



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOC EN UN FPGA BASADO EN EL
ISA DE RISC-V**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

GIANLUCA VINCENZO D'AGOSTINO MATUTE

PROFESOR GUÍA:
Francisco Rivera

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Andrés Caba
Álvaro Silva

SANTIAGO, CHILE
2021

*A las preguntas de nuestra niñez, que se convierten
en el motor de nuestras acciones en el presente.*

El deseo de saber

Agradecimientos

Todos mis agradecimientos a mi familia que ha sido mi apoyo durante toda mi formación académica, por sobre todo a mi mamá que siempre ha sido una voz de consejo y de apoyo fundamental en mi formación profesional y personal. A mi nonno que siempre me inculcó la importancia de la educación y del deseo de hacer lo que realmente quieras con tu vida, que en paz descanse. A mi abuela que ha estado físicamente presente durante todo este periodo tan importante de mi vida, pero que tristemente se ha desvanecido día a día. A mi papá que siempre que lo necesité me ayudó y estuvo para lo que necesitase. A mi profesor guía, quién motivó aún más mi pasión por el diseño de sistemas digitales. A mis compañeros y amigos que siempre estuvieron durante este proceso. A mi ex pareja quién me acompañó e hizo muy feliz durante 4 años de este proceso universitario.

Tabla de Contenidos

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | Introducción | 1 |
| 1.1 | Motivación | 1 |
| 1.2 | Objetivos del trabajo | 2 |
| 2 | Marco teórico y estado del arte | 4 |
| 2.1 | Conceptos elementales | 4 |
| 2.1.1 | Sistemas digitales | 4 |
| 2.1.2 | Arquitectura de computadores | 5 |
| 2.1.3 | Representación binaria en punto flotante | 10 |
| 2.2 | RISC-V | 11 |
| 2.2.1 | Visión general al <i>ISA</i> de <i>RISC-V</i> | 12 |
| 2.2.2 | La Memoria en <i>RISC-V</i> | 13 |
| 2.2.3 | Codificación del largo de instrucciones | 14 |
| 2.2.4 | Excepciones, trampas e interrupciones | 15 |
| 2.2.5 | El <i>ISA</i> base y extensiones implementadas, <i>RV32IMF</i> | 16 |
| 2.2.5.1 | Instrucciones enteras, <i>RV32IM</i> | 19 |
| 2.2.5.2 | Unidad de punto flotante (<i>FPU</i>), <i>RV32F</i> | 22 |
| 2.3 | Revisión del estado del arte | 25 |
| 2.3.1 | <i>A RISC-V Instruction Set Processor-Micro- architecture Design and Analysis</i> | 25 |
| 2.3.2 | <i>Open-Source RISC-V Processor IP Cores for FPGAs – Overview and Evaluation</i> | 29 |
| 2.3.3 | <i>RISC-V based implementation of Programmable Logic Controller on FPGA for Industry 4.0</i> | 30 |
| 2.3.4 | <i>Design and Verification Environment for RISC-V Processor Cores</i> | 31 |
| 2.3.5 | <i>Co-verification design flow for HDL Languages</i> | 31 |
| 2.3.6 | Ejemplo de una implementación real: <i>HiFive Rev B</i> | 32 |
| 2.4 | Tarjeta <i>FPGA</i> y <i>software</i> utilizado | 34 |
| 2.4.1 | <i>Nexys 4</i> | 34 |
| 2.4.2 | <i>Vivado Design Suite de Xilinx</i> | 35 |
| 2.4.3 | <i>RARS 1.5</i> | 36 |
| 3 | Metodología de trabajo | 37 |
| 3.1 | Metodología de diseño <i>Top-Down</i> | 37 |
| 3.2 | Flujo de trabajo | 38 |
| 3.3 | Metodología de verificación | 38 |
| 4 | Diseño propuesto | 40 |
| 4.1 | <i>Instruction Decoder</i> | 42 |
| 4.2 | <i>Register Files</i> | 44 |

| | | |
|---------|---|------------|
| 4.3 | Unidades de memoria | 45 |
| 4.3.1 | <i>Cache Controller</i> | 46 |
| 4.4 | <i>Arithmetic Logic Unit (ALU)</i> | 49 |
| 4.5 | <i>Floating Point Unit (FPU)</i> | 50 |
| 4.5.1 | <i>FP Arithmetic Unit</i> | 54 |
| 4.5.1.1 | <i>FP Arithmetic Unit: ADDER</i> | 62 |
| 4.5.1.2 | <i>FP Arithmetic Unit: MULTIPLIER</i> | 63 |
| 4.5.1.3 | <i>FP Arithmetic Unit: DIVISOR</i> | 64 |
| 4.5.1.4 | <i>FP Arithmetic Unit: significands_divisor</i> | 65 |
| 4.5.1.5 | <i>FP Arithmetic Unit: SQRT</i> | 70 |
| 4.5.1.6 | <i>FP Arithmetic Unit: significand_sqrt</i> | 71 |
| 4.5.1.7 | <i>FP Arithmetic Unit: Exceptions and trivial cases checker</i> | 75 |
| 4.5.1.8 | <i>FP Arithmetic Unit: NORMALIZER</i> | 77 |
| 4.5.1.9 | <i>FP Arithmetic Unit: ROUNDER</i> | 80 |
| 4.5.2 | <i>FP Converter Unit</i> | 80 |
| 4.5.2.1 | <i>FP Converter Unit: exceptions_checker</i> | 84 |
| 4.5.2.2 | <i>FP Converter Unit: fp_to_integer_unit</i> | 86 |
| 4.5.2.3 | <i>FP Converter Unit: Integer rounder</i> | 86 |
| 4.5.2.4 | <i>FP Converter Unit: integer_to_fp_unit</i> | 87 |
| 4.5.2.5 | <i>FP Converter Unit: NORMALIZER</i> | 88 |
| 4.5.2.6 | <i>FP Converter Unit: ROUNDER</i> | 89 |
| 4.6 | <i>Core Complex</i> | 89 |
| 4.6.1 | <i>Single-Cycle Version</i> | 92 |
| 4.6.2 | <i>Pipelined Version</i> | 99 |
| 4.7 | <i>System on a Chip</i> | 108 |
| 4.7.1 | <i>debounce</i> | 114 |
| 5 | Verificación, pruebas e implementación final | 115 |
| 5.1 | Etapa de verificación | 115 |
| 5.1.1 | <i>memory</i> | 115 |
| 5.1.2 | <i>ALU</i> | 117 |
| 5.1.3 | <i>fp_converter</i> | 119 |
| 5.1.4 | <i>fp_arithmetic_unit</i> | 123 |
| 5.1.5 | <i>FPU</i> | 127 |
| 5.1.6 | <i>riscv32imf_top</i> | 127 |
| 5.1.7 | <i>TOP</i> | 131 |
| 5.2 | Pruebas en <i>hardware</i> | 132 |
| 5.2.1 | <i>fibonacci_inputs.s</i> | 132 |
| 5.2.2 | <i>operating_fp.s</i> | 134 |
| 5.3 | Detalles de la implementación | 137 |
| 6 | Conclusiones | 140 |
| | Bibliografía | 142 |
| 1 | ANEXO: Código fuente del <i>SoC</i> | 145 |
| 2 | ANEXO: <i>Test Benches</i> | 226 |
| 3 | ANEXO: Códigos generadores de <i>Test Benches</i> | 240 |
| 4 | ANEXO: Códigos <i>Assembler</i> | 258 |
| 4.1 | <i>Script</i> conversor de palabras | 265 |

Índice de Tablas

| | | |
|-------|--|----|
| 2.1. | Representación binaria en punto flotante para un número X . Fuente: [13]. | 10 |
| 2.2. | Casos especiales para la representación en punto flotante de precisión simple según la <i>IEEE 754</i> . Fuente: [13] | 10 |
| 2.3. | Bits de redondeo. Fuente: [12] | 11 |
| 2.4. | Características de las <i>trampas</i> . Notas: 1) El termino puede ser solicitado, 2) Trampas fatales imprecisas pueden ser observadas por <i>software</i> . Fuente: [8]. | 16 |
| 2.5. | Codificación de los distintos tipos de instrucciones consideradas. Fuente: [8]. | 19 |
| 2.6. | Instrucciones implementadas de <i>RV32I</i> . Fuente: [8]. | 20 |
| 2.7. | Instrucciones implementadas de <i>RV32M</i> . Fuente: [8]. | 22 |
| 2.8. | Modos de redondeo (<i>rm</i>) de <i>RV32F</i> . Fuente: [8]. | 23 |
| 2.9. | Instrucciones implementadas de <i>RV32F</i> . Fuente: [8]. | 24 |
| 2.10. | Posibles formatos para <i>fclass.s</i> . Fuente: [8]. | 25 |
| 4.1. | Codificación para <i>format_type</i> según el tipo de la instrucción. | 42 |
| 4.2. | Codificación para <i>sub_format_type</i> según el subtipo de la instrucción. | 43 |
| 4.3. | Codificación para <i>funct7_out</i> según el <i>funct7</i> de la instrucción. | 43 |
| 4.4. | Codificación para <i>reg_access_option</i> según el acceso a registros de la instrucción. <i>I</i> indica acceso a registros enteros y <i>FP</i> a registros flotantes. Nota: <i>rs3</i> siempre es flotante. | 44 |
| 4.5. | Codificación de <i>alu_option</i> para cada tipo de operación de la <i>ALU</i> | 50 |
| 4.6. | Codificación de <i>fpu_option</i> para cada operación de la <i>FPU</i> | 51 |
| 4.7. | Resumen del criterio de redondeo utilizado según el <i>rounding mode (RM)</i> , el bit de signo (<i>sign</i>) y los bits <i>guard (g)</i> , <i>round (r)</i> y <i>sticky (s)</i> . 1 indica que se redondea el resultado (sumar uno a <i>fraction</i>) y 0 que se trunca (no se modifica <i>fraction</i>). Nota: <i>lsb=fraction[0]</i> | 54 |
| 4.8. | Codificación de la entrada <i>op</i> del módulo <i>fp_arithmetic_unit</i> | 54 |
| 4.9. | Codificación de la salida <i>status</i> del módulo <i>fp_arithmetic_unit</i> | 55 |
| 4.10. | <i>Lookup-Table</i> propuesto por [27]. | 73 |
| 4.11. | Codificación de la salida <i>sel_out</i> del módulo <i>excep_triv_checker</i> y del <i>FSM</i> del módulo <i>fp_arithmetic_unit</i> (ver figura 4.9). | 75 |
| 4.12. | Codificación de la salida <i>status</i> del módulo <i>NORMALIZER</i> | 77 |
| 4.13. | Codificación de la salida <i>exit_status</i> del <i>core complex</i> . Nota: <i>program/error</i> ocurren cuando se trata de acceder a una dirección de memoria fuera del rango de memoria de la <i>BRAM</i> . Además, solo en el caso <i>Single-Cycle</i> las instrucciones no válidas generan <i>program error</i> , mientras que en el caso <i>Pipelined</i> estas se tratan como <i>nops</i> | 91 |

- 4.14. Cuando solo se menciona un color quiere decir que ambos *LEDs* tricolor tienen el mismo color, en caso contrario el *LED* derecho se corresponde con el color de la derecha y el izquierdo con el color de la izquierda. Cuando ocurre un *get** solo uno de los *LEDs* se enciende, según la mitad de la palabra que se esté ingresando.

109

Índice de Ilustraciones

| | | |
|-------|---|----|
| 2.1. | Ejemplo de <i>datapath single-cycle</i> . Fuente: [12]. | 6 |
| 2.2. | Ejemplo de <i>datapath pipelined</i> . Fuente: [12]. | 7 |
| 2.3. | <i>Endianness</i> | 8 |
| 2.4. | Codificación de longitud de instrucción <i>RISC-V</i> . Solo las codificaciones de 16 bits y 32 bits se consideran “congeladas” en este momento. Fuente: [8]. | 15 |
| 2.5. | <i>Register Files</i> para <i>RV32I unprivileged</i> . Fuente: [8]. | 17 |
| 2.6. | <i>Register Files</i> para <i>RV32F unprivileged</i> . Fuente: [8]. | 18 |
| 2.7. | Arquitectura de nivel superior del procesador <i>RISC-V</i> . Fuente: [15]. | 26 |
| 2.8. | microarquitectura de la <i>fetch unit</i> . Fuente: [15]. | 27 |
| 2.9. | Diagrama de flujo del decodificador de instrucciones. Fuente: [15]. | 27 |
| 2.10. | Microarquitectura del decodificador de instrucciones. Fuente: [15]. | 28 |
| 2.11. | Organización del <i>Register File</i> . Fuente: [15]. | 28 |
| 2.12. | Número de menciones en las publicaciones de diferentes <i>CPU IP cores</i> . Fuente: [16]. | 30 |
| 2.13. | La estructura de la arquitectura PLC propuesta. Fuente: [17]. | 31 |
| 2.14. | Proceso de desarrollo típico. Fuente: [19]. | 32 |
| 2.15. | Proceso de desarrollo de co-verificación. Fuente: [19]. | 32 |
| 2.16. | Tarjeta <i>HiFive1 Rev B</i> . Fuente: [20]. | 32 |
| 2.17. | <i>Pinout</i> de la tarjeta <i>HiFive1 Rev B</i> . Fuente: [20]. | 33 |
| 2.18. | Diagrama de bloques de nivel superior del chip <i>Sifive FE310-G002</i> . Fuente: [21]. | 33 |
| 2.19. | Tarjeta utilizada, la <i>Nexys 4</i> . Fuente: [23]. | 35 |
| 3.1. | Enfoque Diseño Contemporáneo (<i>Top-Down</i>). Fuente: [10]. | 37 |
| 4.1. | Diagrama de bloques de nivel superior propuesto en primera instancia para el <i>SoC</i> | 40 |
| 4.2. | Diagrama de bloques simplificado <i>core complex pipelined</i> | 41 |
| 4.3. | Diagrama de bloques de nivel superior (simplificado) propuesta final para el <i>SoC</i> | 41 |
| 4.4. | Diagrama de bloques detallados del <i>Register Files</i> | 44 |
| 4.5. | Diagrama de bloques de la memoria cache implementada. Fuente: [12]. | 47 |
| 4.6. | <i>FSM</i> del <i>Cache Controller</i> implementado. Fuente: [12]. | 48 |
| 4.7. | Diagrama <i>MDS</i> del <i>FSM</i> de la <i>FPU</i> | 52 |
| 4.8. | Diagrama de flujo simplificado del módulo <i>fp_arithmetic_unit</i> | 56 |
| 4.9. | Diagrama de bloques detallado del módulo <i>fp_arithmetic_unit</i> | 57 |
| 4.10. | Diagrama de flujo detallado del módulo <i>fp_arithmetic_unit</i> | 60 |
| 4.11. | Diagrama <i>MDS</i> del módulo <i>fp_arithmetic_unit</i> | 61 |
| 4.12. | Diagrama de flujo simplificado del submódulo <i>ADDER</i> | 62 |
| 4.13. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>ADDER</i> | 63 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.14. | Diagrama de flujo simplificado del submódulo <i>MULTIPLIER</i> | 64 |
| 4.15. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>MULTIPLIER</i> | 64 |
| 4.16. | Diagrama de flujo simplificado del submódulo <i>DIVISOR</i> | 65 |
| 4.17. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>DIVISOR</i> | 65 |
| 4.18. | Diagrama de flujo simplificado del submódulo <i>significands_divisor</i> | 66 |
| 4.19. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>significands_divisor</i> | 67 |
| 4.20. | Diagrama de flujo detallado del submódulo <i>significands_divisor</i> | 68 |
| 4.21. | Diagrama <i>MDS</i> del submódulo <i>significands_divisor</i> | 69 |
| 4.22. | Diagrama de flujo simplificado del submódulo <i>SQRT</i> | 70 |
| 4.23. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>SQRT</i> | 71 |
| 4.24. | Diagrama de flujo simplificado del submódulo <i>significand_sqrt</i> | 72 |
| 4.25. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>significand_sqrt</i> | 73 |
| 4.26. | Diagrama de flujo detallado del submódulo <i>significand_sqrt</i> | 74 |
| 4.27. | Diagrama <i>MDS</i> del submódulo <i>significand_sqrt</i> | 74 |
| 4.28. | Diagrama de flujo del submódulo <i>excep_triv_checker</i> | 76 |
| 4.29. | Diagrama de flujo simplificado del submódulo <i>NORMALIZER</i> | 77 |
| 4.30. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>NORMALIZER</i> | 78 |
| 4.31. | Diagrama de flujo detallado del submódulo <i>NORMALIZER</i> | 79 |
| 4.32. | Diagrama <i>MDS</i> del submódulo <i>NORMALIZER</i> | 79 |
| 4.33. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>ROUNDER</i> | 80 |
| 4.34. | Diagramas de flujo simplificado del módulo <i>fp_converter</i> | 81 |
| 4.35. | Diagrama de bloques detallado del módulo <i>fp_converter</i> | 82 |
| 4.36. | Diagrama <i>MDS</i> del módulo <i>fp_converter</i> | 83 |
| 4.37. | Diagrama de flujo del submódulo <i>converter_exceptions_checker</i> del módulo <i>fp_converter</i> | 85 |
| 4.38. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>fp_to_integer_unit</i> del módulo <i>fp_converter</i> | 86 |
| 4.39. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>integer_to_fp_unit</i> del módulo <i>fp_converter</i> | 87 |
| 4.40. | Diagrama de bloques detallado del submódulo <i>normalizer_integer2fp</i> del módulo <i>fp_converter</i> | 88 |
| 4.41. | Diagrama <i>MDS</i> del submódulo <i>normalizer_integer2fp</i> del módulo <i>fp_converter</i> | 88 |
| 4.42. | Diagrama de flujo simplificado para el <i>core complex Single-Cycle</i> | 92 |
| 4.43. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Single-Cycle</i> parte 1. . . | 93 |
| 4.44. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Single-Cycle</i> parte 2. . . | 94 |
| 4.45. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Single-Cycle</i> parte 3. . . | 95 |
| 4.46. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Single-Cycle</i> parte 4. . . | 96 |
| 4.47. | Diagrama <i>MDS</i> para el <i>core complex Single-Cycle</i> | 98 |
| 4.48. | Diagrama de flujo simplificado para el <i>core complex Pipelined</i> | 99 |
| 4.49. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Pipelined</i> parte 1. . . . | 100 |
| 4.50. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Pipelined</i> parte 2. . . . | 101 |
| 4.51. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Pipelined</i> parte 3. . . . | 102 |
| 4.52. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Pipelined</i> parte 4. . . . | 103 |
| 4.53. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Pipelined</i> parte 5. . . . | 104 |
| 4.54. | Diagrama de bloques detallado para el <i>core complex Pipelined</i> parte 6. . . . | 105 |
| 4.55. | Diagrama <i>MDS</i> para el <i>core complex Pipelined</i> | 108 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 4.56. | Diagrama de flujo simplificado para el <i>SoC</i> | 110 |
| 4.57. | Diagrama de bloques detallado para el <i>SoC</i> | 111 |
| 4.58. | Diagrama <i>MDS</i> para el <i>SoC</i> | 112 |
| 4.59. | Diagrama <i>MDS</i> para el <i>debounce</i> | 114 |
| 5.1. | Resultados de tb_memory.sv parte 1. | 116 |
| 5.2. | Resultados de tb_memory.sv parte 2. | 117 |
| 5.3. | Resultados de tb_ALU.sv | 118 |
| 5.4. | Resultados de tb_fp_converter.sv parte 1. | 120 |
| 5.5. | Resultados de tb_fp_converter.sv parte 2. | 121 |
| 5.6. | Resultados de tb_fp_converter.sv parte 3. | 122 |
| 5.7. | Resultados de tb_fp_arithmetic_unit.sv parte 1. | 124 |
| 5.8. | Resultados de tb_fp_arithmetic_unit.sv parte 2. | 125 |
| 5.9. | Resultados de tb_fp_arithmetic_unit.sv parte 3. | 126 |
| 5.10. | Resultados de tb_fp_arithmetic_unit.sv parte 4. | 127 |
| 5.11. | Ejemplo del resultados obtenido al ejecutar tb_FPU.sv | 127 |
| 5.12. | Estado final de los registros para la simulación de testing_code_imf.s en <i>RARS</i> | 128 |
| 5.13. | Estado final de los registros para la simulación de testing_code_imf.s en <i>Vivado</i> . Captura de <i>registers.mem</i> | 129 |
| 5.14. | Memoria de datos resultante para la simulación de testing_code_imf.s en <i>RARS</i> | 130 |
| 5.15. | Memoria de datos resultante para la simulación de testing_code_imf.s en <i>Vivado</i> . Captura de <i>data_out.mem</i> | 130 |
| 5.16. | Resultado obtenido en la consola de <i>Vivado</i> al ejecutar tb_riscv32imf_top.sv | 130 |
| 5.17. | Resultado de <i>fibonacci_simple.s</i> en <i>RARS</i> | 131 |
| 5.18. | Resultado de <i>fibonacci_simple.s</i> para la señal <i>info_out[31:0]</i> al ejecutar <i>tb_TOP.sv</i> en <i>Vivado</i> | 131 |
| 5.19. | Resultado de <i>fibonacci_simple.s</i> en la consola de <i>Vivado</i> al ejecutar <i>tb_TOP.sv</i> | 131 |
| 5.20. | Resultado de <i>fibonacci_inputs.s</i> en <i>RARS</i> | 132 |
| 5.21. | Resultado de <i>fibonacci_inputs.s</i> en la <i>Nexys 4</i> | 133 |
| 5.22. | Resultado de <i>operating_fp.s</i> en <i>RARS</i> | 134 |
| 5.23. | Estado final de los registros de punto flotante para la simulación de operating_fp.s en <i>RARS</i> | 135 |
| 5.24. | Representación binaria para las entradas 5.7 y 91.26 del programa <i>operating_fp.s</i> . Fuente: https://www.h-schmidt.net/FloatConverter/IEEE754.html | 135 |
| 5.25. | Resultado de <i>operating_fp.s</i> en la <i>Nexys 4</i> | 136 |
| 5.26. | Resumen de los recursos de <i>hardware</i> utilizados, <i>post-synthesis</i> y <i>post-implementation</i> , de la tarjeta <i>FPGA Nexys 4</i> en la implementación. | 138 |
| 5.27. | Resumen del consumo de energía de la implementación realizada. | 138 |
| 5.28. | Resumen del reloj implementado. | 139 |
| 5.29. | Resumen de las características del <i>timing</i> del diseño implementado. | 139 |

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO
POR: GIANLUCA VINCENZO D'AGOSTINO MATUTE
FECHA: 2021
PROF. GUÍA: FRANCISCO RIVERA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOC EN UN FPGA BASADO EN EL ISA DE RISC-V

En este trabajo de título se presenta el problema de desarrollo, diseño e implementación de un *System on a Chip* utilizando el juego de instrucciones libre de *RISC-V*, el cual se espera que tenga un gran impacto en el desarrollo tecnológico a nivel mundial, al facilitar el diseño de dispositivos digitales a nuevas empresas por no requerir el pago de licencias de uso, ser altamente escalable y de diseño modular. El *System on a Chip* se implementa en una tarjeta *FPGA* y dispone del juego de instrucciones base de 32 bits, las extensiones de multiplicación/división y de punto flotante de precisión simple de *RISC-V*. Además, el diseño obtenido tiene una orientación pedagógica, es decir que, tiene una función ilustrativa para que futuros estudiantes de diseño digital aprendan sobre el diseño e implementación de sistemas/arquitecturas digitales sobre un *FPGA*. Para el desarrollo, implementación y pruebas se utiliza *System Verilog* junto al *software Vivado* y para la etapa de verificación se utiliza *RARS*, un simulador de *RISC-V*, y la generación de *test benches* con números pseudoaleatorios.

1 Introducción

En este trabajo de título se presenta el proceso de investigación, diseño e implementación de un *System on a Chip (SoC)*. Para ello se realiza la investigación bibliográfica pertinente, el desarrollo de todos los diseños y simulaciones de los sistemas digitales que conforman el *SoC* obtenido. Finalmente se realiza la integración/síntesis final de todos los componentes en una tarjeta *FPGA*, obteniéndose un *SoC* bastante simple, pero, completamente funcional para fines pedagógicos.

Este trabajo y el *SoC* obtenido están pensados para que futuros estudiantes del área se puedan familiarizar con el proceso de diseño, la metodología de desarrollo y el prototipado de sistemas digitales complejos sobre una tarjeta *FPGA*. Por otro lado, se busca explorar las posibilidades del uso de un conjunto de instrucciones (*ISA*) libre como *RISC-V*, el cual ha ganado gran relevancia recientemente.

A continuación, se presenta la motivación del trabajo realizado y los objetivos planteados, para continuar con el marco teórico y la investigación del estado del arte, la metodología de trabajo empleada, los diseños digitales obtenidos, las pruebas realizadas e implementación obtenida y, finalmente, se presentan las conclusiones.

1.1 Motivación

En el mundo actual, cada vez más informatizado y conectado, el número de dispositivos electrónicos digitales ha crecido exponencialmente, en concordancia por lo predicho según la ley de Moore [1], la cual indica/incita el ritmo exponencial en el desarrollo de circuitos integrados (*IC*). Lo anterior, trae como consecuencia la aparición de un mayor número de dispositivos pequeños y de bajo consumo con el deber de realizar tareas simples de forma rápida y eficiente. Este fenómeno es potenciado con la implementación a nivel mundial del *Internet of things (IoT)*, como se indica en [2], los sistemas *IoT* tienen un mercado en crecimiento y la complejidad de dichos sistemas, la cual es soportada a base de *SoCs* para diferentes elementos, también ha aumentado.

Para satisfacer esta necesidad, de dispositivos pequeños y de bajo consumo con tareas específicas, la solución es el desarrollo e implementación de un *SoC* que cumpla la tarea deseada [3]. Un *SoC* es, básicamente, un sistema digital basado en un único chip en el cual se integran todos los componentes necesarios, digitales y/o analógicos, para el correcto funcionamiento de dicho sistema.

Según [1], a comienzos del nuevo milenio se redefine la Ley de Moore, debido a que ya no se logra disminuir de forma considerable el tamaño de los transistores de un chip, esto provoca el desarrollo de nuevas arquitecturas en sistemas digitales, basados en *multi-cores*, diseños *3-D*, etc... Bajo este contexto, en la última década, se vuelven comunes los procesadores de filosofía *RISC* (*Reduced Instruction Set Computer*).

Los procesadores *RISC* se diferencian de los procesadores *CISC* (*Complex Instruction Set Computer*), debido a que su *ISA* (*Instruction Set Architecture*) solo se compone de instrucciones, comparativamente, simples, por lo que la complejidad de la arquitectura para

soportar dicho juego de instrucciones es menor, logrando mayores velocidades y un mejor consumo energético [4]. La relevancia de los procesadores *RISC* es tal que permite el auge de los *Smartphones* y el de múltiples dispositivos de bajo consumo y de tareas específicas, es decir, son la base de muchos *SoCs* hoy en día.

Actualmente, un procesador, más bien un *ISA*, de este tipo que despierta el interés, incluso de grandes empresas como *Nvidia* y *Western Digital Corp*, es el *RISC-V* [5]. Lo que hace interesante a este *ISA*, es su naturaleza de *Hardware Libre*, lo cual quiere decir que puede ser utilizado por cualquiera, sin necesidad de pagar derechos o licencias de uso, lo que genera un gran impacto en la industria al facilitar que una empresa pueda desarrollar su propia tecnología basada en este *ISA* de forma libre [5].

Lo anterior deja en claro la importancia de *RISC-V* y de los *SoCs* en la industria. Esto hace interesante, en el ambiente académico y de desarrollo tecnológico, el perfeccionamiento de diseños, prototipado e implementación de este tipo de sistemas. Por ello, el objetivo de este trabajo de memoria de título tiene un enfoque pedagógico al centrarse en el cómo se desarrolla un *SoC* y la metodología empleada para abordar el diseño de un sistema digital complejo.

En la implementación y realización de pruebas del *SoC*, hace falta una plataforma de prototipado. Para esto se emplea una tarjeta basada en un chip *FPGA* (*Field Programmable Gate Arrays*), tecnología con más de 30 años de desarrollo y de gran utilidad para el diseño, prueba, desarrollo e incluso implementación final de sistemas digitales [6]. Además, como se expone en [7], esta tecnología puede tener un gran impacto en la implementación del 5G y en el *IoT* en un futuro cercano, por lo que es interesante aprovechar las capacidades y versatilidad de este tipo de dispositivos.

1.2 Objetivos del trabajo

El objetivo de este proyecto es el diseño, implementación y prueba de un *SoC*, con fines pedagógicos, en una tarjeta *FPGA*, utilizando el *ISA* libre de *RISC-V*. Como requisito mínimo se implementa el módulo base de instrucciones enteras, *RV32I*, junto a sus extensiones *M*, multiplicación y división de enteros, y *F*, el co-procesador para el cálculo de punto flotante de precisión simple [8].

Para resolver el problema planteado, se debe proponer un diseño para el *core* del *SoC*, basado en los módulos de *RISC-V* ya mencionados, *RV32IMF*. Luego se define el entorno de ejecución para dicho *core*, este entorno define el comportamiento que tendrá un programa escrito en *RISC-V*, además de manejar los múltiples *cores* y *threads* disponibles en implementaciones más avanzadas. Debido al esfuerzo que conlleva el diseño de un *core* que soporta *RV32IMF*, el entorno de ejecución implementado es bastante simple.

Dicho entorno se limita a una interacción básica con el usuario mediante pulsadores e interruptores como entradas al sistema, y *displays* de 7 segmentos y LEDs como salidas. Lo que permite ingresar y visualizar enteros o números flotantes (ambos de 32 bits) en representación binaria y hexadecimal respectivamente. Esto que quiere decir que dicho entorno, o *execution environment*, es de tipo "*Bare metal*" o, en otras palabras, una implementación

simple y directa en *hardware* [8].

Con lo anterior, solo se cubre la parte de diseño, pero también hace falta testear su funcionamiento, para ello se realizan simulaciones del *core* obtenido y de distintos sub-módulos del mismo, *FPU* y *ALU*, y del *SoC* completo. Una vez realizadas estas simulaciones se sintetiza el *SoC* en un *FPGA* para corroborar su correcto funcionamiento. Esto se explica con mayores detalles en la secciones 3 y 5.

De lo anterior se desprenden los siguientes objetivos específicos:

1. Implementar y diseñar la arquitectura de un *CPU-core* basada en el conjunto de instrucciones libre de *RISC-V*.
 - Incluyendo los módulos *RV32I*, *RV32M* y *RV32F* de *RISC-V*.
 - Analizar y comprender las posibilidades que ofrece un *ISA* libre como el de *RISC-V*.
2. Asociado al punto anterior, está el diseño e implementación del *hardware* necesario para el correcto funcionamiento del *SoC* y del entorno de ejecución.
3. Poner en práctica la metodología de diseño *Top-Down* en el desarrollo de sistemas digitales.
4. Utilizar una placa *FPGA* como plataforma de prototipado y para la implementación final.
5. Dominio y uso de *HDL (Hardware Description Language)*, el cuál se utiliza para sintetizar todos los diseños digitales realizados sobre el *FPGA* y para realizar las simulaciones.
6. Diseño de pruebas de funcionamiento de los diseños obtenidos, previo a la implementación en *hardware* sobre el *FPGA*.
7. Obtener un *SoC* y corroborar su correcto funcionamiento.
8. Finalmente, comentar sobre cómo se aborda un trabajo de este tipo, las complicaciones relacionadas y las mejoras propuestas para el *SoC* obtenido.

A continuación, en las sección 2, se presentan los antecedentes teóricos y prácticos pertinentes al problema estudiado y el estado del arte sobre este tema.

2 Marco teórico y estado del arte

En esta sección se presentan los fundamentos teóricos básicos para abordar el problema, junto a una investigación que abarca desde la documentación necesaria para la implementación del *CPU-core* y del resto del *hardware*, hasta los entornos y tarjetas de desarrollo necesarias para el proyecto. Además, se revisa el trabajo de otros autores y el estado del arte como punto de referencia/partida para la realización de la metodología de trabajo y de diseño, de la implementación y de las pruebas de funcionamiento; temas que se explican en las secciones 3, 4 y 5.

2.1 Conceptos elementales

Para entender este proyecto se deben manejar conceptos básicos de sistemas digitales y arquitectura de computadores, puesto que un *SoC* es, básicamente, un sistema computacional completo, tal vez más o menos complejo, que cuenta con todos componentes básicos: *CPU* (*central processing unit*), sistemas de memoria, conjuntos de instrucciones (*ISA*), *hardware* controlador y controlado, *software* que controla las tareas del dispositivo, lógica binaria, entorno de ejecución, dispositivos de entrada/salida (E/S), etc... Por esto, es importante dar ciertas nociones fundamentales.

2.1.1 Sistemas digitales

Un sistema digital es un dispositivo electrónico que utiliza lógica binaria, junto al álgebra booleana, para ejecutar tareas, estas pueden ser algoritmos complejos o muy simples, controlar algún sistema o entregar resultados matemáticos, prácticamente cualquier función que pueda realizar una máquina puede ser controlada mediante un sistema digital. Estos pueden ser tan complejos como un supercomputador, hasta tan simples como indicar la hora. Por lo mismo, hay una gran variedad de diseños digitales, según lo estudiado en los cursos [9] y [10] estos pueden ser:

1. **Combinacionales o secuenciales**, la diferencia radica en que el último es controlado por un reloj (*clock*) y posee elementos de memoria. Mientras que los circuitos combinacionales simplemente responden a las señales que reciben (sus salidas dependen solo de las entradas) sin estar controlados por un reloj. Es importante destacar que los circuitos combinacionales forman parte de los secuenciales.

- En un sistema secuencial hay que considerar el *setup time* y el *hold time* del reloj para el correcto desempeño del mismo: el primero corresponde al tiempo mínimo que las entradas/memoria del sistema deben ser estables antes de que se active el canto del reloj y el segundo al tiempo mínimo que deben estar estables después de que dicho canto se active

2. Una **máquina de estados** (*Finite-state machine* o **FSM**), esta puede ser de *Moore*, donde las salidas solo dependen únicamente del estado actual, o de *Mealy*, donde también dependen de las entradas. Una maquina de estados es *secuencial*.
3. Ser de propósito general, como un microcontrolador, o específico, como un transceptor WiFi.

4. Implementados en un único chip (*SoC*), en conjunto con múltiples circuitos integrados o, incluso, solo con transistores (casos muy simples).
5. Basados en una arquitectura de computador o no. Es decir que un sistema digital no debe contar necesariamente con un *CPU-core*.

Por otro lado, es importante destacar los siguientes aspectos de los sistemas digitales:

1. Estos sistemas manejan la información que se reciben del mundo real de forma digital, es decir, en forma de unos y ceros. Por lo que cualquier información continua pasa a ser discreta.
2. Están compuestas por compuertas lógicas (AND, NAND, OR, XOR, NOR, NOT, etc...), estas a su vez se componen de transistores dispuestos físicamente de tal forma que al entrar/recibir cierto nivel de voltaje, alto o bajo, en su(s) entrada(s), se retorna el correspondiente nivel de voltaje, según la lógica de la(s) compuerta(s), en la(s) salida(s).
3. Dependen de la tecnología en la que se implementan los transistores/compuertas (CMOS, TTL, n-MOS, p-MOS, etc...) y/o la decisión del diseñador, si para el sistema el nivel de voltaje alto corresponde al uno lógico y el bajo al cero lógico o viceversa.
4. Para el diseño de sistemas digitales se recurren a mayores niveles de abstracción, trabajando con compuertas y módulos típicos en la implementación de estos (MUX, DECODER, ENCODER, ALU, etc...) y no a nivel de transistor propiamente tal, se realiza un diseño a nivel de bloques funcionales.

2.1.2 Arquitectura de computadores

Un computador es un sistema digital muy complejo, puesto que es un dispositivo de propósito general, programable y que debe interactuar con el usuario, ojalá de forma amigable. Según lo estudiado en el curso [11], el cual a su vez se basa en el libro [12], este tipo de sistemas se componen de los siguientes elementos:

1. **La *CPU*:** Se encarga de procesar toda la información del sistema.
 - La arquitectura de la *CPU* se construye a partir de un conjunto de instrucciones (*ISA*), las cuales el procesador deberá ser capaz de leer y ejecutar. Dichas instrucciones se codifican en binario y se almacenan en memoria.
 - El *datapath* de una *CPU* es una colección de unidades funcionales (como unidades lógicas aritméticas, multiplicadores, muxes, decoders, etc...) que realizan operaciones de procesamiento de datos, acceso a registros temporales y manejo de buses de datos. Una unidad de control está encargada de manejar el *datapath*. El *datapath* se compone de diferentes etapas de ejecución de la instrucción, siendo las siguientes 5 etapas las más típicas:
 - **Fetch:** Etapa en la que se busca la instrucción en la memoria.
 - **Decode:** Etapa en la que se decodifica la instrucción y lee los registros involucrados en la misma.
 - **Execute:** Etapa en la que se ejecuta la operación aritmética/lógica de la instrucción.

- **Memory:** Etapa en la que se accede a la memoria si la instrucción lo necesita.
- **Write Back:** Etapa en la que se guarda, si corresponde, el resultado de la instrucción en el registro.
- Presentan diferentes filosofías de diseño que repercuten en la complejidad de la arquitectura final de la *CPU*, estas son:
 - **RISC (Reduced instruction set computing):** Basada en un conjunto de instrucciones reducido, menor complejidad. Busca simplificar al máximo el conjunto de instrucciones requeridas.
 - **CISC (Complex instruction set computing):** Basada en un conjunto de instrucciones complejo, mayor complejidad. Busca acercar instrucciones a los lenguajes de alto nivel.
- Pueden ser *Single-Cycle*, *Multi-Cycle* o *Pipelined*:
 - Un procesador *Single-Cycle* (ver figura 2.1) funciona de tal manera que la instrucción “cruza” una sola vez el *datapath* de la *CPU* (es decir en un solo ciclo de reloj), pero requiere una unidad funcional diferente para cada etapa de la ejecución de dicha instrucción.
 - El segundo tipo de procesador, *Multi-Cycle*, presenta un *datapath* simplificado, esto gracias a que las unidades funcionales para cada etapa de la ejecución de la instrucción son la misma dado a que la instrucción se ejecuta en múltiples ciclos de reloj.

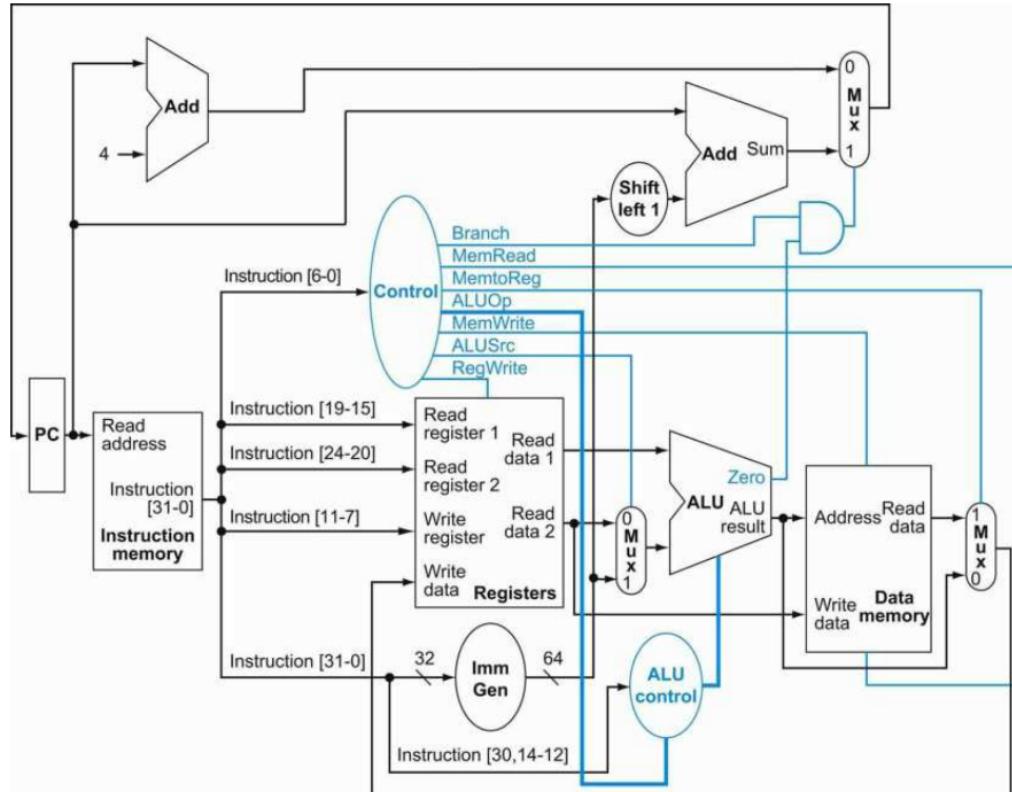


Figura 2.1: Ejemplo de *datapath single-cycle*. Fuente: [12].

- Y el último tipo de procesador, *Pipelined* (ver figura 2.2), es la norma en los procesadores de computadores de mayor rendimiento. Está basado en el diseño del *datapath* de un procesador *Single-Cycle* pero se introducen registros (memorias que almacenan los resultados de la etapa anterior para el siguiente ciclo de reloj) entre cada una de las etapas de ejecución de la instrucción, de esta forma se ejecutan de forma paralela más de una instrucción a la vez (en el mismo ciclo de reloj), esto gracias a que se utilizan todas las unidades funcionales del *datapath* en cada ciclo de reloj pero por diferentes instrucciones. Con este diseño es imposible tener una instrucción ejecutada en un solo ciclo de reloj, como pasa en el *Single-Cycle*, pero permite elevar la frecuencia de funcionamiento, obteniendo un mayor rendimiento del sistema en comparación a la versión *Single-Cycle*, donde el periodo de reloj queda definido por el *datapath* completo, mientras que en el caso *Pipelined* queda definido por la unidad funcional (*Fetch*, *Decode*, *Execute*, *Memory* o *Write Back*) más lenta. En este tipo de arquitecturas suelen ocurrir dependencias de datos entre las etapas (*Data Hazard*) y fallas en la predicción de la siguiente instrucción cuando ocurre alguna bifurcación (*Control Hazard*).

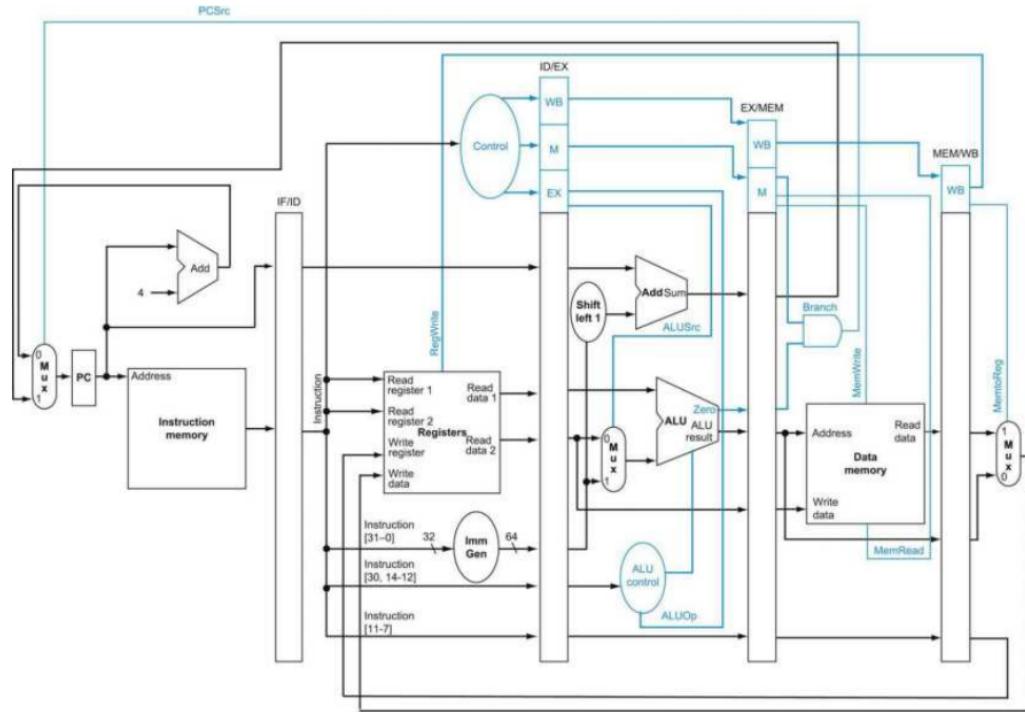


Figura 2.2: Ejemplo de *datapath pipelined*. Fuente: [12].

- Actualmente, debido a que cada vez es más difícil aumentar el rendimiento de un procesador se han desarrollado arquitecturas *multi-core* con *multiple issue* (paralelismo a nivel de instrucción, no confundir con *pipelined*), los cuales ejecutan múltiples instrucciones en el mismo ciclo de reloj y *core*, entre muchas otras.
- Según la forma en que direcciona la memoria se clasifican entre *Big-endian* y *Little-endian*, la diferencia radica en a que byte, más (*MSB*) o menos (*LSB*) significativo respectivamente, se direcciona. Esto se aprecia claramente en la figura 2.3.

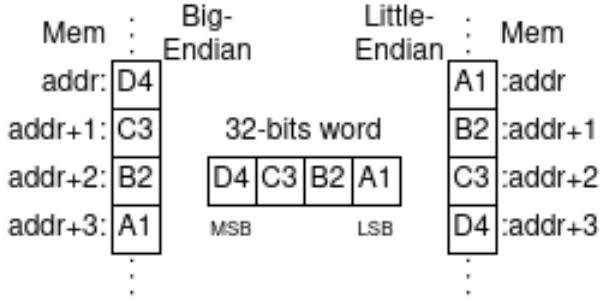


Figura 2.3: *Endianness*.

- Existen dos subdivisiones según cómo se comunica el procesador con la memoria de datos e instrucciones, estas son:

- *Von Neumann*: donde la memoria de datos e instrucciones es la misma o, visto desde otro ángulo, se acceden mediante el mismo bus de datos. Por esto, solo permite leer una instrucción o un dato en memoria a la vez, no permite realizar ambas operaciones al momento.

- *Harvard*: en este caso la memoria de datos e instrucciones se encuentran separadas o, en otras palabras, el procesador puede acceder mediante buses distintos a la memoria de programa/instrucciones y a la de datos, lo que permite un acceso simultáneo. Nótese que no es necesario diseñar de forma completamente aislada las memorias, basta con añadir dos puertos de lectura.

2. **Sistema de memoria:** La memoria se encarga de almacenar la información con la que trabaja todo el sistema, ya sean datos y/o instrucciones. La memoria generalmente se jerarquiza, debido a que los dispositivos de almacenamiento suelen ser más lentos que la *CPU*, por lo que se almacena la información con la que se está trabajando en el momento en una memoria más rápida. Siendo la más rápida la memoria caché integrada en la *CPU* misma. Esto se debe a que las memorias veloces son muy costosas de implementar, por ello también suelen ser más pequeñas (como la memoria caché), mientras que las memorias RAM ya son más económicas de implementar y cuentan con mayor capacidad de almacenamiento, después un disco duro mecánico ya es bastante más económico por GB de almacenamiento pero es el más lento de todos; es decir que a mayor almacenamiento se suele perder velocidad de acceso, por ello, este apartado suele ser un limitante en el rendimiento de un sistema computacional.

3. **Dispositivos de entrada/salida (E/S):** Estos son el medio por el cual el sistema recibe información e interactúa con el mundo real.

- Ejemplos de entradas: teclado, ratón, pantalla táctil, sensores, dispositivos de almacenamiento, etc...
- Ejemplos de salidas: la imagen en un monitor (generalmente se requiere de un co-procesador gráfico para esta tarea), actuadores, dispositivos de almacenamiento, altavoces, etc...

4. • **Entorno de ejecución:** O *Execution Environment* [8], es el encargado de que cada uno de los *harts* (hilo de ejecución a nivel de *hardware*, no de *software*, como lo son los *threads*) ejecuten las instrucciones que se le asignan (*forward progress*), si un *hart* no

está ejecutando ninguna tarea entra en un modo de espera por algún evento y el entorno de ejecución no se debe preocupar de este hasta que le asigne alguna tarea nueva al *hart* (el entorno suspende su responsabilidad). La responsabilidad del entorno de ejecución para con el *hart* finaliza cuando este último termina su ejecución.

- Es interesante notar la diferencia entre un *thread* y un *hart*, los primeros son ejecutados por un *software* el cual se encuentra dentro de un entorno de ejecución mientras que los *harts* son manejados por dicho entorno. Por lo tanto, un *thread* no decide como administra los recursos del sistema, si no que le pide al entorno de ejecución que administre el uso de los *harts* disponibles. Nótese que un *core* puede tener más de un *hart*.

- Por otro lado, el estado inicial de un programa, el número y tipos de *harts* disponibles y sus privilegios dentro de sistema quedan definidos por el *Execution Environment Interface (EEI)*, el cual también define la accesibilidad y los atributos de la memoria, las regiones de E/S, el comportamiento de todas las instrucciones legales ejecutadas en cada *hart* (el *ISA* es un componente de la *EEI*), y el manejo de cualquier interrupción o excepción que surja durante la ejecución, incluidas las llamadas al entorno. La implementación del *EEI* puede ser puramente *software*, *hardware* o una mezcla de ambas, a continuación, se presentan algunos ejemplos:

- Puramente *hardware (Bare Metal)*, el/los *hart/s* están directamente implementados en hilos de procesamiento físico y sus instrucciones tienen acceso completo al espacio físico de direcciones de memoria. Esta plataforma define un entorno de ejecución al encenderse.

- Sistemas operativos que proporcionan múltiples entornos de ejecución a nivel de usuario mediante la multiplexación de *harts* a nivel de usuario en subprocesos en cada uno de los procesadores físicos disponibles y controlando el acceso a la memoria a través de la memoria virtual.

- *Hypervisors* los cuales brindan múltiples entornos de ejecución a nivel de supervisor para sistemas operativos invitados.

- Emuladores.

Por otro lado, el desempeño de un procesador se puede resumir como “el tiempo que tarda en ejecutar algún programa en particular”. Por ello, se define el *Performance* de un procesador como $Performance = 1/CPUtime$, se puede decir que un procesador *X* es *n* veces más rápido que *Y* en ejecutar dicho programa si:

$$\frac{Performance_X}{Performance_Y} = \frac{CPUtime_Y}{CPUtime_X} = n \quad (2.1)$$

Donde se define el tiempo de CPU como:

$$CPUtime = totalClockCycles * clockPeriod = \frac{totalClockCycles}{clockFrequency} \quad (2.2)$$

Considerando:

$$totalClockCycles = \frac{ClockCycles}{instruction} * \frac{instructions}{program} \quad (2.3)$$

Definiendo *CPI* (*cycles per instruction*) como:

$$CPI = \frac{ClockCycles}{instruction} \quad (2.4)$$

Se obtiene:

$$CPUtime = \frac{instructions}{program} * \frac{CPI}{clockFrequency} \quad (2.5)$$

Es importante destacar que el *CPI* no es el mismo para todos los tipos de instrucciones, pero por simplicidad se asume lo contrario en las ecuaciones recién expuestas.

2.1.3 Representación binaria en punto flotante

En esta sección se presenta la notación binaria para números punto flotante de precisión simple, la cual está definida por la *IEEE 754* [13]. Esta representación utiliza 32 bits y se compone de 3 campos, *sign* (1 bit), *exponent* (8 bits) y *fraction* (23 bits), tal como se puede ver en tabla 2.1.

| | | | | |
|------|----------|----------|----|---|
| 31 | 30 | 23 | 22 | 0 |
| sign | exponent | fraction | | X |

Tabla 2.1: Representación binaria en punto flotante para un número *X*.

Fuente: [13].

En esta representación, *sign* indica el signo del número, 1 para negativo y 0 para positivo. Por otro lado, *exponent* es un número sin signo el cual indica el exponente sesgado del número representado, esto quiere decir que el exponente real viene dado por *exponent* – *bias*, donde *bias* es igual a 127 para el caso de precisión simple. Luego, para el caso común con números normalizados, *fraction* es la fracción de la mantisa (*significand*) normalizada, cumpliéndose que *significand* = 1.*fraction* (bit silencioso). Finalmente el número viene dado por:

$$X = (-1)^{sign} * significand * 2^{exponent-bias} = (-1)^{sign} * 1.fraction * 2^{exponent-127} \quad (2.6)$$

Hay ciertos casos especiales en esta notación, estás son notaciones reservadas para números fuera del rango que permite la precisión simple (la cual es desde $\pm 1.18 * 10^{-38}$ hasta $\pm 3.4 * 10^{38}$), dichos casos se resumen en la tabla 2.2.

| <i>exponent</i> | <i>fraction</i> | <i>X</i> | Descripción |
|-----------------|-----------------|----------------------|--|
| = 0 | = 0 | <i>Zero</i> | El cero es indiferente al bit de signo |
| = 0 | $\neq 0$ | <i>Denormalized</i> | Número desnormalizado: <i>significand</i> = 0. <i>fraction</i> |
| = 255 | = 0 | $\pm Infinity$ | El bit de signo indica hacia donde tiende el número |
| = 255 | $\neq 0$ | <i>Signaling NaN</i> | <i>Not a Number</i> con <i>fraction</i> [22] = 0 |
| = 255 | $\neq 0$ | <i>Quiet NaN</i> | <i>Not a Number</i> con <i>fraction</i> [22] = 1 |

Tabla 2.2: Casos especiales para la representación en punto flotante de precisión simple según la *IEEE 754*. Fuente: [13]

Si durante alguna operación aritmética se decrece el campo *exponent* hasta llegar a cero, se empieza a desplazar hacia la derecha el *significand* (originalmente normalizado). Si se realizan 23

desplazamientos o menos, el *significand* no llega a ser cero, obteniéndose un número desnormalizado (sin bit silencioso). En el caso que llegase a ser cero ocurre un *underflow* y el resultado será cero. Por otro lado, Si dicha operación aritmética aumenta el *exponent* y llega a 255, ocurre un *overflow* y automáticamente el resultado pasa a ser $\pm\text{Infinity}$. Finalmente, si la operación no entrega un número válido se devuelve un *NaN*.

Cuando se realizan operaciones se consideran 3 bits extras, a la derecha del campo *fraction*. Estos se explican en la tabla 2.3 y se utilizan, según el modo de redondeo empleado, para decidir si truncar o redondear el resultado de alguna operación.

| Bit | Descripción |
|---------------------------------|--|
| $Guard = g = significand[-24]$ | Primer bit a la derecha de <i>fraction</i> [0]. |
| $Round = r = significand[-25]$ | Segundo bit a la derecha de <i>fraction</i> [0]. |
| $Sticky = s = significand[-26]$ | Tercer bit a la derecha de <i>fraction</i> [0]. Este bit se mantiene igual a 1 siempre que haya algún bits igual a 1 a la derecha de <i>r</i> . |

Tabla 2.3: Bits de redondeo. Fuente: [12]

2.2 RISC-V

El corazón de este proyecto es la *CPU*, el encargado de gestionar los datos, acciones y todas las funciones del *SoC*. En este caso la implementación se realizará utilizando la arquitectura e *ISA* del *RISC-V*, un procesador de *Hardware Libre* desarrollado en la *University of California, Berkeley* [8].

Los manuales disponibles sobre *RISC-V* se dividen en dos volúmenes, el primero es [8] y se centra en las instrucciones *unprivileged*, mientras que el segundo volumen, [14], se centra en las instrucciones *privileged*. Las instrucciones sin privilegios (*unprivileged*) son aquellas que generalmente se pueden usar en todos los modos de privilegio y en todas las arquitecturas privilegiadas (*privileged*), aunque el comportamiento puede variar según el modo de privilegio y la arquitectura de privilegio. El concepto de privilegio se explica en [8], pero para el nivel de la implementación realizada basta considerar únicamente el modo sin privilegios presentado en [8].

A continuación, se expondrán las principales características y consideraciones del *ISA* de *RISC-V*. Toda esta información, y más, se puede hallar en el manual oficial [8].

Ahora, se presentan los principales objetivos del proyecto *RISC-V*:

- El desarrollo de un *ISA* completo, abierto y gratuito a la disposición, tanto de la industria como de la academia.
- El desarrollo de un *ISA* útil para la implementación directa de *hardware* nativo, no solo para simulación o traducción binaria.
- El desarrollo de un *ISA* sencillo que evite el desarrollo de arquitecturas demasiado complicadas, con el fin de que sea útil para implementar algún estilo particular de micro-arquitecturas o para la implementación de tecnología (por ejemplo, tecnologías personalizables como *ASIC* (*Application-Specific Integrated Circuit*) o *FPGA*). Este *ISA* debe permitir una implementación eficiente en cualquiera de dichos casos.
- Desarrollar un *ISA* segmentado, es decir, compuesto por un *ISA* básico con las instrucciones más simples, pero completamente funcional por si solo y útil como base en el diseño de ace-

leradores de *hardware (accelerators)*, y por extensiones estandarizadas de este *ISA* base, que son útiles para el desarrollo de *software* de propósito general.

- Soporte para el estándar *2008 IEEE-754* para el cálculo de punto flotante.
- Desarrollar un *ISA* que admite amplias extensiones y variantes especializadas.
- El desarrollo de las variantes de 32 y 64 bits.
- Desarrollar un *ISA* con soporte para implementaciones altamente paralelas de *multi-cores o many-cores*, incluidos los multiprocesadores heterogéneos (sistemas donde los diferentes *cores* no son idénticos).
- El desarrollo de instrucciones opcionales de longitud variable para expandir el espacio de codificación de instrucciones disponible y para admitir una codificación de instrucción densa, opcional, para un mejor rendimiento, tamaño de código estático y eficiencia energética.
- Desarrollar un *ISA* completamente virtualizable con el fin de facilitar el desarrollo de un *Hypervisor* (un *Hypervisor* no es más que un software que crea y ejecuta máquinas virtuales).
- Desarrollar un *ISA* que simplifica los experimentos con nuevos diseños de arquitectura privilegiada.

El diseño de una plataforma de hardware basada en *RISC-V* puede contener bancos de memoria, dispositivos de entrada salida, etc..., pero por sobre todo es capaz de contener múltiples *cores* compatibles, por definición un *core* debe tener integrada una unidad independiente de *instruction fetch* (unidad encargada de encontrar la siguiente línea de comando a ejecutar por el *core*). A su vez, a un *core* se le pueden agregar extensiones del juego de instrucciones o algún co-procesador añadido (también añadiéndose extensiones al juego de instrucciones). Otro elemento que puede contener un diseño de este tipo es un *accelerator*, la cual es una unidad de función fija no programable o un *core* que puede funcionar de forma autónoma pero que está especializado para ciertas tareas.

2.2.1 Visión general al *ISA* de *RISC-V*

RISC-V se define mediante un *ISA* completo base, que debe estar presente en cualquier implementación, más extensiones opcionales para este. Dicha *ISA* base se parece bastante al de las primeras arquitecturas *RISC* y se restringe a las instrucciones mínimas necesarias para el funcionamiento de compiladores, *assemblers* (programa que convierte el lenguaje ensamblador en código máquina), *linkers* (programa que toma uno o más archivos objeto (generados por un compilador o ensamblador) y los combina en un solo archivo ejecutable, archivo de biblioteca u otro archivo ".objeto"), y sistemas operativos (añadiendo ciertas operaciones con privilegios), por lo que se provee un *ISA* conveniente y un *software toolchain*, "esqueleto", sobre el cual se pueden construir *ISAs* más personalizadas.

RISC-V es, en realidad, una familia de *ISAs* relacionadas entre sí, hay 4 *ISAs* base diferentes. Cada una de estas se caracteriza por el ancho de los *integer registers*, el tamaño correspondiente del espacio de direcciones, y por el número de *integer registers*. Hay dos variantes primarias, el *RV32I* y el *RV64I*, los cuales tienen un espacio de direcciones de 32 y 64 bits respectivamente. Se utiliza el término *XLEN* para referirse al ancho del *integer register* en bits (32 o 64 bits generalmente). Hay otras variantes secundarias, conocidas como *RV32E* (variante del *RV32I* con soporte para microcontroladores, tiene la mitad de *integer registers*) y *R128I* (aún no está completo y pretende trabajar con un *XLEN* = 128). Los conjuntos de instrucciones utilizan una representación en complemento a dos para valores enteros con signo.

Por otro lado, las extensiones de *RISC-V* se pueden clasificar en 3 categorías; *standard*, *reserved* y *custom*. *Standard* se usa para referirse a las extensiones definidas por la fundación *RISC-V*, *reserved* son las extensiones que aún no están definidas pero que en un futuro se pueden volver *standard*,

non-standard se utiliza para referirse a las extensiones no definidas por la fundación, las extensiones *custom* no se deben usar con una *standard* y están disponibles para extensiones *non-standard* específicas del proveedor, una extensión *non-conforming* describe una extensión *non-standard* que puede usar una codificación *standard* o *reserved* (por ejemplo, las extensiones personalizadas son *non-conforming*). Las extensiones del juego de instrucciones generalmente son compartidas, pero pueden haber ligeras diferencias de funcionalidad dependiendo del *ISA* base utilizado.

El nombre asignado al *ISA* base es *I* (con el prefijo RV32 o RV64, según la variante elegida), y se compone por instrucciones de cálculo de números enteros, cargas de números enteros, almacenamiento de números enteros e instrucciones de flujo de control. A continuación, se listan las extensiones *standar* más importantes:

- *M*: Extensión de multiplicación y división de enteros, agrega instrucciones para multiplicar y dividir valores contenidos en los *integer registers*.
- *A*: Extensión de instrucciones *atomic*, agrega instrucciones que leen, modifican y escriben de forma “atómica” (sin división, evita la perdida de información) la memoria para la sincronización entre *harts*.
- *F*: Extensión de punto flotante de precisión simple, agrega registros de punto flotante, instrucciones de precisión simple y, cargas y almacenamiento de precisión simple.
- *D*: Extensión de punto flotante de precisión doble, expande los registros de punto flotante y agrega instrucciones computacionales de precisión doble y, cargas y almacenamiento de precisión doble.
- *C*: La extensión de instrucción comprimida proporciona formas más estrechas (16 bits) de instrucciones comunes.

2.2.2 La Memoria en *RISC-V*

Un *hart* basado en *RISC-V* tiene un espacio de direcciones de 2^{XLEN} bytes y es direccionable a nivel de byte. En este ámbito se define como *word* de memoria a un conjunto de 32 bits (4 bytes), *halfword* serían 16 bits (2 bytes), *doubleword* son 64 bits (8 bytes) y *quadword* 128 bits (16 bytes). El espacio de direcciones de memoria es circular, es decir que el byte en la dirección $2^{XLEN} - 1$ es adyacente al de la dirección 0. Gracias a esto, para el cálculo de las direcciones de memoria realizadas por el *hardware* se ignoran los *overflows*, simplemente se realiza la operación módulo 2^{XLEN} .

El entorno de ejecución es el encargado de determinar y mapear los recursos de *hardware* en el espacio de direcciones del *hart*. Diferentes rangos de direcciones del espacio de direcciones de un *hart* pueden:

1. Estar vacíos, libres.
2. Contener la memoria principal.
3. Contener dispositivos de Entrada/Salida (E/S).

Las lecturas y escrituras de dispositivos de E/S pueden tener efectos secundarios visibles, mientras que los accesos a la memoria principal no. Es posible, para el entorno de ejecución, que todo el espacio de direcciones del *hart* sean dispositivos de E/S, pero usualmente hay una porción específica para la memoria principal.

Cuando una plataforma *RISC-V* tiene varios *harts*, los espacios de direcciones de dos *harts* pueden ser completamente iguales o completamente diferentes, o pueden ser parcialmente diferentes, pero compartiendo algún subconjunto de recursos, mapeados en el mismo o diferentes rangos de direcciones.

La ejecución de cada instrucción de máquina desencadena uno o más accesos a la memoria, subdivididos en accesos “implícitos” y “explícitos”. En cada instrucción ejecutada hay una lectura “implícita” en memoria, conocida como *instruction fetch*, con el fin de obtener la instrucción codificada a ejecutar, en muchas instrucciones es el único acceso a memoria. El acceso “explícito” se da cuando las instrucciones específicas de carga (*load*) y almacenamiento (*store*) realizan un acceso de la memoria, lectura (*read*) o escritura (*write*) respectivamente, en una dirección determinada por la instrucción. El entorno de ejecución puede dictar que la ejecución de la instrucción realice otros accesos implícitos a la memoria (como implementar la traducción de direcciones), además de los documentados para la *ISA* sin privilegios.

El entorno de ejecución determina qué porciones del espacio de direcciones no vacante son accesibles para cada tipo de acceso a la memoria. Para exemplificar, el conjunto de direcciones que puede ser leído por los accesos de memoria implícitos (*instruction fetch*), puede o no traslaparse con el conjunto de direcciones para los accesos de memoria de lectura explícitos, o el conjunto de direcciones que puede ser explícitamente escrito, por alguna instrucción *store*, puede ser solo un subconjunto de todas las direcciones que se pueden leer. Normalmente, si una instrucción intenta acceder a la memoria en una dirección inaccesible/prohibida, se genera una excepción para la instrucción. Las direcciones de memoria vacantes en el espacio de direcciones nunca son accesibles.

2.2.3 Codificación del largo de instrucciones

El *ISA RISC-V* básico tiene instrucciones de 32 bits de longitud fija que deben alinearse en límites de 32 bits. Sin embargo, el esquema de codificación estándar de *RISC-V* está diseñado para soportar extensiones de *ISA* con instrucciones de largo variable, donde cada instrucción puede tener cualquier número de parcelas (*parcels*) de instrucciones de 16 bits de longitud y las parcelas están alineadas, naturalmente, en límites de 16 bits. La extensión de *ISA* estándar *C*, reduce el tamaño del código al proporcionar instrucciones comprimidas de 16 bits y relajar las restricciones de alineación para permitir que todas las instrucciones (16 y 32 bits) se alineen en cualquier límite de 16 bits, con el fin de mejorar la densidad del código.

Se utiliza el término *IALING* (medido en bits) para referirse a las restricciones de alineamiento de las direcciones de memoria de las instrucciones impuesta por la implementación. *IALING* es de 32 bits para el *ISA* base, pero algunas extensiones relajan el *IALING* a 16 bits, como es el caso de la extensión *C*. 32 y 16 son los únicos dos valores que puede tomar *IALING*.

El término *ILEN* (medido en bits) se utiliza para referirse al máximo *Instruction-Length* de una implementación dada, siempre es múltiplo de *IALING*. En implementaciones donde se utiliza un *ISA* base, el *ILEN* es igual a 32, y en implementaciones donde se utiliza un largo de instrucciones mayor, el *ILEN* también es mayor.

En la figura 2.4 se puede ver el estándar *RISC-V* para la codificación del largo de instrucciones. Todas las instrucciones de 32 bits en el *ISA* base tienen los últimos dos bits menos significativos fijos en 11_{base2} . Las instrucciones opcionales comprimidas de 16 bits (extensión *C*) tienen los últimos dos bits menos significativos fijos en 00_{base2} , 01_{base2} o 10_{base2} .



Figura 2.4: Codificación de longitud de instrucción *RISC-V*. Solo las codificaciones de 16 bits y 32 bits se consideran “congeladas” en este momento. Fuente: [8].

Las extensiones del conjunto de instrucciones estándar codificadas con más de 32 bits tienen bits adicionales, de orden inferior, fijos en 1_{base2} , con las convenciones para longitudes de 48 y 64 bits que se muestran en la figura 2.4. Las instrucciones con un largo de entre 80 y 176 bits son codificados usando un campo de 3 bits, [14:12], que entregan el número de *halfwords* (16 bits) agregadas a las primeras 5 *halfwords*. La codificación con los bits [14:12] = 111_{base2} está reservado para codificación de instrucciones aún más largas en un futuro.

Codificaciones con los bits [15:0] iguales a cero se consideran instrucciones “ilegales”. Se considera que estas instrucciones tienen una longitud mínima: 16 bits si está presente alguna extensión de conjunto de instrucciones de 16 bits, de lo contrario 32 bits. La codificación con los bits [ILEN-1:0] iguales a uno también se considera “illegal”; esta instrucción se considera que tiene una longitud de bits *ILEN*.

Endianness de *RISC-V*

La *ISA* base de *RISC-V* puede trabajar con sistemas de memoria tanto *Big-Endian* como *Little-Endian* (definido por el *EEI*), la arquitectura privilegiada fomenta aún más las operaciones *Big-Endian*. Las instrucciones se guardan en memoria en forma de secuencias de 16 bits, en parcelas *Little-Endian*, sin importar si el sistema de memoria es *Big* o *Little Endian*. Las parcelas que forman una instrucción se almacenan en direcciones de memoria de 16 bits (*halfword*) crecientes, y la parcela con la dirección más baja contiene los bits menos significativos de la instrucción.

2.2.4 Excepciones, trampas e interrupciones

Se utiliza el término “*excepción*” para referirse a una condición inusual que ocurre durante la ejecución de alguna otra instrucción en el *hart* actual del *RISC-V*. El término “*interrupción*” se refiere a un evento externo, asíncrono, que puede causar que un *hart* del *RISC-V* experimente una inesperada transferencia de control. Finalmente se usa la palabra “*trampa*” para referirse a la transferencia de control a un manejador de *trampas* a causa de una *excepción* o *interrupción*.

El comportamiento general de la mayoría de los *EEIs* de un *RISC-V* es que acciona una *trampa* para algún manejador cuando se señala una excepción en alguna instrucción. La manera en que las *interrupciones* son generadas, enrutadas y habilitadas por un *hart* depende del *EEI*.

El cómo las *trampas* son manejadas y se hacen visibles en el *software* en ejecución, en el *hart*, depende del entorno de ejecución. Desde el punto de vista del *software* corriendo dentro de un

entorno de ejecución, las *trampas* detectadas por un *hart* durante el tiempo de ejecución pueden tener cuatro efectos diferentes:

- **Trampa Contenida (*Contained Trap*):** La *trampa* es visible y manejada por el *software* que está corriendo dentro del entorno de ejecución. Por ejemplo, en un *EEI* que provee ambos modos en el *hart*, *supervisor* y *usuario*, un *ECALL (System Call)* o, como se denomina en la nomenclatura de *RISC-V, Executive Call*) por un *hart* en *modo-usuario*, generalmente resulta en una transferencia de control a un manejador en el *modo-supervisor*, que se ejecuta en el mismo *hart*. De igual modo, en el mismo entorno de ejecución, cuando un *hart* es interrumpido, un manejador de interrupciones va a ejecutarse en el *modo-supervisor* en el *hart*.
- **Trampa Solicitada (*Requested Trap*):** La *trampa* es una excepción asíncrona, la cual es una llamada explícita para el entorno de ejecución y solicita una acción en nombre del *software* que se está corriendo en el entorno de ejecución. Un ejemplo es un *System Call*. En este caso, la ejecución puede o no reanudarse en el *hart* después de que la acción solicitada es tomada por el entorno de ejecución. Por ejemplo, un *System Call* puede eliminar el *hart* o provocar una terminación ordenada de todo el entorno de ejecución.
- **Trampa Invisible (*Invisible Trap*):** La *trampa* es manejada de forma transparente por el entorno de ejecución y la ejecución se reanuda normalmente, después de que se maneja la *trampa*. Los ejemplos incluyen emular instrucciones faltantes, manejar fallas de páginas no residentes en un sistema de memoria virtual paginado por demanda o manejar interrupciones del dispositivo para un trabajo diferente en una máquina multiprogramada. En esos casos, el *software* corriendo dentro del entorno de ejecución no se entera de la *trampa* (se ignoran los efectos en el “*timing*” en estas definiciones).
- **Trampa Fatal (*Fatal Trap*):** Esta *trampa* representa una falla fatal y hace que el entorno de ejecución finalice la ejecución. Los ejemplos incluyen fallar en una verificación de protección de página de memoria virtual o permitir que expire un *watchdog timer*. Cada *EEI* debe definir como una ejecución finaliza y se reporta con el medio externo.

En la tabla 2.4 se puede apreciar un resumen de las principales características de los tipos de *trampas*.

| | Contenida | Solicitada | Invisible | Fatal |
|-------------------------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|
| ¿Terminó la ejecución? | No | No ₁ | No | Si |
| ¿El <i>software</i> es ajeno? | No | No | Si | Si ₂ |
| ¿Manejado por el entorno? | No | Si | Si | Si |

Tabla 2.4: Características de las *trampas*. Notas: 1) El término puede ser solicitado, 2) Trampas fatales imprecisas pueden ser observadas por *software*.
Fuente: [8].

El *EEI* define para cada *trampa* si se maneja con precisión, aunque la recomendación es mantener la precisión siempre que sea posible. Las *trampas contenidas y solicitadas* pueden observarse que son imprecisas por *software* dentro del entorno de ejecución. Las *trampas invisibles*, por definición, no pueden ser vistas si son imprecisas o no por el *software* que está corriendo dentro del entorno de ejecución. Las *trampas fatales* pueden ser observadas como imprecisas por el *software* corriendo dentro del entorno de ejecución, si las instrucciones erróneas conocidas no causan la terminación inmediata del entorno.

2.2.5 El *ISA* base y extensiones implementadas, *RV32IMF*

A continuación, se presenta el juego de instrucciones consideradas, *RV32IMF*, para la implementación del *SoC*, el cual se conforma por el *ISA* base, *RV32I*, y dos de sus extensiones *standard*, *M*

y F . Donde, se cumple $XLEN = ILEN = IALING = 32bits$.

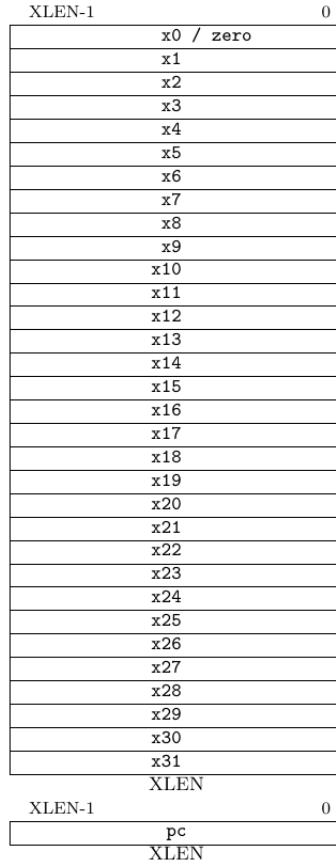


Figura 2.5: *Register Files* para *RV32I unprivileged*. Fuente: [8].

RV32I añade 32 registros de 32 bits, $x0 - x31$, de propósito general (*Register Files*), con $x0$ siempre igual a cero (*hardwired to zero*). Los registros de uso general pueden mantener valores que muchas instrucciones interpretan como una colección de valores *booleanos*, como enteros binarios en complemento de dos o como enteros binarios sin signo. Adicionalmente, hay un registro *unprivileged* llamado *Program Counter (PC)*, el cual almacena la dirección de la instrucción actual. Ver figura 2.5.

RV32I tiene 4 formatos de instrucciones básicos (*R/I/S/U*), donde se mantienen los registros de la fuente (*source*), $rs1$ y $rs2$, y el de destino (*destination*), rd , en la misma posición en todos los formatos para facilitar/simplificar la decodificación. A excepción de los datos inmediatos de 5 bits utilizados en las instrucciones *CSR (Control and Status Register)*, extensión no implementada, los datos inmediatos (*imm*) siempre están extendidos por el signo y generalmente se ubican en los bits disponibles a la izquierda en la instrucción que se han asignado para reducir la complejidad del *hardware*. En particular, el bit de signo para todos los datos inmediatos siempre está en el bit 31 de la instrucción para acelerar el circuito de extensión de signo. Por otro lado, *RV32M* solo añade instrucciones de tipo *R* con soporte para multiplicación y división de enteros. Es importante destacar que no se incluyen instrucciones especiales para verificaciones de *overflow* de operaciones aritméticas enteras, pero estas verificaciones se pueden realizar mediante una, dos o tres instrucciones simples según el caso.

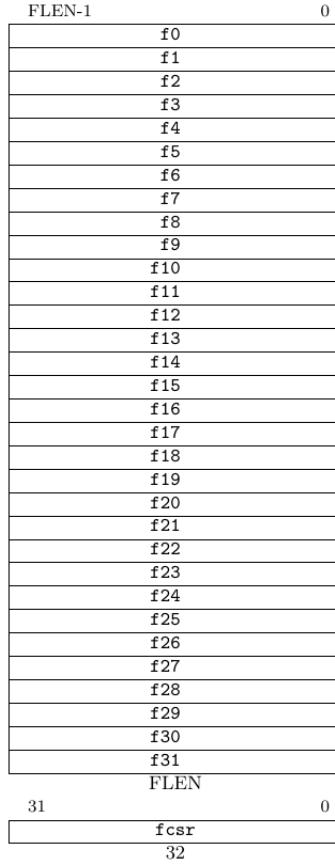


Figura 2.6: *Register Files* para *RV32F unprivileged*. Fuente: [8].

Para dar soporte a operaciones de punto flotante de precisión simple, bajo el estándar *IEEE 754-2008*, a nivel de *hardware* se añade *RV32F*, el cual integra 32 registros, $f_0 - f_{31}$, de 32 bits (lo que quiere decir que $FLEN = 32$, este valor indica el ancho de los registros de la extensión *F*) exclusivos para almacenar registros de operaciones de punto flotante. Además, añade un registro de *control and status*, *FCSR*, pero como no se implementa la extensión *CSR* de *RISC-V*, tampoco se implementa *FCSR*. Ver figura 2.6.

A su vez, *RV32F* añade instrucciones de tipo *R* e introduce las de tipo *R4* (las cuales agregan una tercera fuente, *rs3*), además de añadir una de tipo *S* y otra de tipo *I*, correspondientes al *store* y *load*, respectivamente, para palabras de punto flotante, ya que utilizan un espacio de registros distinto al de las operaciones enteras.

En la tabla 2.5 se puede apreciar la codificación y los campos que componen a cada tipo de instrucción considerada:

| 31 | 27 | 26 | 25 | 24 | 20 | 19 | 15 | 14 | 12 | 11 | 7 | 6 | 0 | |
|-----|----|--------------|-----------------------|-----|--------|-------------|----|--------|--------|--------|----|---|---|--|
| | | | funct7 | rs2 | rs1 | funct3 | | rd | | opcode | R | | | |
| rs3 | | funct2 | rs2 | rs1 | funct3 | | rd | | opcode | | R4 | | | |
| | | imm[11:0] | | rs1 | funct3 | | rd | | opcode | | I | | | |
| | | imm[11:5] | rs2 | rs1 | funct3 | imm[4:0] | | opcode | | | S | | | |
| | | imm[12 10:5] | rs2 | rs1 | funct3 | imm[4:1 11] | | opcode | | | B | | | |
| | | | imm[31:12] | | | | rd | | opcode | | U | | | |
| | | | imm[20 10:1 11 19:12] | | | | rd | | opcode | | J | | | |

Tabla 2.5: Codificación de los distintos tipos de instrucciones consideradas.
Fuente: [8].

Las instrucciones de tipo *R* y *R4* son operaciones *register-to-register*, las de tipo *I* son *immediate-to-register* o *load*, las tipo *S* son operaciones *store*, la instrucción de tipo *J* corresponde a un *jump*, las tipo *B* son *branch* y las tipo *U* también son operaciones *immediate-to-register*.

2.2.5.1 Instrucciones enteras, *RV32IM*

En la tabla 2.6 se aprecian todas las instrucciones de *RV32I* implementadas, junto al detalle de cada uno de los campos presentados en la tabla 2.5 y una breve descripción, escrita en pseudo-código, de la operación que realizan. Nótese, que en la tabla 2.5 los campos *rs1*, *rs2* y *rd* tienen 5 bits y se refieren a la dirección en el *Register Files* y el campo *imm* se encuentra sin extender; mientras que en la tabla 2.6, *rs1*, *rs2* y *rd* se refieren a los valores de *XLEN* bits almacenados (o por almacenar en el caso de *rd*) en el *Register Files* y con *imm* ya extendido.

| RV32I - Integer instructions | | | | | |
|------------------------------|-----|---------|--------|----------------|---|
| Inst. | FMT | Opcode | funct3 | extra | Descripción |
| add | R | 0110011 | 0x0 | funct7=0x00 | $rd = rs1 + rs2$ |
| sub | R | 0110011 | 0x0 | funct7=0x20 | $rd = rs1 - rs2$ |
| xor | R | 0110011 | 0x4 | funct7=0x00 | $rd = rs1 \wedge rs2$ |
| or | R | 0110011 | 0x6 | funct7=0x00 | $rd = rs1 rs2$ |
| and | R | 0110011 | 0x7 | funct7=0x00 | $rd = rs1 \& rs2$ |
| sll | R | 0110011 | 0x1 | funct7=0x00 | $rd = rs1 \ll rs2$ |
| srl | R | 0110011 | 0x5 | funct7=0x00 | $rd = rs1 \gg rs2$ |
| sra | R | 0110011 | 0x5 | funct7=0x20 | $rd = rs1 \gg rs2$ (msb-extends) |
| slt | R | 0110011 | 0x2 | funct7=0x00 | $rd = (rs1 < rs2) ? 1 : 0$ |
| sltu | R | 0110011 | 0x3 | funct7=0x00 | $rd = (rs1 < rs2) ? 1 : 0$ (unsigned) |
| addi | I | 0010011 | 0x0 | | $rd = rs1 + imm$ |
| xori | I | 0010011 | 0x4 | | $rd = rs1 \wedge imm$ |
| ori | I | 0010011 | 0x6 | | $rd = rs1 imm$ |
| andi | I | 0010011 | 0x7 | | $rd = rs1 \& imm$ |
| slli | I | 0010011 | 0x1 | imm[11:5]=0x00 | $rd = rs1 \ll imm[4:0]$ |
| srli | I | 0010011 | 0x5 | imm[11:5]=0x00 | $rd = rs1 \gg imm[4:0]$ |
| srai | I | 0010011 | 0x5 | imm[11:5]=0x20 | $rd = rs1 \gg imm[4:0]$ (msb-extends) |
| slti | I | 0010011 | 0x2 | | $rd = (rs1 < imm) ? 1 : 0$ |
| sltiu | I | 0010011 | 0x3 | | $rd = (rs1 < imm) ? 1 : 0$ (zero-extends) |
| lb | I | 0000011 | 0x0 | | $rd = M[rs1+imm][7:0]$ |
| lh | I | 0000011 | 0x1 | | $rd = M[rs1+imm][15:0]$ |
| lw | I | 0000011 | 0x2 | | $rd = M[rs1+imm][31:0]$ |
| lbu | I | 0000011 | 0x4 | | $rd = M[rs1+imm][7:0]$ (zero-extends) |
| lhu | I | 0000011 | 0x5 | | $rd = M[rs1+imm][15:0]$ (zero-extends) |
| sb | S | 0100011 | 0x0 | | $M[rs1+imm][7:0] = rs2[7:0]$ |
| sh | S | 0100011 | 0x1 | | $M[rs1+imm][15:0] = rs2[15:0]$ |
| sw | S | 0100011 | 0x2 | | $M[rs1+imm][31:0] = rs2[31:0]$ |
| beq | B | 1100011 | 0x0 | | $if(rs1 == rs2) PC += imm$ |
| bne | B | 1100011 | 0x1 | | $if(rs1 != rs2) PC += imm$ |
| blt | B | 1100011 | 0x4 | | $if(rs1 < rs2) PC += imm$ |
| bge | B | 1100011 | 0x5 | | $if(rs1 >= rs2) PC += imm$ |
| bltu | B | 1100011 | 0x6 | | $if(rs1 < rs2) PC += imm$ (zero-extends) |
| bgeu | B | 1100011 | 0x7 | | $if(rs1 >= rs2) PC += imm$ (zero-extends) |
| jal | J | 1101111 | | | $rd = PC+4; PC += imm$ |
| jalr | I | 1100111 | 0x0 | | $rd = PC+4; PC = rs1 + imm$ |
| lui | U | 0110111 | | | $rd = imm \ll 12$ |
| auipc | U | 0010111 | | | $rd = PC + (imm \ll 12)$ |
| ecall | I | 1110011 | 0x0 | imm=0x0 | Transfer control to OS |
| ebreak | I | 1110011 | 0x0 | imm=0x1 | Transfer control to debugger |

Tabla 2.6: Instrucciones implementadas de *RV32I*. Fuente: [8].

A continuación, se explican las instrucciones de la tabla 2.6 con consideraciones que no se aprecian claramente en la misma. La diferencia entre *sra/srai* y *srl/srli* radica en que las primeras extienden el signo durante el desplazamiento de *rs1* (siempre el operando a desplazar), las segundas no lo hacen. Para *sra*, *srl* y *sll* se codifica el número de desplazamientos en los 5 bits menos significativos de *rs2*, mientras que *srai*, *srl* y *slli* codifican dicho número en los 5 bits menos significativos del campo *imm*. Luego, *slt/slti* y *sltu/sltiu* realizan la comparación con y sin signo respectivamente. Por otro lado, las instrucciones *sll* y *slli* rellenan con ceros los bits menos significativos resultantes del desplazamiento. Las instrucciones de tipo *U* llenan con ceros los 12 bits menos significativos del campo *imm*. La instrucción *nop* se implementa como *addi x0, x0, 0* y simplemente incrementa el *PC*.

RV32I provee dos tipos de instrucciones de transferencia de control: “saltos incondicionales” (*unconditional jumps, jal/jalr*) y “bifurcaciones condicionales” (*conditional branches*, todas las tipo *B*). En la instrucción *jal* los saltos pueden apuntar a un rango de $PC \pm 1MiB$. En la ejecución de *jalr* se obtiene la dirección objetivo, *PC*, sumando *imm* a *rs1* y luego establece el bit menos significativo de la suma igual cero. Las instrucciones *jal/jalr* generan una excepción de “dirección de instrucción desalineada” (*instruction-address-misaligned*) si la dirección de destino no está alineada con un “límite de cuatro bytes” (*four-byte boundary*). En las instrucciones de tipo *B* el rango de la bifurcación condicional es de $PC \pm 4KiB$ y generan una excepción de *instruction-address-misaligned* si la dirección objetivo no está alineada con un límite de cuatro bytes (*four-byte boundary*) y la condición de bifurcación evaluada es verdadera. Por otro lado, la diferencia entre las instrucciones *blt/bge* y *bltu/bgeu* es que las ultimas dos realizan la comparación sin signo y las primeras con.

En la tabla 2.6 se representa a la memoria como *M[dirección de acceso]*, donde las instrucciones *load-I* leen un dato en memoria y lo guardan en *rd*, mientras que las de tipo *store-S* almacenan la información del registro *rs2* en memoria, en ambos casos se utiliza el registro *rs1* y el campo *imm* para el direccionamiento. Luego la diferencia entre *lb/lh* y *lbu/lhu* es que los últimos no extienden el signo del *byte/halfword* leído desde memoria a 32 bits, mientras que los primeros si lo hacen.

Independiente del *EEI*, los *loads* y *stores* cuyas direcciones efectivas están alineadas naturalmente no generan excepción de dirección desalineada (*address-misaligned exception*), y si no es el caso el comportamiento depende del *EEI*. Un *EEI* puede garantizar que los desalineamientos de *loads* y *stores* sean totalmente compatibles, por lo que el *software* que se ejecuta dentro del entorno de ejecución nunca experimentará una trampa de dirección desalineada contenida o fatal. En este caso, los *loads* y *stores* desalineados se pueden manejar mediante *hardware*, o mediante una trampa invisible en la implementación del entorno de ejecución, o posiblemente una combinación de *hardware* y trampa invisible dependiendo de la dirección. Es posible que un *EEI* no garantice que los *loads* y *stores* desalineados se manejen de manera invisible. En este caso los *loads* y *stores* que no están alineados de forma natural pueden completar la ejecución con éxito o generar una excepción. La excepción generada puede ser un *address-misaligned exception* o un *access-fault exception*. Para un acceso a la memoria que de otro modo podría completarse pero por la desalineación no es capaz, se puede generar un *access exception* en lugar de un *address-misaligned exception*, sino se debe emular el acceso desalineado, por ejemplo, si los accesos a la región de la memoria tienen efectos secundarios. Cuando un *EEI* no garantiza el manejo invisible de los desalineamientos generados por los *loads* y *stores*, el *EEI* debe definir si las excepciones causadas por la desalineación de direcciones dan como resultado una trampa contenida (permitiendo que el software que se ejecuta dentro del entorno de ejecución maneje la trampa) o una trampa fatal (*terminating execution*). Incluso cuando los *loads* y *stores* desalineados se completan correctamente, estos accesos pueden ejecutarse muy lentamente según la implementación (por ejemplo, cuando se implementa a través de una trampa invisible). Además, mientras que se garantiza que los *loads* y *stores* alineados de forma natural se ejecuten de forma atómica, los *loads* y *stores* desalineados pueden no estarlo, y por lo tanto requieren una sincronización adicional para asegurar la atomicidad.

Finalmente las instrucciones *ecall*/*ebreak* provocan una trampa solicitada precisa para el entorno de ejecución, *ecall* se utiliza para realizar una solicitud de servicio, donde el *EEI* definirá cómo se pasan los parámetros para la solicitud de servicio, pero generalmente estos estarán en ubicaciones definidas en el *Integer Register Files*. Y *ebreak* se utiliza para devolver el control a un entorno de depuración.

Es importante señalar que hay una última instrucción que forma parte de *RV32I* que no se considera relevante para la implementación. Esto es debido a que dicha instrucción, *fence*, se utiliza para funciones de ordenamiento de memoria y dispositivos de E/S, característica propia de implementaciones de mayor complejidad con múltiples *harts* en el entorno de ejecución.

| RV32M - Multiply Extension | | | | | |
|----------------------------|-----|---------|--------|-------------|---------------------------|
| Inst. | FMT | Opcode | funct3 | extra | Descripción |
| mul | R | 0110011 | 0x0 | funct7=0x01 | $rd = (rs1 * rs2)[31:0]$ |
| mulh | R | 0110011 | 0x1 | funct7=0x01 | $rd = (rs1 * rs2)[63:32]$ |
| mulhsu | R | 0110011 | 0x2 | funct7=0x01 | $rd = (rs1 * rs2)[63:32]$ |
| mulhu | R | 0110011 | 0x3 | funct7=0x01 | $rd = (rs1 * rs2)[63:32]$ |
| div | R | 0110011 | 0x4 | funct7=0x01 | $rd = rs1 / rs2$ |
| divu | R | 0110011 | 0x5 | funct7=0x01 | $rd = rs1 / rs2$ |
| rem | R | 0110011 | 0x6 | funct7=0x01 | $rd = rs1 \% rs2$ |
| remu | R | 0110011 | 0x7 | funct7=0x01 | $rd = rs1 \% rs2$ |

Tabla 2.7: Instrucciones implementadas de *RV32M*. Fuente: [8].

Las instrucciones *RV32M* implementadas se pueden ver en la tabla 2.7, la cual entrega una visión general de la extensión de la misma forma que la tabla anterior. Las instrucciones *mul/mulh/mulhsu/mulhu* realizan la multiplicación entre los operandos de 32 bits, *rs1* y *rs2*. Mientras *mul* almacena los 32 bits menos significativos del resultado en *rd*, las demás instrucciones de multiplicación, *mulh/mulhsu/mulhu*, almacenan los 32 bits más significativos. En *mul/mulh* se realiza la operación considerando ambos operandos con signo, *mulhu* considera ambos sin signo y *mulhsu* considera *rs1* con signo y *rs2* sin. Luego *div* y *divu* realizan la división entera (redondeando hacia cero) con y sin signo respectivamente. Análogamente *rem* y *remu* entregan el resto de dicha división, con y sin signo respectivamente, el signo del resultado de estas últimas dos instrucciones es igual al del dividendo (*rs1*).

2.2.5.2 Unidad de punto flotante (*FPU*), *RV32F*

La unidad de punto flotante, o *FPU* por sus siglas en inglés, es la unidad encargada de realizar las operaciones de punto flotante de precisión simple bajo el estándar *IEEE 754-2008*. A diferencia de las instrucciones descritas en la sección anterior que suelen ser ejecutadas por la *ALU*, siglas en inglés para unidad aritmética lógica, la mayoría de las instrucciones que añade *RV32F* son ejecutadas por la *FPU*. Es importante destacar que por la naturaleza de los números de punto flotante, la *FPU* presenta un alto costo en ciclos de ejecución en comparación a la *ALU*, lo que penaliza el rendimiento del sistema cuando ejecuta códigos con muchos cálculos de este tipo.

El registro *FCSR* tiene el fin de almacenar los *flags* que genera la *FPU*, estos *flags* son *NV* (operación inválida), *DZ* (división por cero), *OF* (*overflow*), *UF* (*underflow*) y *NX* (resultado inexacto). Si bien este registro no se implementa, si se consideran dichos *flags* en el diseño de la *FPU*. Otro rol del registro es almacenar el modo de redondeo dinámico (*DYN*).

En *RV32F*, excepto cuando se indique lo contrario, si el resultado de una operación de punto flotante es *NaN*, es el canónico (*0x7FC00000*). Por otra parte, considera los modos de redondeo (*rm*) que se presentan y explican en la tabla 2.8.

| Modo | Código | Descripción |
|------|--------|--|
| RNE | 000 | Redondear al más cercano, o al par. |
| RTZ | 001 | Redondear hacia cero. |
| RDN | 010 | Redondear hacia abajo (hacia <i>-inf</i>). |
| RUP | 011 | Redondear hacia arriba (hacia <i>+inf</i>). |
| RMM | 100 | Redondear al más cercano, o lejos de cero. |
| DYM | 111 | Se utiliza el modo especificado en <i>FCSR</i> , el cual puede ser cualquiera de los anteriores. |

Tabla 2.8: Modos de redondeo (*rm*) de *RV32F*. Fuente: [8].

En la tabla 2.9 se pueden ver las instrucciones añadidas por *RV32F*. La mayoría de ellas hacen uso exclusivos de los registros flotantes *f0 – f31*, pero hay ciertas excepciones en las que se pueden usar registros enteros *x1 – x31* y flotantes. A continuación se detallan todas las salvedades que no se aprecian claramente en la tabla 2.9. En la tabla *rm* se refiere al modo de redondeo seleccionado.

Las instrucciones *flw* y *fsw* corresponden al *load* y *store*, respectivamente, para los registros flotantes. En ambos casos se cumple que *rs1* es entero, mientras que *rd* y *rs2* son registros flotantes para *flw* y *fsw* respectivamente.

En cuanto a *fmin.s* y *fmax.s*, estás consideran $-0.0 < +0.0$ y todos sus registros son flotantes. Además, si ambos operandos son *NaN* se devuelve el *NaN* canónico, si solo uno es *NaN* el resultado es el operando que no lo es. Finalmente, si algún operando es un *Signaling NaN* se levanta *NV*.

El formato *R4* se introduce para dar cabida a instrucciones que reciben 3 operandos, las instrucciones de este tipo ejecutan un multiplicación y una suma/resta, todos los registros involucrados son flotantes. Estas instrucciones levanta el *flag NV* cuando los multiplicandos son $\pm inf$ y 0, incluso cuando el sumando es un *Quiet NaN*.

| RV32F - Floating-Point Extension | | | | | | |
|----------------------------------|-----|---------|--------|---------|-----------|---|
| Inst. | FMT | Opcode | funct3 | funct7 | extra | Descripción |
| flw | I | 0000111 | 010 | | | $rd = M[rs1 + imm]$ |
| fsw | S | 0100111 | 010 | | | $M[rs1 + imm] = rs2$ |
| fmadd.s | R4 | 1000011 | rm | | funct2=00 | $rd = rs1 * rs2 + rs3$ |
| fmsub.s | R4 | 1000111 | rm | | funct2=00 | $rd = rs1 * rs2 - rs3$ |
| fnmadd.s | R4 | 1001111 | rm | | funct2=00 | $rd = -rs1 * rs2 + rs3$ |
| fnmsub.s | R4 | 1001011 | rm | | funct2=00 | $rd = -rs1 * rs2 - rs3$ |
| fadd.s | R | 1010011 | rm | 0000000 | | $rd = rs1 + rs2$ |
| fsub.s | R | 1010011 | rm | 0000100 | | $rd = rs1 - rs2$ |
| fmul.s | R | 1010011 | rm | 0001000 | | $rd = rs1 * rs2$ |
| fdiv.s | R | 1010011 | rm | 0001100 | | $rd = rs1 / rs2$ |
| fsqrt.s | R | 1010011 | rm | 0101100 | rs2=00000 | $rd = \sqrt{rs1}$ |
| fsgnj.s | R | 1010011 | 000 | 0010000 | | $rd = \text{abs}(rs1) * \text{sgn}(rs2)$ |
| fsgnjn.s | R | 1010011 | 001 | 0010000 | | $rd = \text{abs}(rs1) * -\text{sgn}(rs2)$ |
| fsgnjx.s | R | 1010011 | 010 | 0010000 | | $rd = rs1 * \text{sgn}(rs2)$ |
| fmin.s | R | 1010011 | 000 | 0010100 | | $rd = \min(rs1, rs2)$ |
| fmax.s | R | 1010011 | 001 | 0010100 | | $rd = \max(rs1, rs2)$ |
| fcvt.s.w | R | 1010011 | rm | 1101000 | | $rd = (\text{float}) rs1$ |
| fcvt.s.wu | R | 1010011 | rm | 1101000 | | $rd = (\text{float}) rs1$ |
| fcvt.w.s | R | 1010011 | rm | 1100000 | | $rd = (\text{int32_t}) rs1$ |
| fcvt.w.u.s | R | 1010011 | rm | 1100000 | | $rd = (\text{uint32_t}) rs1$ |
| fmv.x.w | R | 1010011 | 000 | 1110000 | | $rd = *((\text{int}^*) \&rs1)$ |
| fmv.w.x | R | 1010011 | 000 | 1111000 | | $rd = *((\text{float}^*) \&rs1)$ |
| feq.s | R | 1010011 | 010 | 1010000 | | $rd = (rs1 == rs2) ? 1 : 0$ |
| flt.s | R | 1010011 | 001 | 1010000 | | $rd = (rs1 < rs2) ? 1 : 0$ |
| fle.s | R | 1010011 | 000 | 1010000 | | $rd = (rs1 <= rs2) ? 1 : 0$ |
| fclass.s | R | 1010011 | 001 | 1110000 | rs2=00000 | $rd = 0..9$ |

Tabla 2.9: Instrucciones implementadas de *RV32F*. Fuente: [8].

Las instrucciones de conversión entre un número en punto flotante y un entero usan ambos tipos de registros. En el caso de *fcvt.s.w* y *fcvt.s.wu* se realiza la conversión del número entero, con y sin signo respectivamente, del registro entero *rs1* a un número en punto flotante y lo almacena en el registro flotante *rd*. Por otra parte, *fcvt.w.s* y *fcvt.w.u.s* convierten el flotante ubicado en el registro flotante *rs1* a un entero, con y sin signo respectivamente, y lo almacenan en el registro entero *rd*. En cualquier caso, si el resultado no es representable en el formato de destino, se devuelve el valor más cercano y se levanta *NV*. Se realiza el redondeo de acuerdo al *rm* especificado en el campo *funct3* de la instrucción.

Para mover registros desde los registros enteros a los flotantes y viceversa, sin realizar conversión alguna, se utilizan las instrucciones *fmw.w.x* y *fmw.x.w* respectivamente. En *fmw.w.x* se tiene que *rd* es un registro flotante y *rs1* entero, mientras que para *fmw.x.w* es al revés.

| Bit <i>rd</i> | Descripción de <i>rs1</i> |
|---------------|---------------------------------|
| 0 | $-\infty$ |
| 1 | < 0 (<i>Normalizado</i>) |
| 2 | < 0 (<i>Desnormalizado</i>) |
| 3 | -0 |
| 4 | $+0$ |
| 5 | > 0 (<i>Desnormalizado</i>) |
| 6 | > 0 (<i>Normalizado</i>) |
| 7 | $+\infty$ |
| 8 | <i>Signaling NaN</i> |
| 9 | <i>Quiet NaN</i> |

Tabla 2.10: Posibles formatos para *fclass.s*. Fuente: [8].

Por otro lado, *feq.s*, *flt.s* y *fle.s* realizan la comparación con los registros *rs1* y *rs2* flotantes, pero almacenan el resultado en uno entero (*rd*). Además, *flt.s* y *fle.s* realizan una comparación *signaling*, es decir, levantan *NV* cuando *rs1* o *rs2* es *NaN*. Sin embargo, *feq.s* realiza una comparación *quiet*, osea, levanta *NV* cuando algún operando en un *Signaling NaN*. Basta que algún operando sea *NaN* para que el resultado sea 0.

Finalmente, *fclass.s* examina el número en punto flotante, ubicado en el registro flotante *rs1*, y guarda en el registro entero *rd* una máscara de 10 bits que indica la clase a la que pertenece el operando. En la tabla 2.10 se puede ver qué bit (siempre es sólo uno) se debe “encender” en dicha máscara según la clasificación correspondiente. El resto de instrucciones sólo utilizan registros flotantes para sus operaciones.

2.3 Revisión del estado del arte

Otros autores ya han enfrentado la problemática del diseño e implementación de un sistema basado en *RISC-V*, por ejemplo en [15] se presenta el diseño y el análisis de la microarquitectura de procesador utilizando el conjunto de instrucciones de *RISC-V*, en [16] se estudia la implementación en *FPGAs* de núcleos basados en *RISC-V*, los autores de [17] exponen la implementación de un *PLC* (*Programmable Logic Controller*) en un *FPGA* para la Industria 4.0 basándose en *RISC-V*. En [18] se presenta la implementación de un entorno de diseño y verificación para núcleos de procesadores *RISC-V* y en [19] se desarrolla una metodología de diseño para lenguajes *HDL*. A continuación se presenta una revisión de los trabajos recién mencionados y un ejemplo comercial de una implementación real basada en *RISC-V* por parte de la empresa *SiFive*.

2.3.1 A *RISC-V Instruction Set Processor-Micro- architecture Design and Analysis*

En [15] se presenta el diseño un procesador de 32 bits *single-core* basado en el *ISA* de *RISC-V*. El diseño se realiza utilizando el simulador *Blue-spec System Verilog* y se implementa en una plataforma *FPGA* y nodos de tecnología de 65nm y 130nm para *ASIC* (*Application-specific integrated circuit*).

Los autores adoptan una arquitectura *RISC* típica *single issue, pipelined* de 5 etapas (*Fetch, Decode, Register Select, Execute* y *Write Back*), con *in-order fetch, out-of order execution* e *in-order completion*. La arquitectura se puede ver en la figura 2.7. Por otro lado, la verificación de la *FPU*

implementada se realiza mediante *test benches* con *pseudo random test vectors* generados en *C*, y el *core* se verifica mediante archivos hexadecimales generados a partir de código ensamblador escrito a mano.

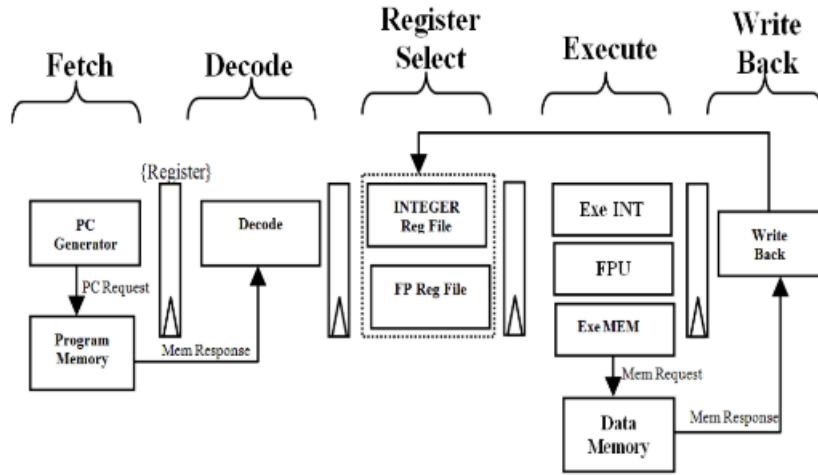


Figura 2.7: Arquitectura de nivel superior del procesador *RISC-V*. Fuente: [15].

En la etapa *fetch* se obtiene la instrucción desde la “memoria de instrucciones” a partir de la dirección indicada por el *PC*. Luego se envía la instrucción a la etapa de decodificación (*decode*) para la extracción de información de sus campos. La información extraída se envía a la etapa de *register select* (*RS*). Desde la etapa *RS* el “*pipeline*” se divide en tres unidades *pipelines* simultáneas, las instrucciones *integer* pasan por el *integer execution pipeline*, las instrucciones de memoria pasan por la *memory pipeline* y las instrucciones de coma flotante por la unidad *FP execution pipeline unit*. La etapa *Write Back* (*WB*) recibe las respuestas de estas tres etapas de ejecución simultáneas y, según la planificación de la instrucción, la etapa *WB* permite confirmar las instrucciones en orden. A continuación se explica cada una de estas etapas.

A- Fetch Stage

En la figura 2.8 se presenta la microarquitectura de la *fetch unit*. Esta unidad se encarga de computar/calcular el *PC* actual y de predecir el siguiente valor del *PC*. La unidad tiene un registro de 32 bits, el cual se encarga de almacenar el valor actual del *PC*, y un sumador de 32 bits que calcula el siguiente valor del *PC* sumando 4 al valor actual. El siguiente *PC* se predice mediante *PC + 4* o utilizando un sofisticado esquema de predicción de bifurcaciones (necesario para el manejo de *Control Hazards*).

El esquema de predicción de bifurcaciones (*branch prediction scheme*) consiste en dos unidades, *Branch Target Buffer* (*BTB*) y *Branch Predication* (*BP*), unidad “búfer de destino de bifurcación” y “predicción de bifurcación” respectivamente. La unidad *BTB* emite una señal booleana, *valid*, junto con la dirección *PC* de destino. *BP* entrega información booleana (*prediction*) que indica si el valor de *PC* está presente o no. Un multiplexor selecciona entre *PC + 4* o el *PC* predicho como el siguiente *PC*, en base de las señales *valid* y *prediction*. El *PC* actual y siguiente se entregan a la etapa *Decode Stage* para su posterior procesamiento.

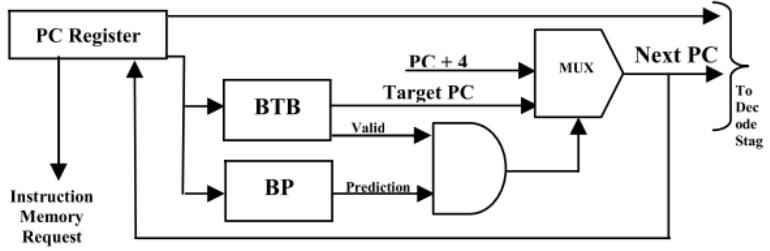


Figura 2.8: microarquitectura de la *fetch unit*. Fuente: [15].

B- Decode Stage

El decodificador de instrucciones recibe la instrucción desde la memoria de programa con su correspondiente *PC* y *PC* predicho desde la etapa de *fetch*. En la figura 2.9 se muestra el diagrama de flujo del decodificador de instrucciones. Basándose en los 7 bits menos significativos de la instrucción (*opcode*), las instrucciones se clasifican en uno de los grupos principales de instrucciones (*Branch Inst.*, *Load Inst.*, *Store Inst.*, *Arithmetic and Logic Inst.*, *Atomic Operations*, *System Inst.*, *Special*, *unconditional jump*, *Synchronization*). Luego se extrae el sub-grupo de la instrucción a partir del campo de 3 bits, *function field*. Las direcciones de los registros de fuente y destino están codificadas en campos de 5 bits cada uno y su posición es fija independientemente del tipo de instrucción. Si se ha producido una instrucción de tipo inmediata, los datos inmediatos se extienden por signo a 32 bits para su posterior procesamiento.

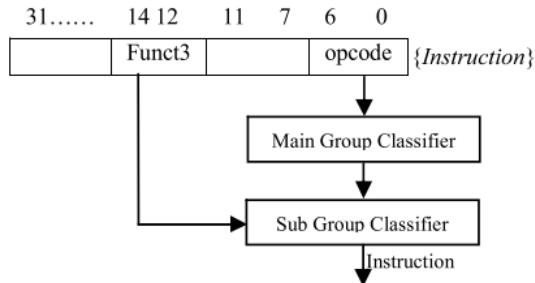


Figura 2.9: Diagrama de flujo del decodificador de instrucciones. Fuente: [15].

En la figura 2.10 se presenta la microarquitectura del decodificador de instrucciones. El *Op-code* se proporciona al clasificador de grupo principal, el cual proporciona la clase del grupo principal como salida. El clasificador de grupo principal tiene 7 comparadores en paralelo (*7-bit comparator*) para decodificar la clase del grupo principal. El *Op-code* de la instrucción se compara con 7 categorías de *Op-codes* al mismo tiempo. Si la salida de algún comparador se 'enciende' (*goes high*), se genera la señal del grupo principal correspondiente, de lo contrario, la instrucción que se decodifica se considera ILEGAL. Además, el clasificador de sub-grupos determina la operación exacta que debe realizar la instrucción. El sub-grupo se determina mediante un campo de 3 bits (*function field*) y el grupo principal. Si el campo de 3 bits, *function field*, de la instrucción concuerda con el campo de 3 bits de la clase principal decodificada, el clasificador de sub-grupos genera la categoría de sub-grupo correspondiente bajo la clase principal decodificada, de lo contrario, la instrucción cae bajo la categoría de ILEGAL.

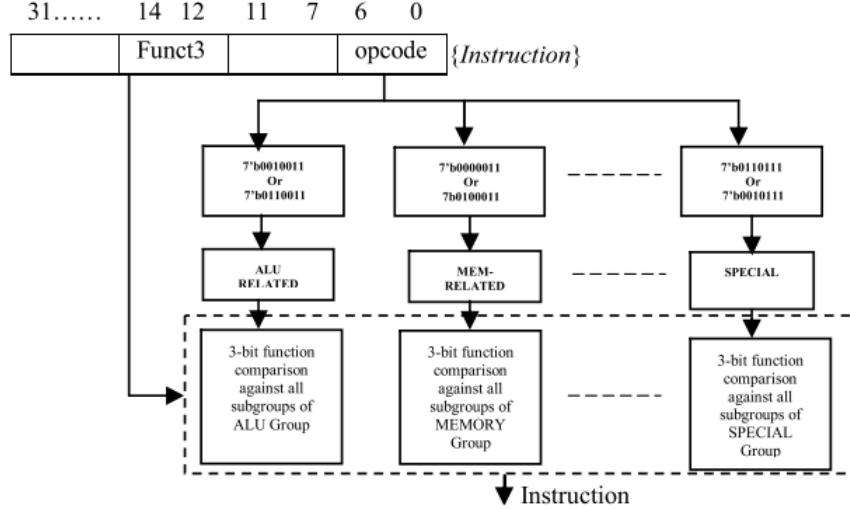


Figura 2.10: Microarquitectura del decodificador de instrucciones. Fuente: [15].

El decodificador genera señales de control para el procesamiento posterior de la instrucción. Las señales de control incluyen; *Register Access*, *Register update* y *Pipeline information* (el *pipeline* en la cual se programará la instrucción). *Register Access* puede ser acceso a archivos de registros enteros (*INT-ACCESS*), acceso a registros de punto flotante (*FP-ACCESS*) o sin acceso (*NO-ACCESS*). *Register update* indica qué archivo de registro debe volver a escribirse después de ejecutar la instrucción. El procesamiento de instrucciones se organiza a través de dos *pipelines* independientes para el cálculo de *ALU* de enteros / direcciones de memoria y *FPU*. La señal *EXPIPE* indica el *pipeline* a través del cual se debe procesar la instrucción.

Además de decodificar instrucciones, en esta etapa se detecta dependencia de datos (*Data Hazard Detection*) entre instrucciones. La información decodificada se reenvía hacia la etapa *Register Select Stage* en forma de un paquete junto el *PC* actual y predicho.

C- Register Select Stage

La etapa *RS* recibe la información codificada de las instrucciones desde la etapa anterior y selecciona los operandos ya sea desde un archivo de registro de punto flotante o entero. Esta etapa contiene un archivo de registros enteros (32 registros de 32 bits de ancho) y de punto flotante (32 registros de 64 bits de ancho). El archivo de registros (*Register file*) se implementa como una *RAM* (*Random Access Memory*), que tiene una latencia de un ciclo de reloj con tres puertos de lectura y un puerto de escritura.

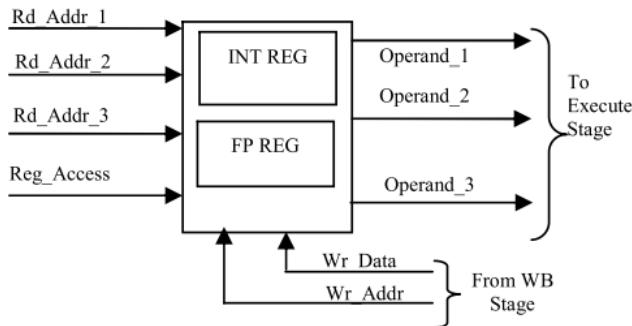


Figura 2.11: Organización del *Register File*. Fuente: [15].

En la figura 2.11 se muestra la organización del *Register file*. La unidad de *Register file* recibe tres direcciones de origen (*Rd_Addr_1*, *Rd_Addr_2* y *Rd_Addr_3*) y una señal de control (*Reg_Access*) que especifica el acceso a los archivos de registro (acceso entero o acceso de punto flotante). La salida del *Register file* es de 64 bits que contiene los datos del *Register file* de punto flotante o entero y tiene un puerto de escritura de 64 bits para el *write back*.

Basado en la información del *pipeline* proveniente de la etapa de decodificación, los operandos después del *Register Select* se entregan al *pipeline* de cálculo de *ALU* de enteros / direcciones de memoria o al *pipeline* de ejecución *FP* (*Floating Point*). Un programador de instrucciones *FIFO* (*First Input First Output*) que es parte de la etapa de ejecución de enteros/memoria/*FPU* se utiliza para programar las instrucciones en los diversos *pipelines* y confirmar las instrucciones en orden.

D- Execute Stage

Esta etapa consta de tres unidades simultáneas para operaciones aritméticas y lógicas enteras, etc., cálculo de direcciones de memoria de operandos y cálculo de coma flotante. La ejecución de enteros realiza operaciones aritméticas (suma, resta, multiplicación y división) y lógicas (*AND*, *OR*, *XOR* y desplazamiento). Además, la unidad aritmética entera calcula la dirección de destino para instrucciones de salto y bifurcación incondicional o condicional. La unidad de ejecución de enteros (*integer execution unit*) ejecuta las instrucciones relacionadas con el sistema, como las instrucciones *SCALL*, *SBREAK* para el acceso de nivel supervisor de la instrucción. Se utiliza un esquema *forwarding* de envío de datos eficiente para enviar la salida de las unidades de ejecución a la entrada de la misma. Por otro lado, las instrucciones relacionadas con la unidad de memoria calculan la dirección de la memoria de datos de destino para las operaciones de *load* y *store*. La microarquitectura de la unidad de ejecución *FP* sigue un esquema *out-of-order*, como no se busca una implementación compleja en el caso del trabajo presentado en este informe, no se considera la posibilidad de implementar una *FPU* bajo dicho esquema.

E- Write Back Stage

La etapa *WB* confirma la instrucción desde el *pipeline* y actualiza el archivo de registros con los resultados de las unidades de ejecución. *WB* lee la instrucción desde la parte superior de la instrucción programada *FIFO* y en base a la información del *pipeline*, lee unidades concurrentes de números enteros, de memoria o de coma flotante.

2.3.2 Open-Source RISC-V Processor IP Cores for FPGAs – Overview and Evaluation

En [16] se plantea la importancia que han adquirido los *FPGAs*, gracias a que cada vez pueden implementarse diseños más complejos debido a la reducción en los tamaños de los transistores que lo conforman y a la mejora de rendimiento con respecto a las frecuencias de reloj que llegan a conseguir. Esto junto a los acotados plazos de desarrollo del mercado actual, impulsa a que cada vez más microprocesadores sean implementados en este tipo de dispositivos a escala comercial.

El trabajo de los autores es un análisis y pruebas, usando un *FPGA*, de *CPUs* de *Hardware Libre*, centrándose en *RISC-V*. En el texto hablan de “*CPU IP core*”, *IP* viene de *intellectual property*, los *IP cores* comerciales representan una metodología para la implementación de tecnología en cortas ventanas de tiempo de desarrollo y son la base de diseño de múltiples *SoCs*, por lo que estudian los alcances de la propiedad intelectual del *Hardware Libre* como tal.

En el texto estudiado también se señalan ciertas consideraciones a tomar en cuenta a la hora de utilizar *CPU IP cores* comerciales:

- Los *CPU cores* comerciales existentes de los proveedores de *FPGA* suelen depender de la tecnología. Por lo tanto, no es posible trasladar el diseño a dispositivos de otros proveedores de *FPGA* sin cambiar también el *CPU core*.
- Por otro lado existen familias de *FPGA* con *CPU cores* cableados (*hard-wired*) (por ejemplo, la arquitectura ARM Cortex). Estos *CPU cores* brindan un rendimiento excelente (frecuencias de reloj superiores a 1 GHz), pero los costos se elevan.
- Para el caso anterior, es prácticamente una necesidad agregar una memoria externa al chip *FPGA*, debido a que la RAM incorporada en dicho chip es insuficiente para el *CPU core* cableado del sistema; lo que aumenta los costos.

Los autores mencionan las cualidades del *ISA* libre de *RISC-V* y destacan que realizando búsquedas de texto completo de palabras clave significativas de los últimos 5 años (desde la fecha de la publicación en 2019); ha disminuido la cantidad de menciones de *commercial soft CPU IP core* y aumentado las menciones de *open-source CPU IP core*, en especial las de *RISC-V*. En la figura 2.12 se puede ver la gráfica con estos datos.

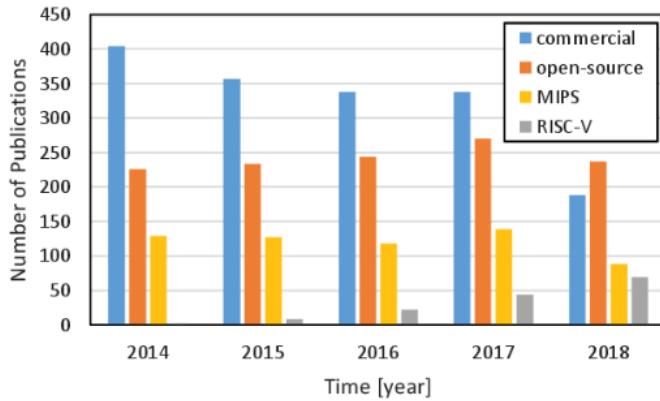


Figura 2.12: Número de menciones en las publicaciones de diferentes *CPU IP cores*. Fuente: [16].

2.3.3 *RISC-V based implementation of Programmable Logic Controller on FPGA for Industry 4.0*

Los autores de [17] implementan un *PLC* (*Programmable Logic Controller*), como producto para la industria 4.0 y el *IIoT* (*Industrial Internet of Things*), basándose en *RISC-V* y utilizando un *FPGA* como plataforma. Un *PLC* es un dispositivo programable enfocado a reemplazar las antiguas técnicas de control industrial basados en relés, como se indica en el texto, cada vez se les exigen más características y capacidades, pero los productores de *PLCs* no han ahondado en mejorar el mecanismo por el cual ejecutan sus programas; por lo que el foco de su trabajo recae en optimizar dicho mecanismo. Por otro lado, comentan los diversos lenguajes que se utilizan para manejar un *PLC*; *Instruction List (IL)*, *Structured Text (ST)*, *Ladder Diagram (LD)* y *Function Block Diagram (FBD)*.

La industria 4.0 requiere la gestión de las conexiones entre sensores, *PLCs* y los dispositivos computacionales en la nube. Por lo que los autores proponen que al integrar los *PLCs* en un *FPGA* se abra la puerta para poder integrar otros componentes en el mismo chip (osea un *SoC*); esto permitiría el paso a la próxima generación de la industria de fabricación, donde se necesita una

puerta de enlace entre la tecnología de la información (*Information Technology (IT)*) y la tecnología operativa (*Operation Technology (OT)*).

En la figura 2.13 se puede apreciar la arquitectura propuesta para el *PLC*, es un diagrama de bloques que ilustra los componentes básicos propuestos por parte de los autores.

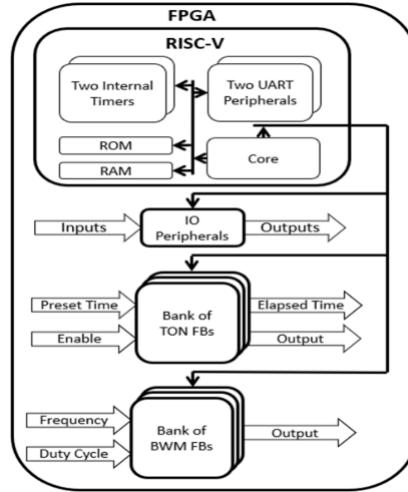


Figura 2.13: La estructura de la arquitectura PLC propuesta. Fuente: [17].

2.3.4 Design and Verification Environment for RISC-V Processor Cores

En [18] se desarrolla un entorno de diseño y verificación orientado a *RISC-V*; el objetivo de estos entornos es comprobar que cada una de las unidades funcionales del procesador se comuniquen correctamente entre si. Esto con el fin de disminuir complejidad y tiempos en la etapa de verificación.

En el texto se comentan las ventajas de *RISC-V* al ser *Hardware Libre* bajo la licencia “*Berkeley Software Distribution (BSD) open-source license*”. También, se destaca el potencial que representa la comunidad de *RISC-V*, la cual provee soporte de *software* como; *compiler toolchains*, *integrated Development Environment (IDA)*, sistemas operativos orientados a sistemas embebidos y un *framework* para la verificación formal (es decir que usa métodos matemáticos para comprobar el correcto funcionamiento del diseño) llamado *riscv-formal*, el cual utiliza el *RISC-V Formal Interface (RVFI)*. Por otro lado, se recalca la estabilidad de *RISC-V*, debido a que sus *ISAs* base están congeladas. Además, se destaca el apoyo a la fundación de *RISC-V*, sin fines de lucro, con miembros como *Google*, *Nvidia* o *Qualcomm* (entre más de 100), lo que indica la estabilidad del *ISA* y el impacto de este en el futuro cercano.

Los autores proponen un modelo que consta de dos unidades; un emulador que actuó como *golden reference model* y un *disassembler* (traduce lenguaje de máquina a lenguaje ensamblador), ambos escritos en *Verilog*. El emulador se conecta con el flujo de instrucciones ejecutadas por el modelo del procesador, si ocurre alguna inconsistencia es reportada por el emulador. Mientras, el *disassembler* traduce y muestra las instrucciones para facilitar el proceso de depuración.

2.3.5 Co-verification design flow for HDL Languages

En [19], los autores presentan una metodología de trabajo enfocada al diseño de sistemas complejos en *HDL* sobre *FPGAs*. Indican que cerca del 60 % del tiempo del diseñador se utiliza en realizar pruebas. Por ello, proponen una metodología de diseño y prueba que reduzca el tiempo ocupado en

simulaciones y verificaciones.

En la figura 2.14 se puede apreciar el típico desarrollo de este tipo de diseños. El problema que se presenta es que el modelo del sistema (*System Model*) debe concordar con el modelo *HDL*; pero estos códigos/modelo pueden evolucionar constantemente por lo que se pueden llegar a presentar multiples fallas o *bugs*, en especial en procesos de desarrollo ágiles.

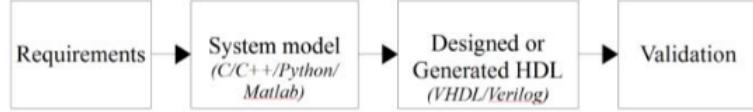


Figura 2.14: Proceso de desarrollo típico. Fuente: [19].

El enfoque propuesto para resolver este problema se puede apreciar en la figura 2.15, consiste en el uso de herramientas y metodologías para simplificar el diseño de código en *HDL* a partir del *System Model* y la co-verificación automática para asegurar que la implementación se comporte correctamente. Sin embargo, se enfocan en diseños *fixed-point*

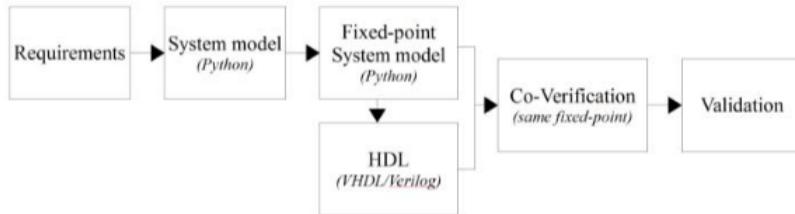


Figura 2.15: Proceso de desarrollo de co-verificación. Fuente: [19].

2.3.6 Ejemplo de una implementación real: *HiFive Rev B*

HiFive Rev B es una tarjeta de desarrollo, similar a *Arduino*, de la compañía *SiFive*. Se puede ver en la figura 2.16. El chip que controla esta tarjeta es el *SiFive FE310-G002* y su procesador está basado en *RISC-V*.

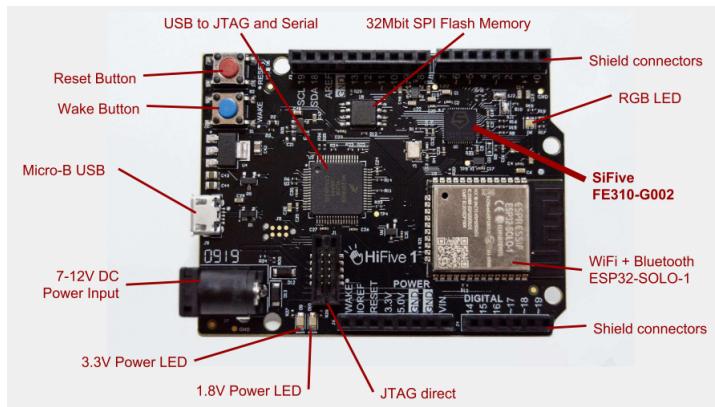


Figura 2.16: Tarjeta *HiFive1 Rev B*. Fuente: [20].

La gracia de esta tarjeta es que posee conectividad inalámbrica (*WiFi* y *Bluetooth*) y pines de conexión *serial/I₂C/SPI* (ver figura 2.17) para comunicarse, sin embargo, esta tarjeta no incluye cálculo de punto flotante mediante *hardware* [20].

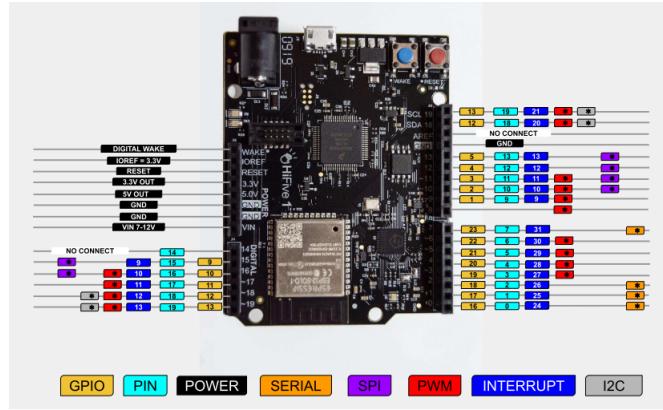


Figura 2.17: *Pinout* de la tarjeta *HiFive1 Rev B*. Fuente: [20].

Por otro lado, en [21] se dispone del *datasheet* del chip *SiFive FE310-G002*, donde se puede apreciar el diagrama de bloques de nivel superior del mismo (ver figura 2.18). Este es un buen ejemplo de implementación de un *SoC*. En [22] se puede verificar que el diseño realizado consta de 5 etapas *pipelined*.

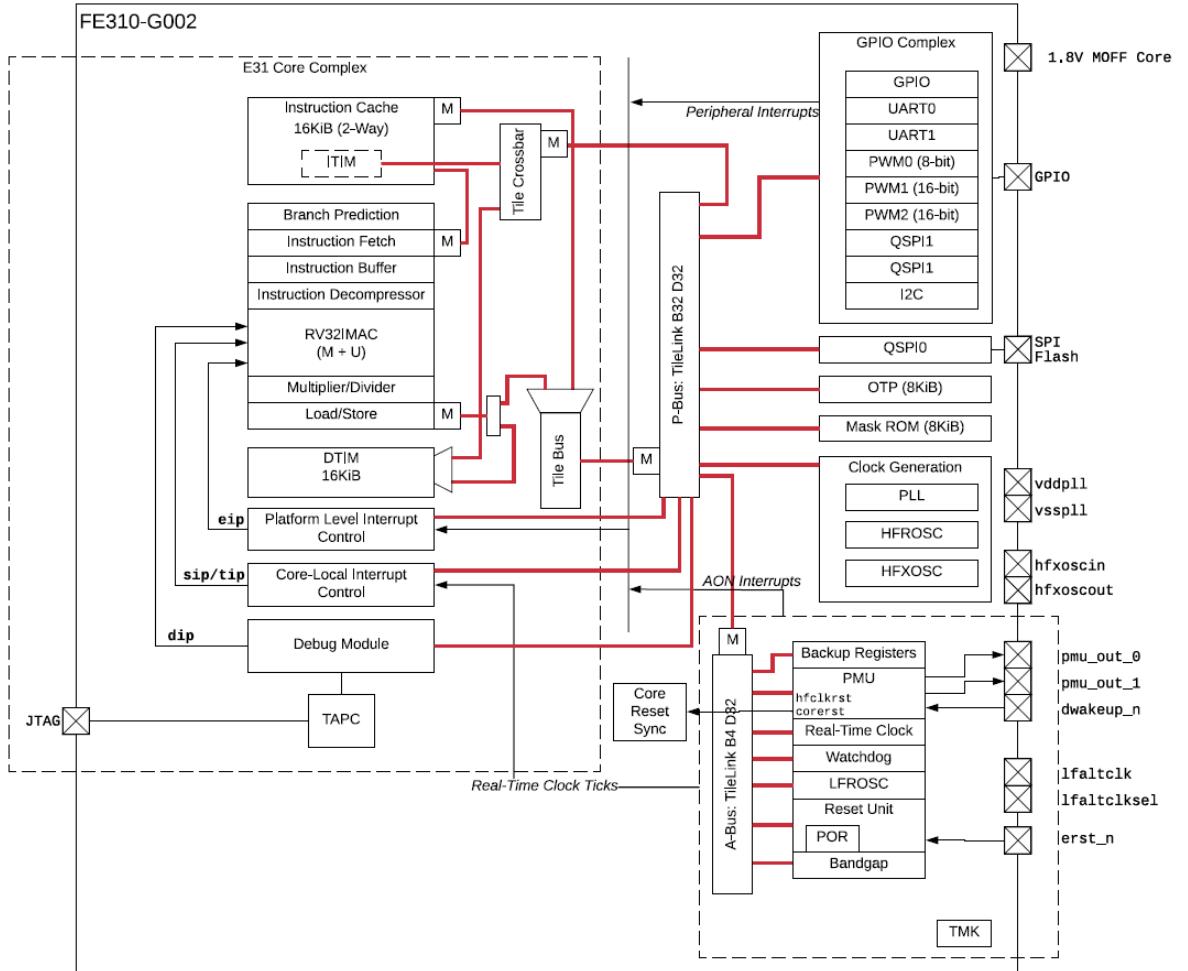


Figura 2.18: Diagrama de bloques de nivel superior del chip *SiFive FE310-G002*. Fuente: [21].

2.4 Tarjeta *FPGA* y *software* utilizado

En esta sección se presentan las herramientas utilizadas en el proceso de desarrollo, verificación e implementación de los diseños digitales obtenidos. Para la implementación, como ya se ha mencionado, se dispone de una tarjeta de desarrollo *FPGA*, en este caso la *Nexys 4* [23]. Los diseños digitales a implementar se desarrollan y verifican utilizando un lenguaje de programación especializado de tipo *HDL (hardware description language)*, utilizado para describir *hardware*. Para este tipo de lenguajes hace falta un *software* de desarrollo especializado en la síntesis, verificación e implementación de diseños digitales, en este caso se trata de *Vivado Design Suite*, proveído por *Xilinx* [24]. Finalmente, para la escritura y verificación de código ensamblador para *RV32IMF* se dispone de la herramienta *RARS 1.5* [25].

2.4.1 *Nexys 4*

Un *FPGA (Field Programmable Gate Arrays)* es, en palabras simples, una pieza de *hardware* fabricada en silicio capaz de reconfigurarse dinámicamente, es decir que es capaz de cambiar su estructura interna (la conexión de los transistores que la componen), lo que permite implementar diferentes diseños de *hardware* en el mismo chip y actualizarlos de ser necesario. Tal es la versatilidad de esta tecnología que en [7] se habla de su importancia y su posible papel revolucionario en el internet de las cosas (*IoT*) junto al venidero 5G, y es gracias a esta misma versatilidad que habilita implementar actualizaciones a nivel de *hardware* para el manejo de los nuevos estándares de comunicaciones y su posibilidad de personalización. También, evita la necesidad de invertir en un nuevo *hardware* específico para el manejo de estas nuevas tecnologías y permite el desarrollo de aceleradores, los cuales se podrían implementar en base al *ISA* libre de *RISC-V*.

La tarjeta utilizada corresponde a la *Nexys 4* (figura 2.19), fabricada por *Digilent* y basada en el chip *FPGA Artix-7 100T* de *Xilinx*. Esta tarjeta es una plataforma de desarrollo de circuitos digitales completa y lista para usar que cuenta con generosas memorias externas y varios periféricos incorporados que permiten el uso de esta tarjeta en una amplia gama de diseños sin necesidad de otros componentes, se destacan [23]:

- 16 interruptores de usuario.
- 16 *LEDs* de usuario.
- 2 *LEDs* tri-color.
- 2 pantallas de 4 dígitos de 7 segmentos.
- 5 pulsadores + 1 de reinicio *CPU* + 1 de reinicio de configuración *FPGA*
- Puerto *USB UART/JTAG* compartido.
- Micrófono (*PDM*).
- Conector *VGA* de 12 bits.
- Conector de audio (+ salida de audio *PWM*).
- Conector *Ethernet*.
- Conector de host *USB*.
- Sensor de temperatura.
- Acelerómetro de 3 ejes.
- 16MB de *Cellular RAM*.
- Conector de tarjeta *Mirco SD*.

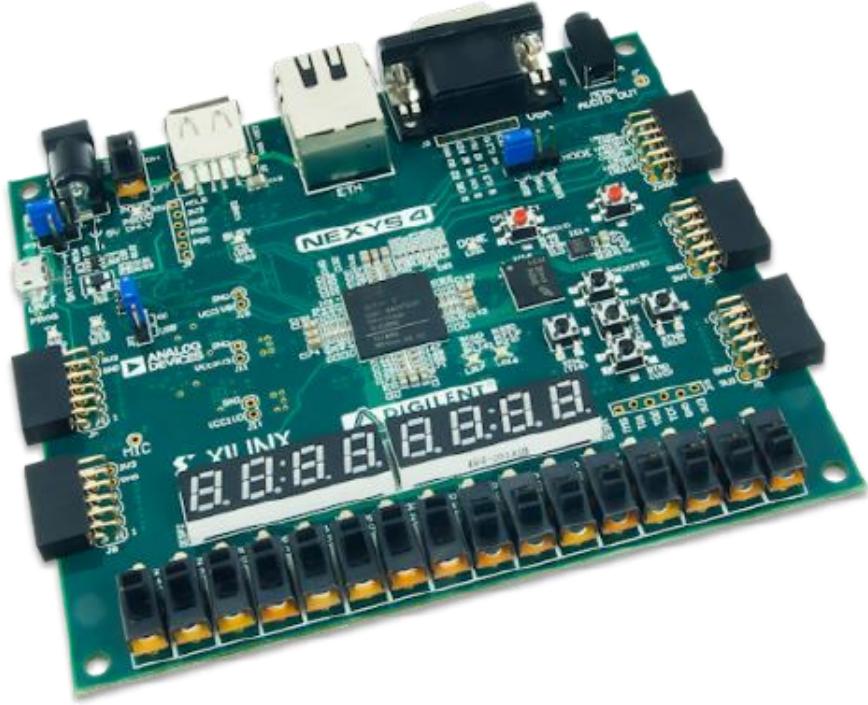


Figura 2.19: Tarjeta utilizada, la *Nexys 4*. Fuente: [23].

Por otra parte, es importante destacar que el *Artix-7 100T* cuenta con:

- 15.850 *logic slides*, cada uno con cuatro *6-input LUTs (look-up tables)* y 8 *flip-flops*.
- 4.860Kb de *fast block RAM*.
- 240 *DSP slices (Digital Signal Processing)*.
- Un *analog-to-digital converter (XADC)* en el chip.
- Velocidades de reloj interno superiores a 450MHz.
- 6 *clock management tile (CMT)*, cada uno con *phase-locked loop (PLL)*.

2.4.2 *Vivado Design Suite* de *Xilinx*

Tal como se indica en [23], la *Nexys 4* es compatible con la herramienta *Vivado Design Suite*, software desarrollado por *Xilinx*, compañía inventora de la tecnología *FPGA* [24]. Esta *suite* de desarrollo, *Vivado*, entrega herramientas de síntesis, simulación e implementación de diseños escritos en *HDL*, por lo que su función es tomar el código fuente con dichos diseños para sintetizarlo en un circuito digital viable. A partir de dicha síntesis, se puede realizar una implementación en la misma *suite* para el chip *FPGA* deseado, garantizando la compatibilidad del diseño sintetizado con el *FPGA* utilizado. Posteriormente, se genera el archivo (*bitstream*) que permite cargar los diseños en el *FPGA*. Por otro lado, para crear pruebas de verificación (*test benches*) se usa el mismo lenguaje *HDL* y *Vivado* permite ejecutar simulaciones junto con la visualización de la evolución de todas las señales del sistema en una línea de tiempo.

Dentro de los lenguajes *HDL* que *Vivado 2020.2* (versión utilizada) admite se encuentran; *VHDL*, *Verilog* y *System Verilog*. El lenguaje utilizado para el proyecto es *System Verilog*, el cual se encuentra definido por la *IEEE* en [26]. Se usa este lenguaje debido a su simplicidad en comparación con *VHDL* y por ser una actualización de *Verilog*.

2.4.3 *RARS* 1.5

Para la elaboración de código de prueba para el *SoC* se utiliza *RARS*. Esta herramienta, desarrollada por *Pete Sanderson* y *Kenneth Vollmar*, es un simulador de *RISC-V*. La última versión es la 1.5 y se encuentra disponible en [GitHub](#) en formato “.jar”. *RARS* permite escribir instrucciones de máquina, ensamblador o *assembler*, y verificar su funcionamiento a nivel de registros y memoria. Además, presenta una amplia documentación, integrada en la misma aplicación, de las instrucciones de *RISC-V* [25].

Este *software* se utiliza para contrastar el resultado de un código de prueba en las simulaciones de *Vivado* y en *hardware* con el de *RARS*. Gracias a la posibilidad de ejecutar instrucción por instrucción, ver los accesos a memoria y los accesos de registros en *RARS* se facilita la etapa de depuración de la *CPU* y del *SoC*.

Otra importante función que entrega *RARS* es la posibilidad de compilar código ensamblador en diferentes formatos y exportarlo, como puede ser texto plano en formato hexadecimal o binario. Si bien existen herramientas, *toolchains*, gratuitas proveídas por la fundación *RISC-V* (disponibles en [GitHub](#)) específicas para compilar código escrito en *RISC-V*, estas están pensadas para implementaciones de mayor complejidad arquitectónica y no resultan útiles ni cómodas para trabajar en la implementación. Por ejemplo, para obtener el código ensamblador compilado en un archivo de texto con cada instrucción en formato hexadecimal o binario se debe escribir un código que ejecute comandos de compilación especiales, además de tener que instalar el *toolchain*, lo cual termina siendo un proceso muy laborioso en comparación a las funciones que ofrece *RARS*. Esto sin mencionar que el *toolchain* suele asumir soporte para sistemas operativos, lo que añade líneas de código extra (innecesarias y molestas en este caso) para el manejo de múltiples *harts* y del entorno de ejecución.

3 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo empleada para el desarrollo de los diseños del *SoC* se basa en el enfoque *Top-Down*. Por otra parte, para la metodología de verificación de los diseños se opta por el método utilizado en 2.3.1. A continuación, se presenta la metodología de diseño *Top-Down* estudiada en [10], el flujo de trabajo y los detalles de la metodología de verificación empleada.

3.1 Metodología de diseño *Top-Down*

Esta es una filosofía/metodología de diseño para sistemas digitales grandes y complejos que permite el trabajo en equipo (factor que no se aprovecha en este trabajo), entre sus ventajas se destaca [10]:

- Permite el manejo de diseños grandes y complejos.
- Permite esfuerzos simultáneos e independientes.
- Permite eliminar tempranamente problemas serios de la arquitectura.
- Identifica tempranamente módulos reusables.

Y entre sus desventajas se puede destacar que; hay ciertas decisiones que no se pueden tomar sin tener alguna implementación y que podrían significar el doble de esfuerzo.

El enfoque de esta metodología de diseño se puede apreciar en la figura 3.1, donde se propone un modelo compuesto por señales externas de entrada, salida, e internas de control y decisión, más un sistema controlado y uno controlador.

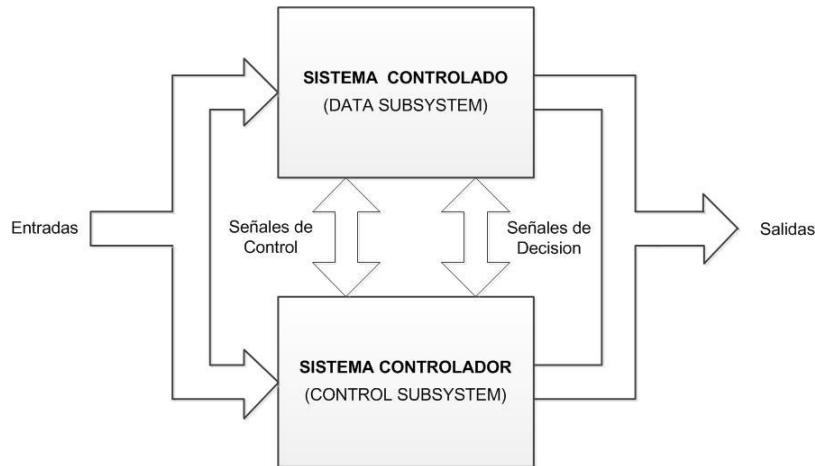


Figura 3.1: Enfoque Diseño Contemporáneo (*Top-Down*). Fuente: [10].

Como se puede desprender de lo anterior, la idea es separar el sistema controlado del controlador y que estos se comuniquen mediante señales internas (control y decisión). La metodología *Top-Down* considera la realización de diagramas simplificados y detallados de la siguiente forma:

1. Primero se realiza un diagrama de bloques simplificado, donde se identifica cada uno de los bloques/componentes necesarios para el funcionamiento del sistema.
2. Luego, a partir del diagrama anterior, se elabora un diagrama de flujo simplificado; este diagrama muestra de forma sencilla la lógica (algoritmo) del sistema controlador y su interacción con el sistema controlado.
3. A partir del diagrama de bloques y flujo simplificados se elabora el diagrama de bloques detallado, donde se especifican cada una de las señales E/S y de control/decisión pertinentes.

4. Una vez detallado el diagrama de bloques se utiliza, junto al diagrama de flujo simplificado, para elaborar un diagrama de flujo detallado, donde se consideran las señales identificadas en el punto anterior.
5. A partir de este último diagrama de flujo detallado se construye un diagrama *MDS* (*Mnemonic Documented State*); este diagrama muestra de forma clara cada uno de los estados posibles del sistema, las señales de transición y las señales que se generan en cada estado de la *FSM* del sistema controlador.
6. Una vez obtenido el diagrama *MDS* se pasa a la fase de implementación, simulación y pruebas mediante el uso de algún lenguaje *HDL*.

3.2 Flujo de trabajo

El flujo de trabajo empleado se puede separar en las siguientes etapas:

- **Etapa de planteamiento** inicial, aquí se define la arquitectura del *SoC* a nivel general. Se identifican los submódulos del mismo, del entorno de ejecución y del procesador.
- **Etapa de diseño** de cada componente identificado anteriormente utilizando la metodología *Top-Down*.
- **Etapa de verificación** que consta de pruebas/simulaciones para los diseños obtenidos en la etapa anterior.
- **Etapa de rediseño** para mejorar rendimiento y/o solucionar problemas encontrados en la etapa anterior.
- **Etapa de iteración** de las etapas de verificación y rediseño hasta que cada uno de los componentes identificados en la etapa de diseño funcione correctamente.
- **Etapa de integración** de todos elementos del *SoC* y verificación del funcionamiento del *SoC* mismo. De ser necesario se vuelve a la etapa de iteración considerando los modulos que presenten fallas durante las simulaciones.
- **Etapa de implementación** física en el *FPGA* con sus pruebas de funcionamiento. Si hace falta se vuelve a la etapa de iteración.

Considerando estos puntos y la metodología de diseño presentada en la sección 3.1: primero se confecciona un diagrama de bloques general (de nivel superior), que contemple la *CPU* y el resto del *hardware* del *SoC*, por lo que hace falta definir las funciones preliminares del mismo. Luego, se comienza con el diseño de los elementos más complejos a los simples, comenzando con el *CPU* y cada uno de los submódulos del mismo, para terminar con el *hardware* del entorno de ejecución y del *SoC*. Todo esto siguiendo el flujo de trabajo antes descrito.

Los detalles del diseño final del *SoC* obtenido se presentan en 4. En 5 se presenta la implementación realizada y las pruebas realizadas al *SoC* en forma de simulaciones (ya sea sobre submódulos o el *SoC* completo) y sobre *hardware*. Ahora se explica la metodología de verificación empleada para distintos casos de *UUT* (*unit under test*).

3.3 Metodología de verificación

Similar a lo expuesto 2.3.1, la verificación empleada se basa en *test benches* sobre la *UUT*. Cuando el módulo es muy simple no se realiza verificación, si tiene un mayor grado de complejidad se escribe el *test bench* directamente en *System Verilog*. Para casos aun más complejos, como la *ALU* o *FPU*, se generan estos *test benches* en *System Verilog* mediante un código escrito en *C* que escribe pruebas con entradas generadas de forma pseudo-aleatoria. Los detalles de las pruebas y simulaciones

realizadas a cada módulo relevante con esta metodología de verificación se presentan en el anexo 4.1.

Lo anterior solo se refiere a la verificación de los módulos que conforman el *core* y el *SoC*. Sin embargo, para comprobar el funcionamiento de estos últimos se debe ejecutar algún programa de prueba en el *core* del *SoC*. Por ello, se escriben a mano códigos de prueba en lenguaje ensamblador, considerando las llamadas de sistema permitidas por el entorno de ejecución implementado y las instrucciones presentadas en las tablas 2.6, 2.7 y 2.9. Estos códigos de prueba se testean en *RARS* para asegurar su compilación y correcta ejecución. La misma herramienta *RARS* permite exportar el código compilado y el estado inicial (y final) de la memoria de datos en formato de texto plano con representación hexadecimal o binaria. Luego con un pequeño *script* de *Python* se reordenan las palabras de 8 bytes según la configuración de la memoria implementada en el *SoC*, con esto se puede precargar el estado inicial de la memoria de programa y datos del *SoC* al momento de encenderse. Los detalles de este procedimiento se presentan en 5.1.

Una vez con el programa cargado en la memoria del procesador se realiza el *test bench* para el comportamiento esperado de dicho programa y comprobar su correcto funcionamiento. En este caso, es especialmente importante la visualización de las señales en la línea de tiempo, por sobre todo los cambios de los registros, los accesos a memoria, el avance del *PC* y de las instrucciones. Todos los datos mencionados y más se contrastan con la simulación del mismo código en *RARS* para la depuración de los diseños (note que las llamadas a sistema del entorno implementado y de *RARS* deben concordar para poder realizar esta tarea). Nuevamente, este proceso es similar al del trabajo presentado en 2.3.1, pero aprovechando las bondades de *RARS*.

En cuanto al proceso de verificación sobre *hardware* del *SoC* completo, se limita a comprobar el correcto funcionamiento del programa cargado y la estabilidad del mismo. Los detalles de los resultados obtenidos de esta verificación se presentan en 5.2.

Por otra parte, considerando la metodología de verificación presentada en la sección 2.3.4 se pueden apreciar similitudes con respecto a la utilizada, puesto que *RARS* hace de *disassembler* y *golden reference model* al mismo tiempo. En cuanto a la metodología expuesta en 2.3.5, es desestimada al considerarse mayor la curva de aprendizaje de su implementación que sus beneficios potenciales y poco útil a estar enfocada a diseños *fixed-point*.

4 Diseño propuesto

En esta sección se presenta el proceso de diseño realizado y el resultado del mismo. En primera instancia, tal como se indica en 3.2, se realiza un planteamiento inicial. En este planteamiento se estudian ejemplos de *SoCs*, como el de las figuras 2.13 y 2.18, para luego elaborar el diagrama de bloques de nivel superior propuesto del *SoC* a implementar, el cual se puede ver en la figura 4.1.

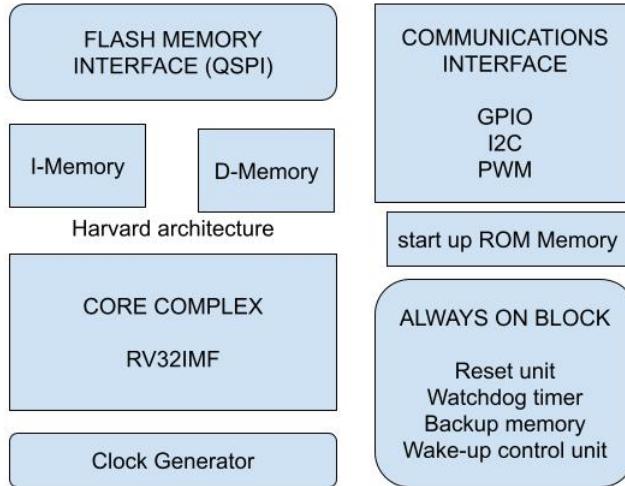


Figura 4.1: Diagrama de bloques de nivel superior propuesto en primera instancia para el *SoC*.

Observando la figura 4.1 se puede apreciar el planteamiento de un procesador con arquitectura de tipo *Harvard* (ver sección 2.1.2). Luego, se centra la atención en el *core complex*, el cual se basa en los juegos de instrucciones *RV32Iv2.1*, *RV32Mv2.0* y *RV32Fv2.2*, las últimas versiones disponibles según [8]. Se propone, en un principio, un diseño de 5 etapas *Pipelined* en base al trabajo de [15]. Sin embargo, se decide implementar el enfoque *Pipelined* de [12] al considerarse más simple e ilustrativo para una primera implementación de un procesador de este tipo, por lo mismo y siguiendo la metodología *Top-Down*, se propone el diagrama de bloques simplificado de la figura 4.2, donde se identifican las etapas *pipeline* consideradas, estas son: *Instruction Fetch (IF)*, *Instruction Decode & Register Select (DR)*, *Execution or Address calculation (EX)*, *Data Memory Access (MEM)* y *Write Back (WB)*. Otra razón para cambiar al enfoque presentado en [12], es para poder empezar con el diseño de una versión *Single-Cycle* con el objetivo de realizar la conversión a *Pipelined* de forma más sencilla.

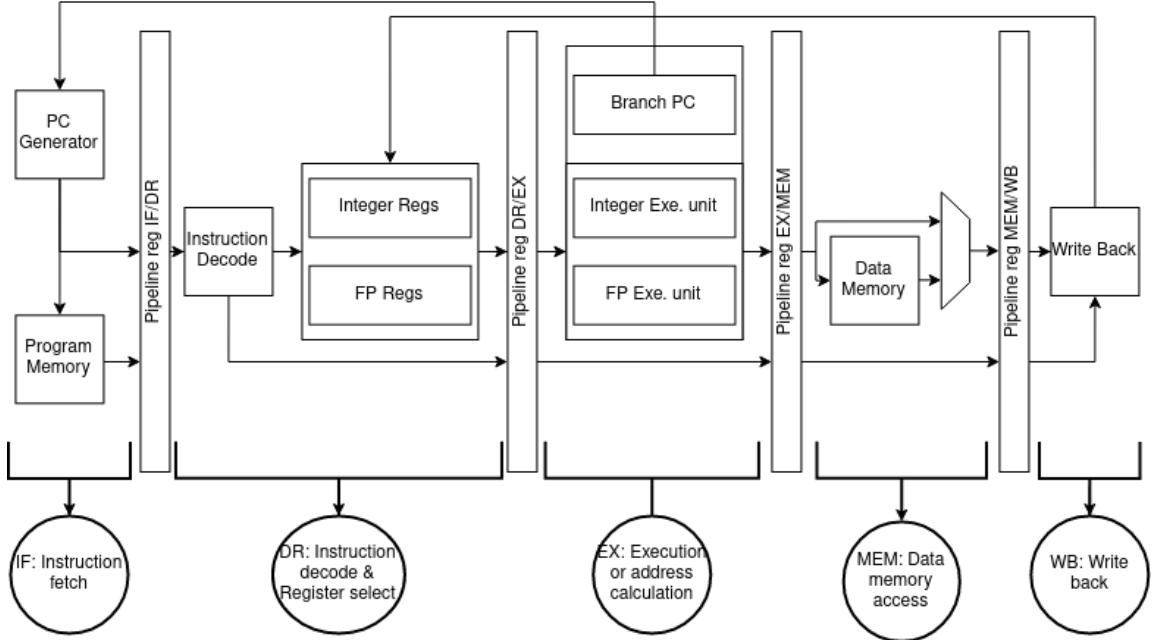


Figura 4.2: Diagrama de bloques simplificado *core complex pipelined*.

En la figura 4.2 ya se pueden apreciar los principales submódulos del *core complex*, como la *ALU*, *FPU*, *Register Files*, *PC generator*, *Instruction Decode*, *Write Back* y las memorias de datos y programa. De todos los módulos recién mencionados, el más complejo de diseñar e implementar es la *FPU*. Debido a estas dificultades en el proceso de diseño, verificación y depuración del mismo (rediseño) y el tiempo requerido en ello, se decide modificar la propuesta de *SoC* de la figura 4.1 y simplificar el mismo.

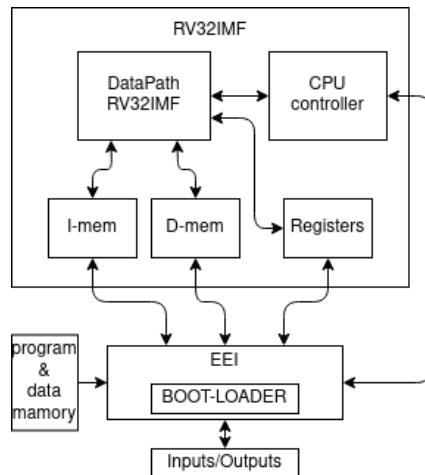


Figura 4.3: Diagrama de bloques de nivel superior (simplificado) propuesta final para el *SoC*.

El diagrama de bloques simplificado del nuevo *SoC* propuesto se puede ver en la figura 4.3. Las únicas diferencias de este diagrama con la implementación final, radica en los bloques “*program & data mamory*” y “*BOOT-LOADER*”. Esto se debe a que no se implementa *ROM* por temas de tiempo, por ello se carga directamente el código que ejecuta el *SoC* a las *BRAM* (*Block RAM*) del *core complex*. En la figura 4.3 se aprecia que el *EEI* (*Execution Environment Interface*) debe tener acceso a las memorias y al *Register Files*, esto con el fin de cargar programas, leer y cargar datos

en el *hart* e interpretar/recibir llamadas de sistemas. Además, el *EEI* le indica al *core complex* con que *PC* inicial la ejecución y cuando iniciarla, luego espera a que la ejecución termine con alguna llamada de sistema o algún error/excepción (trampas).

Como se indica en 3, la etapa de diseño se basa en la metodología *Top-Down*. Sin embargo, no se aplica la metodología completa para cada submódulo, se puede aplicar de forma completa, parcial o no aplicar directamente según la complejidad de cada módulo/submódulo.

A continuación, se presenta el diseño de cada módulo y submódulo del *SoC* obtenido a partir del planteamiento inicial recién presentado. Primero se explican las unidades básicas de *Instruction Decoder*, *Register Files* y la *ALU*, para continuar con las más complejas como las unidades de memoria (al implementar *Cache Controller*) y la *FPU*. Finalmente, se presentan los diseños obtenidos del *core complex* y del *EEI*, los cuales representan la implementación completa del *SoC*.

4.1 *Instruction Decoder*

El *Instruction Decoder* es completamente combinacional y tiene la función de recibir la instrucción ($in[31 : 0]$) a ejecutar y retornar la información contenida en cada uno de sus campos (ver tabla 2.5). Además, se encarga de extender a 32 bits el signo del campo *imm* según el tipo de instrucción y activar la señal *is_imm_valid* si dicho campo es válido. Los campos que se retornan directamente son: $funct3[2 : 0] = in[14 : 12]$, $funct2[1 : 0] = in[26 : 25]$ (este campo es ignorado en el resto del diseño porque para el juego de instrucciones implementado no tiene relevancia), $rd_add[4 : 0] = in[11 : 7]$, $rs1_add[4 : 0] = in[19 : 15]$, $rs2_add[4 : 0] = in[24 : 20]$ y $rs3_add[4 : 0] = in[31 : 27]$.

| format_type[2:0] | |
|------------------|------|
| FMT | code |
| R | 000 |
| R4 | 001 |
| S | 011 |
| B | 100 |
| U | 101 |
| J | 110 |
| I | 010 |
| not validid | 111 |

Tabla 4.1: Codificación para *format_type* según el tipo de la instrucción.

Por otro lado, el campo *opcode* de la instrucción se codifica en dos señales: *format_type[2 : 0]* y *sub_format_type[2 : 0]*, la primera señal indica el tipo de instrucción (*R/R4/I/S/B/U/J*) y su codificación se puede apreciar en la tabla 4.1. Mientras que la segunda señal, *sub_format_type*, realiza una segunda clasificación según el subtipo de la instrucción, esta clasificación se puede apreciar en la tabla 4.2.

| sub_format_type[2:0] | | | | | |
|----------------------|--------|----------|------------|---------|---|
| code | R | R4 | S | U | I |
| 000 | RV32F | fmadd.s | fsw | lui | flw |
| 001 | RV32IM | fmsub.s | sb, sh, sw | auipc | addi, xori, ori, andi, slli, srli, srai, slti, sltiu |
| 010 | - | fnmsub.s | - | - | lb, lh, lw, lbu, lhu |
| 011 | - | fnmadd.s | - | - | jalr |
| 100 | - | - | - | - | ecall, ebreak |
| 111 | | | | default | |

Tabla 4.2: Codificación para *sub_format_type* según el subtípo de la instrucción.

Otro campo que debe analizar este módulo es $funct7[6 : 0] = in[31 : 25]$, la salida para este campo es *funct7_out[3 : 0]* y está definida en la tabla 4.3.

| funct7[6:0] | funct7_out[3:0] |
|-------------|-----------------|
| 0000000 | 0000 |
| 0000001 | 0001 |
| 0100000 | 0010 |
| 0000100 | 0011 |
| 0001000 | 0100 |
| 0001100 | 0101 |
| 0101100 | 0110 |
| 0010000 | 0111 |
| 0010100 | 1000 |
| 1101000 | 1001 |
| 1100000 | 1010 |
| 1110000 | 1011 |
| 1111000 | 1100 |
| 1010000 | 1101 |
| not validid | 1111 |

Tabla 4.3: Codificación para *funct7_out* según el *funct7* de la instrucción.

Finalmente, considerando que las instrucciones de *RV32F*, definidas en la tabla 2.9, pueden presentar accesos a registros flotantes y enteros, hace falta una última señal de control de acceso de registros. Esta señal es *reg_access_option[1 : 0]* y se obtiene a partir del *opcode* (*format_type* y *sub_format_type*) y *funct7* (*funct7_out*), su codificación se presenta en la tabla 4.4.

| reg_access_option[1:0] | | | |
|------------------------|----|-----|-----|
| code | rd | rs1 | rs2 |
| 00 | I | I | I |
| 01 | FP | I | FP |
| 10 | I | FP | FP |
| 11 | FP | FP | FP |

Tabla 4.4: Codificación para *reg_access_option* según el acceso a registros de la instrucción. *I* indica acceso a registros enteros y *FP* a registros flotantes. Nota: *rs3* siempre es flotante.

4.2 Register Files

Esta unidad tiene la función de almacenar, entregar y modificar los registros, 32 enteros y 32 flotantes, con los que trabaja el *core complex*. En la figura 4.4 se aprecia el diagrama de bloques de la implementación realizada junto a las entradas que recibe y sus salidas.

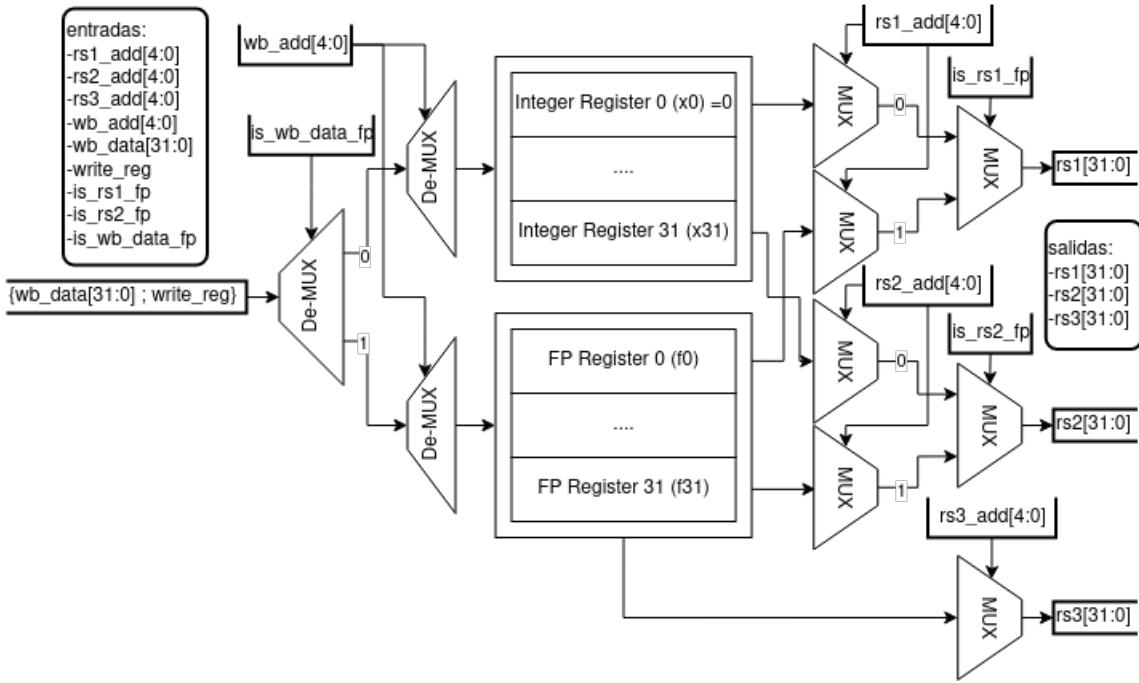


Figura 4.4: Diagrama de bloques detallados del *Register Files*.

Es importante indicar las siguientes consideraciones de este módulo:

- El primer registro entero, $x0$, siempre es cero (*hardwired to zero*).
- Inspirado en [15], posee 3 puertos de lectura combinacionales, donde $rs1_add$, $rs2_add$ y $rs3_add$ indican qué registro se desea leer para cada puerto de salida, $rs1$, $rs2$ y $rs3$ respectivamente. Para distinguir entre un acceso a los registros flotantes o enteros se utilizan las señales is_rs1_fp y is_rs2_fp : si son 1 indican que el acceso es a un registro flotante (de lo contrario sería entero) para las salidas $rs1$ y $rs2$ respectivamente. El acceso de $rs3$ siempre es un registro flotante.
- Posee 1 puerto de escritura síncrono que se activa en el canto negativo del reloj. Donde wb_add direcciona al registro que se desea modificar por el valor ingresado en wb_data y

is_wb_data_fp indica si es flotante ($= 1$) o no ($= 0$). La señal *write_reg* indica si corresponde realizar la escritura.

- En [8] se definen los roles de los registros enteros y flotantes, entre los que se destacan dos registros enteros: *x2* como el *stack pointer* (*sp*), por lo que se inicializa con el valor $32'h2FFC$, y *x3* como *global pointer* (*gp*), que se inicializa igual a $32'h1800$. Se toman los valores que utiliza *RARS* como referencia en este caso.

4.3 Unidades de memoria

Como ya se ha mencionado, se opta por una arquitectura de tipo *Harvard*, esto quiere decir que el *core complex* accesa mediante buses de datos distintos a las memorias de programa (*I-mem*) y de datos (*D-mem*). Considerando lo anterior, hay distintas formas de implementar la memoria. Por ejemplo, puede ser mediante alguna *BRAM* con dos puertos de lectura/escritura o dos *BRAMs* separadas cada una con un solo puerto de lectura/escritura.

Para ambos casos hay ciertas consideraciones, cuando se implementa solo una *BRAM* al momento de direccionar se debe distinguir claramente qué sección de la memoria corresponde al programa y a los datos, es decir que, alguna de las dos secciones presenta un *offset* y no se direcciona desde cero. Si se utilizan dos *BRAMs*, ambas deben ser direccionadas desde cero (el *offset* antes mencionado entre *I-mem* y *D-mem* no existe), pero puede ser que el diseñador considere conveniente que no sea así, por ejemplo para compilar programas bajo algún estándar que considere el *offset* entre las memorias. En tal caso, hay diversas opciones, una puede ser añadir un restador o sumador en el *core complex* que ajuste el direccionamiento de la *BRAM*, ya sea *I-mem* o *D-mem*, según el *offset* deseado.

En esta ocasión, por simplicidad, se decide por la implementación de dos *BRAMs* sin ajuste de *offset*. Es importante tener en cuenta esta decisión al momento de escribir y compilar programas en lenguaje ensamblador. En este caso, como se menciona en 2.4.3, se utiliza *RARS* con la configuración de memoria (la cual también define *sp* y *gp*, ver 4.2) definiendo que el direccionamiento de datos comience en $0x00000000$ y la de programa en $0x00003000$, de esta forma no hay que ajustar el *offset* en el acceso de *D-mem* y para *I-mem* no hace falta ajuste alguno puesto a que el *EEI* se encarga de inicializar la ejecución con *PC* = 0 y que todos los saltos se calculan en base a dicho *PC* (excepto *jalr*, pero en general recibe algún *PC* anterior a través de *rs1*, ver tabla 2.6).

Debido a lo anterior, se diseña un sólo módulo de memoria que se utiliza para *D-mem* y para *I-mem*. El diseño contempla un direccionamiento *little endian*, una memoria cache con su controlador y la *BRAM*. Además, debe ser capaz de escribir *words*, *halfwords* y *bytes* en memoria, las cuales también se deben poder leer con y sin extensión de signo. Es importante destacar que el direccionamiento es a nivel de *byte*. Por otro lado, se implementa una *BRAM* de $62.496KB$, dando un total de $124.992KB$ al considerar ambas memorias.

El módulo de memoria implementado se llama *memory* y está compuesto por un bloque *always* combinacional, la *BRAM* (llamada *block_ram*) y el submódulo *cache_controller*. Las entradas de *memory* son:

- **clk** y **rst**: reloj y reset del sistema respectivamente.
- **rw**: si es 1 se escribe (*write/store*) en memoria y si es 0 se lee (*read/load*).
- **valid**: si se activa se realiza la operación, ya sea leer o escribir.
- **addr[31:0]**: indica el direccionamiento de memoria a nivel de *byte*.
- **data_in[31:0]**: información por escribir cuando *rw=1*.
- **byte_half_word[1:0]**:

00 o 11: indican que se desea leer/escribir un *word*.

01: indica que se desea leer/escribir un *halfword*.

10: indica que se desea leer/escribir un *byte*.

- **is_load_unsigned:** si es 1 cuando $rw=0$ y $byte_half_word[1:0]$ indica *halfword* o *byte*, no se extiende el signo de la respuesta. Si bajo las mismas condiciones es 0, se extiende el signo.

En cuanto a las salidas, estas son: **ready** para indicar que la operación de lectura/escritura se completó, **out_of_range** que indica si la dirección ingresada está fuera del rango del espacio de direcciones de la memoria física (la *BRAM*) y **data_out[31:0]** con la respuesta para las operaciones de lectura. También, se introduce un parámetro en el módulo, **initial_option**, que se conecta directamente con el parámetro del mismo nombre que recibe el módulo *block_ram* declarado en *memory*.

La función del bloque *always* en *memory* es la de manejar las peticiones provenientes de la *CPU* y dirigirlas al *cache_controller* (el cual contiene la memoria cache), este módulo se explica en 4.3.1. Luego el *cache_controller* se comunica con *block_ram* (la *BRAM*).

En concreto, el bloque *always* recibe las entradas de *memory* antes mencionadas y se encarga de verificar si se desea realizar una lectura o escritura, según sea el caso y la información entregada por *byte_half_word*, se determinan las entradas (de solicitud proveniente de la *CPU*) pertinentes para el *cache_controller*. Luego, espera a que el *cache_controller* entregue el resultado de su ejecución, al finalizarse, el bloque *always* retorna la información obtenida si era una lectura (considerando la información de *byte_half_word* y realizando la extensión de signo si corresponde según lo indicado en *is_load_unsigned*) e indica que se finaliza la ejecución (*ready=1*). Este bloque, además, se encarga de manejar los accesos a memoria desalineados, para ello simplemente ignoran los bits menos significativos de la dirección de acceso solicitada según corresponda: si se accesa un *word*, se ignoran los últimos 2 bits menos significativos, si es un *halfword*, se ignora el último menos significativo y si se accesa un *byte* no se ignora ningún bit.

Como ya se mencionó, la *BRAM* está descrita por el módulo *block_ram* y cuenta con una capacidad de 62.496KB, con 3906 entradas de un ancho de 16 *bytes*. Las entradas del módulo son:

- **clk:** el reloj del sistema.
- **addr[11:0]:** con 12 bits basta para direccionar las 3906 entradas. Nótese que $addr[11 : 0] = addr2byte[15 : 4]$, donde $addr2byte[31:0]$ sería el direccionamiento a nivel de *byte* del acceso deseado.
- **data_in[127:0]:** es la información a escribir si es el caso.
- **rw:** si es 1 se escribe, en caso de ser 0 se lee.
- **valid:** indica si realizar la operación, ya sea leer o escribir.

Por otra parte, solo hay dos salidas: **ready** para indicar que se realizó la operación y **data_out[127:0]** que retorna el valor de la lectura. Es importante señalar que este módulo recibe el parámetro **initial_option**, si es 1 se precarga la *BRAM* con la memoria de datos, si es 2 con la de programa y en cualquier otro caso se inicializa en blanco, más detalles sobre la implementación en 5.

A continuación, se presenta el diseño del módulo *cache_controller*, el cual se encarga de la comunicación con la *BRAM* y de la gestión de la memoria cache.

4.3.1 Cache Controller

Este módulo contiene la memoria cache y se encarga de manejar la información solicitada por la *CPU* y el acceso a la *BRAM*. La implementación se basa en la presentada en [12] (capítulos 5.9 y 5.12). La memoria cache cuenta con las siguientes características:

- Es directamente mapeada, es decir que, cada locación en memoria principal (la *BRAM*) es mapeada a, exactamente, una locación en la cache.
- Cada bloque tiene un *dirty bit* y un *valid bit*, el primero se prende si se escribe en el bloque, solo se apaga al cargar un nuevo bloque para lectura. Por otro lado, el *valid bit* indica si el bloque alojado en el cache es válido, o sea, que corresponde a un bloque de la memoria principal.
- El *Write-Back* (actualización de la memoria principal) usa *write allocate*, es decir que, si ocurre un *miss* al querer escribir una área de memoria que no está alojada en la cache se verifica el *dirty bit*, este indica si el bloque alojado actualmente está sucio, si no lo está, se escribe en el cache y se prende el *dirty bit* del bloque, si no, se escribe dicho bloque en la memoria principal y luego se carga el nuevo bloque a escribir en la cache para su escritura.
- Presenta un *block size* (ancho de las entradas de memoria) de 4 palabras (*words*), es decir, 16 *bytes*.
- Un tamaño de $16KiB$, es decir que tiene 1024 entradas (*blocks*).
- Direccionamiento de 32 bits.
- El cache tiene un índice de 10 bits: $2^{10} = 1024$ bloques/entradas de memoria.
- El *block offset* es de 4 bits: $2^4 = 16$ *bytes* por bloque.
- Presenta un *tag size* de $32 - (10 + 4) = 18$ bits: $tag[17 : 0] = addr[31 : 14]$. El *tag* indica que bloque de la memoria principal está alojado en el bloque del cache.

En la figura 4.5 se aprecia el diagrama de bloques del cache implementado.

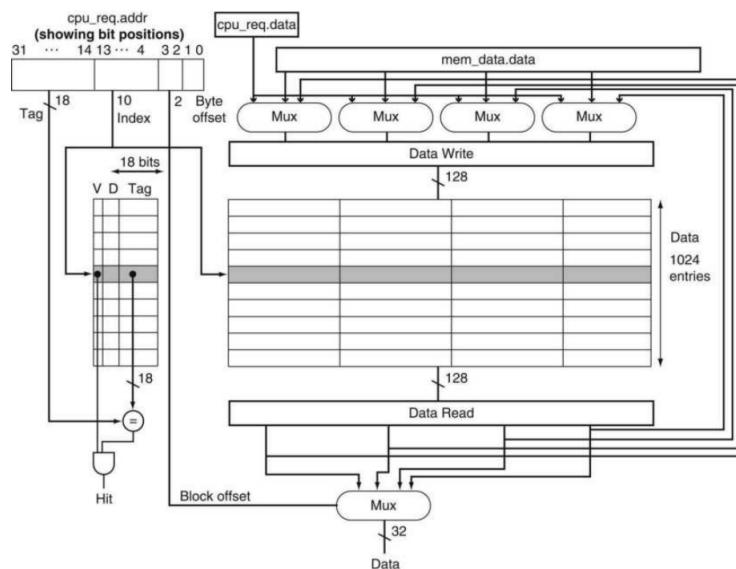


Figura 4.5: Diagrama de bloques de la memoria cache implementada. Fuente: [12].

Para explicar el funcionamiento de este módulo se comienza con las interfaces con la *CPU* y con la memoria principal. Las señales entre el *cache_controller* y la *CPU* son:

- Desde la *CPU* al *cache_controller*:
 - cpu_rw**: Si es 1 indica escritura, si es 0 lectura.
 - cpu_valid**: Indica que se inicie la operación.
 - cpu_addr[31:0]**: La dirección del acceso deseado.
 - cpu_data_in[31:0]**: Datos provenientes de la *CPU*.

- Desde el *cache_controller* a la *CPU*:
 - cpu_ready**: Indica a la *CPU* que la operación fue finalizada.
 - cpu_data_out[31:0]**: Datos provenientes del *cache_controller*.

Luego las señales entre el *cache_controller* y *block_ram* son:

- Desde el *cache_controller* a la *block_ram*:
 - mem_rw**: Si es 1 indica escritura, si es 0 lectura.
 - mem_valid**: Indica que se inicie la operación.
 - mem_addr[31:0]**: La dirección del acceso deseado.
 - mem_data_in[127:0]**: Datos provenientes del *cache_controller*.
- Desde la *block_ram* al *cache_controller*:
 - mem_ready**: Indica al *cache_controller* que la operación fue finalizada.
 - mem_data_out[127:0]**: Datos provenientes de la *block_ram*.

Finalmente se implementa el controlador propuesto en [12], la máquina de estados de dicho controlador se puede ver en la figura 4.6. Solo se realiza una modificación del código utilizado para este controlador, en el estado *compare_tag*, originalmente realiza el *hit* y en el siguiente ciclo vuelve al estado *idle*. Esto se modifica para que se mantenga en *compare_tag* hasta que *cpu_valid* sea 0 de nuevo.

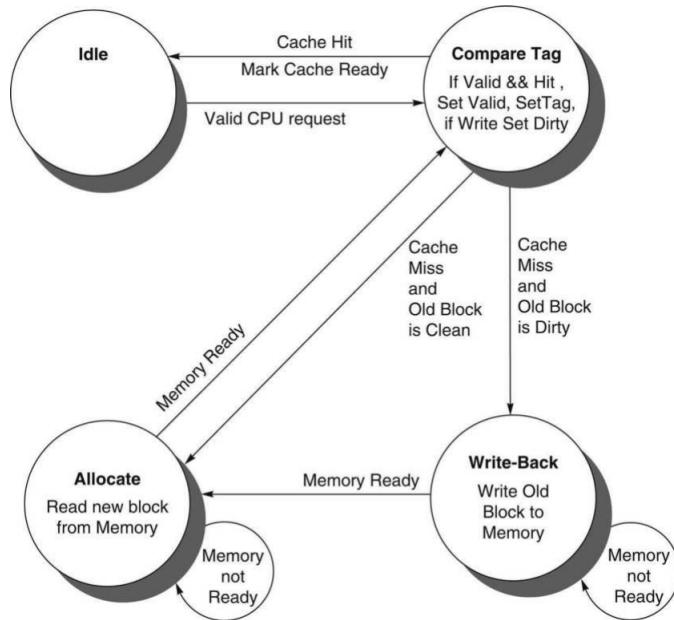


Figura 4.6: *FSM* del *Cache Controller* implementado. Fuente: [12].

A continuación, se explica cada estado del *FSM* de la figura 4.6:

- **Idle**: Estado de espera por alguna solicitud de escritura o lectura válida, en tal caso el siguiente estado es **Compare Tag**.
- **Compare Tag**: Este estado comprueba si ocurre un *hit*, esto sucede si para el *cache index* igual a *cpu_addr[13 : 4]*, se cumple que *tag[17 : 0] = cpu_addr[31 : 14]* y que el *valid bit* es 1, en caso contrario es un *miss*. Si ocurre un *hit* se realiza la operación de escritura/lectura en la cache (si es escritura se enciende en *dirty bit* del bloque), indica que la operación se finalizó y, en la versión original, se vuelve al estado **Idle**, pero en este caso, se mantiene en **Compare Tag** hasta que *cpu_valid* sea 0, cuando esto sucede se vuelve a **Idle**. Si por otro lado ocurre un *miss*, se actualiza el *tag* y el siguiente estado es **Write-Back** si el *dirty bit* está prendido o **Allocate** si está apagado.

- **Write-Back:** Este estado escribe el bloque de 128 bits de la cache en la memoria principal usando la dirección compuesta por el *tag* y el *cache index* (*cpu_addr[31:4]*). Se mantiene en este estado hasta que la memoria indica que se finaliza la operación de escritura, luego se pasa a **Allocate**.
- **Allocate:** Se busca el nuevo bloque en la memoria principal y se actualiza el bloque correspondiente en el cache. Se mantiene en este estado hasta que la memoria indica que se finaliza la operación de lectura, luego se pasa a **Compare Tag**.

4.4 Arithmetic Logic Unit (ALU)

Este módulo se encarga de ejecutar las operaciones aritméticas o lógicas de números enteros de la instrucción en ejecución y su implementación es puramente combinacional. Recibe dos operandos, *in1[31:0]* e *in2[31:0]*, y la operación a realizar está definida por la entrada *operation[4:0]*. Las salidas son dos, *res[31:0]* y *boolean_res*, la primera es el resultado de la operación y la ultima salida indica, en las operaciones de comparación (*beq/bne/blt/bltu/slty/slty/bge/bgeu*), si se cumple la condición ($= 1$) o no ($= 0$).

La misma *ALU* se compone de 3 *sub-ALUs*, una para las operaciones lógicas y aritméticas de *RV32I* (*integer_sub_alu_simple*), otra para las de comparación de *RV32I* (*integer_sub_alu_comparison*) y la última dedicada a las de multiplicación y división de *RV32M* (*integer_sub_alu_mul*). En el caso de *integer_sub_alu_simple* se retorna el resultado directamente, *integer_sub_alu_comparison* retorna el booleano resultante de la comparación, el cual seria el valor de *boolean_res*, y la *ALU* se encarga de retorna $32'b1$ o $32'b0$ según corresponda. En cuanto al submódulo *integer_sub_alu_mul* es importante señalar que si *in2=0* se retorna $32'hFFFFFFF$ para las operaciones de división e *in1* en las de módulo.

Para determinar la operación que debe realizar la *ALU* se implementa el módulo combinacional *alu_op_selection*. Las entradas que recibe este módulo son: *imm_11_5[6:0]=imm[11:5]*, *funct7_out[3:0]*, *funct3[2:0]*, *format_type[2:0]* y *sub_format_type[2:0]*, todas provenientes del *Instruction Decoder*. A partir de dichas entradas y de la información contenida en las tablas 2.6 y 2.7, se determina que operación debe ejecutar la *ALU* para la instrucción en curso, generando la salida *alu_option[4:0]* que se conecta a la entrada *operation[4:0]* de la *ALU*. En la tabla 4.5 se aprecia la codificación para todas las operaciones de la *ALU*.

| alu_op_selection | | | |
|--------------------|-----------------|------------|---------------------------|
| Operation | alu_option[4:0] | Inst. | Note |
| in1 + in2 | 00_000 | add, addi | default operation |
| in1 - in2 | 00_001 | sub | - |
| in1 ^ in2 | 00_010 | xor, xori | - |
| in1 in2 | 00_011 | or, ori | - |
| in1 & in2 | 00_100 | and, andi | - |
| in1 << in2 | 00_101 | sll, slli | - |
| in1 >> in2 | 00_110 | srl, srli | in1 unsigned |
| in1 >> in2 | 00_111 | sra, srai | in1 signed |
| in1 == in2 ? | 01_000 | beq | - |
| in1 != in2 ? | 01_001 | bne | - |
| in1 < in2 ? | 01_010 | blt, slt | signed operation |
| in1 < in2 ? | 01_011 | bltu, sltu | unsigned operation |
| in1 >= in2 ? | 01_100 | bge | signed operation |
| in1 >= in2 ? | 01_101 | bgeu | unsigned operation |
| (in1 * in2)[31:0] | 10_000 | mul | signed operation |
| in1 / in2 | 10_011 | div | signed operation |
| in1 / in2 | 10_100 | divu | unsigned operation |
| in1 % in2 | 10_101 | rem | signed operation |
| in1 % in2 | 10_111 | remu | unsigned operation |
| (in1 * in2)[63:32] | 11_000 | mulh | signed operation |
| (in1 * in2)[63:32] | 11_001 | mulu | unsigned operation |
| (in1 * in2)[63:32] | 11_010 | mulsu | in1 signed / in2 unsigned |

Tabla 4.5: Codificación de *alu_option* para cada tipo de operación de la *ALU*.

4.5 Floating Point Unit (FPU)

La *FPU* se encarga de ejecutar todas las operaciones relacionadas con el juego de instrucciones definido por la extensión *RV32F*, estas se resumen en la tabla 2.9. Las entradas del módulo son:

- **clk** y **rst**: Señales de reloj y *reset* respectivamente.
- **start**: Indica que se inicie el calculo de la operación solicitada.
- **rm[2:0]**: Especifica el modo de redondeo.
- **option[4:0]**: Indica la operación que debe realizar la *FPU*.
- **in1[31:0]/in2[31:0]/in3[31:0]**: Son los operandos.

Y las salidas son:

- **NV, NX, UF, OF y DZ**: Indican si ocurre una operación no válida, inexacta, *underflow*, *overflow* y/o división por cero respectivamente.
- **ready**: Indica la finalización de la operación.
- **out[31:0]**: El resultado de la operación.

| fpu_op_selection | |
|------------------|-----------------|
| Inst. | fpu_option[4:0] |
| fmadd.s | 0_00_00 |
| fmsub.s | 0_00_01 |
| fnmsub.s | 0_00_10 |
| fnmadd.s | 0_00_11 |
| fadd.s | 1_00_00 |
| fsub.s | 1_00_01 |
| fmul.s | 1_00_10 |
| fdiv.s | 1_00_11 |
| fsqrt.s | 1_01_00 |
| fsgnj.s | 0_11_00 |
| fsgnjn.s | 0_11_01 |
| fsgnjx.s | 0_11_10 |
| fmin.s | 0_10_00 |
| fmax.s | 0_10_01 |
| fcvt.s.w | 0_01_00 |
| fcvt.s.wu | 0_01_01 |
| fcvt.w.s | 0_01_10 |
| fcvt.w.u.s | 0_01_11 |
| fle.s | 1_10_00 |
| flt.s | 1_10_01 |
| feq.s | 1_10_10 |
| fclass.s | 0_11_11 |
| not valid | 1_11_11 |

Tabla 4.6: Codificación de *fpu_option* para cada operación de la *FPU*.

Para determinar la entrada *option* se añade el módulo *fpu_op_selection*, el cual es combinatorial y se encarga de recibir las señales: **rs2_add[4:0]**, **funct7_out[3:0]**, **funct3[2:0]**, **format_type[2:0]**, **sub_format_type[2:0]** y **rm_from_fcsr[2:0]** (esta última entrada recibe el *rounding mode* proveniente del registro *FCSR*, sin embargo no fue implementado, por ello siempre es *RNE=000*). Con la información recibida se retorna: **rm2fpu[2:0]**, el modo de redondeo seleccionado para la *FPU* (el cual puede estar definido por *funct3* o por *rm_from_fcsr* si *funct3=111*), y **fpu_option[4:0]**, esta última señal se conecta con la entrada *option* de la *FPU* para indicar la operación deseada, la codificación para cada instrucción se detalla en la tabla 4.6.

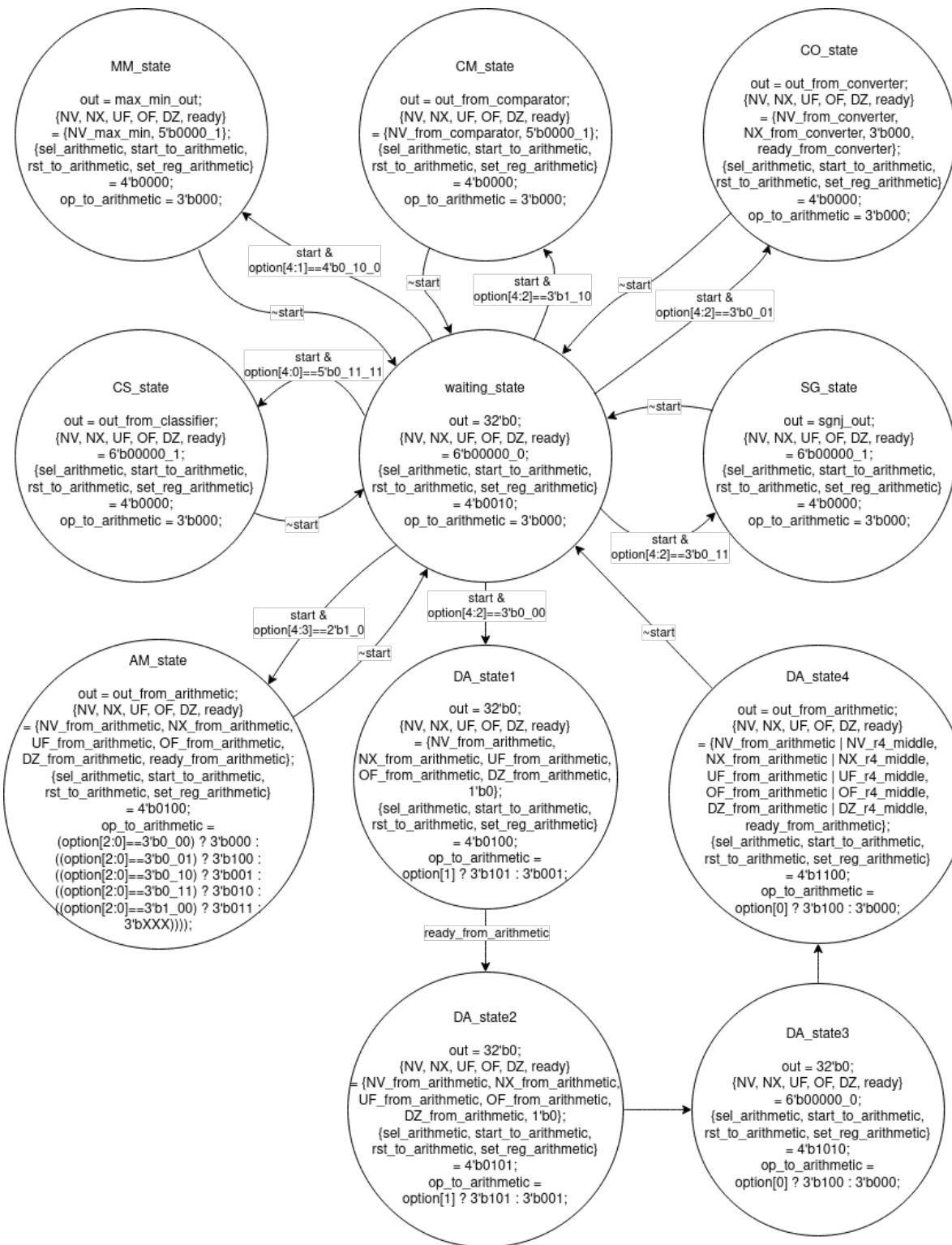


Figura 4.7: Diagrama MDS del *FSM* de la *FPU*.

La *FPU* se compone de un *FSM* el cual se encarga de manejar distintas unidades de ejecución según la entrada *option*. En la figura 4.7 se aprecia el diagrama *MDS* del *FSM* con el detalle de las señales de E/S y transición de los estados, ahora se explica el rol de cada estado y como maneja cada unidad de ejecución:

- **waiting_state:** Este estado se encarga de esperar la señal *start*, luego según la opción conte-

nida en *option* (como se aprecia en la figura 4.7) decide cual será el siguiente estado.

- **CS_state**: Este estado se encarga únicamente de ejecutar la instrucción *fclass.s* y para ello dispone de un simple submódulo combinacional, *fp_classifier*, encargado de recibir *in1* y retornar la clasificación correspondiente según la tabla 2.10. Prende automáticamente la señal *ready* y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.
- **MM_state**: Aquí se ejecutan las instrucciones *fmin.s* y *fmax.s* considerando los operandos *in1* e *in2*, esto se realiza mediante un *assign* y la ayuda del submódulo *fp_comparator* (el cual a su vez se encarga de ejecutar las instrucciones manejadas por el estado *CM_state*). Prende automáticamente la señal *ready* y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.
- **CM_state**: Este estado realiza las comparaciones de las instrucciones *fle.s*, *flt.s* y *feq.s* para los operando *in1* e *in2*, para ello se dispone del submódulo combinacional *fp_comparator*, el cual realiza las comparaciones según lo especificado en 2.2.5.2. Prende automáticamente la señal *ready* y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.
- **CO_state**: Aquí se ejecutan las instrucciones *fcvt.s.w*, *fcvt.s.wu*, *fcvt.w.s* y *fcvt.wu.s* considerando *in1*, para esta tarea se implementa el módulo secuencial *fp_converter* (detallado en la sección 4.5.2). Prende *ready* cuando *fp_converter* indica que finalizó la ejecución y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.
- **SG_state**: Realiza las operaciones *fsgnj.s*, *fsgnjn.s* y *fsgnjx.s* de forma combinacional mediante un *assign*, se consideran las entradas *in1* e *in2*. Prende automáticamente la señal *ready* y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.
- **AM_state**: Este estado ejecuta las instrucciones *fadd.s*, *fsub.s*, *fmul.s*, *fdiv.s* y *fsqrt.s* con *in1* e *in2* como operandos, para esta tarea se implementa el módulo secuencial *fp_arithmetic_unit* (detallado en la sección 4.5.1). Prende *ready* cuando *fp_arithmetic_unit* indica que finalizó la ejecución y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.
- **DA_state1, DA_state2, DA_state3 y DA_state4**: Estos estados se encargan de ejecutar las instrucciones de tipo *R4*. Por simplicidad y tiempo, no se implementa una unidad específica para la ejecución de este tipo de instrucciones con tres operandos (*in1*, *in2* e *in3*), por ello se reutiliza el módulo *fp_arithmetic_unit*. En *DA_state1* se realiza la multiplicación considerando *in1* e *in2*, cuando está lista la operación se pasa al estado *DA_state2*, este almacena el resultado en un registro, luego en *DA_state3* se modifican las entradas de *fp_arithmetic_unit* por el registro temporal con el resultado anterior e *in3* y se cambia la operación por la suma o resta, finalmente, en *DA_state4* se espera el fin de la ejecución de *fp_arithmetic_unit* para encender *ready* y volver a **waiting_state** cuando *start* se apague.

Note que no se siguen todos los pasos de la metodología *Top-Down* para la confección del diagrama *MDS*, esto se debe a que este módulo se desarrolla después que sus principales submódulos, *fp_arithmetic_unit* y *fp_converter*, por ello la experiencia adquirida ayuda a ahorrar tiempo en los nuevos diseños realizados.

También es importante tener en cuenta el modo de redondeo seleccionado por *rm*, el cual puede ser *RNE*, *RTZ*, *RDN*, *RUP* o *RMM*. En la tabla 4.7 se aprecia la codificación para cada uno de los modos y el criterio de redondeo o truncamiento utilizado según los bits *guard*, *round* y *sticky*.

Los modos de redondeo se consideran en los módulos *fp_arithmetic_unit* y *fp_converter*. A continuación, en las secciones 4.5.1 y 4.5.2 respectivamente, se presenta el diseño desarrollado para estos módulos, los cuales fueron en gran medida el mayor reto de todo el trabajo realizado después de la implementación del *core complex* y del *SoC* como tal. Es importante tener en cuenta para las maquinas de estados que se presentan en las subsecciones venideras, que las mismas se activan en el canto positivo del reloj y que cuando se habla de algún registro, este almacena su nuevo valor en el canto negativo.

| grs[2:0] 0.grs ₁₀ | 000 0.000 | 001 0.125 | 010 0.250 | 011 0.375 | 100 0.500 | 101 0.625 | 110 0.750 | 111 0.875 | sign bit | RM Description |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-------------|------------------------------------|
| RNE (000) | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | lsb lsb | 1 1 | 1 1 | 1 1 | 0 1 | To nearest, ties to even |
| RTZ (001) | 0 0 | 0 1 | Toward zero |
| RDN (010) | 0 0 | 0 1 | 0 1 | Toward -inf |
| RUP (011) | 0 0 | 1 0 | 0 1 | Toward +inf |
| RMM (100) | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 0 0 | 1 1 | 1 1 | 1 1 | 1 1 | 0 1 | To nearest, ties away from zero |

Tabla 4.7: Resumen del criterio de redondeo utilizado según el *rounding mode* (*RM*), el bit de signo (*sign*) y los bits *guard* (*g*), *round* (*r*) y *sticky* (*s*). 1 indica que se redondea el resultado (sumar uno a *fraction*) y 0 que se trunca (no se modifica *fraction*). Nota: *lsb=fraction[0]*.

4.5.1 FP Arithmetic Unit

Este módulo, *fp_arithmetic_unit* el más complejo de todos los diseñados en este trabajo, se encarga de las operaciones aritméticas de punto flotante: suma, resta, multiplicación, división y raíz cuadrada. Para ello recibe las siguientes entradas:

- **start, rst, clk**: Señal de inicio de ejecución, de *reset* y reloj respectivamente.
- **rm[2:0]**: El *rounding mode* seleccionado. Ver tabla 4.7.
- **op[2:0]**: Señal que codifica la operación a realizar. Ver tabla 4.8.
- **in1[31:0]/in2[31:0]**: Operando en punto flotante.

| op[2:0] | | |
|---------|---------------|-----------|
| Code | Pseudocode | Operation |
| 000 | out=in1+in2 | ADD |
| 001 | out=in1*in2 | MUL |
| 010 | out=in1/in2 | DIV |
| 011 | out=sqrt(in1) | SQRT |
| 100 | out=in1-in2 | SUB |
| 101 | out=-in1*in2 | -MUL |
| 110 | out=-in1/in2 | -DIV |

Tabla 4.8: Codificación de la entrada *op* del módulo *fp_arithmetic_unit*.

Luego el módulo retorna:

- **ready**: Señal que indica que la operación se ha completado.
- **status[2:0]**: Señal que indica la bandera que se pudo generar en la ejecución. Ver tabla 4.9.
- **out[31:0]**: El resultado de la operación.

| status[2:0] | |
|-------------|------|
| Code | Flag |
| 000 | none |
| 001 | UF |
| 010 | OF |
| 011 | NV |
| 100 | DZ |
| 111 | NX |

Tabla 4.9: Codificación de la salida *status* del módulo *fp_arithmetic_unit*.

Debido a que este módulo es complejo de implementar, se diseña a partir de la metodología *Top-Down* desde un principio. Sin embargo, no se realiza el planteamiento del diagrama de bloques simplificado debido a que se empieza el diseño desde los algoritmos para el cálculo de cada operación.

Los algoritmos de suma y multiplicación de punto flotante son extraídos del capítulo 3 de [12], el algoritmo de la división es similar al de multiplicación por lo que se infiere a partir de este último. Finalmente, el algoritmo utilizado para el cálculo de la raíz cuadrada fue extraído del trabajo realizado en [27].

Todos los algoritmos tienen en común la fase de redondeo y normalización, teniendo esto en cuenta se propone el diagrama de flujo simplificado de la figura 4.8. De esta forma no se duplica el hardware necesario para redondeo y normalización. Además, se determina la necesidad de un módulo encargado de identificar los casos triviales, especiales o excepciones.

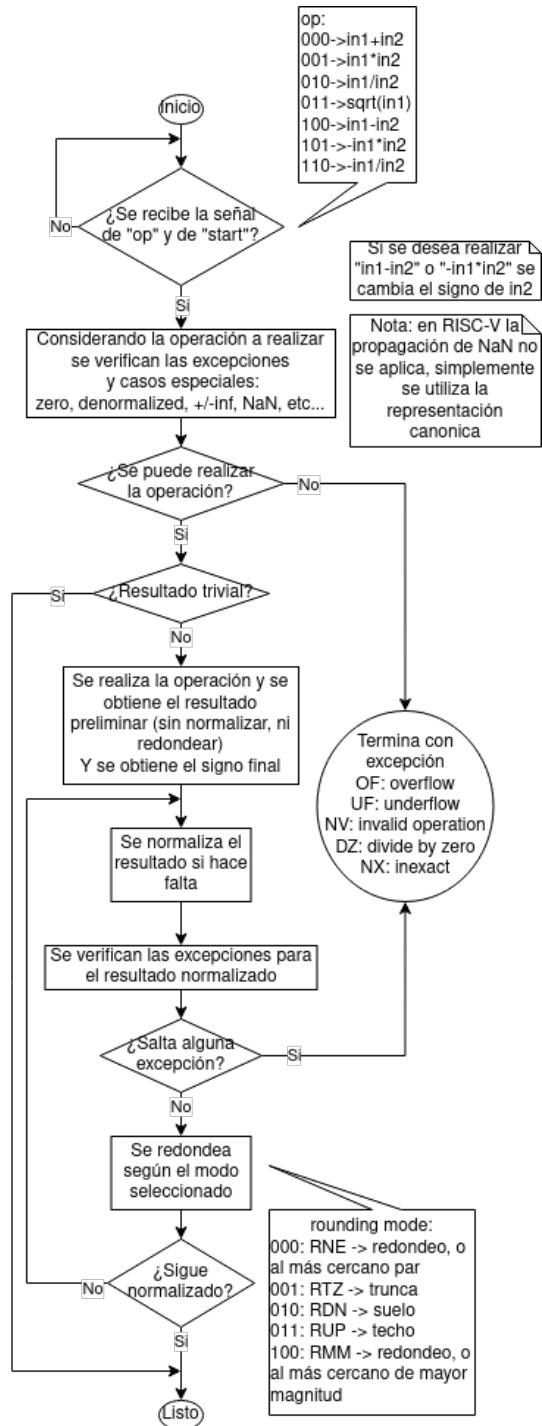


Figura 4.8: Diagrama de flujo simplificado del módulo *fp_arithmetic_unit*.

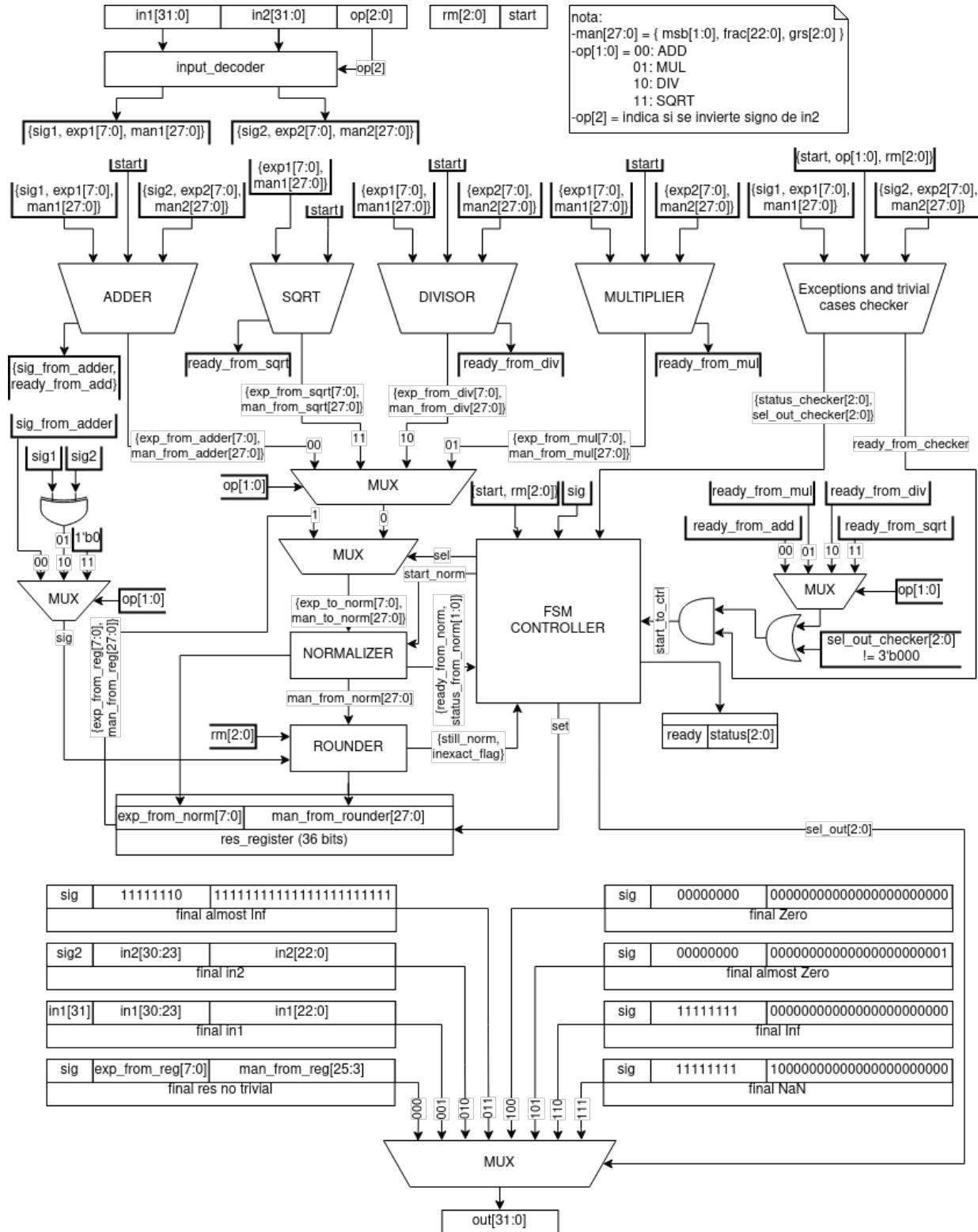


Figura 4.9: Diagrama de bloques detallado del módulo *fp_arithmetic_unit*.

Considerando el diagrama de flujo de la figura 4.8 se elabora el diagrama de bloques detallado (ver figura 4.9) del módulo *fp_arithmetic_unit*, donde se identifican 7 submódulos principales con sus entradas y salidas. A continuación, se detalla el rol de cada uno de estas unidades:

- **ADDER**: Encargado de las operaciones de suma y resta. Detallado en 4.5.1.1.
- **MULTIPLIER**: Realiza la multiplicación. Detallado en 4.5.1.2.
- **DIVISOR**: Realiza la división. Detallado en 4.5.1.3.
 - significands_divisor**: Parte del módulo *DIVISOR*, ejecuta la división de la mantisa. Detallado en 4.5.1.4.
- **SQRT**: Calcula la raíz cuadrada. Detallado en 4.5.1.5.
 - significand_sqrt**: Parte del módulo *SQRT*, calcula la raíz cuadrada de la mantisa. Detallado en 4.5.1.6.
- **Exceptions and trivial cases checker**: Se encarga de verificar los casos triviales y excepciones. Detallado en 4.5.1.7.
- **NORMALIZER**: Normaliza el resultado. Detallado en 4.5.1.8.
- **ROUNDER**: Realiza el redondeo del resultado siguiendo la tabla 4.7. Detallado en 4.5.1.9.

Es importante señalar el rol del bloque identificado como “*input_decoder*” en la figura 4.9. Su tarea es recibir las entradas *in1[31:0]* e *in2[31:0]* para separar los campos de signo, exponente y mantisa. Si *op[2]=1*, se invierte el signo de *in2*, esto permite realizar la resta o cambiar el signo del resultado de la multiplicación o división (útil en operaciones de tipo *R4*). Con respecto a la mantisa, esta se obtiene agregando 5 bits al campo *fraction[22:0]*, 3 a la derecha inicializados en cero para considerar los bits *guard*, *round* y *sticky*. Por otro lado, el primer bit a la izquierda de *fraction[22:0]* es el bit silencioso, se inicia 1 si el exponente es distinto de cero, en caso contrario se inicia en cero y el segundo a la izquierda siempre se inicia en cero.

Teniendo en consideración el diagrama de la figura 4.9 se confecciona el diagrama de flujo detallado del controlador (ver figura 4.10), este diagrama muestra las señales de salida para cada estado y las preguntas o señales de decisión consideradas para las transiciones de estado. A partir del diagrama de flujo detallado se elabora el diagrama *MDS* de la figura 4.11. A continuación, se detalla el rol de cada estado:

- **waiting_state**: Espera la señal *start_to_ctrl* para iniciar la ejecución, cuando esto sucede el siguiente estado depende del valor de *check_flag*, si es 1 significa que la unidad *excep_triv_checker* determina que la operación se puede realizar y el siguiente estado es **initial_state**, de ser 0 se pasa a **exception_state_1**.
- **initial_state**: Inicia la ejecución del *NORMALIZER* y espera a que finalice su ejecución (*ready_from_norm=1*).
 - Si *NORMALIZER* indica (*is_normal = 0 <=> status_from_norm ≠ 00*) que ocurre *overflow*, *underflow* o que el exponente del resultado llega a cero (es decir que el resultado final es desnormalizado) el siguiente estado es **exception_state_2**.
 - Si por otro lado, *NORMALIZER* determina (*is_normal = 1 <=> status_from_norm = 00*) que el resultado es válido y *ROUNDER* que está normalizado (*still_norm = 1*) aún después del redondeo se pasa a **pre_final_state_1**, si no es así (*still_norm = 0*) el siguiente estado es **pre_iteration_state**.
- **pre_iteration_state**: Este estado guarda el resultado inicial (con *sel = 0*) y pasa a **iteration_state_1**.
- **iteration_state_1**: Apaga el *NORMALIZER* y cambia la entrada del mismo por el resultado actual (*sel = 1*), el siguiente estado es **iteration_state_2**
- **iteration_state_2**: Inicia la ejecución del *NORMALIZER* y espera a que finalice su ejecución (*ready_from_norm=1*).
 - Si *NORMALIZER* indica (*is_normal = 0 <=> status_from_norm ≠ 00*) que ocurre *overflow*, *underflow* o que el exponente del resultado llega a cero (es decir que el resultado final es desnormalizado) el siguiente estado es **exception_state_3**.

- Si por otro lado, *NORMALIZER* determina ($is_normal = 1 \Leftrightarrow status_from_norm = 00$) que el resultado es válido y *ROUNDER* que está normalizado ($still_norm = 1$) aún después del redondeo se pasa a **pre_final_state_2**, si no es así ($still_norm = 0$) el siguiente estado es **iteration_state_3**.

- **iteration_state_3**: Guarda el resultado actual (con $sel = 1$) y pasa a **iteration_state_1**.
- **exception_state_1**: Activa la señal *ready* y selecciona como resultado la respuesta trivial y la bandera definida por *excep_triv_checker*. Si se apaga *start* pasa a **waiting_state**.
- **exception_state_2**: Guarda el resultado inicial (con $sel = 0$) y pasa a **final_exception_state**.
- **exception_state_3**: Guarda el resultado actual (con $sel = 1$) y pasa a **final_exception_state**.
- **final_exception_state**: Activa la señal *ready*, apaga el *NORMALIZER*. Este estado espera a que se apague *start* para volver a **waiting_state**. Luego hay 3 escenarios posibles, según el resultado del *NORMALIZER* para la selección de la bandera por levantar y el resultado final:
 - Si $is_desnorm = 1 \Leftrightarrow status_from_norm = 11$ el resultado final es válido y desnormalizado, por ello se levanta la bandera *UF*.
 - Si $is_of = 1 \Leftrightarrow status_from_norm = 10$ ocurre un *overflow*, se levanta *OF* y el resultado final puede ser *inf* o *almost inf* (la representación de mayor magnitud antes de *inf*) según el modo de redondeo y el signo del resultado.
 - Si $is_uf = 1 \Leftrightarrow status_from_norm = 01$ ocurre un *underflow*, se levanta *UF* y el resultado final puede ser *zero* o *almost zero* (la representación de menor magnitud después de *zero*) según el modo de redondeo y el signo del resultado.
- **pre_final_state_1**: Guarda el resultado inicial (con $sel = 0$) y pasa a **final_state**.
- **pre_final_state_2**: Guarda el resultado actual (con $sel = 1$) y pasa a **final_state**.
- **final_state**: Apaga el *NORMALIZER*, activa *ready* y si el *ROUNDER* levanta la bandera *NX* (*inexact_flag = 1*) se retorna dicha bandera, si no, simplemente no se levanta bandera. El resultado actual es el final y retorna a **waiting_state** si *start* se apaga.

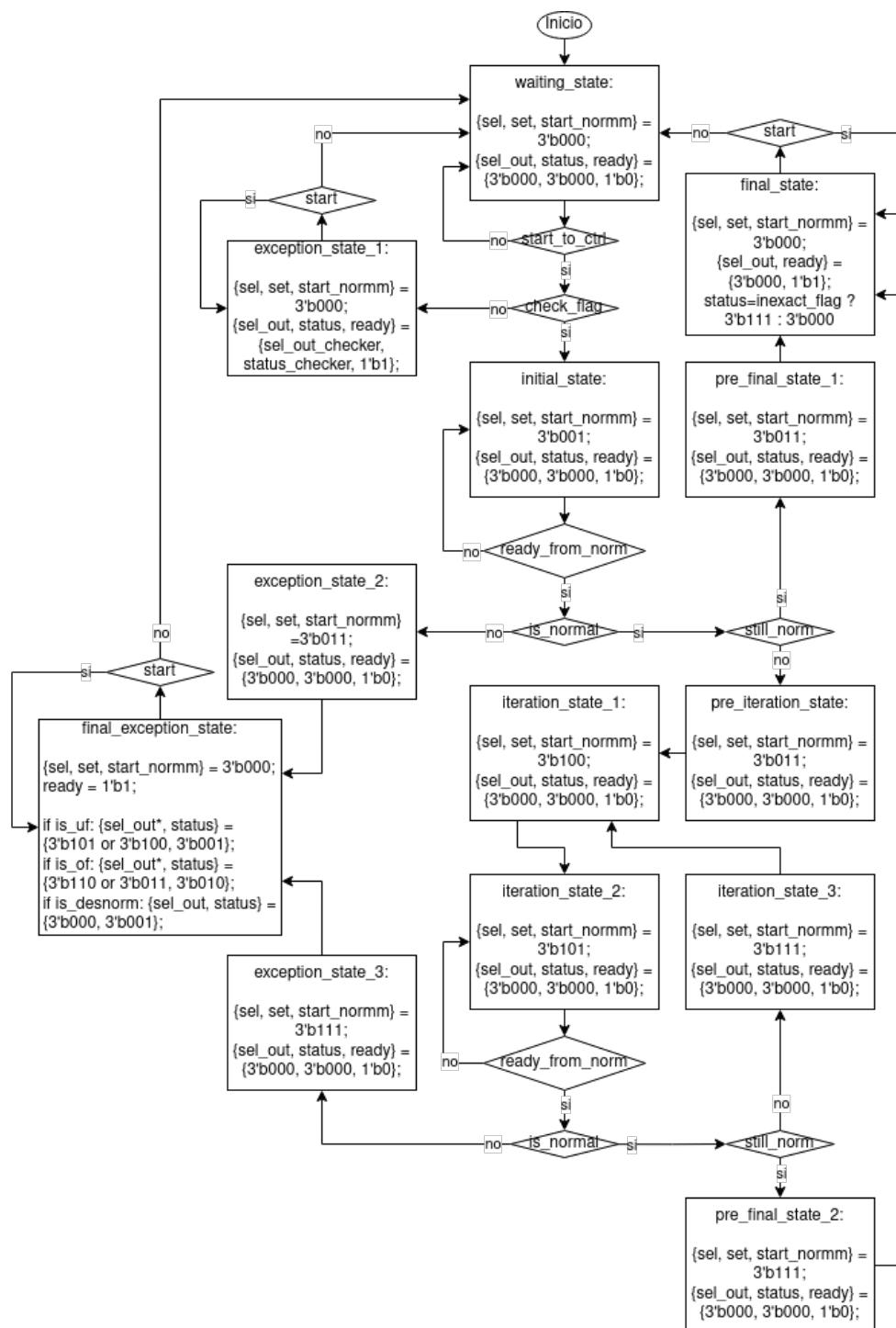


Figura 4.10: Diagrama de flujo detallado del módulo *fp_arithmetic_unit*.

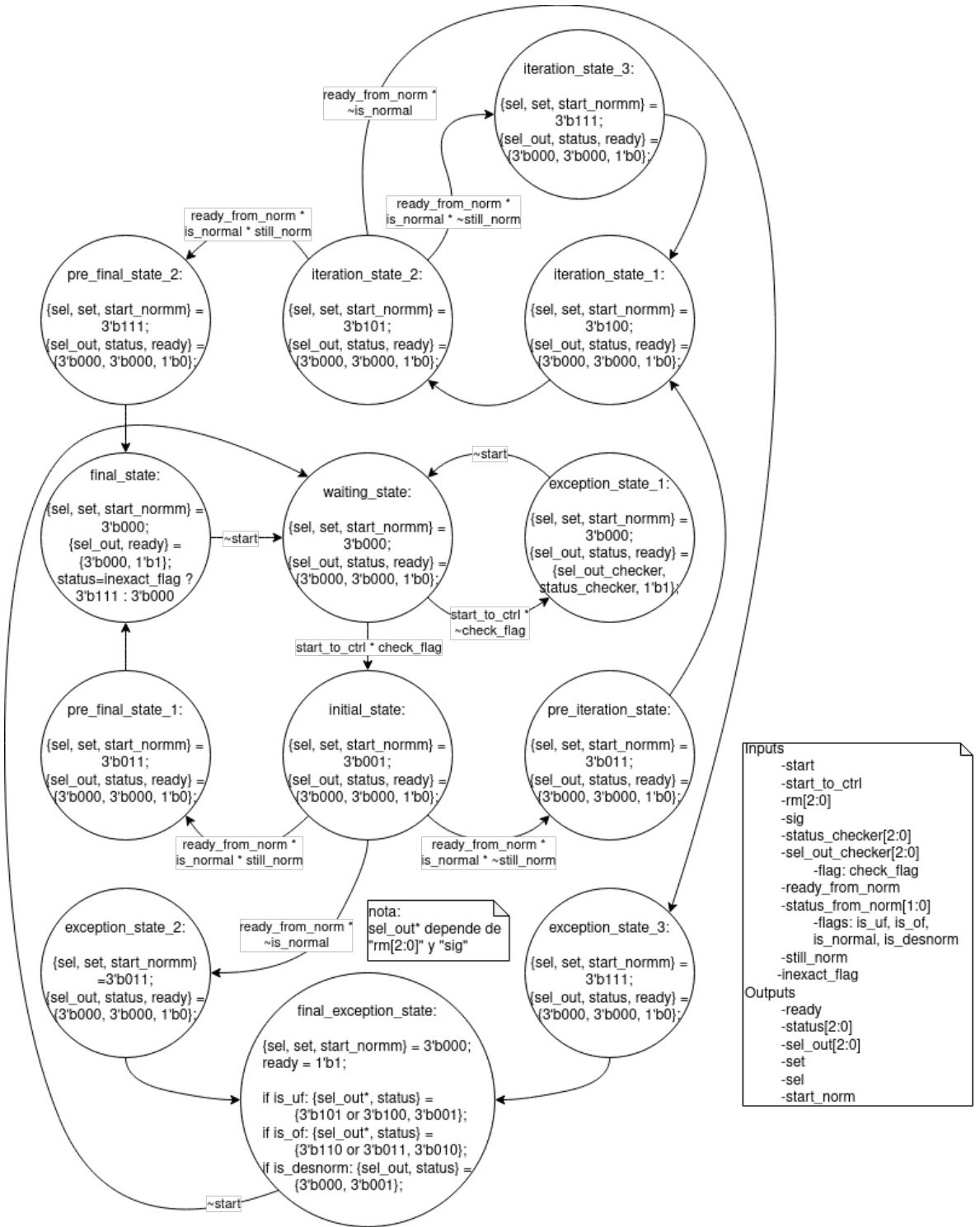


Figura 4.11: Diagrama MDS del módulo *fp_arithmetic_unit*.

A continuación, se detalla el diseño de los principales submódulos que conforman la unidad aritmética de punto flotante. Para el desarrollo de los mismo se vuelve a la metodología de diseño *Top-Down*. Es importante señalar que en algunos de estos módulos se repite la unidad “*inputs normalizer*”, tal como se puede ver en los diagramas de las figuras 4.13, 4.15, 4.19 y 4.23. Esta unidad corresponde a un simple módulo secuencial, *normalizer4significands_inputs*, encargado de tomar la mantisa de entrada y normalizarla en caso de presentar el bit silencioso (el primero a la izquierda de *fraction*) igual a cero (número desnormalizado). Las salidas de *normalizer4significands_inputs*

son la mantisa normalizada y un *offset*, este ultimo indica el exponente negativo del número en cuestión (cuantos desplazamientos de posición se realizaron). Este módulo se implementa al detectar problemas con el calculo de números desnormalizados y por razones de tiempo no se realiza una modificación mayor del diseño completo de *fp_arithmetic_unit*, por ello se deja propuesto como mejora añadir este bloque en el módulo principal *fp_arithmetic_unit* y no en los submódulos para evitar duplicar *hardware*.

4.5.1.1 FP Arithmetic Unit: ADDER

Este módulo se encarga de calcular el resultado inicial de la suma de números de punto flotante, sin considerar la etapa de normalización o redondeo. Para ello, recibe las señales:

- **start, clk**: Señal de inicio de ejecución y reloj respectivamente.
- **sig1, sig2**: Signo de cada operando.
- **exp1[7:0], exp2[7:0]**: Exponente de cada operando.
- **man1[27:0], man2[27:0]**: Mantisa de cada operando.

Y retorna:

- **ready**: Señal de finalización de ejecución.
- **sig_out**: Signo del resultado.
- **exp_out[7:0]**: Exponente del resultado.
- **man_out[27:0]**: Mantisa del resultado.

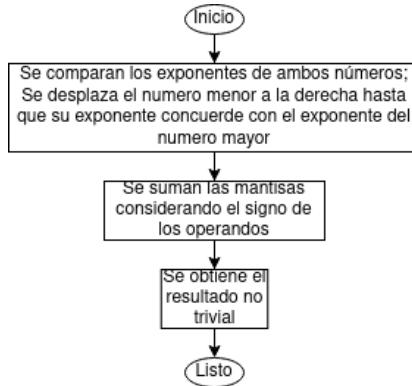


Figura 4.12: Diagrama de flujo simplificado del submódulo *ADDER*.

En la figura 4.12 se aprecia el diagrama de flujo considerado, el cual se basa en el diagrama de flujo para el sumador de punto flotante presentado en [12]. A partir de este diagrama se diseña el diagrama de bloques detallado de la figura 4.13, donde se aprecia que la unidad es completamente combinacional exceptuando las unidades “*inputs normalizer*”. Con esto se obtiene el resultado preliminar listo para pasar a la fase de normalización y redondeo.

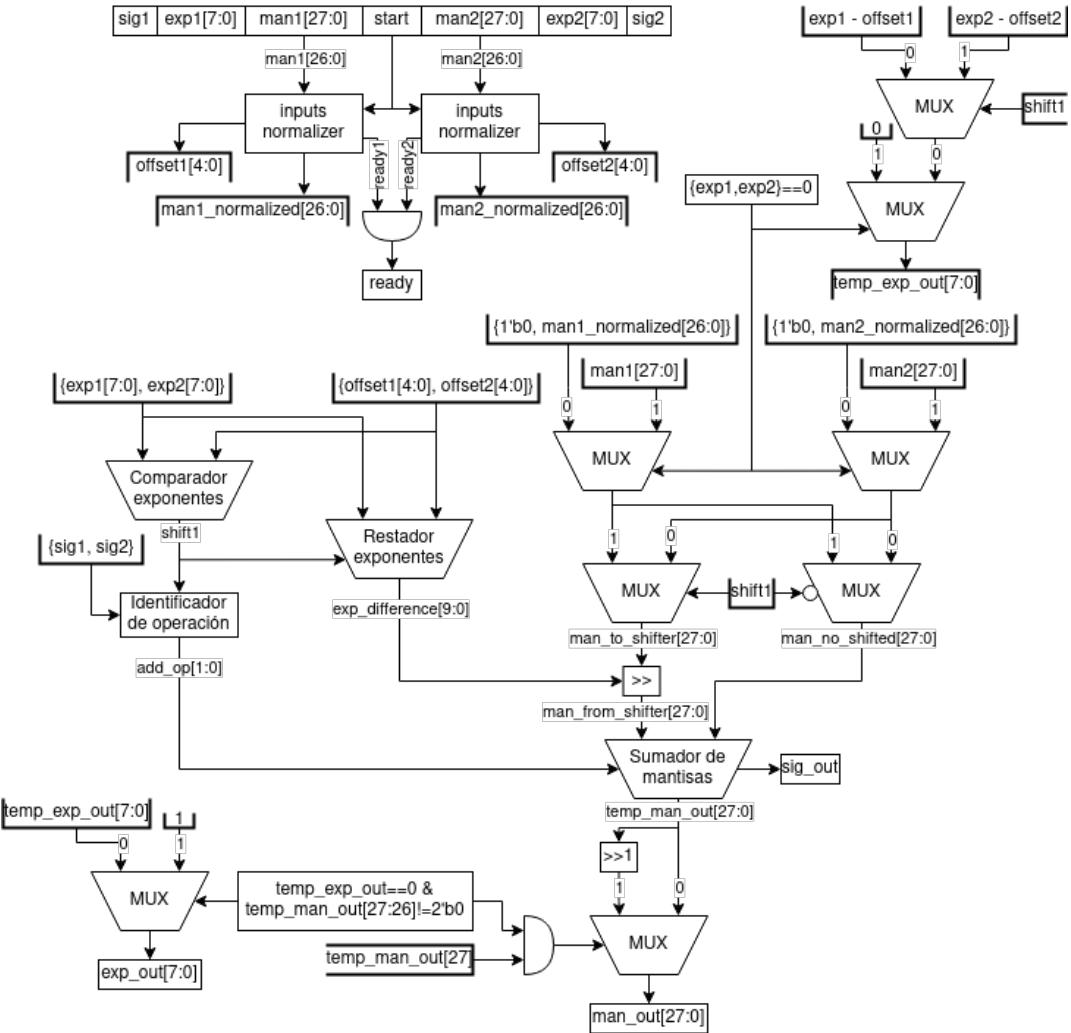


Figura 4.13: Diagrama de bloques detallado del submódulo *ADDER*.

4.5.1.2 FP Arithmetic Unit: MULTIPLIER

Este módulo se encarga de calcular el resultado inicial de la multiplicación de números de punto flotante, sin considerar la etapa de normalización o redondeo. Para ello, recibe las señales:

- **start, clk:** Señal de inicio de ejecución y reloj respectivamente.
- **exp1[7:0], exp2[7:0]:** Exponente de cada operando.
- **man1[27:0], man2[27:0]:** Mantisa de cada operando.

Y retorna:

- **ready:** Señal de finalización de ejecución.
- **exp_out[7:0]:** Exponente del resultado.
- **man_out[27:0]:** Mantisa del resultado.

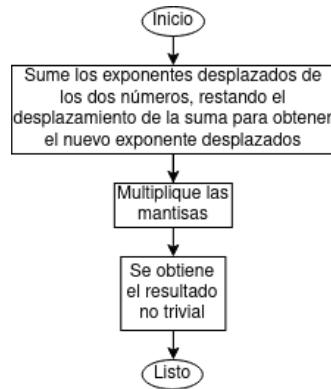


Figura 4.14: Diagrama de flujo simplificado del submódulo *MULTIPLIER*.

En la figura 4.14 se aprecia el diagrama de flujo considerado, el cual se basa en el diagrama de flujo para el multiplicador de punto flotante presentado en [12]. A partir de este diagrama de flujo se diseña el de bloques detallado de la figura 4.15, donde se aprecia que la unidad es completamente combinacional exceptuando las unidades “*inputs normalizer*”. Es importante indicar que los bloques “Selector de exponente final” y “Selector de mantisa final” (este además requiere la señal *temp_man1[55]*) consideran el resultado del “Sumador de exponente”, *temp_exp[9:0]*, para determinar si ocurre un *overflow*, resultado desnormalizado o normal y así retornar el resultado preliminar correcto para pasar a la fase de normalización y redondeo.

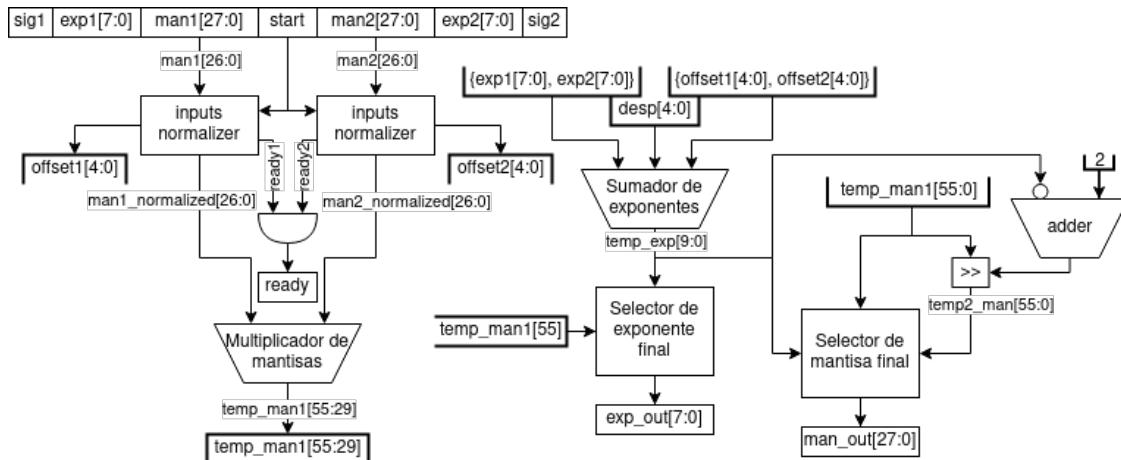


Figura 4.15: Diagrama de bloques detallado del submódulo *MULTIPLIER*.

4.5.1.3 FP Arithmetic Unit: DIVISOR

Este módulo se encarga de calcular el resultado inicial de la división de números de punto flotante, sin considerar la etapa de normalización o redondeo. Para ello, recibe las señales:

- **start, rst, clk:** Señal de inicio de ejecución, *reset* y reloj respectivamente.
- **exp1[7:0], exp2[7:0]:** Exponente de cada operando.
- **man1[27:0], man2[27:0]:** Mantisa de cada operando.

Y retorna:

- **ready:** Señal de finalización de ejecución.
- **exp_out[7:0]:** Exponente del resultado.

- **man_out[27:0]**: Mantisa del resultado.

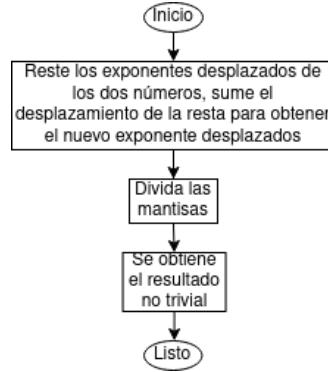


Figura 4.16: Diagrama de flujo simplificado del submódulo *DIVISOR*.

En la figura 4.16 se aprecia el diagrama de flujo considerado, el cual se infiere a partir del diagrama 4.14. A partir de este diagrama de flujo se diseña el de bloques detallado de la figura 4.17, donde se aprecia que la unidad es completamente combinacional exceptuando la unidad “*Divisor de mantis*as”, el cual se explica en 4.5.1.4. Es importante indicar que los bloques “Selector de exponente final” (este además requiere la señal *temp_man1[54]*) y “Selector de mantisa final” consideran el resultado del “Sumador de exponente”, *temp_exp[9:0]*, para determinar si ocurre un *overflow*, resultado desnormalizado o normal y así retornar el resultado preliminar correcto para pasar a la fase de normalización y redondeo.

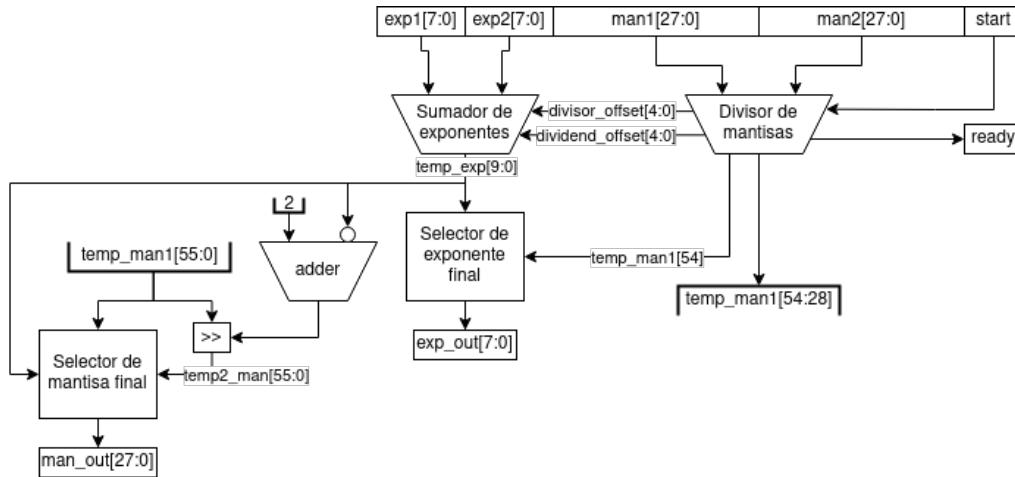


Figura 4.17: Diagrama de bloques detallado del submódulo *DIVISOR*.

4.5.1.4 FP Arithmetic Unit: significands_divisor

Este módulo se encarga de realizar la división de las mantis. Para ello, recibe las entradas:

- **start, rst, clk**: Señal de inicio de ejecución, *reset* y reloj respectivamente.
- **dividend[26:0], divisor[26:0]**: Mantisas de dividendo y divisor respectivamente.

Y retorna:

- **ready**: Señal de finalización de ejecución.
- **man_output[26:0]**: Mantisa del resultado.

- **dividend_offset[4:0], divisor_offset[4:0]**: Son los *offsets* retornados por las unidades “*inputs normalizer*” del dividendo y divisor respectivamente.

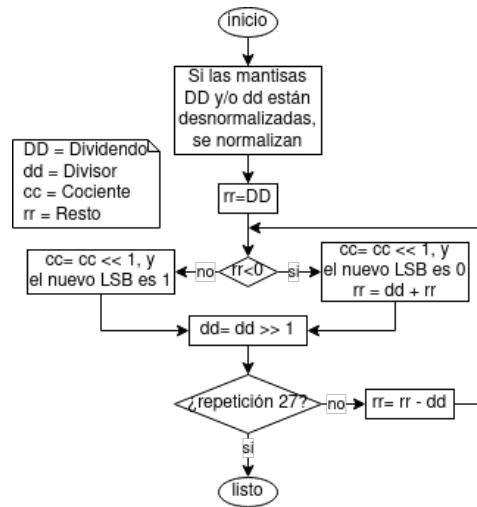


Figura 4.18: Diagrama de flujo simplificado del submódulo *significands_divisor*.

En la figura 4.18 se visualiza el diagrama de flujo simplificado con el algoritmo para realizar la división de mantis, el cual se basa en el algoritmo clásico de la división (tal como se presenta en el capítulo 3.4 de [12]). Con este diagrama se elabora el de bloques detallado de la figura 4.19 donde se identifican las señales de control para el *FSM*.

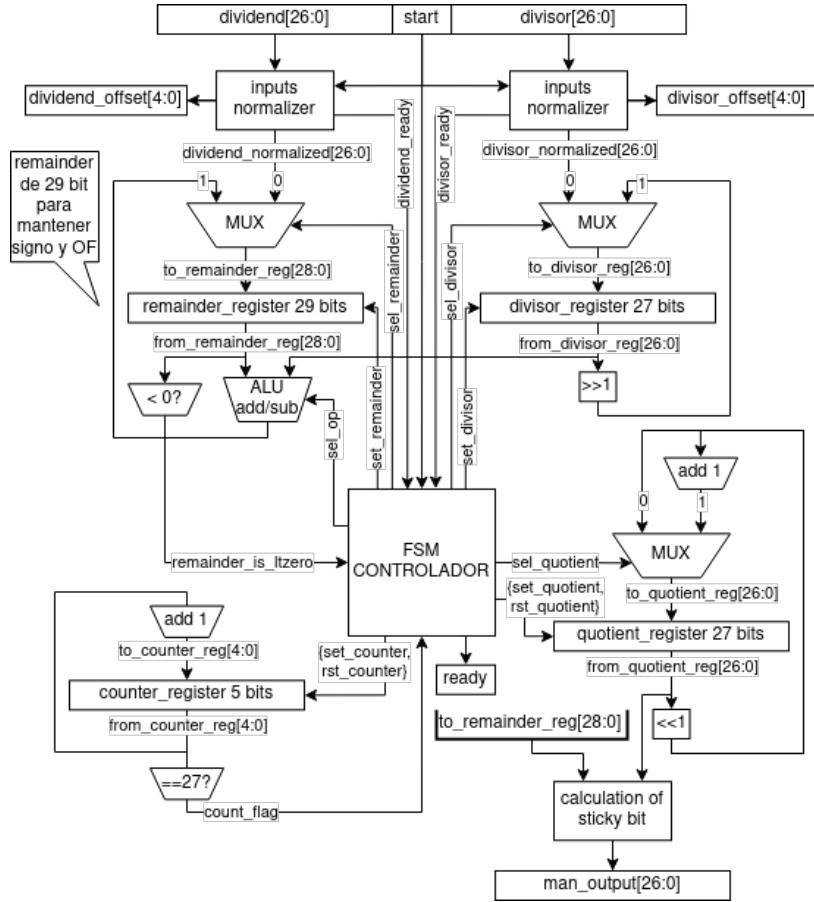


Figura 4.19: Diagrama de bloques detallado del submódulo *signif_cands_divisor*.

En la figura 4.20 se presenta el diagrama de flujo detallado elaborado a partir de los diagramas de las figura 4.18 y 4.19. En este diagrama se identifican los estados necesarios para el controlador junto con el flujo de las señales de control y decisión. Considerando este último diagrama se confecciona el diagrama *MDS* de la figura 4.21.

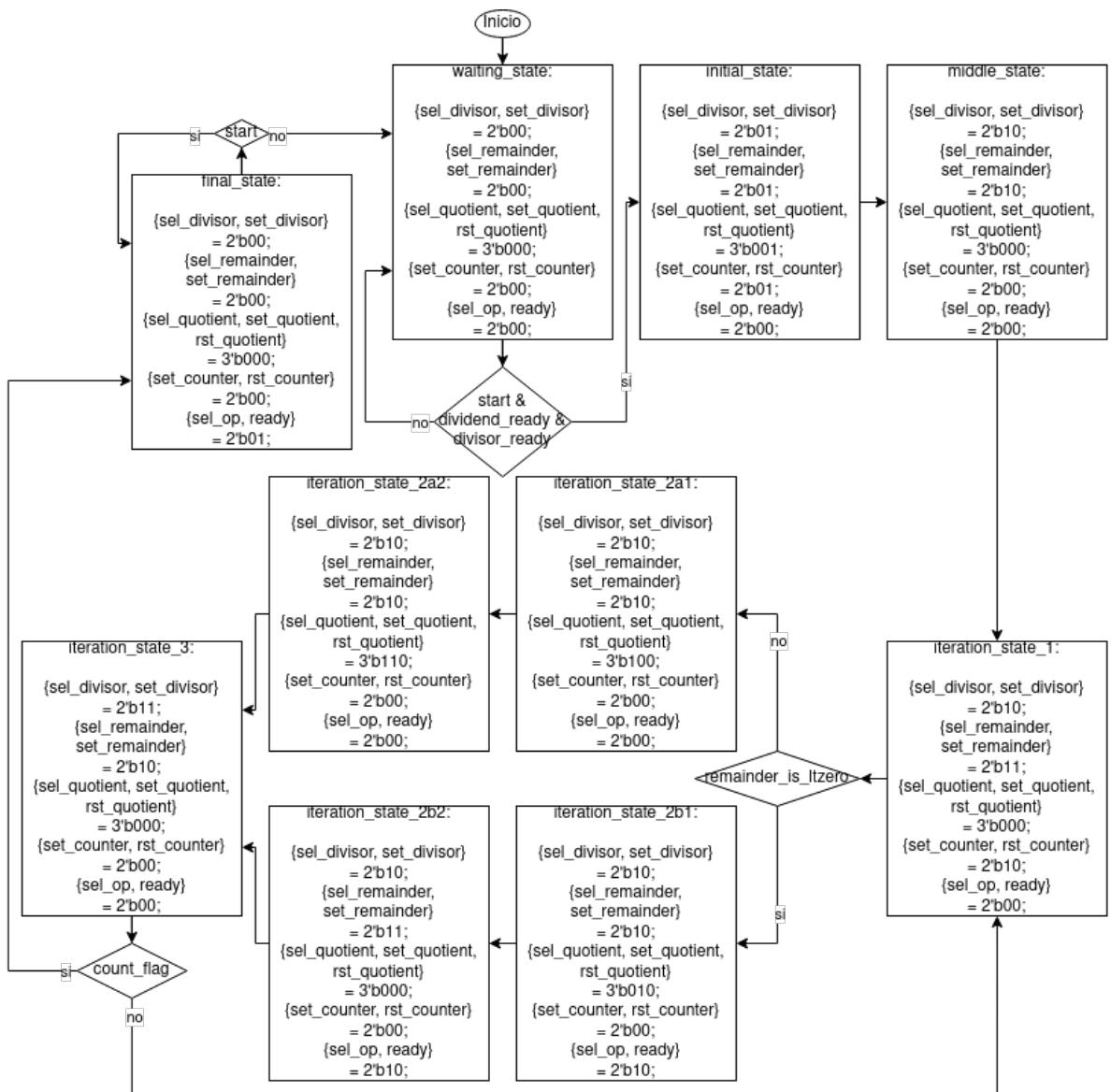


Figura 4.20: Diagrama de flujo detallado del submódulo *signifcands_divisor*.

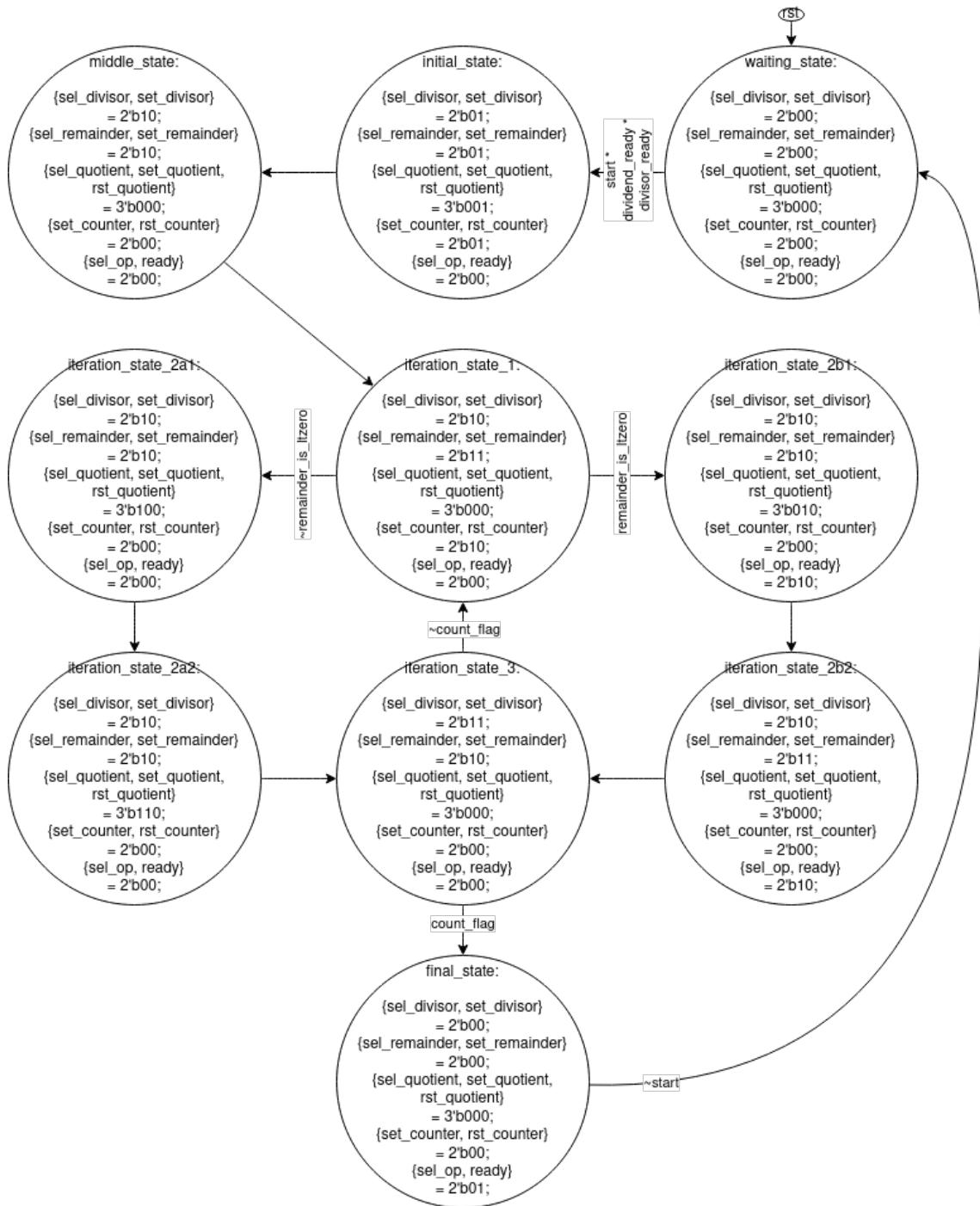


Figura 4.21: Diagrama MDS del submódulo *significands_divisor*.

A continuación, se detalla el rol de cada uno de los estados del controlador:

- **waiting_state:** Espera la señal de *start* y que ambos operandos estén normalizados, cuando esto sucede el siguiente estado es **initial_state**.
- **initial_state:** Guarda el divisor y resto inicial en los registros temporales e inicializa en cero los registros del cociente y del contador, luego pasa a **middle_state**.
- **middle_state:** Cambia las entradas de los registros del divisor y del resto por la salida del nuevo resultado temporal, luego el siguiente estado es **iteration_state_1**.
- **iteration_state_1:** Guarda el nuevo resto e incrementa en uno el contador, luego si el resto

es mayor o igual cero el siguiente estado es **iteration_state_2a1**, si no, pasa al estado **iteration_state_2b1**.

- **iteration_state_2a1:** Cambia la entrada del cociente (del registro que lo contiene) para que reciba en su entrada el mismo cociente desplazado en una posición a la izquierda, llenando con 1. El siguiente estado es **iteration_state_2a2**.
- **iteration_state_2a2:** Guarda el nuevo cociente y pasa a **iteration_state_3**.
- **iteration_state_2b1:** Modifica la operación que realiza la pequeña *ALU* por una suma (por defecto es resta). No modifica la entrada del cociente, por ello recibe en su entrada el mismo cociente desplazado en una posición a la izquierda, llenando con 0. Guarda el nuevo cociente y pasa a **iteration_state_2b2**.
- **iteration_state_2b2:** Guarda el nuevo resto y pasa a **iteration_state_3**.
- **iteration_state_3:** Fija la operación de la *ALU* en resta nuevamente y guarda el nuevo divisor. Si el contador llega a 27 el siguiente estado es **final_state**, en caso contrario se vuelve a **iteration_state_1**.
- **final_state:** Enciende *ready* y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.

4.5.1.5 FP Arithmetic Unit: SQRT

Este módulo se encarga de calcular el resultado inicial de la raíz cuadrada de un número de punto flotante, sin considerar la etapa de normalización o redondeo. Para ello, recibe las señales:

- **start, rst, clk:** Señal de inicio de ejecución, *reset* y reloj respectivamente.
- **exp_in[7:0]:** Exponente del operando.
- **man_in[27:0]:** Mantisa del operando.

Y retorna:

- **ready:** Señal de finalización de ejecución.
- **exp_out[7:0]:** Exponente del resultado.
- **man_out[27:0]:** Mantisa del resultado.

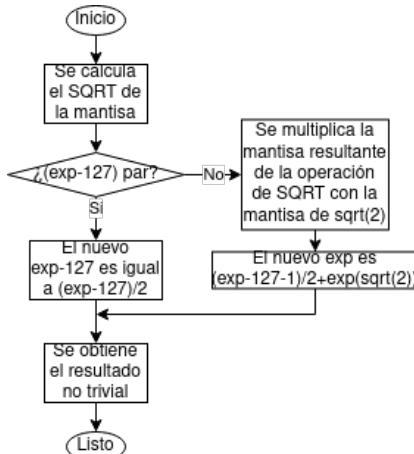


Figura 4.22: Diagrama de flujo simplificado del submódulo *SQRT*.

El algoritmo del diagrama de flujo de la figura 4.22 se basa en el trabajo realizado en [27], donde se propone una arquitectura para el cálculo de la raíz cuadrada de un número. A continuación, se

presenta el desarrollo matemático que determina este algoritmo, sea X un número en punto flotante, Y su mantisa y K su exponente (sin sesgo, es decir que $K = \text{exponent} - 127$), se cumple:

$$\sqrt{X} = \sqrt{Y} \sqrt{2^K} = \begin{cases} \sqrt{Y} 2^{\frac{K}{2}} & \text{si } K \text{ es par} \\ \sqrt{Y} 2^{\lfloor \frac{K}{2} \rfloor} \sqrt{2} & \text{si } K \text{ es impar} \end{cases} \quad (4.1)$$

Luego, para hallar la raíz cuadrada del número basta hallar el de la mantisa, esta tarea es del módulo *significand_sqrt* descrito en 4.5.1.6.

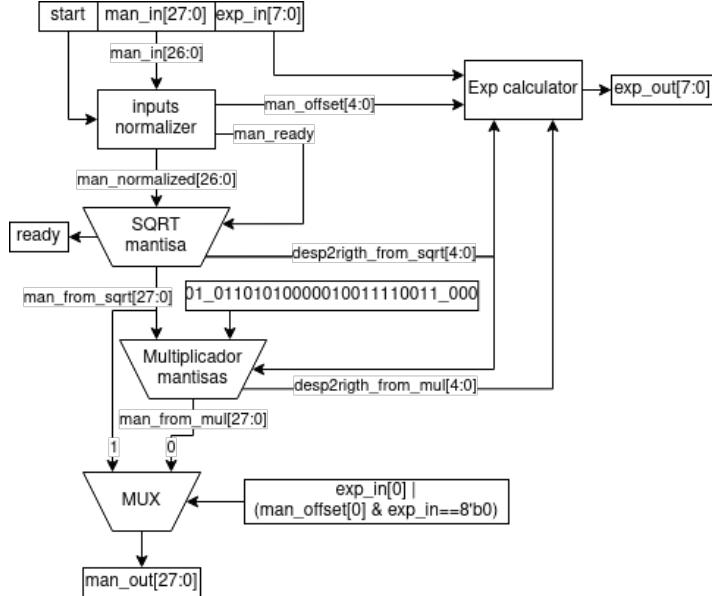


Figura 4.23: Diagrama de bloques detallado del submódulo *SQRT*.

A partir del diagrama de la figura 4.22 se confecciona el diagrama de bloques detallado de la figura 4.23. En este diagrama se identifican dos unidades secuenciales, el “*inputs normalizer*” y el “*SQRT mantisa*” (*significand_sqrt*), cuando finaliza la ejecución del primero comienza la del segundo. Por otra parte, el multiplicador de mantis recibe la mantisa de $\sqrt{2}$ y el resultado de *significand_sqrt*, nótese que el exponente sin sesgo de $\sqrt{2}$ es 0, con sesgo sería 127, por ello no hace falta considerarlo en el cálculo del exponente final. Además, *significand_sqrt* y el multiplicador de mantis retornan *desp2rigth_from_sqrt[4:0]* y *desp2rigth_from_mul[4:0]* respectivamente, estas señales indican cuanto se debe desplazar a la derecha la mantisa resultante para que el exponente inicial concuerde con el resultado de las multiplicaciones realizadas en estos módulos, también basta dejar la mantisa tal cual y sumar este desplazamiento al exponente.

4.5.1.6 FP Arithmetic Unit: *significand_sqrt*

Este módulo se encarga de calcular la raíz cuadrada de la mantisa. Para ello, recibe las entradas:

- **start, rst, clk:** Señal de inicio de ejecución, *reset* y reloj respectivamente.
- **frac_in[22:0]:** Recibe, únicamente, el campo *fraction* del número en punto flotante.

Y retorna:

- **ready:** Señal de finalización de ejecución.
- **man_output[26:0]:** Mantisa del resultado.
- **desp2rigth_out[4:0]:** Representa cuanto debe aumentar el exponente del resultado o cuanto se debe desplazar a la derecha el resultado para no tener que modificar el exponente.

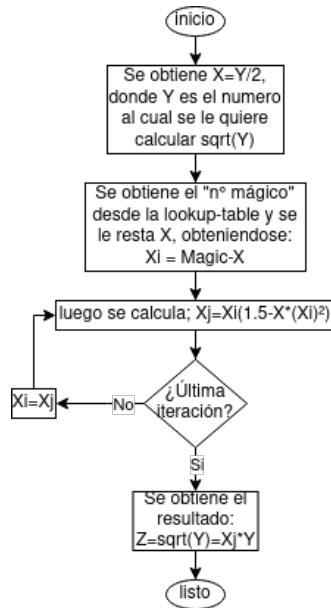


Figura 4.24: Diagrama de flujo simplificado del submódulo *significand_sqrt*.

En la figura 4.24 se aprecia el diagrama de flujo simplificado del módulo, este se basa en el algoritmo presentado en [27]. A continuación, se explica dicho algoritmo, en [27] se propone el método de *Newton-Raphson* para calcular la raíz cuadrada (y su inversa): para esto se comienza de un *guess*, g , inicial sobre el cual iterar para encontrar la función deseada, $g = (\sqrt{Y})^{-1}$, donde Y es la mantisa. Para aplicar *Newton-Raphson* se debe iterar $new_g = g - \frac{f(g)}{f'(g)}$, para esto se define la función:

$$error(g) = (g)^{-2} - ((\sqrt{Y})^{-1})^{-2} = \frac{1}{g^2} - Y = g^{-2} - Y \quad (4.2)$$

Luego se obtiene:

$$new_g = g - \frac{error(g)}{error'(g)} = g + \frac{g - Yg^3}{2} = \frac{3}{2}g - \frac{1}{2}Yg^3 = g(1.5 - 0.5Yg^2) \quad (4.3)$$

A partir de esta última ecuación se obtiene el algoritmo de la figura 4.24. Para la implementación, en [27], se propone un *Look-Up-Table* que determina el primer valor de g , esta tabla recibe Y y retorna el número mágico, *MagicNumber*, según lo indicado en la tabla 4.10. En concreto, se calcula $x = Y/2 = 0.5Y$ y $x_i = MagicNumber - x$, con esto se iteran las siguientes ecuaciones un número determinado de veces:

$$x_j = x_i(1.5 - x_i^2) \quad (4.4)$$

$$x_i = x_j \quad (4.5)$$

Donde x_j sería *new_g* y x_i sería *g*. Al finalizar, $x_j \approx (\sqrt{Y})^{-1}$ y $\sqrt{Y} \approx x_j Y$, obteniéndose el resultado deseado.

Considerando el algoritmo planteado y la arquitectura propuesta en [27], se confecciona el diagrama de bloques detallado de la figura 4.25. Este diagrama difiere del diseño original de [27], donde se realizan dos iteraciones simplemente duplicando el *hardware* (permitiendo un diseño puramente combinacional). En este caso se realizan las iteraciones reutilizando *hardware*, por lo mismo, requiere de un controlador y más ciclos de reloj para su ejecución, tal como se puede apreciar en la figura 4.25.

| Lookup-Table | | |
|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------|
| From | To | MagicNumber |
| 1.00000000000000000000000000000000 | 1.00111111111111111111111111111111 | 1.10000001100001001111010 |
| 1.01000000000000000000000000000000 | 1.01011111111111111111111111111111 | 1.1000100110111010000111 |
| 1.01100000000000000000000000000000 | 1.01111111111111111111111111111111 | 1.1000101011111001100111 |
| 1.10000000000000000000000000000000 | 1.10011111111111111111111111111111 | 1.10010001011001000011000 |
| 1.10100000000000000000000000000000 | 1.10111111111111111111111111111111 | 1.10011001000100100100010 |
| 1.11000000000000000000000000000000 | 1.11011111111111111111111111111111 | 1.10100010100010100001111 |
| 1.11100000000000000000000000000000 | 1.11111111111111111111111111111111 | 1.1011010101111011100101 |

Tabla 4.10: *Lookup-Table* propuesto por [27].

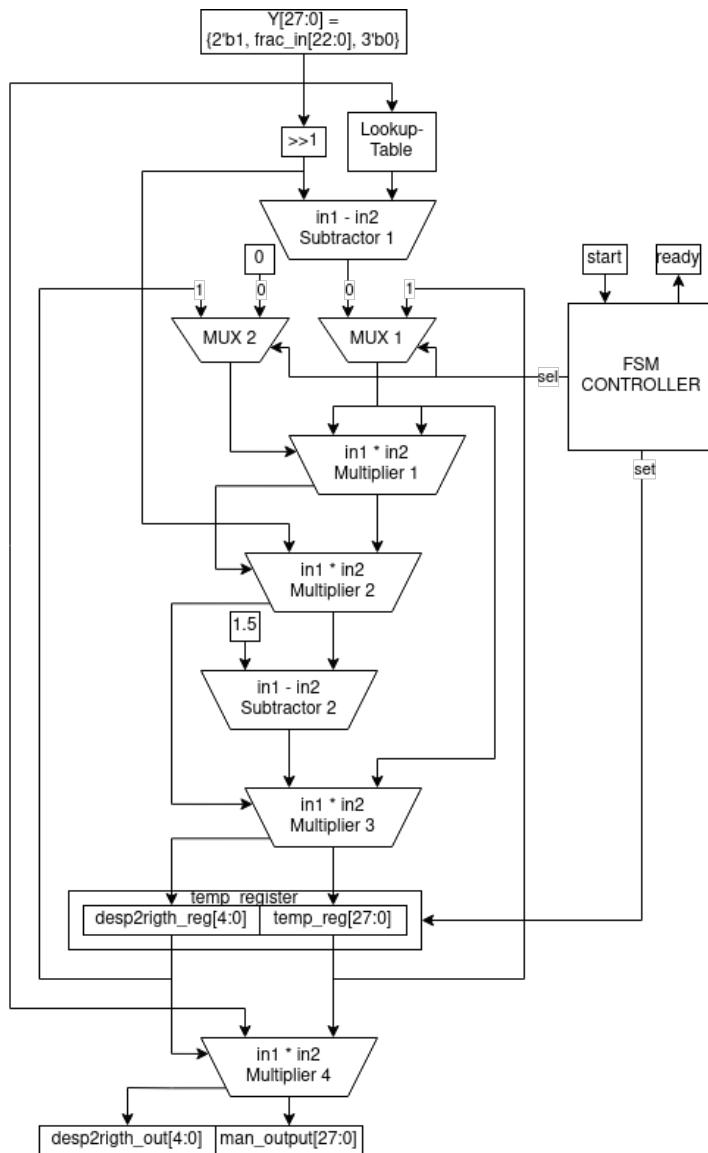


Figura 4.25: Diagrama de bloques detallado del submódulo *significand_sqrt*.

Finalmente, la máquina de estados resulta bastante simple, se podría añadir un contador para determinar el número de iteraciones, sin embargo, por simplicidad solo se añaden más estados al *FSM*. En la figura 4.26 se observa el diagrama de flujo detallado, a partir del cual se confecciona el diagrama *MDS* de la figura 4.27.

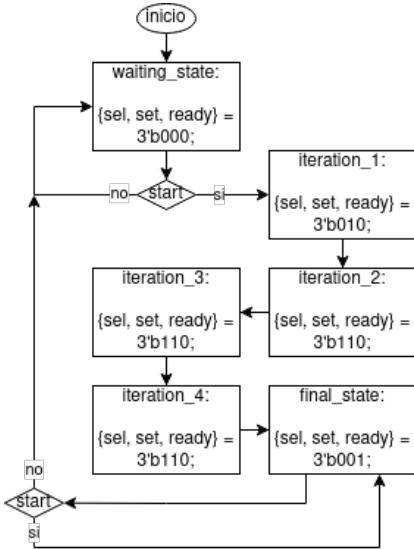


Figura 4.26: Diagrama de flujo detallado del submódulo *significand_sqrt*.

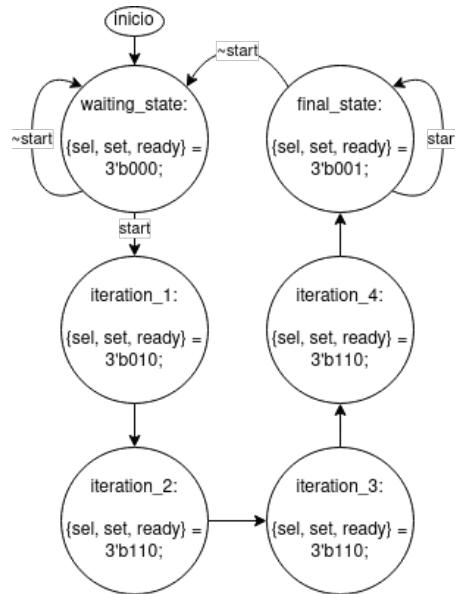


Figura 4.27: Diagrama *MDS* del submódulo *significand_sqrt*.

A continuación, se explica el rol de cada uno de los estados del controlador:

- **waiting_state**: Espera la señal de *start*, luego el siguiente estado es **iteration_1**.
- **iteration_1**: Guarda el resultado inicial, luego pasa a **iteration_2**.
- **iteration_2, iteration_3 y iteration_4**: Todos estos estados guardan el nuevo resultado considerando la mantisa obtenida en la iteración anterior. El estado **iteration_2** pasa a **iteration_3**, **iteration_3** pasa a **iteration_4** e **iteration_4** a **final_state**.
- **final_state**: Enciende *ready* y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.

4.5.1.7 FP Arithmetic Unit: Exceptions and trivial cases checker

Este módulo, *excep_triv_checker*, se encarga de verificar las entradas de la operación a realizar por la *fp_arithmetic_unit*, esto con el fin de identificar de forma inmediata cuando los operandos no son válidos, presentan alguna excepción o el resultado es trivial. Para esta tarea recibe las siguientes señales:

- **start, clk**: Señal de inicio de ejecución y reloj respectivamente.
- **sig1, sig2**: Signo de cada operando.
- **exp1[7:0], exp2[7:0]**: Exponente de cada operando.
- **frac1[23:0], frac2[23:0]**: Recibe, únicamente, el campo *fraction* y el bit silencioso de cada operando.
- **rm[2:0]**: El *rounding mode* seleccionado. Ver tabla 4.7.
- **op[1:0]**: Señal que codifica la operación a realizar: 00 para la suma, 01 la multiplicación, 10 la división y 11 para el calculo de raíz cuadrada.

Y retorna:

- **ready**: Señal de finalización de ejecución.
- **status_out[2:0]**: Señal que indica la bandera que se genera. Su codificación es la misma que la presentada en la tabla 4.9.
- **sel_out[2:0]**: Señal que indica cual es la salida. Esta señal se codifica según lo indicado en la tabla 4.11 y comparte codificación con la señal de control del mismo nombre del *FSM* de la figura 4.9.

| sel_out[2:0] | |
|--------------|---------------|
| Code | Out. selected |
| 000 | No trivial |
| 001 | In1 |
| 010 | In2 |
| 011 | Almost inf |
| 100 | Zero |
| 101 | Almost zero |
| 110 | Inf |
| 111 | NaN |

Tabla 4.11: Codificación de la salida *sel_out* del módulo *excep_triv_checker* y del *FSM* del módulo *fp_arithmetic_unit* (ver figura 4.9).

El módulo es completamente combinacional, exceptuando dos unidades “*inputs normalizer*” consideradas para las entradas *frac1* y *frac2*. La lógica combinacional está definida por el diagrama de flujo de la figura 4.28.

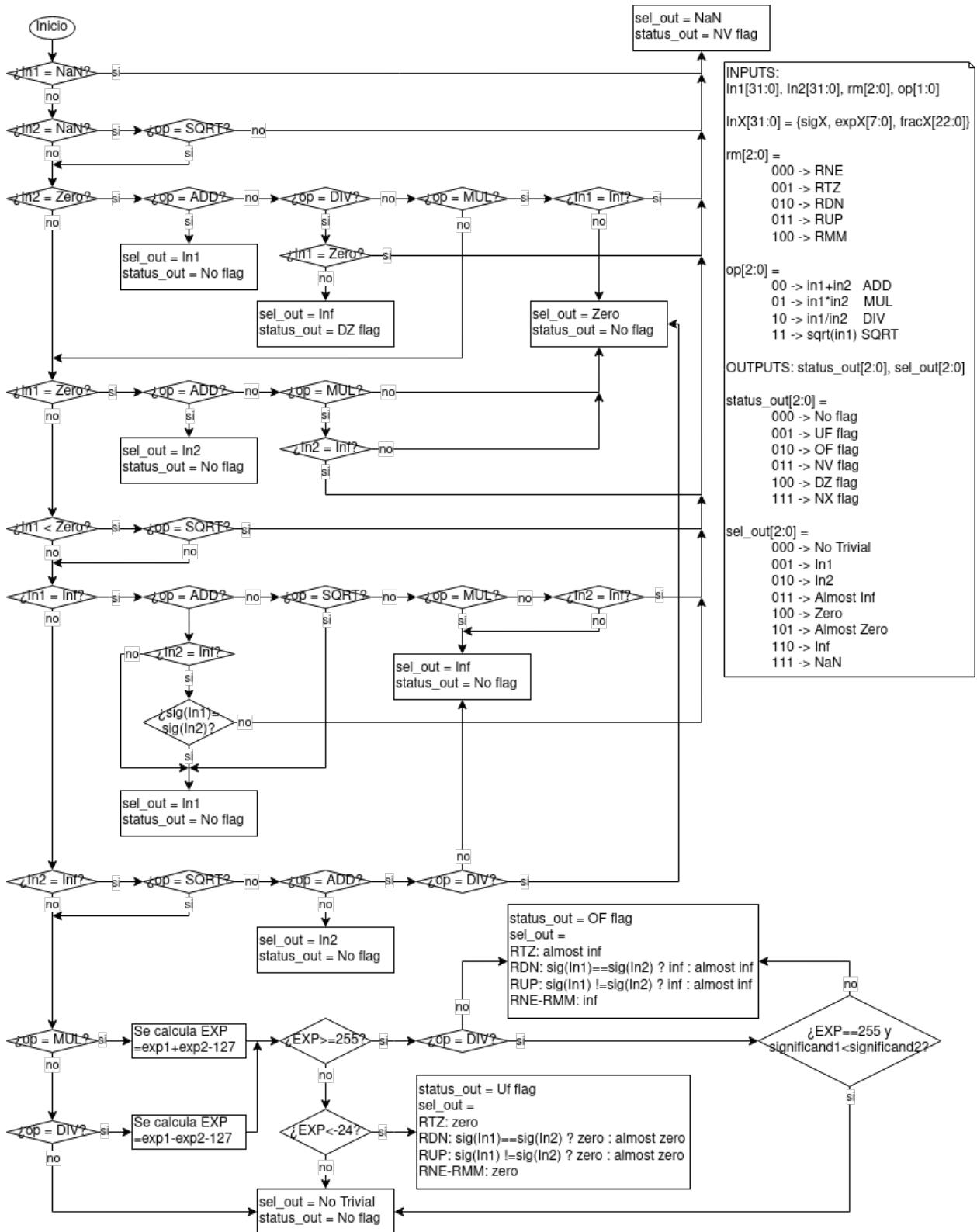


Figura 4.28: Diagrama de flujo del submódulo *excep_triv_checker*.

4.5.1.8 FP Arithmetic Unit: NORMALIZER

Este módulo se encarga de recibir el resultado preliminar del módulo *fp_arithmetic_unit* y lo normaliza si corresponde. Para esta tarea recibe las siguientes señales:

- **start, rst, clk**: Señal de inicio de ejecución, *reset* y reloj respectivamente.
- **exp_in[7:0]**: Exponente del operando.
- **man_in[27:0]**: Mantisa del operando.

Y retorna:

- **ready**: Señal de finalización de ejecución.
- **status[1:0]**: Señal que indica si el resultado final está correcto y normalizado o si es desnormalizado, o si ocurre un *underflow* u *overflow*. Ver tabla 4.12.
- **exp_out[7:0]**: Exponente del resultado.
- **man_out[27:0]**: Mantisa del resultado.

| status[1:0] | |
|-------------|---------------|
| Code | Status |
| 00 | Normalized |
| 01 | Underflow |
| 10 | Overflow |
| 11 | Desnormalized |

Tabla 4.12: Codificación de la salida *status* del módulo *NORMALIZER*.

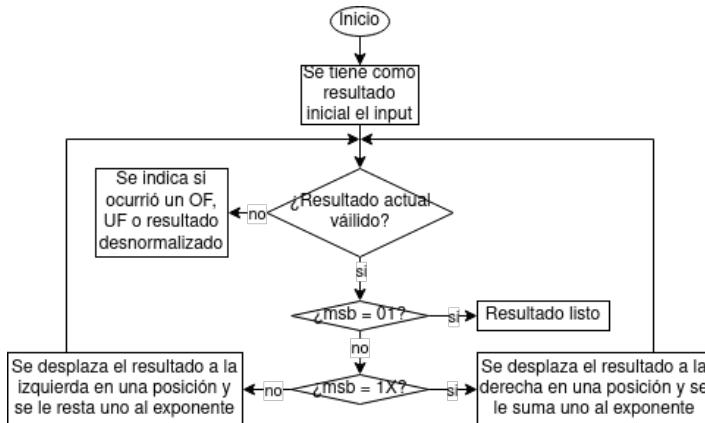


Figura 4.29: Diagrama de flujo simplificado del submódulo *NORMALIZER*.

En la figura 4.29 se observa el diagrama de flujo simplificado con el algoritmo utilizado para la normalización, donde $msb = man_in[27 : 26]$. A partir de este diagrama de flujo se confecciona el diagrama de bloques de la figura 4.30.

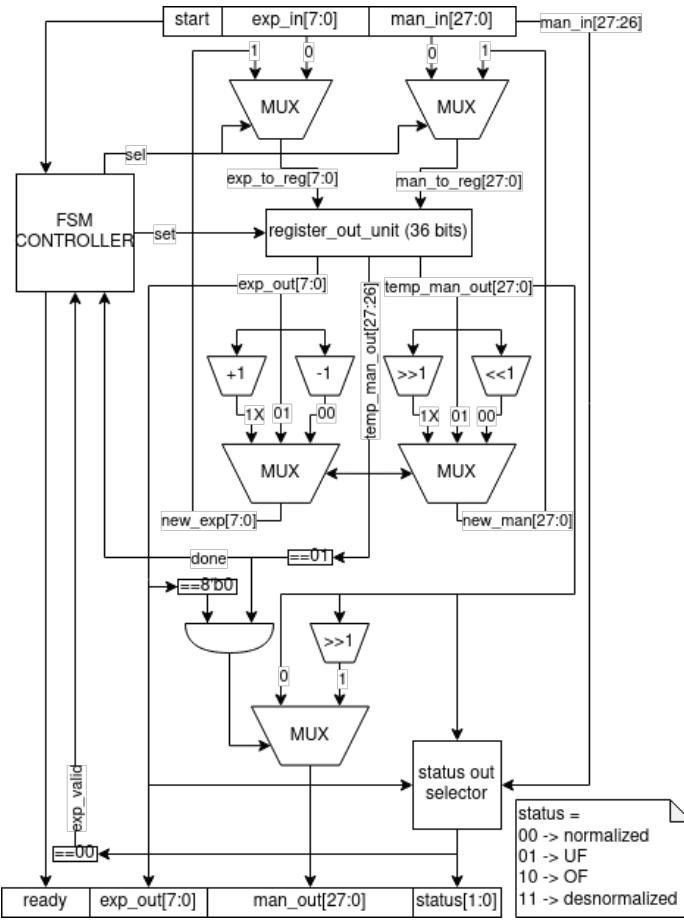


Figura 4.30: Diagrama de bloques detallado del submódulo *NORMALIZER*.

En la figura 4.30 se pueden apreciar las señales de decisión para la máquina de estados, las cuales son: *done* para indicar que el resultado está normalizado y *exp_valid*, que indica si *status* = 00, para informar que el resultado actual es válido. Por otra parte, la unidad “*status out selector*” recibe las señales necesarias para determinar el valor de *status*.

Con la ayuda de los diagramas de las figuras 4.29 y 4.30 se construye el diagrama de flujo detallado de la figura 4.31 y, posteriormente, el diagrama *MDS* de la figura 4.32. Estos últimos definen el funcionamiento de la máquina de estados que rige la ejecución del módulo. A continuación, se explica el rol de cada estado:

- **waiting_state:** Espera la señal de *start*, luego el siguiente estado es **initial_state**.
- **initial_state:** Guarda el resultado inicial y pasa al estado **iteration_state** si aún no está normalizado pero sigue siendo un resultado válido. Si ya está normalizado o deja de ser válido pasa a **final_state**.
- **iteration_state:** En cada ciclo actualiza al nuevo resultado considerando el anterior, si ya está normalizado o deja de ser válido pasa a **final_state**.
- **final_state:** Enciende *ready* y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.

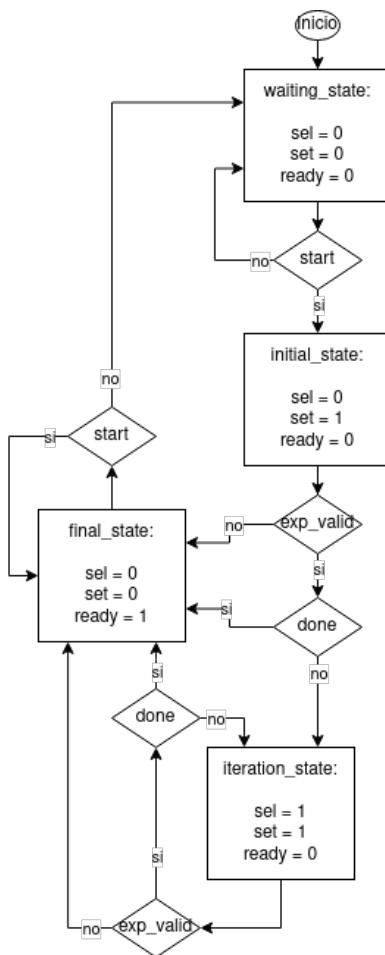


Figura 4.31: Diagrama de flujo detallado del submódulo *NORMALIZER*.

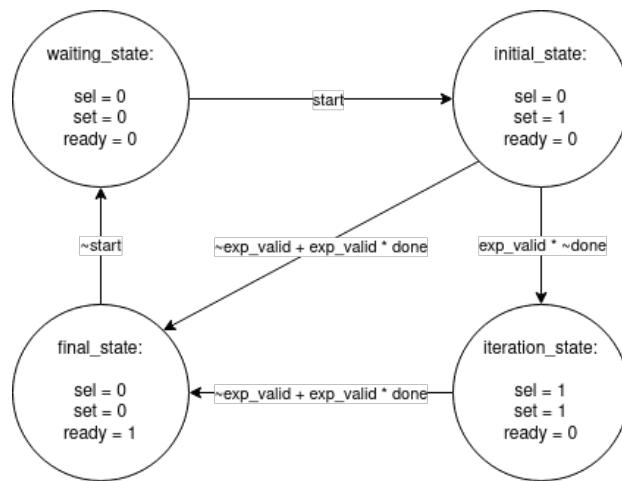


Figura 4.32: Diagrama *MDS* del submódulo *NORMALIZER*.

4.5.1.9 FP Arithmetic Unit: ROUNDER

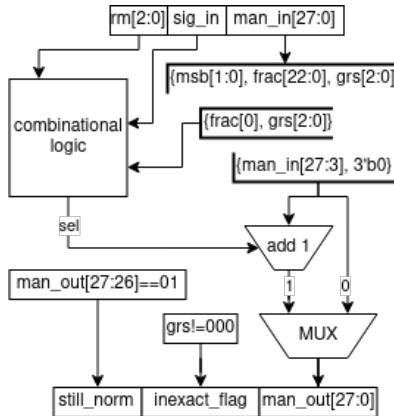


Figura 4.33: Diagrama de bloques detallado del submódulo *ROUNDER*.

Este módulo es completamente combinacional y se encarga de recibir la salida del *NORMALIZER* para aplicar el modo de redondeo seleccionado. Para esta tarea recibe las entradas:

- **rm[2:0]**: El modo de redondeo.
- **sig_in**: Signo del resultado sin redondear.
- **man_in[27:0]**: Mantisa del resultado sin redondear.

Y retorna:

- **still_norm**: Bandera que indica que el resultado sigue estando normalizado.
- **inexact_flag**: Bandera que indica que el resultado es inexacto.
- **man_out[27:0]**: Mantisa del resultado después del redondeo.

En la figura 4.33 se visualiza el diagrama de bloques detallado del módulo, donde se puede ver el bloque “*combinational logic*”. Este bloque se encarga de decidir, según lo indicado en la tabla 4.7, si truncar o redondear el resultado. Luego, el módulo utiliza las banderas *still_norm* y *inexact_flag* para informar a *fp_arithmetic_unit* el estado del resultado, si sigue normalizado y/o es un resultado inexacto respectivamente.

4.5.2 FP Converter Unit

Este módulo, *fp_converter*, se encarga de realizar las conversiones de números enteros, con y sin signo, a números en punto flotante y viceversa. Para ello, recibe las siguientes entradas:

- **start, rst, clk**: Señal de inicio de ejecución, de *reset* y reloj respectivamente.
- **rm[2:0]**: El *rounding mode* seleccionado. Ver tabla 4.7.
- **option**: Señal que indica la operación a realizar. Si es 1 se realiza la conversión de entero a punto flotante y viceversa si es 0.
- **integer_is_signed**: Si es 1 indica que el entero de la conversión es con signo, en caso de ser 0 es sin signo.
- **in[31:0]**: Número de entrada, ya sea entero o punto flotante, para la conversión.

Y retorna:

- **ready**: Señal que indica que la conversión se ha completado.
- **NV, NX**: Banderas de conversión no válida e inexacta respectivamente.

- **out[31:0]:** El resultado de la conversión.

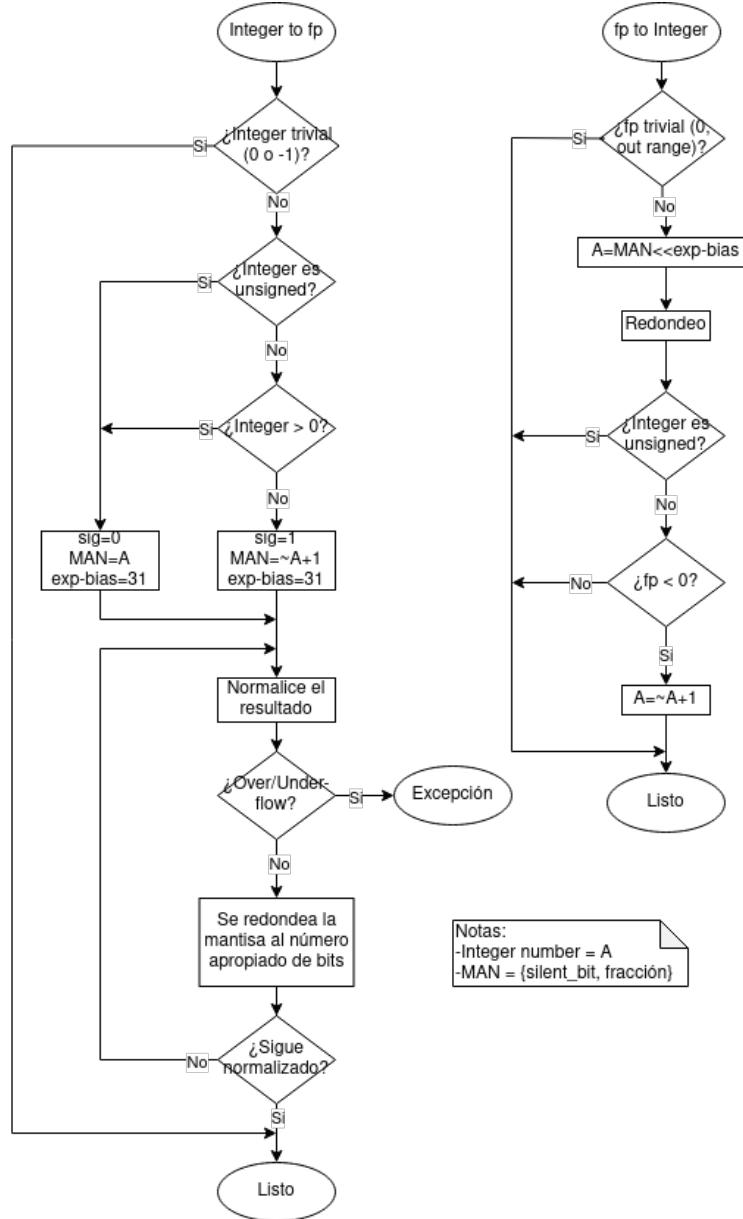


Figura 4.34: Diagramas de flujo simplificado del módulo *fp_converter*.

Para este módulo se confeccionan dos diagramas de flujo simplificado, los cuales se pueden ver en la figura 4.34, uno para cada tipo de conversión. Ambos algoritmos son la aplicación directa de los conceptos básicos presentados en la sección 2.1.3. Además, en estos diagramas se aprecia que la conversión de número entero a punto flotante es más compleja que la de punto flotante a entero, esto se debe a la necesidad de incluir las fases de normalización y redondeo similares a las requeridas por la unidad *fp_arithmetic_unit*.

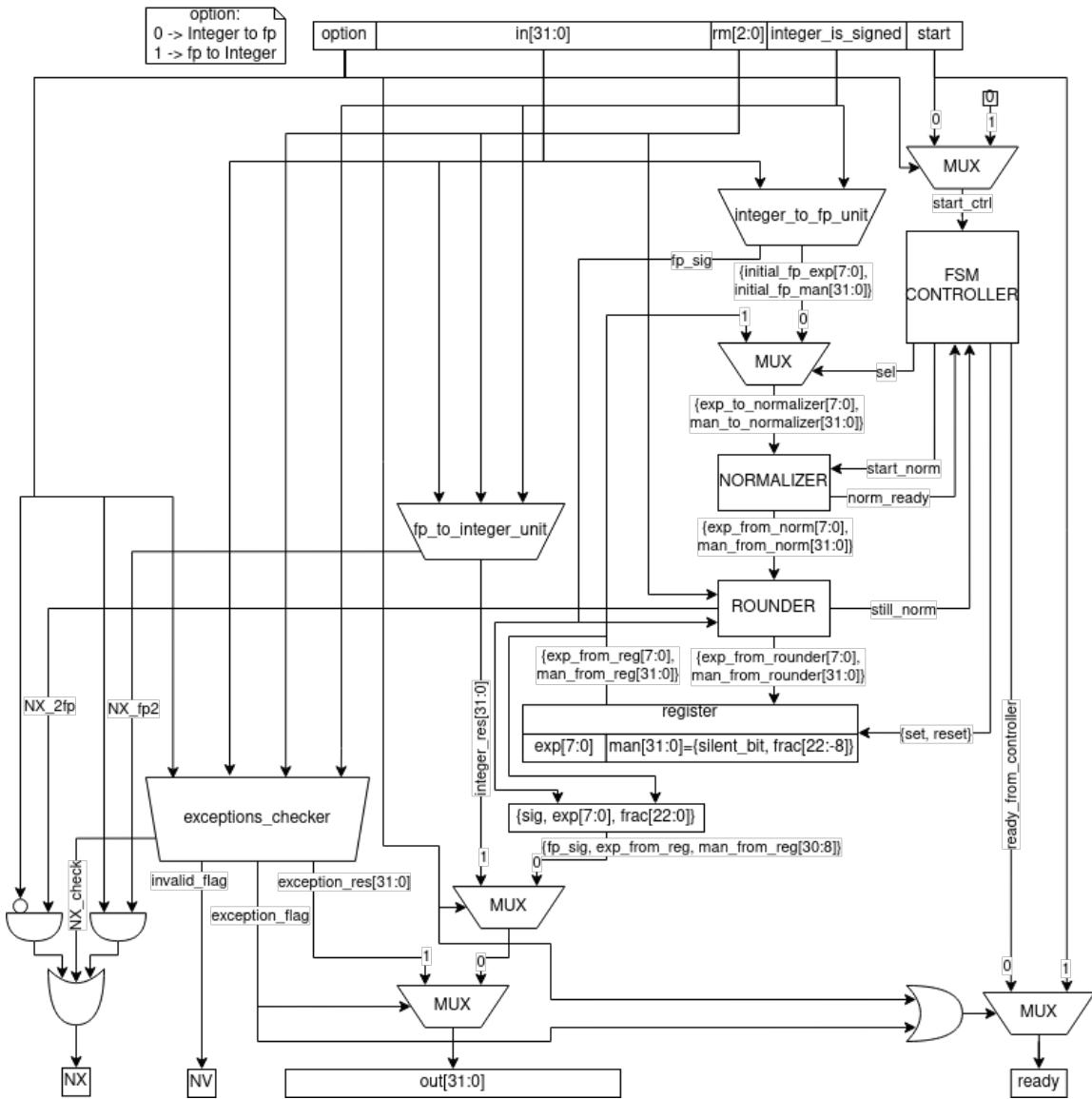


Figura 4.35: Diagrama de bloques detallado del módulo *fp_converter*.

Considerando los diagramas de la figura 4.34 se elabora el diagrama de bloques detallado de la figura 4.35, donde se identifican los principales 5 submódulos funcionales del módulo:

- **exceptions_checker**: Unidad encargada de identificar los casos triviales y excepciones en las conversiones. Detallado en 4.5.2.1.
- **fp_to_integer_unit**: Unidad que realiza la conversión de número de punto flotante a entero. Detallado en 4.5.2.2.
- **integer_to_fp_unit**: Unidad que realiza la conversión de número entero a punto flotante. Detallado en 4.5.2.4.
- **NORMALIZER**: Normaliza el resultado de la conversión de número entero a punto flotante. Detallado en 4.5.2.5.
- **ROUNDER**: Realiza el redondeo del resultado de la conversión de número entero a punto flotante siguiendo la tabla 4.7. Detallado en 4.5.2.6.

Además, en la figura 4.35 se aprecian las señales de control y de decisión del *FSM* que rige la ejecución de la unidad de conversión. Nótese además, que todos los bloques, exceptuando *NORMALIZER*

y *FSM CONTROLLER*, son combinacionales. Por otra parte, es importante señalar que el *FSM* se activa únicamente para la conversión de entero a flotante.

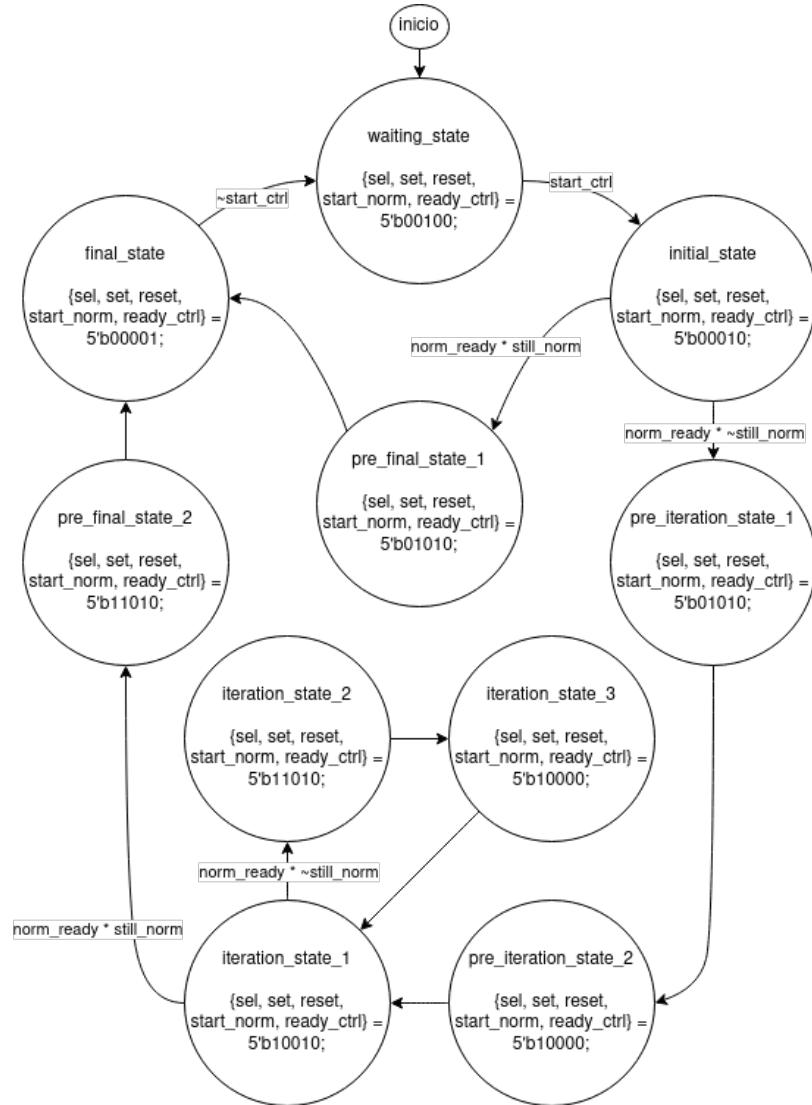


Figura 4.36: Diagrama *MDS* del módulo *fp_converter*.

A partir del diagrama de flujo para la conversión de entero a punto flotante (figura 4.34) y diagrama de bloques detallado (figura 4.35) se confecciona, directamente, el diagrama *MDS* para la máquina de estados del módulo. A continuación se explica cada estado de la misma:

- **waiting_state**: Mantiene el registro temporal con la respuesta en 0 (*reset* = 1) y espera la señal *start_ctrl* para iniciar la ejecución, cuando esto sucede el siguiente estado es **initial_state**.
- **initial_state**: Inicia la ejecución del *NORMALIZER* (*start_norm* = 1) y espera a que finalice su ejecución (*norm_ready*=1). Cuando esto sucede, depende de la señal *still_norm* el siguiente estado, si es 1 se pasa a **pre_final_state_1**, de ser 0 a **pre_iteration_state_1**.
- **pre_iteration_state_1**: Guarda el resultado inicial en el registro temporal (*set* = 1) y pasa al estado **pre_iteration_state_2**.
- **pre_iteration_state_2**: Apaga el *NORMALIZER* (*start_norm* = 0) y cambia la entrada del mismo (*sel* = 1) por el del resultado en curso. El siguiente estado es **iteration_state_1**.

- **iteration_state_1**: Inicia la ejecución del *NORMALIZER* ($start_norm = 1$) y espera a que finalice su ejecución ($norm_ready=1$). Cuando esto sucede, depende de la señal *still_norm* el siguiente estado, si es 1 se pasa a **pre_final_state_2**, de ser 0 a **iteration_state_2**.
- **iteration_state_2**: Guarda el resultado actual en el registro temporal ($set = 1$) y pasa al estado **iteration_state_3**.
- **iteration_state_3**: Apaga el *NORMALIZER* ($start_norm = 0$) y pasa al estado **iteration_state_1**.
- **pre_final_state_1**: Guarda el resultado inicial en el registro temporal ($set = 1$) y pasa al estado **final_state**.
- **pre_final_state_2**: Guarda el resultado actual en el registro temporal ($set = 1$) y pasa al estado **final_state**.
- **final_state**: Apaga el *NORMALIZER* ($start_norm = 0$), activa *ready_from_controller* y retorna a **waiting_state** si *start_ctrl* se apaga.

A continuación, se presentan los principales submódulos del *fp_converter*.

4.5.2.1 FP Converter Unit: *exceptions_checker*

El módulo *converter_exceptions_checker* es completamente combinacional y es el encargado de verificar la entrada del conversor e identificar de forma inmediata los casos triviales, entradas no válidas o excepciones. Para esta tarea recibe las siguientes señales:

- **option**: Si es 1 la conversión es de punto flotante a entero, en caso de ser 0 es la conversión inversa.
- **integer_is_signed**: Si es 1 el entero involucrado en la conversión es con signo, de ser 0 es sin signo.
- **rm[2:0]**: El *rounding mode* seleccionado. Ver tabla 4.7.
- **in[31:0]**: Número de entrada para la conversión.

Y retorna:

- **invalid_flag, inexact_flag**: Banderas de operación inválida e inexacta respectivamente.
- **exception_flag**: Bandera que indica que la respuesta final del módulo *fp_converter* es trivial y viene dada por *exception_res* cuando es 1, en caso de ser 0 la respuesta no es trivial.
- **exception_res[31:0]**: Respuesta trivial, válida cuando *exception_flag = 1*, del módulo *fp_converter*.

En la figura 4.37 se aprecia el diagrama de flujo que determina la lógica combinacional del submódulo.

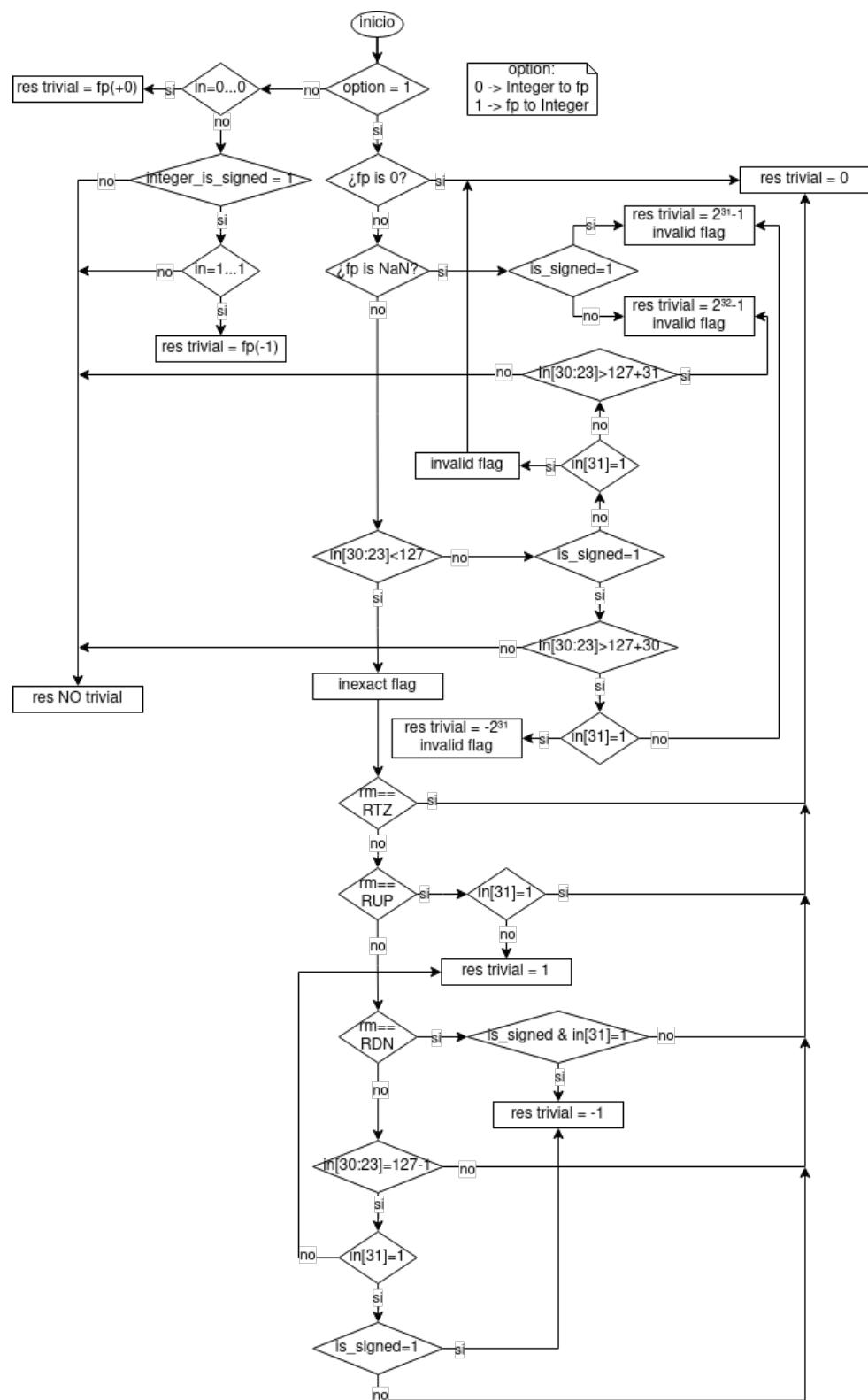


Figura 4.37: Diagrama de flujo del submódulo *converter_exceptions_checker* del módulo *fp_converter*.

4.5.2.2 FP Converter Unit: fp_to_integer_unit

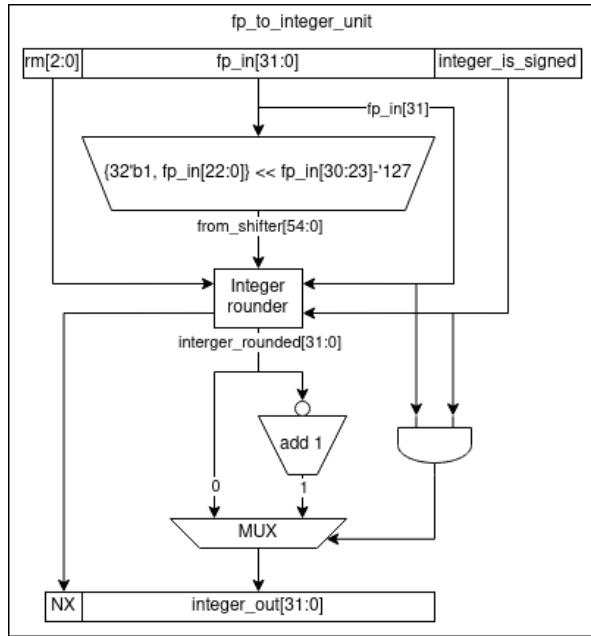


Figura 4.38: Diagrama de bloques detallado del submódulo *fp_to_integer_unit* del módulo *fp_converter*.

Este módulo, *fp_to_integer_unit*, es el encargado de realizar la conversión punto flotante a entero y es completamente combinacional. Para esta tarea recibe las señales:

- **integer_is_signed**: Señal que indica que el entero tiene signo.
- **rm[2:0]**: Modo de redondeo seleccionado.
- **fp_in[31:0]**: Número flotante a convertir.

Y retorna:

- **NX**: Bandera de operación inexacta.
- **integer_out[31:0]**: Entero resultante.

En la figura 4.38 se aprecia el diagrama de bloques detallado, el cual se confecciona a partir del diagrama de flujo específico para esta conversión de a la figura 4.34. Como se aprecia en la figura este módulo presenta una arquitectura simple basada en los conceptos presentados en 2.1.3. El bloque “*Integer rounder*” se explica a continuación.

4.5.2.3 FP Converter Unit: Integer rounder

El módulo combinacional *integer_rounder* realiza el redondeo del número entero resultante de la conversión de punto flotante a entero. Para ello, utiliza el mismo criterio de la tabla 4.7. Las entradas que recibe son:

- **is_signed**: Si es 1 el entero es con signo, de ser 0 es sin signo.
- **sig_in**: Indica el signo del entero si lo hubiese.
- **rm[2:0]**: Modo de redondeo seleccionado.
- **integer_in[54:0]**: Entero por redondear, observe que tiene 55 bits (32+23) para no perder ningún bit del campo *fraction* del punto flotante entrante. Esto es importante a la hora de calcular el *sticky* bit a considerar para el redondeo.

Y retorna:

- **NX**: Bandera que de operación inexacta.
- **integer_out[31:0]**: Entero redondeado.

EL entero resultante viene dado por $integer_in[54:23]$, el calculo de los bits de redondeo se realiza de la siguiente forma: g (*guard*) y r (*round*) corresponden a los bits $integer_in[22]$ e $integer_in[21]$ respectivamente, mientras que s (*sticky*) es igual a 1 solo si se cumple que $integer_in[20 : 0] \neq 0$. Por otra parte, NX es 0 cuando $grs = 000$, en caso contrario es 1. Finalmente, el módulo considera el signo del entero para determinar la salida del módulo y considera la posibilidad de *overflow* (debido a como se realiza la conversión no hace falta manejar el caso de *underflow*).

4.5.2.4 FP Converter Unit: integer_to_fp_unit

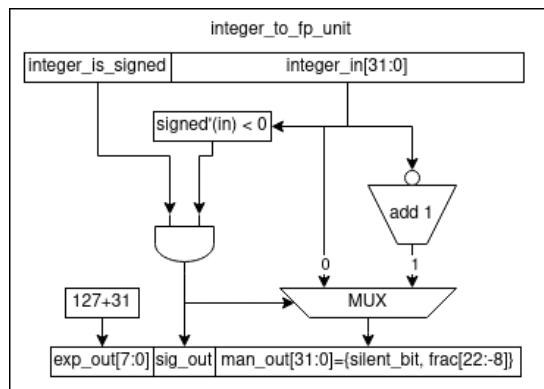


Figura 4.39: Diagrama de bloques detallado del submódulo *integer_to_fp_unit* del módulo *fp_converter*.

El módulo combinacional *integer_to_fp_unit* es el encargado de obtener el resultado inicial de la conversión de entero a punto flotante. Para ello, recibe las entradas:

- **integer_is_signed**: Señal que indica que el entero de entrada tiene signo.
- **integer_in[31:0]**: Entero a convertir.

Para retornar:

- **sig_out**: Signo del punto flotante resultante.
- **exp_out[7:0]**: Exponente del punto flotante resultante.
- **man_out[31:0]**: Mantisa del punto flotante resultante.

En la figura 4.39 se aprecia el diagrama de bloques detallado del submódulo, el cual se confecciona a partir del diagrama de flujo, específico para esta operación, de la figura 4.34. Las salidas de este módulo deben pasar por las fases de normalización y redondeo. A continuación, se explican los módulos encargados de estas tareas.

4.5.2.5 FP Converter Unit: NORMALIZER

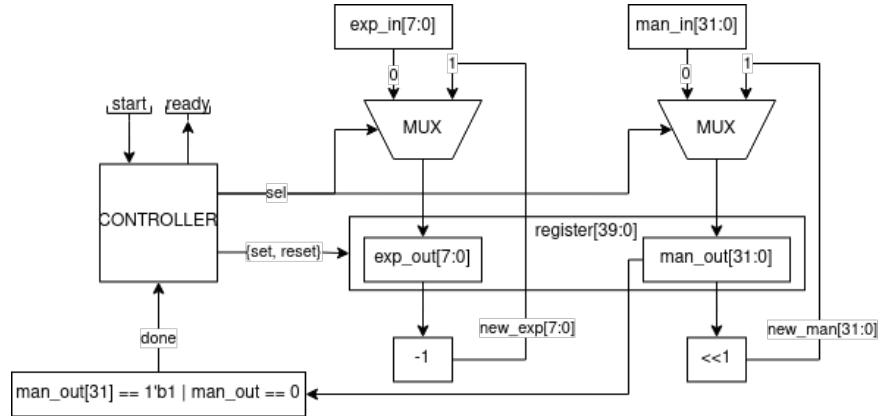


Figura 4.40: Diagrama de bloques detallado del submódulo *normalizer_integer2fp* del módulo *fp_converter*.

El submódulo *normalizer_integer2fp* se encarga de normalizar el resultado preliminar del módulo *integer_to_fp_unit*. Para esta tarea recibe las señales:

- **start, rst, clk**: Señales de inicio de ejecución, *reset*, y reloj del sistema respectivamente.
- **exp_in[7:0]**: Exponente del resultado preliminar en punto flotante.
- **man_in[31:0]**: Mantisa del resultado preliminar en punto flotante.

Y retorna:

- **ready**: Señal que indica la finalización de la normalización.
- **exp_out[7:0]**: Exponente resultante.
- **man_out[31:0]**: Mantisa resultante.

En la figura 4.40 se aprecia el diagrama de bloques detallado, el cual se basa en el el diagrama de flujo del normalizador de la unidad aritmética de punto flotante (figura 4.29), pero sin considerar el desplazamiento a la derecha. Por lo tanto, esta es una versión simplificada y suficiente para la conversión de entero a flotante.

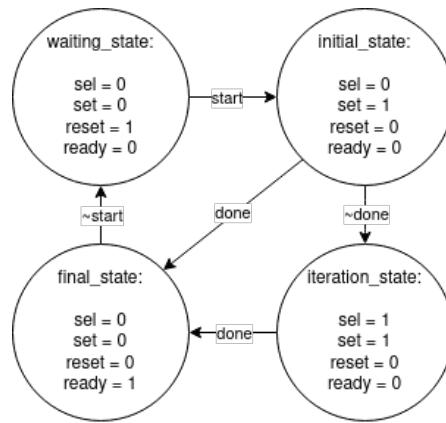


Figura 4.41: Diagrama *MDS* del submódulo *normalizer_integer2fp* del módulo *fp_converter*.

A partir del diagrama de bloques detallado de la figura 4.40 se elabora directamente el diagrama *MDS* (figura 4.41) de la máquina de estados del controlador. A continuación, se explica el rol de cada estado:

- **waiting_state**: Mantiene el registro temporal en cero y espera la señal *start*, cuando esto sucede pasa al estado **initial_state**.
- **initial_state**: Guarda el resultado inicial y pasa al estado **iteration_state** si aún no está normalizado (*done* = 0), en caso de estarlo (*done* = 1) pasa al estado **final_state**.
- **iteration_state**: En cada ciclo actualiza el nuevo resultado considerando el anterior, si ya está normalizado (*done* = 1) pasa al estado **final_state**.
- **final_state**: Enciende *ready* y vuelve a **waiting_state** cuando *start* se apaga.

4.5.2.6 FP Converter Unit: ROUNDER

El módulo combinacional *rounder_integer2fp* se encarga de tomar el resultado del módulo *normalizer_integer2fp* para realizar el redondeo siguiendo el criterio de la tabla 4.7. Para esto, recibe las entradas:

- **sig_in**: Signo del número en punto flotante a redondear.
- **rm[2:0]**: Modo de redondeo seleccionado.
- **exp_in[7:0]**: Exponente del número en punto flotante.
- **man_in[31:0]**: Mantisa del número en punto flotante.

Y retorna:

- **still_norm**: Bandera que indica que el número sigue normalizado después del redondeo.
- **NX**: Bandera que indica que el resultado es inexacto.
- **exp_out[7:0]**: Exponente del resultado normalizado.
- **man_out[31:0]**: Mantisa del resultado normalizado.

El calculo de los bits de redondeo se realiza de la siguiente forma: *g* (*guard*) y *r* (*round*) corresponden a los bits *man_in[7]* e *man_in[6]* respectivamente, mientras que *s* (*sticky*) es igual a 1 solo si se cumple que *man_in[5 : 0] ≠ 0*. Por otra parte, *NX* es 0 cuando *grs* = 000, en caso contrario es 1.

4.6 Core Complex

El *core complex* corresponde al módulo que contiene el procesador del *SoC*, este es de un solo núcleo (*core*), *single issue* y utiliza el juego de instrucciones *RV32IMF* (ver tablas 2.6, 2.7 y 2.9). Este módulo es el encargado de procesar los programas que se puedan cargar en el *SoC*.

Para este módulo se diseñan dos versiones, una *Single-Cycle* y otra *Pipelined*. Se comienza por la versión *Single-Cycle* (tomando como referencia el procesador del mismo tipo presentado en [12]) debido a su simplicidad. Esta característica ayuda en la etapa de verificación y depuración del *datapath*, donde se utilizan programas escritos en lenguaje ensamblador. Depurar el *datapath* de la versión *Single-Cycle* ahorra tiempo y trabajo en la etapa de verificación del diseño *Pipelined*, el cual se realiza considerando la versión *Single-Cycle* como base.

Ambas versiones del *core complex* hacen uso de todos los módulos ya presentados y reciben las siguientes entradas:

- **start, rst, clk**: Señales de inicio de ejecución, *reset* y reloj del sistema respectivamente.
- **initial_PC**: Indica el *Program Counter* inicial para la ejecución.
- **acces_to_registers_files, acces_to_data_mem, acces_to_prog_mem**: Señales de acceso para el *Register Files*, memoria de datos y de programa respectivamente. Cuando alguna de estas señales es 1 y *start* = 0 permite el acceso a las entradas y salidas de su respectivo módulo.

- **do_wb_fromEEI, is_wb_data_fp_fromEEI,**
wb_add_fromEEI[4:0], wb_data_fromEEI[31:0]: Señales de acceso para el puerto de escritura de registros en el *Register Files*. Si *do_wb_fromEEI* (puerto *write_reg*) es 1, se guarda la entrada *wb_data_fromEEI* (puerto *wb_data*) en el registro ubicado en la dirección indicada por *wb_add_fromEEI* (puerto *wb_add*). La señal *is_wb_data_fp_fromEEI* (puerto *is_wb_data_fp*) indica que es un registro flotante cuando es igual a 1, en caso contrario el registro a modificar es entero. Estas entradas son válidas cuando *acces_to_registers_files* = 1 y *start* = 0.
- **is_rs1_fp_fromEEI, is_rs2_fp_fromEEI,**
rs1_add_fromEEI[4:0], rs2_add_fromEEI[4:0]: Señales de acceso a los puertos de lectura del *Register Files*. Se pueden acceder dos registros a la vez: *is_rs1_fp_fromEEI* (puerto *is_rs1_fp*) y *rs1_add_fromEEI* (puerto *rs1_add*) indican si el primer registro es flotante y su dirección respectivamente, mientras que *is_rs2_fp_fromEEI* (puerto *is_rs2_fp*) y *rs2_add_fromEEI* (puerto *rs2_add*) indican lo mismo para el segundo registro. Solo son válidas cuando *acces_to_registers_files* = 1 y *start* = 0.
- **data_rw_fromEEI, data_valid_mem_fromEEI,**
data_is_load_unsigned_fromEEI, data_byte_half_word_fromEEI[1:0],
data_addr_fromEEI[31:0], data_in_fromEEI[31:0]: Señales de acceso a los puertos de la memoria de datos, solo son válidas cuando *start* = 0 y *acces_to_data_mem* = 1. La entrada *data_rw_fromEEI* (puerto *rw*) indica que se desea realizar una escritura en memoria cuando es 1, en caso contrario se realiza una lectura, *data_valid_mem_fromEEI* (puerto *valid*) indica que se comience la ejecución de la lectura/escritura, *data_is_load_unsigned_fromEEI* (puerto *is_load_unsigned*) indica que la lectura es sin signo (aplica cuando no se leen palabras de 32 bits), *data_byte_half_word_fromEEI* (puerto *byte_half_word*) indica si se desea acceder a un *word*, *halfword* o *byte*, *data_addr_fromEEI* (puerto *addr*) indica la dirección de acceso y *data_in_fromEEI* (puerto *data_in*) es la información a escribir si es el caso.
- **prog_rw_fromEEI, prog_valid_mem_fromEEI,**
prog_is_load_unsigned_fromEEI, prog_byte_half_word_fromEEI[1:0],
prog_addr_fromEEI[31:0], prog_in_fromEEI[31:0]: Funcionan exactamente igual que las señales del punto anterior pero para la memoria de programa y solo son válidas cuando *start* = 0 y *acces_to_prog_mem* = 1.

Y retornan las salidas:

- **ready:** Señal que indica la finalización de ejecución.
- **exit_status[1:0]:** Indica el estado de finalización, esto se detalla en la tabla 4.13.
- **PC[31:0]:** Indica el *Program Counter* de la instrucción que termina la ejecución, no el de la siguiente instrucción.
- **rs1_toEEI[31:0], rs2_toEEI[31:0]:** Registros accedidos por *rs1_add_fromEEI* y *rs2_add_fromEEI* respectivamente.
- **data_ready_toEEI, prog_ready_toEEI:** Señales que indican que el acceso a la memoria, de datos y programa respectivamente, ha finalizado.
- **data_out_of_range_toEEI, prog_out_of_range_toEEI:** Señales que indican que el acceso de la memoria, de datos y programa respectivamente, esta fuera del rango válido para la *BRAM* implementada.
- **data_out_toEEI[31:0], prog_out_toEEI[31:0]:** Salida de las lecturas de la memoria de datos y de programa respectivamente.

Estas E/S son parte fundamental del *EEI* y permiten la comunicación entre el *core complex* y el entorno de ejecución. Note que la mayoría de las E/S son para tener acceso directo a las E/S del *Register Files* y de las memorias de datos y programa. Esto permite que el entorno de ejecución

en el cual se implemente el núcleo pueda cargar programas, leer/escribir direcciones de memoria e interpretar/ejecutar las llamadas de sistema del núcleo.

| exit_status[1:0] | |
|------------------|---------------|
| Code | Status |
| 00 | ecall |
| 01 | program error |
| 10 | data error |
| 11 | ebreak |

Tabla 4.13: Codificación de la salida *exit_status* del *core complex*. Nota: *program/error* ocurren cuando se trata de acceder a una dirección de memoria fuera del rango de memoria de la *BRAM*. Además, solo en el caso *Single-Cycle* las instrucciones no válidas generan *program error*, mientras que en el caso *Pipelined* estas se tratan como *nops*.

La única diferencia entre cada *core complex* en cuanto a cómo finalizan su ejecución es que: la versión *Single-Cycle* finaliza con *program error* cuando hay una instrucción no válida, mientras que, la versión *Pipelined* simplemente las trata como *nops*.

Para la aplicación de la metodología de diseño *Top-Down*, se utiliza el mismo diagrama de bloques simplificado de la figura 4.2 en ambas versiones (para el diseño *Single-Cycle* simplemente se ignoran los registros *Pipeline*). A partir de este diagrama de bloques se continua (en la sección 4.6.1 para la versión *Single-Cycle* y en la 4.6.2 para la *Pipelined*) con la metodología descrita en 3.1.

4.6.1 Single-Cycle Version

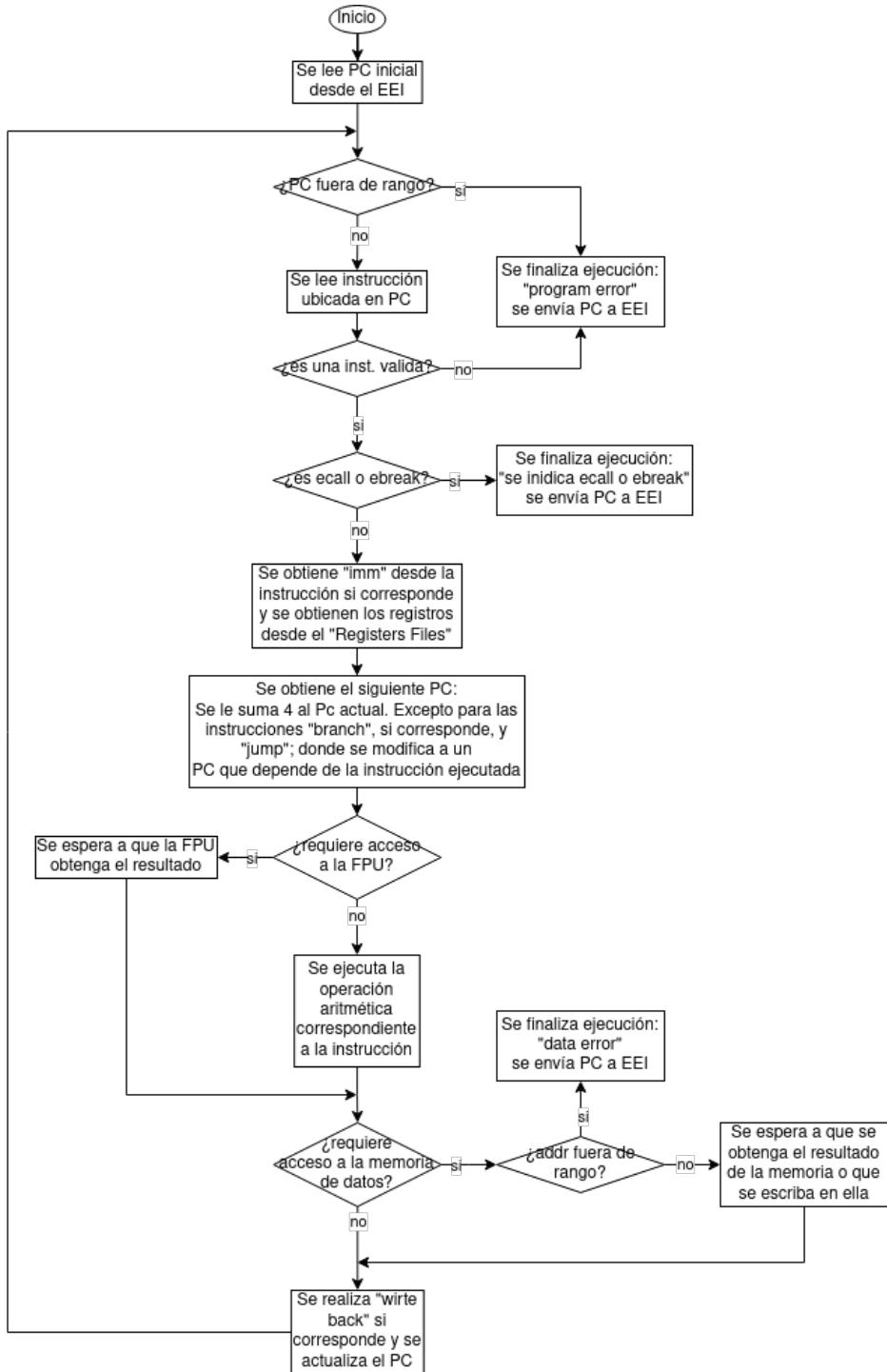


Figura 4.42: Diagrama de flujo simplificado para el *core complex Single-Cycle*.

Para la confección del diseño *Single-Cycle* se plantea el diagrama de flujo simplificado de la figura 4.42, a partir del mismo se obtiene el diagrama de bloques detallado, el cual se puede observar en las figuras 4.43, 4.44, 4.45 y 4.46.

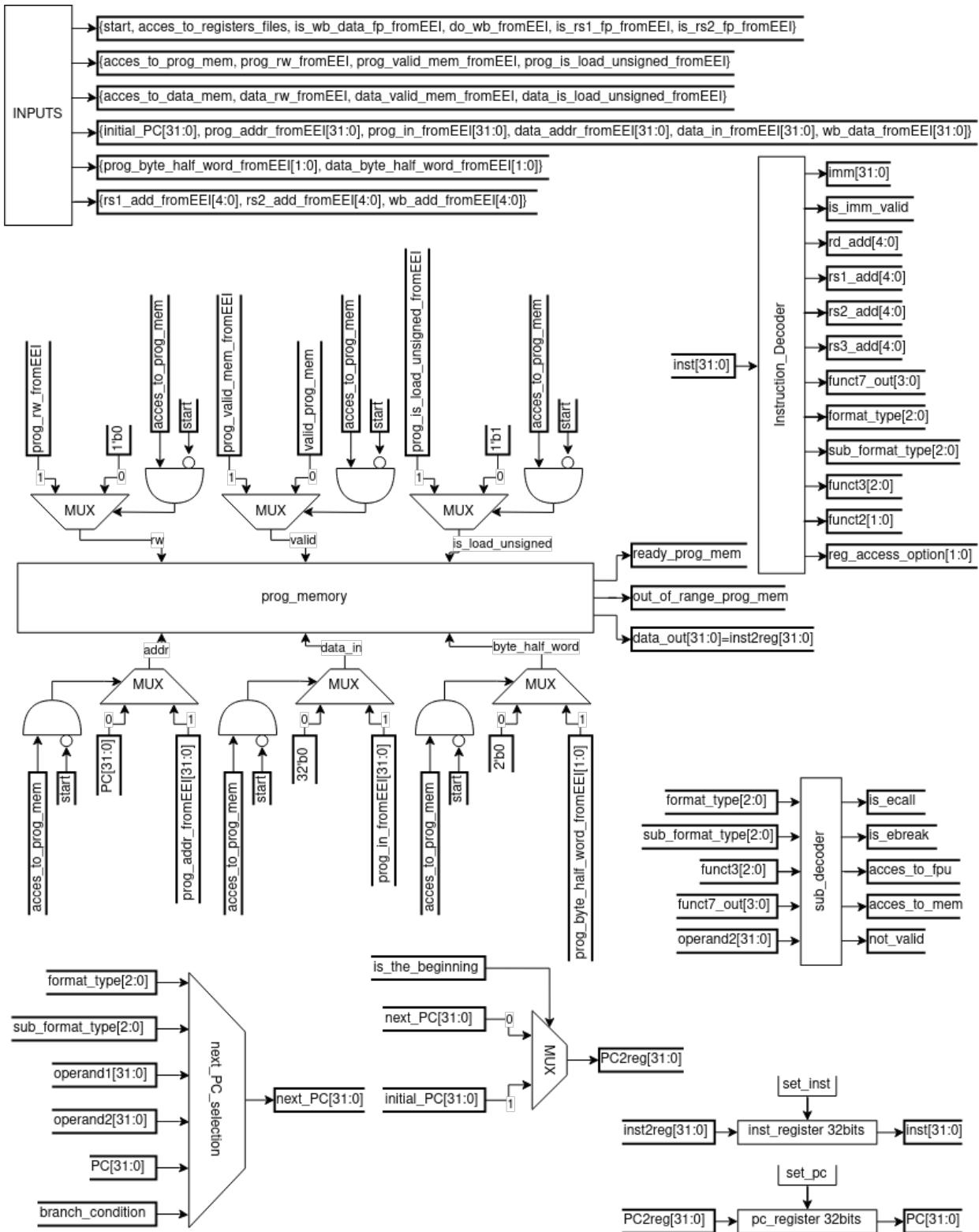


Figura 4.43: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Single-Cycle* parte 1.

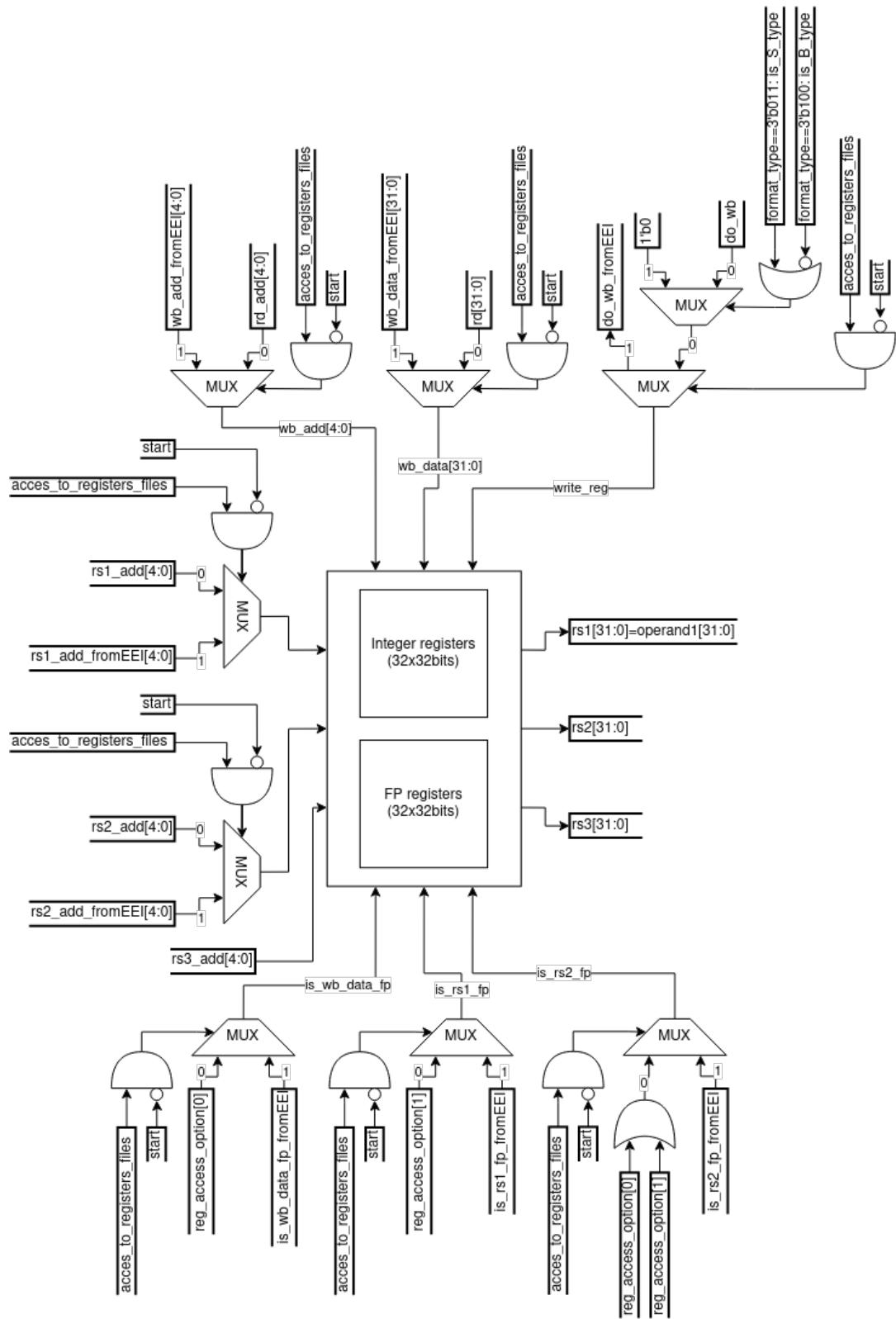


Figura 4.44: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Single-Cycle* parte 2.

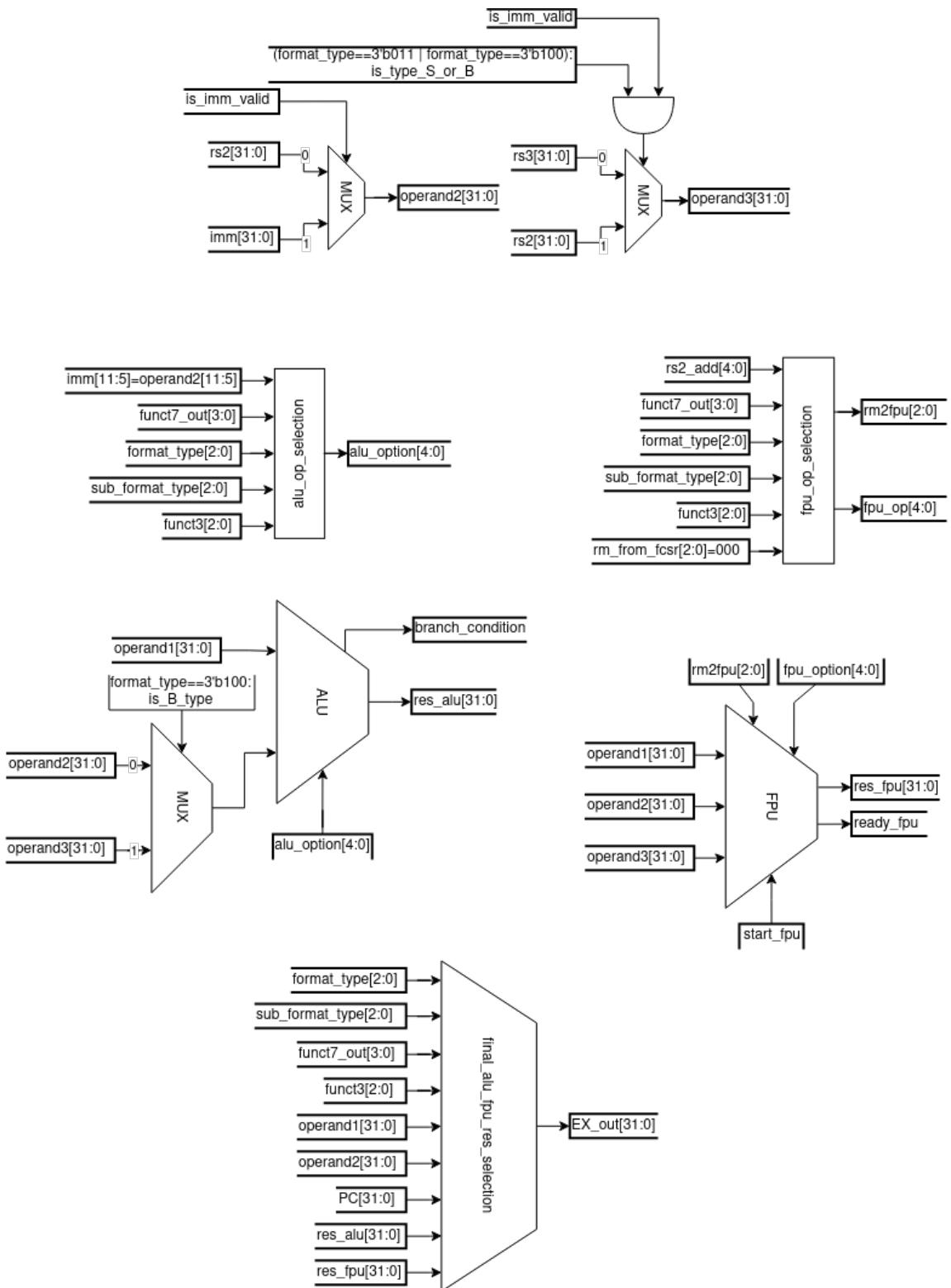


Figura 4.45: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Single-Cycle* parte 3.

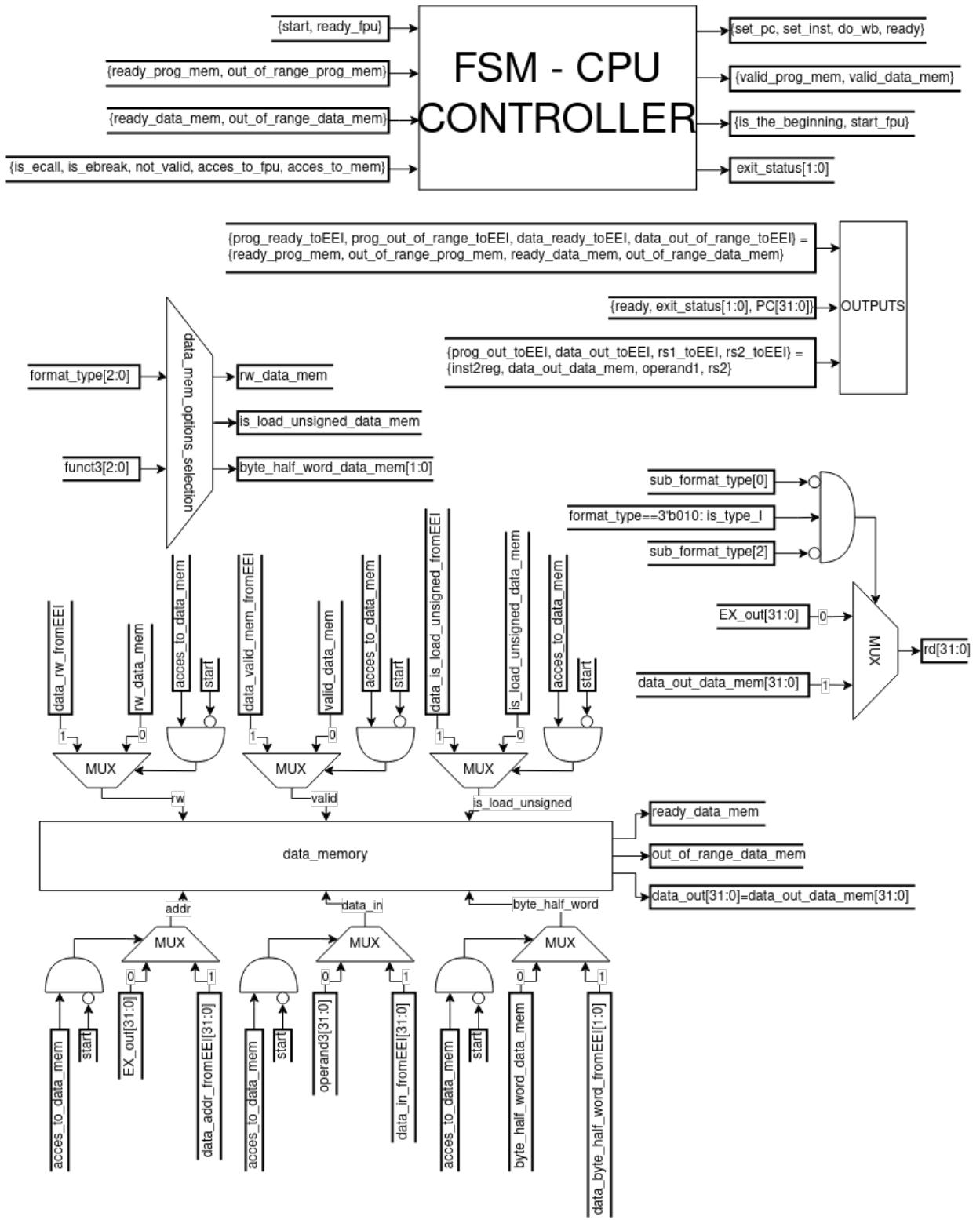


Figura 4.46: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Single-Cycle* parte 4.

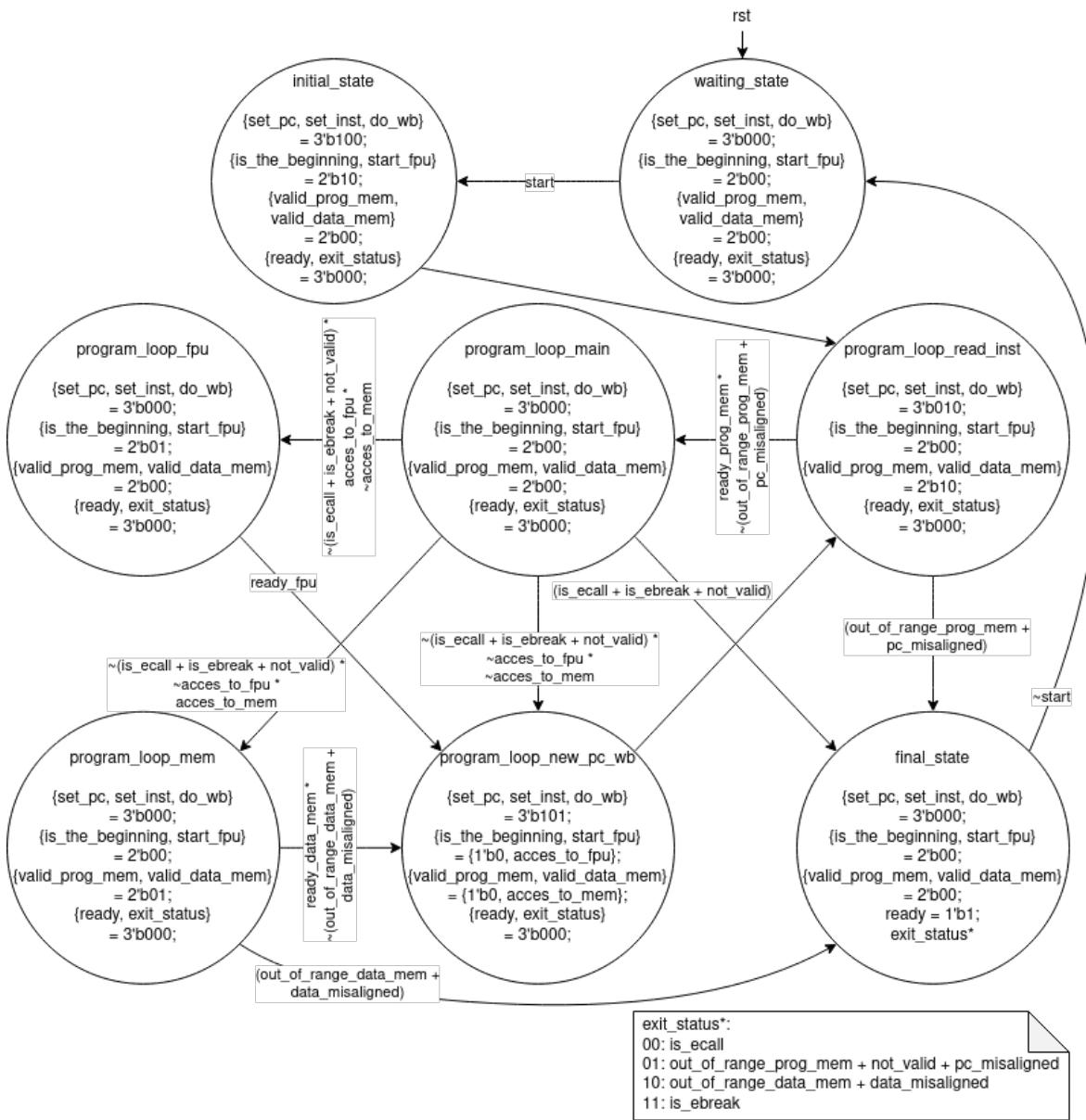
En las figuras 4.43, 4.44, 4.45 y 4.46 se aprecian las señales entre los distintos bloques funcionales del *datapath*, donde se puede ver la comunicación entre todos los módulos implementados. Sin embargo, hay pequeñas unidades combinacionales que no se han presentado, estas son:

- **pc_register, inst_register:** Registros temporales para el *Program Counter* y la instrucción en curso respectivamente. Ambos actualizan su valor en el canto negativo del reloj, siempre y cuando reciban la señal *set_pc* y *set_inst* respectivamente.
- **sub_decoder:** Recibe como entradas las salidas de la unidad *Instruction_Decoder*, en específico: *format_type*, *sub_format_type*, *funct7_out* y *funct3*. Con dicha información y *operand2* (el campo *imm*) retorna las señales: *is_ecall* para indicar que la instrucción en curso es un *ecall*, *is_ebreak* indica que es un *ebreak*, *acces_to_fpu* indica que la instrucción accede a la *FPU*, *acces_to_mem* para indicar que se accede a la memoria de datos y *not_valid* para indicar que la instrucción es no válida.
- **next_PC_selection:** Recibe como entradas las señales: *operand1*, *operand2* y *PC* para el calculo de nuevo *Program Counter* y *branch_condition*, *format_type* y *sub_format_type* para la selección del mismo. A partir de dichas entradas se obtiene el nuevo *Program Counter*, *next_PC*.
- **final_alu_fpu_res_selection:** Esta unidad se encarga de seleccionar el resultado final de la etapa de ejecución. Para esta tarea recibe las señales de decisión: *format_type*, *sub_format_type*, *funct7_out* y *funct3*. Luego, para el calculo se recibe: *operand1*, *operand2*, *PC*, *res_alu* y *res_fpu*. El resultado de la unidad es *EX_out*.
- **data_mem_options_selection:** Recibe las señales *format_type* y *funct3*, con esto retorna las opciones de acceso a la memoria de datos: *rw_data_mem*, *is_load_unsigned_data_mem* y *byte_half_word_data_mem*.

Finalmente, a partir del diagrama de bloques detallado se confecciona directamente el diagrama *MDS* de la figura 4.47. A continuación, se presenta el rol de cada uno de los estados de la maquina de estados, los cuales se actualizan en el canto positivo del reloj:

- **waiting_state:** Espera la señal *start*, cuando esto sucede pasa al estado **initial_state**.
- **initial_state:** Guarda el *Program Counter* inicial en el registro temporal y pasa al estado **program_loop_read_inst**.
- **program_loop_read_inst:** Apaga el acceso a la *FPU* o la memoria de datos si corresponde. Luego, lee y guarda la instrucción de la memoria de programa indicada por el *Program Counter*. Si el acceso a la memoria de programa esta fuera de rango (*out_of_range_prog_mem = 1*) se pasa al estado **final_state**, si no es el caso, espera a que la instrucción esté lista (*ready_prog_mem = 1*) y el siguiente estado es **program_loop_main**.
- **program_loop_main:** Este analiza las señales de control provenientes del *sub_decoder*. Si alguna de las señales *is_ecall*, *is_ebreak* y *not_valid* está activada pasa al estado **final_state**. Si no es el caso, el siguiente estado depende las señales *acces_to_fpu* y *acces_to_mem*, si se activa la primera se pasa a **program_loop_fpu**, en caso de activarse la segunda señal se pasa a **program_loop_mem** y si ninguna de ellas se activa, se pasa a **program_loop_new_pc_wb**.
- **program_loop_fpu:** Inicia la ejecución de la *FPU* y espera a que esté listo (*ready_fpu = 1*), cuando esto sucede pasa al estado **program_loop_new_pc_wb**.
- **program_loop_mem:** Si detecta que la dirección de acceso a memoria esta fuera de rango (*out_of_range_data_mem = 1*) pasa directamente al estado **final_state**. Si no es el caso, se inicia el acceso a la memoria de datos y se espera a que esté listo (*ready_data_mem = 1*) para pasar al estado **program_loop_new_pc_wb**.
- **program_loop_new_pc_wb:** Realiza el *Write Back* si corresponde y actualiza el *Program Counter*, luego pasa al estado **program_loop_read_inst**.

- **final_state**: Estado de finalización de ejecución, prende *ready* y selecciona el *exit_status* pertinente, ver tabla 4.13. Cambia de estado, a **waiting_state** cuando *start* se apaga.



4.6.2 Pipelined Version

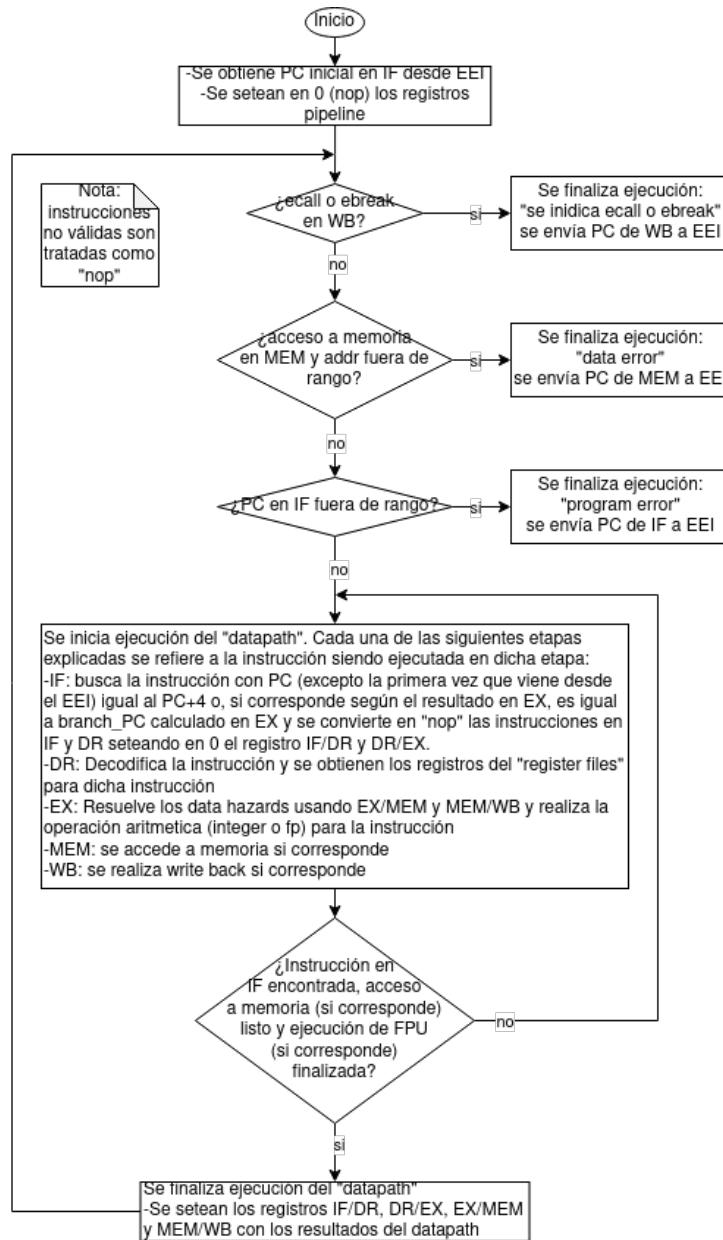


Figura 4.48: Diagrama de flujo simplificado para el *core complex Pipelined*.

Para la confección del diseño *Pipelined* se plantea el diagrama de flujo simplificado de la figura 4.42, a partir del mismo se obtiene el diagrama de bloques detallado, el cual se puede ver en las figuras 4.49, 4.50, 4.51, 4.52, 4.53 y 4.54.

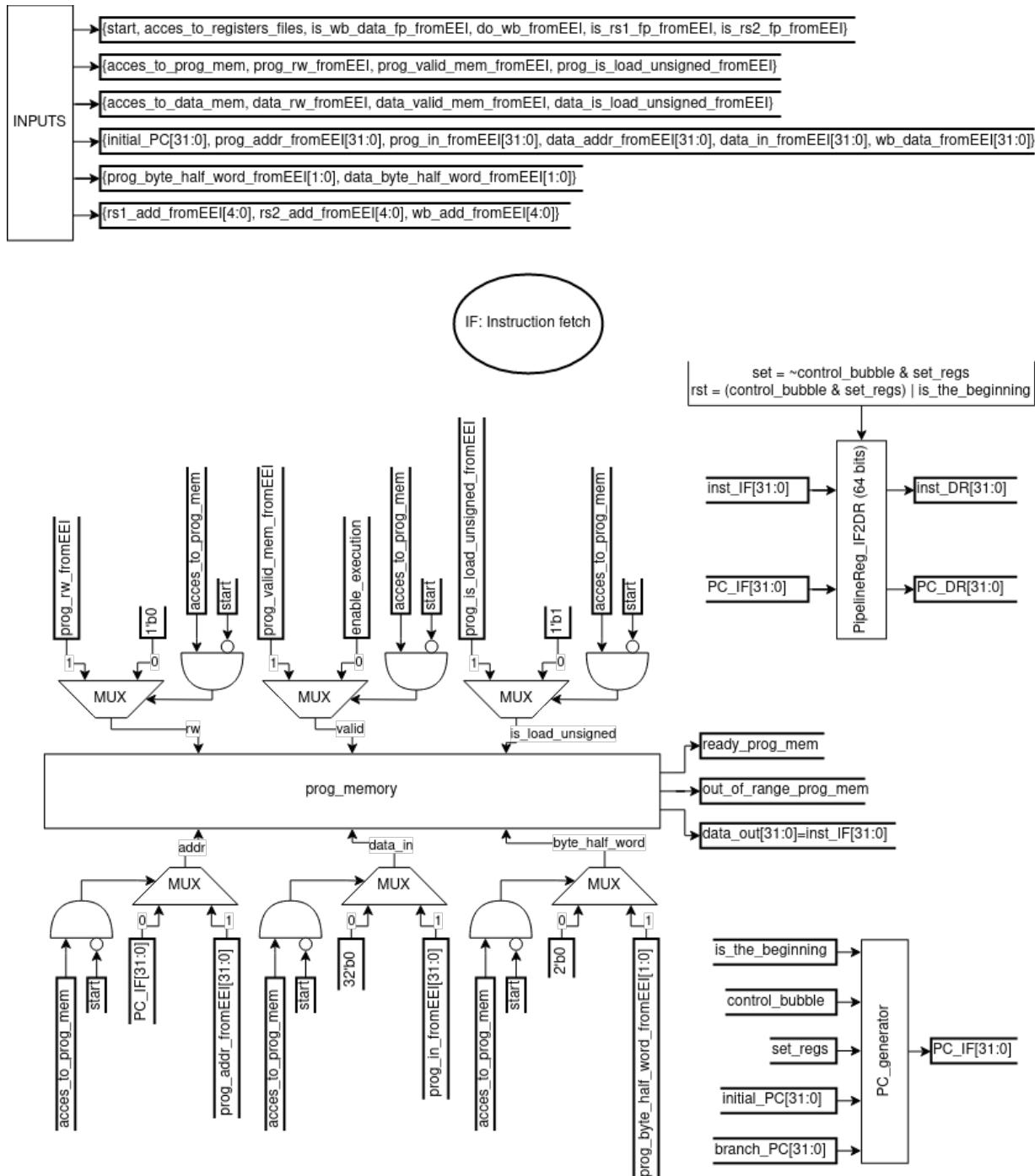


Figura 4.49: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Pipelined* parte 1.

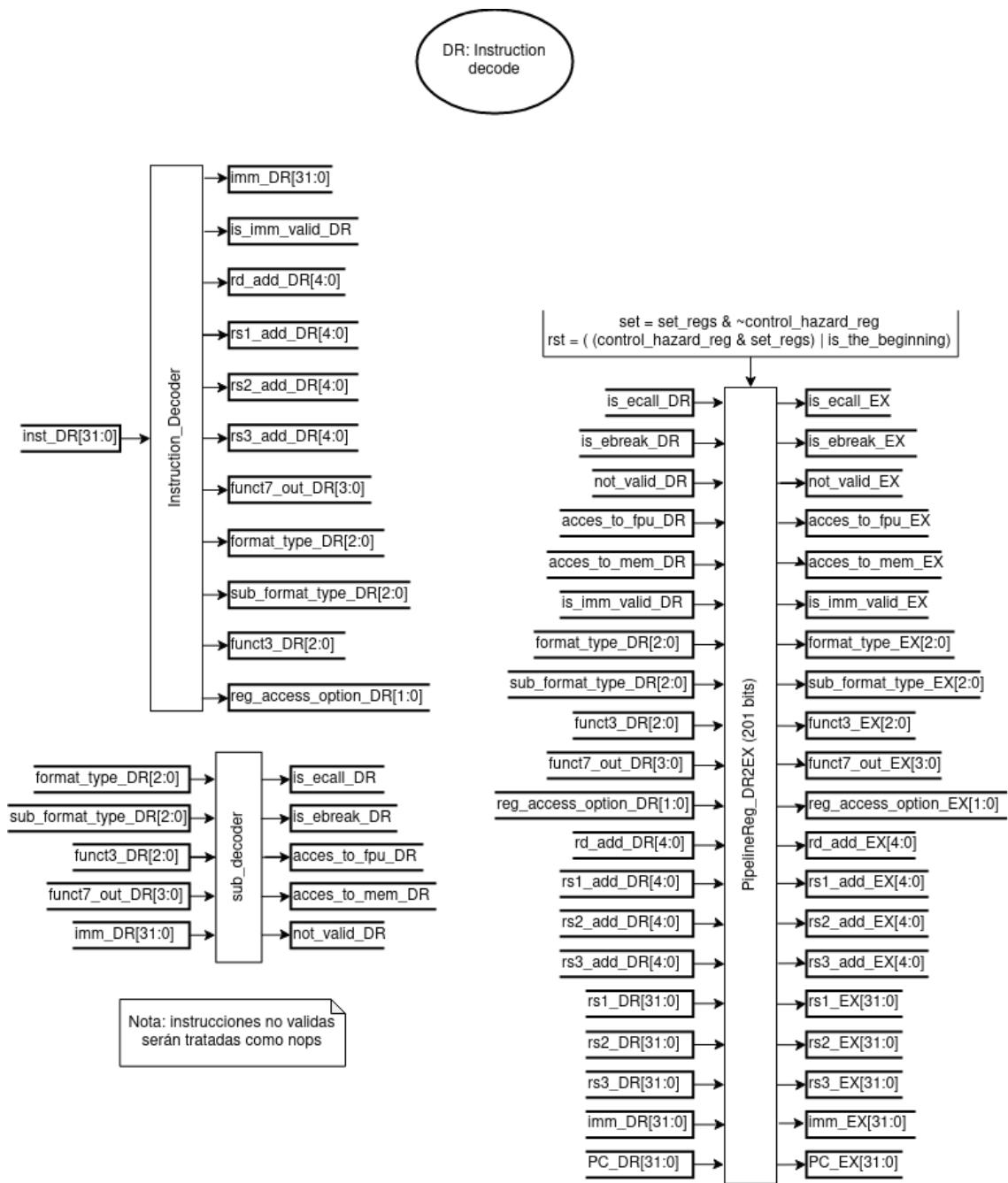


Figura 4.50: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Pipelined* parte 2.

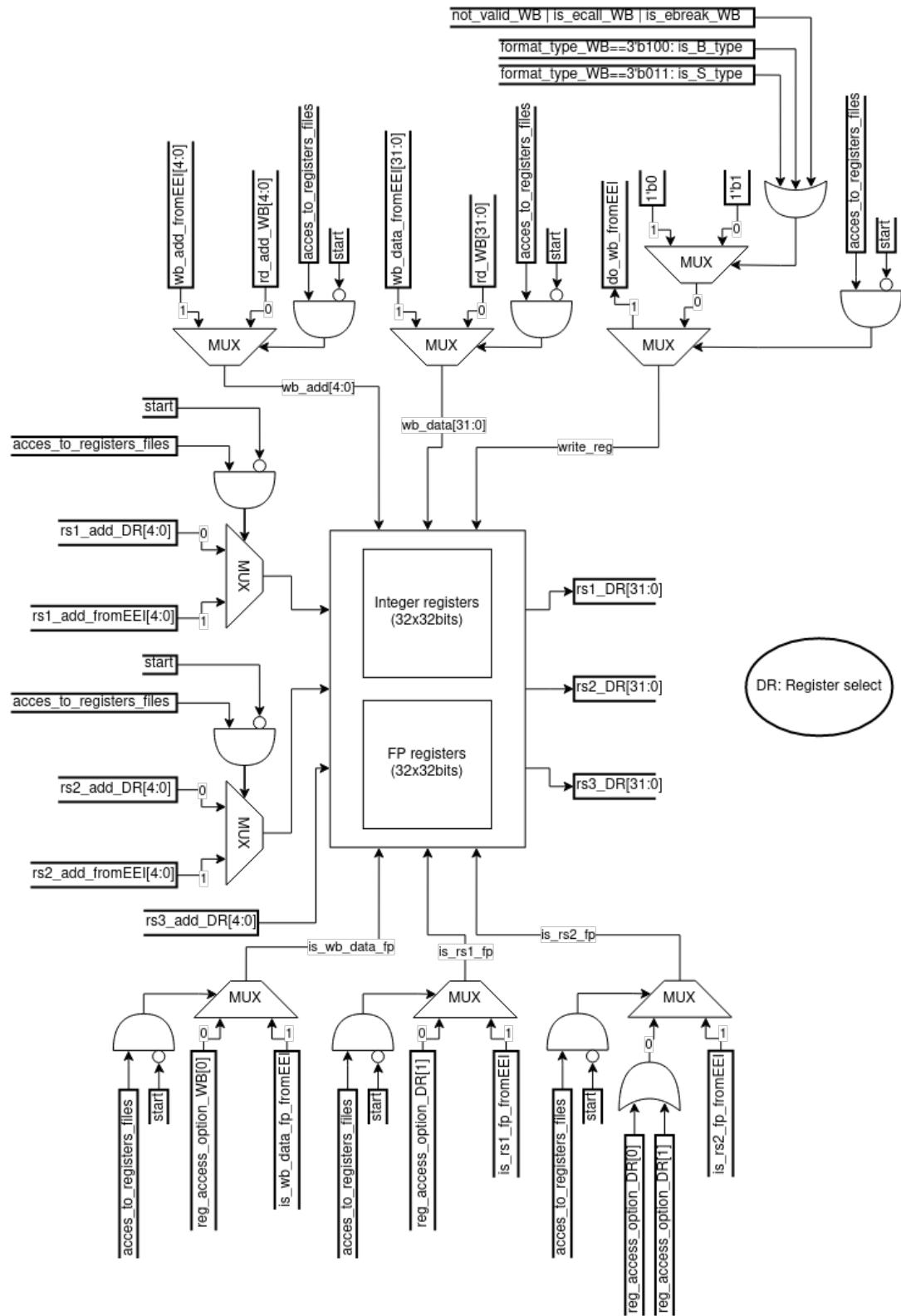


Figura 4.51: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Pipelined* parte 3.

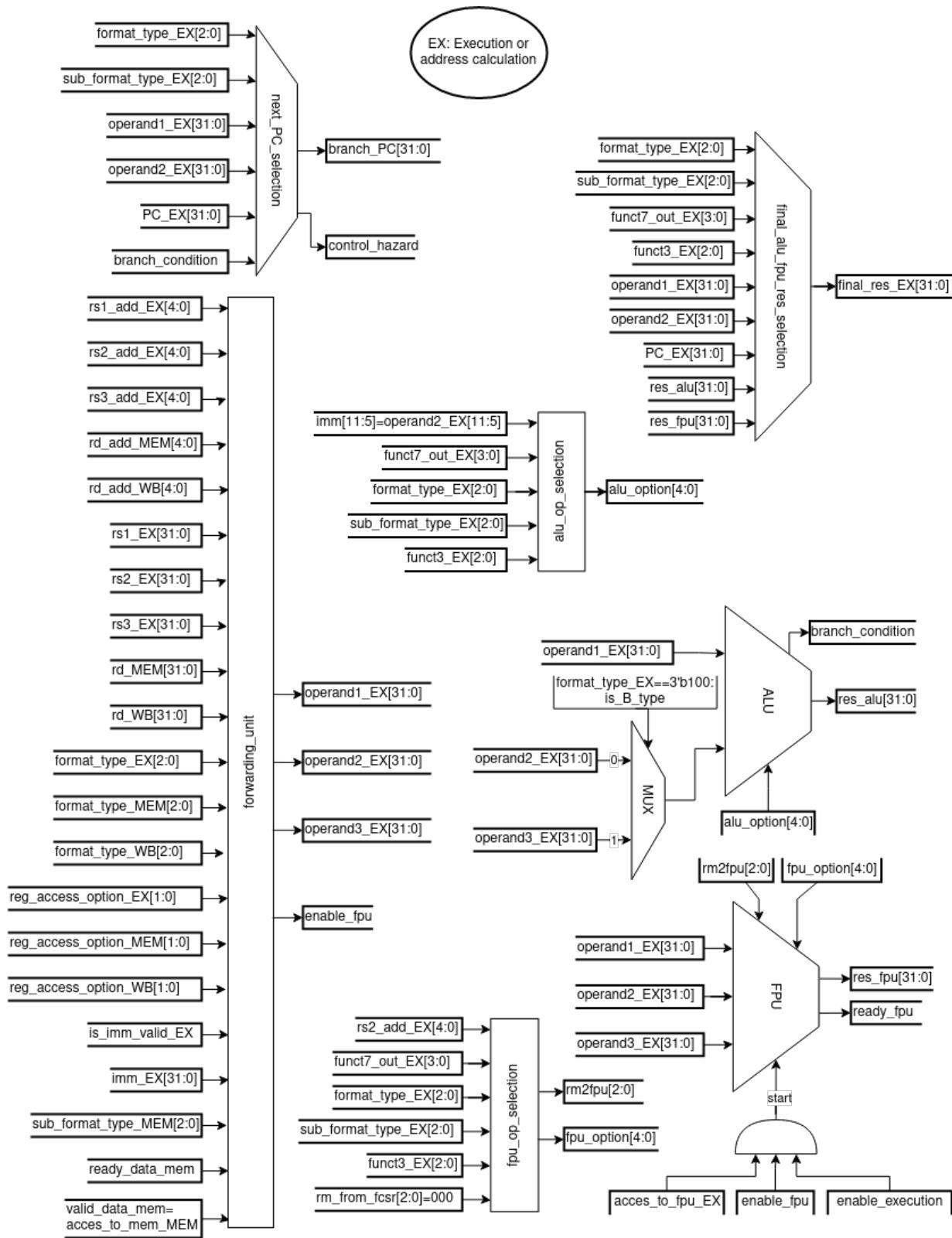


Figura 4.52: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Pipelined* parte 4.

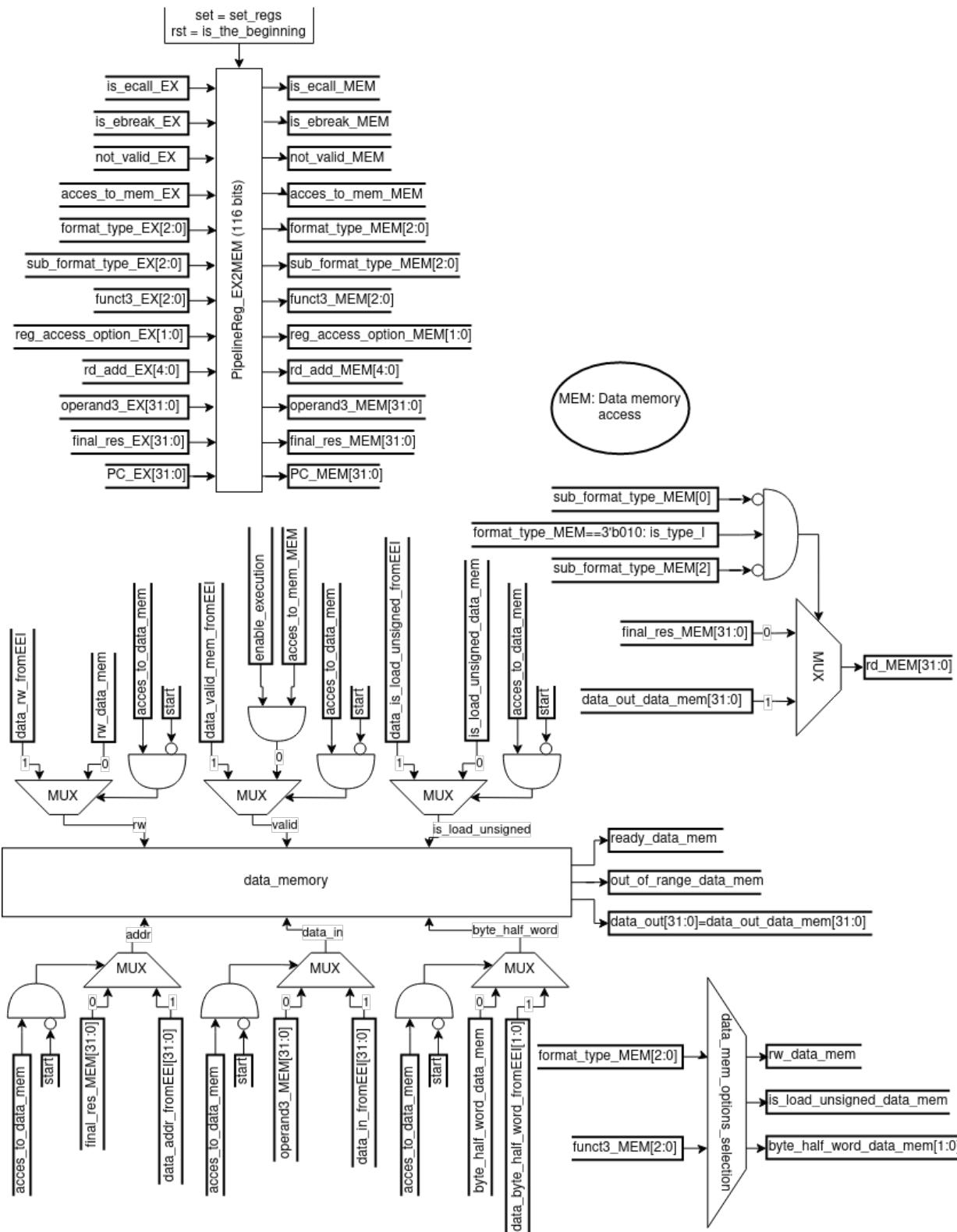


Figura 4.53: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Pipelined* parte 5.

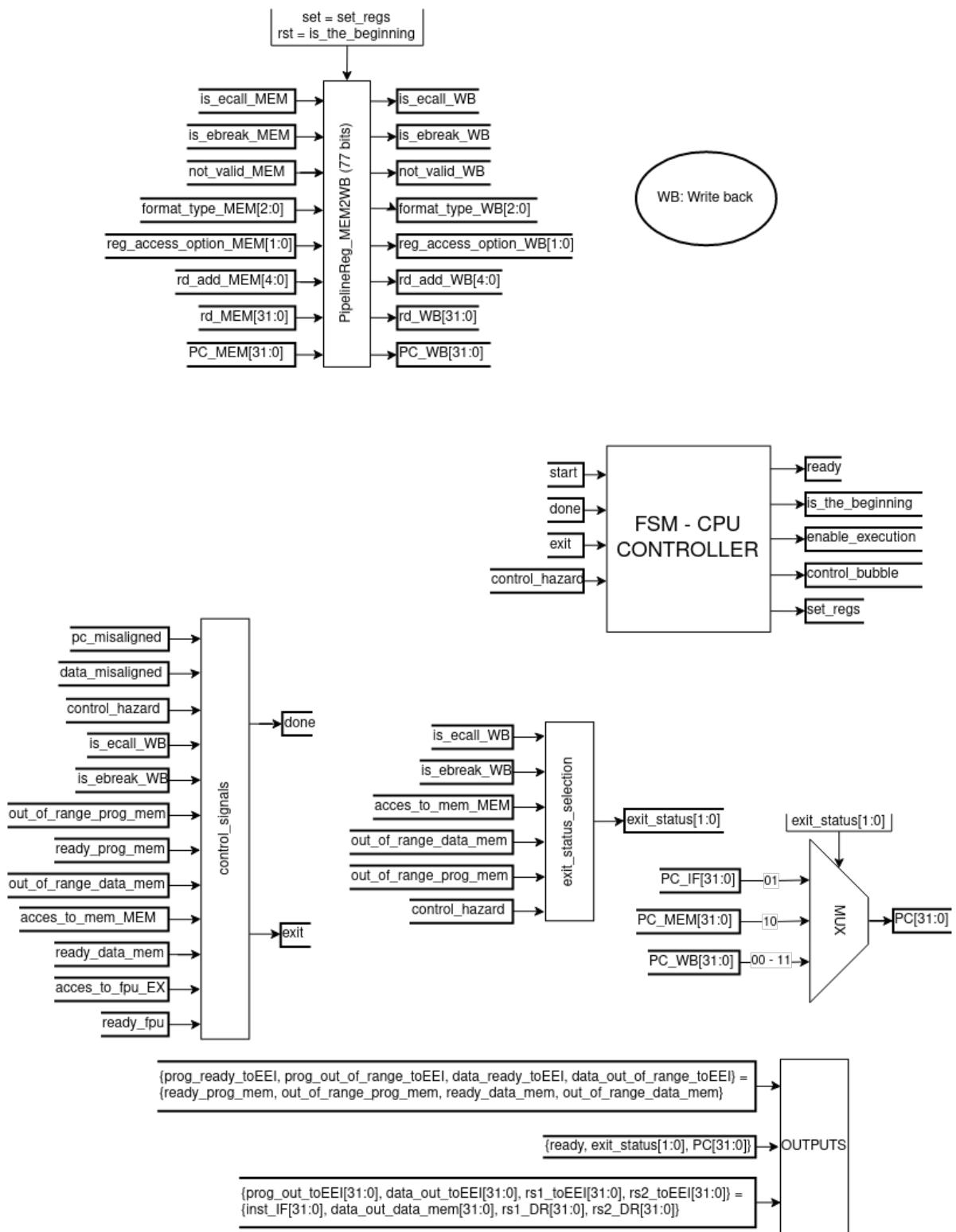


Figura 4.54: Diagrama de bloques detallado para el *core complex Pipelined* parte 6.

Como se puede apreciar en el diagrama de bloques detallado, se implementan 4 registros *pipeline*: *PipelineReg_IF2DR*, *PipelineReg_DR2EX*, *PipelineReg_EX2MEM* y *PipelineReg_MEM2WB*. En un principio se diseñan como 4 registros independientes (cada uno con su propio bloque *always*) con actualización en el canto negativo del reloj siempre que *set* = 1 (de esta forma se han tratado todos los demás registros). Sin bien esto funciona en las simulaciones, en el *hardware* presenta problemas de metaestabilidad. Finalmente, se implementan todos los registros en un único bloque *always* (actualizado en el canto positivo del reloj) con asignaciones *blocking*, esto con el fin de asegurar que se actualicen en el siguiente orden: *PipelineReg_MEM2WB* –> *PipelineReg_EX2MEM* –> *PipelineReg_DR2EX* –> *PipelineReg_IF2DR*. En el diagrama de bloques detallado se pueden ver las señales que rigen la actualización de estos registros (*set/reset*).

En las figuras 4.49, 4.50, 4.51, 4.52, 4.53 y 4.54 se aprecian las señales entre los distintos bloques funcionales del *datapath*, donde se puede ver la comunicación entre todos los módulos implementados. Sin embargo, hay pequeñas unidades que no se han presentado, estas son:

- **PC_generator:** Unidad secuencial que se activa en el canto positivo del reloj y se actualiza antes que los registros *pipeline*. Si *is_the_beginning* = 1 se actualiza: *new_PC* = *initial_PC*, de no ser el caso, el nuevo *Program Counter* depende de las señales *set_regs* y *control_bubble*. Si *set_regs* = 0 se cumple: *new_PC* = *PF_IF* (no se actualiza el *Program Counter* de la etapa *IF*), de ser 1, y *control_bubble* = 1 se tiene que: *new_PC* = *branch_PC* y si *control_bubble* = 0, se tiene: *new_PC* = *PF_IF* + 4. Una vez obtenido *new_PC* se actualizan todos los registros *pipeline*, luego se actualiza *PC_IF* = *new_PC* solo si *is_the_beginning* | *set_regs* = 1.
- **sub_decoder:** Es combinacional y recibe como entradas las salidas de la unidad *Instruction_Decoder*, estas son: *format_type_DR*, *sub_format_type_DR*, *funct7_out_DR*, *funct3_DR* e *imm_DR*. Con dicha información retorna las señales: *is_ecall_DR* para indicar que la instrucción en curso (en la etapa *DR*) es un *ecall*, *is_ebreak_DR* indica que es un *ebreak*, *acces_to_fpu_DR* indica que la instrucción accede a la *FPU*, *acces_to_mem_DR* para indicar que se accede a la memoria de datos y *not_valid_DR* para indicar que la instrucción es no válida.
- **forwarding_unit:** Este módulo combinacional se encarga de solucionar los *data hazard* que se presentan en la arquitectura *Pipelined*. Para esta tarea recibe: *is_imm_valid_EX*, *ready_data_mem*, *valid_data_mem*, *reg_access_option_EX*, *reg_access_option_MEM*, *reg_access_option_WB*, *format_type_EX*, *format_type_MEM*, *format_type_WB*, *sub_format_type_MEM*, *rs1_add_EX*, *rs2_add_EX*, *rs3_add_EX*, *rd_add_MEM*, *rd_add_WB*, *rs1_EX*, *rs2_EX*, *rs3_EX*, *rd_MEM*, *rd_WB* e *imm_EX*. Con la información recibida el módulo es capaz de determinar los operandos, *operand1_EX*, *operand2_EX* y *operand3_EX*, para la etapa *EX* cuando ocurre algún *data hazard* redirigiendo los resultados almacenados en el registro *pipeline* de la etapa *MEM* o *WB* si es necesario. Además, si ocurre un *data hazard* en una operación que accede a la *FPU* y tiene dependencia del resultado de la instrucción que se está ejecutando en la etapa *MEM* y esta última accede a memoria, la unidad mantiene apagado el acceso a la *FPU* hasta que el acceso a memoria esté listo mediante la señal *enable_fpu*.
- **next_PC_selection:** Unidad combinacional que recibe como entradas las señales: *operand1_EX*, *operand2_EX* y *PC_EX* para el cálculo de nuevo *Program Counter* en caso de una bifurcación y las señales *branch_condition*, *format_type_EX* y *sub_format_type_EX* para la selección del mismo. A partir de dichas entradas se obtiene el nuevo *Program Counter* en caso de una bifurcación válida, *branch_PC*. También, enciende la señal *control_hazard* para indicar que la bifurcación debe ser tomada si es el caso.
- **final_alu_fpu_res_selection:** Esta unidad se encarga de seleccionar combinacionalmente el resultado final de la etapa de ejecución (*EX*). Para esta tarea recibe las señales de decisión: *format_type_EX*, *sub_format_type_EX*, *funct7_out_EX* y *funct3_EX*. Luego, para la selec-

ción se recibe: *operand1_EX*, *operand2_EX*, *PC_EX*, *res_alu* y *res_fpu*. El resultado de la unidad es *final_res_EX*.

- ***data_mem_options_selection***: Recibe las señales *format_type_MEM* y *funct3_MEM*, con esto retorna las opciones de acceso a la memoria de datos: *rw_data_mem*, *is_load_unsigned_data_mem* y *byte_half_word_data_mem*. Esta unidad es combinacional.
- ***control_signals***: Unidad combinacional encargada de recibir las señales: *is_ecall_WB*, *is_ebreak_WB*, *control_hazard*, *out_of_range_prog_mem*, *out_of_range_data_mem*, *acces_to_mem_MEM*, *acces_to_fpu_EX*, *ready_prog_mem*, *ready_data_mem* y *ready_fpu*. Con estas señales la unidad retorna: *exit* para indicar a la máquina de estados el fin de la ejecución del programa en curso y *done* para indicar que se finaliza la ejecución de todas las etapas en curso.
- ***exit_status_selection***: Esta unidad combinacional determina la salida *exit_status* según lo indicado en la tabla 4.13. Para esta tarea recibe las señales: *is_ecall_WB*, *is_ebreak_WB*, *acces_to_mem_MEM*, *out_of_range_data_mem*, *out_of_range_prog_mem* y *control_hazard*.

Finalmente, a partir del diagrama de bloques detallado se confecciona directamente el diagrama *MDS* de la figura 4.55. A continuación, se presenta el rol de cada uno de los estados de la *FSM*, los cuales se actualizan en el canto positivo del reloj:

- **waiting_state**: Espera la señal *start*, cuando esto sucede guarda el *Program Counter* inicial, reinicia los registros *pipeline* en cero (*is_the_beginning = start*) y pasa al estado **loop_state_1**.
- **loop_state_1**: Inicia la ejecución del *datapath pipelined* (*enable_execution = 1*). Si *exit = 1* se pasa directamente al estado **final_state**, si no es el caso se espera a que el *datapath* finalice la ejecución (*done = 1*). Luego, si *control_hazard = 1* ocurre un *control hazzard* y se pasa al estado **loop_state_2_chazzard**, si no es el caso se pasa a **loop_state_2_normal**.
- **loop_state_2_normal**: Mantiene *enable_execution = 1* y actualiza los registros *pipeline* (*set_regs = 1*). El siguiente estado es **loop_state_3**.
- **loop_state_2_chazzard**: Mantiene *enable_execution = 1* y actualiza los registros *pipeline* (*set_regs = 1*) considerando el *control hazzard* (*control_bubble = 1*). El siguiente estado es **loop_state_3**.
- **loop_state_3**: Apaga *control_bubble* si corresponde y finaliza la ejecución del *datapath* (*enable_execution = 0*). Pasa al estado **loop_state_1**.
- **final_state**: Mantiene *enable_execution = 1* y levanta la señal *ready*. Vuelve al estado **waiting_state** solo cuando *start* se apaga.

Es importante destacar que el estado se actualiza solo después de que se actualizan los registros *pipeline* y *PC_IF*. Esto es fundamental para el correcto funcionamiento del diseño en *hardware*. Por esta razón se implementa en el mismo bloque *always* el *PC_generator*, los registros *pipeline* y la actualización del siguiente estado.

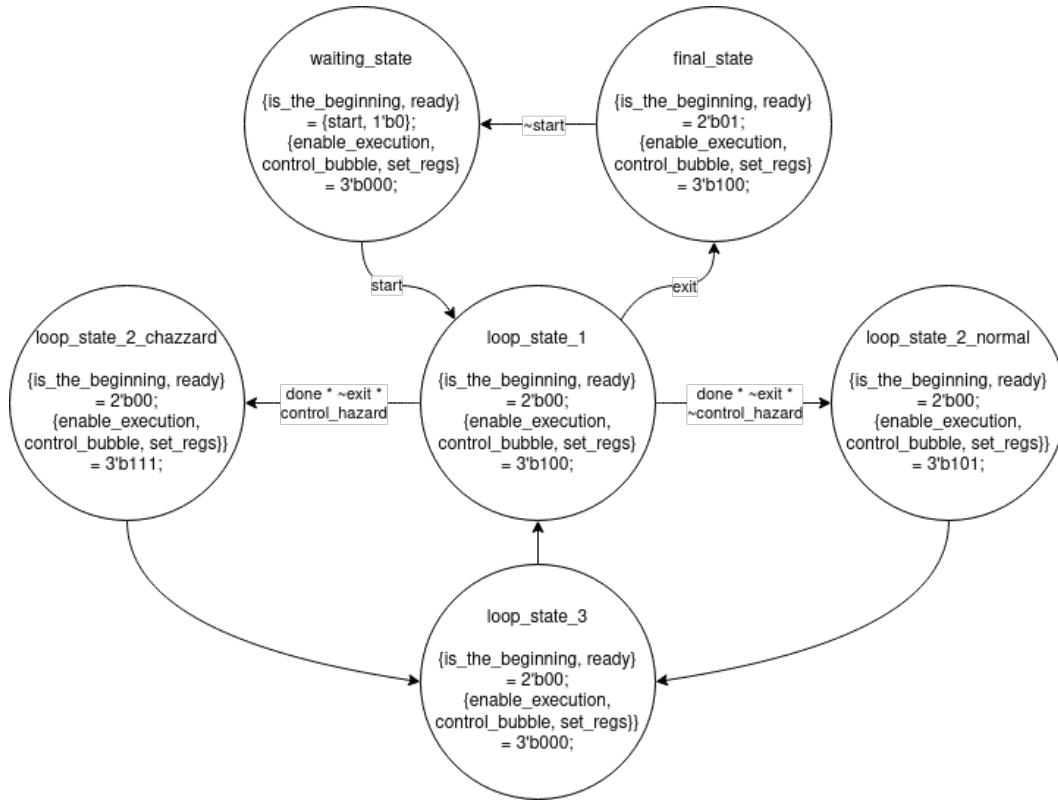


Figura 4.55: Diagrama MDS para el *core complex Pipelined*.

4.7 System on a Chip

Finalmente, se diseña el *SoC*, el cual resulta ser bastante simple debido al tiempo requerido para la implementación del *core complex*. Por ello, se consideran los siguientes dispositivos de E/S:

- **Entradas:**

- **3 pulsadores:** *start* (inicia la ejecución), *resume* (reanuda la ejecución) y *reset* (reinicia la ejecución).
- **16 interruptores:** Se utilizan para recibir palabras de 32 bits (se utiliza *start* y *resume* para ingresar ambas mitades de la palabra).

- **Salidas:**

- **2 LEDs tricolor:** Muestran el estado de la ejecución. Ver tabla 4.14.
- **16 LEDs verdes:** Sirven como retroalimentación de la palabra ingresada con los interruptores (solo se encienden cuando se está recibiendo una entrada en una llamada de sistema “get”).
- **2 Displays de 7 segmentos:** Muestran palabras de 32 bits en formato hexadecimal. Las letras se distinguen de los números porque se prende el punto que acompaña al dígito.

| Colors Codification | |
|---------------------|---------------------------|
| Color | SoC state |
| BLUE | waiting state |
| CYAN | cpu working |
| WHITE | ebreak |
| RED | ecall default |
| RED/BLUE | prog error |
| BLUE/RED | data error |
| PURPLE | print/get* integer |
| YELLOW | print/get* floating point |
| GREEN | final state |

Tabla 4.14: Cuando solo se menciona un color quiere decir que ambos *LEDs* tricolor tienen el mismo color, en caso contrario el *LED* derecho se corresponde con el color de la derecha y el izquierdo con el color de la izquierda. Cuando ocurre un *get** solo uno de los *LEDs* se enciende, según la mitad de la palabra que se esté ingresando.

Teniendo esto en cuenta se establecen 4 llamadas de sistema, estas se realizan cuando el *core complex* finaliza su ejecución con un *ecall*. A continuación, se detalla cada llamada de sistema posible:

- **Print Integer:** Cuando $x17 = 1$ se muestra, en formato hexadecimal, la palabra de 32 bits contenida en el registro entero $x10$.
- **Print Float:** Cuando $x17 = 2$ se muestra, en formato hexadecimal, la palabra de 32 bits contenida en el registro flotante $f10$.
- **Get Integer:** Cuando $x17 = 5$ se recibe, en formato binario, una palabra de 32 bits y la guarda en el registro entero $x10$.
- **Get Float:** Cuando $x17 = 6$ se muestra, en formato binario, una palabra de 32 bits y la guarda en el registro flotante $f10$.
- **Exit:** Cuando $x17 = 10$ se finaliza el programa.

Si ocurre un *ecall* pero $x17$ no contiene un valor válido, es tratado como un *ebreak*, es decir, simplemente muestra, en formato hexadecimal, el *Program Counter* de la siguiente instrucción. Por otra parte, es importante mencionar que la convención para las llamadas de sistema recién presentada concuerda con las llamadas de sistema *Print Integer*, *Print Float*, *Get Integer*, *Get Float* y *Exit* de *RARS*.

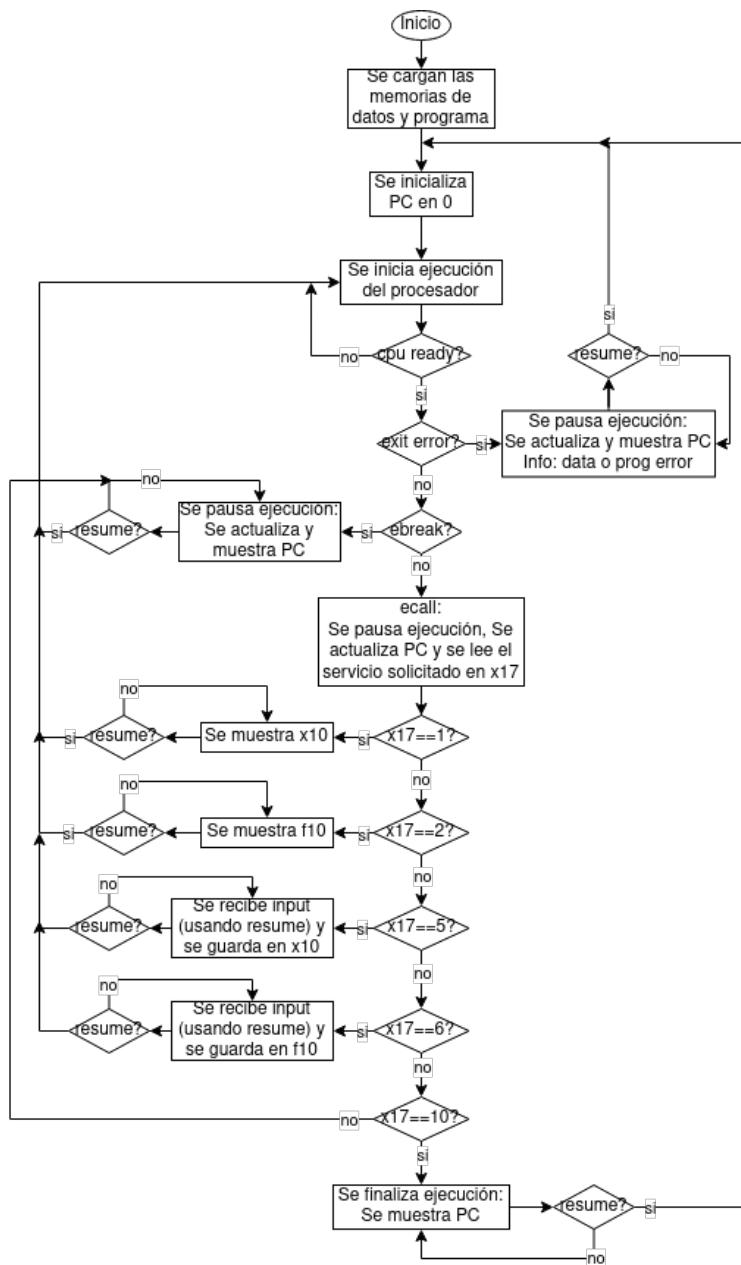


Figura 4.56: Diagrama de flujo simplificado para el *SoC*.

Considerando los llamados de sistema y las E/S presentadas, se confecciona el diagrama de flujo simplificado para el *SoC*, este se puede ver en la figura 4.56. Como se aprecia en el diagrama, para el manejo de errores simplemente se finaliza la ejecución del código y se muestra el tipo de error. Por otro lado, este diagrama contempla una fase de carga de programa, un *BOOT-LOADER*, sin embargo, por tiempo y simplicidad, se cargan los programas directamente en las memorias del *core complex*.

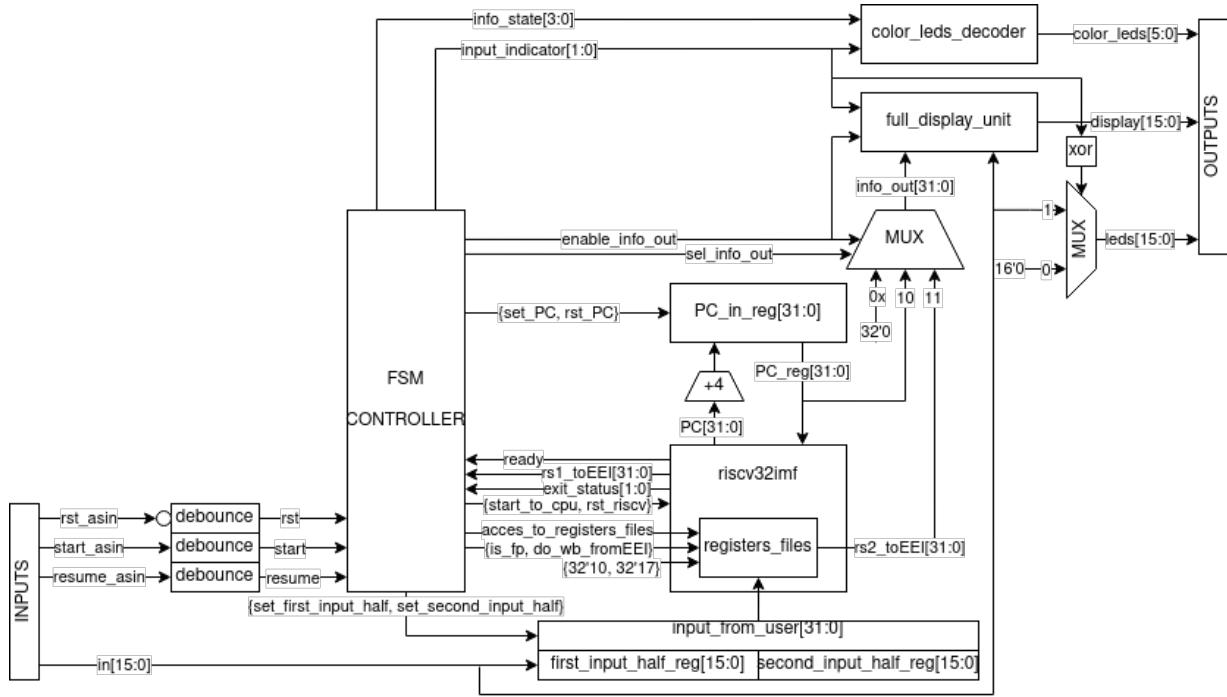


Figura 4.57: Diagrama de bloques detallado para el *SoC*.

Teniendo en cuenta las E/S, las llamadas de sistema y el diagrama de flujo, se confecciona el diagrama de bloques detallado de la figura 4.57. En este diagrama se visualiza el detalle de las conexiones y los distintos submódulo necesarios para la interacción con el usuario, donde se destacan:

- **debounce**: Módulos encargados de sincronizar las señales de entrada, ver 4.7.1.
- **input_from_user**: Dos registros temporales de 16 bits encargados de almacenar la entrada del usuario (cuando ocurre un “get”).
- **PC_in_reg**: Registro temporal encargado de almacenar el *Program Counter* inicial del *core complex*.
- **color_leds_decoder**: Unidad encargada de determinar el color de los *LEDs* tricolor según el estado de la *FSM* del *SoC*.
- **full_display**: Unidad encargada de recibir una palabra de 32 bits e imprimirla en los *Displays* de 7 segmentos.

Considerando este diagrama de bloques se determina la máquina de estados presentada en el diagrama *MDS* de la figura 4.58.

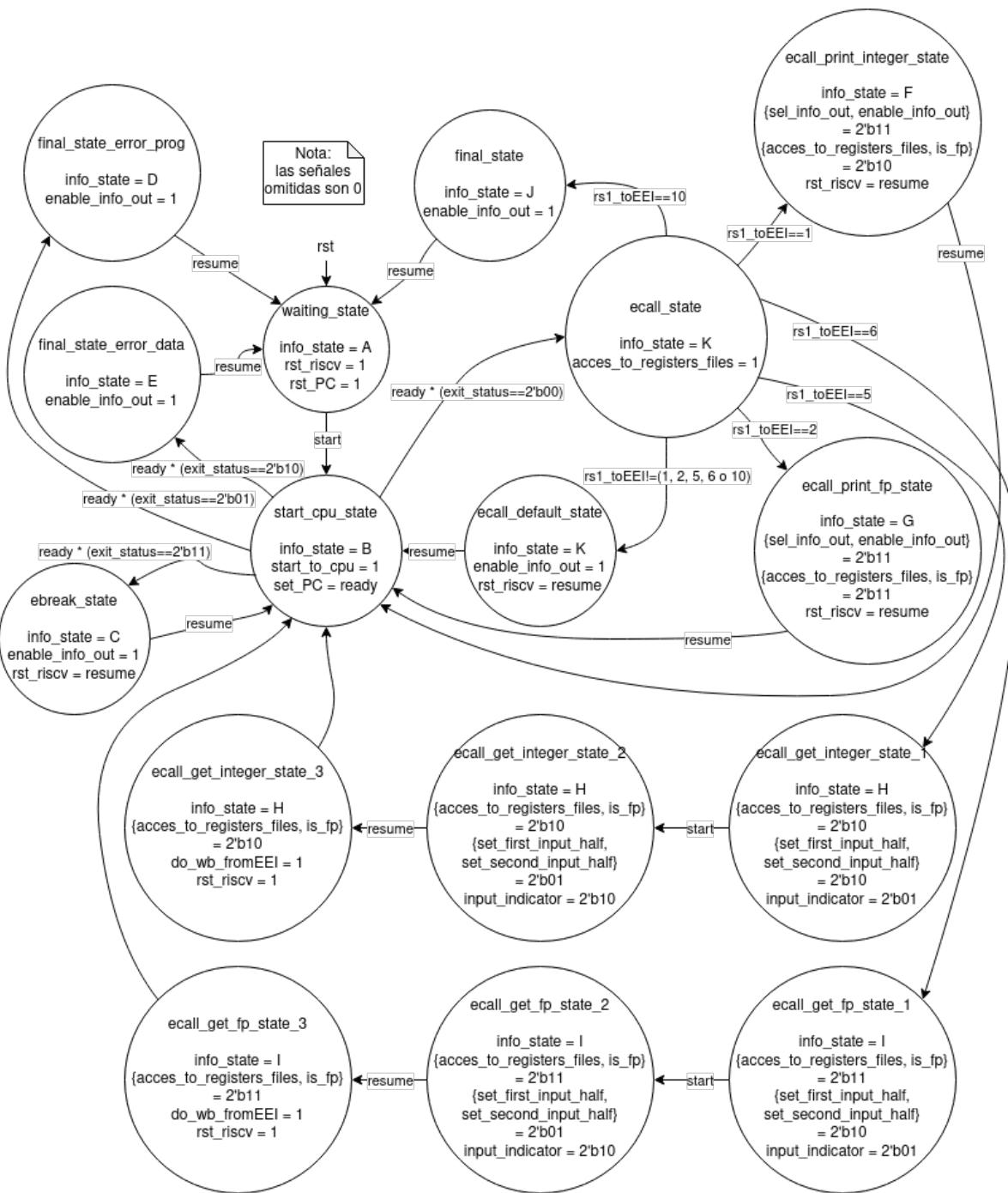


Figura 4.58: Diagrama *MDS* para el *SoC*.

A continuación, se presenta el rol de cada uno de los estados de la *FSM* descrita en la figura 4.58:

- **waiting_state**: *SoC state = waiting state*. Mantiene el *core complex* en *reset* y el registro con el *Program Counter* inicial en 0. Luego, espera la señal *start* para pasar al estado **start_cpu_state**. Esta es la única máquina de estados que simplemente recibe un pulso de la señal *start*, el resto de las máquinas descritas requieren que dicha señal sea 1 durante toda la ejecución.
- **start_cpu_state**: *SoC state = cpu working*. Inicia la ejecución del *core complex*, cuando finaliza dicha ejecución se actualiza el *Program Counter* por el de la instrucción que sigue al

`ecall/ebreak` ($PC + 4$). Luego, según el `exit_status` se selecciona el siguiente estado:

- 00: `ecall_state`.
- 01: `final_state_error_prog`.
- 10: `final_state_error_data`.
- 11: `ebreak_state`.

- **`ebreak_state`:** *SoC state = ebreak*. Detiene la ejecución del *core complex* y muestra $PC + 4$. Cuando se recibe la señal *resume* se reinicia el *core complex* y se pasa al estado `start_cpu_state`.
- **`final_state_error_prog`:** *SoC state = prog error*. Detiene la ejecución del *core complex* y muestra $PC + 4$. Cuando se recibe la señal *resume* se reinicia el *core complex* y se pasa al estado `waiting_state`.
- **`final_state_error_data`:** *SoC state = data error*. Detiene la ejecución del *core complex* y muestra $PC + 4$. Cuando se recibe la señal *resume* se reinicia el *core complex* y se pasa al estado `waiting_state`.
- **`ecall_state`:** *SoC state = ecall default*. Detiene la ejecución del *core complex* y accede al *Register files* para ejecutar la llamada de sistema, por ello el siguiente estado depende de lo indicado en el registro $x17$, si es no válido pasa a `ecall_default_state`, de lo contrario:

- $x17 = 1$: `ecall_print_integer_state`.
- $x17 = 2$: `ecall_print_fp_state`.
- $x17 = 5$: `ecall_get_integer_state_1`.
- $x17 = 6$: `ecall_get_fp_state_1`.
- $x17 = 10$: `final_state`.

- **`ecall_default_state`:** *SoC state = ecall default*. Muestra $PC + 4$. Cuando se recibe la señal *resume* se reinicia el *core complex* y se pasa al estado `start_cpu_state`.
- **`ecall_print_integer_state`:** *SoC state = print integer*. Detiene la ejecución del *core complex* y muestra $x10$. Cuando se recibe la señal *resume* se reinicia el *core complex* y se pasa al estado `start_cpu_state`.
- **`ecall_print_fp_state`:** *SoC state = print floating point*. Detiene la ejecución del *core complex* y muestra $f10$. Cuando se recibe la señal *resume* se reinicia el *core complex* y se pasa al estado `start_cpu_state`.
- **`ecall_get_integer_state_1`:** *SoC state = get* integer* (solo se prende el *LED tricolor derecho*). Se recibe, mediante los interruptores, los primeros 16 bits del entero a ingresar, la entrada se confirma cuando se pulsa *start*. Luego, se pasa al estado `ecall_get_integer_state_2`.
- **`ecall_get_integer_state_2`:** *SoC state = get** integer* (solo se prende el *LED tricolor izquierdo*). Se recibe, mediante los interruptores, los últimos 16 bits del entero a ingresar, la entrada se confirma cuando se pulsa *resume*. Luego, se pasa al estado `ecall_get_integer_state_3`.
- **`ecall_get_integer_state_3`:** *SoC state = get integer* (se prenden ambos *LEDs tricolor*). Guarda el entero ingresado en $x10$, reinicia el *core complex* y vuelve al estado `start_cpu_state`.
- **`ecall_get_fp_state_1`:** *SoC state = get* floating point* (solo se prende el *LED tricolor derecho*). Se recibe, mediante los interruptores, los primeros 16 bits del punto flotante a ingresar, la entrada se confirma cuando se pulsa *start*. Luego, se pasa al estado `ecall_get_fp_state_2`.
- **`ecall_get_fp_state_2`:** *SoC state = get** floating point* (solo se prende el *LED tricolor izquierdo*). Se recibe, mediante los interruptores, los últimos 16 bits del punto flotante a ingresar, la entrada se confirma cuando se pulsa *resume*. Luego, se pasa al estado `ecall_get_fp_state_3`.
- **`ecall_get_fp_state_3`:** *SoC state = get floating point* (se prenden ambos *LEDs tricolor*). Guarda el punto flotante ingresado en $f10$, reinicia el *core complex* y vuelve al estado `start_cpu_state`.
- **`final_state`:** *SoC state = final state*. Detiene la ejecución del *core complex* y muestra $PC + 4$. Cuando se recibe la señal *resume* se reinicia el *core complex* y se pasa al estado `waiting_state`.

4.7.1 debounce

Esta unidad se encarga de recibir la señal asíncrona proveniente de los pulsadores y sincronizarla con el reloj del sistema como un único pulso en un ciclo de reloj. A continuación, se detallan los estados del diagrama *MDS* (figura 4.59) de la *FSM* del módulo:

- **waiting_state**: Espera a que se active la señal *signal_in*, luego pasa a **counter_state**.
- **counter_state**: Se inicia un contador (de 16 bits), cuando este finaliza (en *0xFFFF*) y la señal *signal_in* sigue activa se pasa a **hold_state**. Si el contador no finaliza antes de que la señal *signal_in* desaparezca, se vuelve al estado **waiting_state**.
- **hold_state**: Se mantiene en este estado hasta que la señal *signal_in* desaparezca, cuando esto ocurre se pasa al estado **response_state**.
- **response_state**: Levanta la señal *signal_out* solo por un ciclo de reloj y pasa al estado **waiting_state**.

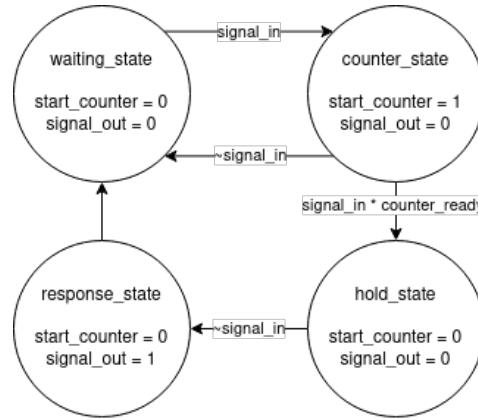


Figura 4.59: Diagrama *MDS* para el *debounce*.

5 Verificación, pruebas e implementación final

Los diseños presentados en 4 se desarrollan y verifican utilizando el *software* recomendado por el fabricante de la tarjeta *FPGA* utilizada, *Digilent*. Dicho *software* es *Vivado* de *Xilinx*, en concreto la versión *2020.2* para *Linux* y la tarjeta utilizada, como se menciona en 2, es la *Nexys 4*. Por otra parte, es importante señalar que todos los diseños digitales están implementados en el lenguaje *HDL System Verilog*. Todos los códigos desarrollados se presentan en los anexos y están disponibles en *GitHub* en el repositorio [GianlucaDagostino/Trabajo_Titulo_SoC-RiscV](#).

A continuación, se presenta la etapa de verificación desarrollada, las pruebas realizadas sobre el *hardware* y los detalles de la implementación final para la versión del *core complex Pipelined*.

5.1 Etapa de verificación

En esta sección se presenta el proceso de verificación realizado para distintos módulos cruciales del diseño, los cuales son: *memory*, *ALU*, *fp_converter*, *fp_arithmetic_unit*, *FPU*, *riscv32imf_pipeline*, *riscv32imf_singlecycle* y *TOP*. Para el desarrollo y verificación de las unidades relacionadas con el cálculo de números de punto flotante es realmente útil tener acceso a un **conversor de punto flotante a binario y viceversa**.

5.1.1 *memory*

Para este módulo (ver anexo 1) se confecciona el *test bench tb_memory.sv* (disponible en el anexo 2). Dicho *test bench* realiza 12 pruebas de funcionamiento, ya sean operaciones de escritura o lectura, y verifica que los resultados sean los esperados. En las figuras 5.1 y 5.2 se aprecian los resultados obtenidos, los cuales son satisfactorios.

```

Último byte direccionable: 0000f41f

test 1: verificar señal "out_of_range"
>> addr: 0000f45f - data_in: 6a70a30c
options: load word
Initial time:           10000
Elapsed time:            0
test 1: passed

test 2: guardar data (word) y leerla
>> addr: 0000941b - data_in: 6a70a30c
options: store word
store - Initial time:    30000
store - Elapsed time:    30000
>> addr: 0000941b - data_in: 6a70a30c
options: load word
load - Initial time:     80000
load - Elapsed time:     10000
data_out: 6a70a30c
test 2: passed

test 3: guardar data (word) y leerla en el mismo bloque cache del test 2 pero otra palabra
>> addr: 0000941f - data_in: c672830c
options: store word
store - Initial time:    110000
store - Elapsed time:    10000
>> addr: 0000941f - data_in: c672830c
options: load word
load - Initial time:     140000
load - Elapsed time:     10000
data_out: c672830c
test 3: passed

test 4: leer la palabra almacenada en el test 2 (para comprobar que se haya almacenado correctamente despues de los tests anteriores)
>> addr: 0000941b - data_in: c672830c
options: load word
load - Initial time:     170000
load - Elapsed time:     10000
data_out: 6a70a30c
test 4: passed

test 5: leer un byte signed
>> addr: 0000941b - data_in: c672830c
options: load byte signed
load - Initial time:     200000
load - Elapsed time:     10000
data_out: 0000006a
test 5: passed

test 6: leer un byte signed
>> addr: 00009419 - data_in: c672830c
options: load byte signed
load - Initial time:     230000
load - Elapsed time:     10000
data_out: ffffffa3
test 6: passed

```

Figura 5.1: Resultados de **tb_memory.sv** parte 1.

```

test 7: leer el mismo byte anterior pero unsigned
>> addr: 00009419 - data_in: c672830c
options: load byte unsigned
load - Initial time: 260000
load - Elapsed time: 10000
data_out: 000000a3
test 7: passed

test 8: ahora se modifica el byte leido en los test 6 y 7, luego se lee
>> addr: 00009419 - data_in: c67283fc
options: store byte
store - Initial time: 290000
store - Elapsed time: 10000
>> addr: 00009419 - data_in: c67283fc
options: load byte unsigned
load - Initial time: 320000
load - Elapsed time: 10000
data_out: 000000fc
test 8: passed

test 9: se comprueba que la palabra donde se almacena el byte modificado en el test 8 mantenga el resto de sus bits en orden
>> addr: 00009419 - data_in: c672830c
options: load word
load - Initial time: 350000
load - Elapsed time: 10000
data_out: 6a70fc0c
test 9: passed

test 10: se cambian los bits del tag c/r a la dirección del test 9 y se guarda un halfword, luego se lee el word
>> addr: 00001419 - data_in: c672830c
options: store halfword
store - Initial time: 380000
store - Elapsed time: 20000
>> addr: 00001419 - data_in: c672830c
options: load word
load - Initial time: 420000
load - Elapsed time: 10000
data_out: 0000830c
test 10: passed

test 11: se vuelve a usar la dirección del test 9 para leer el halfword almacenada en dicha dirección
>> addr: 00009419 - data_in: c672830c
options: load halfword unsigned
load - Initial time: 450000
load - Elapsed time: 20000
data_out: 0000fc0c
test 11: passed

test 12: misma operación del test 11 pero con signo
>> addr: 00009419 - data_in: c672830c
options: load halfword signed
load - Initial time: 490000
load - Elapsed time: 10000
data_out: fffffc0c
test 12: passed

```

Figura 5.2: Resultados de **tb_memory.sv** parte 2.

5.1.2 ALU

Este módulo (ver anexo 1) se verifica con la ayuda de un programa escrito en *C* (no se utiliza *Python* debido a que no permite manipular los modos de redondeo deseados, esto es relevante en las siguientes simulaciones), **tb_ALU_gen.c** (disponible en el anexo 3). Dicho programa al ser ejecutado pregunta al usuario cuantos *set test* se desean escribir y cuantos se desean descartar, a partir de dicha información genera el archivo **tb_ALU.sv** con la cantidad de *set test* pertinentes. Cada uno de estos *sets* se construye a partir de 2 números enteros pseudoaleatorios y escribe un *test* para cada una de las 22 operaciones de la *ALU*, para el caso de las operaciones de comparación se agregan 2 *tests* extras pues se compara cada número consigo mismo y ambos por separado, esto da un total de 34 *tests* por *set*. Para realizar la mayor cantidad de pruebas posibles en un tiempo razonable, se realizan 10 simulaciones de 1000 *set tests* cada una, esto evita que el computador tenga un consumo excesivo de memoria y sea capaz de realizar las simulaciones sin problemas. En la figura 5.3 se aprecian los resultados obtenidos, los cuales muestran un correcto funcionamiento por parte del módulo.

```

$ gcc tb_ALU ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 1000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 0
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 10010100011000010000110000100101
    in2 : 01110101111000010000100000000000
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 0001101011101110000100110000101
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 3000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 2000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 2999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 111101000101111111111000101
    in2 : 0000101000101110000101101101000
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 000001001000101010110000101
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 5000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 4000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 4999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 00100010100010111101110010101
    in2 : 110101000101000101000100001010
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 00100010100010111101110010101
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 7000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 6000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 6999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 10110111010111010100001010001
    in2 : 0110000001111000001110101111
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 01000110111000010011000111100010
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 9000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 8000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 8999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 00010011000101010111001011111
    in2 : 0001011001011001010011101110000
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 00010011000101010111001011111
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 2000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 1000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 1999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 01111000000100011001111000110
    in2 : 00100001110100101010111000101
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 0011101111001100000011000011010
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 4000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 3000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 3999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 11110010110100001111010100101
    in2 : 0010001001010111111010000000110
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 00000111010011000011000001111
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 6000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 5000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 5999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 1010010010001100010000010000011
    in2 : 0010111001110010111001100101110
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 000100010011001100001101111001
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 8000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 7000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 7999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 111111000110010110000001100101
    in2 : 1100010000111101011100011100011
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 001100111101000000011110000010
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

$ ./tb_ALU_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 10000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 9000
N° of tests written: 34000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 9999 - op: modulo (unsigned) <<
    Inputs
    operation: 10111
    in1 : 01111010111000011000011111011
    in2 : 01000001010100101010111000101
    Outputs
    res: PASSED!
    res : 0011101111001100000011000011010
    boolean_res: PASSED!!
    boolean_res : 0
    .....
    Total errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total out errors found : 0 (0.000000 percentage)
    Total boolean errors found : 0 (0.000000 percentage)
    END

```

Figura 5.3: Resultados de **tb_ALU.sv**.

5.1.3 *fp_converter*

Este módulo (ver anexo 1) se verifica de la misma forma que la *ALU* (ver 5.1.2). El programa que genera los *set tests* es **tb_fp_converter_gen.c** (ver anexo 3) y retorna el archivo **tb_fp_converter.sv**. Una diferencia con el caso anterior es que solo genera un número de forma pseudoaleatorios por *set test* y es tratado como entero y punto flotante al mismo tiempo (mantienen la misma representación binaria). Cada *set test* realiza las 4 operaciones de conversión para cada uno de los 4 modos de redondeo que permite seleccionar *C* (*RMM* no se puede testear debido a que no está implementado en *C*), lo que da un total de 16 *tests* por *set*. Es importante mencionar que en las conversiones de punto flotante a entero (con o sin signo) se deben tomar ciertas consideraciones en los casos de *overflow* o *underflow* debido a la forma en que el procesador *Intel*, donde se ejecuta **tb_fp_converter_gen.c**, maneja dichas excepciones. Al igual que en 5.1.2 se realizan diversas simulaciones, en este caso son: 20 simulaciones de 500 *set tests* cada una. Los resultados obtenidos se pueden apreciar en las figuras 5.4, 5.5 y 5.6, corroborando un correcto funcionamiento del módulo.

```

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 0
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 499-fp2signed-RUP <<
in: 0110000111111100100000101100101
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time: 457540000
Elapsed time: 10000
out: PASSED!!
out: 01111111111111111111111111111111
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 10
Maximum elapsed time: 160
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 1000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 999-fp2signed-RUP <<
in: 1110100100010111001010000101001
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time: 460420000
Elapsed time: 10000
out: PASSED!!
out: 1000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 10
Maximum elapsed time: 190
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 1500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 1000
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 1499-fp2signed-RUP <<
in: 01110001111111001011110111111101111
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time: 459860000
Elapsed time: 10000
out: PASSED!!
out: 01111111111111111111111111111111
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 10
Maximum elapsed time: 170
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 2500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 2000
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 2499-fp2signed-RUP <<
in: 100101100101011010010010010101
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time: 455540000
Elapsed time: 10000
out: PASSED!!
out: 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
NV: PASSED!!
NV: 0
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 10
Maximum elapsed time: 120
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 3000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 2500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 2999-fp2signed-RUP <<
in: 0100000001000000110101010100110
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time: 456420000
Elapsed time: 10000
out: PASSED!!
out: 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
NV: PASSED!!
NV: 0
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 10
Maximum elapsed time: 140
END

```

Figura 5.4: Resultados de **tb_fp_converter.sv** parte 1.

```

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 3500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 3000
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 3499-fp2signed-RUP <<
in: 01100011011000100101100000111011
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time:        460260000
Elapsed time:        10000
out: PASSED!!
out: 01111111111111111111111111111111
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    10
Maximum elapsed time:   170
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 4500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 4000
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 4499-fp2signed-RUP <<
in: 0100010011011010000100010000100
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time:        461260000
Elapsed time:        10000
out: PASSED!!
out: 00000000000000000000000000001110110001
NV: PASSED!!
NV: 0
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    10
Maximum elapsed time:   140
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 5500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 5000
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 5499-fp2signed-RUP <<
in: 0010101101111011101010111000001
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time:        458180000
Elapsed time:        10000
out: PASSED!!
out: 0000000000000000000000000000000000000000
NV: PASSED!!
NV: 0
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    10
Maximum elapsed time:   160
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 4000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 3500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 3999-fp2signed-RUP <<
in: 0111110000000100011100111000110
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time:        458500000
Elapsed time:        10000
out: PASSED!!
out: 01111111111111111111111111111111
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    10
Maximum elapsed time:   150
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 5000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 4500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 4999-fp2signed-RUP <<
in: 000100011011111110100010000101
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time:        458820000
Elapsed time:        10000
out: PASSED!!
out: 00000000000000000000000000000000
NV: PASSED!!
NV: 0
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    10
Maximum elapsed time:   200
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 6000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 5500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 5999-fp2signed-RUP <<
in: 11111010001011111111111000101
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: 011
Initial time:        461580000
Elapsed time:        10000
out: PASSED!!
out: 10000000000000000000000000000000
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    10
Maximum elapsed time:   130
END

```

Figura 5.5: Resultados de `tb_fp_converter.sv` parte 2.

```

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 6500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 6000
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 6499-fp2signed-RUP <<
in: 11001111001100110011001100111
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: O11
Initial time:        457900000
Elapsed time:       10000
out: PASSED!!
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:      10
Maximum elapsed time:     160
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 7000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 6500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 6999-fp2signed-RUP <<
in: 110001110000111010110011101101
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: O11
Initial time:        461740000
Elapsed time:       10000
out: PASSED!!
NV: PASSED!!
NV: 0
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:      10
Maximum elapsed time:     170
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 8000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 7500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 7499-fp2signed-RUP <<
in: 1100010010100010010110001110
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: O11
Initial time:        460540000
Elapsed time:       10000
out: PASSED!!
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:      10
Maximum elapsed time:     130
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 8500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 8000
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 7999-fp2signed-RUP <<
in: 111001001011001000111010100101
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: O11
Initial time:        458820000
Elapsed time:       10000
out: PASSED!!
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 0
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:      10
Maximum elapsed time:     140
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 9000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 8500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 8499-fp2signed-RUP <<
in: 1010110100100100010001010101011
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: O11
Initial time:        458460000
Elapsed time:       10000
out: PASSED!!
NV: PASSED!!
NV: 0
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:      10
Maximum elapsed time:     130
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 9500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 9000
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 8999-fp2signed-RUP <<
in: 0100100101110100011000111111011
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: O11
Initial time:        459060000
Elapsed time:       10000
out: PASSED!!
NV: PASSED!!
NV: 1
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:      10
Maximum elapsed time:     140
END

$ ./tb_fp_converter_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 10000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 9500
N° of tests written: 8000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
    >>>Test 9499-fp2signed-RUP <<
in: 010001010010111010001111110101
integer_is_signed: 1
option: 1
rm: O11
Initial time:        461420000
Elapsed time:       10000
out: PASSED!!
NV: PASSED!!
NV: 0
NX: PASSED!!
NX: 1
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NV_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total NX_errors errors found:      0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:      10
Maximum elapsed time:     140
END

```

Figura 5.6: Resultados de **tb_fp_converter.sv** parte 3.

5.1.4 *fp_arithmetic_unit*

Este módulo (ver anexo 1) se verifica con el mismo método presentado para la *ALU* y el *fp_converter*. El código que genera los *test benches* es **tb_fp_arithmetic_unit_gen.c** (disponible en el anexo 3) y retorna **tb_fp_arithmetic_unit.sv**. En este caso se generan 2 números punto flotante de forma pseudoaleatoria por *set test*, cada uno de estos *sets* contiene 5 *tests*, uno por cada operación que realiza la unidad, por modo de redondeo (igual que en el caso anterior, solo se consideran 4 modos). Nuevamente, se realizan 20 simulaciones de 500 *set tests* cada una. Además, **tb_fp_arithmetic_unit_gen.c** se encarga de modificar los resultados que son *NaN* por el *NaN* canónico.

Es importante destacar que los resultados para el cálculo de la raíz cuadrada y la división se verifican de forma especial, esto debido a que en múltiples ocasiones el campo *fraction* del punto flotante resultante varía en ± 1 o ± 2 . Por el tiempo requerido en la implementación de esta unidad se acepta dicho margen de error. A pesar de lo anterior, como se puede ver en los resultados de las figuras 5.7, 5.8, 5.9 y 5.10, se detecta un total de 8 errores en todas las pruebas realizadas, 4 son de *status* (la bandera que levanta una operación) para cada modo de redondeo del: *Test 4321-SUB*, este error es despreciado debido a que finalmente las banderas no juegan un rol importante el diseño completo ya que no se implementa el registro *FCSR*. Los otros 4 errores están relacionados con el número en punto flotante obtenido en la operación, donde las pruebas: *Test 3678-DIV-RTZ*, *Test 3678-DIV-RDN* y *Test 3678-DIV-RUP* presentan un error en el campo *fraction* de ± 3 y *Test 2758-MUL-RNE* de ± 1 . Estos errores se consideran aceptables debido a las restricciones de tiempo para el desarrollo del *SoC*.

```

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 0
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 499-SUB-RUP <<
In1: 11101010001011001010000101001
In2: 1000100100011011001010010101
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5629610000
Elapsed time:     60000
out: PASSED!!
out: : 111010110001011001010000101000
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found:      0 (0.00000 percentage)
Total out errors found:   0 (0.00000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.00000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1180
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 1500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 1000
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 1499-SUB-RUP <<
In1: 010000000100000001101010100110
In2: 1111110101000111111001111001001
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5676820000
Elapsed time:     60000
out: PASSED!!
out: : 011111010100111111001111001010
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out errors found:   0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1210
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 2500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 2000
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 2499-SUB-RUP <<
In1: 0100000001000000011010101000101
In2: 1011110000010111110010011010
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5668410000
Elapsed time:     60000
out: PASSED!!
out: : 00111100000101111110010011011
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out errors found:   0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1190
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 1000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 999-SUB-RUP <<
In1: 10010100011100001000111000100101
In2: 0111011011110011000010010100000
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5680990000
Elapsed time:     60000
out: PASSED!!
out: : 11110110111110011000010010100000
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out errors found:   0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1190
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 2000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 1500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 1999-SUB-RUP <<
In1: 011110000001000111001111000110
In2: 00100011101001111100111100111101
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5609110000
Elapsed time:     60000
out: PASSED!!
out: : 0111110000001000111001111000110
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out errors found:   0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1180
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 3000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 2500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 2999-SUB-RUP <<
In1: 1111011000101111111111000101
In2: 000010010011110001011010101000
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5632990000
Elapsed time:     60000
out: PASSED!!
out: : 1111011000101111111111000101
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found:      1 (0.005000 percentage)
Total out errors found:   1 (0.010000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1180
END
>>>Test 2758-MUL-RNE <<
In1: 00101000001110101010000101100
In2: 00010111010100101010101011001
Operation: 001
Rounding_Mode: 000
Initial time:      2873690000
Elapsed time:     60000
out: FAILED!!
out: should be: 000000000011111001000010110100000
out: : 000000000011111001000010110100000
status: PASSED!!
status: 001

```

Figura 5.7: Resultados de **tb_fp_arithmetic_unit.sv** parte 1.

```

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 3500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 3000
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 3499-SUB-RUP <<
In1: 1100011100001110101100111101101
In2: 0111110011010000100111110111101
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5656000000
Elapsed time:      60000
out: PASSED!
out: : 11111100110100001001111101111101
status: PASSED!
status: 111
-----
Total errors found:      0 (0.000000 percentage)
Total out errors found:  0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1220
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 4000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 3500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 3999-SUB-RUP <<
In1: 11111001011101000011110101001001
In2: 0010000101001011111101000000110
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5656040000
Elapsed time:      60000
out: PASSED!
out: : 11111001011101000011110101001001
status: PASSED!
status: 111
-----
Total errors found:      3 (0.015000 percentage)
Total out errors found:  3 (0.030000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1180
END

>>>Test 3678-DIV-RTZ <<
In1: 01001001100001010010100100010010
In2: 010101010001010101110111111
Operation: 010
Rounding_Mode: 001
Initial time:      2009120000
Elapsed time:      720000
out: FAILED!
out should be: 0011001011101011010011101000110
out: : 0011001011101011010011101000110
out: PASSED!
status: PASSED!
status: 111
-----
```

>>>Test 3678-DIV-RDN <<

```

In1: 01001001100001010010100100010010
In2: 010101010001010101110111111
Operation: 010
Rounding_Mode: 010
Initial time:      2012130000
Elapsed time:      720000
out: FAILED!
out should be: 001100101110101101011011101000110
out: : 001100101110101101011011101000110
out: PASSED!
status: PASSED!
-----
```

>>>Test 3678-DIV-RUP <<

```

In1: 01001001100001010010100100010010
In2: 010101010001010101110111111
Operation: 010
Rounding_Mode: 011
Initial time:      2015140000
Elapsed time:      720000
out: FAILED!
out should be: 001100101110101101011011101000110
out: : 001100101110101101011011101000110
out: PASSED!
status: PASSED!
-----
```

\$./tb_fp_arithmetic_unit_gen

```

Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 4500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 4000
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 4499-SUB-RUP <<
In1: 1100000000110111011110000000110
In2: 10000000001110100101000111001061000
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      5651580000
Elapsed time:      60000
out: PASSED!
out: : 1100000000110111011110000000110
status: PASSED!
status: 111
-----
Total errors found:      4 (0.020000 percentage)
Total out errors found:  0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 4 (0.040000 percentage)
Minimum elapsed time:    20
Maximum elapsed time:   1180
END

>>>Test 4321-SUB-RTZ <<
In1: 100000000111001110010010110001
In2: 1000000001110011100100101000101101
Operation: 100
Rounding_Mode: 001
Initial time:      3629180000
Elapsed time:      70000
out: PASSED!
out: : 100000000001001101011010000100
status: FAILED!
status should be: 000
status: 001
-----
```

>>>Test 4321-SUB-RDN <<

```

In1: 100000000111001110010010110001
In2: 10000000011001100100101000101000101101
Operation: 100
Rounding_Mode: 010
Initial time:      3632130000
Elapsed time:      70000
out: PASSED!
out: : 100000000001001101011010000100
status: FAILED!
status should be: 000
status: 001
-----
```

>>>Test 4321-SUB-RDN <<

```

In1: 100000000111001110010010110001
In2: 10000000011001100100101000101000101101
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      3635080000
Elapsed time:      70000
out: PASSED!
out: : 100000000001001101011010000100
status: FAILED!
status should be: 000
status: 001
-----
```

>>>Test 4321-SUB-RUP <<

```

In1: 100000000111001110010010110001
In2: 10000000011001100100101000101000101101
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time:      3638030000
Elapsed time:      70000
out: PASSED!
out: : 100000000001001101011010000100
status: FAILED!
status should be: 000
status: 001
-----
```

Figura 5.8: Resultados de `tb_fp_arithmetic_unit.sv` parte 2.

```

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 5000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 4500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv

>>>Test 4999-SUB-RUP <<
In1: 001000101001011110101110010101
In2: 11010010100101001010010001010
Operation: 100
Rounding_Mode: O11
Initial_time: 5629900000
Elapsed_time: 60000
out: PASSED!!
out : 01010110010101010100110001011
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1180
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 6000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 5500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv

>>>Test 5999-SUB-RUP <<
In1: 10100110010001100010000010000011
In2: 00101110011001011001010010110110
Operation: 100
Rounding_Mode: O11
Initial_time: 5654180000
Elapsed_time: 60000
out: PASSED!!
out : 101011110011000101100110101111
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1180
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 7000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 6500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv

>>>Test 6999-SUB-RUP <<
In1: 1010111010111010101000011010001
In2: 011000000111100000111010101111
Operation: 100
Rounding_Mode: O11
Initial_time: 5628880000
Elapsed_time: 60000
out: PASSED!!
out : 1111000001111000001111011011111
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1180
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 8000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 7500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv

>>>Test 7999-SUB-RUP <<
In1: 111111000110010100000001100101
In2: 110001000011110101110001100001
Operation: 100
Rounding_Mode: O11
Initial_time: 5627520000
Elapsed_time: 60000
out: PASSED!!
out : 111111000110010100000001100100
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1200
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 5500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 5000
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv

>>>Test 5499-SUB-RUP <<
In1: 00000001111100001000110001111101
In2: 1100001110100101010101101101100100
Operation: 100
Rounding_Mode: O11
Initial_time: 5707980000
Elapsed_time: 60000
out: PASSED!!
out : 010000111010010101011011100101
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1180
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 6500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 6000
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv

>>>Test 6499-SUB-RUP <<
In1: 1001011100101011001011010101000
In2: 11000010000010101011100010001100
Operation: 100
Rounding_Mode: O11
Initial_time: 5651500000
Elapsed_time: 60000
out: PASSED!!
out : 010000100000101010101110001000110
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1180
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 7500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 7000
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv

>>>Test 7499-SUB-RUP <<
In1: 11010001111000010001000010100001100
In2: 0111000001111010010100001111100
Operation: 100
Rounding_Mode: O11
Initial_time: 5671980000
Elapsed_time: 60000
out: PASSED!!
out : 111101110101110010101001111100
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1190
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 8500
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 8000
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv

>>>Test 7899-SUB-RUP <<
In1: 1110101011110001000010100001111100
In2: 0100001000001010111101010110101
Operation: 100
Rounding_Mode: O11
Initial_time: 5653760000
Elapsed_time: 60000
out: PASSED!!
out : 1110101011110001000011111100
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1190
END

```

Figura 5.9: Resultados de `tb_fp_arithmetic_unit.sv` parte 3.

```

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 9000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 8500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 8999-SUB-RUP <<
In1: 000100110001010101110010111111
In2: 000101100110110010100110110110000
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time: 5627630000
Elapsed time: 60000
out: PASSED!!
out: 10010110011010100101000111111101
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1180
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 10000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 9500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 9499-SUB-RUP <<
In1: 1011110010110001010101110101101
In2: 11001000100001000010100001101000110010
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time: 5671280000
Elapsed time: 60000
out: PASSED!!
out: 010010001000010000110100011001
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1190
END

$ ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
Is little endian
Enter n° of set test to write (max input 99999): 10000
Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): 9500
N° of tests written: 10000
Operation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.sv
>>>Test 9999-SUB-RUP <<
In1: 0111110100110000110000111111011
In2: 010000010101001001010111000101
Operation: 100
Rounding_Mode: 011
Initial time: 5645620000
Elapsed time: 60000
out: PASSED!!
out: 0111110100110000110000111111011
status: PASSED!!
status: 111
-----
Total errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total out errors found: 0 (0.000000 percentage)
Total status errors found: 0 (0.000000 percentage)
Minimum elapsed time: 20
Maximum elapsed time: 1180
END

```

Figura 5.10: Resultados de **tb_fp_arithmetic_unit.sv** parte 4.

5.1.5 FPU

Este módulo (ver anexo 1) es relativamente simple con respecto a los presentados anteriormente, al incorporar operaciones de punto flotante simple (las cuales se verifican al realizar simulaciones sobre el *core complex*) y coordinar las entradas y salidas de los módulos *fp_converter* y *fp_arithmetic_unit*. Por ello, para su verificación se realizan *test benches* simples basados en el código **tb_FPU.sv** (ver anexo 2), para corroborar que se realicen las operaciones como se espera simplemente se toma dicho archivo y se realizan modificaciones según la operación a testear. Gracias a esto se comprueba el correcto funcionamiento del módulo. En la figura 5.11 se aprecia un ejemplo de la salida que genera este *test bench*.

```

FPU- out: 1100000011000000000000000000000000000000
FPU- NV, NX, UF, OF, DZ: 00000
fpu_op_selection- rm2fpu: 011
fpu_op_selection- fpu_option: 10100

```

Figura 5.11: Ejemplo del resultados obtenido al ejecutar **tb_FPU.sv**.

5.1.6 riscv32imf_top

Para testear los módulos *riscv32imf_singlecycle* (ver anexo 1) y *riscv32imf_pipeline* (ver anexo 1) se escribe un programa simple en lenguaje ensamblador que utiliza todas las instrucciones implementadas, **testing_code_imf.s** (ver anexo 4). Además, se crea el *test bench*, compatible para ambos *cores*, **tb_riscv32imf_top.sv** (ver anexo 2) específicamente para ser ejecutado con este programa de prueba. Es importante destacar que el *test bench* genera 3 archivos de salida:

prog_out.mem, *data_out.mem* y *registers.mem*, los cuales contienen, respectivamente, el estado final de la memoria de programa (la cual no cambia), la de datos y el estado final de los registros. Nótese además, que la carpeta con el código fuente del diseño debe contener los archivos *text_in.mem* y *data_in.mem*, los cuales contienen la memoria de programa y de datos inicial para la ejecución del programa compilado. Estos últimos archivos deben ordenar las palabras en formato hexadecimal en bloques de 4 palabras de derecha a izquierda, para esto se utiliza un pequeño *script* de *Python* (detalles en el anexo 4.1).

| Registers | | Floating Point | Registers | | Floating Point |
|-----------|--------|----------------|-----------|--------|----------------|
| Name | Number | Value | Name | Number | Value |
| zero | 0 | 0x00000000 | ft0 | 0 | 0x00001ffc |
| ra | 1 | 0x80001ffe | ft1 | 1 | 0x000017fd |
| sp | 2 | 0xffffffffd | ft2 | 2 | 0x000037f9 |
| gp | 3 | 0x00001800 | ft3 | 3 | 0xbfe00000 |
| tp | 4 | 0x000007ff | ft4 | 4 | 0xbfe00000 |
| t0 | 5 | 0x000000535 | ft5 | 5 | 0x000081f0 |
| t1 | 6 | 0x0029a800 | ft6 | 6 | 0x000061f4 |
| t2 | 7 | 0xffffffffa | ft7 | 7 | 0x80001ffc |
| s0 | 8 | 0x00000ffe | fs0 | 8 | 0x000081f0 |
| s1 | 9 | 0x000003fc | fsl | 9 | 0x7fc00000 |
| a0 | 10 | 0x00000ffe | fa0 | 10 | 0x80001ffc |
| a1 | 11 | 0x00001ffc | fa1 | 11 | 0x00001ffc |
| a2 | 12 | 0x000017fd | fa2 | 12 | 0xc0440000 |
| a3 | 13 | 0x00001002 | fa3 | 13 | 0xc0440000 |
| a4 | 14 | 0x0000007c | fa4 | 14 | 0x00001ffc |
| a5 | 15 | 0x00000000 | fa5 | 15 | 0xc0670000 |
| a6 | 16 | 0x00000ffe | fa6 | 16 | 0xc0ab8000 |
| a7 | 17 | 0x0000000a | fa7 | 17 | 0xc0c00000 |
| s2 | 18 | 0xffffffffd | fs2 | 18 | 0x4f800000 |
| s3 | 19 | 0x7fffffff | fs3 | 19 | 0x00000000... |
| s4 | 20 | 0x00003134 | fs4 | 20 | 0x00000000... |
| s5 | 21 | 0xffffffffc | fs5 | 21 | 0x00000000... |
| s6 | 22 | 0x00000001f | fs6 | 22 | 0x00000000... |
| s7 | 23 | 0x00000000 | fs7 | 23 | 0x00000000... |
| s8 | 24 | 0x00000020 | fs8 | 24 | 0x00000000... |
| s9 | 25 | 0x000003fd | fs9 | 25 | 0x00000000... |
| s10 | 26 | 0x00000001b | fs10 | 26 | 0x00000000... |
| s11 | 27 | 0x000000001 | fs11 | 27 | 0x00000000... |
| t3 | 28 | 0x00001ffd | ft8 | 28 | 0x00000000... |
| t4 | 29 | 0x00001ffc | ft9 | 29 | 0x00000000... |
| t5 | 30 | 0x001f4000 | ft10 | 30 | 0x00000000... |
| t6 | 31 | 0x001f70f0 | ft11 | 31 | 0x00000000... |
| pc | | 0x000031c4 | | | |

Figura 5.12: Estado final de los registros para la simulación de *testing_code_imfs.s* en *RARS*.

| integer_regs | | fp_REGS | |
|--------------|-----------|---------|----------|
| 00: | 00000000 | 00: | 00001ffc |
| 01: | 80001ffe | 01: | 000017fd |
| 02: | ffffffffd | 02: | 000037f9 |
| 03: | 00001800 | 03: | bfe00000 |
| 04: | 000007ff | 04: | bfe00000 |
| 05: | 00000535 | 05: | 000081f0 |
| 06: | 0029a800 | 06: | 000061f4 |
| 07: | ffffffffa | 07: | 80001ffc |
| 08: | 00000ffe | 08: | 000081f0 |
| 09: | 000003fc | 09: | 7fc00000 |
| 0a: | 00000ffe | 0a: | 80001ffc |
| 0b: | 00001ffc | 0b: | 00001ffc |
| 0c: | 000017fd | 0c: | c0440000 |
| 0d: | 00001002 | 0d: | c0440000 |
| 0e: | 0000007c | 0e: | 00001ffc |
| 0f: | 00000000 | 0f: | c0670000 |
| 10: | 00000ffe | 10: | c0ab8000 |
| 11: | 0000000a | 11: | c0c00000 |
| 12: | ffffffffd | 12: | 4f800000 |
| 13: | 7ffffffd | 13: | 00000000 |
| 14: | 00000134 | 14: | 00000000 |
| 15: | ffffffffc | 15: | 00000000 |
| 16: | 0000001f | 16: | 00000000 |
| 17: | 00000000 | 17: | 00000000 |
| 18: | 00000020 | 18: | 00000000 |
| 19: | 000003fd | 19: | 00000000 |
| 1a: | 0000001b | 1a: | 00000000 |
| 1b: | 00000001 | 1b: | 00000000 |
| 1c: | 00001ffd | 1c: | 00000000 |
| 1d: | 00001ffc | 1d: | 00000000 |
| 1e: | 001f4000 | 1e: | 00000000 |
| 1f: | 001f40f0 | 1f: | 00000000 |

Figura 5.13: Estado final de los registros para la simulación de `testing_code_imf.s` en Vivado. Captura de `registers.mem`.

En las figuras 5.12 y 5.13 se aprecia el estado final de los registros para la simulación del programa en *RARS* y el resultado del *test bench* respectivamente, siendo ambos prácticamente idénticos. Las únicas discrepancias ocurren en los registros enteros: *x20* (0x14) y *x31* (0x1f), estas diferencias se deben a que *RARS* considera como *Program Counter* inicial la dirección 0x3000 y la implementación realizada lo considera desde cero.

| Address | Value (+0) | Value (+4) | Value (+8) | Value (+c) | Value (+10) | Value (+14) | Value (+18) | Value (+1c) |
|------------|------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 |
| 0x00000020 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 |
| 0x00000040 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 |
| 0x00000060 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 |
| 0x00000080 | 0x00000000 | 0x0000ffffd | 0x00000000 | 0x00001fffc | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x3fe00000 |
| 0x000000a0 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 |
| 0x000000c0 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 |
| 0x000000e0 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 | 0x00000000 |

Figura 5.14: Memoria de datos resultante para la simulación de `testing_code_imf.s` en *RARS*.

| data_out.mem | |
|--------------|----------------------------|
| en | + |
| | 1000 GB Volume ~/Documents |
| 00000080: | 00000000 |
| 00000084: | 0000ffffd |
| 00000088: | 00000000 |
| 0000008c: | 00001ffc |
| 00000090: | 00000000 |
| 00000094: | 00000000 |
| 00000098: | 00000000 |
| 0000009c: | 3fe00000 |
| 000000a0: | 00000000 |

Figura 5.15: Memoria de datos resultante para la simulación de `testing_code_imf.s` en *Vivado*. Captura de `data_out.mem`.

```
BEGIN
prog_out.mem - OK: -20000
data_out.mem - OK: -19999
registers.mem - OK: -19998

INFO: [USF-XSim-96] XSim co
INFO: [USF-XSim-97] XSim si
launch_simulation: Time (s)
run all

exit_status: 00

PC: 000001c4

END
```

Figura 5.16: Resultado obtenido en la consola de *Vivado* al ejecutar `tb_riscv32imf_top.sv`.

El estado final de la memoria de datos concuerda para ambos casos y se puede apreciar en las figuras 5.14 y 5.15 para la simulación en *RARs* y en *Vivado* respectivamente. Además, en la figura 5.16 se puede ver la respuesta en consola del *test bench*, donde se observa el *Program Counter* final de la ejecución, nuevamente considerando la discrepancia del mismo entre ambas simulaciones, concuerda con el *PC* que se aprecia en la figura 5.12.

5.1.7 TOP

Para verificar este módulo (ver anexo 1) se utiliza otro programa en lenguaje ensamblador, **fibonacci_simple.s** (disponible en el anexo 4). Este código implementa la siguiente función recursiva:

```
1 int fibonacci(int n){  
2     if(n <= 2)  
3         return 1;  
4     else  
5         return fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2);  
6 }
```

Y lo ejecuta de la siguiente forma:

```
1 #include <stdio.h>  
2 int main(){  
3     for(int i=3; i<=7; i++){  
4         printf(" %d", i);  
5         printf(" %d", fibonacci(i));  
6     }  
7     return 0;  
8 }
```

El código ensamblador esta escrito de manera formal, considerando los registros *ra* y *sp*, esto con el fin de simular la ejecución de un código compilado. Luego, para la ejecución de este programa se confecciona el *test bench tb_TOP.sv* (ver anexo 2), el cual simula la interacción con el usuario para poder visualizar los resultados.

```
32435568713  
-- program is finished running (0) --
```

Figura 5.17: Resultado de *fibonacci_simple.s* en *RARS*.



Figura 5.18: Resultado de *fibonacci_simple.s* para la señal *info_out[31:0]* al ejecutar *tb_TOP.sv* en *Vivado*.

```
BEGIN

    color_leds: 001001
    INFO: [USF-XSim-96]
    INFO: [USF-XSim-97]
    launch_simulation: 1
    run all

    color_leds: 010010

END
```

Figura 5.19: Resultado de *fibonacci_simple.s* en la consola de *Vivado* al ejecutar *tb_TOP.sv*.

En la figura 5.17 se aprecia el resultado de la simulación en *RARS*. Mientras que en la figura 5.18 se puede ver la señal *info_out[31:0]*, esta es la palabra de 32 bits que se muestra en la placa *Nexys 4* mediante los *displays* de 7 segmentos. Considerando como está implementado el entorno de ejecución, esta señal concuerda con los resultados de la simulación en *RARS*. Por otro lado, en la figura 5.19 se muestra el resultado del *test bench* en la consola de *Vivado*, aquí se aprecia la codificación binaria para los colores de los *LEDs* que informan el estado inicial y final de la ejecución del programa en el *SoC*. Los resultados obtenidos muestran un correcto funcionamiento del *SoC* y del *core complex* (ambas versiones).

5.2 Pruebas en hardware

A continuación, se presentan los resultados experimentales de las pruebas realizadas en la *Nexys 4*. Para esta tarea se dispone de dos programas en lenguaje ensamblador, el primero basado en el programa de verificación presentado en 5.1.7 y el segundo enfocado en testear las operaciones aritméticas de punto flotante.

Es importante mencionar que el botón *start* es el pulsador *BTNU(F15)* de la placa, *resume* corresponde al pulsador *BTND(V10)* y el de *reset* al *CPU RESET*. Por otra parte, los *LEDs* de tricolor, *LD17* y *LD16* son los *LEDs* que indican el estado de ejecución.

5.2.1 fibonacci_inputs.s

Se escribe el programa ***fibonacci_inputs.s*** (ver anexo 4) basado en el código, antes mencionado, ***fibonacci_simple.s***. Este nuevo programa, nuevamente implementa la función *fibonacci* (presentada en 5.1.7). La diferencia radica en la interacción con el usuario, en este caso se implementa dicha función de la siguiente forma:

```

1 #include <stdio.h>
2 int main(){
3     int a, b;
4     scanf("%d", &a);
5     // Entre cada entrada se agrega un "ebreak", para probar su funcionamiento.
6     scanf("%d", &b);
7     for(int i=a; i<=b; i++)
8         printf(" %d", fibonacci(i));
9     return 0;
10 }
```

En la figura 5.20 se aprecia el resultado de la simulación en *RARS* para este programa. Por otro lado, en la figura 5.21 se pueden ver las imágenes de cada estado de la ejecución del programa corriendo en la tarjeta *FPGA*.

| |
|---------------------------------------|
| 1 |
| 9 |
| 112358132134 |
| -- program is finished running (0) -- |

Figura 5.20: Resultado de *fibonacci_inputs.s* en *RARS*.



Figura 5.21: Resultado de *fibonacci_inputs.s* en la *Nexys 4*.

Las imágenes de la figura 5.21 están numeradas y en orden. La imagen número 1 muestra el estado de espera del *SoC*, para iniciar la ejecución se oprime el botón *start*. En la imagen 2 se introduce la primera mitad de 16 bits del primer entero a ingresar, para confirmar esta mitad se oprime *start*, luego la segunda mitad se ingresa en la foto número 3 y se confirma con el botón *resume*. En la imagen 4 se aprecia el *ebreak* que separa el ingreso de ambos números enteros y en las imágenes 5 y 6 se ingresa el segundo entero de la misma forma que el primero. Luego, entre las imágenes 7 y 15 se pueden ver las salidas del programa, para avanzar al siguiente resultado (entero) se oprime *resume*. Nótese que el último dígito de la derecha en la imagen número 13 es el dígito hexadecimal *D* debido a que está acompañado por el punto decimal de la derecha. Para pasar de la pantalla presentada en la imagen 15 a la de fin de ejecución (con los *LEDs* de estado en verde y mostrando el estado del *Program Counter* al finalizar la ejecución) de la foto 16 se oprime *resume*.

Si se vuelve a oprimir *resume* se retorna al estado de espera (imagen 17). Finalmente, se corrobora el correcto funcionamiento del programa en la tarjeta *FPGA* al obtenerse los resultados esperados.

5.2.2 *operating_fp.s*

Para probar las operaciones aritméticas de punto flotante se escribe el programa **operating_fp.s** (ver anexo 4). Este programa, además, guarda 2 palabras en memoria, 0xBCCCCCCC y 0xFFFFFFFF, las cuales se imprimen como enteros en pantalla al inicio y al final de la ejecución respectivamente. Durante la ejecución, se reciben dos número en punto flotante en los registros *ft1* y *ft2* para luego realizar las siguientes operaciones:

```
1  fmuls    ft3, ft1, ft2
2  fadd.s   ft4, ft1, ft2
3  fsub.s   ft5, ft3, ft4
4  fdiv.s   ft6, ft4, ft1
5  fsqrt.s  ft7, ft3
6  fmadd.s  ft8, ft3, ft6, ft1
7  fmsub.s  ft9, ft3, ft6, ft1
8  fnmadd.s ft10, ft3, ft6, ft1
9  fnmsub.s ft11, ft3, ft6, ft1
```

Después se imprimen en pantalla los números en punto flotante de los registros: *ft3*, *ft4*, *ft5*, *ft6*, *ft7*, *ft8*, *ft9*, *ft10* y *ft11*.

```
-11453246135.7
91.26
520.18296.96423.2220217.01052722.8074998854.278842.87-8854.27-8842.87-286331154
```

Figura 5.22: Resultado de *operating_fp.s* en *RARS*.

En la figura 5.22 se aprecia la salida de la consola del simulador *RARS* para este programa, donde el primer número en punto flotante ingresado es 5.7 y el segundo es 91.26. Por otro lado, -11453246135 corresponde a la palabra 0xBCCCCCCC y -286331154 corresponde a 0xFFFFFFFF. Luego, los números de la tercera línea antes de -286331154 son los resultados de los registros antes mencionados (*ft3* a *ft11*). Sin embargo, resulta más cómodo visualizar los resultados de estos registros en la figura 5.23 ya que se encuentra en formato hexadecimal, el mismo formato de visualización utilizado en la tarjeta *FPGA*.

| Registers | | Floating Point |
|-----------|--------|----------------|
| Name | Number | Value |
| ft0 | 0 | 0x00000000 |
| ft1 | 1 | 0x40b66666 |
| ft2 | 2 | 0x42b6851f |
| ft3 | 3 | 0x44020ba6 |
| ft4 | 4 | 0x42c1eb85 |
| ft5 | 5 | 0x43d39c6b |
| ft6 | 6 | 0x4188158f |
| ft7 | 7 | 0x41b675c2 |
| fs0 | 8 | 0x000000... |
| fs1 | 9 | 0x000000... |
| fa0 | 10 | 0xc60a2b7b |
| fa1 | 11 | 0x000000... |
| fa2 | 12 | 0x000000... |
| fa3 | 13 | 0x000000... |
| fa4 | 14 | 0x000000... |
| fa5 | 15 | 0x000000... |
| fa6 | 16 | 0x000000... |
| fa7 | 17 | 0x000000... |
| fs2 | 18 | 0x000000... |
| fs3 | 19 | 0x000000... |
| fs4 | 20 | 0x000000... |
| fs5 | 21 | 0x000000... |
| fs6 | 22 | 0x000000... |
| fs7 | 23 | 0x000000... |
| fs8 | 24 | 0x000000... |
| fs9 | 25 | 0x000000... |
| fs10 | 26 | 0x000000... |
| fs11 | 27 | 0x000000... |
| ft8 | 28 | 0x460a5914 |
| ft9 | 29 | 0x460a2b7b |
| ft10 | 30 | 0xc60a5914 |
| ft11 | 31 | 0xc60a2b7b |

Figura 5.23: Estado final de los registros de punto flotante para la simulación de `operating_fp.s` en *RARS*.

En la figura 5.24 se aprecia el **conversor de punto flotante a binario** utilizado para determinar la representación binaria de las entradas 5.7 y 91.26 para la ejecución del programa en la tarjeta *Nexys 4*.

The figure consists of two vertically stacked screenshots of the "IEEE 754 Converter (JavaScript), V0.22" tool.

Top Screenshot (Input 5.7):

- Sign:** +1
- Encoded as:** 0
- Binary:**
- Value:** 5.7
- Exponent:** 2², 129
- Mantissa:** 1.4249999523162842, 3565158
- Output Fields:**
 - You entered: 5.7
 - Value actually stored in float: 5.69999980926513671875
 - Error due to conversion: -1.9073486328125E-7
 - Binary Representation: 01000001011011001100110011001100
 - Hexadecimal Representation: 0x40b66666

Bottom Screenshot (Input 91.26):

- Sign:** +1
- Encoded as:** 0
- Binary:**
- Value:** 91.26
- Exponent:** 2⁶, 133
- Mantissa:** 1.425937533378601, 3573023
- Output Fields:**
 - You entered: 91.26
 - Value actually stored in float: 91.26000213623046875
 - Error due to conversion: 0.00000213623046875
 - Binary Representation: 0100001010110110100010100011111
 - Hexadecimal Representation: 0x42b6851f

Figura 5.24: Representación binaria para las entradas 5.7 y 91.26 del programa `operating_fp.s`. Fuente: <https://www.h-schmidt.net/FloatConverter/IEEE754.html>.



Figura 5.25: Resultado de *operating_fp.s* en la *Nexys 4*.

En la figura 5.25 se pueden ver las 18 imágenes con los resultados de las pruebas sobre el *hardware* para este programa. La imagen número 1, nuevamente, muestra el estado de espera del *SoC*, la 2 muestra el *print* inicial, como entero, de la palabra 0xBCCCCCCC. Luego, las imágenes 3 y 4 muestran como se ingresa el primer número en punto flotante, 5.7 y las fotos 5 y 6 muestran el ingreso de 91.26 (se ingresan de la misma forma que los enteros del caso anterior, se presiona *start* para ingresar la primera mitad y *resume* para la segunda). Después, para visualizar cada uno de los números en punto flotante de los registros *ft3* a *ft11* se debe ir presionando *resume*, estos se pueden ver en orden entre las fotos 7 y 15. En la imagen número 16 se aprecia la palabra 0xEEEEEEEE como corresponde, se oprime *resume* y finalmente se termina la ejecución en la imagen 17, presionando *resume* nuevamente se vuelve al estado de espera de la imagen 18.

Si se observa el estado final de los registros de la simulación en *RARS* en la figura 5.23 y se compara con el resultado de las fotos 7 a 15 de la figura 5.25 se pueden apreciar ciertas discrepancias entre ellos. En concreto, los registros *ft8* y *ft10* difieren en 1 con respecto a los resultados de la simulación y *ft7* en *RARS* es $0x41B675C2 \approx 22.8075$, mientras que en la imagen número 11 de los resultados sobre la tarjeta *FPGA* es $0x41B7DA15 \approx 22.9815$. Estas diferencias concuerdan con lo mencionado en 5.1.4 y el error del calculo de la raíz cuadrada mencionado en [27], por lo que se consideran aceptables.

5.3 Detalles de la implementación

En esta sección se presentan los detalles de la implementación final del *SoC* obtenido. Para la síntesis del diseño final, etapa en la cual se interpreta el código fuente en una representación a nivel de compuertas, se considera el *core complex Pipelined* y la estrategia por defecto de *Vivado (Strategy: Vivado Synthesis Defaults)*, al terminar este proceso de síntesis no se genera señal alguna de error o *warning* en el *software* y una vez finalizado se pueden realizar las simulaciones de comportamiento del sistema digital obtenido.

Después de la síntesis del diseño se debe realizar el proceso de implementación en *Vivado*. Este proceso incluye todos los pasos para colocar y enrutar la lista de conexiones a los recursos del dispositivo *FPGA*, cumpliendo con las limitaciones lógicas, físicas y de tiempo del diseño. En esta etapa es fundamental un archivo de extensión “*.xdc*”, este define los puertos de E/S para el sistema y el reloj del mismo, en este caso dicho archivo es *top_constraints.xdc* (disponible en el anexo 1).

Durante el proceso de implementación pueden surgir 2 *warnings*, el primero es: *[Pwropt 34-321] HACOOException: Too many TFIs and TFOs in design, exiting pwropt*, este se soluciona ejecutando *set_param pwropt.maxFaninFanoutToNetRatio 1000* en la consola de *Vivado*. Por otro lado, el segundo *warning* es: *[Power 33-332] Found switching activity that implies high-fanout reset nets being asserted for excessive periods of time which may result in inaccurate power analysis*, sin embargo no se ahonda en su resolución ya que no afecta al proyecto y no se considera pertinente invertir tiempo en ello.

Luego de la síntesis e implementación del diseño se procede a generar el *bitstream*, este corresponde al archivo con el cual se carga el diseño en el *FPGA*. Luego de obtener el *bitstream* se generan 93 *warnings* nuevos, todos ellos relacionados con posibles optimizaciones del diseño enfocados en los multiplicadores implementados, esto debido a que se utiliza inferencia para todas las operaciones de multiplicación. Estos *warnings* se dividen en 3 tipos:

- 37 son *[DRC DPIP-1] Input pipelining*: Indica que aplicar un diseño *Pipelined* a la entrada del bloque *DSP48* del *FPGA* (utilizado para las multiplicaciones) mejora el rendimiento (*performance*) del diseño.
- 28 son *[DRC DPOP-1] PREG Output pipelining*: Indica que aplicar un diseño *Pipelined* a la salida del bloque *DSP48* del *FPGA* (utilizado para las multiplicaciones) mejora el rendimiento (*performance*) y el consumo de energía del diseño.
- 28 son *[DRC DPOP-2] MREG Output pipelining*: Indica que aplicar un diseño *Pipelined* a la operación de multiplicación mejora el rendimiento (*performance*) y el consumo de energía del diseño.

Nuevamente, por razones de tiempo no se profundiza en solucionar estos problemas debido a que no suponen un problema para el funcionamiento del diseño obtenido pero es un punto a mejorar.

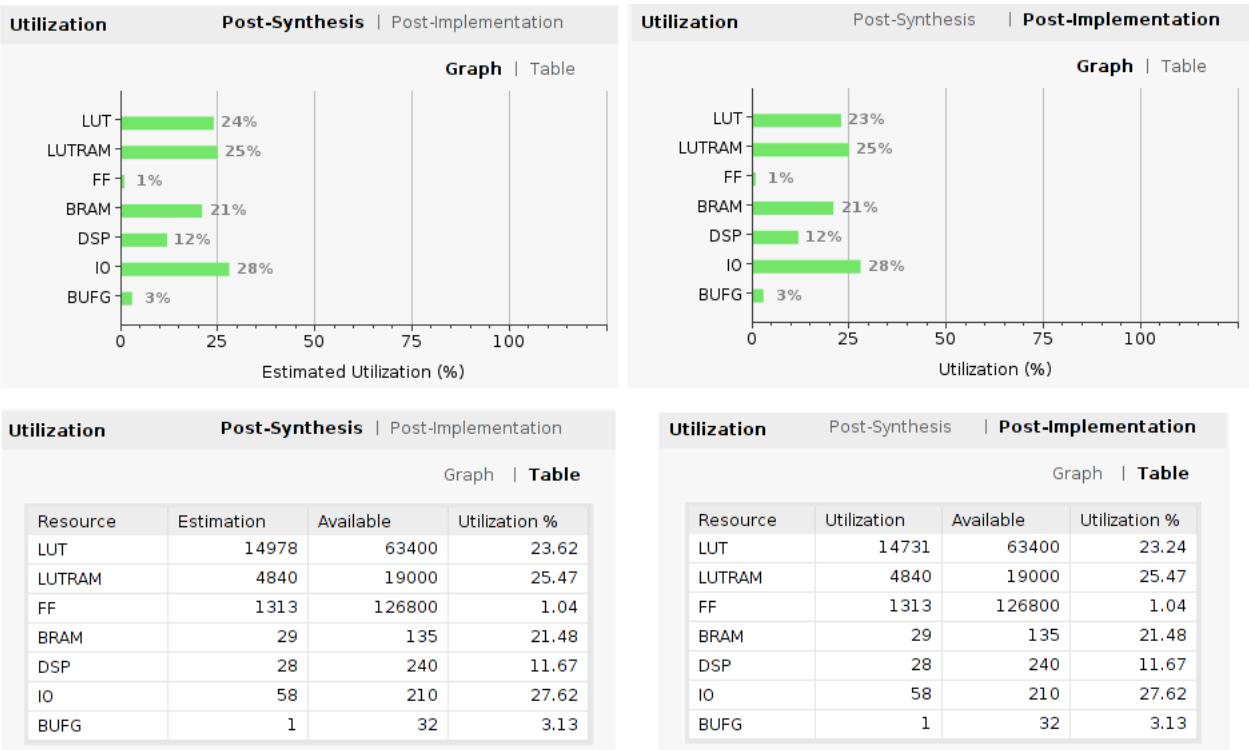


Figura 5.26: Resumen de los recursos de *hardware* utilizados, *post-synthesis* y *post-implementation*, de la tarjeta *FPGA Nexys 4* en la implementación.

En la figura 5.26 se visualizan los gráficos de barras y tablas con el detalle del uso de recursos del *FPGA post-synthesis* y *post-implementation*, donde se aprecia el bajo uso de éstos por parte diseño final obtenido. Por lo tanto, aún quedan muchos recursos del *FPGA* que se pueden utilizar para diseñar un *SoC* más complejo y completo empleando el *core complex* aquí obtenido como base.

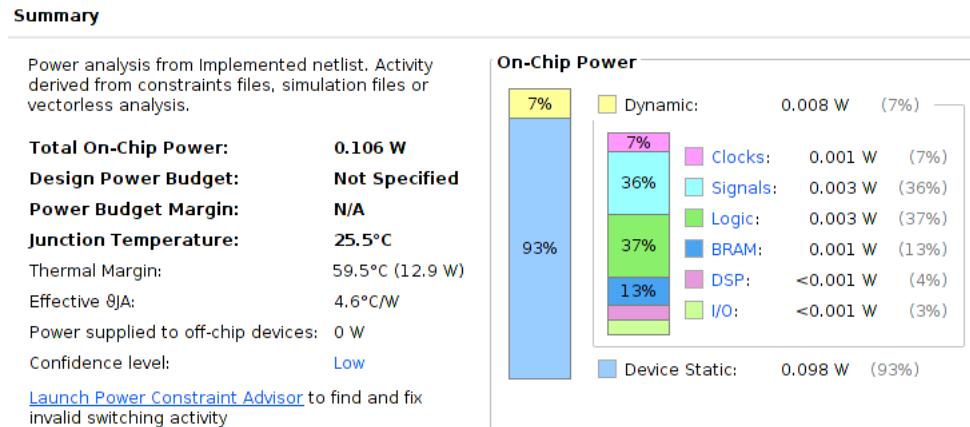


Figura 5.27: Resumen del consumo de energía de la implementación realizada.

El detalle del consumo de energía estimado para el *SoC* implementado se puede apreciar en detalle en la figura 5.27. Sin embargo, debido al *warning* ya mencionado, [Power 33-332], esta información puede resultar inexacta.

| Clock Summary | | | |
|---------------|-----------------|-------------|-----------------|
| Name | Waveform | Period (ns) | Frequency (MHz) |
| CLK | {0.000 135.000} | 270.000 | 3.704 |

Figura 5.28: Resumen del reloj implementado.

Los detalles del reloj que rige al sistema completo se pueden ver en la figura 5.28, donde se aprecia la frecuencia, el periodo y la forma de onda del mismo. La frecuencia final obtenida resulta ser bastante baja, esto es debido a la poca experiencia previa en el diseño de sistemas digitales del estilo, por ello no se aprovechan todas las bondades y técnicas de diseño que ofrece *System Verilog*, sobre todo en la implementación de la unidad de punto flotante, la cual es la que más penaliza el rendimiento del sistema.

Design Timing Summary

| Setup | Hold | Pulse Width |
|---------------------------------------|----------------------------------|---|
| Worst Negative Slack (WNS): 83.461 ns | Worst Hold Slack (WHS): 0.050 ns | Worst Pulse Width Slack (WPWS): 133.750 ns |
| Total Negative Slack (TNS): 0.000 ns | Total Hold Slack (THS): 0.000 ns | Total Pulse Width Negative Slack (TPWS): 0.000 ns |
| Number of Failing Endpoints: 0 | Number of Failing Endpoints: 0 | Number of Failing Endpoints: 0 |
| Total Number of Endpoints: 53136 | Total Number of Endpoints: 53136 | Total Number of Endpoints: 6304 |

All user specified timing constraints are met.

Figura 5.29: Resumen de las características del *timing* del diseño implementado.

Finalmente, en la imagen 5.29 se pueden distinguir los detalles de *timing* del diseño, incluyendo los peores casos y detalles para el *setup time* (tiempo mínimo en el cual los datos deben estar estables antes de que se active el canto del reloj), el *hold time* (tiempo mínimo en el cual los datos deben estar estables después de que se active el canto del reloj) y el *pulse width* (ancho de pulso del reloj). Si bien se puede lograr una mejor frecuencia sin que *Vivado* arroje algún error relacionado con el *timing* del diseño, en la práctica (con el diseño cargado en el *hardware*) el *SoC* no funciona correctamente.

6 Conclusiones

El trabajo de investigación previo y de diseño convergen a un resultado funcional para propósitos pedagógicos, tal como se propone en 1. En concreto, se obtienen dos diseños para el *core complex*, uno *Single-Cycle* y otro *Pipelined*, basados en el juego de instrucciones *RV32IMF* de *RISC-V*. Luego, este se implementa en un entorno de ejecución básico el cual permite interactuar con el usuario ingresando (en representación binaria) y/o visualizando (en representación hexadecimal) números enteros o en punto flotante. Este resultado, a pesar de su simplicidad, corresponde a un *System on a Chip* al contener todos los elementos necesarios para su funcionamiento en el mismo chip *FPGA*.

El objetivo principal planteado en 1.2 se cumple satisfactoriamente al lograr la implementación exitosa de todo el juego de instrucciones propuesto, esto incluye las instrucciones base, *RV32I*, de *RISC-V* y sus extensiones *M* y *F*, para el *core complex* e integrarlo en un *FPGA*, obteniéndose el *SoC* final. Gracias a esta tarea se adquiere experiencia en el diseño de procesadores, sus entornos de ejecución, las consideraciones al respecto y su implementación mediante *System Verilog*. También, se logra un mayor entendimiento del área de interés en el diseño de sistemas digitales y se exploran las posibilidades que ofrece *RISC-V* actualmente en el mercado y en la academia de primera mano al tener que analizar el *ISA* oficial, presentado en [8], para la realización del proyecto. Además, se comprueba la eficacia de abordar tareas complejas del estilo con un enfoque de diseño como lo es la metodología *Top-Down* aprendida en [10]. Por otro lado, se destaca la complejidad de la etapa de verificación de diseños digitales grandes debido a que la mayor parte del tiempo de desarrollo se invierte en dicha etapa. Finalmente, es importante mencionar la versatilidad que ofrecen las plataformas de desarrollo y prototipado basados en chips *FPGA*, como la *Nexys 4*, pues permiten testear diseños digitales directamente en *hardware* de forma bastante amigable.

La etapa de verificación es especialmente complicada en este tipo de diseños debido a: la cantidad de simulaciones y *test benches* que se deben realizar en un producto formal para asegurar su correcto funcionamiento y el tiempo invertido en la resolución de los errores hallados en el proceso de depuración. En el trabajo realizado se aplican técnicas validas de verificación (explicadas en 5.1) e inspiradas en los trabajos presentados en 2.3. Sin embargo, por las limitaciones de tiempo no se logran realizar pruebas más profundas de distintos módulos del diseño, por sobre todo, de la unidad aritmética de punto flotante que no termina de presentar un comportamiento completamente satisfactorio.

El estudio del trabajo previo de otros autores es fundamental para el éxito de desarrollos de este estilo en un tiempo razonable, pues dan una indicación clara de como abordar este tipo de desarrollos y las herramientas/metodologías existentes para ello. Luego, la revisión de trabajos específicos, como el presentado en [27], durante la etapa de diseño también juega un rol crucial pues durante esta etapa se vislumbran dificultades que no se consideran en las etapas tempranas de planteamiento.

El *SoC* obtenido resulta ser bastante limitado para una aplicación comercial/industrial real pero resulta bastante valioso, junto al contenido del presente informe, en el ámbito académico. El objetivo del trabajo es dar un punto de partida para hacer crecer este diseño inicial, por ello se busca la simplicidad de manera de reducir también la posibilidad de errores y permitir abarcar el diseño en un tiempo razonable. Como trabajo futuro, para obtener un *SoC* funcional en aplicaciones reales, se propone en primera instancia: optimizar el diseño de la *FPU* y realizar pruebas de verificación más intensivas y rigurosas, en particular se recomienda rediseñar su arquitectura utilizando mejor las bondades que ofrece *System Verilog* y considerar desde un primer momento los casos borde de números en punto flotante desnormalizados para evitar tener que duplicar el *hardware* que normaliza las mantis de entrada, tal como se comenta en 4.5.1), además de mejorar la precisión del cálculo de raíces cuadradas. Por otro lado, se puede trabajar en una implementación más compleja del entorno

de ejecución del *core complex* y agregar más funciones e interfaces de comunicación al diseño del *SoC*, tal como se propone en el primer planteamiento del diagrama de bloques de nivel superior de la figura 4.1, e integrar nuevas llamadas de sistemas acorde a las nuevas capacidades del mismo, además de añadir un *BOOT LOADER* para no tener que inicializar los diseños con el programa ya cargado directamente en las memorias internas del *core complex*: esto permitiría aprovechar las memorias externas al *FPGA* que ofrece la *Nexys 4*. Otras posibles mejoras son la integración de los módulos *CSR* (*Control and Status Register*) y *A* (*Atomic*), que permitirían integrar múltiples núcleos en el diseño. También, se pueden añadir estrategias más sofisticadas para el manejo de los *control hazards* y aumentar el nivel de paralelismo en la ejecución de programas añadiendo un esquema *multiple issue* al *core complex*. Sin mencionar las posibles mejoras en el manejo de la memoria cache al agregar un esquema asociativo, ya sea parcial o completo. Hasta se podría llegar a añadir soporte para sistemas operativos, implementando una arquitectura con privilegios. En el diseño de procesadores y sistemas digitales quedan muchas posibilidades de mejora abiertas.

Implementar un *core complex* basado en *RISC-V* es especialmente interesante actualmente y también lo es generar documentación al respecto en español, para así fomentar la investigación a nivel nacional de las posibilidades que ofrece este *ISA* libre tal como sucede a nivel mundial. Como se menciona en 1.1, en el ultimo tiempo *RISC-V* ha hecho eco de sus posibilidades, en concreto: la *European Processor Initiative* acaba de finalizar su primera versión de un procesador basado en *RISC-V* [28], la empresa *Microchip* ya tiene en producción una familia de *SoCs FPGA* con un núcleo basado en *RISC-V* integrado [29]. También, han surgido empresas dedicadas a explotar y explorar las posibilidades de esta tecnología, como: *VentanaMicro* (fundada en 2018) [30] y *SiFive* (fundada en 2015) [31], inclusive empresas con trayectoria como: *Imagination*, con más de 25 años en el mercado de la tecnología, ha puesto sus ojos en *RISC-V* [32] y *Apple* que está en búsqueda de profesionales con experiencia en *RISC-V* [33]. Esto deja en claro el impacto actual y futuro de este *ISA* y las posibilidades que ofrece al ser *hardware libre*. Por ello, es importante fomentar el desarrollo nacional en esta área y este trabajo de título busca acercar este mundo al ámbito académico nacional para poder comenzar a crear tecnología de punta localmente.

Bibliografía

- [1] E. P. DeBenedictis, "It's Time to Redefine Moore's Law Again," in Computer, vol. 50, no. 2, pp. 72–75, Feb. 2017, doi: 10.1109/MC.2017.34.
- [2] H. R. Lee, C. H. Lin, K. H. Park, W. J. Kim, and H. J. Cho, "Development of SoC virtual platform for IoT terminals based on OneM2M," Proc. - Int. SoC Des. Conf. 2017, ISOCC 2017, pp. 320–321, 2018, doi: 10.1109/ISOCC.2017.8368917.
- [3] Wei Hwang, "New trends in low power SoC design technologies," p. 422, 2004, doi: 10.1109/soc.2003.1241559.
- [4] P. Chow, "RISC-(reduced instruction set computers)," in IEEE Potentials, vol. 10, no. 3, pp. 28-31, Oct. 1991, doi: 10.1109/45.127642.
- [5] "The rise of RISC - [Opinion]," in IEEE Spectrum, vol. 55, no. 8, pp. 18-18, Aug. 2018, doi: 10.1109/MSPEC.2018.8423577.
- [6] S. M. S. Trimberger, "Three Ages of FPGAs: A Retrospective on the First Thirty Years of FPGA Technology: This Paper Reflects on How Moore's Law Has Driven the Design of FPGAs Through Three Epochs: the Age of Invention, the Age of Expansion, and the Age of Accumulation," in IEEE Solid-State Circuits Magazine, vol. 10, no. 2, pp. 16-29, Spring 2018, doi: 10.1109/MSSC.2018.2822862.
- [7] V. Chamola, S. Patra, N. Kumar, and M. Guizani, "FPGA for 5G: Re-configurable hardware for next generation communication," IEEE Wirel. Commun., vol. 27, no. 3, pp. 140–147, 2020, doi: 10.1109/MWC.001.1900359.
- [8] A. Waterman and K. Asanovic, "The RISC-V Instruction Set Manual Volume I: Unprivileged ISA - Document Version 20191213," RISC-V Found., vol. I, 2019.
- [9] "Sistemas Digitales" notas de clases para EL4002-1, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Otoño 2018.
- [10] "Seminario de Sistemas Digitales" notas de clases para EL7039-1, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Primavera 2019.
- [11] "Arquitectura de Computadores" notas de clases para EL4102-1, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile, Primavera 2018.
- [12] D. A. Patterson and J. L. Hennessy, "Computer Organization and Design, The Hardware Software/Interface: RISC-V Edition". Cambridge, Estados Unidos: Morgan Kaufmann, 2018.
- [13] "IEEE Standard for Floating-Point Arithmetic,- in IEEE Std 754-2008" , vol., no., pp.1-70, 29 Aug. 2008, doi: 10.1109/IEEEESTD.2008.4610935.
- [14] V. Ii, P. Architecture, D. Version, A. Waterman, K. Asanovi, and C. S. Division, "The RISC-V Instruction Set Manual, Volume II: Privileged Architecture, Document Version 1.12-draft," vol. II, p. 135, 2019, [Online]. Available: <https://github.com/riscv/riscv-isa-manual/releases/download/draft-20200727-8088ba4/riscv-privileged.pdf>.

- [15] A. Raveendran, V. B. Patil, D. Selvakumar and V. Desalpchine, “A RISC-V instruction set processor-micro-architecture design and analysis,” 2016 International Conference on VLSI Systems, Architectures, Technology and Applications (VLSI-SATA), Bangalore, 2016, pp. 1-7, doi: 10.1109/VLSI-SATA.2016.7593047.
- [16] R. Höller, D. Haselberger, D. Ballek, P. Rössler, M. Krapfenbauer and M. Linauer, “Open-Source RISC-V Processor IP Cores for FPGAs — Overview and Evaluation,” 2019 8th Mediterranean Conference on Embedded Computing (MECO), Budva, Montenegro, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/MECO.2019.8760205.
- [17] H. Eassa, I. Adly and H. H. Issa, “RISC-V based implementation of Programmable Logic Controller on FPGA for Industry 4.0,” 2019 31st International Conference on Microelectronics (ICM), Cairo, Egypt, 2019, pp. 98-102, doi: 10.1109/ICM48031.2019.9021939.
- [18] A. Oleksiak, S. Cieślak, K. Marcinek and W. A. Pleskacz, “Design and Verification Environment for RISC-V Processor Cores,” 2019 MIXDES - 26th International Conference ‘Mixed Design of Integrated Circuits and Systems’, Rzeszów, Poland, 2019, pp. 206-209, doi: 10.23919/MIXDES.2019.8787108.
- [19] Beaulieu, L., Weppe, O., Le Ludec, B., & Lebeau, F. (2018). “Co-verification design flow for HDL languages: A complete development methodology”. ICECS 2017 - 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, 2018-Janua, 530–533. <https://doi.org/10.1109/ICECS.2017.8292096>
- [20] “SiFive HiFive1 Rev B Getting Started Guide Version 1.2” 2021. https://starfivetech.com/uploads/hifive1b-getting-started-guide_v1.2.pdf
- [21] “SiFive FE310-G002 Preliminary Datasheet”. (n.d.). <https://cdn.sparkfun.com/assets/5/b/e/6/2/fe310-g002-ds.pdf>.
- [22] SiFive. (n.d.). “SiFive FE310-G002 Manual”. https://sifive.cdn.prismic.io/sifive%2F59a1f74e-d918-41c5-b837-3fe01ba7eaa1_fe310-g002-manual-v19p05.pdf.
- [23] “Nexys 4™ FPGA Board Reference Manual”, Digilent, 1300 Henley Court. April 11, 2016. [Online]. <https://digilent.com/reference/programmable-logic/nexys-4/reference-manual>.
- [24] Xilinx, “Vivado Design Suite”, 2021. [Online]. <https://www.xilinx.com/products/design-tools/vivado.html>.
- [25] P. Sanderson, K. Vollmar (2021) “RARS – RISC-V Assembler and Runtime Simulator” [Código fuente]. <https://github.com/TheThirdOne/rars>.
- [26] “IEEE Standard for SystemVerilog—Unified Hardware Design, Specification, and Verification Language,” in IEEE Std 1800-2017 (Revision of IEEE Std 1800-2012) , vol., no., pp.1-1315, 22 Feb. 2018, doi: 10.1109/IEEEESTD.2018.8299595.
- [27] A. Hasnat, T. Bhattacharyya, A. Dey, S. Halder and D. Bhattacharjee, “A fast FPGA based architecture for computation of square root and Inverse Square Root,” 2017 Devices for Integrated Circuit (DevIC), 2017, pp. 383-387, doi: 10.1109/DEVIC.2017.8073975.
- [28] European Processor Initiative. (2021, Septiembre 22) “EPI EPAC1.0 RISC-V Test Chip Samples Delivered” [Online]. Available: <https://www.european-processor-initiative.eu/epi-epac1-0-risc-v-test-chip-samples-delivered/>
- [29] Microchip “MPFS250T Mid range, low power, with hard RISC-V based” [Online]. Available: <https://www.microchip.com/en-us/product/MPFS250T>
- [30] Ventana Micro “RISC-V Performance Leader Delivering A Family of Data Center Class CPU Cores” [Online]. Available: <https://www.ventanamicro.com/#about>

- [31] SiFive “Leading the RISC-V revolution” [Online]. Available: <https://www.sifive.com>
- [32] D. Harold, J. Jones. (2021, Febrero 22) “Imagination’s GPU selected by StarFive to create high-performance, small and low-cost BeagleV RISC-V AI single board computer” [Online]. Available: <https://www.imaginationtech.com/news/press-release/imaginations-gpu-selected-by-starfive-to-create-high-performance-small-and-low-cost-beaglev-risc-v-ai-single-board-computer/>
- [33] Apple (2021, Septiembre 2) “RISC-V High Performance Programmer” [Online]. Available: <https://jobs.apple.com/es-cl/details/200282667/risc-v-high-performance-programmer>

1 ANEXO: Código fuente del *SoC*

En esta sección se presentan todos los archivos del código fuente del *SoC* diseñado:

TOP.sv: Archivo que contiene el módulo *top* del diseño completo. Note que en las líneas 212 y 213 se comenta el *core complex Single-Cycle* y se deja como predeterminado el *core complex Pipelined*, pero ambos son compatibles.

```
1  /*
2  autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3  Santiago de Chile, Septiembre 2021
4  */
5  'timescale 1ns / 1ps
6 // set_param pwropt.maxFaninFanoutToNetRatio 1000
7 module TOP(
8     input clk, rst_asin, start_asin, resume_asin, // rst, start, resume deben ser pulsadores (
9         ↪ OJO, en todo el resto del diseño start se comporta de otra forma)
10    input [15:0] in,
11    output [5:0] color_leds,
12    output [15:0] leds, display
13 );
14 typedef enum {
15     waiting_state,
16     final_state_error_prog, final_state_error_data, start_cpu_state,
17     ebreak_state, ecall_state, ecall_default_state,
18     ecall_print_integer_state, ecall_print_fp_state,
19     ecall_get_integer_state_1, ecall_get_integer_state_2, ecall_get_integer_state_3,
20     ecall_get_fp_state_1, ecall_get_fp_state_2, ecall_get_fp_state_3,
21     final_state
22 } state_type;
23 state_type actual_state, next_state;
24 reg rst_PC, set_PC, set_first_input_half, set_second_input_half,
25     start_to_cpu, sel_info_out, enable_info_out,
26     acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI, rst_riscv;
27 reg [3:0] info_state;
28 reg [1:0] input_indicator;
29 /*
30     input_indicator =
31         00 o 11 - no input indicator
32         01 - first half indicator
33         10 - second half indicator
34     exit_status[1:0] =
35         00 -> ecall (se lee registro x17 y según eso se toma decisión)
36         11 -> ebreak (pausa ejecución)
37         01 -> program out of range
38         10 -> memory out of range
39 */
40 wire ready, prog_ready_toEEI, prog_out_of_range_toEEI, data_ready_toEEI,
41     ↪ data_out_of_range_toEEI, rst, start, resume;
42 wire [1:0] exit_status;
43 wire [15:0] second_input_half, first_input_half;
44 wire [31:0] prog_out_toEEI, data_out_toEEI, rs1_toEEI, rs2_toEEI, PC, PC_reg,
```

```

    ↵ info_out, input_from_user;
43 assign info_out = enable_info_out ? (sel_info_out ? rs2_toEEI : PC_reg) : 32'b0;
44 assign input_from_user = {second_input_half, first_input_half};
45 assign leds = (input_indicator[1]^input_indicator[0]) ? in : 16'b0;
46 // color_leds_decoder
47 assign color_leds = (input_indicator==2'b01 & info_state==4'h8) ? 6'b000_101 : //
    ↵ get integer (PURPLE)
        ((input_indicator==2'b10 & info_state==4'h8) ? 6'b101_000 : // get
    ↵ integer (PURPLE)
        ((input_indicator==2'b01 & info_state==4'h9) ? 6'b000_110 : // get fp (
    ↵ YELLOW)
        ((input_indicator==2'b10 & info_state==4'h9) ? 6'b110_000 : // get fp (
    ↵ YELLOW)
        ((info_state==4'h0) ? 6'b001_001 : // A -> --B|--B = BLUE - waiting
    ↵ state
        ((info_state==4'h2) ? 6'b011_011 : // B -> -GB|-GB = CYAN - cpu
    ↵ working
        ((info_state==4'h3) ? 6'b111_111 : // C -> RGB|RGB = WHITE - -
    ↵ ebreak
        ((info_state==4'h4) ? 6'b100_001 : // D -> R--|--B = RED/BLUE - prog
    ↵ error
        ((info_state==4'h5) ? 6'b001_100 : // E -> --B|R-- = BLUE/RED - data
    ↵ error
        ((info_state==4'h6) ? 6'b101_101 : // F -> R-B|R-B = PURPLE - print
    ↵ integer
        ((info_state==4'h7) ? 6'b110_110 : // G -> RG-|RG- = YELLOW - -
    ↵ print fp
        ((info_state==4'h8) ? 6'b000_000 : // H -> ---|--- = NO COLOR - get
    ↵ integer
        ((info_state==4'h9) ? 6'b000_000 : // I -> ---|--- = NO COLOR - get fp
        ((info_state==4'hA) ? 6'b010_010 : // J -> -G-|-G- = GREEN - final
    ↵ state
        ((info_state==4'hB) ? 6'b100_100 : // K -> R--|R-- = RED - ecall
    ↵ default
        6'b000_000)))))))))); //rgb_rgb
62 // FSM controller
63 always_ff @(posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;
64 always_comb
65     case (actual_state)
66         default: begin
67             {input_indicator, info_state}           = 6'b00_0000; // A
68             {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
69             {sel_info_out, enable_info_out}          = 2'b00;
70             {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b000;
71             {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}   = 4'b00_00;
72             next_state = actual_state;
73         end
74     waiting_state: begin
75         {input_indicator, info_state}           = 6'b00_0000; // A
76         {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
77         {sel_info_out, enable_info_out}          = 2'b00;
78         {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b000;
79     end

```

```

80   {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}      = 4'b10_01;
81   next_state = start ? start_cpu_state : waiting_state;
82 end
83 start_cpu_state: begin
84   {input_indicator, info_state}                  = 6'b00_0010; // B
85   {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
86   {sel_info_out, enable_info_out}              = 2'b00;
87   {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b000;
88   {rst_riscv, start_to_cpu, rst_PC} = 3'b01_0; set_PC = ready;
89   next_state = ready ? ((exit_status == 2'b11) ? ebreak_state :
90                         ((exit_status == 2'b01) ? final_state_error_prog :
91                          ((exit_status == 2'b10) ? final_state_error_data :
92                            ecall_state))) : start_cpu_state;
93 end
94 ebreak_state: begin
95   {input_indicator, info_state}                  = 6'b00_0011; // C
96   {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
97   {sel_info_out, enable_info_out}              = 2'b01;
98   {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b000;
99   {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}     = {resume, 3'b0_00};
100  next_state = resume ? start_cpu_state : ebreak_state;
101 end
102 final_state_error_prog: begin
103   {input_indicator, info_state}                  = 6'b00_0100; // D
104   {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
105   {sel_info_out, enable_info_out}              = 2'b01;
106   {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b000;
107   {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}     = 4'b00_00;
108   next_state = resume ? waiting_state : final_state_error_prog;
109 end
110 final_state_error_data: begin
111   {input_indicator, info_state}                  = 6'b00_0101; // E
112   {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
113   {sel_info_out, enable_info_out}              = 2'b01;
114   {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b000;
115   {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}     = 4'b00_00;
116   next_state = resume ? waiting_state : final_state_error_data;
117 end
118 ecall_print_integer_state: begin
119   {input_indicator, info_state}                  = 6'b00_0110; // F
120   {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
121   {sel_info_out, enable_info_out}              = 2'b11;
122   {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b100;
123   {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}     = {resume, 3'b0_00};
124   next_state = resume ? start_cpu_state : ecall_print_integer_state;
125 end
126 ecall_print_fp_state: begin
127   {input_indicator, info_state}                  = 6'b00_0111; // G
128   {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
129   {sel_info_out, enable_info_out}              = 2'b11;
130   {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b110;
131   {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}     = {resume, 3'b0_00};

```

```

132     next_state = resume ? start_cpu_state : ecall_print_fp_state;
133 end
134 ecall_get_integer_state_1: begin
135     {input_indicator, info_state}          = 6'b01_1000; // H
136     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b10;
137     {sel_info_out, enable_info_out}        = 2'b00;
138     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b100;
139     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}    = 4'b00_00;
140     next_state = start ? ecall_get_integer_state_2 : ecall_get_integer_state_1;
141 end
142 ecall_get_integer_state_2: begin
143     {input_indicator, info_state}          = 6'b10_1000; // H
144     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b01;
145     {sel_info_out, enable_info_out}        = 2'b00;
146     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b100;
147     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}    = 4'b00_00;
148     next_state = resume ? ecall_get_integer_state_3 : ecall_get_integer_state_2;
149 end
150 ecall_get_integer_state_3: begin
151     {input_indicator, info_state}          = 6'b00_1000; // H
152     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
153     {sel_info_out, enable_info_out}        = 2'b00;
154     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b101;
155     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}    = 4'b10_00;
156     next_state = start_cpu_state;
157 end
158 ecall_get_fp_state_1: begin
159     {input_indicator, info_state}          = 6'b01_1001; // I
160     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b10;
161     {sel_info_out, enable_info_out}        = 2'b00;
162     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b110;
163     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}    = 4'b00_00;
164     next_state = start ? ecall_get_fp_state_2 : ecall_get_fp_state_1;
165 end
166 ecall_get_fp_state_2: begin
167     {input_indicator, info_state}          = 6'b10_1001; // I
168     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b01;
169     {sel_info_out, enable_info_out}        = 2'b00;
170     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b110;
171     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}    = 4'b00_00;
172     next_state = resume ? ecall_get_fp_state_3 : ecall_get_fp_state_2;
173 end
174 ecall_get_fp_state_3: begin
175     {input_indicator, info_state}          = 6'b00_1001; // I
176     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
177     {sel_info_out, enable_info_out}        = 2'b00;
178     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b111;
179     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC}    = 4'b10_00;
180     next_state = start_cpu_state;
181 end
182 final_state: begin
183     {input_indicator, info_state}          = 6'b00_1010; // J

```

```

184     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
185     {sel_info_out, enable_info_out} = 2'b01;
186     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b000;
187     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC} = 4'b00_00;
188     next_state = resume ? waiting_state : final_state;
189   end
190   ecall_state: begin
191     {input_indicator, info_state} = 6'b00_1011; // K
192     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
193     {sel_info_out, enable_info_out} = 2'b00;
194     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b100;
195     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC} = 4'b00_00;
196     next_state = (rs1_toEEI==31'b01010) ? final_state :
197       ((rs1_toEEI==31'b00001) ? ecall_print_integer_state :
198       ((rs1_toEEI==31'b00010) ? ecall_print_fp_state :
199       ((rs1_toEEI==31'b00101) ? ecall_get_integer_state_1 :
200       ((rs1_toEEI==31'b00110) ? ecall_get_fp_state_1 :
201         ecall_default_state)));
202   end
203   ecall_default_state: begin
204     {input_indicator, info_state} = 6'b00_1011; // K
205     {set_first_input_half, set_second_input_half} = 2'b00;
206     {sel_info_out, enable_info_out} = 2'b01;
207     {acces_to_registers_files, is_fp, do_wb_fromEEI} = 3'b000;
208     {rst_riscv, start_to_cpu, set_PC, rst_PC} = {resume, 3'b0_00};
209     next_state = resume ? start_cpu_state : ecall_default_state;
210   end
211 endcase
212 //riscv32imf_singlecycle
213 riscv32imf_pipeline
214 riscv32imf(
215   // inputs
216   .clk(clk), .rst(rst | rst_riscv), .start(start_to_cpu), .acces_to_registers_files(
217     ↪ acces_to_registers_files),
218   .is_wb_data_fp_fromEEI(is_fp), .do_wb_fromEEI(do_wb_fromEEI),
219   .is_rs1_fp_fromEEI(1'b0), .is_rs2_fp_fromEEI(is_fp),
220   .acces_to_prog_mem(1'b0), .prog_rw_fromEEI(1'b0),
221   .prog_valid_mem_fromEEI(1'b0), .prog_is_load_unsigned_fromEEI(1'b0),
222   .acces_to_data_mem(1'b0), .data_rw_fromEEI(1'b0),
223   .data_valid_mem_fromEEI(1'b0), .data_is_load_unsigned_fromEEI(1'b0),
224   .initial_PC(PC_reg),
225   .prog_addr_fromEEI(32'b0), .prog_in_fromEEI(32'b0),
226   .data_addr_fromEEI(32'b0), .data_in_fromEEI(32'b0),
227   .wb_data_fromEEI(input_from_user),
228   .prog_byte_half_word_fromEEI(2'b00), .data_byte_half_word_fromEEI(2'b00),
229   .rs1_add_fromEEI(5'b10001), .rs2_add_fromEEI(5'b01010), .wb_add_fromEEI(5'
230     ↪ b01010),
231   // outputs
232   .ready(ready),
233   .prog_ready_toEEI(prog_ready_toEEI), .prog_out_of_range_toEEI(
234     ↪ prog_out_of_range_toEEI),
235   .data_ready_toEEI(data_ready_toEEI), .data_out_of_range_toEEI(

```

```

233     ↪ data_out_of_range_toEEI),
234     .exit_status(exit_status),
235     .prog_out_toEEI(prog_out_toEEI), .data_out_toEEI(data_out_toEEI), .rs1_toEEI(
236     ↪ rs1_toEEI), .rs2_toEEI(rs2_toEEI), .PC(PC)
237 );
238 generic_register #(.width(32)) PC_in_reg(
239     .clk(clk), .reset(rst_PC), .load(set_PC), .data_in(PC+32'b100),
240     .data_out(PC_reg)
241 );
242 generic_register #(.width(16)) first_input_half_reg(
243     .clk(clk), .reset(1'b0), .load(set_first_input_half), .data_in(in),
244     .data_out(first_input_half)
245 );
246 generic_register #(.width(16)) second_input_half_reg(
247     .clk(clk), .reset(1'b0), .load(set_second_input_half), .data_in(in),
248     .data_out(second_input_half)
249 );
250 debounce rst_debounce (.clk(clk), .signal_in(~rst_asin), .signal_out(rst));
251 debounce start_debounce (.clk(clk), .signal_in(start_asin), .signal_out(start));
252 debounce resume_debounce(.clk(clk), .signal_in(resume_asin), .signal_out(resume));
253 full_display full_display_unit(
254     .clk(clk), .enable( (input_indicator[1]^input_indicator[0]) | enable_info_out ),
255     .show_options(input_indicator), .in( (input_indicator[1]^input_indicator[0]) ? {in, in}
256     ↪ : info_out ),
257     .out(display)
258 );
259 endmodule
260
261 module generic_register #(parameter width=32)(
262     input clk, reset, load,
263     input [width-1:0] data_in,
264     output reg[width-1:0] data_out
265 );
266     always_ff @ (negedge clk) data_out <= load ? data_in : (reset ? 0 : data_out);
267 endmodule
268
269 module debounce(input clk, signal_in, output reg signal_out);
270     typedef enum {
271         waiting_state, counter_state, hold_state, response_state
272     } state_type;
273     state_type actual_state, next_state;
274     reg signal_in_sync, start_counter, counter_ready;
275     reg [15:0] counter;
276     always_ff @ (posedge clk) {signal_in_sync, actual_state} <= {signal_in, next_state}; // 
277     ↪ Señal de entrada sincronizada y actualización de estado
278     always_ff @ (posedge clk) // debounce counter
279         if(start_counter) {counter, counter_ready} <= {counter + 16'b1, (counter == 16'
280         ↪ hFFFF) ? 1'b1 : 1'b0};
281         else           {counter, counter_ready} <= 17'b0;
282     always_comb // FSM controller
283         case (actual_state)
284             default: begin

```

```

280     {start_counter, signal_out} = 2'b00;
281     next_state = actual_state;
282   end
283   waiting_state: begin
284     {start_counter, signal_out} = 2'b00;
285     next_state = signal_in_sync ? counter_state : waiting_state;
286   end
287   counter_state: begin
288     {start_counter, signal_out} = 2'b10;
289     next_state = signal_in_sync ? (counter_ready ? hold_state : counter_state) :
290     ↪ waiting_state;
291   end
292   hold_state: begin
293     {start_counter, signal_out} = 2'b00;
294     next_state = signal_in_sync ? hold_state : response_state;
295   end
296   response_state: begin
297     {start_counter, signal_out} = 2'b01;
298     next_state = waiting_state;
299   end
300 endcase
301 endmodule
302
303 module full_display(
304   input clk, enable,
305   input [1:0] show_options,
306   input [31:0] in,
307   output [15:0] out // enable7, enable6, enable5, enable4, enable3, enable2, enable1, enable0
308   ↪ , CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
309 );
310 /*
311   show_options =
312     00 o 11 -> full: 8 bytes
313     01      -> half: first 4 bytes
314     10      -> half: last 4 bytes
315 */
316 reg [2:0] select;
317 reg [15:0] counter;
318 wire show_first_half, show_last_half;
319 wire [7:0] character0, character1, character2, character3, character4, character5, character6
320   ↪ , character7;
321 assign {show_first_half, show_last_half} = {(show_options==2'b10) ? 1'b0 : 1'b1, (
322   ↪ show_options==2'b01) ? 1'b0 : 1'b1};
323 assign out = enable ?
324   ((select==3'h0) ? {show_first_half ? 8'b11111110 : 8'hFF, character0} :
325     ((select==3'h1) ? {show_first_half ? 8'b11111101 : 8'hFF, character1} :
326       ((select==3'h2) ? {show_first_half ? 8'b11111011 : 8'hFF, character2} :
327         ((select==3'h3) ? {show_first_half ? 8'b11110111 : 8'hFF, character3} :
328           ((select==3'h4) ? {show_last_half ? 8'b11101111 : 8'hFF, character4} :
329             ((select==3'h5) ? {show_last_half ? 8'b11011111 : 8'hFF, character5} :
330               ((select==3'h6) ? {show_last_half ? 8'b10111111 : 8'hFF, character6} :
331                 ((select==3'h7) ? {show_last_half ? 8'b01111111 : 8'hFF, character7} :
```

```

328             16'hFFFF)))))) : 16'hFFF;
329     always_ff @(posedge clk)
330         if(enable) begin
331             if(counter==16'hFFFF) {select, counter} = { unsigned'(select)+3'b1, 16'b0 };
332             else {select, counter} = { select, unsigned'(counter)+16'b1 };
333         end
334         else {select, counter} = 0;
335     display_character display_character_unit0(
336         .in(in[ 3: 0]), .out(character0) // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
337     );
338     display_character display_character_unit1(
339         .in(in[ 7: 4]), .out(character1) // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
340     );
341     display_character display_character_unit2(
342         .in(in[11: 8]), .out(character2) // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
343     );
344     display_character display_character_unit3(
345         .in(in[15:12]), .out(character3) // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
346     );
347     display_character display_character_unit4(
348         .in(in[19:16]), .out(character4) // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
349     );
350     display_character display_character_unit5(
351         .in(in[23:20]), .out(character5) // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
352     );
353     display_character display_character_unit6(
354         .in(in[27:24]), .out(character6) // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
355     );
356     display_character display_character_unit7(
357         .in(in[31:28]), .out(character7) // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
358     );
359 endmodule
360
361 module display_character(
362     input [3:0] in,
363     output [7:0] out // CA, CB, CC, CD, CE, CF, CG, DP
364 ); // Dot On (0 lógico) => letra | Dot Off (1 lógico) => número
365 assign out = (in==4'h0) ? 8'b00000011 : // 0
366     ((in==4'h1) ? 8'b10011111 : // 1
367     ((in==4'h2) ? 8'b00100101 : // 2
368     ((in==4'h3) ? 8'b00001101 : // 3
369     ((in==4'h4) ? 8'b10011001 : // 4
370     ((in==4'h5) ? 8'b01001001 : // 5
371     ((in==4'h6) ? 8'b01000001 : // 6
372     ((in==4'h7) ? 8'b00011111 : // 7
373     ((in==4'h8) ? 8'b00000001 : // 8
374     ((in==4'h9) ? 8'b00001001 : // 9
375     ((in==4'hA) ? 8'b00010000 : // A
376     ((in==4'hB) ? 8'b00000000 : // B
377     ((in==4'hC) ? 8'b01100010 : // C
378     ((in==4'hD) ? 8'b00000010 : // D
379     ((in==4'hE) ? 8'b01100000 : // E

```

```

380      ((in==4'hF) ? 8'b01110000 : // F
381          7'b1111111)))))))))); // default
382 endmodule

```

riscv32imf_singlecycle.sv: Archivo *top* del *core complex Single-Cycle*.

```

1  /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4 */
5 'timescale 1ns / 1ps
6
7 module riscv32imf_singlecycle(
8     input clk, rst, start, acces_to_registers_files, is_wb_data_fp_fromEEI, do_wb_fromEEI
9         , is_rs1_fp_fromEEI, is_rs2_fp_fromEEI,
10    input acces_to_prog_mem, prog_rw_fromEEI, prog_valid_mem_fromEEI,
11        prog_is_load_unsigned_fromEEI,
12    input acces_to_data_mem, data_rw_fromEEI, data_valid_mem_fromEEI,
13        data_is_load_unsigned_fromEEI,
14    input [31:0] initial_PC, prog_addr_fromEEI, prog_in_fromEEI, data_addr_fromEEI,
15        data_in_fromEEI, wb_data_fromEEI,
16    input [1:0] prog_byte_half_word_fromEEI, data_byte_half_word_fromEEI,
17    input [4:0] rs1_add_fromEEI, rs2_add_fromEEI, wb_add_fromEEI,
18    output prog_ready_toEEI, prog_out_of_range_toEEI, data_ready_toEEI,
19        data_out_of_range_toEEI,
20    output reg ready,
21    output reg [1:0] exit_status,
22    output [31:0] prog_out_toEEI, data_out_toEEI, rs1_toEEI, rs2_toEEI, PC
23 /*
24     exit_status[1:0] =
25         00 -> ecall
26         11 -> ebreak
27         01 -> program out of range or not valid inst
28         10 -> memory out of range
29 */
30 );
31 typedef enum {
32     waiting_state,
33     initial_state,
34     program_loop_main,
35     program_loop_fpu,
36     program_loop_mem,
37     program_loop_new_pc_wb,
38     program_loop_read_inst,
39     final_state
40 } state_type;
41 state_type actual_state, next_state;
42 // Controller signals
43 reg is_the_beginning, valid_prog_mem, valid_data_mem, start_fpu, set_pc, set_inst,
44     , do_wb;
45 wire ready_fpu, ready_prog_mem, out_of_range_prog_mem, ready_data_mem,
46     , out_of_range_data_mem, is_ecall, is_ebreak, acces_to_fpu, acces_to_mem,

```

```

    ↪ not_valid;
// Datapath signals
41 wire is_imm_valid, branch_condition, rw_data_mem, is_load_unsigned_data_mem;
42 wire [4:0] rs1_add, rs2_add, rs3_add, rd_add, alu_option, fpu_option, ignored_flags;
43 wire [3:0] funct7_out;
44 wire [2:0] format_type, sub_format_type, funct3, rm2fpu;
45 wire [1:0] reg_access_option, byte_half_word_data_mem, funct2;
46 wire [31:0] jalr_pc, inst, inst2reg, PC2reg, imm, rs2, rs3, rd, operand1, operand2,
   ↪ operand3, res_alu, res_fpu, EX_out, data_out_data_mem, next_PC;
47 // interface con EEI
48 assign {prog_ready_toEEI, prog_out_of_range_toEEI, prog_out_toEEI} = {
   ↪ ready_prog_mem, out_of_range_prog_mem, inst2reg};
49 assign {data_ready_toEEI, data_out_of_range_toEEI, data_out_toEEI} = {
   ↪ ready_data_mem, out_of_range_data_mem, data_out_data_mem};
50 assign {rs1_toEEI, rs2_toEEI} = {operand1, rs2};
51 // PC predictor
52 assign PC2reg = is_the_beginning ? initial_PC : next_PC;
53 // mux for operand2
54 assign operand2 = is_imm_valid ? imm : rs2;
55 // mux for operand3
56 assign operand3 = (is_imm_valid & (format_type==3'b011 | format_type==3'b100)) ?
   ↪ rs2 : rs3;
57 // data_mem_options_selection
58 assign rw_data_mem = (format_type==3'b011) ? 1'b1 : 1'b0; // only 1 in S type
   ↪ instruction
59 assign is_load_unsigned_data_mem = (format_type==3'b010 & funct3[2:1]==2'b10) ?
   ↪ 1'b1 : 1'b0; // only 1 in I type instruction and funct3= 4 o 5
60 assign byte_half_word_data_mem = (funct3[1:0]==2'b00) ? 2'b10 : // funct3= 0 o 4 -
   ↪ byte
   ((funct3[1:0]==2'b01) ? 2'b01 : // funct3= 1 o 5 -half
   2'b00); // funct3= 2 -word (default)
61 // next_PC_selection
62 assign jalr_pc = operand1+operand2;
63 assign next_PC = ({format_type, branch_condition}==4'b100_1 | format_type==3'
   ↪ b110) ? PC+operand2 : // B | J
   (({format_type, sub_format_type}==6'b010_011) ? {jalr_pc
   ↪ [31:1], 1'b0} : // I (jalr)
   PC+32'b100); // Deafault
64 // final_alu_fpu_res_selection
65 assign EX_out = (({format_type, sub_format_type}==6'b000_000 & {funct7_out,
   ↪ funct3}!=7'b1011_000 & {funct7_out, funct3}!=7'b1100_000) | // se excluyen fmv.x
   ↪ .w y fmv.w.x
   format_type==3'b001) ? res_fpu : // R
   ↪ (fp) o R4
   (({format_type, sub_format_type}==6'b000_000 & (funct7_out==4'b1011
   ↪ | funct7_out==4'b1100)) ? operand1 : // fmv.x.w y fmv.w.x
   (({format_type, sub_format_type}==6'b010_011 | format_type==3'b110) ?
   ↪ PC+32'b100 : // I (jalr) o J
   ((format_type==3'b101) ? (operand2 + (sub_format_type[0] ? PC : 32'
   ↪ b0) ) : // U
   res_alu)); // default

```

```

75 // mux rd
76 assign rd = (format_type==3'b010 & ~sub_format_type[2] & ~sub_format_type[0]) ?
    ↪ data_out_data_mem : EX_out;
77 // sub_decoder
78 assign is_ecall = (format_type==3'b010 & sub_format_type==3'b100 & operand2
    ↪ ==32'b0) ? 1'b1 : 1'b0;
79 assign is_ebreak = (format_type==3'b010 & sub_format_type==3'b100 & operand2
    ↪ ==32'b1) ? 1'b1 : 1'b0;
80 assign acces_to_fpu =
81     format_type==3'b001 | ( // R4
82         {format_type, sub_format_type}==6'b0 & {funct7_out, funct3}!=7'b1011_000 &
83         ↪ {funct7_out, funct3}!=7'b1100_000 ) // R (fp) - {fmv.x.w, fmv.w.x}
84     ) ? 1'b1 : 1'b0;
85 assign acces_to_mem = (format_type==3'b011 | (format_type==3'b010 &
86     ↪ sub_format_type[2] & ~sub_format_type[0])) ? 1'b1 : 1'b0;
87 assign not_valid = format_type==3'b111 ? 1'b1 : 1'b0;
88 // FSM controller
89 always_ff @(posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;
90 always_comb
91     case (actual_state)
92         default: begin           // dafault
93             {set_pc, set_inst, do_wb}      = 3'b000;
94             {is_the_beginning, start_fpu} = 2'b00;
95             {valid_prog_mem, valid_data_mem} = 2'b00;
96             {ready, exit_status}        = 3'b000;
97             next_state = actual_state;
98         end
99         waiting_state: begin          // se espera señal de inicio "start"
100             {set_pc, set_inst, do_wb}      = 3'b000;
101             {is_the_beginning, start_fpu} = 2'b00;
102             {valid_prog_mem, valid_data_mem} = 2'b00;
103             {ready, exit_status}        = 3'b000;
104             next_state = start ? initial_state : waiting_state;
105         end
106         initial_state: begin          // se setea PC
107             {set_pc, set_inst, do_wb}      = 3'b100;
108             {is_the_beginning, start_fpu} = 2'b10;
109             {valid_prog_mem, valid_data_mem} = 2'b00;
110             {ready, exit_status}        = 3'b000;
111             next_state = program_loop_read_inst;
112         end
113         program_loop_read_inst: begin // se lee nueva instrucción
114             {set_pc, set_inst, do_wb}      = 3'b010;
115             {is_the_beginning, start_fpu} = 2'b00;
116             {valid_prog_mem, valid_data_mem} = 2'b10;
117             {ready, exit_status}        = 3'b000;
118             next_state = out_of_range_prog_mem ? final_state : (ready_prog_mem ?
119             ↪ program_loop_main : program_loop_read_inst);
120         end
121         program_loop_main: begin      // se setea y decodifica instrucción
122             {set_pc, set_inst, do_wb}      = 3'b000;
123             {is_the_beginning, start_fpu} = 2'b00;

```

```

121     {valid_prog_mem, valid_data_mem} = 2'b00;
122     {ready, exit_status}          = 3'b000;
123     next_state = (is_ecall | is_ebreak | not_valid) ? final_state :
124                                     (acces_to_fpu ? program_loop_fpu :
125                                     (acces_to_mem ? program_loop_mem :
126                                       → program_loop_new_pc_wb));
127   end
128   program_loop_fpu: begin      // se espera FPU
129     {set_pc, set_inst, do_wb}    = 3'b000;
130     {is_the_beginning, start_fpu} = 2'b01;
131     {valid_prog_mem, valid_data_mem} = 2'b00;
132     {ready, exit_status}          = 3'b000;
133     next_state = ready_fpu ? program_loop_new_pc_wb : program_loop_fpu;
134   end
135   program_loop_mem: begin      // se espera mem
136     {set_pc, set_inst, do_wb}    = 3'b000;
137     {is_the_beginning, start_fpu} = 2'b00;
138     {valid_prog_mem, valid_data_mem} = 2'b01;
139     {ready, exit_status}          = 3'b000;
140     next_state = out_of_range_data_mem ? final_state : (ready_data_mem ?
141       → program_loop_new_pc_wb : program_loop_mem);
142   end
143   program_loop_new_pc_wb: begin // se setea new PC y realiza wb
144     {set_pc, set_inst, do_wb}    = 3'b101;
145     {is_the_beginning, valid_prog_mem} = 2'b0;
146     start_fpu      = acces_to_fpu ? 1'b1 : 1'b0;
147     valid_data_mem = acces_to_mem ? 1'b1 : 1'b0;
148     {ready, exit_status}          = 3'b000;
149     next_state = program_loop_read_inst;
150   end
151   final_state: begin           // se finaliza ejecución
152     {set_pc, set_inst, do_wb}    = 3'b000;
153     {is_the_beginning, start_fpu} = 2'b00;
154     {valid_prog_mem, valid_data_mem} = 2'b00;
155     ready = 1'b1;
156     exit_status = is_ecall
157       ? 2'b00 : // 00 -> ecall
158       ( is_ebreak
159         ? 2'b11 : // 11 -> ebreak
160         ( (out_of_range_prog_mem | not_valid) ? 2'b01 : // 01 -> program
161           → out of range or not valid
162             ( out_of_range_data_mem
163               ? 2'b10 : // 10 -> memory out
164             → of range
165               2'b00 ));
166             next_state = start ? final_state : waiting_state;
167           end
168         endcase
169       generic_register #(width(32)) pc_register(
170         .clk(clk), .reset(rst), .load(set_pc), .data_in(PC2reg),
171         .data_out(PC)
172       );
173       generic_register #(width(32)) inst_register(
174         .clk(clk), .reset(rst), .load(set_inst), .data_in(inst2reg),
175         .data_out(inst)
176     );

```

```

169 );
170 // prog_memory
171 memory #(.initial_option(2)) prog_memory_unit(
172     .clk(clk), .rst(1'b0),
173     // inputs
174     .rw(      (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_rw_fromEEI      : 1'b0),
175     .valid(   (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_valid_mem_fromEEI : 1'b0,
176             ↳ valid_prog_mem),
177     .addr(    (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_addr_fromEEI      : PC),
178     .data_in( (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_in_fromEEI       : 32'b0
179             ↳ ),
180     .byte_half_word( (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_byte_half_word_fromEEI
181             ↳ : 2'b0),
182     .is_load_unsigned((acces_to_prog_mem & ~start) ?
183             ↳ prog_is_load_unsigned_fromEEI : 1'b1),
184     // outputs
185     .ready(ready_prog_mem), .out_of_range(out_of_range_prog_mem), .data_out(
186             ↳ inst2reg)
187 );
188 // data_memory
189 memory #(.initial_option(1)) data_memory_unit(
190     .clk(clk), .rst(1'b0),
191     // inputs
192     .rw(      (acces_to_data_mem & ~start) ? data_rw_fromEEI      : 1'b0),
193             ↳ rw_data_mem),
194     .valid(   (acces_to_data_mem & ~start) ? data_valid_mem_fromEEI : 1'b0,
195             ↳ valid_data_mem),
196     .addr(    (acces_to_data_mem & ~start) ? data_addr_fromEEI      : EX_out),
197     .data_in( (acces_to_data_mem & ~start) ? data_in_fromEEI       : 32'b0
198             ↳ operand3),
199     .byte_half_word( (acces_to_data_mem & ~start) ? data_byte_half_word_fromEEI
200             ↳ : byte_half_word_data_mem),
201     .is_load_unsigned((acces_to_data_mem & ~start) ?
202             ↳ data_is_load_unsigned_fromEEI : is_load_unsigned_data_mem),
203     // outputs
204     .ready(ready_data_mem), .out_of_range(out_of_range_data_mem), .data_out(
205             ↳ data_out_data_mem)
206 );
207 // Instruction_Decoder
208 Instruction_Decoder Instruction_Decoder_unit(
209     .in(inst),
210     .is_imm_valid(is_imm_valid), .imm(imm),
211     .rd_add(rd_add), .rs1_add(rs1_add), .rs2_add(rs2_add), .rs3_add(rs3_add),
212     .funct7_out(funct7_out), .format_type(format_type), .sub_format_type(
213             ↳ sub_format_type),
214     .funct3(funct3), .funct2(funct2), .reg_access_option(reg_access_option)
215 );
216 // registers_files
217 registers_files registers_files_unit(
218     .clk(clk),
219     // inputs

```

```

208     .rs1_add( acces_to_registers_files & ~start) ? rs1_add_fromEEI : rs1_add),
209     .rs2_add( acces_to_registers_files & ~start) ? rs2_add_fromEEI : rs2_add),
210     .rs3_add(rs3_add),
211     .wb_add( acces_to_registers_files & ~start) ? wb_add_fromEEI : rd_add),
212     .wb_data( acces_to_registers_files & ~start) ? wb_data_fromEEI : rd),
213     .write_reg( acces_to_registers_files & ~start) ? do_wb_fromEEI :
214         ((format_type==3'b011 | format_type==3'b100) ? 1'b0 : do_wb) ),
215     .is_wb_data_fp( acces_to_registers_files & ~start) ? is_wb_data_fp_fromEEI :
216         ↪ reg_access_option[0]),
217     .is_rs1_fp( acces_to_registers_files & ~start) ? is_rs1_fp_fromEEI :
218         ↪ reg_access_option[1]),
219     .is_rs2_fp( acces_to_registers_files & ~start) ? is_rs2_fp_fromEEI :
220         ↪ reg_access_option[1] | reg_access_option[0])),
221         // outputs
222     .rs1(operand1), .rs2(rs2), .rs3(rs3)
223 );
224 // alu_op_selection
225 alu_op_selection alu_op_selection_unit(
226     .imm_11_5(operand2[11:5]), .funct7_out(funct7_out),
227     .format_type(format_type), .sub_format_type(sub_format_type), .funct3(funct3),
228     .alu_option(alu_option)
229 );
230 // ALU
231 ALU ALU_unit(
232     .in1(operand1), .in2( (format_type==3'b100) ? operand3 : operand2), // is B type?
233     .operation(alu_option),
234     .res(res_alu), .boolean_res(branch_condition)
235 );
236 // fpu_op_selection
237 fpu_op_selection fpu_op_selection_unit(
238     .rs2_add(rs2_add), .funct7_out(funct7_out),
239     .format_type(format_type), .sub_format_type(sub_format_type), .funct3(funct3), .
240         ↪ rm_from_fcsr(3'b000),
241     .rm2fpu(rm2fpu), .fpu_option(fpu_option)
242 );
243 // FPU
244 FPU FPU_unit(
245     .start(start_fpu), .rst(rst), .clk(clk), .rm(rm2fpu),
246     .option(fpu_option), .in1(operand1), .in2(operand2), .in3(operand3),
247     .NV(ignore_flags[4]), .NX(ignore_flags[3]), .UF(ignore_flags[2]), .OF(ignore_flags
248         ↪ [1]), .DZ(ignore_flags[0]),
249     .ready(ready_fpu), .out(res_fpu)
250 );
251 endmodule

```

riscv32imf_pipeline.sv: Archivo *top* del *core complex Pipelined*.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4 */
5 'timescale 1ns / 1ps

```

```

6
7 module riscv32imf_pipeline(
8     input clk, rst, start, acces_to_registers_files, is_wb_data_fp_fromEEI, do_wb_fromEEI
9         , is_rs1_fp_fromEEI, is_rs2_fp_fromEEI,
10    input acces_to_prog_mem, prog_rw_fromEEI, prog_valid_mem_fromEEI,
11        , prog_is_load_unsigned_fromEEI,
12    input acces_to_data_mem, data_rw_fromEEI, data_valid_mem_fromEEI,
13        , data_is_load_unsigned_fromEEI,
14    input [31:0] initial_PC, prog_addr_fromEEI, prog_in_fromEEI, data_addr_fromEEI,
15        , data_in_fromEEI, wb_data_fromEEI,
16    input [1:0] prog_byte_half_word_fromEEI, data_byte_half_word_fromEEI,
17    input [4:0] rs1_add_fromEEI, rs2_add_fromEEI, wb_add_fromEEI,
18    output prog_ready_toEEI, prog_out_of_range_toEEI, data_ready_toEEI,
19        , data_out_of_range_toEEI,
20    output reg ready,
21    output [1:0] exit_status,
22    output [31:0] prog_out_toEEI, data_out_toEEI, rs1_toEEI, rs2_toEEI, PC
23 /*
24     exit_status[1:0] =
25         00 -> ecall
26         11 -> ebreak
27         01 -> program out of range
28         10 -> memory out of range
29 */
30 );
31
32 typedef enum {waiting_state, loop_state_1, loop_state_2_normal,
33             , loop_state_2_chazzard, loop_state_3, prog_error_state, final_state} state_type;
34 state_type actual_state, next_state;
35
36 reg set_regs, is_the_beginning, enable_execution, not_valid_EX, not_valid_MEMORY,
37     , not_valid_WB, control_bubble, acces_to_fpu_EX,
38     , acces_to_mem_EX, acces_to_mem_MEMORY, is_imm_valid_EX, is_ecall_EX,
39     , is_ecall_MEMORY, is_ebreak_EX, is_ebreak_MEMORY, is_ecall_WB, is_ebreak_WB;
40 reg [4:0] rd_add_EX, rd_add_MEMORY, rd_add_WB, rs1_add_EX, rs2_add_EX,
41     , rs3_add_EX;
42 reg [3:0] funct7_out_EX;
43 reg [2:0] format_type_MEMORY, sub_format_type_MEMORY, format_type_EX,
44     , sub_format_type_EX, format_type_WB, funct3_EX, funct3_MEMORY;
45 reg [1:0] reg_access_option_EX, reg_access_option_MEMORY, reg_access_option_WB;
46 reg [31:0] new_PC, PC_IF, PC_DR, PC_EX, PC_MEMORY, PC_WB, inst_DR, imm_EX,
47     , rs1_EX, rs2_EX, rs3_EX, final_res_MEMORY, operand3_MEMORY, rd_WB;
48
49 wire is_ecall_DR, is_ebreak_DR, acces_to_fpu_DR, acces_to_mem_DR,
50     , not_valid_DR, is_imm_valid_DR, ready_fpu, enable_fpu, exit, done,
51     , ready_prog_mem, out_of_range_prog_mem, ready_data_mem,
52     , out_of_range_data_mem, rw_data_mem, is_load_unsigned_data_mem,
53     , branch_condition, control_hazard;
54
55 wire [6:0] ignored_signals;
56 wire [4:0] rd_add_DR, rs1_add_DR, rs2_add_DR, rs3_add_DR, alu_option,
57     , fpu_option;
58 wire [3:0] funct7_out_DR;
59 wire [2:0] format_type_DR, sub_format_type_DR, funct3_DR, rm2fpu;
60 wire [1:0] reg_access_option_DR, byte_half_word_data_mem;
61 wire [31:0] jalr_pc, branch_PC, rs1_DR, rs2_DR, rs3_DR, imm_DR, rd_MEMORY,

```

```

    ↪ operand1_EX, operand2_EX, operand3_EX, final_res_EX, inst_IF, res_alu,
    ↪ res_fpu, data_out_data_mem;
43 // interface con EEI
44 assign {prog_ready_toEEI, prog_out_of_range_toEEI, data_ready_toEEI,
    ↪ data_out_of_range_toEEI, prog_out_toEEI, data_out_toEEI, rs1_toEEI,
    ↪ rs2_toEEI} =
45     {ready_prog_mem, out_of_range_prog_mem, ready_data_mem,
    ↪ out_of_range_data_mem, inst_IF, data_out_data_mem, rs1_DR,
    ↪ rs2_DR};
46 assign PC = (exit_status[1]^exit_status[0]) ? (exit_status[0] ? PC_IF : PC_MEM) :
    ↪ PC_WB;
47 // exit_status_selection
48 assign exit_status = is_ecall_WB
    ? 2'b00 : (
49     is_ebreak_WB
    ? 2'b11 : (
50         acces_to_mem_MEMORY & out_of_range_data_mem) ? 2'b10 : (
51             (out_of_range_prog_mem & ~control_hazard) ? 2'b01 : (
52                 2'b00)));
53 // data_mem_options_selection
54 assign rw_data_mem = (format_type_MEMORY==3'b011) ? 1'b1 : 1'b0; // only 1 in S type
    ↪ instruction
55 assign is_load_unsigned_data_mem = (format_type_MEMORY==3'b010 & funct3_MEMORY
    ↪ [2:1]==2'b10) ? 1'b1 : 1'b0; // only 1 in I type instruction and funct3= 4 o 5
56 assign byte_half_word_data_mem = (funct3_MEMORY[1:0]==2'b00) ? 2'b10 : // funct3= 0
    ↪ o 4 -byte
    ((funct3_MEMORY[1:0]==2'b01) ? 2'b01 : // funct3= 1 o 5 -half
    2'b00); // funct3= 2 -word (default)
57 // final_alu_fpu_res_selection
58 assign final_res_EX =
59     ((format_type_EX, sub_format_type_EX)==6'b000_000 & {funct7_out_EX,
    ↪ funct3_EX}!=7'b1011_000 & {funct7_out_EX, funct3_EX}!=7'b1100_000) | // se
    ↪ excluyen fmv.x.w y fmv.w.x
60     format_type_EX==3'b001) ? res_fpu : // R (fp) o R4
61     ((format_type_EX, sub_format_type_EX)==6'b000_000 & (funct7_out_EX==4'
    ↪ b1011 | funct7_out_EX==4'b1100)) ? operand1_EX : // fmv.x.w y fmv.w.x
62     ((format_type_EX, sub_format_type_EX)==6'b010_011 | format_type_EX==3'
    ↪ b110) ? PC_EX+32'b100 : // I (jalr) o J
63     ((format_type_EX==3'b101) ? (operand2_EX + (sub_format_type_EX[0] ?
    ↪ PC_EX : 32'b0) ) : // U
    res_alu)); // default
64 // mux rd
65 assign rd_MEMORY = (format_type_MEMORY==3'b010 & ~sub_format_type_MEMORY[2] &
    ↪ sub_format_type_MEMORY[0]) ? data_out_data_mem : final_res_MEMORY;
66 // sub_decoder
67 assign is_ecall_DR = (format_type_DR==3'b010 & sub_format_type_DR==3'b100 &
    ↪ imm_DR==32'b0) ? 1'b1 : 1'b0;
68 assign is_ebreak_DR = (format_type_DR==3'b010 & sub_format_type_DR==3'b100
    ↪ & imm_DR==32'b1) ? 1'b1 : 1'b0;
69 assign acces_to_fpu_DR = (
70     format_type_DR==3'b001 | ( // R4
71         {format_type_DR, sub_format_type_DR}==6'b0 & {funct7_out_DR,
    ↪ funct3_DR}!=7'b1011_000 & {funct7_out_DR, funct3_DR}!=7'b1100_000 ) // R (
    ↪ fp) - {fmv.x.w, fmv.w.x}

```

```

75      ) ? 1'b1 : 1'b0;
76  assign acces_to_mem_DR = (format_type_DR==3'b011 | (format_type_DR==3'b010
    ↪ & ~sub_format_type_DR[2] & ~sub_format_type_DR[0])) ? 1'b1 : 1'b0;
77  assign not_valid_DR = format_type_DR==3'b111 ? 1'b1 : 1'b0;
78 // next_PC_selection
79  assign control_hazard = ( ({format_type_EX, branch_condition}==4'b100_1 |
    ↪ format_type_EX==3'b110) | ({format_type_EX, sub_format_type_EX}==6'
    ↪ b010_011) ) ? 1'b1 : 1'b0;
80  assign jalr_pc = operand1_EX+operand2_EX;
81  assign branch_PC = ({format_type_EX, branch_condition}==4'b100_1 |
    ↪ format_type_EX==3'b110) ? PC_EX+operand2_EX : // B | J
82          (({format_type_EX, sub_format_type_EX}==6'b010_011) ?
    ↪ {jalr_pc[31:1], 1'b0} : // I (jalr)
    ↪ 32'b0);
83 // control_signals
84  assign exit = (is_ecall_WB | is_ebreak_WB |
    (out_of_range_prog_mem & ~control_hazard) |
    (acces_to_mem_MEM & out_of_range_data_mem) ) ? 1'b1 : 1'b0;
85  assign done = (((ready_prog_mem & ~out_of_range_prog_mem) | control_hazard) &
86          ((acces_to_fpu_EX & ready_fpu) | ~acces_to_fpu_EX) &
87          ((acces_to_mem_MEM & ready_data_mem & ~out_of_range_data_mem) |
    ↪ ~acces_to_mem_MEM)) ? 1'b1 : 1'b0;
88 // FSM controller
89  always_comb
90      case (actual_state)
91          default: begin
92              {is_the_beginning, ready}           = 2'b00;
93              {enable_execution, control_bubble, set_regs} = 3'b000;
94              next_state = actual_state;
95          end
96          waiting_state: begin
97              {is_the_beginning, ready}           = {start, 1'b0};
98              {enable_execution, control_bubble, set_regs} = 3'b000;
99              next_state = start ? loop_state_1 : waiting_state;
100         end
101         loop_state_1: begin
102             {is_the_beginning, ready}           = 2'b00;
103             {enable_execution, control_bubble, set_regs} = 3'b100;
104             next_state = start ? (exit ? final_state :
105                 (done ? (control_hazard ? loop_state_2_chazzard : loop_state_2_normal)
106                  : loop_state_1)) : waiting_state;
107         end
108         end
109         loop_state_2_normal: begin
110             {is_the_beginning, ready}           = 2'b00;
111             {enable_execution, control_bubble, set_regs} = 3'b101;
112             next_state = loop_state_3;
113         end
114         loop_state_2_chazzard: begin
115             {is_the_beginning, ready}           = 2'b00;
116             {enable_execution, control_bubble, set_regs} = 3'b111;
117             next_state = loop_state_3;
118         end
119     end
120 
```

```

121     loop_state_3: begin
122         {is_the_beginning, ready} = 2'b00;
123         {enable_execution, control_bubble, set_regs} = 3'b000;
124         next_state = loop_state_1;
125     end
126     final_state: begin
127         {is_the_beginning, ready} = 2'b01;
128         {enable_execution, control_bubble, set_regs} = 3'b100;
129         next_state = start ? final_state : waiting_state;;
130     end
131 endcase
132 always_ff @(posedge(clk)) begin // el orden SI importa
133     new_PC = is_the_beginning ? initial_PC : (set_regs ? (control_bubble ? branch_PC
134     : PC_IF+32'b100) : PC_IF); // PC_generator
135     if(is_the_beginning) begin // reset
136         // PipelineReg_MEM2WB
137         {PC_WB, rd_WB, rd_add_WB, format_type_WB, reg_access_option_WB,
138         ↪ not_valid_WB, is_ebreak_WB, is_ecall_WB } = 0;
139         // PipelineReg_EX2MEM
140         {PC_MEMORY, final_res_MEMORY, operand3_MEMORY, rd_add_MEMORY, format_type_MEMORY
141         ↪ , sub_format_type_MEMORY, funct3_MEMORY,
142         reg_access_option_MEMORY, acces_to_mem_MEMORY, not_valid_MEMORY,
143         ↪ is_ebreak_MEMORY, is_ecall_MEMORY} = 0;
144     end
145     else if(set_regs) begin // set
146         // PipelineReg_MEM2WB
147         {PC_WB, rd_WB, rd_add_WB, format_type_WB, reg_access_option_WB,
148         ↪ not_valid_WB, is_ebreak_WB, is_ecall_WB }
149         =
150         {PC_MEMORY, rd_MEMORY, rd_add_MEMORY, format_type_MEMORY,
151         ↪ reg_access_option_MEMORY, not_valid_MEMORY, is_ebreak_MEMORY, is_ecall_MEMORY};
152         // PipelineReg_EX2MEM
153         {PC_MEMORY, final_res_MEMORY, operand3_MEMORY, rd_add_MEMORY, format_type_MEMORY
154         ↪ , sub_format_type_MEMORY, funct3_MEMORY,
155         reg_access_option_MEMORY, acces_to_mem_MEMORY, not_valid_MEMORY,
156         ↪ is_ebreak_MEMORY, is_ecall_MEMORY}
157         =
158         {PC_EX, final_res_EX, operand3_EX, rd_add_EX, format_type_EX,
159         ↪ sub_format_type_EX, funct3_EX,
159         ↪ reg_access_option_EX, acces_to_mem_EX, not_valid_EX, is_ebreak_EX,
159         ↪ is_ecall_EX };
160     end
161     if((control_bubble & set_regs) | is_the_beginning) begin // reset (c. hazard)
162         // PipelineReg_DR2EX
163         {PC_EX, imm_EX, rs1_EX, rs2_EX, rs3_EX, rd_add_EX, rs1_add_EX,
164         ↪ rs2_add_EX, rs3_add_EX,
165         funct7_out_EX, funct3_EX, format_type_EX, sub_format_type_EX,
166         ↪ reg_access_option_EX,
167         is_imm_valid_EX, acces_to_fpu_EX, acces_to_mem_EX, not_valid_EX,
168         ↪ is_ebreak_EX, is_ecall_EX} = 0;
169         // PipelineReg_IF2DR
170         {PC_DR, inst_DR} = 0;

```

```

160    end
161    else if(~control_bubble & set_regs) begin // set (c. hazard)
162        // PipelineReg_DR2EX
163        {PC_EX, imm_EX, rs1_EX, rs2_EX, rs3_EX, rd_add_EX, rs1_add_EX,
164         → rs2_add_EX, rs3_add_EX,
165         funct7_out_EX, funct3_EX, format_type_EX, sub_format_type_EX,
166         → reg_access_option_EX,
167         is_imm_valid_EX, acces_to_fpu_EX, acces_to_mem_EX, not_valid_EX,
168         → is_ebreak_EX, is_ecall_EX}
169        =
170        {PC_DR, imm_DR, rs1_DR, rs2_DR, rs3_DR, rd_add_DR, rs1_add_DR,
171         → rs2_add_DR, rs3_add_DR,
172         funct7_out_DR, funct3_DR, format_type_DR, sub_format_type_DR,
173         → reg_access_option_DR,
174         is_imm_valid_DR, acces_to_fpu_DR, acces_to_mem_DR, not_valid_DR,
175         → is_ebreak_DR, is_ecall_DR};
176        // PipelineReg_IF2DR
177        {PC_DR, inst_DR} = {PC_IF, inst_IF};
178    end
179    if(is_the_beginning | set_regs) PC_IF = new_PC; // PC_generator
180    actual_state = rst ? waiting_state : next_state;
181 end
182 // prog_memory
183 memory #(initial_option(2)) prog_memory_unit(
184     .clk(clk), .rst(rst),
185     // inputs
186     .rw(      (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_rw_fromEEI      : 1'b0),
187     .valid(   (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_valid_mem_fromEEI : 1'b0,
188     → enable_execution),
189     .addr(    (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_addr_fromEEI    : 1'b0,
190     → PC_IF),
191     .data_in( (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_in_fromEEI      : 32'b0
192     → ),
193     .byte_half_word( (acces_to_prog_mem & ~start) ? prog_byte_half_word_fromEEI : 1'b0),
194     .is_load_unsigned((acces_to_prog_mem & ~start) ?
195     → prog_is_load_unsigned_fromEEI : 1'b1),
196     // outputs
197     .ready(ready_prog_mem), .out_of_range(out_of_range_prog_mem), .data_out(
198     → inst_IF)
199 );
200 // data_memory
201 memory #(initial_option(1)) data_memory_unit(
202     .clk(clk), .rst(rst),
203     // inputs
204     .rw(      (acces_to_data_mem & ~start) ? data_rw_fromEEI      : 1'b0),
205     → rw_data_mem),
206     .valid(   (acces_to_data_mem & ~start) ? data_valid_mem_fromEEI : 1'b0,
207     → acces_to_mem_MEM & enable_execution),
208     .addr(    (acces_to_data_mem & ~start) ? data_addr_fromEEI    : 1'b0,
209     → final_res_MEM),
210     .data_in( (acces_to_data_mem & ~start) ? data_in_fromEEI      : 1'b0)
211 );

```

```

    ↳ operand3_MEMORY),
197     .byte_half_word( (acces_to_data_mem & ~start) ? data_byte_half_word_fromEEI
    ↳   : byte_half_word_data_mem),
198     .is_load_unsigned((acces_to_data_mem & ~start) ?
    ↳ data_is_load_unsigned_fromEEI : is_load_unsigned_data_mem),
199     // outputs
200     .ready(ready_data_mem), .out_of_range(out_of_range_data_mem), .data_out(
    ↳ data_out_data_mem)
201 );
202 // Instruction_Decoder
203 Instruction_Decoder Instruction_Decoder_unit(
204     .in(inst_DR),
205     .is_imm_valid(is_imm_valid_DR), .imm(imm_DR),
206     .rd_add(rd_add_DR), .rs1_add(rs1_add_DR), .rs2_add(rs2_add_DR), .rs3_add(
    ↳ rs3_add_DR),
207     .funct7_out(funct7_out_DR), .format_type(format_type_DR), .sub_format_type(
    ↳ sub_format_type_DR),
208     .funct3(funct3_DR), .funct2(ignored_signals[6:5]), .reg_access_option(
    ↳ reg_access_option_DR)
209 );
210 // registers_files
211 registers_files registers_files_unit(
212     .clk(clk),
213     // inputs
214     .rs1_add( (acces_to_registers_files & ~start) ? rs1_add_fromEEI : rs1_add_DR),
215     .rs2_add( (acces_to_registers_files & ~start) ? rs2_add_fromEEI : rs2_add_DR),
216     .rs3_add( rs3_add_DR ),
217     .wb_add( (acces_to_registers_files & ~start) ? wb_add_fromEEI : rd_add_WB),
218     .wb_data( (acces_to_registers_files & ~start) ? wb_data_fromEEI : rd_WB),
219     .write_reg( (acces_to_registers_files & ~start) ? do_wb_fromEEI :
220         ((format_type_WB==3'b011 | format_type_WB==3'b100 | not_valid_WB |
    ↳ is_ecall_WB | is_ebreak_WB) ? 1'b0 : 1'b1) ),
221         .is_wb_data_fp( (acces_to_registers_files & ~start) ? is_wb_data_fp_fromEEI :
    ↳ reg_access_option_WB[0]),
222         .is_rs1_fp( (acces_to_registers_files & ~start) ? is_rs1_fp_fromEEI :
    ↳ reg_access_option_DR[1]),
223         .is_rs2_fp( (acces_to_registers_files & ~start) ? is_rs2_fp_fromEEI :
    ↳ reg_access_option_DR[1] | reg_access_option_DR[0])),
224         // outputs
225         .rs1(rs1_DR), .rs2(rs2_DR), .rs3(rs3_DR)
226 );
227 // forwarding_unit
228 forwarding_unit forwarding_unit(
229     .is_imm_valid_EX(is_imm_valid_EX), .ready_data_mem(ready_data_mem), .
    ↳ valid_data_mem(acces_to_mem_MEMORY),
230     .reg_access_option_EX(reg_access_option_EX), .reg_access_option_MEMORY(
    ↳ reg_access_option_MEMORY), .reg_access_option_WB(reg_access_option_WB),
231     .format_type_EX(format_type_EX), .format_type_MEMORY(format_type_MEMORY), .
    ↳ format_type_WB(format_type_WB), .sub_format_type_MEMORY(
    ↳ sub_format_type_MEMORY),
232     .rs1_add_EX(rs1_add_EX), .rs2_add_EX(rs2_add_EX), .rs3_add_EX(rs3_add_EX
    ↳ ), .rd_add_MEMORY(rd_add_MEMORY), .rd_add_WB(rd_add_WB),

```

```

233     .rs1_EX(rs1_EX), .rs2_EX(rs2_EX), .rs3_EX(rs3_EX), .rd_MEM(rd_MEM), .
234     ↪ rd_WB(rd_WB), .imm_EX(imm_EX),
235     .enable_fpu(enable_fpu), .operand1_EX(operand1_EX), .operand2_EX(operand2_EX
236     ↪ ), .operand3_EX(operand3_EX)
237 );
238 // alu_op_selection
239 alu_op_selection alu_op_selection_unit(
240     .imm_11_5(operand2_EX[11:5]), .funct7_out(funct7_out_EX),
241     .format_type(format_type_EX), .sub_format_type(sub_format_type_EX), .funct3(
242     ↪ funct3_EX),
243     .alu_option(alu_option)
244 );
245 // ALU
246 ALU ALU_unit(
247     .in1(operand1_EX), .in2((format_type_EX==3'b100) ? operand3_EX : operand2_EX
248     ↪ ), // is B type?
249     .operation(alu_option),
250     .res(res_alu), .boolean_res(branch_condition)
251 );
252 // fpu_op_selection
253 fpu_op_selection fpu_op_selection_unit(
254     .rs2_add(rs2_add_EX), .funct7_out(funct7_out_EX),
255     .format_type(format_type_EX), .sub_format_type(sub_format_type_EX), .funct3(
256     ↪ funct3_EX), .rm_from_fcsr(3'b000),
257     .rm2fpu(rm2fpu), .fpu_option(fpu_option)
258 );
259 // FPU
260 FPU FPU_unit(
261     .start(acces_to_fpu_EX & enable_fpu & enable_execution), .rst(rst | ~
262     ↪ enable_execution), .clk(clk), .rm(rm2fpu),
263     .option(fpu_option), .in1(operand1_EX), .in2(operand2_EX), .in3(operand3_EX),
264     .NV(ignored_signals[4]), .NX(ignored_signals[3]), .UF(ignored_signals[2]), .OF(
265     ↪ ignored_signals[1]), .DZ(ignored_signals[0]),
266     .ready(ready_fpu), .out(res_fpu)
267 );
268 endmodule
269
270 module forwarding_unit(
271     input is_imm_valid_EX, ready_data_mem, valid_data_mem,
272     input [1:0] reg_access_option_EX, reg_access_option_MEMORY, reg_access_option_WB,
273     input [2:0] format_type_EX, format_type_MEMORY, format_type_WB,
274     ↪ sub_format_type_MEMORY,
275     input [4:0] rs1_add_EX, rs2_add_EX, rs3_add_EX, rd_add_MEMORY, rd_add_WB,
276     input [31:0] rs1_EX, rs2_EX, rs3_EX, rd_MEMORY, rd_WB, imm_EX,
277     output enable_fpu,
278     output [31:0] operand1_EX, operand2_EX, operand3_EX
279 );
280 /*
281     reg_access_option:
282     |code| rd | rs1 | rs2 |
283     | 00 | I | I | I |
284     | 01 | FP | I | FP |

```

```

277     | 10 | I | FP | FP |
278     | 11 | FP | FP | FP |
279     note: rs3 is always FP
280 */
281 wire [31:0] final_rs1, final_rs2, final_rs3;
// checking rs1, rs2, rs3: se debe checkear MEM primero y despues WB (debido a que
// → MEM el la inst immediatamente precedente)
283 //           calza la dirección      no se trata de x0          es un
// → write back por realizar          son del mismo tipo (integer/fp)
284 assign final_rs1 = ( rs1_add_EX==rd_add_MEM & ~( rd_add_MEM==5'b0 & ~
// → reg_access_option_MEMORY[0] ) & format_type_MEMORY!=3'b011 & format_type_MEMORY
// → !=3'b100 & reg_access_option_EX[1]==reg_access_option_MEMORY[0] ) ? rd_MEMORY :
// → (
285     ( rs1_add_EX==rd_add_WB & ~( rd_add_WB ==5'b0 & ~
// → reg_access_option_WB[0] ) & format_type_WB !=3'b011 & format_type_WB
// → !=3'b100 & reg_access_option_EX[1]==reg_access_option_WB[0] ) ? rd_WB : (
286         rs1_EX));
287 assign final_rs2 = ( rs2_add_EX==rd_add_MEM & ~( rd_add_MEM==5'b0 & ~
// → reg_access_option_MEMORY[0] ) & format_type_MEMORY!=3'b011 & format_type_MEMORY
// → !=3'b100 & ((reg_access_option_EX==2'b0 & ~reg_access_option_MEMORY[0]) | (
288         reg_access_option_EX!=2'b0 & reg_access_option_MEMORY[0])) ) ? rd_MEMORY : (
289             ( rs2_add_EX==rd_add_WB & ~( rd_add_WB ==5'b0 & ~
// → reg_access_option_WB[0] ) & format_type_WB !=3'b011 & format_type_WB
// → !=3'b100 & ((reg_access_option_EX==2'b0 & ~reg_access_option_WB[0]) | (
290             reg_access_option_EX!=2'b0 & reg_access_option_WB[0])) ) ? rd_WB : (
291                 rs2_EX));
292 assign final_rs3 = ( rs3_add_EX==rd_add_MEM & ~( rd_add_MEM==5'b0 & ~
// → reg_access_option_MEMORY[0] ) & format_type_MEMORY!=3'b011 & format_type_MEMORY
// → !=3'b100 & reg_access_option_MEMORY[0] ) ? rd_MEMORY : (
293                 ( rs3_add_EX==rd_add_WB & ~( rd_add_WB ==5'b0 & ~
// → reg_access_option_WB[0] ) & format_type_WB !=3'b011 & format_type_WB
// → !=3'b100 & reg_access_option_WB[0] ) ? rd_WB : (
294                     rs3_EX));
295 // final outputs (analogo al caso single cycle)
296 assign operand1_EX = final_rs1;
297 assign operand2_EX = is_imm_valid_EX ? imm_EX : final_rs2;
298 assign operand3_EX = (format_type_EX==3'b011 | format_type_EX==3'b100) ?
// → final_rs2 : final_rs3;
299 // permite la ejecución de la FPU, es importante en las instrucciones load cuando hay
// → data hazard pues debe esperar a que se obtenga el dato de la memoria
300 assign enable_fpu = ( // si alguno de los operandos depende de rd_MEMORY
301     ( (rs1_add_EX==rd_add_MEM & format_type_EX!=3'b101 & format_type_EX
// → !=3'b110) | // no aplica para U y J
302         (rs2_add_EX==rd_add_MEM & (~is_imm_valid_EX | format_type_EX==3'
// → b011 | format_type_EX==3'b100)) | // aplica si imm es inválido o para B o S
303         (rs3_add_EX==rd_add_MEM & format_type_EX==3'b001) // aplica para R4
304     ) & (~sub_format_type_MEMORY[2] & ~sub_format_type_MEMORY[0] &
// → format_type_MEMORY==3'b010 & valid_data_mem) // y es una instrucción de tipo
// → load (en MEM)
305     & ~( rd_add_MEMORY==5'b0 & ~reg_access_option_MEMORY[0] ) // y no se trata de x0
306     & ==zero
307     ) ? ready_data_mem : 1'b1; // se espera a que el dato sea valido

```

```
305 endmodule
```

Instruction_Decoder.sv: Archivo que describe los módulos *Instruction_Decoder* y *registers_files*.

```
1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4 */
5 'timescale 1ns / 1ps
6
7 module Instruction_Decoder(
8     input [31:0] in,
9     output is_imm_valid,
10    output [31:0] imm,
11    output [4:0] rd_add, rs1_add, rs2_add, rs3_add,
12    output [3:0] funct7_out,
13    output [2:0] format_type, sub_format_type, funct3,
14    output [1:0] reg_access_option, funct2
15 );
16 wire [6:0] opcode, funct7;
17 assign {opcode , funct7 , funct3 , funct2 , rd_add , rs1_add , rs2_add , rs3_add } =
18     {in[6:0], in[31:25], in[14:12], in[26:25], in[11:7], in[19:15], in[24:20], in[31:27]};
19 /*
20     Format Group Classifier:
21     opcode -> Type
22     0110011 -> R
23     1010011 -> R (FP)
24     100 00 11 -> R4 (FP- fmadd.s)
25     100 01 11 -> R4 (FP- fmsub.s)
26     100 11 11 -> R4 (FP- fnmadd.s)
27     100 10 11 -> R4 (FP- fnmsub.s)
28     0100011 -> S
29     0100111 -> S (FP)
30     1100011 -> B
31     1101111 -> J
32     0110111 -> U (lui)
33     0010111 -> U (auipc)
34     0010011 -> I (addi, xori, ori, andi, slli, srli, srai, slti, sltiu)
35     0000011 -> I (lb, lh, lw, lbu, lhu)
36     1100111 -> I (jalr)
37     1110011 -> I (ecall, ebreak)
38     0000111 -> I (FP)
39     format_type[2:0]:
40     000 -> R type
41     001 -> R4 type
42     011 -> S type
43     100 -> B type
44     101 -> U type
45     110 -> J type
46     010 -> I type
47     111 -> Not valid type
```

```

48 */
49 assign format_type = (opcode[4:0]==5'b10011 & (opcode[6]^opcode[5])) ? 3'b000 : // R
50     (({opcode[6:4], opcode[1:0]}==5'b10011)           ? 3'b001 : // R4
51     (({opcode[6:3], opcode[1:0]}==6'b010011)           ? 3'b011 : // S
52     ((opcode==7'b1100011)                            ? 3'b100 : // B
53     ((opcode==7'b1101111)                            ? 3'b110 : // J
54     (({opcode[6], opcode[4:0]}==6'b010111)           ? 3'b101 : // U
55     ((opcode[1:0]==2'b11&(opcode[6:2]==5'b100|opcode[6:2]==5'b0|opcode
      ↳ [6:2]==5'b1
      |opcode[6:2]==5'b11001|opcode[6:2]==5'b11100)) ? 3'b010 : // I
      3'b111))))); // Not valid
56
57 /*
58   Sub-Format Group Classifier
59   sub_format_type[2:0]:
60     if format_type[2:0] = 000
61       -000 -> R (FP)
62       -001 -> R
63       if format_type[2:0] = 001
64         -000 -> R4 (FP- fmadd.s)
65         -001 -> R4 (FP- fmsub.s)
66         -010 -> R4 (FP- fnmsub.s)
67         -011 -> R4 (FP- fnmadd.s)
68       100 00 11 -> R4 (FP- fmadd.s)
69       100 01 11 -> R4 (FP- fmsub.s)
70       100 10 11 -> R4 (FP- fnmsub.s)
71       100 11 11 -> R4 (FP- fnmadd.s)
72       if format_type[2:0] = 010
73         -000 -> I (FP)
74         -001 -> I (addi, xori, ori, andi, slli, srli, srai, slti, sltiu)
75         -010 -> I (lb, lh, lw, lbu, lhu)
76         -011 -> I (jalr)
77         -100 -> I (ecall, ebreak)
78       if format_type[2:0] = 011
79         -000 -> S (FP)
80         -001 -> S
81       if format_type[2:0] = 101
82         -000 -> U (lui)
83         -001 -> U (auipc)
84       else
85         -111
86 */
87 assign sub_format_type = (format_type==3'b000) ? (opcode[6] ? 3'b000 : 3'b001) : // R
88     ((format_type==3'b011) ? (opcode[2] ? 3'b000 : 3'b001) : // S
89     ((format_type==3'b101) ? (opcode[5] ? 3'b000 : 3'b001) : // U
90     ((format_type==3'b001) ? opcode[4:2] : // R4
91     ((format_type==3'b010&opcode[6:2]==5'b1)    ? 3'b000 : // I (FP)
92     ((format_type==3'b010&opcode[6:2]==5'b0)    ? 3'b010 : // I (lb, lh,
      ↳ lw, lbu, lhu)
      ((format_type==3'b010&opcode[6:2]==5'b100) ? 3'b001 : // I (addi,
      ↳ xori, ori, andi, slli, srli, srai, slti, sltiu)
      ((format_type==3'b010&opcode[6:2]==5'b11001) ? 3'b011 : // I (jalr)
      ((format_type==3'b010&opcode[6:2]==5'b11100) ? 3'b100 : // I (

```

```

    ↳ ecall, ebreak)
97         3'b111))))));
98     /*
99      Operation Classifier:
100     if Funct7[6:0]==0000000: Funct7-out[3:0]==0000
101     if Funct7[6:0]==0000001: Funct7-out[3:0]==0001
102     if Funct7[6:0]==0100000: Funct7-out[3:0]==0010
103     if Funct7[6:0]==0000100: Funct7-out[3:0]==0011
104     if Funct7[6:0]==0001000: Funct7-out[3:0]==0100
105     if Funct7[6:0]==0001100: Funct7-out[3:0]==0101
106     if Funct7[6:0]==0101100: Funct7-out[3:0]==0110
107     if Funct7[6:0]==0010000: Funct7-out[3:0]==0111
108     if Funct7[6:0]==0010100: Funct7-out[3:0]==1000
109     if Funct7[6:0]==1101000: Funct7-out[3:0]==1001
110     if Funct7[6:0]==1100000: Funct7-out[3:0]==1010
111     if Funct7[6:0]==1110000: Funct7-out[3:0]==1011
112     if Funct7[6:0]==1111000: Funct7-out[3:0]==1100
113     if Funct7[6:0]==1010000: Funct7-out[3:0]==1101
114     else:
115         Funct7-out[3:0]==1111
116     */
117     assign funct7_out = (funct7==7'b0000000) ? 4'b0000 : // 0x00
118             ((funct7==7'b0000001) ? 4'b0001 : // 0x01
119             ((funct7==7'b0100000) ? 4'b0010 : // 0x20
120             ((funct7==7'b0000100) ? 4'b0011 :
121             ((funct7==7'b0001000) ? 4'b0100 :
122             ((funct7==7'b0001100) ? 4'b0101 :
123             ((funct7==7'b0101100) ? 4'b0110 :
124             ((funct7==7'b00010000) ? 4'b0111 :
125             ((funct7==7'b0010100) ? 4'b1000 :
126             ((funct7==7'b1101000) ? 4'b1001 :
127             ((funct7==7'b1100000) ? 4'b1010 :
128             ((funct7==7'b1110000) ? 4'b1011 :
129             ((funct7==7'b1111000) ? 4'b1100 :
130             ((funct7==7'b1010000) ? 4'b1101 :
131             4'b1111))))))))));
132     /*
133      Registers selection options
134      if format-type[2:0]==000 (R):
135          if sub-format-type[2:0]==000 (FP):
136              if Funct7-out[3:0]==1010 o 1011 o 1101 ( fwt.w(u).s fmv.x.w fclass.s freq.s fit.s file.s )
137                  reg_access_option[1:0]==10
138              if Funct7-out[3:0]==1001 o 1100 ( fwt.s.w(u) fmv.w.x )
139                  reg_access_option[1:0]==01
140              else:
141                  reg_access_option[1:0]==11
142
143          if sub-format-type[2:0]==001 (no FP):
144              reg_access_option[1:0]==00
145      if format-type[2:0]==010 (I):
146          if sub-format-type[2:0]==000 (FP): reg_access_option[1:0]==01
147          if sub-format-type[2:0]==001 o 010 o 011 o 100 (no FP): reg_access_option[1:0]==00

```

```

148 if format-type[2:0]==011 (S):
149     if sub-format-type[2:0]==000 (FP): reg_access_option[1:0]=01
150     if sub-format-type[2:0]==001 (no FP): reg_access_option[1:0]=00
151 if format-type[2:0]==001 (R4):
152     reg_access_option[1:0]=11
153 if format-type[2:0]==100 (B):
154     reg_access_option[1:0]=00
155 if format-type[2:0]==101 (U) o 110 (J):
156     reg_access_option[1:0]=00 o 10==0
157 reg_access_option[1:0] =
158     00: rd, rs1, rs2 son registros Integer
159     01: rs1 es reg Integer y rd, rs2 son FP
160     10: rd es reg Integer y rs1, rs2 son FP
161     11: rd, rs1, rs2 son registros FP
162 reg_access_option:
163 | code| rd | rs1 | rs2 |
164 | 00 | I | I | I |
165 | 01 | FP | I | FP |
166 | 10 | I | FP | FP |
167 | 11 | FP | FP | FP |
168 note: rs3 is always FP
169 */
170 assign reg_access_option = (format_type[2:1]==2'b10|format_type==3'b110) ? 2'b00 :
171     // B-U-J
172     ((format_type==3'b001) ? 2'b11 : // R4
173     ((format_type==3'b011&sub_format_type==3'b000) ? 2'b01 : // S
174     ↪ (FP)
175     ((format_type==3'b011&sub_format_type==3'b001) ? 2'b00 : // S
176     ↪ (no FP)
177     ((format_type==3'b010&sub_format_type==3'b000) ? 2'b01 : // I (
178     ↪ FP)
179     ((format_type==3'b010&sub_format_type!=3'b111) ? 2'b00 : // I (
180     ↪ no FP)
181     ((format_type==3'b000&sub_format_type==3'b001) ? 2'b00 : // R
182     ↪ (no FP)
183     ((format_type==3'b000&sub_format_type==3'b000&(funct7_out
184     ↪ ==4'b1010|
185         funct7_out==4'b1011|funct7_out==4'b1101 )) ? 2'b10 : // R (
186         ↪ FP) ( fwt.w(u).s fmv.x.w fclass.s feq.s flt.s fle.s )
187         ((format_type==3'b000&sub_format_type==3'b000&(
188             funct7_out==4'b1001|funct7_out==4'b1100 )) ? 2'b01 : // R (
189             ↪ FP) ( fwt.s.w(u) fmv.w.x )
190             ((format_type==3'b000&sub_format_type==3'b000&(
191                 funct7_out!=4'b1111
192                 )) ? 2'b11 : // R (FP) (~
193                 2'b00))))));
194 /*
195     if format-type[2:0] = 010 (I type):
196         imm[31:0] = Inst[31]*ones[19:0] : Inst[30:20]
197         is_imm_valid = 1
198     if format-type[2:0] = 011 (S type):
199         imm[31:0] = Inst[31]*ones[19:0] : Inst[30:25] : Inst[11:7]
200         is_imm_valid = 1

```

```

191 if format-type[2:0] == 100 (B type):
192     imm[31:0] = Inst[31]*ones[19:0] : Inst[7] : Inst[30:25] : Inst[11:8] : 0
193     is_imm_valid = 1
194 if format-type[2:0] == 101 (U type):
195     imm[31:0] = Inst[31:12] : zeros[11:0]
196     is_imm_valid = 1
197 if format-type[2:0] == 110 (J type):
198     imm[31:0] = Inst[31]*ones[11:0] : Inst[19:12] : Inst[20] : Inst[30:21] : 0
199     is_imm_valid = 1
200 else:
201     imm[31:0] = dont_care[31:0]
202     is_imm_valid = 0
203 */
204 assign is_imm_valid = (format_type[2:1]==2'b01|format_type[2:1]==2'b10|
205     ↪ format_type==3'b110) ? 1'b1 : 1'b0;
206 assign imm = (format_type==3'b010) ? 32'(signed'(in[31:20]))
207     ↪ : // I
208     ((format_type==3'b011) ? 32'(signed'({in[31:25], in[11:7]})) :
209     ↪ // S
210     ((format_type==3'b100) ? 32'(signed'({in[31], in[7], in[30:25], in[11:8], 1'b0})) :
211     ↪ : // B
212     ((format_type==3'b101) ? {in[31:12], 12'b0} :
213     ↪ // U
214     ((format_type==3'b110) ? 32'(signed'({in[31], in[19:12], in[20], in[30:21], 1'b0})) :
215     ↪ : // J
216     32'bxxxx_xxxx_xxxx_xxxx_xxxx_xxxx_xxxx_xxxx));
217 endmodule
218
219 module registers_files(
220     input clk,           // clock del sistema
221     input [4:0] rs1_add, // dirección reg source 1
222     input [4:0] rs2_add, // dirección reg source 2
223     input [4:0] rs3_add, // dirección reg source 3
224     input [4:0] wb_add, // dirección reg para wb
225     input [31:0] wb_data, // data para wb
226     input write_reg,    // pin que indica si realizar wb
227     input is_wb_data_fp, // indica si el reg de wb es fp o no
228     input is_rs1_fp,    // indica si el reg source 1 es fp o no
229     input is_rs2_fp,    // indica si el reg source 2 es fp o no
230     output [31:0] rs1,   // data de reg source 1
231     output [31:0] rs2,   // data de reg source 2
232     output [31:0] rs3   // data de reg source 3
233 );
234     reg[31:0] int_registers[31:0];
235     reg[31:0] fp_registers[31:0];
236 initial for(int i=0; i<32; i++) begin
237     if(i == 2) {int_registers[i], fp_registers[i]} = {32'h2FFC, 32'b0}; // sp
238     else if(i == 3) {int_registers[i], fp_registers[i]} = {32'h1800, 32'b0}; // gp
239     else {int_registers[i], fp_registers[i]} = '0;
240 end
241 assign rs1 = is_rs1_fp ? fp_registers[rs1_add] : int_registers[rs1_add];
242 assign rs2 = is_rs2_fp ? fp_registers[rs2_add] : int_registers[rs2_add];

```

```

237 assign rs3 = fp_registers[rs3_addr];
238 always @ (negedge clk)
239   if(write_reg)
240     if(is_wb_data_fp) fp_registers[wb_addr] <= wb_data;
241   else begin
242     if(wb_addr == 5'd0) int_registers[wb_addr] <= 32'd0;
243     else int_registers[wb_addr] <= wb_data;
244   end
245 endmodule

```

cache_controller.sv: Archivo que describe el *cache_controller*.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4
5 THIS CODE WAS EXTRACTED FROM: D. A. Patterson and J. L. Hennessy, "Computer
   → Organization and Design, The Hardware Software/Interface: RISC-V Edition".
   → Cambridge, Estados Unidos: Morgan Kaufmann, 2018.
6 */
7
8 'timescale 1ns / 1ps
9
10 // Data structures for cache tad & data
11
12 parameter int TAGMSB = 31; // tag msb
13 parameter int TAGLSB = 14; // tag lsb
14
15 // Data structure for cache tag
16 typedef struct packed{
17   bit valid;           // valid bit
18   bit dirty;          // dirty bit
19   bit [TAGMSB:TAGLSB]tag; // tag bits
20 } cache_tag_type;
21
22 // Data structure fot cache memory request
23 typedef struct{
24   bit [9:0]index; // 10-bit index
25   bit we;        // write enable
26 } cache_req_type;
27
28 // 128-bit cache line data
29 typedef bit [127:0]cache_data_type;
30
31 // Data structures for CPU <-> Cache controller interface
32
33 // CPU request (CPU -> cache controller)
34 typedef struct{
35   bit [31:0]addr; // 32-bit request addr
36   bit [31:0]data; // 32-bit request data (used when write)
37   bit rw;        // request type: 0=read, 1=write
38   bit valid;    // request is valid

```

```

39 } cpu_req_type;
40
41 // Cache result (cache controller -> CPU)
42 typedef struct{
43     bit [31:0]data; // 32-bit data
44     bit ready;    // result is ready
45 } cpu_result_type;
46
47 // Data structures for cache controller <-> memory interface
48
49 // Memory request (cache controller -> memory)
50 typedef struct{
51     bit [31:0]addr; // Request byte addr
52     bit [127:0]data; // 128-bit request data (used when write)
53     bit rw;        // request type: 0=read, 1=write
54     bit valid;     // request is valid
55 } mem_req_type;
56
57 // Memory controller response (memory -> cache controller)
58 typedef struct{
59     cache_data_type data; // 128-bit read back data
60     bit ready;          // data is ready
61 } mem_data_type;
62
63 /////////////////////////////////
64
65 /* cache: data memory, single port, 1024 blocks */
66 module dm_cache_data(input bit clk,
67                       input cache_req_type data_req, // data request/command, e.g. RW.
68                       ↗ valid
69                       input cache_data_type data_write, // write port (128-bit line)
70                       output cache_data_type data_read // read port
71 );
72 timeunit 1ns;
73 timeprecision 1ps;
74
75 cache_data_type data_mem[0:1023];
76
77 initial begin
78     for(int i=0; i<1024; i++)
79         data_mem[i] = '0;
80     end
81
82 assign data_read = data_mem[data_req.index];
83
84 always_ff @(posedge(clk)) begin
85     if(data_req.we)
86         data_mem[data_req.index] <= data_write;
87     end
88 endmodule
89

```

```

90 /* cache: tag memory, single port, 1024 blocks */
91 module dm_cache_tag(input bit clk, // write clock
92                      input cache_req_type tag_req, // tag request/command, e.g. RW, valid
93                      input cache_tag_type tag_write, // write port
94                      output cache_tag_type tag_read // read port
95 );
96 timeunit 1ns;
97 timeprecision 1ps;
98
99 cache_tag_type tag_mem[0:1023];
100
101 initial begin
102   for(int i=0; i<1024; i++)
103     tag_mem[i] = '0;
104 end
105
106 assign tag_read = tag_mem[tag_req.index];
107
108 always_ff @(posedge(clk)) begin
109   if(tag_req.we)
110     tag_mem[tag_req.index] <= tag_write;
111 end
112
113 endmodule
114
115 //////////////////////////////////////////////////////////////////
116
117 /* cache finite state machine */
118 module dm_cache_fsm(input bit clk, input bit rst,
119                      input cpu_req_type cpu_req, // CPU request input (CPU -> cache)
120                      input mem_data_type mem_data, // memory response (memory ->
121                      → cache)
122                      output mem_req_type mem_req, // memory request (cache ->
123                      → memory)
124                      output cpu_result_type cpu_res // CPU response output (cache -> CPU);
125                      );
126 timeunit 1ns;
127 timeprecision 1ps;
128
129 /* write clock */
130 typedef enum {idle, compare_tag, allocate, write_back} cache_state_type;
131
132 /* FSM register */
133 cache_state_type vstate, rstate;
134
135 /* interface signals to tag memory */
136 cache_tag_type tag_read; // tag read result
137 cache_tag_type tag_write; // tag write data
138 cache_req_type tag_req; // tag request
139
140 /* interface signals to cache data memory */
141 cache_data_type data_read; // data read result

```

```

140 cache_data_type data_write; // data write data
141 cache_req_type data_req; // data request
142
143 /* temporary variable for cache controller result */
144 cpu_result_type v_cpu_res;
145
146 /* temporary variable for memorye controller request */
147 mem_req_type v_mem_req;
148
149 // Connect to output ports
150 assign mem_req = v_mem_req;
151 assign cpu_res = v_cpu_res;
152
153 always_comb begin
154
155     /*----- default values for all signals -----*/
156
157     /* no state change by default */
158     vstate = rstate;
159     v_cpu_res = '{0, 0};
160     tag_write = '{0, 0, 0};
161
162     /* read tag by default */
163     tag_req.we = '0;
164     /* direct map index for tag */
165     tag_req.index = cpu_req.addr[13:4];
166
167     /* read current cache line by default */
168     data_req.we = '0;
169     /* direct map index for cache data */
170     data_req.index = cpu_req.addr[13:4];
171
172     /* modify correct word (32-bits) based on address */
173     data_write = data_read;
174     case(cpu_req.addr[3:2])
175         2'b00: data_write[31:0] = cpu_req.data;
176         2'b01: data_write[63:32] = cpu_req.data;
177         2'b10: data_write[95:64] = cpu_req.data;
178         2'b11: data_write[127:96] = cpu_req.data;
179     endcase
180
181     /* read out correct word (32-bits) from cache (to CPU) */
182     case(cpu_req.addr[3:2])
183         2'b00: v_cpu_res.data = data_read[31:0];
184         2'b01: v_cpu_res.data = data_read[63:32];
185         2'b10: v_cpu_res.data = data_read[95:64];
186         2'b11: v_cpu_res.data = data_read[127:96];
187     endcase
188
189     /* memory request address (sampled from CPU request) */
190     v_mem_req.addr = cpu_req.addr;
191     /* memory request data (used in write) */

```

```

192     v_mem_req.data = data_read;
193
194     v_mem_req.rw = '0;
195     v_mem_req.valid = '0; // MOD: faltaba
196
197     /*----- cache FSM -----*/
198     case(rstate)
199         /* idle state */
200         idle: begin
201             /* if there is a CPU request, then compare cache tag */
202             if(cpu_req.valid)
203                 vstate = compare_tag;
204         end
205         /* compare_tag state */
206         compare_tag: begin
207             /* cache hit (tag match and cache entry is valid) */
208             if(cpu_req.addr[TAGMSB:TAGLSB] == tag_read.tag && tag_read.valid) begin
209                 v_cpu_res.ready = '1;
210                 /* write hit */
211                 if(cpu_req.rw) begin
212                     /* read/modify cache line */
213                     tag_req.we = '1;
214                     data_req.we = '1;
215                     /* no change in tag */
216                     tag_write.tag = tag_read.tag;
217                     tag_write.valid = '1;
218                     /* cache line is dirty */
219                     tag_write.dirty = '1;
220                 end
221                 /* xaction is finished */
222                 vstate = cpu_req.valid ? compare_tag : idle; // MOD: original -> //vstate =
223             ↣ idle;
224             end
225             /* cache miss */
226             else begin
227                 /* generate new tag */
228                 tag_req.we = '1;
229                 tag_write.valid = '1;
230                 /* new tag */
231                 tag_write.tag = cpu_req.addr[TAGMSB:TAGLSB];
232                 /* cache line is dirty if write */
233                 tag_write.dirty = cpu_req.rw;
234                 /* generate memory request on miss */
235                 v_mem_req.valid = '1;
236                 /* compulsory miss or miss with clean block */
237                 if(tag_read.valid == 1'b0 || tag_read.dirty == 1'b0)
238                     /* wait till a new block is allocated */
239                     vstate = allocate;
240                 /* miss with dirty line */
241                 else begin
242                     /* write back address */
243                     v_mem_req.addr = {tag_read.tag, cpu_req.addr[TAGLSB-1:0]};

```

```

243         v_mem_req.rw = '1;
244         /* wait till write is completed */
245         vstate = write_back;
246     end
247 end
248
249 /* wait for allocating a new cache line */
250 allocate: begin
251     /* memory controller has responded */
252     if(mem_data.ready) begin
253         /* re-compare tag for write miss (need modify correct word) */
254         vstate = compare_tag;
255         data_write = mem_data.data;
256         /* update cache line data */
257         data_req.we = '1;
258     end
259 end
260
261 /* wait for writing back dirty cache line */
262 write_back: begin
263     /* write back is completed */
264     if(mem_data.ready) begin
265         /* issue new data memory request (allocating a new line) */
266         v_mem_req.valid = '1;
267         v_mem_req.rw = '0;
268         vstate = allocate;
269     end
270 endcase
271
272 end
273
274 always_ff @(posedge(clk)) begin
275     if(rst)
276         rstate <= idle; // reset to idle state
277     else
278         rstate <= vstate;
279 end
280
281 /* connect cache tag/data memory */
282 dm_cache_tag ctag(.*);
283 dm_cache_data cdata(.*);
284
285 endmodule
286
287 /////////////////////////////////
288
289 /* TOP MODULE OF THIS FILE */
290 module cache_controller(
291     input clk,
292     input rst,
293     input [31:0] cpu_addr,
294     input [31:0] cpu_data_in,

```

```

295     input cpu_rw,
296     input cpu_valid,
297     input [127:0] mem_data_in,
298     input mem_ready,
299     output [31:0] cpu_data_out,
300     output cpu_ready,
301     output [31:0] mem_addr,
302     output [127:0] mem_data_out,
303     output mem_rw,
304     output mem_valid
305 );
306
307 // Inputs
308 cpu_req_type cpu_req;
309 mem_data_type mem_data;
310
311 // Outputs
312 mem_req_type mem_req;
313 cpu_result_type cpu_res;
314
315 // Input connections
316 assign cpu_req = '{addr:cpu_addr, data:cpu_data_in, rw:cpu_rw, valid:cpu_valid};
317 assign mem_data = '{data:mem_data_in, ready:mem_ready};
318
319 // Output connections
320 assign mem_addr = mem_req.addr;
321 assign mem_data_out = mem_req.data;
322 assign mem_rw = mem_req.rw;
323 assign mem_valid = mem_req.valid;
324 assign cpu_data_out = cpu_res.data;
325 assign cpu_ready = cpu_res.ready;
326
327 // FSM
328 dm_cache_fsm cache_fsm(clk, rst, cpu_req, mem_data, mem_req, cpu_res);
329
330 endmodule

```

memory.sv: Archivo *top* de las memorias implementadas que contiene los submódulos *cache_controller* y *block_ram*.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4 */
5 'timescale 1ns / 1ps
6
7 module memory #(parameter initial_option=0)(
8     input clk,           // global clock
9     input rst,           // reset cache FSM
10    input rw,            // =1 -> write, =0 -> read
11    input valid,         // do operation
12    input [31:0] addr,   // address from cpu

```

```

13    input [31:0] data_in,      // data to save
14    input [1:0] byte_half_word, // Options; 00 or 11->word, 01->halfword, 10->byte
15    input is_load_unsigned,   // =1 -> load is unsigned, =0 -> load is signed
16    output reg ready,        // the operation is ready
17    output out_of_range,    // the address is out of range
18    output reg [31:0] data_out // readed data
19 );
20
21 // para manejar el almacenamiento de datos en el always
22 reg lecture_flag;
23
24 // entradas indirectas (que pasan por always combinacional) del cache
25 reg [31:0] data_to_cache;
26 reg rw_to_cache;
27 reg valid_to_cache;
28
29 // conexiones desde la salida del cache al always combinacional
30 wire [31:0] data_from_cache; // salida indirecta a cpu
31 wire ready_from_cache; // salida indirecta a cpu
32 wire [31:0] addr_from_cache; // salida indirecta a bram
33
34 // entrada indirecta de la bram desde el cache
35 wire [11:0] addr_to_bram; // esto es mas bien un indice
36
37 // conexiones desde la salida de cache a la entrada de bram
38 wire [127:0] data_from_cache_to_bram;
39 wire valid_from_cache_to_bram;
40 wire rw_from_cache_to_bram;
41
42 // conexiones desde la salida de bram a la entrada de cache
43 wire [127:0] data_from_bram_to_cache;
44 wire ready_from_bram_to_cache;
45
46 // Se verifica que la dirección está en el rango de la memoria ram (3906*4*4bytes = 62496
47 // → bytes = 62.496KB)
48 assign out_of_range = addr > 32'b1111_0100_0001_1111 ? '1 : '0;
49
50 // Se ajusta dirección recibida por bram (recibe 14 bits de addr)
51 assign addr_to_bram = addr_from_cache[15:4];
52
53 // always necesario para manejar byte, halfword, word
54 always_comb begin
55     lecture_flag = 0;
56     data_out = 32'b0;
57     data_to_cache = 32'b0;
58     rw_to_cache = 0;
59     ready = 0;
60     valid_to_cache = 0;
61     if(~out_of_range*valid) begin
62         valid_to_cache = 1;
63         if(rw) begin // escritura
64             if(ready_from_cache & ~lecture_flag) begin

```

```

64         data_out = data_from_cache;
65         lecture_flag = 1;
66     end
67     if(lecture_flag) begin
68         valid_to_cache = 0;
69         case(byte_half_word)
70             2'b01: begin // 01->store halfword (little endian)
71                 case(addr[1])
72                     1'b0: data_to_cache = {data_out[31:16],data_in[15:0]};
73                     1'b1: data_to_cache = {data_in[15:0],data_out[15:0]};
74                 endcase
75             end
76             2'b10: begin // 10->store byte (little endian)
77                 case(addr[1:0])
78                     2'b00: data_to_cache = {data_out[31:8],data_in[7:0]};
79                     2'b01: data_to_cache = {data_out[31:16],data_in[7:0],data_out
80                         ↪ [7:0]};
81                     2'b10: data_to_cache = {data_out[31:24],data_in[7:0],data_out
82                         ↪ [15:0]};
83                     2'b11: data_to_cache = {data_in[7:0],data_out[23:0]};
84                 endcase
85             end
86             default: begin // 00 or 11->store word
87                 data_to_cache = data_in;
88             end
89         endcase
90         rw_to_cache = 1;
91         valid_to_cache = 1;
92         ready = ready_from_cache;
93     end
94     else begin // lectura is_load_unsigned
95         if(ready_from_cache) begin
96             case(byte_half_word)
97                 2'b01: begin // 01->load halfword (little endian)
98                     case(addr[1])
99                         1'b0: data_out = is_load_unsigned ? 32'(unsigned'
100                             ↪ data_from_cache[15:0])) : 32'(signed'(data_from_cache[15:0]));
101                         1'b1: data_out = is_load_unsigned ? 32'(unsigned'
102                             ↪ data_from_cache[31:16])) : 32'(signed'(data_from_cache[31:16]));
103                     endcase
104                 end
105                 2'b10: begin // 10->load byte (little endian)
106                     case(addr[1:0])
107                         2'b00: data_out = is_load_unsigned ? 32'(unsigned'
108                             ↪ data_from_cache[7:0])) : 32'(signed'(data_from_cache[7:0]));
109                         2'b01: data_out = is_load_unsigned ? 32'(unsigned'
110                             ↪ data_from_cache[15:8])) : 32'(signed'(data_from_cache[15:8]));
111                         2'b10: data_out = is_load_unsigned ? 32'(unsigned'
112                             ↪ data_from_cache[23:16])) : 32'(signed'(data_from_cache[23:16]));
113                         2'b11: data_out = is_load_unsigned ? 32'(unsigned'
114                             ↪ data_from_cache[31:24])) : 32'(signed'(data_from_cache[31:24]));

```

```

108         endcase
109     end
110     default: begin // 00 or 11->load word
111         data_out = data_from_cache;
112     end
113     endcase
114     ready = 1;
115     valid_to_cache = 1;
116     lecture_flag = 0;
117     data_to_cache = 32'bX;
118     rw_to_cache = 0;
119     end
120   end
121 end
122 else begin
123   lecture_flag = 0;
124   data_out = 32'bX;
125   data_to_cache = 32'bX;
126   rw_to_cache = 0;
127   ready = 0;
128   valid_to_cache = 0;
129 end
130 end
131
132 cache_controller cache_controller_unit(
133   //inputs
134   .clk(clk), // global clock
135   .rst(rst), // reset cache
136   .cpu_addr(addr), // (32 bits) address from cpu
137   .cpu_data_in(data_to_cache), // (32 bits) bus dependiente de always combinacional
138   .cpu_rw(rw_to_cache), // rw dependiente de always combinacional
139   .cpu_valid(valid_to_cache), // valid dependiente de always combinacional
140   .mem_data_in(data_from_bram_to_cache), // (128 bits) conectado directamente con
141   ↪ la salida (data_out) de bram
142   .mem_ready(ready_from_bram_to_cache), // conectado directamente con la salida (
143   ↪ ready) de bram
144   //outputs
145   .cpu_data_out(data_from_cache), // (32 bits) salida que va a always combinacional
146   .cpu_ready(ready_from_cache), // salida que va a always combinacional
147   .mem_addr(addr_from_cache), // (32 bits) salida que va a always combinacional
148   .mem_data_out(data_from_cache_to_bram), // (128 bits) conectado directamente a
149   ↪ la entrada (data_in) de la bram
150   .mem_rw(rw_from_cache_to_bram), // conectado directamente a la entrada (rw) de
151   ↪ la bram
152   .mem_valid(valid_from_cache_to_bram) // conectado directamente a la entrada (
153   ↪ valid) de la bram
154 );
155
156 block_ram #(.initial_option(initial_option)) block_ram_unit(
157   //inputs
158   .clk(clk), // global clock
159   .addr(addr_to_bram), // (14 bits) bus dependiente de always combinacional

```

```

155     .data_in(data_from_cache_to_bram), // (128 bits) conectado directamente con la
156     ↪ salida (mem_data_out) del cache
157     .rw(rw_from_cache_to_bram), // conectado directamente con la salida (mem_rw) del
158     ↪ cache
159     .valid(valid_from_cache_to_bram), // conectado directamente con la salida (
160     ↪ mem_valid) del cache
161     //outputs
162     .data_out(data_from_bram_to_cache), // (128 bits) conectado directamente a la
163     ↪ entrada (mem_data_in) del cache
164     .ready(ready_from_bram_to_cache) // conectado directamente a la entrada (
165     ↪ mem_ready) del cache
166 );
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187

```

ALU.sv: Archivo que contiene los módulos *ALU* y *alu_op_selection*.

```
1 /*  
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute  
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021  
4 */  
5 'timescale 1ns / 1ps  
6  
7 module alu_op_selection(  
8     input [6:0] imm_11_5, // imm[11:5]  
9     input [3:0] funct7_out,  
10    input [2:0] format_type, sub_format_type, funct3,  
11    output reg [4:0] alu_option
```

```

12 );
13 always_comb
14   if(format_type==3'b000 & sub_format_type==3'b001) // R (no FP)
15     case(func3)
16       3'b000: alu_option = (funct7_out==4'b0000) ? 5'b00_000 : // add
17           ((funct7_out==4'b0010) ? 5'b00_001 : // sub
18           ((funct7_out==4'b0001) ? 5'b10_000 : // mul
19             5'bxx_xxx));
20       3'b001: alu_option = (funct7_out==4'b0000) ? 5'b00_101 : // sll
21           ((funct7_out==4'b0001) ? 5'b11_000 : // mulh
22             5'bxx_xxx);
23       3'b010: alu_option = (funct7_out==4'b0000) ? 5'b01_010 : // slt
24           ((funct7_out==4'b0001) ? 5'b11_010 : // mulsu
25             5'bxx_xxx);
26       3'b011: alu_option = (funct7_out==4'b0000) ? 5'b01_011 : // sltu
27           ((funct7_out==4'b0001) ? 5'b11_001 : // mulu
28             5'bxx_xxx);
29       3'b100: alu_option = (funct7_out==4'b0000) ? 5'b00_010 : // xor
30           ((funct7_out==4'b0001) ? 5'b10_011 : // div
31             5'bxx_xxx);
32       3'b101: alu_option = (funct7_out==4'b0000) ? 5'b00_110 : // srl
33           ((funct7_out==4'b0010) ? 5'b00_111 : // sra
34           ((funct7_out==4'b0001) ? 5'b10_100 : // divu
35             5'bxx_xxx));
36       3'b110: alu_option = (funct7_out==4'b0000) ? 5'b00_011 : // or
37           ((funct7_out==4'b0001) ? 5'b10_101 : // rem
38             5'bxx_xxx);
39       3'b111: alu_option = (funct7_out==4'b0000) ? 5'b00_100 : // and
40           ((funct7_out==4'b0001) ? 5'b10_111 : // remu
41             5'bxx_xxx);
42     default: alu_option = 5'bxx_xxx;
43   endcase
44   else if(format_type==3'b100) // B
45     case(func3)
46       3'b000: alu_option = 5'b01_000; // beq
47       3'b001: alu_option = 5'b01_001; // bne
48       3'b100: alu_option = 5'b01_010; // blt
49       3'b101: alu_option = 5'b01_100; // bge
50       3'b110: alu_option = 5'b01_011; // bltu
51       3'b111: alu_option = 5'b01_101; // bgeu
52     default: alu_option = 5'bxx_xxx;
53   endcase
54   else if(format_type==3'b010) // I
55     if(sub_format_type==3'b001) // (addi, xori, ori, andi, slli, srli, srai, slti, sltiu)
56       case (funct3)
57         3'b000: alu_option = 5'b00_000; // addi
58         3'b001: alu_option = 5'b00_101; // slli
59         3'b010: alu_option = 5'b01_010; // slti
60         3'b011: alu_option = 5'b01_011; // sltiu
61         3'b100: alu_option = 5'b00_010; // xori
62         3'b101: alu_option = (imm_11_5==7'b000_0000) ? 5'b00_110 : // srli
63             ((imm_11_5==7'b010_0000) ? 5'b00_111 : // srai

```

```

54                                     5'bxx_xxx);
55
56      3'b110: alu_option = 5'b 00_011; // ori
57      3'b111: alu_option = 5'b 00_100; // andi
58      default: alu_option = 5'bxx_xxx;
59
60      endcase
61
62      else
63          alu_option = 5'b00_000;
64
65      else
66          alu_option = 5'b00_000; // S(011) & default
67
68  endmodule
69
70
71 module ALU(
72     input [31:0] in1,
73     input [31:0] in2,
74     input [4:0] operation,
75     output [31:0] res,
76     output boolean_res
77 );
78
79     wire [31:0] res_simple, res_mul;
80     wire temp_boolean_res;
81
82     assign res      = (operation[4:3] == 2'b00) ? res_simple :
83             ((operation[4] == 1'b1)    ? res_mul :
84             ((operation[4:3] == 2'b01) ? (temp_boolean_res ? 32'b1 : 32'b0) : 32'bX))
85             ↵ ;
86
87     assign boolean_res = (operation[4:3] == 2'b01) ? temp_boolean_res : 1'b0;
88 /*
89 over/under-flow se debe controlar mediante software
90 integer_sub_alu_simple:
91     operation=00_000: + add
92     operation=00_001: - sub
93     operation=00_010: ^ xor
94     operation=00_011: | or
95     operation=00_100: & and
96     operation=00_101: << shift left
97     operation=00_110: >> shift right
98     operation=00_111: >> shift right (MSB extend)
99 integer_sub_alu_comparison:
100    operation=01_000: == equality
101    operation=01_001: != difference
102    operation=01_010: < is less than
103    operation=01_011: < is less than (unsigned)
104    operation=01_100: >= is bigger or equal
105    operation=01_101: >= is bigger or equal (unsigned)
106 integer_sub_alu_mul:
107    operation=10_000: * mul
108    operation=11_000: * mul high
109    operation=11_001: * mul high (unsigned)
110    operation=11_010: * mul high (signed*unsigned)
111    operation=10_011: / div
112    operation=10_100: / div (unsigned)
113    operation=10_101: % modulo
114    operation=10_111: % modulo (unsigned)

```

```

115 /*
116     integer_sub_alu_simple    simple_alu    (in1, in2, operation[2:0], res_simple);
117     integer_sub_alu_comparison comparison_alu(in1, in2, operation[2:0], temp_boolean_res
118         → );
119     integer_sub_alu_mul       mul_alu      (in1, in2, operation[2:0], operation[3], res_mul);
120 
```

```

121 module integer_sub_alu_simple(
122     input [31:0] in1,
123     input [31:0] in2,
124     input [2:0] sub_option,
125     output reg [31:0] res
126 );
127     always_comb begin
128         case(sub_option)
129             3'b000: // operation=00_000: + add
130                 res = in1 + in2;
131             3'b001: // operation=00_001: - sub
132                 res = in1 - in2;
133             3'b010: // operation=00_010: ^ xor
134                 res = in1 ^ in2;
135             3'b011: // operation=00_011: | or
136                 res = in1 | in2;
137             3'b100: // operation=00_100: & and
138                 res = in1 & in2;
139             3'b101: // operation=00_101: << shift left
140                 res = (unsigned'(in1) <<unsigned'(in2[4:0]));
141             3'b110: // operation=00_110: >> shift right
142                 res = (unsigned'(in1) >>unsigned'(in2[4:0]));
143             3'b111: // operation=00_111: >> shift right (MSB extend)
144                 res = (signed'(in1) >>unsigned'(in2[4:0]));
145             default:
146                 res = 32'bX;
147         endcase
148     end
149 
```

```

150 endmodule
151
152 module integer_sub_alu_comparison(
153     input [31:0] in1,
154     input [31:0] in2,
155     input [2:0] sub_option,
156     output reg boolean_res
157 );
158     always_comb begin
159         case(sub_option)
160             3'b000: // operation=01_000: == equality
161                 boolean_res = (in1 == in2) ? 1'b1 : 1'b0;
162             3'b001: // operation=01_001: != difference
163                 boolean_res = (in1 != in2) ? 1'b1 : 1'b0;
164             3'b010: // operation=01_010: < is less than
165                 boolean_res = (signed'(in1) <signed'(in2)) ? 1'b1 : 1'b0;
166             3'b011: // operation=01_011: < is less than (unsigned)

```

FPU.sv: Archivo que contiene los módulos *FPU* (este a su vez implementa todos los submódulos de pertinentes a la unidad de punto flotante, en particular integra: *fp_converter.sv* y *fp_arithmetic_unit.sv*) y *fpu_op_selection*.

```
1 /*  
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute  
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021  
4 */
```

```

5  `timescale 1ns / 1ps
6
7  module fpu_op_selection(
8      input [4:0] rs2_add,
9      input [3:0] funct7_out,
10     input [2:0] format_type, sub_format_type, funct3, rm_from_fcsr,
11     output reg [2:0] rm2fpu,
12     output reg [4:0] fpu_option
13 );
14    assign rm2fpu = (funct3 == 3'b111) ? rm_from_fcsr : funct3;
15  always_comb begin
16      if(format_type[2:1]==2'b00)
17          if(format_type[0]) // R4
18              case (sub_format_type)
19                  3'b000:   fpu_option = 5'b0_00_00; // fmadd.s
20                  3'b001:   fpu_option = 5'b0_00_01; // fmsub.s
21                  3'b010:   fpu_option = 5'b0_00_10; // fnmsub.s
22                  3'b011:   fpu_option = 5'b0_00_11; // fnmadd.s
23                  default: fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
24          endcase
25      else // R
26          if(sub_format_type!=3'b000) fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
27      else
28          case(funct7_out)
29              /*-----*/
30                  4'b0000: fpu_option = 5'b 1_00_00; // fadd.s
31                  4'b0011: fpu_option = 5'b 1_00_01; // fsub.s
32                  4'b0100: fpu_option = 5'b 1_00_10; // fmuls.s
33                  4'b0101: fpu_option = 5'b 1_00_11; // fdiv.s
34                  4'b0110: fpu_option = 5'b 1_01_00; // fsqrt.s
35              /*-----*/
36                  4'b0111:case(funct3)
37                      3'b000: fpu_option = 5'b0_11_00; // fsgnj.s
38                      3'b001: fpu_option = 5'b0_11_01; // fsgnjn.s
39                      3'b010: fpu_option = 5'b0_11_10; // fsgnjx.s
40                      default: fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
41          endcase
42      /*-----*/
43                  4'b1000:case(funct3)
44                      3'b000: fpu_option = 5'b0_10_00; // fmin.s
45                      3'b001: fpu_option = 5'b0_10_01; // fmax.s
46                      default: fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
47          endcase
48      /*-----*/
49                  4'b1001:case(rs2_add)
50                      5'b00000: fpu_option = 5'b0_01_00; // fcvt.s.w
51                      5'b00001: fpu_option = 5'b0_01_01; // fcvt.s.wu
52                      default: fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
53          endcase
54                  4'b1010:case(rs2_add)
55                      5'b00000: fpu_option = 5'b0_01_10; // fcvt.w.s
56                      5'b00001: fpu_option = 5'b0_01_11; // fcvt.wu.s

```

```

57         default: fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
58     endcase
59     /*
60     4'b 1101:case(func3)
61         3'b000: fpu_option = 5'b1_10_00; // fls.s
62         3'b001: fpu_option = 5'b1_10_01; // flt.s
63         3'b010: fpu_option = 5'b1_10_10; // feq.s
64         default: fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
65     endcase
66     /*
67     4'b1011: fpu_option = (func3==3'b001) ? 5'b0_11_11 : 5'b1_11_11; //
68     ↵ fclass.s
69     /*
70         default: fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
71     endcase
72     else fpu_option = 5'b1_11_11; // not valid option
73 end
74 /*
75 option = f(format_type[2:0], funct7_out[3:0], funct3[2:0], rs2_option)
76 format_type[2:0]= (only for FPU)
77     000 -> R type
78     001 -> R4 type
79     011 -> S type (mem option, not used here)
80     010 -> I type (mem option, not used here)
81     111 -> Not valid type
82 sub_format_type[2:0]= (only for R4)
83     -000 -> R4 (FP- fmadd.s)
84     -001 -> R4 (FP- fmsub.s)
85     -010 -> R4 (FP- fnmsub.s)
86     -011 -> R4 (FP- fnmadd.s)
87 funct7_out[3:0]= (only for FPU)
88     if Funct7[6:0]==0000000: Funct7-out[3:0]=0000
89     if Funct7[6:0]==0000100: Funct7-out[3:0]=0011
90     if Funct7[6:0]==0001000: Funct7-out[3:0]=0100
91     if Funct7[6:0]==0001100: Funct7-out[3:0]=0101
92     if Funct7[6:0]==0101100: Funct7-out[3:0]=0110
93     if Funct7[6:0]==0010000: Funct7-out[3:0]=0111
94     if Funct7[6:0]==0010100: Funct7-out[3:0]=1000
95     if Funct7[6:0]==1101000: Funct7-out[3:0]=1001
96     if Funct7[6:0]==1100000: Funct7-out[3:0]=1010
97     if Funct7[6:0]==1110000: Funct7-out[3:0]=1011
98     if Funct7[6:0]==1111000: Funct7-out[3:0]=1100
99     if Funct7[6:0]==1010000: Funct7-out[3:0]=1101
100 funct3[2:0]= 000 | 001 | 010 | rm
101 rm[2:0]=
102     000 -> RNE
103     001 -> RTZ
104     010 -> RDN
105     011 -> RUP
106     100 -> RMM
107     101 -> (Invalid)

```

```

108     110 -> (Invalid)
109     111 -> DYN: In instruction's rm field, selects dynamic rounding mode; In Rounding
110     ↪ Mode register, Invalid.
111     rs2_option= 0 | 1
112
113     =      format_type sub_format_type funct3 funct7_out rs2_add -> fpu_option
114     -----
114     fmadd.s   R4 001    000      rm    ---    --- -> 0_00_00
115     fmsub.s   R4 001    001      rm    ---    --- -> 0_00_01 DA: double
116     ↪ arithmetic
116     fnmsub.s   R4 001    010      rm    ---    --- -> 0_00_10 0_00_XX
117     fnmadd.s   R4 001    011      rm    ---    --- -> 0_00_11
118
119     -----
119     fadd.s    R 000     000      rm    0000    --- -> 1_00_00
120     fsub.s    R 000     000      rm    0011    --- -> 1_00_01
121     fmul.s    R 000     000      rm    0100    --- -> 1_00_10 AM:
121     ↪ arithmetic
122     fdiv.s    R 000     000      rm    0101    --- -> 1_00_11 1_0X_XX
123     fsqrt.s   R 000     000      rm    0110    00000 -> 1_01_00
124
124     -----
125     fsgnj.s   R 000     000      000    0111    --- -> 0_11_00
126     fsgnjn.s  R 000     000      001    0111    --- -> 0_11_01 SG: sgnj
127     fsgnjx.s  R 000     000      010    0111    --- -> 0_11_10 0_11_XX
128
128     -----
129     fmin.s    R 000     000      000    1000    --- -> 0_10_00 MM: max/
129     ↪ min
130     fmax.s    R 000     000      001    1000    --- -> 0_10_01 0_10_0X
131
131     -----
132     fcvt.s.w  R 000     000      rm    1001    00000 -> 0_01_00
133     fcvt.s.wu R 000     000      rm    1001    00001 -> 0_01_01 CO:
133     ↪ Conversions
134     fcvt.w.s  R 000     000      rm    1010    00000 -> 0_01_10 0_01_XX
135     fcvt.wu.s R 000     000      rm    1010    00001 -> 0_01_11
136
136     -----
137     fles       R 000     000      000    1101    --- -> 1_10_00
138     flt.s     R 000     000      001    1101    --- -> 1_10_01 CM:
138     ↪ Comparisson
139     feq.s     R 000     000      010    1101    --- -> 1_10_10 1_10_XX
140
140     -----
141     fclass.s  R 000     000      001    1011    00000 -> 0_11_11 CS: Class
142
142     -----
143                         0_11_11
143                         1_11_11 not valid
144 */
145 module FPU(
146     input start, rst, clk, // start: Need to be on til the op is ready
147     input [2:0] rm,
148     input [4:0] option,
149     input [31:0] in1, in2, in3,
150     output reg NV, NX, UF, OF, DZ, ready,
151     output reg [31:0] out
152 );
153     typedef enum {

```

```

154     waiting_state, CS_state, MM_state, CM_state, CO_state, SG_state,
155     DA_state1, DA_state2, DA_state3, DA_state4, AM_state
156 } state_type;
157 state_type actual_state, next_state;
158 reg sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic;
159 reg [2:0] op_to_arithmetic;
160 wire NX_from_converter, NV_from_converter, NV_from_comparator,
161     ready_from_arithmetic, ready_from_converter, NV_max_min, in1_is_nan,
162     ↪ in2_is_nan,
163     UF_from_arithmetic, OF_from_arithmetic, NV_from_arithmetic,
164     ↪ DZ_from_arithmetic, NX_from_arithmetic,
165     NV_r4_middle, NX_r4_middle, UF_r4_middle, OF_r4_middle, DZ_r4_middle;
166 wire [2:0] status_from_arithmetic;
167 wire [31:0] in1_to_fp_arithmetic_unit, in2_to_fp_arithmetic_unit, r4_middle_out,
168     out_from_arithmetic, out_from_converter, out_from_classifier,
169     ↪ out_from_comparator,
170     sgnj_out, max_min_out;
171 assign in1_is_nan = (in1[30:23] == 8'b11111111 & in1[22:0] != 23'b0) ? 1 : 0;
172 assign in2_is_nan = (in2[30:23] == 8'b11111111 & in2[22:0] != 23'b0) ? 1 : 0;
173 // SG: sgnj
174 assign sgnj_out = {(option[0] ? ~in2[31] : (option[1] ? in1[31]^in2[31] : in2[31])), in1
175     ↪ [30:0]};
176 // MM: max/min /* notese que los inputs op del modulo fp_comparator para ambos
177     ↪ casos (max min) es considerado */
178 /*
179     option[1:0]=01 > ft y max | option[1:0]=00 > fle y min
180
181     option[0]=1 -> lt: in1 < in2 (flag signaling: signaling comparison) flag when Nan in (res
182     ↪ = 0)
183     option[0]=0 -> le: in1 <= in2 (flag signaling: signaling comparison) flag when Nan in (
184     ↪ res = 0)
185 */
186 assign max_min_out = ~(in1_is_nan & in2_is_nan) ? (option[0] ?
187     (out_from_comparator[0] ? (in2_is_nan ? in1 : in2) : (in1_is_nan ? in2 : in1)) : //
188     ↪ max-ft
189     (out_from_comparator[0] ? (in1_is_nan ? in2 : in1) : (in2_is_nan ? in1 : in2)) // //
190     ↪ min-fle
191     ) : 32'b0_1111111_10000000000000000000000000;
192 assign NV_max_min = ((in1_is_nan&~in1[22]) | (in2_is_nan&~in2[22])) ? 1'b1 : 1'b0;
193 // DA: double arithmetic
194 assign in1_to_fp_arithmetic_unit = sel_arithmetic ? r4_middle_out : in1;
195 assign in2_to_fp_arithmetic_unit = sel_arithmetic ? in3 : in2;
196 assign UF_from_arithmetic = (status_from_arithmetic==3'b001) ? 1'b1 : 1'b0;
197 assign OF_from_arithmetic = (status_from_arithmetic==3'b010) ? 1'b1 : 1'b0;
198 assign NV_from_arithmetic = (status_from_arithmetic==3'b011) ? 1'b1 : 1'b0;
199 assign DZ_from_arithmetic = (status_from_arithmetic==3'b100) ? 1'b1 : 1'b0;
200 assign NX_from_arithmetic = (status_from_arithmetic==3'b111 |
201     status_from_arithmetic==3'b001) ? 1'b1 : 1'b0;
202 /*
203     status =
204         001 -> UF flag
205         010 -> OF flag

```

```

197      011 -> NV flag
198      100 -> DZ flag
199      111 -> NX flag
200  */
201 // FSM
202 always_ff @(posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;
203 always_comb
204     case (actual_state)
205         default: begin
206             out = 32'b0;
207             {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = 6'b00000_0;
208             {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic,
209             → op_to_arithmetic} = {4'b0000, 3'b000};
210             next_state = actual_state;
211         end
212         waiting_state: begin
213             out = 32'b0;
214             {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = 6'b00000_0;
215             {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic,
216             → op_to_arithmetic} = {4'b0010, 3'b000};
217             next_state = start ? ((option[4:0]==5'b0_11_11) ? CS_state :
218                             ((option[4:1]==4'b0_10_0 ) ? MM_state :
219                             ((option[4:2]==3'b1_10 ) ? CM_state :
220                             ((option[4:2]==3'b0_01 ) ? CO_state :
221                             ((option[4:2]==3'b0_11 ) ? SG_state :
222                             ((option[4:2]==3'b0_00 ) ? DA_state1 :
223                             ((option[4:3]==2'b1_0 ) ? AM_state :
224                             waiting_state)))))) : waiting_state;
225         end
226         CS_state: begin
227             out = out_from_classifier;
228             {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = 6'b00000_1;
229             {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic,
230             → op_to_arithmetic} = {4'b0000, 3'b000};
231             next_state = start ? CS_state : waiting_state;
232         end
233         MM_state: begin
234             out = max_min_out;
235             {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = {NV_max_min, 5'b0000_1};
236             {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic,
237             → op_to_arithmetic} = {4'b0000, 3'b000};
238             next_state = start ? MM_state : waiting_state;
239         end
240         CM_state: begin
241             out = out_from_comparator;
242             {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = {NV_from_comparator, 5'b0000_1};
243             {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic,
244             → op_to_arithmetic} = {4'b0000, 3'b000};
245             next_state = start ? CM_state : waiting_state;
246         end
247         CO_state: begin
248             out = out_from_converter;

```

```

244     {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = {NV_from_converter, NX_from_converter, 3'
245     ↳ b000, ready_from_converter};
246     {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic,
247     ↳ op_to_arithmetic} = {4'b0000, 3'b000};
248     next_state = start ? CO_state : waiting_state;
249   end
250   SG_state: begin
251     out = sgnj_out;
252     {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = 6'b00000_1;
253     {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic,
254     ↳ op_to_arithmetic} = {4'b0000, 3'b000};
255     next_state = start ? SG_state : waiting_state;
256   end
257   /*
258   op =
259     000 -> in1+in2  ADD  -1_0 0_00
260     001 -> in1*in2  MUL  -1_0 0_10
261     010 -> in1/in2  DIV  -1_0 0_11
262     011 -> sqrt(in1) SQRT  -1_0 1_00
263     100 -> in1-in2  SUB  -1_0 0_01
264   */
265   AM_state: begin
266     out = out_from_arithmetic;
267     {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = {NV_from_arithmetic, NX_from_arithmetic,
268     ↳ UF_from_arithmetic,
269     OF_from_arithmetic, DZ_from_arithmetic,
270     ↳ ready_from_arithmetic};
271     op_to_arithmetic = (option[2:0]==3'b0_00) ? 3'b000 :
272       ((option[2:0]==3'b0_01) ? 3'b100 :
273       ((option[2:0]==3'b0_10) ? 3'b001 :
274       ((option[2:0]==3'b0_11) ? 3'b010 :
275       ((option[2:0]==3'b1_00) ? 3'b011 :
276       3'bXXX)));
277     {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic} =
278     ↳ 4'b0100;
279     next_state = start ? AM_state : waiting_state;
280   end
281   /*
282   fmadd.s -> option[1:0]=00 -> rd = rs1 * rs2 + rs3
283   fmsub.s -> option[1:0]=01 -> rd = rs1 * rs2 - rs3
284   fmmsub.s -> option[1:0]=10 -> rd = -rs1 * rs2 + rs3
285   fnmadd.s -> option[1:0]=11 -> rd = -rs1 * rs2 - rs3
286   */
287   op =
288     000 -> in1+in2  ADD
289     001 -> in1*in2  MUL
290     100 -> in1-in2  SUB
291     101 -> -in1*in2 -MUL
292   */
293   DA_state1: begin
294     out = 32'b0;
295     {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = {NV_from_arithmetic, NX_from_arithmetic,
296     ↳ UF_from_arithmetic,

```

```

289                      OF_from_arithmetic, DZ_from_arithmetic, 1'b0} );
290          op_to_arithmetic = option[1] ? 3'b101 : 3'b001;
291          {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic} =
292          ↳ 4'b0100;
293          next_state = ready_from_arithmetic ? DA_state2 : DA_state1;
294      end
295      DA_state2: begin
296          out = 32'b0;
297          {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = {NV_from_arithmetic, NX_from_arithmetic,
298          ↳ UF_from_arithmetic,
299                      OF_from_arithmetic, DZ_from_arithmetic, 1'b0} ;
300          op_to_arithmetic = option[1] ? 3'b101 : 3'b001;
301          {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic} =
302          ↳ 4'b0101;
303          next_state = DA_state3;
304      end
305      DA_state3: begin
306          out = 32'b0;
307          {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = 6'b00000_0;
308          op_to_arithmetic = option[0] ? 3'b100 : 3'b000;
309          {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic} =
310          ↳ 4'b1010;
311          next_state = DA_state4;
312      end
313      DA_state4: begin
314          out = out_from_arithmetic;
315          {NV, NX, UF, OF, DZ, ready} = {NV_from_arithmetic | NV_r4_middle,
316          ↳ NX_from_arithmetic | NX_r4_middle,
317                      UF_from_arithmetic | UF_r4_middle,
318                      OF_from_arithmetic | OF_r4_middle,
319                      DZ_from_arithmetic | DZ_r4_middle,
320                      ↳ ready_from_arithmetic};
321          op_to_arithmetic = option[0] ? 3'b100 : 3'b000;
322          {sel_arithmetic, start_to_arithmetic, rst_to_arithmetic, set_reg_arithmetic} =
323          ↳ 4'b1100;
324          next_state = start ? DA_state4 : waiting_state;
325      end
326  endcase
327 // AM: arithmetic
328 fp_arithmetic_unit fp_arithmetic_unit_module(
329     //inputs
330     .start(start_to_arithmetic), .rst(rst | rst_to_arithmetic), .clk(clk),
331     .op(op_to_arithmetic), .rm(rm),
332     .in1(in1_to_fp_arithmetic_unit), .in2(in2_to_fp_arithmetic_unit),
333     //outputs
334     .ready(ready_from_arithmetic), .status(status_from_arithmetic), .out(
335     ↳ out_from_arithmetic)
336 );
337 generic_register #(.(width(32+5)) fp_arithmetic_unit_register
338     .clk(clk), .reset(1'b0), .load(set_reg_arithmetic), .data_in({NV, NX, UF, OF, DZ,
339     ↳ out_from_arithmetic}),
340     .data_out({NV_r4_middle, NX_r4_middle, UF_r4_middle, OF_r4_middle,

```

```

    ↪ DZ_r4_middle, r4_middle_out})
331 );
332 // CO: Conversions
333 fp_converter fp_converter_unit(
334     //inputs
335     .start(start), .rst(rst), .clk(clk),
336     .integer_is_signed(~option[0]), .option(option[1]), .rm(rm), .in(in1),
337     /* option: 0 -> Integer to fp | 1 -> fp to Integer */
338     //outputs
339     .NV(NV_from_converter), .NX(NX_from_converter), .ready(ready_from_converter), .
    ↪ out(out_from_converter)
340 );
341 // CS: Class
342 fp_classifier fp_classifier_unit(
343     //inputs
344     .in(in1),
345     //outputs
346     .out(out_from_classifier)
347 );
348 // CM: Comparisson
349 fp_comparator fp_comparator_unit(
350     //inputs
351     .in1_is_nan(in1_is_nan), .in2_is_nan(in2_is_nan),
352     .op((option[0] ? 2'b01 : (option[1] ? 2'b00 : 2'b10))), .in1(in1), .in2(in2),
353     /* op
            00 -> eq: in1 == in2 (no flag signaling: quiet comparison) no flag when Nan in (res
    ↪ = 0)
            01 -> lt: in1 < in2 (flag signaling: signaling comparison) flag when Nan in (res = 0)
            10 -> le: in1 <= in2 (flag signaling: signaling comparison) flag when Nan in (res = 0)
            11 -> not used but = eq
        */
359     //outputs
360     .invalid_flag(NV_from_comparator), .out(out_from_comparator)
361 );
362 endmodule
363
364 module fp_classifier(
365     input [31:0] in,
366     output reg [31:0] out
367 );
368 always_comb begin
369     out = 32'b0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000_0000;
370     case (in[30:23])
371         default:           if(in[31]) out[1] =1'b1; else out[6] =1'b1;
372             8'b00000000:      if(in[22:0]==23'b0) if(in[31]) out[3] =1'b1; else out[4] =1'b1;
373                 else          if(in[31]) out[2] =1'b1; else out[5] =1'b1;
374             8'b11111111:      if(in[22:0]==23'b0) if(in[31]) out[0] =1'b1; else out[7] =1'b1;
375                 else          if(in[22]) out[9] =1'b1; else out[8] =1'b1;
376         endcase
377     end

```

```

380 endmodule
381
382 module fp_comparator(
383     input in1_is_nan, in2_is_nan,
384     input [1:0] op,
385     input [31:0] in1, in2,
386     output invalid_flag,
387     output [31:0] out
388     /*
389     op =
390         00 -> eq: in1 == in2 (no flag signaling: quiet comparison) no flag when Nan in (res =
391             ↪ 0)
392         01 -> lt: in1 < in2 (flag signaling: signaling comparison) flag when Nan in (res = 0)
393         10 -> le: in1 <= in2 (flag signaling: signaling comparison) flag when Nan in (res = 0)
394         11 -> not used but = eq
395     */
396 );
397     reg less_flag;
398     wire equal_flag;
399     assign equal_flag = (in1 == in2) ? 1'b1 : 1'b0;
400     assign invalid_flag = (op[1] ^ op[0]) ? (in1_is_nan | in2_is_nan) : (in1_is_nan & ~in1[22]
401             ↪ | in2_is_nan & ~in2[22]);
402     assign out = (op == 2'b01) ? ( (less_flag & ~ (in1_is_nan | in2_is_nan))           ?
403             ↪ 32'b1 : 32'b0 ) :
404         (op == 2'b10) ? ( ((less_flag | equal_flag) & ~ (in1_is_nan | in2_is_nan)) ?
405             ↪ 32'b1 : 32'b0 ) :
406             ( (equal_flag & ~ (in1_is_nan | in2_is_nan))           ? 32'b1 :
407                 ↪ 32'b0 ) ;
408     always_comb
409         if(in1[31] == in2[31]) // sig1 = sig2
410             if    (unsigned'(in1[30:23]) < unsigned'(in2[30:23])) less_flag = in1[31] ? 1'b0 : 1'b1;
411             else if(unsigned'(in1[30:23]) > unsigned'(in2[30:23])) less_flag = in1[31] ? 1'b1 : 1'b0;
412             else // exp1 = exp2
413                 if    (unsigned'(in1[22:0]) < unsigned'(in2[22:0])) less_flag = in1[31] ? 1'b0 : 1'b1
414                     ;
415                 else if(unsigned'(in1[22:0]) > unsigned'(in2[22:0])) less_flag = in1[31] ? 1'b1 : 1'
416                     b0;
417                     else less_flag = 1'b0; // in1 = in2
418             else // sig1 != sig2
419                 less_flag = in1[31];
420     endmodule

```

fp_converter.sv: Archivo *top* del módulo *fp_converter* y que incluye todos los submódulos del mismo.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4 */
5 `timescale 1ns / 1ps
6
7 module fp_converter(

```

```

8   input start, rst, clk, integer_is_signed, option, //option: 0 -> Integer to fp | 1 -> fp to
    ↪ Integer
9   input [2:0] rm,
10  input [31:0] in,
11  output NV, NX, ready,// NV: invalid operation NX: inexact
12  output [31:0] out
13 /*
14 rm =
15   000 -> RNE: To nearest, ties to even
16   001 -> RTZ: Toward 0
17   010 -> RDN: Toward -inf
18   011 -> RUP: Toward +inf
19   100 -> RMM: To nearest, ties away from zero
20 */
21 );
22 typedef enum {waiting_state,
23   initial_state,
24   pre_iteration_state_1,
25   pre_iteration_state_2,
26   iteration_state_1,
27   iteration_state_2,
28   iteration_state_3,
29   pre_final_state_1,
30   pre_final_state_2,
31   final_state
32 } state_type;
33 state_type actual_state, next_state;
34 reg sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller;
35 wire start_ctrl, exception_flag, norm_ready, fp_sig, still_norm, NX_fp2, NX_2fp,
   ↪ NX_check;
36 wire [7:0] initial_fp_exp, exp_to_normalizer, exp_from_reg, exp_from_norm,
   ↪ exp_from_rounder;
37 wire [31:0] integer_res, fp_res, exception_res, initial_fp_man, man_to_normalizer,
   man_from_reg, man_from_norm, man_from_rounder;
38 assign start_ctrl = option ? 1'b0 : start;
39 assign ready = (option | exception_flag) ? start : ready_from_controller;
40 assign out = exception_flag ? exception_res : (option ? integer_res : fp_res);
41 assign {exp_to_normalizer, man_to_normalizer} = sel ? {exp_from_reg, man_from_reg
   ↪ } : {initial_fp_exp, initial_fp_man};
42 assign fp_res = {fp_sig, exp_from_reg, man_from_reg[30:8]};
43 assign NX = ( (NX_fp2 & option) | (NX_2fp & ~option) | NX_check) ? 1'b1 : 1'b0;
44 // FSM
45 always_ff @(posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;
46 always_comb begin
47   case(actual_state)
48     default: begin
49       {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b00000;
50       next_state = actual_state;
51     end
52   waiting_state: begin
53     {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b00100;
54     next_state = start_ctrl ? initial_state : waiting_state;
55   end

```

```

56     end
57     initial_state: begin
58         {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b00010;
59         next_state = norm_ready ? (still_norm ? pre_final_state_1 :
60             → pre_iteration_state_1) : initial_state;
61         end
62         pre_iteration_state_1: begin
63             {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b01010;
64             next_state = pre_iteration_state_2;
65             end
66             pre_iteration_state_2: begin
67                 {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b10000;
68                 next_state = iteration_state_1;
69                 end
70                 iteration_state_1: begin
71                     {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b10010;
72                     next_state = norm_ready ? (still_norm ? pre_final_state_2 : iteration_state_2
73             → ) : iteration_state_1;
74             end
75             iteration_state_2: begin
76                 {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b11010;
77                 next_state = iteration_state_3;
78                 end
79                 iteration_state_3: begin
80                     {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b10000;
81                     next_state = iteration_state_1;
82                     end
83                     pre_final_state_1: begin
84                         {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b01010;
85                         next_state = final_state;
86                         end
87                         pre_final_state_2: begin
88                             {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b11010;
89                             next_state = final_state;
90                             end
91                             final_state: begin
92                                 {sel, set, reset, start_norm, ready_from_controller} = 5'b00001;
93                                 next_state = start_ctrl ? final_state : waiting_state;
94                                 end
95                                 endcase
96     end
97     converter_exceptions_checker converter_exceptions_checker_module(
98         .integer_is_signed(integer_is_signed), .option(option), .rm(rm), .in(in),
99         .exception_flag(exception_flag), .invalid_flag(NV), .inexact_flag(NX_check), .
100            → exception_res(exception_res)
101    );
102    fp_to_integer_unit fp_to_integer_unit_module(
103        .integer_is_signed(integer_is_signed), .rm(rm), .fp_in(in),
104        .NX(NX_fp2), .integer_out(integer_res)
105    );
106    integer_to_fp_unit integer_to_fp_unit_module(
107        .integer_is_signed(integer_is_signed), .integer_in(in),

```



```

148 if(option) // fp2integer
149     if(in_as_fp_is_zero) {sel, exception_flag} = {3'b100, 1'b1};
150     else if(in_as_fp_is_nan) {sel, exception_flag} = {(integer_is_signed ? 3'b001 : 3'
151         ↪ b010), 1'b1};
152     else if(exp_lt_0)
153         case(rm)
154             3'b010: {sel, exception_flag} = {((integer_is_signed & in[31]) ? 3'b010 : 3'
155                 ↪ b100), 1'b1}; // RDN
156             3'b011: {sel, exception_flag} = {(in[31] ? 3'b100 : 3'b101), 1'b1};
157             ↪ // RUP
158             3'b001: {sel, exception_flag} = {3'b100, 1'b1};
159             ↪ // RTZ
160             default: {sel, exception_flag} = {((unsigned'(in[30:23]) == unsigned'(8'
161                 ↪ b01111110)) ?
162                     (in[31] ? (integer_is_signed ? 3'b010 : 3'b100) : 3'b101) : 3'b100 ), 1'b1};
163             ↪ // RNE - RMM
164             endcase
165         else if(integer_is_signed) {sel, exception_flag} = exp_gt_30 ? { (in[31] ? 3'b000 : 3'
166             ↪ b001), 1'b1} : {3'bX, 1'b0};
167         else {sel, exception_flag} = in[31] ? {3'b100, 1'b1} : (exp_gt_31 ? {3'b010, 1'b1} :
168             ↪ {3'bX, 1'b0}); // integer_is_signed=0
169         else begin // integer2fp
170             sel = in_is_zeros ? 3'b100 : ((integer_is_signed & in_is_ones) ? 3'b011 : 3'bX);
171             exception_flag = (in_is_zeros | (integer_is_signed & in_is_ones)) ? 1'b1 : 1'b0;
172         end
173     endmodule
174
175 module fp_to_integer_unit(
176     input integer_is_signed,
177     input [2:0] rm,
178     input [31:0] fp_in,
179     output NX,
180     output [31:0] integer_out
181 );
182     wire [54:0] from_shifter;
183     wire [31:0] interger_rounded;
184     assign from_shifter = {32'b1, fp_in[22:0]} << unsigned'(fp_in[30:23]) - unsigned'(8'
185         ↪ b0111111);
186     assign integer_out = (integer_is_signed & fp_in[31]) ? ~interger_rounded+32'b1 :
187         ↪ interger_rounded;
188     integer_rounding integer_rounding_unit(
189         .is_signed(integer_is_signed), .sig_in(fp_in[31]), .rm(rm), .integer_in(from_shifter),
190         .NX(NX), .integer_out(interger_rounded)
191     );
192 endmodule
193
194 module integer_rounding(
195     input is_signed, sig_in,
196     input [2:0] rm,
197     input [54:0] integer_in,
198     output NX,
199     output [31:0] integer_out

```

```

190 );
191 reg sel;
192 wire sticky, is_overflow;
193 wire [2:0] rounding_bits;
194 wire [32:0] temp_out; // se añade bit en caso de overflow para unsigned integer
195 // Se obtienen rounding bits
196 assign sticky = (integer_in[20:0] != 0) ? 1'b1 : 1'b0;
197 assign rounding_bits = {integer_in[22:21], sticky};
198 // Salida falg NX
199 assign NX = (rounding_bits == 3'b0) ? 1'b0 : 1'b1;
200 // Se redondea
201 assign temp_out = sel ? {1'b0, integer_in[54:23]}+33'b1 : {1'b0, integer_in[54:23]};
202 // Se checkea overflow según si es signed o no
203 assign is_overflow = is_signed ? (temp_out[32:31]==2'b0 ? 1'b1 : 1'b0)
204 : (temp_out[ 32 ] !=1'b0 ? 1'b1 : 1'b0);
205 // Se obtiene resultado final
206 assign integer_out = is_overflow ?
207 (is_signed ? 32'b0111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111 : 32'
208 ↪ b1111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111111)
209 : temp_out[31:0];
210 // Logica combinacional de redondeo
211 always_comb
212 case(rounding_bits) // grs
213 3'b000: sel = 1'b0;
214 default: case(rm)
215 3'b000: sel = (rounding_bits[1:0]==2'b0) ? (integer_in[23] ? 1'b1 : 1'b0) : ///
216 ↪ RNE
217 (rounding_bits[2] ? 1'b1 : 1'b0);
218 3'b001: sel = 1'b0; // RTZ
219 3'b010: sel = sig_in ? 1'b1 : 1'b0; // RDN
220 3'b011: sel = ~sig_in ? 1'b1 : 1'b0; // RUP
221 3'b100: sel = (rounding_bits[1:0]==2'b0) ? 1'b1 : ///
222 ↪ RMM
223 (rounding_bits[2] ? 1'b1 : 1'b0);
224 default: sel = 1'b0;
225 endcase
226 endcase
227 endmodule
228
229 module integer_to_fp_unit(
230   input integer_is_signed,
231   input [31:0] integer_in,
232   output sig_out,
233   output [7:0] exp_out,
234   output [31:0] man_out
235 );
236 assign sig_out = (integer_is_signed & (signed'(integer_in)<0)) ? 1'b1 : 1'b0;
237 assign exp_out = 8'b10011110; // = 158 = 127+31
238 assign man_out = sig_out ? ~integer_in+32'b1 : integer_in;
239 endmodule
240
241 module normalizer_integer2fp(

```

```

239 // Input
240 input start, rst, clk,
241 input [7:0] exp_in,
242 input [31:0] man_in,
243 // Output
244 output reg ready,
245 output [7:0] exp_out,
246 output [31:0] man_out
247 );
248 typedef enum {
249     waiting_state, initial_state, iteration_state, final_state
250 } state_type;
251 state_type actual_state, next_state;
252 reg sel, set, reset;
253 wire done;
254 wire [7:0] new_exp;
255 wire [31:0] new_man;
256 wire [39:0] to_reg;
257 assign done = (man_out[31] == 1'b1 | man_out == 0) ? 1'b1 : 1'b0;
258 assign new_exp = unsigned'(exp_out) - unsigned'(8'b1);
259 assign new_man = man_out << 1;
260 assign to_reg = sel ? {new_exp, new_man} : {exp_in, man_in};
261 // FSM
262 always_ff @(posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;
263 always_comb begin
264     case(actual_state)
265         default: begin
266             {sel, set, reset, ready} = 4'b0000;
267             next_state = actual_state;
268         end
269         waiting_state: begin
270             {sel, set, reset, ready} = 4'b0010;
271             next_state = start ? initial_state : waiting_state;
272         end
273         initial_state: begin
274             {sel, set, reset, ready} = 4'b0100;
275             next_state = done ? final_state : iteration_state;
276         end
277         iteration_state: begin
278             {sel, set, reset, ready} = 4'b1100;
279             next_state = done ? final_state : iteration_state;
280         end
281         final_state: begin
282             {sel, set, reset, ready} = 4'b0001;
283             next_state = start ? final_state : waiting_state;
284         end
285     endcase
286 end
287 // registers
288 generic_register #(40) register_out_unit(
289     .clk(clk), .reset(reset), .load(set), .data_in(to_reg),
290     .data_out({exp_out, man_out})

```

```

291     );
292 endmodule
293
294 module rounder_integer2fp(
295     input sig_in,
296     input [2:0] rm,
297     input [7:0] exp_in,
298     input [31:0] man_in,
299     /*
300      rm =
301          000 -> RNE: To nearest, ties to even
302          001 -> RTZ: Toward 0
303          010 -> RDN: Toward -inf
304          011 -> RUP: Toward +inf
305          100 -> RMM: To nearest, ties away from zero
306      */
307     output still_norm, NX,
308     output [7:0] exp_out,
309     output [31:0] man_out
310 );
311 reg sel;
312 wire sticky;
313 wire [2:0] grs;
314 wire [32:0] temp;
315 assign exp_out = temp[32] ? unsigned'(exp_in)+8'b1 : exp_in;
316 assign sticky = (man_in[5:0] != 6'b0) ? 1'b1 : 1'b0;
317 assign grs = {man_in[7:6], sticky};
318 assign NX = (grs != 3'b0) ? 1'b1 : 1'b0;
319 assign still_norm = (man_out[31]==1'b1 | man_out==0) ? 1'b1 : 1'b0;
320 assign man_out = temp[32] ? temp[32:1] : temp[31:0];
321 assign temp = sel ? {1'b0, man_in}+33'b100000000 : {1'b0, man_in};
322 always_comb
323     case(grs) // grs
324         3'b000: sel = 1'b0;
325         default: case(rm)
326             3'b000: sel = (grs[1:0]==2'b0) ? (man_in[8] ? 1'b1 : 1'b0) : // RNE: To
327             ↪ nearest, ties to even
328                 (grs[2] ? 1'b1 : 1'b0); // RTZ: Toward 0
329             3'b001: sel = 1'b0; // RDN: Toward -inf
330             3'b010: sel = sig_in ? 1'b1 : 1'b0; // RUP: Toward +inf
331             3'b011: sel = ~sig_in ? 1'b1 : 1'b0;
332             3'b100: sel = (grs[1:0]==2'b0) ? (1'b1) :
333             ↪ ties away from zero
334                 (grs[2] ? 1'b1 : 1'b0);
335             default: sel = 1'b0;
336         endcase
337     endcase
338 endmodule

```

fp_arithmetic_unit.sv: Archivo *top* del módulo *fp_arithmetic_unit* y que incluye todos los submódulos del mismo.

```

1  /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4 */
5 'timescale 1ns / 1ps
6
7 /***** Top module: begin *****/
8 module fp_arithmetic_unit(
9     input start, rst, clk, // start: Need to be on til the op is ready
10    input [2:0] op, rm,
11    input [31:0] in1, in2,
12    /*
13      op =
14        000 -> in1+in2  ADD
15        001 -> in1*in2  MUL
16        010 -> in1/in2  DIV
17        011 -> sqrt(in1) SQRT
18        100 -> in1-in2  SUB
19        101 -> -in1*in2 -MUL
20        110 -> -in1/in2 -DIV
21      rm =
22        000 -> RNE
23        001 -> RTZ
24        010 -> RDN
25        011 -> RUP
26        100 -> RMM
27    */
28    output reg ready, // On when the operation is ready
29    output reg [2:0] status,
30    output [31:0] out
31    /*
32      status =
33        000 -> no flag
34        101 -> no flag
35        110 -> no flag
36      -----
37        001 -> UF flag
38        010 -> OF flag
39        011 -> NV flag
40        100 -> DZ flag
41        111 -> NX flag
42    */
43 );
44 typedef enum {
45     waiting_state,
46     initial_state,
47     pre_iteration_state,
48     iteration_state_1,
49     iteration_state_2,
50     iteration_state_3,
51     exception_state_1,
52     exception_state_2,

```

```

53     exception_state_3,
54     final_exception_state,
55     pre_final_state_1,
56     pre_final_state_2,
57     final_state
58 } state_type;
59 state_type actual_state, next_state;
60 reg sel, set, start_norm;
61 reg [2:0] sel_out;
62 wire sig1, sig2, sig, sig_from_adder, start_to_ctrl, ready_from_checker,
63   ↪ ready_from_norm, ready_from_add, ready_from_mul, ready_from_div,
64   ↪ ready_from_sqrt, still_norm, inexact_flag, check_flag, is_normal, is_uf, is_of,
65   ↪ is_desnorm;
66 wire [1:0] status_from_norm;
67 wire [2:0] status_checker, sel_out_checker;
68 wire [7:0] exp1, exp2, exp_to_norm, exp_from_reg, exp_from_adder, exp_from_mul,
69   ↪ exp_from_div, exp_from_sqrt, exp_from_norm;
70 wire [27:0] man1, man2, man_to_norm, man_from_reg, man_from_adder,
71   ↪ man_from_mul, man_from_div, man_from_sqrt, man_from_norm,
72   ↪ man_from_rounder;
73 // Obtaining full inputs: input_decoder
74 assign sig2 = op[2] ? ~in2[31] : in2[31];
75 assign {sig1, exp1, exp2, man1[27], man2[27], man1[25:0], man2[25:0]}
76   = {in1[31:23], in2[30:23], 2'b0, in1[22:0], 3'b0, in2[22:0], 3'b0};
77 assign man1[26] = (exp1 == 8'b0) ? 1'b0 : 1'b1;
78 assign man2[26] = (exp2 == 8'b0) ? 1'b0 : 1'b1;
79 // Mux inputs to normalizer
80 assign {exp_to_norm, man_to_norm} = sel ? {exp_from_reg, man_from_reg} :
81   ((op[1:0] == 2'b00) ? {exp_from_adder, man_from_adder} :
82     ↪ // add
83     ((op[1:0] == 2'b01) ? {exp_from_mul, man_from_mul} :
84       ↪ // mul
85       ((op[1:0] == 2'b10) ? {exp_from_div, man_from_div} : // div
86         ↪
87         ((op[1:0] == 2'b11) ? {exp_from_sqrt, man_from_sqrt} :
88           ↪ // sqrt
89           36'bX)));
90 // Mux start to controller
91 assign start_to_ctrl = ((op[1:0] == 2'b00) ? ((ready_from_add | ~check_flag) *
92   ↪ ready_from_checker) : // add
93   ((op[1:0] == 2'b01) ? ((ready_from_mul | ~check_flag) *
94   ↪ ready_from_checker) : // mul
95   ((op[1:0] == 2'b10) ? ((ready_from_div | ~check_flag) *
96   ↪ ready_from_checker) : // div
97   ((op[1:0] == 2'b11) ? ((ready_from_sqrt | ~check_flag) *
98   ↪ ready_from_checker) : // sqrt
99     ↪ 1'bx));
100 // Mux sig
101 assign sig = (op[1:0] == 2'b00) ? sig_from_adder : // add
102   ((op[1:0] == 2'b11) ? 1'b0 : // sqrt
103     ↪ sig1^sig2); // mul or div
104 // OUT

```

```

91 assign out = (sel_out == 3'b000) ? {sig, exp_from_reg, man_from_reg[25:3]} : // 
92   ↪ final res no trivial
93     ((sel_out == 3'b001) ? in1 :                                     // final in1
94     ((sel_out == 3'b010) ? {sig2, in2[30:0]} :                      // final in2
95     ((sel_out == 3'b100) ? {sig, 31'b0} :                           // final Zero
96     ((sel_out == 3'b101) ? {sig, 31'b1} :                           // final almost Zero
97     ((sel_out == 3'b110) ? {sig, 8'b11111111, 23'b0} :           // final Inf
98     ((sel_out == 3'b011) ? {sig, 31'b111111011111111111111111111111} : // final
99   ↪ almost Inf
100    ((sel_out == 3'b111) ? {sig, 9'b111111111, 22'b0} :           // final NaN
101      32'bX))))));
102 // control flags (inputs) for FSM
103 assign check_flag = (sel_out_checker == 3'b000) ? 1'b1 : 1'b0; // no trivial res
104 assign is_normal = (status_from_norm == 2'b00) ? 1'b1 : 1'b0; // normal res
105 assign is_uf = (status_from_norm == 2'b01) ? 1'b1 : 1'b0; // UF flag res
106 assign is_of = (status_from_norm == 2'b10) ? 1'b1 : 1'b0; // OF flag res
107 assign is_desnorm= (status_from_norm == 2'b11) ? 1'b1 : 1'b0; // res desnormalized
108 // FSM
109 always_ff @(posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;
110 always_comb begin
111   case(actual_state)
112     default: begin
113       {sel, set, start_norm} = 3'b000;
114       {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
115       next_state = actual_state;
116     end
117     waiting_state: begin
118       {sel, set, start_norm} = 3'b000;
119       {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
120       next_state = start_to_ctrl ? (check_flag ? initial_state : exception_state_1) :
121         ↪ waiting_state;
122       end
123     initial_state: begin
124       {sel, set, start_norm} = 3'b001;
125       {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
126       next_state = ready_from_norm ? (is_normal ? (still_norm ? pre_final_state_1
127         ↪ : pre_iteration_state) : exception_state_2) : initial_state;
128       end
129     pre_iteration_state: begin
130       {sel, set, start_norm} = 3'b011;
131       {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
132       next_state = iteration_state_1;
133     end
134     iteration_state_1: begin
135       {sel, set, start_norm} = 3'b100;
136       {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
137       next_state = iteration_state_2;
138     end
139     iteration_state_2: begin
140       {sel, set, start_norm} = 3'b101;
141       {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
142       next_state = ready_from_norm ? (is_normal ? (still_norm ? pre_final_state_2

```

```

    ↪ : iteration_state_3) : exception_state_3) : iteration_state_2;
139
140      end
141      iteration_state_3: begin
142          {sel, set, start_norm} = 3'b111;
143          {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
144          next_state = iteration_state_1;
145      end
146      exception_state_1: begin
147          {sel, set, start_norm} = 3'b000;
148          {sel_out, status, ready} = {sel_out_checker, status_checker, 1'b1};
149          next_state = start ? exception_state_1 : waiting_state;
150      end
151      exception_state_2: begin
152          {sel, set, start_norm} = 3'b011;
153          {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
154          next_state = final_exception_state;
155      end
156      exception_state_3: begin
157          {sel, set, start_norm} = 3'b111;
158          {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
159          next_state = final_exception_state;
160      end
161      final_exception_state: begin
162          {sel, set, start_norm} = 3'b000; ready = 1'b1;
163          if(is_desnorm) {sel_out, status} = {3'b000, 3'b001}; // desnorm => uf => NX
164          else if(is_of) begin
165              // OF flag - "inf" or "almost inf"
166              status = 3'b010;
167              sel_out = (rm == 3'b001) ? 3'b011 : // RTZ
168                  ((rm == 3'b010) ? (sig ? 3'b110 : 3'b011) : // RDN
169                  ((rm == 3'b011) ? (~sig ? 3'b110 : 3'b011) : // RUP
170                  3'b110)); // RNE - RMM
171          end
172          else if(is_uf) begin
173              // Uf flag - "zero" or "almost zero"
174              status = 3'b001;
175              sel_out = (rm == 3'b001) ? 3'b100 : // RTZ
176                  ((rm == 3'b010) ? (sig ? 3'b101 : 3'b100) : // RDN
177                  ((rm == 3'b011) ? (~sig ? 3'b101 : 3'b100) : // RUP
178                  3'b100)); // RNE - RMM
179          end
180          else {sel_out, status} = 6'bX;
181          next_state = start ? final_exception_state : waiting_state;
182      end
183      pre_final_state_1: begin
184          {sel, set, start_norm} = 3'b011;
185          {sel_out, status, ready} = {3'b000, 3'b000, 1'b0};
186          next_state = final_state;
187      end
188      pre_final_state_2: begin
189          {sel, set, start_norm} = 3'b111;

```

```

190         next_state = final_state;
191     end
192     final_state: begin
193         {sel, set, start_norm} = 3'b000;
194         {sel_out, ready} = {3'b000, 1'b1};
195         status = inexact_flag ? 3'b111 : 3'b000;
196         next_state = start ? final_state : waiting_state;
197     end
198 endcase
199 end
200 /**
201 generic_register #(.width(36)) res_register(
202     .clk(clk), .reset(1'b0), .load(set), .data_in({exp_from_norm, man_from_rounder}),
203     .data_out({exp_from_reg, man_from_reg})
204 );
205 /**
206 NORMALIZER normalizer_unit(
207     .start(start_norm), .rst(rst), .clk(clk), .exp_in(exp_to_norm), .man_in(
208         ↪ man_to_norm),
209         .ready(ready_from_norm), .status(status_from_norm), .exp_out(exp_from_norm), .
210         ↪ man_out(man_from_norm)
211 );
212 ROUNDER rounder_unit(
213     .rm(rm), .sig_in(sig), .man_in(man_from_norm),
214     .still_norm(still_norm), .inexact_flag(inexact_flag), .man_out(man_from_rounder)
215 );
216 /**
217 excep_triv_checker excep_triv_checker_unit(
218     .start(start), .clk(clk), .rm(rm), .op(op[1:0]), .sig1(sig1), .sig2(sig2), .exp1(exp1), .exp2(
219         ↪ exp2), .frac1(man1[26:3]), .frac2(man2[26:3]),
220         .ready(ready_from_checker), .status_out(status_checker), .sel_out(sel_out_checker)
221 );
222 /**
223 ADDER adder_unit(
224     .start(start), .clk(clk), .sig1(sig1), .sig2(sig2), .exp1(exp1), .exp2(exp2), .man1(man1), .
225         ↪ man2(man2),
226         .ready(ready_from_add), .sig_out(sig_from_adder), .exp_out(exp_from_adder), .
227         ↪ man_out(man_from_adder)
228 );
229 MULTIPLIER multiplier_unit(
230     .start(start), .clk(clk), .exp1(exp1), .exp2(exp2), .man1(man1), .man2(man2),
231     .ready(ready_from_mul), .exp_out(exp_from_mul), .man_out(man_from_mul)
232 );
233 DIVISOR divisor_unit(
234     .start(start), .rst(rst), .clk(clk), .exp1(exp1), .exp2(exp2), .man1(man1), .man2(man2),
235     .ready(ready_from_div), .exp_out(exp_from_div), .man_out(man_from_div)
236 );
237 SQRT sqrt_unit(
238     .start(start), .rst(rst), .clk(clk), .exp_in(exp1), .man_in(man1),
239     .ready(ready_from_sqrt), .exp_out(exp_from_sqrt), .man_out(man_from_sqrt)
240 );
241
242 endmodule

```

```

237 /***** Top module: end *****/
238
239 **** Normalizer and Rounder: begin ****
240 module NORMALIZER(
241     input start, rst, clk,
242     input [7:0] exp_in,
243     input [27:0] man_in,
244     output reg ready,
245     output [1:0] status,
246     output [7:0] exp_out,
247     output [27:0] man_out
248     /*
249     status =
250         00 -> normalized
251         01 -> UF
252         10 -> OF
253         11 -> desnormalized
254     */
255 );
256     typedef enum {
257         waiting_state, initial_state, iteration_state, final_state
258     } state_type;
259     state_type actual_state, next_state;
260     reg sel, set;
261     wire done, exp_valid;
262     wire [7:0] new_exp, exp_to_reg;
263     wire [27:0] new_man, man_to_reg, desp_man_izq, temp_man_out;
264     // flags
265     assign done      = (temp_man_out[27:26] == 2'b01) ? 1 : 0;
266     assign exp_valid = (status      == 2'b00) ? 1 : 0;
267     // new normalized value
268     assign new_exp = (temp_man_out[27] == 1'b1) ? (unsigned'(exp_out)+unsigned'(8'b1)
269     ↪ ) :
270         ((temp_man_out[26] == 1'b0) ? (unsigned'(exp_out)-unsigned'(8'b1)) :
271     ↪ exp_out);
272     assign new_man = (temp_man_out[27] == 1'b1) ? (temp_man_out[0] ? {
273     ↪ temp_man_out[27:1] >> 1}, temp_man_out[0]) : (temp_man_out >> 1) :
274         ((temp_man_out[26] == 1'b0) ? (temp_man_out << 1) : temp_man_out);
275     // mux to register
276     assign {exp_to_reg, man_to_reg} = sel ? {new_exp, new_man} : {exp_in, man_in};
277     // status out
278     assign status = (exp_out==8'b11111111 & (man_in[27] | man_in[26])) ? 2'b10 :
279         ((exp_out==8'b0) ? ((temp_man_out[27:1]==27'b0) ? 2'b01 : 2'b11) : 2'b00)
280     ↪ ;
281     assign man_out = (exp_out==8'b0 & done) ? (temp_man_out>>1) : temp_man_out;
282     // FSM
283     always_ff @(posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;
284     always_comb begin
285         case(actual_state)
286             default: begin
287                 {sel, set, ready} = 3'b000;
288                 next_state = actual_state;

```

```

285     end
286     waiting_state: begin
287         {sel, set, ready} = 3'b000;
288         next_state = start ? initial_state : waiting_state;
289     end
290     initial_state: begin
291         {sel, set, ready} = 3'b010;
292         next_state = exp_valid ? (done ? final_state : iteration_state) : final_state;
293     end
294     iteration_state: begin
295         {sel, set, ready} = 3'b110;
296         next_state = exp_valid ? (done ? final_state : iteration_state) : final_state;
297     end
298     final_state: begin
299         {sel, set, ready} = 3'b001;
300         next_state = start ? final_state : waiting_state;
301     end
302 endcase
303 end
304 // register
305 generic_register #(.(width(36)) register_out_unit(
306     .clk(clk), .reset(1'b0), .load(set), .data_in({exp_to_reg, man_to_reg}),
307     .data_out({exp_out, temp_man_out})
308 );
309 endmodule
310
311 module ROUNDER(
312     input [2:0] rm,
313     input sig_in,
314     input [27:0] man_in,
315     /*
316         rm =
317             000 -> RNE
318             001 -> RTZ
319             010 -> RDN
320             011 -> RUP
321             100 -> RMM
322     */
323     output still_norm, inexact_flag,
324     output [27:0] man_out
325 );
326     reg sel;
327     assign inexact_flag = (man_in[2:0] != 3'b0) ? 1'b1 : 1'b0;
328     assign still_norm = (man_out[27:26]==2'b01) ? 1'b1 : 1'b0;
329     assign man_out = sel ? {man_in[27:3], 3'b0}+28'b1000 : {man_in[27:3], 3'b0};
330     always_comb
331         case(man_in[2:0]) // grs
332             3'b000: sel = 1'b0;
333             default: case(rm)
334                 3'b000: sel = (man_in[1:0]==2'b0) ? (man_in[3] ? 1'b1 : 1'b0) : // RNE
335                                     ((man_in[2] ? 1'b1 : 1'b0));
336                 3'b001: sel = 1'b0;                                // RTZ

```

```

337     3'b010: sel = sig_in ? 1'b1 : 1'b0;           // RDN
338     3'b011: sel = ~sig_in ? 1'b1 : 1'b0;          // RUP
339     3'b100: sel = (man_in[1:0]==2'b0) ? (1'b1) :   // RMM
340                     ((man_in[2] ? 1'b1 : 1'b0));
341     default: sel = 1'b0;
342 endcase
343 endcase
344 endmodule
345 /***** Normalizer and Rounder: end *****/
346
347 /***** Arithmetic Units: begin *****/
348 /*----- ADDER BEGIN -----*/
349 module ADDER(
350     input start, clk,
351     input sig1, sig2,
352     input [7:0] exp1, exp2,
353     input [27:0] man1, man2,
354     output ready,
355     output sig_out,
356     output [7:0] exp_out,
357     output [27:0] man_out
358 );
359     wire ready1, ready2, shift1;
360     wire [1:0] add_op;
361     wire [7:0] temp_exp_out;
362     wire [9:0] exp_difference;
363     wire [4:0] offset1, offset2;
364     wire [26:0] man1_normalized, man2_normalized;
365     wire [27:0] man_to_shifter, man_from_shifter, man_no_shifted, temp_man_out;
366     assign ready = (ready1 & ready2) ? 1'b1 : 1'b0;
367     //Comparador de exponentes
368     assign shift1 = ((signed'({2'b0, exp1})-signed'({5'b0, offset1}))<(signed'({2'b0, exp2})-
369         ↪ signed'({5'b0, offset2}))) ? 1 : 0;
370     // Restador de exponentes
371     assign exp_difference = {exp1,exp2}==0 ? 0 : (shift1 ? ((signed'({2'b0, exp2})-signed'
372         ↪ '({5'b0, offset2}))- (signed'({2'b0, exp1})-signed'({5'b0, offset1}))) : ((signed'({2'b0,
373             ↪ exp1})-signed'({5'b0, offset1}))- (signed'({2'b0, exp2})-signed'({5'b0, offset2})));
374     // Identificador de operación
375     assign add_op = shift1 ? {sig1, sig2} : {sig2, sig1};
376     // Mux to shifter
377     assign man_to_shifter = shift1 ? ({exp1,exp2}==0 ? man1 : {1'b0, man1_normalized})
378         ↪ : ({exp1,exp2}==0 ? man2 : {1'b0, man2_normalized});
379     // Man direct to adder
380     assign man_no_shifted = ~shift1 ? ({exp1,exp2}==0 ? man1 : {1'b0, man1_normalized})
381         ↪ : ({exp1,exp2}==0 ? man2 : {1'b0, man2_normalized});
382     // Outputs
383     assign temp_exp_out = {exp1,exp2}==0 ? 0 : (~shift1 ? exp1-offset1 : exp2-offset2);
384     assign exp_out = (temp_exp_out==0 & temp_man_out[27:26]!=2'b0) ? 8'b1 :
385         ↪ temp_exp_out;
386     assign man_out = (temp_exp_out==0 & temp_man_out[27:26]!=2'b0) ? (
387                 ↪ temp_man_out[27] ? (temp_man_out>>1) : temp_man_out
388             ) : temp_man_out;

```

```

383     shifter_right shifter_right_unit(
384         .exp_difference(exp_difference), .man_input(man_to_shifter),
385         .man_output(man_from_shifter)
386     );
387     significands_adder significands_adder_unit(
388         .add_op(add_op), .man_in_1(man_from_shifter), .man_in_2(man_no_shifted),
389         .sig_r(sig_out), .man_output(temp_man_out)
390     );
391     normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_adder1(
392         .start(start), .clk(clk), .man_in(man1[26:0]),
393         .ready(ready1), .man_out(man1_normalized), .offset(offset1)
394     );
395     normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_adder2(
396         .start(start), .clk(clk), .man_in(man2[26:0]),
397         .ready(ready2), .man_out(man2_normalized), .offset(offset2)
398     );
399 endmodule
400
401 module shifter_right(
402     input[9:0] exp_difference,
403     input[27:0] man_input,
404     output[27:0] man_output
405 );
406     wire[49:0] temp;
407     wire sticky;
408     assign temp = {man_input, 22'b0} >> signed'(exp_difference);
409     assign sticky = (temp[22:0] != 0 || exp_difference >= 26) ? 1 : 0;
410     assign man_output = {temp[49:23], sticky};
411 endmodule
412
413 module significands_adder(
414     input [1:0] add_op,
415     input [27:0] man_in_1, man_in_2,
416     output reg sig_r,
417     output [27:0] man_output
418 );
419     reg[27:0] temp;
420     wire sticky;
421     assign sticky = (man_in_1[0] || man_in_2[0] || temp[0]) ? 1 : 0; // Manteniendo el
        ↪ sticky bit
422     assign man_output = {temp[27:1], sticky}; // Mantisa de salida
423 always_comb
424     case(add_op) // add_op = {signo mantisa desplazada (man_in_1), signo mantisa no
        ↪ desplazada (man_in_2)}
425         2'b00: begin
426             temp = unsigned'(man_in_2) + unsigned'(man_in_1);
427             sig_r = 0;
428         end
429         2'b01:
430             if(man_in_1 >= man_in_2) begin
431                 temp = unsigned'(man_in_1) - unsigned'(man_in_2);
432                 sig_r = 0;

```

```

433     end
434   else begin
435     temp = unsigned'(man_in_2) - unsigned'(man_in_1);
436     sig_r = 1;
437   end
438   2'b10:
439     if(man_in_2 >= man_in_1) begin
440       temp = unsigned'(man_in_2) - unsigned'(man_in_1);
441       sig_r = 0;
442     end
443   else begin
444     temp = unsigned'(man_in_1) - unsigned'(man_in_2);
445     sig_r = 1;
446   end
447   2'b11: begin
448     temp = unsigned'(man_in_2) + unsigned'(man_in_1);
449     sig_r = 1;
450   end
451 endcase
452 endmodule
453 /*----- ADDER END -----*/
454
455 /*----- MULTIPLIER BEGIN -----*/
456 module MULTIPLIER(
457   input start, clk,
458   input [7:0] exp1, exp2,
459   input [27:0] man1, man2,
460   output ready,
461   output [7:0] exp_out,
462   output [27:0] man_out
463 );
464   wire ready1, ready2;
465   wire [9:0] temp_exp;
466   wire [26:0] man1_normalized, man2_normalized;
467   wire [55:0] temp_man1, temp2_man;
468   wire [4:0] desp, offset1, offset2;
469   assign ready = (ready1 & ready2) ? 1'b1 : 1'b0;
470   assign temp_exp = signed'({2'b0, exp1})+signed'({2'b0, exp2})-signed'({5'b0, offset1})-
471     ↪ signed'({5'b0, offset2})-signed'(10'b000111111)+signed'({5'b0, desp});
472   assign exp_out = (signed'(temp_exp)<signed'(0)) ? 8'b0 : // Desnorm -
473     ↪ UF
474     ((signed'(temp_exp)==signed'(0) & temp_man1[55]) ? 8'b1 : // NX
475      ((signed'(temp_exp)>=signed'(10'b001111111)) ? 8'b11111111 : // OF
476        ↪ temp_exp[7:0]));
477   assign temp2_man = (unsigned'(temp_man1) >> (~unsigned'(temp_exp)+unsigned'(10'
478     ↪ b10)));
479   assign man_out = (signed'(temp_exp)<signed'(0)) ? {temp2_man[55:29], ((temp2_man
480     ↪ [28:0] != 29'b0) ? 1'b1 : 1'b0)} : // Desnorm - UF
481     ((signed'(temp_exp)==signed'(0) & temp_man1[55]) ? {1'b0, temp_man1
482     ↪ [55:30], ((temp_man1[29:0] != 29'b0) ? 1'b1 : 1'b0)} : // NX
483       ((signed'(temp_exp)>=signed'(10'b001111111)) ? 28'b0 :
484         ↪ // OF

```

```

479             {temp_man1[55:29], ((temp_man1[28:0] != 29'b0) ? 1'b1 : 1'b0)}));
480 significands_multiplier man_multiplier(
481     .man_in_1({1'b0, man1_normalized}), .man_in_2({1'b0, man2_normalized}), .
482     ↪ previous_desp2righth(5'b0),
483     .man_output(temp_man1[55:28]), .actual_desp2righth(desp)
484 );
485 normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_multiplier1(
486     .start(start), .clk(clk), .man_in(man1[26:0]),
487     .ready(ready1), .man_out(man1_normalized), .offset(offset1)
488 );
489 normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_multiplier2(
490     .start(start), .clk(clk), .man_in(man2[26:0]),
491     .ready(ready2), .man_out(man2_normalized), .offset(offset2)
492 );
493 endmodule
494
495 module significands_multiplier( // man_in_1 * man_in_2
496     input [4:0] previous_desp2righth,
497     input [27:0] man_in_1, man_in_2,
498     output [4:0] actual_desp2righth,
499     output [27:0] man_output
500 );
501     wire[55:0] temp;
502     wire sticky;
503     assign temp = 56'(unsigned'(man_in_1)*unsigned'(man_in_2));
504     assign sticky = (temp[55] | temp[54]) ? ((temp[28:0] != 29'b0) ? 1 : 0) : ((temp[26:0] !=
505         ↪ 27'b0) ? 1 : 0) ;
506     assign actual_desp2righth = (temp[55] | temp[54]) ? (unsigned'(previous_desp2righth)+
507         ↪ unsigned'(5'b10)) : previous_desp2righth;
508     assign man_output = (temp[55] | temp[54]) ? ({temp[55:29], sticky}) : ({temp[53:27],
509         ↪ sticky});
510 endmodule
511 /*----- MULTIPLIER END -----*/
512
513 /*----- DIVISOR BEGIN -----*/
514 module DIVISOR(
515     input start, rst, clk,
516     input [7:0] exp1, exp2,
517     input [27:0] man1, man2,
518     output ready,
519     output [7:0] exp_out,
520     output [27:0] man_out
521 );
522     wire sticky;
523     wire [9:0] temp_exp;
524     wire [55:0] temp_man1, temp2_man;
525     wire [4:0] dividend_offset, divisor_offset;
526     assign temp_exp = signed'({2'b0, exp1})-signed'({5'b0, dividend_offset})-signed'({2'b0,
527         ↪ exp2})+signed'({5'b0, divisor_offset})+signed'(10'b000111111);
528     assign exp_out = (signed'(temp_exp)<=signed'(0)) ? 8'b0 :
529         ↪ Desnorm - UF
530             ((signed'(temp_exp)>=signed'(10'b001111111) & temp_man1[54]) ? 8'

```

```

    ↳ b11111111 : // OF
      temp_exp[7:0]);
                                // normal
    ↳ case
526 assign temp2_man = (unsigned'(temp_man1) >> (~unsigned'(temp_exp)+unsigned'(10'
    ↳ b10)));
527 assign sticky = (temp2_man[28:0] != 29'b0) ? 1'b1 : 1'b0;
528 assign man_out = (signed'(temp_exp)<=signed'(0)) ? {temp2_man[55:29], sticky} :
    ↳      // Desnorm - UF
      ( (signed'(temp_exp)>=signed'(10'b001111111) & temp_man1[54] ) ? 28'
    ↳ b0 : // OF
      temp_man1[55:28]);
                                // normal
530
531 assign {temp_man1[55], temp_man1[27:0]} = 29'b0;
532 significands_divisor significands_divisor_unit(
533   .start(start), .rst(rst), .clk(clk),
534   .dividend(man1[26:0]), .divisor(man2[26:0]),
535   .ready(ready), .man_output(temp_man1[54:28]),
536   .dividend_offset(dividend_offset), .divisor_offset(divisor_offset)
537 );
538 endmodule
539
540 module significands_divisor (
541   input start, rst, clk,
542   input [26:0] dividend, divisor, // dividend/divisor=quotient or quotient*divisor+
    ↳ remainder=dividend
543   output reg ready,
544   output [26:0] man_output, // bit_0, bit_-1, ..., bit_-23, bit_g, bit_r, bit_s
545   output [4:0] dividend_offset, divisor_offset
546 );
547 typedef enum {
548   waiting_state,
549   initial_state,
550   middle_state,
551   iteration_state_1,
552   iteration_state_2a1,
553   iteration_state_2a2,
554   iteration_state_2b1,
555   iteration_state_2b2,
556   iteration_state_3,
557   final_state
558 } state_type;
559 state_type actual_state, next_state;
560 reg sel_divisor, set_divisor, sel_remainder, set_remainder, sel_op,
    sel_quotient, set_quotient, rst_quotient, set_counter, rst_counter;
561 wire dividend_ready, divisor_ready, count_flag, remainder_is_ltzero, sticky;
562 wire [4:0] to_counter_reg, from_counter_reg;
563 wire [26:0] dividend_normalized, divisor_normalized,
    to_quotient_reg, from_quotient_reg,
    to_divisor_reg, from_divisor_reg;
564 wire [28:0] to_remainder_reg, from_remainder_reg;
565 assign to_divisor_reg = sel_divisor ? (from_divisor_reg>>1) : divisor_normalized;
566 assign to_remainder_reg = sel_remainder ? (

```

```

570      (sel_op) ? (signed'(from_remainder_reg)+signed'({2'b0, from_divisor_reg})) : //  

571      ↪ sel_op=1 -> rr=rr+dd  

572          (signed'(from_remainder_reg)-signed'({2'b0, from_divisor_reg})) // sel_op  

573      ↪ =0 -> rr=rr-dd  

574      ) : {2'b0, dividend_normalized};  

575 assign to_quotient_reg = sel_quotient ? (unsigned'((from_quotient_reg<<1))+unsigned  

576      ↪ '(27'b1)) : (from_quotient_reg<<1);  

577 assign to_counter_reg = (unsigned'(from_counter_reg)+unsigned'(5'b1));  

578 assign count_flag = (unsigned'(from_counter_reg)==unsigned'(27)) ? 1'b1 : 1'b0;  

579 assign remainder_is_ltzero = (signed'(from_remainder_reg)<signed'(29'b0)) ? 1'b1 : 1'b0;  

580 assign sticky = ((from_quotient_reg[0]==1'b1 | to_remainder_reg!=29'b0) ? 1'b1 : 1'b0)  

581      ↪ ;  

582 assign man_output = {from_quotient_reg[26:1], sticky}; // se mantiene sticky  

583 // FSM  

584 always_ff @ (posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;  

585 always_comb  

586     case(actual_state)  

587         default: begin  

588             {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b00; // divisor controls  

589             {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b00; // remainder controls  

590             {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b000; // quotient controls  

591             {set_counter, rst_counter}           = 2'b00; // counter controls  

592             {sel_op, ready}                   = 2'b00; // alu_op and ready signals  

593             next_state = actual_state;  

594         end  

595         waiting_state: begin  

596             {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b00; // divisor controls  

597             {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b00; // remainder controls  

598             {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b000; // quotient controls  

599             {set_counter, rst_counter}           = 2'b00; // counter controls  

600             {sel_op, ready}                   = 2'b00; // alu_op and ready signals  

601             next_state = (start & dividend_ready & divisor_ready) ? initial_state :  

602             ↪ waiting_state;  

603         end  

604         initial_state: begin  

605             {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b01; // divisor controls  

606             {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b01; // remainder controls  

607             {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b001; // quotient controls  

608             {set_counter, rst_counter}           = 2'b01; // counter controls  

609             {sel_op, ready}                   = 2'b00; // alu_op and ready signals  

610             next_state = middle_state;  

611         end  

612         middle_state: begin  

613             {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b10; // divisor controls  

614             {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b10; // remainder controls  

615             {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b000; // quotient controls  

616             {set_counter, rst_counter}           = 2'b00; // counter controls  

617             {sel_op, ready}                   = 2'b00; // alu_op and ready signals  

618             next_state = iteration_state_1;  

619         end  

620         iteration_state_1: begin  

621             {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b10; // divisor controls

```

```

617     {sel_remainder, set_remainder}          = 2'b11; // remainder controls
618     {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b000; // quotient controls
619     {set_counter, rst_counter}              = 2'b10; // counter controls
620     {sel_op, ready}                      = 2'b00; // alu_op and ready signals
621     next_state = remainder_is_ltzero ? iteration_state_2b1 : iteration_state_2a1;
622 end
623 iteration_state_2a1: begin
624     {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b10; // divisor controls
625     {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b10; // remainder controls
626     {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b100; // quotient controls
627     {set_counter, rst_counter}          = 2'b00; // counter controls
628     {sel_op, ready}                  = 2'b00; // alu_op and ready signals
629     next_state = iteration_state_2a2;
630 end
631 iteration_state_2a2: begin
632     {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b10; // divisor controls
633     {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b10; // remainder controls
634     {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b110; // quotient controls
635     {set_counter, rst_counter}          = 2'b00; // counter controls
636     {sel_op, ready}                  = 2'b00; // alu_op and ready signals
637     next_state = iteration_state_3;
638 end
639 iteration_state_2b1: begin
640     {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b10; // divisor controls
641     {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b10; // remainder controls
642     {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b010; // quotient controls
643     {set_counter, rst_counter}          = 2'b00; // counter controls
644     {sel_op, ready}                  = 2'b10; // alu_op and ready signals
645     next_state = iteration_state_2b2;
646 end
647 iteration_state_2b2: begin
648     {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b10; // divisor controls
649     {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b11; // remainder controls
650     {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b000; // quotient controls
651     {set_counter, rst_counter}          = 2'b00; // counter controls
652     {sel_op, ready}                  = 2'b10; // alu_op and ready signals
653     next_state = iteration_state_3;
654 end
655 iteration_state_3: begin
656     {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b11; // divisor controls
657     {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b10; // remainder controls
658     {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b000; // quotient controls
659     {set_counter, rst_counter}          = 2'b00; // counter controls
660     {sel_op, ready}                  = 2'b00; // alu_op and ready signals
661     next_state = count_flag ? final_state : iteration_state_1;
662 end
663 final_state: begin
664     {sel_divisor, set_divisor}           = 2'b00; // divisor controls
665     {sel_remainder, set_remainder}       = 2'b00; // remainder controls
666     {sel_quotient, set_quotient, rst_quotient} = 3'b000; // quotient controls
667     {set_counter, rst_counter}          = 2'b00; // counter controls
668     {sel_op, ready}                  = 2'b01; // alu_op and ready signals

```

```

669         next_state = start ? final_state : waiting_state;
670     end
671   endcase
672   generic_register #(width(29)) remainder_register(
673     .clk(clk), .reset(1'b0), .load(set_remainder), .data_in(to_remainder_reg),
674     .data_out(from_remainder_reg)
675   );
676   generic_register #(width(27)) divisor_register(
677     .clk(clk), .reset(1'b0), .load(set_divisor), .data_in(to_divisor_reg),
678     .data_out(from_divisor_reg)
679   );
680   generic_register #(width(27)) quotient_register(
681     .clk(clk), .reset(rst_quotient), .load(set_quotient), .data_in(to_quotient_reg),
682     .data_out(from_quotient_reg)
683   );
684   generic_register #(width(5)) counter_register(
685     .clk(clk), .reset(rst_counter), .load(set_counter), .data_in(to_counter_reg),
686     .data_out(from_counter_reg)
687   );
688   normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_divisor_4dividend(
689     .start(start), .clk(clk), .man_in(dividend),
690     .ready(dividend_ready), .man_out(dividend_normalized), .offset(dividend_offset)
691   );
692   normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_divisor_4divisor(
693     .start(start), .clk(clk), .man_in(divisor),
694     .ready(divisor_ready), .man_out(divisor_normalized), .offset(divisor_offset)
695   );
696 endmodule
697
698 module normalizer4significands_inputs(
699   input start, clk,
700   input [26:0] man_in,
701   output reg ready,
702   output reg [26:0] man_out,
703   reg [4:0] offset
704 );
705 reg iteration_flag;
706 always_ff @(posedge(clk))
707   if(start)
708     if(~ready)
709       if(iteration_flag)
710         if(man_out[26]) {offset, man_out, iteration_flag, ready} = {offset, man_out,
711           ↪ 2'b11};
712         else {offset, man_out, iteration_flag, ready} = {offset+5'b1,
713           ↪ man_out<<1, 2'b10};
714         else if(man_in==0) {offset, man_out, ready} = 33'b1;
715         else if(man_in[26]) {offset, man_out, iteration_flag, ready} = {5'b0, man_in, 2'
716           ↪ b01};
717         else {offset, man_out, iteration_flag, ready} = {5'b0, man_in<<1, 2'
718           ↪ b10};
719         else {offset, man_out, iteration_flag, ready} = {offset, man_out, 2'b01};
720       else {man_out, iteration_flag, ready} = 29'b0;

```

```

717 endmodule
718 /*----- DIVISOR END -----*/
719
720 /*----- SQRT BEGIN -----*/
721 module SQRT(
722     input start, rst, clk,
723     input [7:0] exp_in,
724     input [27:0] man_in,
725     output ready,
726     output [7:0] exp_out,
727     output [27:0] man_out
728 );
729     wire man_ready;
730     wire [4:0] desp2rigth_from_sqrt, desp2rigth_from_mul, man_offset;
731     wire [26:0] man_normalized;
732     wire [27:0] man_from_sqrt, man_from_mul;
733 // exp_in[0] = 1 -> (exp_in-127) is even
734 assign exp_out = (exp_in[0] | (man_offset[0] & exp_in==8'b0)) ? (( ((unsigned')(exp_in
    ↪ )-unsigned'({3'b0, man_offset}))-unsigned'(127)) >> 1)+unsigned'(127) )+unsigned
    ↪ '({3'b0, desp2rigth_from_sqrt}) :
    (( ((unsigned')(exp_in)-unsigned'({3'b0, man_offset}))-unsigned
    ↪ '(128)) >> 1)+unsigned'(127) )+unsigned'({3'b0, desp2rigth_from_mul }));
735 assign man_out = (exp_in[0] | (man_offset[0] & exp_in==8'b0)) ? man_from_sqrt :
    ↪ man_from_mul;
736 significand_sqrt significand_sqrt_unit(
737     .start(man_ready), .rst(rst), .clk(clk), .frac_in(man_normalized[25:3]),
738     .ready(ready), .desp2rigth_out(desp2rigth_from_sqrt), .man_output(man_from_sqrt)
739 );
740 significands_multiplier significands_multiplier_unit(
741     .man_in_1(man_from_sqrt), .man_in_2(28'b01_01101010000010011110011_000), .
    ↪ previous_desp2rigth(desp2rigth_from_sqrt),
    .man_output(man_from_mul), .actual_desp2rigth(desp2rigth_from_mul)
742 );
743 normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_sqrt_unit(
744     .start(start), .clk(clk), .man_in(man_in[26:0]),
745     .ready(man_ready), .man_out(man_normalized), .offset(man_offset)
746 );
747
748 endmodule
749
750
751 module significand_sqrt( // = sqrt({1,frac_in})
752     input start, rst, clk,
753     input [22:0] frac_in,
754     output reg ready,
755     output [4:0] desp2rigth_out,
756     output [27:0] man_output // bit_1, bit_0, bitexp_out_-1, ..., bit_-23, bit_g, bit_r,
    ↪ bit_s
757 );
758     typedef enum {
759         waiting_state, iteration_1, iteration_2, iteration_3, iteration_4, final_state
760     } state_type;
761     state_type actual_state, next_state;
762     reg set, sel;

```

```

763     wire [4:0] desp2rigth_to_reg,
764         desp2rigth_from_reg,
765         desp2rigth_to_multiplier_1,
766         desp2rigth_from_multiplier_1_to_multiplier_2,
767         desp2rigth_from_multiplier_2_to_multiplier_3;
768     wire [22:0] magic_number_to_sub_1;
769     wire [27:0] temp_to_reg,
770         temp_from_reg,
771         to_multiplier_1_and_3,
772         from_mul_2_to_sub_2,
773         from_sub_2_to_mul_3,
774         from_mul_1_to_mul_2,
775         res_from_sub_1;
776 // MUX
777 assign {to_multiplier_1_and_3, desp2rigth_to_multiplier_1} = sel ? {temp_from_reg,
778     → desp2rigth_from_reg} : {res_from_sub_1, 5'b0} ;
779 // lookup table
780 assign magic_number_to_sub_1 = ( (frac_in >= 23'b00000000000000000000000000) & (
781     → frac_in <= 23'b00111111111111111111) ) ? 23'b100000110001001111010 :
782     ( (frac_in >= 23'b01000000000000000000000000) & (frac_in <= 23'
783     → b0101111111111111111111) ) ? 23'b10000100110111010000111 :
784     ( (frac_in >= 23'b01100000000000000000000000) & (frac_in <= 23'
785     → b0111111111111111111111) ) ? 23'b1000101011111001100111 :
786     ( (frac_in >= 23'b10000000000000000000000000) & (frac_in <= 23'
787     → b1001111111111111111111) ) ? 23'b1001000101100100001100 :
788     ( (frac_in >= 23'b10100000000000000000000000) & (frac_in <= 23'
789     → b1011111111111111111111) ) ? 23'b10011001000100100010 :
790     ( (frac_in >= 23'b11000000000000000000000000) & (frac_in <= 23'
791     → b1101111111111111111111) ) ? 23'b10100010100010100001111 :
792     ( (frac_in >= 23'b11100000000000000000000000) & (frac_in <= 23'
793     → b1111111111111111111111) ) ? 23'b1011010101111011100101 : 23'bX;
794 // FSM
795 always_ff @(posedge(clk)) actual_state <= rst ? waiting_state : next_state;
796 always_comb begin
797     case(actual_state)
798         default: begin
799             {sel, set, ready} = 3'b000;
800             next_state = actual_state;
801         end
802         waiting_state: begin
803             {sel, set, ready} = 3'b000;
804             next_state = start ? iteration_1 : waiting_state;
805         end
806         iteration_1: begin
807             {sel, set, ready} = 3'b010;
808             next_state = iteration_2;
809         end
810         iteration_2: begin
811             {sel, set, ready} = 3'b110;
812             next_state = iteration_3;
813         end
814         iteration_3: begin

```

```

807     {sel, set, ready} = 3'b110;
808     next_state = iteration_4;
809   end
810   iteration_4: begin
811     {sel, set, ready} = 3'b110;
812     next_state = final_state;
813   end
814   final_state: begin
815     {sel, set, ready} = 3'b001;
816     next_state = start ? final_state : waiting_state;
817   end
818 endcase
819 end
820 // sub: |man_in_1 - man_in_2|
821 significands_subtractor sub_1(
822   .man_in_1({3'b1, frac_in, 2'b00}), .man_in_2({2'b01, magic_number_to_sub_1, 3'
823   ↪ b0}),
824   .man_output(res_from_sub_1)
825 );
826 significands_subtractor sub_2(
827   .man_in_1({3'b011, 25'b0}), .man_in_2(from_mul_2_to_sub_2),
828   .man_output(from_sub_2_to_mul_3)
829 );
830 // mul: man_in_1 * man_in_2
831 significands_multiplier mul_1(
832   .man_in_1(to_multiplier_1_and_3), .man_in_2(to_multiplier_1_and_3),
833   ↪ previous_desp2rigth(desp2rigth_to_multiplier_1),
834   .man_output(from_mul_1_to_mul_2), .actual_desp2rigth(
835   ↪ desp2rigth_from_multiplier_1_to_multiplier_2)
836 );
837 significands_multiplier mul_2(
838   .man_in_1(from_mul_1_to_mul_2), .man_in_2({3'b1, frac_in, 2'b00}), .
839   ↪ previous_desp2rigth(desp2rigth_from_multiplier_1_to_multiplier_2),
840   .man_output(from_mul_2_to_sub_2), .actual_desp2rigth(
841   ↪ desp2rigth_from_multiplier_2_to_multiplier_3)
842 );
843 significands_multiplier mul_3(
844   .man_in_1(to_multiplier_1_and_3), .man_in_2(from_sub_2_to_mul_3), .
845   ↪ previous_desp2rigth(desp2rigth_from_multiplier_2_to_multiplier_3),
846   .man_output(temp_to_reg), .actual_desp2rigth(desp2rigth_to_reg)
847 );
848 significands_multiplier mul_4(
849   .man_in_1(temp_from_reg), .man_in_2({2'b1, frac_in, 3'b00}), .previous_desp2rigth(
850   ↪ desp2rigth_from_reg),
851   .man_output(man_output), .actual_desp2rigth(desp2rigth_out)
852 );
853 // register
854 generic_register #(width(33)) temp_register(
855   .clk(clk), .reset(1'b0), .load(set), .data_in({temp_to_reg, desp2rigth_to_reg}),
856   .data_out({temp_from_reg, desp2rigth_from_reg})
857 );
858
859 endmodule

```

```

852
853 module significands_subtractor( // |man_in_1 - man_in_2|
854     input [27:0] man_in_1, man_in_2,
855     output [27:0] man_output
856 );
857     wire sticky;
858     wire [27:0] temp;
859     assign temp = ( unsigned'(man_in_1) >= unsigned'(man_in_2) ) ?
860             ( unsigned'(man_in_1) - unsigned'(man_in_2) ) :
861             ( unsigned'(man_in_2) - unsigned'(man_in_1) );
862     assign sticky = (man_in_1[0] | man_in_2[0] | temp[0]) ? 1 : 0;
863     assign man_output = {temp[27:1], sticky};
864 endmodule
865 /*----- SQRT END -----*/
866 /***** Arithmetic Units: end *****/
867
868 /*** Exceptions and trivial cases checker: begin ***/
869 module excep_triv_checker(
870     input start, clk,
871     input [2:0] rm,
872     input [1:0] op,
873     input sig1, sig2,
874     input [7:0] exp1, exp2,
875     input [23:0] frac1, frac2,
876     output ready,
877     output reg [2:0] status_out, sel_out
878 /*
879     rm =
880         000 -> RNE
881         001 -> RTZ
882         010 -> RDN
883         011 -> RUP
884         100 -> RMM
885     op =
886         00 -> ADD
887         01 -> MUL
888         10 -> DIV
889         11 -> SQRT
890 -----
891     status_out =
892         000 -> no flag
893         101 -> no flag (not used)
894         110 -> no flag (not used)
895 -----
896         001 -> UF flag
897         010 -> OF flag
898         011 -> NV flag
899         100 -> DZ flag
900         111 -> NX flag (not used here)
901     sel_out =
902         000 -> no trivial
903         001 -> in1

```

```

904     010 -> in2
905     011 -> almost inf
906     100 -> zero
907     101 -> almost zero
908     110 -> inf
909     111 -> nan
910   */
911 );
912 wire in1_is_nan, in2_is_nan, in1_is_zero, in2_is_zero, in1_is_inf, in2_is_inf,
913   → sig1_equal_sig2, xor_sigs, ready1, ready2;
914 wire[26:0] man1_normalized, man2_normalized;
915 wire [9:0] mul_exp_initial_res, div_exp_initial_res;
916 wire [4:0] offset1, offset2;
917 assign ready = ((ready1 | in1_is_zero) & (ready2 | in2_is_zero)) ? 1'b1 : 1'b0;
918 assign in1_is_nan = (exp1 == 8'b11111111 & frac1[22:0] != 23'b0) ? 1 : 0;
919 assign in2_is_nan = (exp2 == 8'b11111111 & frac2[22:0] != 23'b0) ? 1 : 0;
920 assign in1_is_zero = (exp1 == 8'b0 & frac1[22:0] == 23'b0) ? 1 : 0;
921 assign in2_is_zero = (exp2 == 8'b0 & frac2[22:0] == 23'b0) ? 1 : 0;
922 assign in1_is_inf = (exp1 == 8'b11111111 & frac1[22:0] == 23'b0) ? 1 : 0;
923 assign in2_is_inf = (exp2 == 8'b11111111 & frac2[22:0] == 23'b0) ? 1 : 0;
924 assign sig1_equal_sig2 = (sig1 == sig2) ? 1 : 0;
925 assign xor_sigs = (sig1^sig2) ? 1 : 0;
926 assign mul_exp_initial_res = signed'({2'b0, exp1}) - signed'({5'b0, offset1}) + signed
927   → '({2'b0, exp2}) - signed'({5'b0, offset2}) - signed'(10'b001111111);
928 assign div_exp_initial_res = signed'({2'b0, exp1}) - signed'({5'b0, offset1}) - signed'({2'
929   → b0, exp2}) + signed'({5'b0, offset2}) + signed'(10'b001111111);
930 always_comb
931   if(in1_is_nan | (in2_is_nan & (op != 2'b11))) {status_out, sel_out} = {3'b011, 3'
932   → b111}; // NV flag - nan
933   else case (op)
934     2'b00: // ADD
935       casex ({in1_is_zero, in2_is_zero, in1_is_inf, in2_is_inf})
936         4'b1X_0X: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b010}; // no flag - in2
937         4'b01_X0: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b001}; // no flag - in1
938         4'b00_11: {status_out, sel_out} = xor_sigs ? {3'b011, 3'b111} : // NV flag -
939   → nan
940           {3'b000, 3'b001} ; // no flag - in1
941         4'b00_10: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b001}; // no flag - in1
942         4'b00_01: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b010}; // no flag - in2
943         default: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b000}; // no flag - no trivial
944       endcase
945     2'b01: // MUL
946       casex ({in1_is_zero, in2_is_zero, in1_is_inf, in2_is_inf})
947         4'b1X_01: {status_out, sel_out} = {3'b011, 3'b111}; // NV flag - nan
948         4'b1X_00: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b100}; // no flag - zero
949         4'b01_10: {status_out, sel_out} = {3'b011, 3'b111}; // NV flag - nan
950         4'b01_00: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b100}; // no flag - zero
951         4'b00_1X: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b110}; // no flag - inf
952         4'b00_X1: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b110}; // no flag - inf
953         default:
954           if(signed'(mul_exp_initial_res)>=signed'(10'b001111111)) begin
955             // OF flag - "inf" or "almost inf" (for DIV or MUL)

```

```

951     status_out = 3'b010;
952     sel_out = (rm == 3'b001) ? 3'b011 : // RTZ
953         ((rm == 3'b010) ? ( xor_sigs ? 3'b110 : 3'b011) : // RDN
954             ((rm == 3'b011) ? (~xor_sigs ? 3'b110 : 3'b011) : // RUP
955                 3'b110));
956 end
957 else if(signed'(mul_exp_initial_res)<signed'(-24)) begin
958     // Uf flag - "zero" or "almost zero" (for DIV or MUL)
959     status_out = 3'b001;
960     sel_out = (rm == 3'b001) ? 3'b100 : // RTZ
961         ((rm == 3'b010) ? ( xor_sigs ? 3'b101 : 3'b100) : // RDN
962             ((rm == 3'b011) ? (~xor_sigs ? 3'b101 : 3'b100) : // RUP
963                 3'b100));
964 end
965 else {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b000}; // no flag - no trivial
966 endcase
967 2'b10: // DIV
968 casex ({in1_is_zero, in2_is_zero, in1_is_inf, in2_is_inf})
969     4'b11_00: {status_out, sel_out} = {3'b011, 3'b111}; // NV flag - nan
970     4'b10_0X: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b100}; // no flag - zero
971     4'b01_X0: {status_out, sel_out} = {3'b100, 3'b110}; // DZ flag - inf
972     4'b00_11: {status_out, sel_out} = {3'b011, 3'b111}; // NV flag - nan
973     4'b00_10: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b110}; // no flag - inf
974     4'b00_01: {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b100}; // no flag - zero
975     default:
976         if(signed'(div_exp_initial_res)>=signed'(10'b00011111111)) begin
977             if((unsigned')(man1_normalized)<unsigned'(man2_normalized))&(signed
978                 ↪ '(div_exp_initial_res)==signed'(10'b00011111111))
979                 {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b000}; // no flag -
980             else begin
981                 // OF flag - "inf" or "almost inf" (for DIV or MUL)
982                 status_out = 3'b010;
983                 sel_out = (rm == 3'b001) ? 3'b011 : // RTZ
984                     ((rm == 3'b010) ? ( xor_sigs ? 3'b110 : 3'b011) : // RDN
985                         ((rm == 3'b011) ? (~xor_sigs ? 3'b110 : 3'b011) : // RUP
986                             3'b110));
987             end
988         // RNE - RMM
989     end
990 else if(signed'(div_exp_initial_res)<signed'(-24)) begin
991     // Uf flag - "zero" or "almost zero" (for DIV or MUL)
992     status_out = 3'b001;
993     sel_out = (rm == 3'b001) ? 3'b100 : // RTZ
994         ((rm == 3'b010) ? ( xor_sigs ? 3'b101 : 3'b100) : // RDN
995             ((rm == 3'b011) ? (~xor_sigs ? 3'b101 : 3'b100) : // RUP
996                 3'b100)); // RNE - RMM
997 end
998 else {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b000}; // no flag - no trivial
999 endcase
1000 default: // SQRT
1001     if(sig1) {status_out, sel_out} = {3'b011, 3'b111}; // NV flag - nan
1002     else if(in1_is_zero | in1_is_inf) {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b001}; //

```

```

    ↪ no flag - in1
1002      else {status_out, sel_out} = {3'b000, 3'b000}; // no flag - no trivial
1003  endcase
1004  normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_checker1(
1005      .start(start), .clk(clk), .man_in({frac1[23:0], 3'b0}),
1006      .ready(ready1), .man_out(man1_normalized), .offset(offset1)
1007 );
1008  normalizer4significands_inputs normalizer4significands_inputs_checker2(
1009      .start(start), .clk(clk), .man_in({frac2[23:0], 3'b0}),
1010      .ready(ready2), .man_out(man2_normalized), .offset(offset2)
1011 );
1012 endmodule
1013 /*** Exceptions and trivial cases checker: end *****/

```

top_constraints.xdc: Archivo que define las *constraints* del proyecto en *Vivado*.

```

1 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {color_leds[5]}]
2 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {color_leds[4]}]
3 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {color_leds[3]}]
4 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {color_leds[2]}]
5 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {color_leds[1]}]
6 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {color_leds[0]}]
7 set_property PACKAGE_PIN F6 [get_ports {color_leds[0]}]
8 set_property PACKAGE_PIN F13 [get_ports {color_leds[1]}]
9 set_property PACKAGE_PIN K5 [get_ports {color_leds[2]}]
10 set_property PACKAGE_PIN L16 [get_ports {color_leds[3]}]
11 set_property PACKAGE_PIN H6 [get_ports {color_leds[4]}]
12 set_property PACKAGE_PIN K6 [get_ports {color_leds[5]}]
13 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[15]}]
14 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[14]}]
15 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[13]}]
16 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[12]}]
17 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[11]}]
18 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[10]}]
19 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[9]}]
20 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[8]}]
21 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[7]}]
22 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[6]}]
23 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[5]}]
24 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[4]}]
25 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[3]}]
26 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[2]}]
27 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[1]}]
28 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {display[0]}]
29 set_property PACKAGE_PIN M4 [get_ports {display[0]}]
30 set_property PACKAGE_PIN L6 [get_ports {display[1]}]
31 set_property PACKAGE_PIN M2 [get_ports {display[2]}]
32 set_property PACKAGE_PIN K3 [get_ports {display[3]}]
33 set_property PACKAGE_PIN L4 [get_ports {display[4]}]
34 set_property PACKAGE_PIN L5 [get_ports {display[5]}]
35 set_property PACKAGE_PIN L3 [get_ports {display[7]}]
36 set_property PACKAGE_PIN N1 [get_ports {display[6]}]

```

```

37 set_property PACKAGE_PIN N6 [get_ports {display[8]}]
38 set_property PACKAGE_PIN M6 [get_ports {display[9]}]
39 set_property PACKAGE_PIN M3 [get_ports {display[10]}]
40 set_property PACKAGE_PIN N5 [get_ports {display[11]}]
41 set_property PACKAGE_PIN N2 [get_ports {display[12]}]
42 set_property PACKAGE_PIN N4 [get_ports {display[13]}]
43 set_property PACKAGE_PIN L1 [get_ports {display[14]}]
44 set_property PACKAGE_PIN M1 [get_ports {display[15]}]
45 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[15]}]
46 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[14]}]
47 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[13]}]
48 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[12]}]
49 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[11]}]
50 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[10]}]
51 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[9]}]
52 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[8]}]
53 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[7]}]
54 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[6]}]
55 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[5]}]
56 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[4]}]
57 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[3]}]
58 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[2]}]
59 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[1]}]
60 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {in[0]}]
61 set_property PACKAGE_PIN U9 [get_ports {in[0]}]
62 set_property PACKAGE_PIN U8 [get_ports {in[1]}]
63 set_property PACKAGE_PIN R7 [get_ports {in[2]}]
64 set_property PACKAGE_PIN R6 [get_ports {in[3]}]
65 set_property PACKAGE_PIN R5 [get_ports {in[4]}]
66 set_property PACKAGE_PIN V7 [get_ports {in[5]}]
67 set_property PACKAGE_PIN V6 [get_ports {in[6]}]
68 set_property PACKAGE_PIN V5 [get_ports {in[7]}]
69 set_property PACKAGE_PIN U4 [get_ports {in[8]}]
70 set_property PACKAGE_PIN V2 [get_ports {in[9]}]
71 set_property PACKAGE_PIN U2 [get_ports {in[10]}]
72 set_property PACKAGE_PIN T3 [get_ports {in[11]}]
73 set_property PACKAGE_PIN T1 [get_ports {in[12]}]
74 set_property PACKAGE_PIN R3 [get_ports {in[13]}]
75 set_property PACKAGE_PIN P3 [get_ports {in[14]}]
76 set_property PACKAGE_PIN P4 [get_ports {in[15]}]
77 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[15]}]
78 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[14]}]
79 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[13]}]
80 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[12]}]
81 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[11]}]
82 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[10]}]
83 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[9]}]
84 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[8]}]
85 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[7]}]
86 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[6]}]
87 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[5]}]
88 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[4]}]

```

```

89 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[3]}]
90 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[2]}]
91 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[1]}]
92 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports {leds[0]}]
93 set_property PACKAGE_PIN T8 [get_ports {leds[0]}]
94 set_property PACKAGE_PIN V9 [get_ports {leds[1]}]
95 set_property PACKAGE_PIN R8 [get_ports {leds[2]}]
96 set_property PACKAGE_PIN T6 [get_ports {leds[3]}]
97 set_property PACKAGE_PIN T5 [get_ports {leds[4]}]
98 set_property PACKAGE_PIN T4 [get_ports {leds[5]}]
99 set_property PACKAGE_PIN U7 [get_ports {leds[6]}]
100 set_property PACKAGE_PIN U6 [get_ports {leds[7]}]
101 set_property PACKAGE_PIN V4 [get_ports {leds[8]}]
102 set_property PACKAGE_PIN U3 [get_ports {leds[9]}]
103 set_property PACKAGE_PIN V1 [get_ports {leds[10]}]
104 set_property PACKAGE_PIN R1 [get_ports {leds[11]}]
105 set_property PACKAGE_PIN P5 [get_ports {leds[12]}]
106 set_property PACKAGE_PIN U1 [get_ports {leds[13]}]
107 set_property PACKAGE_PIN R2 [get_ports {leds[14]}]
108 set_property PACKAGE_PIN P2 [get_ports {leds[15]}]
109 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports resume_asin]
110 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports rst_asin]
111 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports start_asin]
112 set_property PACKAGE_PIN C12 [get_ports rst_asin]
113 set_property PACKAGE_PIN F15 [get_ports start_asin]
114 set_property PACKAGE_PIN V10 [get_ports resume_asin]
115
116 set_property IOSTANDARD LVCMOS33 [get_ports clk]
117 set_property PACKAGE_PIN E3 [get_ports clk]
118
119 set_property CFGBVS VCCO [current_design]
120 set_property CONFIG_VOLTAGE 3.3 [current_design]
121
122 create_clock -period 270.000 -name CLK -waveform {0.000 135.000} -add [get_ports clk]

```

2 ANEXO: *Test Benches*

En esta sección se presentan *test benches* creados para probar distintos módulos del *SoC* diseñado:

tb_memory.sv: *Test bench* encargado de comprobar el correcto funcionamiento del módulo *memory.sv*.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4 */
5 `timescale 1ns / 1ps
6
7 module tb_memory;
8

```

```

9 // Inputs
10 reg clk = 0;
11 reg rst = 0;
12 reg rw = 0;
13 reg valid = 0;
14 reg [31:0] addr = 0;
15 reg [31:0] data_in = 0;
16 reg [1:0] byte_half_word = 0;
17 reg is_load_unsigned = 0;
18 // Outputs
19 wire ready;
20 wire out_of_range;
21 wire [31:0] data_out;
22
23 // Unit under test (UUT)
24 memory uut(
25     // Inputs
26     .clk(clk),
27     .rst(rst),
28     .rw(rw),
29     .valid(valid),
30     .addr(addr),
31     .data_in(data_in),
32     .byte_half_word(byte_half_word),
33     .is_load_unsigned(is_load_unsigned),
34     // Outputs
35     .ready(ready),
36     .out_of_range(out_of_range),
37     .data_out(data_out)
38 );
39
40 always #5 clk = ~clk;
41
42 // Testing
43 initial begin
44     // máxima dirección posible: 32'b0000000000000000_1111_0100_0001_1111
45     int initial_time, elapsed_time;
46     $display("\nÚltimo byte direccionable: %h\n", 32'
47     ↪ b0000000000000000_1111_0100_0001_1111);
48
49     // test 1: verificar señal "out_of_range"
50     $display("test 1: verificar señal \"out_of_range\"");
51     addr = 32'b0000000000000000_1111_0100_0101_1111;
52     data_in = 32'b01101010011100001010001100001100;
53     // options
54     byte_half_word = 2'b00;
55     is_load_unsigned = 0;
56     rw = 0;
57     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
58     $display("options: load word");
59     // execution
60     #10 ; initial_time = $time; valid = 1;

```

```

60    while(~ready & ~out_of_range) #10;
61    elapsed_time = $time-initial_time;
62    $display("Initial time: %t", initial_time);
63    $display("Elapsed time: %t", elapsed_time);
64    // test
65    if(~out_of_range)
66        $display("test 1: failed\n");
67    else $display("test 1: passed\n");
68    #10 ; valid = 0;
69
70    // test 2: gardar data (word) y leerla
71    $display("test 2: gardar data (word) y leerla");
72    addr    = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1011;
73    data_in = 32'b0110101001100001010001100001100;
74    // options
75    byte_half_word    = 2'b00;
76    is_load_unsigned  = 0;
77    rw     = 1;
78    $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
79    $display("options: store word",);
80    // execution
81    #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
82    while(~ready & ~out_of_range) #10;
83    elapsed_time = $time-initial_time;
84    $display("store - Initial time: %t", initial_time);
85    $display("store - Elapsed time: %t", elapsed_time);
86    #10 ; valid = 0;
87    // options
88    byte_half_word    = 2'b00;
89    is_load_unsigned  = 0;
90    rw     = 0;
91    $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
92    $display("options: load word",);
93    // execution
94    #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
95    while(~ready & ~out_of_range) #10;
96    elapsed_time = $time-initial_time;
97    $display("load - Initial time: %t", initial_time);
98    $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
99    // test
100   $display("data_out: %h",data_out);
101   if(data_in == data_out)
102       $display("test 2: passed\n");
103   else $display("test 2: failed\n");
104   #10 ; valid = 0;
105
106   // test 3: gardar data (word) y leerla en el mismo bloque cache del test 2 pero otra
107   ↪ palabra
108   $display("test 3: gardar data (word) y leerla en el mismo bloque cache del test 2 pero
109   ↪ otra palabra");
108   addr    = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1111;
109   data_in = 32'b011000110011100101000001100001100;

```

```

110 // options
111 byte_half_word      = 2'b00;
112 is_load_unsigned   = 0;
113 rw      = 1;
114 $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
115 $display("options: store word",);
116 // execution
117 #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
118 while(~ready & ~out_of_range) #10;
119 elapsed_time = $time-initial_time;
120 $display("store - Initial time: %t", initial_time);
121 $display("store - Elapsed time: %t", elapsed_time);
122 #10 ; valid = 0;
123 // options
124 byte_half_word      = 2'b00;
125 is_load_unsigned   = 0;
126 rw      = 0;
127 $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
128 $display("options: load word",);
129 // execution
130 #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
131 while(~ready & ~out_of_range) #10;
132 elapsed_time = $time-initial_time;
133 $display("load - Initial time: %t", initial_time);
134 $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
135 // test
136 $display("data_out: %h",data_out);
137 if(data_in == data_out)
138     $display("test 3: passed\n");
139 else $display("test 3: failed\n");
140 #10 ; valid = 0;
141
142 // test 4: leer la palabra almacenada en el test 2 (para comprobar que se haya
143 // almacenado correctamente despues de los tests anteriores)
144 $display("test 4: leer la palabra almacenada en el test 2 (para comprobar que se haya
145 // almacenado correctamente despues de los tests anteriores)");
146 addr    = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1011;
147 data_in = 32'b011000110011100101000001100001100;
148 // options
149 byte_half_word      = 2'b00;
150 is_load_unsigned   = 0;
151 rw      = 0;
152 $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
153 $display("options: load word",);
154 // execution
155 #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
156 while(~ready & ~out_of_range) #10;
157 elapsed_time = $time-initial_time;
158 $display("load - Initial time: %t", initial_time);
159 $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
160 // test
161 $display("data_out: %h",data_out);

```

```

160 if(data_out == 32'b01101010011100001010001100001100)
161     $display("test 4: passed\n");
162 else $display("test 4: failed\n");
163 #10 ; valid = 0;
164
165 // test 5: leer un byte signed
166 $display("test 5: leer un byte signed");
167 addr   = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1011;
168 data_in = 32'b01100011001110010100001100001100;
169 // options
170 byte_half_word    = 2'b10;
171 is_load_unsigned  = 0;
172 rw      = 0;
173 $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
174 $display("options: load byte signed",);
175 // execution
176 #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
177 while(~ready & ~out_of_range) #10;
178 elapsed_time = $time-initial_time;
179 $display("load - Initial time: %t", initial_time);
180 $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
181 // test
182 $display("data_out: %h",data_out);
183 if(data_out == 32'b00000000000000000000000000000000_01101010)
184     $display("test 5: passed\n");
185 else $display("test 5: failed\n");
186 #10 ; valid = 0;
187
188 // test 6: leer un byte signed
189 $display("test 6: leer un byte signed");
190 addr   = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1001;
191 data_in = 32'b01100011001110010100001100001100;
192 // options
193 byte_half_word    = 2'b10;
194 is_load_unsigned  = 0;
195 rw      = 0;
196 $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
197 $display("options: load byte signed",);
198 // execution
199 #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
200 while(~ready & ~out_of_range) #10;
201 elapsed_time = $time-initial_time;
202 $display("load - Initial time: %t", initial_time);
203 $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
204 // test
205 $display("data_out: %h",data_out);
206 if(data_out == 32'b11111111111111111111111111)
207     $display("test 6: passed\n");
208 else $display("test 6: failed\n");
209 #10 ; valid = 0;
210
211 // test 7: leer el mismo byte anterior pero unsigned

```

```

212     $display("test 7: leer el mismo byte anterior pero unsigned");
213     addr    = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1001;
214     data_in = 32'b01100011001100101000001100001100;
215     // options
216     byte_half_word    = 2'b10;
217     is_load_unsigned   = 1;
218     rw      = 0;
219     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
220     $display("options: load byte unsigned",);
221     // execution
222     #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
223     while(~ready & ~out_of_range) #10;
224     elapsed_time = $time-initial_time;
225     $display("load - Initial time: %t", initial_time);
226     $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
227     // test
228     $display("data_out: %h",data_out);
229     if(data_out == 32'b0000000000000000000000000000)
230         $display("test 7: passed\n");
231     else $display("test 7: failed\n");
232     #10 ; valid = 0;

233
234     // test 8: ahora se modifica el byte leido en los test 6 y 7, luego se lee
235     $display("test 8: ahora se modifica el byte leido en los test 6 y 7, luego se lee");
236     addr    = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1001;
237     data_in = 32'b011000110011001010000011_1111100;
238     // options
239     byte_half_word    = 2'b10;
240     is_load_unsigned   = 0;
241     rw      = 1;
242     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
243     $display("options: store byte",);
244     // execution
245     #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
246     while(~ready & ~out_of_range) #10;
247     elapsed_time = $time-initial_time;
248     $display("store - Initial time: %t", initial_time);
249     $display("store - Elapsed time: %t", elapsed_time);
250     #10 ; valid = 0;
251     // options
252     byte_half_word    = 2'b10;
253     is_load_unsigned   = 1;
254     rw      = 0;
255     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
256     $display("options: load byte unsigned",);
257     // execution
258     #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
259     while(~ready & ~out_of_range) #10;
260     elapsed_time = $time-initial_time;
261     $display("load - Initial time: %t", initial_time);
262     $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
263     // test

```

```

264     $display("data_out: %h",data_out);
265     if(data_out == 32'b00000000000000000000000000000000_11111100)
266         $display("test 8: passed\n");
267     else $display("test 8: failed\n");
268     #10 ; valid = 0;
269
270     // test 9: se comprueba que la palabra donde se almacena el byte modificado en el test
271     // → 8 mantenga el resto de sus bits en orden
272     $display("test 9: se comprueba que la palabra donde se almacena el byte modificado en
273     // el test 8 mantenga el resto de sus bits en orden");
274     addr    = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1001;
275     data_in = 32'b011000110011100101000001100001100;
276     // options
277     byte_half_word    = 2'b00;
278     is_load_unsigned  = 1;
279     rw      = 0;
280     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
281     $display("options: load word",);
282     // execution
283     #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
284     while(~ready & ~out_of_range) #10;
285     elapsed_time = $time-initial_time;
286     $display("load - Initial time: %t", initial_time);
287     $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
288     // test
289     $display("data_out: %h",data_out);
290     if(data_out == 32'b0110101001110000_11111100_00001100)
291         $display("test 9: passed\n");
292     else $display("test 9: failed\n");
293     #10 ; valid = 0;
294
295     // test 10: se cambian los bits del tag c/r a la dirección del test 9 y se guarda un
296     // → halfword, luego se lee el word
297     $display("test 10: se cambian los bits del tag c/r a la dirección del test 9 y se guarda
298     // un halfword, luego se lee el word");
299     addr    = 32'b0000000000000000_0001_0100_0001_1001;
300     data_in = 32'b011000110011100101000001100001100;
301     // options
302     byte_half_word    = 2'b01;
303     is_load_unsigned  = 0;
304     rw      = 1;
305     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
306     $display("options: store halfword",);
307     // execution
308     #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
309     while(~ready & ~out_of_range) #10;
310     elapsed_time = $time-initial_time;
311     $display("store - Initial time: %t", initial_time);
312     $display("store - Elapsed time: %t", elapsed_time);
313     #10 ; valid = 0;
314     // options
315     byte_half_word    = 2'b00;

```

```

312     is_load_unsigned    = 1;
313     rw      = 0;
314     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
315     $display("options: load word",);
316     // execution
317     #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
318     while(~ready & ~out_of_range) #10;
319     elapsed_time = $time-initial_time;
320     $display("load - Initial time: %t", initial_time);
321     $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
322     // test
323     $display("data_out: %h",data_out);
324     if(data_out == 32'b0000000000000000_1000001100001100)
325         $display("test 10: passed\n");
326     else $display("test 10: failed\n");
327     #10 ; valid = 0;
328
329     // test 11: se vuelve a usar la dirección del test 9 para leer el halfword almacenada en
330     //→ dicha dirección
331     $display("test 11: se vuelve a usar la dirección del test 9 para leer el halfword
332     //→ almacenada en dicha dirección");
333     addr    = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1001;
334     data_in = 32'b011000110011100101000001100001100;
335     // options
336     byte_half_word    = 2'b01;
337     is_load_unsigned   = 1;
338     rw      = 0;
339     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
340     $display("options: load halfword unsigned",);
341     // execution
342     #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
343     while(~ready & ~out_of_range) #10;
344     elapsed_time = $time-initial_time;
345     $display("load - Initial time: %t", initial_time);
346     $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
347     // test
348     $display("data_out: %h",data_out);
349     if(data_out == 32'b0000000000000000_11111100_00001100)
350         $display("test 11: passed\n");
351     else $display("test 11: failed\n");
352     #10 ; valid = 0;
353
354     // test 12: misma operación del test 11 pero con signo
355     $display("test 12: misma operación del test 11 pero con signo");
356     addr    = 32'b0000000000000000_1001_0100_0001_1001;
357     data_in = 32'b011000110011100101000001100001100;
358     // options
359     byte_half_word    = 2'b01;
360     is_load_unsigned   = 0;
361     rw      = 0;
362     $display(">> addr: %h - data_in: %h", addr, data_in);
363     $display("options: load halfword signed",);

```

```

362 // execution
363 #10 ; initial_time = $time; valid = 1;
364 while(~ready & ~out_of_range) #10;
365 elapsed_time = $time-initial_time;
366 $display("load - Initial time: %t", initial_time);
367 $display("load - Elapsed time: %t", elapsed_time);
368 // test
369 $display("data_out: %h",data_out);
370 if(data_out == 32'b1111111111111111_11111100_00001100)
371     $display("test 12: passed\n");
372 else $display("test 12: failed\n");
373 #10 ; valid = 0;
374
375
376 #10 $finish;
377
378 end
379
380 endmodule

```

tb_FPU.sv: *Test bench* encargado de comprobar el correcto funcionamiento del módulo *FPU.sv*.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4 */
5 'timescale 1ns / 1ps
6
7 module tb_FPU;
8     // FPU inputs
9     reg start = 0; reg rst = 0; reg clk = 0;
10    reg [2:0] rm_to_FPU = 0; reg [4:0] option_to_FPU = 0;
11    reg [31:0] input_1 = 0; reg [31:0] input_2 = 0; reg [31:0] input_3 = 0;
12    // fpu_op_selection inputs
13    reg [4:0] rs2_add = 0; reg [3:0] funct7_out = 0;
14    reg [2:0] format_type = 0; reg [2:0] sub_format_type = 0;
15    reg [2:0] funct3 = 0; reg [2:0] rm_from_fcsr = 0;
16    // FPU outputs
17    wire ready, NV, NX, UF, OF, DZ;
18    wire [31:0] out;
19    // fpu_op_selection outputs
20    wire [2:0] rm_fpu_op_selection;
21    wire [4:0] option_fpu_op_selection;
22
23 FPU FPU_uut(
24     // Inputs
25     .start(start), .rst(rst), .clk(clk), // start: Need to be on til the op is ready
26     .rm(rm_to_FPU), .option(option_to_FPU), .in1(input_1), .in2(input_2), .in3(
27     ↪ input_3),
28     // Outputs
29     .ready(ready), .NV(NV), .NX(NX), .UF(UF), .OF(OF), .DZ(DZ), .out(out)
);

```

```

30     fpu_op_selection fpu_op_selection_uut(
31         // Inputs
32         .rs2_add(rs2_add), .funct7_out(funct7_out),
33         .format_type(format_type), .sub_format_type(sub_format_type),
34         .funct3(funct3), .rm_from_fcsr(rm_from_fcsr),
35         // Outputs
36         .rm2fpu(rm_fpu_op_selection), .fpu_option(option_fpu_op_selection)
37     );
38
39     always #5 clk = ~clk;
40
41     initial begin
42         #10 start = 0;
43         // FPU
44         option_to_FPU = 5'b0_01_00;
45         rm_to_FPU = 3'b000;
46         input_1 = 32'b1111_1111_1111_1111_1111_1111_1111_1010;
47         input_2 = 32'b1111111111100;
48         input_3 = 32'b0;
49         // fpu_op_selection
50         rs2_add      = 5'b00000;
51         funct7_out   = 4'b0110;
52         format_type  = 3'b000;
53         sub_format_type = 3'b000;
54         funct3       = 3'b111;
55         rm_from_fcsr = 3'b011;
56         /////////////////////////////////
57         #10 start = 1;
58         while(~ready) #10;
59         // FPU
60         $display("FPU- out: %b", out);
61         $display("FPU- NV, NX, UF, OF, DZ: %b \n", {NV, NX, UF, OF, DZ});
62         // fpu_op_selection
63         $display("fpu_op_selection- rm2fpu: %b", rm_fpu_op_selection);
64         $display("fpu_op_selection- fpu_option: %b \n", option_fpu_op_selection);
65         #10 start = 0; #10 $finish;
66     end
67 endmodule

```

tb_riscv32imf_top.sv: Test bench encargado de comprobar el correcto funcionamiento de los módulos *core complex*: *riscv32imf_singlecycle* y *riscv32imf_pipeline* (en las líneas 19 y 20 se aprecia como se comenta la versión *Single-Cycle* y se deja por defecto la *Pipelined*). Está diseñado para ser ejecutado con el código ensamblador *testing_code_imf.s* cargado en las memorias del *core complex*.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4
5 para: testing_code_imf.s
6 */
7 `timescale 1ns / 1ps
8

```

```

9 module tb_riscv32imf_top;
10    reg clk, rst, start, acces_to_registers_files, is_wb_data_fp_fromEEI, do_wb_fromEEI,
11        ↪ is_rs1_fp_fromEEI, is_rs2_fp_fromEEI;
12    reg acces_to_prog_mem, prog_rw_fromEEI, prog_valid_mem_fromEEI,
13        ↪ prog_is_load_unsigned_fromEEI;
14    reg acces_to_data_mem, data_rw_fromEEI, data_valid_mem_fromEEI,
15        ↪ data_is_load_unsigned_fromEEI;
16    reg [31:0] initial_PC, prog_addr_fromEEI, prog_in_fromEEI, data_addr_fromEEI,
17        ↪ data_in_fromEEI, wb_data_fromEEI;
18    reg [1:0] prog_byte_half_word_fromEEI, data_byte_half_word_fromEEI;
19    reg [4:0] rs1_add_fromEEI, rs2_add_fromEEI, wb_add_fromEEI;
20    wire ready, prog_ready_toEEI, prog_out_of_range_toEEI, data_ready_toEEI,
21        ↪ data_out_of_range_toEEI;
22    wire [1:0] exit_status;
23    wire [31:0] prog_out_toEEI, data_out_toEEI, rs1_toEEI, rs2_toEEI, PC;
24    //riscv32imf_singlecycle
25    riscv32imf_pipeline
26    riscv32imf(
27        // inputs
28            .clk(clk), .rst(rst), .start(start), .acces_to_registers_files(acces_to_registers_files),
29            .is_wb_data_fp_fromEEI(is_wb_data_fp_fromEEI), .do_wb_fromEEI(
30                ↪ do_wb_fromEEI),
31            .is_rs1_fp_fromEEI(is_rs1_fp_fromEEI), .is_rs2_fp_fromEEI(is_rs2_fp_fromEEI),
32            .acces_to_prog_mem(acces_to_prog_mem), .prog_rw_fromEEI(prog_rw_fromEEI),
33            .prog_valid_mem_fromEEI(prog_valid_mem_fromEEI), .
34            ↪ prog_is_load_unsigned_fromEEI(prog_is_load_unsigned_fromEEI),
35            .acces_to_data_mem(acces_to_data_mem), .data_rw_fromEEI(data_rw_fromEEI),
36            .data_valid_mem_fromEEI(data_valid_mem_fromEEI), .
37            ↪ data_is_load_unsigned_fromEEI(data_is_load_unsigned_fromEEI),
38            .initial_PC(initial_PC),
39            .prog_addr_fromEEI(prog_addr_fromEEI), .prog_in_fromEEI(prog_in_fromEEI),
40            .data_addr_fromEEI(data_addr_fromEEI), .data_in_fromEEI(data_in_fromEEI), .
41            ↪ wb_data_fromEEI(wb_data_fromEEI),
42            .prog_byte_half_word_fromEEI(prog_byte_half_word_fromEEI), .
43            ↪ data_byte_half_word_fromEEI(data_byte_half_word_fromEEI),
44            .rs1_add_fromEEI(rs1_add_fromEEI), .rs2_add_fromEEI(rs2_add_fromEEI), .
45            ↪ wb_add_fromEEI(wb_add_fromEEI),
46            // outputs
47            .ready(ready),
48            .prog_ready_toEEI(prog_ready_toEEI), .prog_out_of_range_toEEI(
49            ↪ prog_out_of_range_toEEI),
50            .data_ready_toEEI(data_ready_toEEI), .data_out_of_range_toEEI(
51            ↪ data_out_of_range_toEEI),
52            .exit_status(exit_status),
53            .prog_out_toEEI(prog_out_toEEI), .data_out_toEEI(data_out_toEEI), .rs1_toEEI(
54            ↪ rs1_toEEI), .rs2_toEEI(rs2_toEEI), .PC(PC)
55        );
56    always #5 clk = ~clk;
57    initial begin
58        int prog_out_file, data_out_file, registers_file;
59        string buff_str;
60        {clk, rst, start, acces_to_registers_files, is_wb_data_fp_fromEEI, do_wb_fromEEI,

```

```

    ↵ is_rs1_fp_fromEEI, is_rs2_fp_fromEEI,
47    acces_to_prog_mem, prog_rw_fromEEI, prog_valid_mem_fromEEI,
    ↵ prog_is_load_unsigned_fromEEI,
48    acces_to_data_mem, data_rw_fromEEI, data_valid_mem_fromEEI,
    ↵ data_is_load_unsigned_fromEEI,
49    initial_PC, prog_addr_fromEEI, prog_in_fromEEI, data_addr_fromEEI,
    ↵ data_in_fromEEI, wb_data_fromEEI,
50    prog_byte_half_word_fromEEI, data_byte_half_word_fromEEI, rs1_add_fromEEI,
    ↵ rs2_add_fromEEI, wb_add_fromEEI} = 0;
51    $display("\nBEGIN\n");
52    prog_out_file = $fopen("prog_out.mem","w");
53    data_out_file = $fopen("data_out.mem","w");
54    registers_file = $fopen("registers.mem","w");
55    if(prog_out_file) $display("prog_out.mem - OK: %0d", prog_out_file); else $display(
    ↵ prog_out.mem - FAILED: %0d", prog_out_file);
56    if(data_out_file) $display("data_out.mem - OK: %0d", data_out_file); else $display(
    ↵ data_out.mem - FAILED: %0d", data_out_file);
57    if(registers_file) $display("registers.mem - OK: %0d", registers_file); else $display(
    ↵ registers.mem - FAILED: %0d", registers_file);
58    $display("\n");
59    // Se ejecuta el programa
60    #10 start = 1; while(~ready) #10;
61    $display("\nexit_status: %b\n", exit_status);
62    $display("\nPC: %h\n", PC+32'b100);
63    #10 start = 0;
64    // Se guarda el estado de la memoria de programa
65    acces_to_prog_mem = 1'b1;
66    while(1) begin
67        #10;
68        prog_valid_mem_fromEEI = 1'b1;
69        while(~prog_ready_toEEI & ~prog_out_of_range_toEEI) #10;
70        if(prog_out_of_range_toEEI == 1) break;
71        $fwriteh(prog_out_file, prog_addr_fromEEI); $fwrite(prog_out_file, ": ");
72        $fwriteh(prog_out_file, prog_out_toEEI); $fwrite(prog_out_file, "\n");
73        #10;
74        prog_valid_mem_fromEEI = 1'b0;
75        prog_addr_fromEEI += 4;
76    end
77    {prog_addr_fromEEI, acces_to_prog_mem, prog_valid_mem_fromEEI} = 0;
78    // Se guarda el estado de la memoria de datos
79    acces_to_data_mem = 1'b1;
80    while(1) begin
81        #10;
82        data_valid_mem_fromEEI = 1'b1;
83        while(~data_ready_toEEI & ~data_out_of_range_toEEI) #10;
84        if(data_out_of_range_toEEI == 1) break;
85        $fwriteh(data_out_file, data_addr_fromEEI); $fwrite(data_out_file, ": ");
86        $fwriteh(data_out_file, data_out_toEEI); $fwrite(data_out_file, "\n");
87        #10;
88        data_valid_mem_fromEEI = 1'b0;
89        data_addr_fromEEI += 4;
90    end

```

```

91 {data_addr_fromEEI, acces_to_data_mem, data_valid_mem_fromEEI} = 0;
92 // se guarda el estado del register files
93 acces_to_registers_files = 1'b1;
94 $fwrite(registers_file, "integer_regs\n");
95 {is_rs1_fp_fromEEI, is_rs2_fp_fromEEI} = 2'b00;
96 {rs1_add_fromEEI, rs2_add_fromEEI} = 10'b00000_00001;
97 for(int i = 0; i < 16; i++) begin
98     #10;
99     $fwriteh(registers_file, rs1_add_fromEEI); $fwrite(registers_file, ":   ");
100    $fwriteh(registers_file, rs1_toEEI); $fwrite(registers_file, "\n");
101    $fwriteh(registers_file, rs2_add_fromEEI); $fwrite(registers_file, ":   ");
102    $fwriteh(registers_file, rs2_toEEI); $fwrite(registers_file, "\n");
103    #10;
104    rs1_add_fromEEI += 5'b10;
105    rs2_add_fromEEI += 5'b10;
106    #10;
107 end
108 $fwrite(registers_file, "fp_regs\n");
109 {is_rs1_fp_fromEEI, is_rs2_fp_fromEEI} = 2'b11;
110 {rs1_add_fromEEI, rs2_add_fromEEI} = 10'b00000_00001;
111 for(int i = 0; i < 16; i++) begin
112     #10;
113     $fwriteh(registers_file, rs1_add_fromEEI); $fwrite(registers_file, ":   ");
114     $fwriteh(registers_file, rs1_toEEI); $fwrite(registers_file, "\n");
115     $fwriteh(registers_file, rs2_add_fromEEI); $fwrite(registers_file, ":   ");
116     $fwriteh(registers_file, rs2_toEEI); $fwrite(registers_file, "\n");
117     #10;
118     rs1_add_fromEEI += 5'b10;
119     rs2_add_fromEEI += 5'b10;
120     #10;
121 end
122 {rs1_add_fromEEI, rs2_add_fromEEI, is_rs1_fp_fromEEI, is_rs2_fp_fromEEI,
123  ↪ acces_to_registers_files} = 0;
124 // fin
125 $display("\nEND\n");
126 $fclose(prog_out_file); $fclose(data_out_file); $fclose(registers_file); #10 $finish;
127 end
128 endmodule

```

tb_TOP.sv: *Test bench* encargado de comprobar el correcto funcionamiento del módulo *TOP.sv*. Está diseñado para ser ejecutado con el código ensamblador *fibonacci_simple.s* cargado en las memorias del *core complex*.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4
5 para: fibonacci_simple.s
6 */
7 'timescale 1ns / 1ps
8
9 module tb_TOP;

```

```

10 reg clk, rst_asin, start_asin, resume_asin;
11 reg [15:0] in;
12 wire [5:0] color_leds;
13 wire [15:0] leds, display;
14 TOP TOP_uut(
15     .clk(clk), .rst_asin(rst_asin), .start_asin(start_asin), .resume_asin(resume_asin), .in(
16         ↗ in),
17         .color_leds(color_leds), .leds(leds), .display(display)
18 );
19 always #5 clk = ~clk;
20 initial begin
21     {clk, start_asin, resume_asin, in, rst_asin} = 20'b1;
22     $display("\nBEGIN\n");
23     $display("\ncolor_leds: %b\n", color_leds);
24
25     #100 start_asin = 1'b1; #1000000 start_asin = 1'b0; // se inicia ejecución
26
27     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
28     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
29
30     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
31     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
32
33     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
34     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
35
36     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
37     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
38
39     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
40     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
41
42     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
43     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
44
45     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
46     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
47
48     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
49     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
50
51     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
52     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
53
54     while(color_leds != 6'b101_101) #10; // mientras no imprime un entero se espera
55     #100 resume_asin = 1'b1; #1000000 resume_asin = 1'b0; // se reanuda ejecución
56
57     while(color_leds != 6'b010_010) #10; // mientras no finalice
58
59     #1000000

```

```

61     $display("\nncolor_leds: %b\n", color_leds);
62
63     $display("\nEND\n"); #10 $finish;
64   end
65 endmodule

```

3 ANEXO: Códigos generadores de *Test Benches*

En esta sección se presentan todos los programas generadores de *test benches* para distintos módulos del *SoC* diseñado:

common_functions.h: Archivo “header” que contiene los encabezados y funciones comunes para los programas: *tb_ALU_gen.c*, *tb_fp_converter_gen.c* y *tb_fp_arithmetic_unit_gen.c*.

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <fenv.h>
3 #include <math.h>
4 #include <stdlib.h>
5 #include <string.h>
6 #pragma STDC FENV_ACCESS ON
7
8 int rand_range(int n){
9     int limit;
10    int r;
11    limit = RAND_MAX - (RAND_MAX % n);
12    while((r = rand()) >= limit);
13    return r % n; /* uniform random value in the range 0..n-1 */
14 }
15 int is_big_endian_test(void){
16    int num = 1;
17    if(*(char *)&num == 1){
18        printf("Is little endian\n");
19        return 0;
20    }
21    else{
22        printf("Is big endian\n");
23        return 1;
24    }
25 }
26 void get_binary(char str_buffer[37], void *input_ptr){
27    unsigned int *x, max, i;
28    x = (unsigned int*) input_ptr;
29    max = sizeof(*x)*8;
30    strcat(str_buffer, "32'b");
31    for (i = 0u; i < max; i++){
32        char bin_num[1];
33        *bin_num = (char) 48 + (((*x)>>(max-i-1u)) & 1);
34        strcat(str_buffer, bin_num);
35    }
36 }

```

tb_ALU_gen.c: Programa generador de *test benches* para el módulo *ALU.sv*.

```
1  /*
2  autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3  Santiago de Chile, Septiembre 2021
4
5  gcc tb_ALU_gen.c -o tb_ALU_gen
6  ./tb_ALU_gen
7
8      0 operation=00_000: + add
9      1 operation=00_001: - sub
10     2 operation=00_010: ^ xor
11     3 operation=00_011: | or
12     4 operation=00_100: & and
13     5 operation=00_101: << shift left
14     6 operation=00_110: >> shift right
15     7 operation=00_111: >> shift right (MSB extend)
16
17     8 operation=01_000: == equality
18     9 operation=01_001: != difference
19    10 operation=01_010: < is less than
20    11 operation=01_011: < is less than (unsigned)
21    12 operation=01_100: >= is bigger or equal
22    13 operation=01_101: >= is bigger or equal (unsigned)
23
24    14 operation=10_000: * mul
25    15 operation=10_001: * mul (unsigned)
26    16 operation=10_010: / div
27    17 operation=10_011: / div (unsigned)
28    18 operation=10_100: % modulo
29    19 operation=10_101: % modulo (unsigned)
30 */
31 #include "./common_functions.h"
32 void fput_test_ALU(FILE* file, char test_number[5], int option, char in1[37], char in2[37],
33                     → char out[37], int boolean_out){
34     fputs("      $display(\">>>Test ", file); fputs(test_number, file); fputs(" - op: ", file);
35     if(option==0)   fputs("+ add <<<\");\n          operation      = 5'b00_000", file);
36     else if(option== 1) fputs("- sub <<<\");\n          operation      = 5'b00_001", file);
37     else if(option== 2) fputs("^ xor <<<\");\n          operation      = 5'b00_010", file);
38     else if(option== 3) fputs("| or <<<\");\n          operation      = 5'b00_011", file);
39     else if(option== 4) fputs("& and <<<\");\n          operation      = 5'b00_100", file);
40     else if(option== 5) fputs("<< shift left <<<\");\n          operation      = 5'b00_101", file);
41     else if(option== 6) fputs(">> shift right <<<\");\n          operation      = 5'b00_110", file);
42     else if(option== 7) fputs(">> shift right (MSB extend) <<<\");\n          operation      = 5'`b00_111", file);
43     else if(option== 8) fputs("== equality <<<\");\n          operation      = 5'b01_000", file);
44     else if(option== 9) fputs("!= difference <<<\");\n          operation      = 5'b01_001", file);
45     else if(option==10) fputs("< is less than <<<\");\n          operation      = 5'b01_010", file)
46                     → ;
47     else if(option==11) fputs("< is less than (unsigned) <<<\");\n          operation      = 5'b01_011", file);
48     else if(option==12) fputs(">= is bigger or equal <<<\");\n          operation      = 5'
```

```

    ↵ b01_100", file);
47 else if(option==13) fputs(">= is bigger or equal (unsigned) <<<\");\n      operation
    ↵ = 5'b01_101", file);
48 else if(option==14) fputs("* mul <<<\");\n      operation      = 5'b10_000", file);
49 else if(option==15) fputs("* mul high <<<\");\n      operation      = 5'b11_000", file);
50 else if(option==16) fputs("* mul high (unsigned) <<<\");\n      operation      = 5'
    ↵ b11_001", file);
51 else if(option==17) fputs("* mul high (signed*unsigned) <<<\");\n      operation      =
    ↵ 5'b11_010", file);
52 else if(option==18) fputs("/ div <<<\");\n      operation      = 5'b10_011", file);
53 else if(option==19) fputs("/ div (unsigned) <<<\");\n      operation      = 5'b10_100",
    ↵ file);
54 else if(option==20) fputs("\% modulo <<<\");\n      operation      = 5'b10_101", file);
55 else if(option==21) fputs("\% modulo (unsigned) <<<\");\n      operation      = 5'
    ↵ b10_111", file);
56 fputs(";\n      input_1      = ", file); fputs(in1, file);
57 fputs(";\n      input_2      = ", file); fputs(in2, file);
58 fputs(";\n      correct_out    = ", file); fputs(out, file);
59 fputs(";\n      correct_boolean = 1'b", file); if(boolean_out) fputs("1;\n", file); else fputs
    ↵ ("0;\n", file);
60 fputs("      #10;\n      $display(\"Inputs\");\n      $display(\"operation: \%\nb\",
    ↵ operation);\n      $display(\"in1      : \%\nb\", input_1);\n      $display(\"in2      :
    ↵ \%\nb\", input_2);\n      $display(\"Outputs\");\n", file);
61 fputs("      if(out == correct_out) $display(\"res: PASSED!!\");\n      else begin\n
    ↵      out_errors += 1;\n      $display(\"res: FAILED!!\");\n      $display(\"
    ↵ res should be: \%\nb\", correct_out);\n      end\n      $display(\"res      : \%\nb
    ↵ \", out);\n", file);
62 fputs("      if(boolean == correct_boolean) $display(\"boolean_res: PASSED!!\");
    ↵      else begin\n          boolean_errors += 1;\n          $display(\"boolean_res:
    ↵ FAILED!!\");
    ↵      $display(\"boolean_res should be: \%\nb\", correct_boolean)\n      ;\n      end\n
    ↵      $display(\"boolean_res      : \%\nb\", boolean);\n", file);
63 fputs("      #10;\n      $display(\"-----\");\n", file);
64 }
65 int main(){
66     FILE* file;
67     char percentage_info[5];
68     char str_num_tests[7]; // max input = 99999
69     int num_tests, num_tests_discarded;
70     int is_big_endian = is_big_endian_test();
71     file = fopen ("tb_ALU.sv", "w");
72     fputs("./nautor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute\nSantiago de Chile, Septiembre
    ↵ 2021\nTest Bench for \"tb_ALU.sv\"\n*/\ntimescale 1ns / 1ps\nmodule tb_ALU
    ↵ ;\n", file);
73     fputs("      reg [31:0] input_1 = 0; reg [31:0] input_2 = 0; reg [4:0] operation = 0;\n      wire
    ↵      boolean; wire [31:0] out;\n", file);
74     fputs("      ALU ALU_uut(\n          .in1(input_1), .in2(input_2), .operation(operation),
    ↵          .res(out), .boolean_res(boolean)\n      );\n", file);
75     fputs("      initial begin\n          int out_errors = 0; int boolean_errors = 0;\n          reg
    ↵          [31:0] correct_out; reg correct_boolean;\n          #10 $display(\"BEGIN\");
    ↵          $display(\"-----\");\n", file);
76     printf("Enter n° of set test to write (max input 99999): ");
77     fgets(str_num_tests, sizeof(str_num_tests), stdin);

```

```

78 num_tests = atoi(str_num_tests);
79 memset(str_num_tests,0,sizeof(str_num_tests));
80 printf("Enter nº of initial set test to discard (max input 99999): ");
81 fgets(str_num_tests, sizeof(str_num_tests), stdin);
82 num_tests_discarded = atoi(str_num_tests);
83 memset(str_num_tests,0,sizeof(str_num_tests));
84 for(int i = 0 ; i < num_tests ; i++){
85     int in1, in2, out;
86     unsigned int in1_unsig, in2_unsig;
87     long long_out;
88     unsigned long long_out_unsig;
89     unsigned char *rand_byte_0, *rand_byte_1, *rand_byte_2, *rand_byte_3, *
90     ↪ target_add;
91     char out_str[37];
92     char in1_str[37] = "";
93     char in2_str[37] = "";
94     char current_test_str[5] = "";
95     char test_title_begin[50] = "      /*----- BEGIN: SET TEST ";
96     char test_title_end[50] = "      /*----- END: SET TEST ";
97     // Se asigna espacio en memoria para cada byte aleatorio
98     rand_byte_0 = malloc(sizeof(unsigned char));
99     rand_byte_1 = malloc(sizeof(unsigned char));
100    rand_byte_2 = malloc(sizeof(unsigned char));
101    rand_byte_3 = malloc(sizeof(unsigned char));
102    // Se alinean los bytes
103    rand_byte_1 = rand_byte_0 + 1;
104    rand_byte_2 = rand_byte_1 + 1;
105    rand_byte_3 = rand_byte_2 + 1;
106    // Se determina dirección
107    target_add = is_big_endian ? rand_byte_3 : rand_byte_0;
108    // Se obtienen los bits aleatorios para cada input
109    for(int k = 0 ; k < 2 ; k++){
110        *rand_byte_0 = (unsigned char) rand_range(256);
111        *rand_byte_1 = (unsigned char) rand_range(256);
112        *rand_byte_2 = (unsigned char) rand_range(256);
113        *rand_byte_3 = (unsigned char) rand_range(256);
114        // Se obtienen los resultados aleatorios
115        if(k) {in1 = *( (unsigned int*) target_add ); in1_unsig = *( (unsigned int*)
116        ↪ target_add );}
117        else {in2 = *( (unsigned int*) target_add ); in2_unsig = *( (unsigned int*)
118        ↪ target_add );}
119        if(i >= num_tests_discarded) {
120            // Se escribe encabezado del test
121            sprintf(current_test_str, "%d", i);
122            strcat(test_title_begin, current_test_str);
123            strcat(test_title_end, current_test_str);
124            strcat(test_title_begin, " -----*/\n");
125            strcat(test_title_end, " -----*/\n\n");
126            fputs(test_title_begin, file);
127            // Se obtiene el string con la representación binaria para cada input
128            get_binary(in1_str, &in1);

```

```

127     get_binary(in2_str, &in2);
128     // Se realizan los tests
129
130     // 0 operation=00_000: + add
131     out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) + ( (unsigned int) in2 ) );
132     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
133     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
134     fput_test_ALU(file, current_test_str, 0, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
135     ↵ imprime test
136
137     // 1 operation=00_001: - sub
138     out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) - ( (unsigned int) in2 ) );
139     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
140     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
141     fput_test_ALU(file, current_test_str, 1, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
142     ↵ imprime test
143
144     // 2 operation=00_010: ^ xor
145     out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) ^ ( (unsigned int) in2 ) );
146     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
147     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
148     fput_test_ALU(file, current_test_str, 2, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
149     ↵ imprime test
150
151     // 3 operation=00_011: | or
152     out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) | ( (unsigned int) in2 ) );
153     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
154     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
155     fput_test_ALU(file, current_test_str, 3, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
156     ↵ imprime test
157
158     // 4 operation=00_100: & and
159     out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) & ( (unsigned int) in2 ) );
160     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
161     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
162     fput_test_ALU(file, current_test_str, 4, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
163     ↵ imprime test
164
165     // 5 operation=00_101: << shift left
166     out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) << ( (unsigned int) in2 ) );
167     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
168     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
169     fput_test_ALU(file, current_test_str, 5, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
170     ↵ imprime test
171

```

```

172 // 7 operation=00_111: >> shift rigth (MSB extend)
173 out = (unsigned int) ( ( (int) in1 ) >> ( (unsigned int) in2 ) );
174 memset(out_str,0,sizeof(out_str));
175 get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
176 fput_test_ALU(file, current_test_str, 7, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
177 ↵ imprime test

178 // 8a operation=01_000: == equality
179 out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) == ( (unsigned int) in2 ) );
180 memset(out_str,0,sizeof(out_str));
181 get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
182 fput_test_ALU(file, current_test_str, 8, in1_str, in2_str, out_str, out); // Se
183 ↵ imprime test
184 // 8b operation=01_000: == equality
185 out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) == ( (unsigned int) in1 ) );
186 memset(out_str,0,sizeof(out_str));
187 get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
188 fput_test_ALU(file, current_test_str, 8, in1_str, in1_str, out_str, out); // Se
189 ↵ imprime test
190 // 8c operation=01_000: == equality
191 out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in2 ) == ( (unsigned int) in2 ) );
192 memset(out_str,0,sizeof(out_str));
193 get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
194 fput_test_ALU(file, current_test_str, 8, in2_str, in2_str, out_str, out); // Se
195 ↵ imprime test

196 // 9a operation=01_001: != difference
197 out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) != ( (unsigned int) in2 ) );
198 memset(out_str,0,sizeof(out_str));
199 get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
200 fput_test_ALU(file, current_test_str, 9, in1_str, in2_str, out_str, out); // Se
201 ↵ imprime test
202 // 9b operation=01_001: != difference
203 out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) != ( (unsigned int) in1 ) );
204 memset(out_str,0,sizeof(out_str));
205 get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
206 fput_test_ALU(file, current_test_str, 9, in1_str, in1_str, out_str, out); // Se
207 ↵ imprime test
208 // 9c operation=01_001: != difference
209 out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in2 ) != ( (unsigned int) in2 ) );
210 memset(out_str,0,sizeof(out_str));
211 get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
212 fput_test_ALU(file, current_test_str, 9, in2_str, in2_str, out_str, out); // Se
213 ↵ imprime test

214 // 10a operation=01_010: < is less than
215 out = (unsigned int) ( ( (int) in1 ) < ( (int) in2 ) );
216 memset(out_str,0,sizeof(out_str));
217 get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
218 fput_test_ALU(file, current_test_str, 10, in1_str, in2_str, out_str, out); // Se
219 ↵ imprime test
220 // 10b operation=01_010: < is less than

```

```

216     out = (unsigned int) ( (int) in1 ) < ( (int) in1 );
217     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
218     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
219     fput_test_ALU(file, current_test_str, 10, in1_str, in1_str, out_str, out); // Se
220     ↵ imprime test
221     // 10c operation=01_010: < is less than
222     out = (unsigned int) ( (int) in2 ) < ( (int) in2 );
223     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
224     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
225     fput_test_ALU(file, current_test_str, 10, in2_str, in2_str, out_str, out); // Se
226     ↵ imprime test
227
228     // 11a operation=01_011: < is less than (unsigned)
229     out = (unsigned int) ( (unsigned int) in1 ) < ( (unsigned int) in2 );
230     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
231     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
232     fput_test_ALU(file, current_test_str, 11, in1_str, in2_str, out_str, out); // Se
233     ↵ imprime test
234     // 11b operation=01_011: < is less than (unsigned)
235     out = (unsigned int) ( (unsigned int) in1 ) < ( (unsigned int) in1 );
236     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
237     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
238     fput_test_ALU(file, current_test_str, 11, in1_str, in1_str, out_str, out); // Se
239     ↵ imprime test
240     // 11c operation=01_011: < is less than (unsigned)
241     out = (unsigned int) ( (unsigned int) in2 ) < ( (unsigned int) in2 );
242     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
243     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
244     fput_test_ALU(file, current_test_str, 11, in2_str, in2_str, out_str, out); // Se
245     ↵ imprime test
246
247     // 12a operation=01_100: >= is bigger or equal
248     out = (unsigned int) ( (int) in1 ) >= ( (int) in2 );
249     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
250     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
251     fput_test_ALU(file, current_test_str, 12, in1_str, in2_str, out_str, out); // Se
252     ↵ imprime test
253     // 12b operation=01_100: >= is bigger or equal
254     out = (unsigned int) ( (int) in1 ) >= ( (int) in1 );
255     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
256     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
257     fput_test_ALU(file, current_test_str, 12, in1_str, in1_str, out_str, out); // Se
258     ↵ imprime test
259
260     // 13a operation=01_101: >= is bigger or equal (unsigned)
261     out = (unsigned int) ( (unsigned int) in1 ) >= ( (unsigned int) in2 );

```

```

260     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
261     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
262     fput_test_ALU(file, current_test_str, 13, in1_str, in2_str, out_str, out); // Se
263     ↪ imprime test
264         // 13b operation=01_101: >= is bigger or equal (unsigned)
265         out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) >= ( (unsigned int) in1 ) );
266         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
267         get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
268         fput_test_ALU(file, current_test_str, 13, in1_str, in1_str, out_str, out); // Se
269     ↪ imprime test
270         // 13c operation=01_101: >= is bigger or equal (unsigned)
271         out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in2 ) >= ( (unsigned int) in2 ) );
272         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
273         get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
274         fput_test_ALU(file, current_test_str, 13, in2_str, in2_str, out_str, out); // Se
275     ↪ imprime test
276
277         // 14 operation=10_000: * mul
278         out = (unsigned int) ( ( (int) in1 ) * ( (int) in2 ) );
279         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
280         get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
281         fput_test_ALU(file, current_test_str, 14, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
282     ↪ imprime test
283
284         // 15 operation=11_000: * mul high
285         long_out = (long) ((long) in1)*((long) in2);
286         long_out = long_out >> 32;
287         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
288         get_binary(out_str, &long_out); // Se obtiene la representación binaria del
289     ↪ resultado
290         fput_test_ALU(file, current_test_str, 15, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
291     ↪ imprime test
292
293         // 16 operation=11_001: * mul high (unsigned)
294         long_out_unsig = (unsigned long) ((unsigned long) in1_unsig)*((unsigned long)
295     ↪ in2_unsig);
296         long_out_unsig = long_out_unsig >> 32;
297         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
298         get_binary(out_str, &long_out_unsig); // Se obtiene la representación binaria del
299     ↪ resultado
300         fput_test_ALU(file, current_test_str, 16, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
301     ↪ imprime test
302
303         // 17 operation=11_010: * mul high (signed*unsigned)
304         long_out = (long) ((long) in1)*((unsigned long) in2_unsig);
305         long_out = long_out >> 32;
306         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
307         get_binary(out_str, &long_out); // Se obtiene la representación binaria del
308     ↪ resultado
309         fput_test_ALU(file, current_test_str, 17, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
310     ↪ imprime test

```

```

301     // 18 operation=10_011: / div
302     out = (unsigned int) ( ( (int) in1 ) / ( (int) in2 ) );
303     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
304     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
305     fput_test_ALU(file, current_test_str, 18, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
306     ↪ imprime test
307
308     // 19 operation=10_100: / div (unsigned)
309     out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) / ( (unsigned int) in2 ) );
310     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
311     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
312     fput_test_ALU(file, current_test_str, 19, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
313     ↪ imprime test
314
315     // 20 operation=10_101: % modulo
316     out = (unsigned int) ( ( (int) in1 ) % ( (int) in2 ) );
317     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
318     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
319     fput_test_ALU(file, current_test_str, 20, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
320     ↪ imprime test
321
322     // 21 operation=10_111: % modulo (unsigned)
323     out = (unsigned int) ( ( (unsigned int) in1 ) % ( (unsigned int) in2 ) );
324     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
325     get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del resultado
326     fput_test_ALU(file, current_test_str, 21, in1_str, in2_str, out_str, 0); // Se
327     ↪ imprime test
328
329 }
330 fputs("      $display(\"Total errors found      : \\\%d (\\\%f percentage)\", out_errors
331   ↪ +boolean_errors, (out_errors+boolean_errors)*100.0/", file);
332 sprintf(percentage_info, "%d", (num_tests-num_tests_discarded)*(22+12)*2); fputs(
333   ↪ percentage_info, file); memset(percentage_info,0,sizeof(percentage_info)); sprintf(
334   ↪ percentage_info, "%d", (num_tests-num_tests_discarded)*(22+12));
335 fputs(");\n      $display(\"Total out errors found    : \\\%d (\\\%f percentage)\",
336   ↪ out_errors, out_errors*100.0/", file); fputs(percentage_info, file);
337 fputs(");\n      $display(\"Total boolean errors found  : \\\%d (\\\%f percentage)\",
338   ↪ boolean_errors, boolean_errors*100.0/", file); fputs(percentage_info, file);
339 fputs(");\n      $display(\"END\"); #10 $finish;\n      end\\nendmodule", file);
340 fclose(file);
341 printf("Nº of tests written: %d\nOperation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.
342   ↪ sv\\n", (num_tests-num_tests_discarded)*(22+12));
343 return 0;
344 }
```

tb_fp_converter_gen.c: Programa generador de *test benches* para el módulo *fp_converter.sv*.

1 /*

```

2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4
5 gcc tb_fp_converter_gen.c -o tb_fp_converter_gen -lm
6 ./tb_fp_converter_gen
7
8 option: 0 -> Integer to fp / 1 -> fp to Integer
9 rm =
10    000 -> RNE - code = 0
11    001 -> RTZ - code = 1
12    010 -> RDN - code = 2
13    011 -> RUP - code = 3
14    100 -> RMM - code = 4 (not tested)
15
16 https://www.h-schmidt.net/FloatConverter/IEEE754.html
17 */
18 */
19
20 #include "./common_functions.h"
21
22 void fput_test_fp_converter(FILE* file, char test_number[4], int option, int
23     ↪ integer_is_signed, int rm,
24     ↪ char in[37], char out[37], int NV, int NX){
25     fputs("      $display(\">>>Test ", file); fputs(test_number, file);
26     if(option) if(integer_is_signed) fputs("-fp2signed", file); else fputs("-fp2unsigned", file);
27     else if(integer_is_signed) fputs("-signed2fp", file); else fputs("-unsigned2fp", file);
28     if(rm==0) fputs("-RNE", file); else if(rm==1) fputs("-RTZ", file); else if(rm==2) fputs("-"
29         ↪ RDN", file); else if(rm==3) fputs("-RUP", file); else if(rm==4) fputs("-RMM", file);
30     fputs(" <<<\");\n      option = 1'b", file);
31     if(option) fputs("1;\n", file); else fputs("0;\n", file);
32     fputs("      integer_is_signed = 1'b", file);
33     if(integer_is_signed) fputs("1;\n", file); else fputs("0;\n", file);
34     fputs("      rm = 3'b", file);
35     if(rm==0)fputs("000", file); else if(rm==1) fputs("001", file); else if(rm==2) fputs("010",
36         ↪ file); else if(rm==3) fputs("011", file); else fputs("100", file);
37     fputs(";\n      in = ", file); fputs(in, file); fputs(";\n      correct_out = ", file); fputs(
38         ↪ out, file);
39     fputs(";\n      correct_NV = 1'b", file); if(NV) fputs("1", file); else fputs("0", file);
40     fputs(";\n      correct_NX = 1'b", file); if(NX) fputs("1", file); else fputs("0", file);
41     fputs(";\n      $display(\"in: \%\b\", in);\n      $display(\"integer_is_signed: \%\b\",
42         ↪ integer_is_signed);\n      $display(\"option: \%\b\", option);\n      $display(\"rm:
43         ↪ \%\b\", rm);\n", file);
44     fputs("      #10 start = 1;\n      initial_time = $time;\n      while(~ready) #10;\n
45         ↪ elapsed_time = $time-initial_time;\n", file);
46     fputs("      $display(\"Initial time: \%\t\", initial_time);\n      $display(\"Elapsed time
47         ↪ : \%\t\", elapsed_time);\n", file);
48     fputs("      if(out == correct_out) $display(\"out: PASSED!!\");\n      else begin\n
49         ↪ out_errors += 1;\n      $display(\"out: FAILED!!\");\n", file);
50     fputs("      $display(\"out should be: \%\b\", correct_out);\n      end\n
51         ↪ $display(\"out: \%\b\", out);\n", file);
52     fputs("      if(NV == correct_NV) $display(\"NV: PASSED!!\");\n      else begin\n
53         ↪ NV_errors += 1;\n      $display(\"NV: FAILED!!\");\n", file);

```

```

43     fputs("      $display(\"NV should be: \%\b\", correct_NV);\n      end\n"
44     ↪ $display(\"NV: \%\b\", NV);\n", file);
45 fputs("      if(NX == correct_NX) $display(\"NX: PASSED!!\");\n      else begin\n"
46     ↪ NX_errors += 1;\n      $display(\"NX: FAILED!!\");\n", file);
47 fputs("      $display(\"NX should be: \%\b\", correct_NX);\n      end\n"
48     ↪ $display(\"NX: \%\b\", NX);\n", file);
49 fputs("      if(elapsed_time > max_elapsed_time) max_elapsed_time = elapsed_time;\n"
50     ↪ n      if(elapsed_time < min_elapsed_time) min_elapsed_time = elapsed_time;\n"
51     ↪ #10 start = 0;\n      $display(\"-----\");\n", file);
52 }
53
54 int main(){
55     FILE* file;
56     char percentage_info[4];
57     char str_num_tests[7]; // max input = 99999
58     int num_tests, num_tests_discarded;
59     int original_rounding = fegetround();
60     int is_big_endian = is_big_endian_test();
61     file = fopen ("tb_fp_converter.sv", "w");
62     fputs("/*\nautor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute\nSantiago de Chile, Septiembre\n"
63     ↪ 2021\nTest Bench for \"fp_converter.sv\"\n*/\ntimescale 1ns / 1ps\nmodule\n"
64     ↪ tb_fp_converter;\n", file);
65     fputs("    reg start = 0; reg rst = 0; reg clk = 0;\n    reg option = 0; reg\n"
66     ↪ integer_is_signed = 0;\n", file);
67     fputs("    reg [2:0] rm = 0; reg [31:0] in = 0;\n    // option: 0 -> Integer to fp | 1 -> fp to\n"
68     ↪ Integer;\n", file);
69     fputs("    wire NV, NX, ready; wire [31:0] out;\n    fp_converter uut(\n        .start(start),\n"
70     ↪ .rst(rst), .clk(clk),\n", file);
71     fputs("        .integer_is_signed(integer_is_signed), .option(option), .rm(rm), .in(in),\n"
72     ↪ .NV(NV), .NX(NX), .ready(ready), .out(out)\n", file);
73     fputs("    );\n    always #5 clk = ~clk;\n    initial begin\n", file);
74     fputs("        int out_errors = 0; int NV_errors = 0; int NX_errors = 0;\n        int\n"
75     ↪ min_elapsed_time = 100000; int max_elapsed_time = 0;\n", file);
76     fputs("        int initial_time, elapsed_time;\n        reg [31:0] correct_out; reg\n"
77     ↪ correct_NV, correct_NX;\n        $display(\"BEGIN\"); start = 0;\n", file);
78     printf("Enter n° of set test to write (max input 99999): ");
79     fgets(str_num_tests, sizeof(str_num_tests), stdin);
80     num_tests = atoi(str_num_tests);
81     memset(str_num_tests, 0, sizeof(str_num_tests));
82     printf("Enter n° of initial set test to discard (max input 99999): ");
83     fgets(str_num_tests, sizeof(str_num_tests), stdin);
84     num_tests_discarded = atoi(str_num_tests);
85     memset(str_num_tests, 0, sizeof(str_num_tests));
86     for(int i = 0 ; i < num_tests ; i++){
87         int random_signed;
88         unsigned int random_unsigned;
89         float random_float;
90         unsigned char *rand_byte_0, *rand_byte_1, *rand_byte_2, *rand_byte_3, *\n"
91         ↪ target_add;
92         char in_str[37] = "";
93         char current_test_str[5] = "";
94         char test_title_begin[50] = "      /*----- BEGIN: SET TEST ";

```

```

81   char test_title____end[50] = "      /*----- END: SET TEST ";
82   // Se asigna espacio en memoria para cada byte aleatorio
83   rand_byte_0 = malloc(sizeof(unsigned char));
84   rand_byte_1 = malloc(sizeof(unsigned char));
85   rand_byte_2 = malloc(sizeof(unsigned char));
86   rand_byte_3 = malloc(sizeof(unsigned char));
87   // Se alinean los bytes
88   rand_byte_1 = rand_byte_0 + 1;
89   rand_byte_2 = rand_byte_1 + 1;
90   rand_byte_3 = rand_byte_2 + 1;
91   // Se obtienen los bits aleatorios
92   *rand_byte_0 = (unsigned char) rand_range(256);
93   *rand_byte_1 = (unsigned char) rand_range(256);
94   *rand_byte_2 = (unsigned char) rand_range(256);
95   *rand_byte_3 = (unsigned char) rand_range(256);
96   if(i >= num_tests_discarded) {
97       // Titulo del set de pruebas
98       sprintf(current_test_str, "%d", i);
99       strcat(test_title_begin, current_test_str);
100      strcat(test_title____end, current_test_str);
101      strcat(test_title_begin, " -----*/\n");
102      strcat(test_title____end, " -----*/\n\n");
103      fputs(test_title_begin, file);
104      // Se determina dirección
105      target_add = is_big_endian ? rand_byte_3 : rand_byte_0;
106      // Se obtienen los enteros y el float aleatorios a partir de los bytes aleatorios
107      random_signed = *( (int*) target_add );
108      random_unsigned = *( (unsigned int*) target_add );
109      random_float = *( (float*) target_add );
110      // se obtiene representación binaria
111      get_binary(in_str, target_add);
112      // Ciclo para cada modo de redondeo
113      for(int j = 0 ; j < 4 ; j++){
114          int fp2signed;
115          unsigned int fp2unsigned;
116          float signed2fp, unsigned2fp;
117          int NV, NX;
118          char out_str[37];
119          if(j==0) fetesround(FE_TONEAREST); else if(j==1) fetesround(
120              ↪ FE_TOWARDZERO);
121              else if(j==2) fetesround(FE_DOWNWARD); else if(j==3) fetesround(
122                  ↪ FE_UPWARD);
123
124          // {option, integer_is_signed} = {0, 0}: unsigned2fp
125          if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
126          ↪ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
127          unsigned2fp = (float) random_unsigned;
128          NV = fetestexcept(FE_INVALID);
129          NX = fetestexcept(FE_INEXACT);
130          memset(out_str,0,sizeof(out_str));
131          get_binary(out_str, &unsigned2fp); // Se obtiene la representación binaria del
132          ↪ resultado

```

```

129         fput_test_fp_converter(file, current_test_str, 0, 0, j, in_str, out_str, NV, NX);
130         ↵ // Se imprime test
131
132         // {option, integer_is_signed} = {0, 1}: signed2fp
133         if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
134         ↵ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
135         signed2fp = (float) random_signed;
136         NV = fetestexcept(FE_INVALID);
137         NX = fetestexcept(FE_INEXACT);
138         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
139         get_binary(out_str, &signed2fp); // Se obtiene la representación binaria del
140         ↵ resultado
141         fput_test_fp_converter(file, current_test_str, 0, 1, j, in_str, out_str, NV, NX);
142         ↵ // Se imprime test
143
144         // {option, integer_is_signed} = {1, 0}: fp2unsigned
145         if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
146         ↵ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
147         fp2unsigned = (unsigned int) random_float;
148         NV = fetestexcept(FE_INVALID);
149         NX = fetestexcept(FE_INEXACT);
150         // Inicio: Manejando los resultados de intel
151         if( (fp2unsigned != (unsigned int) (rintf(random_float))) & rintf(random_float)
152         ↵ >=0 ) fp2unsigned = (unsigned int) (rintf(random_float));
153         if(random_float >= 4294967168.0 | isnanf(random_float)) {fp2unsigned =
154         ↵ 4294967295; NV = 1;}
155         if(random_float < 0.0) {fp2unsigned = 0; NV = 1;}
156         //--- Fin: Manejando los resultados de intel
157         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
158         get_binary(out_str, &fp2unsigned); // Se obtiene la representación binaria del
159         ↵ resultado
160         fput_test_fp_converter(file, current_test_str, 1, 0, j, in_str, out_str, NV, NX);
161         ↵ // Se imprime test
162
163         // {option, integer_is_signed} = {1, 1}: fp2signed
164         if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
165         ↵ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
166         fp2signed = (int) random_float;

```

```

167     // Titulo de cierre del set de pruebas
168     fputs(test_title____end, file);
169 }
170 }
171 /* falta agregar casos borde a mano */
172 fputs("$display(\"Total errors found: %d (%f percentage)\", out_errors+
173     → NV_errors+NX_errors, (out_errors+NV_errors+NX_errors)*100.0/", file);
174 sprintf(percentage_info, "%d", (num_tests-num_tests_discarded)*4*4*3); fputs(
175     → percentage_info, file); memset(percentage_info,0,sizeof(percentage_info)); sprintf(
176     → percentage_info, "%d", (num_tests-num_tests_discarded)*4*4);
177 fputs(");\n      $display(\"Total out_errors errors found: %d (%f percentage)\",
178     → out_errors, out_errors*100.0/", file); fputs(percentage_info, file);
179 fputs(");\n      $display(\"Total NV_errors errors found: %d (%f percentage)\",
180     → NV_errors, NV_errors*100.0/", file); fputs(percentage_info, file);
181 fputs(");\n      $display(\"Total NX_errors errors found: %d (%f percentage)\",
182     → NX_errors, NX_errors*100.0/", file); fputs(percentage_info, file);
183 fputs(");\n      $display(\"Minimum elapsed time: %d\", min_elapsed_time);\n", file);
184     → fputs("      $display(\"Maximum elapsed time: %d\", max_elapsed_time);\n", file);
185 fputs("$display(\"END\"); #10 $finish;\n    end\\nendmodule", file);
186 fclose(file); fesetround(original_rounding);
187 printf("Nº of tests written: %d\nOperation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.
188     → sv\n", (num_tests-num_tests_discarded)*4*4);
189 return 0;
190 }

```

tb_fp_arithmetic_unit_gen.c: Programa generador de *test benches* para el módulo *fp_arithmetic_unit*.

```

1 /*
2 autor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute
3 Santiago de Chile, Septiembre 2021
4
5 gcc tb_fp_arithmetic_unit_gen.c -o tb_fp_arithmetic_unit_gen -lm
6 ./tb_fp_arithmetic_unit_gen
7
8 op =
9   000 -> in1+in2  ADD          code= 0
10  001 -> in1*in2  MUL          code= 1
11  010 -> in1/in2  DIV          code= 2
12  011 -> sqrt(in1) SQRT (not exactly equal)  code= 3
13  100 -> in1-in2  SUB          code= 4
14  101 -> -in1*in2 -MUL (not tested)
15  110 -> -in1/in2 -DIV (not tested)
16 rm =
17  000 -> RNE  code= 0
18  001 -> RTZ  code= 1
19  010 -> RDN  code= 2
20  011 -> RUP  code= 3
21  100 -> RMM  code= 4 (not tested)
22 status =
23  000 -> no flag (used)      code= 0
24  101 -> no flag (not used)
25  110 -> no flag (not used)

```

```

26 -----
27 001 -> UF flag      code= 1
28 010 -> OF flag      code= 2
29 011 -> NV flag      code= 3
30 100 -> DZ flag      code= 4
31 111 -> NX flag      code= 5
32
33 https://www.h-schmidt.net/FloatConverter/IEEE754.html
34 */
35
36 #include "./common_functions.h"
37
38 int exceptions_checker(void){
39     if(fetestexcept(FE_DIVBYZERO)) return 4;
40     else if(fetestexcept(FE_INVALID)) return 3;
41     else if(fetestexcept(FE_OVERFLOW)) return 2;
42     else if(fetestexcept(FE_UNDERFLOW)) return 1;
43     else if(fetestexcept(FE_INEXACT)) return 5;
44     else return 0;
45 }
46
47 void fput_test_fp_arithmetic_unit(FILE* file, char test_number[5], int op, int rm,
48                                     char in1[37], char in2[37], char out[37], int status){
49     fputs("      $display(\">>>Test ", file); fputs(test_number, file);
50     if(op==0) fputs("-ADD", file); else if(op==1) fputs("-MUL", file); else if(op==2) fputs("-"
51         " DIV", file); else if(op==3) fputs("-SQRT", file); else if(op==4) fputs("-SUB", file);
52     if(rm==0) fputs("-RNE", file); else if(rm==1) fputs("-RTZ", file); else if(rm==2) fputs("-"
53         " RDN", file); else if(rm==3) fputs("-RUP", file); else if(rm==4) fputs("-RMM", file);
54     fputs(" <<<\");\n      operation    = 3'b", file);
55     if(op==0) fputs("000;\n", file); else if(op==1) fputs("001;\n", file); else if(op==2) fputs("
56         " 010;\n", file); else if(op==3) fputs("011;\n", file); else if(op==4) fputs("100;\n", file);
57     fputs("      rounding_mode = 3'b", file);
58     if(rm==0) fputs("000;\n", file); else if(rm==1) fputs("001;\n", file); else if(rm==2) fputs("
59         " 010;\n", file); else if(rm==3) fputs("011;\n", file); else if(rm==4) fputs("100;\n", file
60         );
61     fputs("      input_1 = ", file); fputs(in1, file); fputs(";\n      input_2 = ", file); fputs(
62         " in2, file); fputs(";\n      correct_out = ", file); fputs(out, file);
63     fputs(";\n      correct_status = 3'b", file);
64     if(status==0) fputs("000;\n", file); else if(status==1) fputs("001;\n", file); else if(status
65         ==2) fputs("010;\n", file); else if(status==3) fputs("011;\n", file); else if(status==4)
66         fputs("100;\n", file); else if(status==5) fputs("111;\n", file);
67     fputs("      $display(\"In1: \%b\", input_1);\n      $display(\"In2: \%b\", input_2);\n
68         n      $display(\"Operation: \%b\", operation);\n      $display(\"Rounding_Mode:
69         \%b\", rounding_mode);\n", file);
70     fputs("      #200 start = 1;\n      initial_time = $time;\n      while(~ready) #10;\n
71         elapsed_time = $time-initial_time;\n      $display(\"Initial time: \%t\",
72         initial_time);\n      $display(\"Elapsed time: \%t\", elapsed_time);\n", file);
73
74     if(op==2 | op==3) fputs("      if(out == correct_out | out == {correct_out[31:23],
75         correct_out[22:0]+23'b1} | out == {correct_out[31:23], correct_out[22:0]-23'b1} |
76         out == {correct_out[31:23], correct_out[22:0]+23'b10} | out == {correct_out
77         [31:23], correct_out[22:0]-23'b10} | out[30:0]==31'

```

```

    ↪ b1111111100000000000000000000000000000000) $display(\"out: PASSED!!\");\n", file);
63 else fputs("      if(out == correct_out | out[30:0]==31'
    ↪ b11111111000000000000000000000000) $display(\"out: PASSED!!\");\n", file);
64
65 fputs("      else begin\n          man_out_errors += 1;\n          $display(\"out:
    ↪ FAILED!!\");\n          $display(\"out should be: \%b\", correct_out);\n      end\
    ↪ n      $display(\"out      : \%b\", out);\n", file);
66 fputs("      if(status == correct_status) $display(\"status: PASSED!!\");\n      else
    ↪ begin\n          status_out_errors += 1;\n          $display(\"status: FAILED!!\");\
    ↪ n          $display(\"status should be: \%b\", correct_status);\n      end\n
    ↪ $display(\"status: \%b\", status);\n", file);
67 fputs("      if(elapsed_time > max_elapsed_time) max_elapsed_time = elapsed_time;
    ↪ n      if(elapsed_time < min_elapsed_time) min_elapsed_time = elapsed_time;\n
    ↪ #200 start = 0;\n      $display(\"-----\");\n", file);
68 }
69
70 int main(){
71     FILE* file;
72     char percentage_info[4];
73     char str_num_tests[7]; // max input = 99999
74     int num_tests, num_tests_discarded;
75     int original_rounding = fegetround();
76     int is_big_endian = is_big_endian_test();
77     file = fopen ("tb_fp_arithmetic_unit.sv", "w");
78     fputs("/*\nautor: Gianluca Vincenzo D'Agostino Matute\nSantiago de Chile, Septiembre
    ↪ 2021\nTest Bench for \"tb_fp_arithmetic_unit.sv\"\n*/\ntimescale 1ns / 1ps\n\
    ↪ nmodule tb_fp_arithmetic_unit;\n", file);
79     fputs("//global inputs\n    reg start = 0; reg rst = 0; reg clk = 0;\n", file);
80     fputs("    reg [31:0] input_1 = 0; reg [31:0] input_2 = 0;\n    reg [2:0] operation = 0; reg
    ↪ [2:0] rounding_mode = 0;\n", file);
81     fputs("//global outputs\n    wire ready; wire [2:0] status; wire [31:0] out;\n", file);
82     fputs("// uut\n    fp_arithmetic_unit uut_fp_arithmetic_unit(\n", file);
83     fputs("        .start(start), .rst(rst), .clk(clk),\n            .op(operation), .rm(
    ↪ rounding_mode),\n", file);
84     fputs("        .in1(input_1), .in2(input_2),\n            //output\n            .ready(ready), .status(
    ↪ status), .out(out)\n    );\n", file);
85     fputs("    always #5 clk = ~clk;\n    initial begin\n        int man_out_errors = 0; int
    ↪ status_out_errors = 0;\n    end\n", file);
86     fputs("    int min_elapsed_time = 100000; int max_elapsed_time = 0;\n    int
    ↪ initial_time, elapsed_time;\n", file);
87     fputs("    reg [31:0] correct_out; reg [2:0] correct_status;\n\n        $display(\"BEGIN
    ↪ \"); start = 0;\n", file);
88     printf("Enter nº of set test to write (max input 99999): ");
89     fgets(str_num_tests, sizeof(str_num_tests), stdin);
90     num_tests = atoi(str_num_tests);
91     memset(str_num_tests, 0, sizeof(str_num_tests));
92     printf("Enter nº of initial set test to discard (max input 99999): ");
93     fgets(str_num_tests, sizeof(str_num_tests), stdin);
94     num_tests_discarded = atoi(str_num_tests);
95     memset(str_num_tests, 0, sizeof(str_num_tests));
96     for(int i = 0 ; i < num_tests ; i++){
97         float in1, in2;

```

```

98     unsigned char *rand_byte_0, *rand_byte_1, *rand_byte_2, *rand_byte_3, *
→ target_add;
99     char in1_str[37] = "";
100    char in2_str[37] = "";
101    char current_test_str[5] = "";
102    char test_title_begin[50] = "      /*----- BEGIN: SET TEST ";
103    char test_title_end[50] = "      /*----- END: SET TEST ";
104    // Se asigna espacio en memoria para cada byte aleatorio
105    rand_byte_0 = malloc(sizeof(unsigned char));
106    rand_byte_1 = malloc(sizeof(unsigned char));
107    rand_byte_2 = malloc(sizeof(unsigned char));
108    rand_byte_3 = malloc(sizeof(unsigned char));
109    // Se alinean los bytes
110    rand_byte_1 = rand_byte_0 + 1;
111    rand_byte_2 = rand_byte_1 + 1;
112    rand_byte_3 = rand_byte_2 + 1;
113    // Se determina dirección
114    target_add = is_big_endian ? rand_byte_3 : rand_byte_0;
115    // Se obtienen los bits aleatorios para cada input
116    for(int k = 0 ; k < 2 ; k++){
117        *rand_byte_0 = (unsigned char) rand_range(256);
118        *rand_byte_1 = (unsigned char) rand_range(256);
119        *rand_byte_2 = (unsigned char) rand_range(256);
120        *rand_byte_3 = (unsigned char) rand_range(256);
121        // Se obtienen los resultados aleatorios
122        if(k) in1 = *( float* ) target_add; else in2 = *( float* ) target_add;
123    }
124    if(i >= num_tests_discarded) {
125        // Se escribe encabezado del test
126        sprintf(current_test_str, "%d", i);
127        strcat(test_title_begin, current_test_str);
128        strcat(test_title_end, current_test_str);
129        strcat(test_title_begin, " -----*/\n");
130        strcat(test_title_end, " -----*/\n\n");
131        fputs(test_title_begin, file);
132        // Se obtiene el string con la representación binaria para cada input
133        get_binary(in1_str, &in1);
134        get_binary(in2_str, &in2);
135        // Ciclo para cada modo de redondeo
136        for(int j = 0 ; j < 4 ; j++){
137            int op, status;
138            float out;
139            char out_str[37];
140            if(j==0) fesetround(FE_TONEAREST); else if(j==1) fesetround(
→ FE_TOWARDZERO);
141            else if(j==2) fesetround(FE_DOWNWARD); else if(j==3) fesetround(
→ FE_UPWARD);

142            // ADD
143            if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
→ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
144            out = (in1+in2); // Se realiza la operación por testear

```

```

146     status = exceptions_checker(); // Se obtiene el status correspondiente
147     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
148     if(isnanf(out)) {strcat(out_str, "32'b11111111110000000000000000000000");
149     ↵ status=3;}
150     else get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del
151     ↵ resultado
152         fputs_test_fp_arithmetic_unit(file, current_test_str, 0, j, in1_str, in2_str,
153     ↵ out_str, status); // Se imprime test
154
155         // MUL
156         if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
157     ↵ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
158         out = (in1*in2); // Se realiza la operación por testear
159         status = exceptions_checker(); // Se obtiene el status correspondiente
160         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
161         if(isnanf(out)) {strcat(out_str, "32'b11111111110000000000000000000000");
162     ↵ status=3;}
163         else get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del
164     ↵ resultado
165         fputs_test_fp_arithmetic_unit(file, current_test_str, 1, j, in1_str, in2_str,
166     ↵ out_str, status); // Se imprime test
167
168         // DIV
169         if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
170     ↵ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
171         out = (in1/in2); // Se realiza la operación por testear
172         status = exceptions_checker(); // Se obtiene el status correspondiente
173         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
174         if(isnanf(out)) {strcat(out_str, "32'b11111111110000000000000000000000");
175     ↵ status=3;}
176         else get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del
177     ↵ resultado
178         fputs_test_fp_arithmetic_unit(file, current_test_str, 2, j, in1_str, in2_str,
179     ↵ out_str, status); // Se imprime test
180
181         // SQRT
182         if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
183     ↵ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
184         out = sqrt(in1); // Se realiza la operación por testear
185         status = exceptions_checker(); // Se obtiene el status correspondiente
186         memset(out_str,0,sizeof(out_str));
187         if(isnanf(out)) {strcat(out_str, "32'b11111111110000000000000000000000");
188     ↵ status=3;}
189         else get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del
190     ↵ resultado
191         fputs_test_fp_arithmetic_unit(file, current_test_str, 3, j, in1_str, in2_str,
192     ↵ out_str, status); // Se imprime test
193
194         // SUB
195         if(feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)) printf("feclearexcept(FE_ALL_EXCEPT)
196     ↵ FAILED!!\n"); // Se limpian las excepciones
197         out = in1 - in2; // Se realiza la operación por testear

```

```

182     status = exceptions_checker(); // Se obtiene el status correspondiente
183     memset(out_str,0,sizeof(out_str));
184     if(isnanf(out)) {strcat(out_str, "32'b11111111110000000000000000000000");
185     ↵ status=3;}
186     else get_binary(out_str, &out); // Se obtiene la representación binaria del
187     ↵ resultado
188     fputs_test_fp_arithmetic_unit(file, current_test_str, 4, j, in1_str, in2_str,
189     ↵ out_str, status); // Se imprime test
190     }
191   }
192   fputs("      $display(\"Total errors found: %d (\%f percentage)\",
193   ↵ status_out_errors, (man_out_errors+status_out_errors)*100.0/", file);
194   sprintf(percentage_info, "%d", (num_tests-num_tests_discarded)*4*5*2); fputs(
195   ↵ percentage_info, file); memset(percentage_info,0,sizeof(percentage_info)); sprintf(
196   ↵ percentage_info, "%d", (num_tests-num_tests_discarded)*4*5);
197   fputs(");\n      $display(\"Total out errors found: %d (\%f percentage)\",
198   ↵ man_out_errors, man_out_errors*100.0/", file); fputs(percentage_info, file);
199   fputs(");\n      $display(\"Total status errors found: %d (\%f percentage)\",
200   ↵ status_out_errors, status_out_errors*100.0/", file); fputs(percentage_info, file);
201   fputs(");\n      $display(\"Minimum elapsed time: %d\",
202   ↵ min_elapsed_time);\n      $display(\"Maximum elapsed time: %d\",
203   ↵ max_elapsed_time);\n", file);
204   fputs("      $display(\"END\"); #10 $finish;\n    end\\nendmodule", file);
205   fclose(file);
206   fetrounround(original_rounding);
207   printf("Nº of tests written: %d\nOperation ready, file generated: tb_fp_arithmetic_unit.
208   ↵ sv\n", (num_tests-num_tests_discarded)*4*5);
209   return 0;
210 }
```

4 ANEXO: Códigos Assembler

En esta sección se presentan todos los programas en lenguaje ensamblador de *Risc-V* utilizados para corroborar el correcto funcionamiento del *core complex* y del *SoC*:

testing_code_imf.s: Código ensamblador de prueba específico para verificar el *core complex*, se carga en el mismo para ejecutar el *test bench* *tb_riscv32imf_top.sv*.

```

1 .text
2   addi    x0, x0, 2047    # x0 = 0 siempre
3   addi    x1, x0, 2047    # x1 = 2047
4   xori    x2, x1, 1024    # x2 = x1 ^ 1024
5   ori     x4, x2, 1563    # x4 = x2 | 1563
6   andi    x5, x4, 1333    # x5 = x4 & 1333
7   slli    x6, x5, 11      # x6 = x5 << 11
8   addi    x7, x0, -78     # x7 = -78
9    srai   x7, x7, 4       # x7 = x7 >> 4 (signed)
10   srli   x7, x7, 1       # x7 = x7 >> 1 (unsigned)
```

```

11    beq    x4, x1, label_1    # x4 == x1 -> label_1
12    label_2:
13    sub    x12, x11, x4      # x11 = x11 - x4
14    xor    x13, x12, x4      # x13 = x12 ^ x4
15    or     x14, x6, x2      # x14 = x6 | x2
16    and    x15, x6, x2      # x15 = x6 & x2
17    bge    x4, x7, label_3  # x4 >= x7 -> label_3
18    addi   x9, x0, 1        # x9 = 1
19    sll    x16, x4, x9      # x16 = x4 << x9
20    blt    x4, x7, label_4  # x4 < x7 -> label_4
21    label_1:
22    add    x8, x4, x4      # x8 = x4 + x4
23    addi   x9, x0, 2        # x9 = 2
24    mul    x10, x4, x9      # x10 = x4 * x9
25    sll    x11, x4, x9      # x11 = x4 << x9
26    bge    x8, x10, label_2 # x8 >= x10 -> label_2
27    label_4:
28    sb     x12, 8(x1)       # M[x1+8][7:0] = x12[7:0] -> sb x1, x12, 8
29    sb     x12, 16(x2)      # M[x2+16][7:0] = x7[7:0] -> sb x2, x7, 16
30    sll    x7, x7, x9      # x7 = x7 << x9
31    sra    x18, x7, x9      # x18 = x7 >> x9 (signed)
32    srl    x19, x7, x9      # x19 = x7 >> x9 (unsigned)
33    sub    x14, x14, x6      # x14 = x14 - x6
34    addi   x14, x14, -899   # x14 = x14 - 900
35    sh     x19, 8(x14)      # M[x14+8][15:0] = x19[15:0] -> sb x14, x19, 8
36    sw     x11, 16(x14)      # M[x14+16][31:0] = x11[31:0] -> sb x14, x11, 16
37    jal    x20, label_5      # x20 = PC + 4, PC = label_5
38    label_3:
39    lbu   x21, 16(x14)      # x21[7:0] = M[x14+16][7:0] -> lb x21, x14, 16 (unsigned)
40    lbu   x22, 17(x14)      # x22[7:0] = M[x14+17][7:0] -> lb x22, x14, 17 (unsigned)
41    slli  x22, x22, 8        # x22 = x22 << 8
42    lbu   x23, 18(x14)      # x23[7:0] = M[x14+18][7:0] -> lb x23, x14, 18 (unsigned)
43    slli  x23, x23, 16      # x23 = x23 << 16
44    lbu   x24, 19(x14)      # x24[7:0] = M[x14+19][7:0] -> lb x24, x14, 19 (unsigned)
45    slli  x24, x24, 24      # x24 = x24 << 24
46    add   x25, x21, x22      # x25 = x21 + x22
47    add   x25, x25, x23      # x25 = x25 + x23
48    add   x25, x25, x24      # x25 = x25 + x24
49    bne   x25, x19, label_5 # x25 != x19 -> label_5
50    bltu  x7, x25, label_2  # x7 < x25 -> label_2 (unsigned)
51    bgeu  x7, x25, label_6  # x7 >= x25 -> label_6 (unsigned)
52    label_7:
53    rem   x25, x25, x23      # x25 = x25 % x23
54    remu  x25, x18, x25      # x25 = x25 % x23 (unsigned)
55    mulhu x9, x25, x18      # x9 = x25 * x18 (h) (unsigned)
56    mulhsu x2, x18, x7      # x9 = x18 * x7 (h) (signed*unsigned)
57    jal    x0, label_8        # PC = label_8
58    label_5:
59    lb    x21, 16(x14)      # x21[7:0] = M[x14+16][7:0] -> lb x21, x14, 16
60    lb    x22, 17(x14)      # x22[7:0] = M[x14+17][7:0] -> lb x22, x14, 17
61    lb    x23, 18(x14)      # x23[7:0] = M[x14+18][7:0] -> lb x23, x14, 18
62    lb    x24, 19(x14)      # x24[7:0] = M[x14+19][7:0] -> lb x24, x14, 19

```

```

63  add      x26, x21, x22      # x26 = x21 + x22
64  add      x26, x26, x23      # x26 = x26 + x23
65  add      x26, x26, x24      # x26 = x26 + x24
66  jalr    x20, x20, 0        # x20 = PC + 4, PC = x20 + 0
67  label_6:
68  lui      x30, 500          # x30 = label_7  << 12
69  auipc   x31, 500          # x30 = PC + label_7  << 12
70  slt      x27, x12, x22      # x27 = x12 < x22 ? 1 : 0
71  slti     x28, x12, 100      # x27 = x12 < 100 ? 1 : 0
72  add      x27, x27, x28      # x27 = x27 + x28
73  sltiu   x28, x12, -10      # x28 = x12 < -10 ? 1 : 0 (unsigned)
74  add      x27, x27, x28      # x27 = x27 + x28
75  sltu     x28, x18, x7       # x27 = x18 < x7 ? 1 : 0 (unsigned)
76  add      x27, x27, x28      # x27 = x27 + x28
77  lw       x28, 16(x14)       # x28[31:0] = M[x14+16][31:0] -> lb x28, x14, 16
78  add      x28, x28, x27      # x28 = x28 + x27
79  lh       x27, 16(x14)       # x27[15:0] = M[x14+16][15:0] -> lb x27, x14, 16
80  lhu      x29, 16(x14)       # x29[15:0] = M[x14+16][15:0] -> lb x29, x14, 16
81  divu     x27, x27, x29      # x27 = x27 / x29 (unsigned)
82  mulh     x1, x23, x27      # x1 = x23 * x27 (h)
83  mul      x23, x23, x27      # x1 = x23 * x27
84  div      x23, x23, x27      # x1 = x23 / x27
85  jal      x20, label_7        # x20 = PC + 4, PC = label_7
86  label_8:
87  flw      f0, 16(x14)       # f0[31:0] = M[x14+16][31:0] -> flw f0, x14, 16
88  fmv.w.x  x1, f12          # x12 -> f1 ##### fmv.w.x  f1, x12
89  fadd.s   f2, f0, f1          # f2 = f0 + f1
90  fdiv.s   f3, f2, f0          # f3 = f2 / f0
91  fsw      f3, 32(x14)       # M[x14+32][31:0] = f3[31:0] -> fsw x14, f3, 32
92  flw      f4, 32(x14)       # f4[31:0] = M[x14+32][31:0] -> flw f4, x14, 32
93  fsgnjn.s f4, f4, f0          # f4 = abs(f4) * -sgn(f0)
94  remu     x25, x25, x0          # x25 = x25
95  fmul.s   f6, f3, f2          # f6 = f3 * f2
96  fsgnjn.s f7, f0, f0          # f4 = abs(f0) * -sgn(f0)
97  fsub.s   f8, f6, f7          # f8 = f6 - f7
98  fmadd.s  f5, f3, f2, f0      # f5 = f3 * f2 + f0
99  fsqrt.s  f9, f7          # f9 = sqrt(f7)
100 fsgnj.s  f10, f7, f4          # f10 = abs(f7) * sgn(f4)
101 fsgnjx.s f11, f7, f4          # f11 = f7 * sgn(f4)
102 fmsub.s  f12, f4, f3, f10      # f12 = f4 * f3 - f10
103 fmin.s   f13, f11, f12      # f13 = min(f11, f12)
104 fmax.s   f14, f11, f12      # f13 = max(f11, f12)
105 fnmadd.s f15, f13, f4, f4      # f15 = -f13 * f4 + f10
106 fnmsub.s f16, f13, f4, f5      # f16 = -f13 * f4 - f10
107 fmv.x.w  x1, f7          # f7 -> x1
108 feq.s    x23, f0, f14      # x23 = (f0 == f14) ? 1 : 0
109 flt.s    x24, f0, f14      # x24 = (f0 < f14) ? 1 : 0
110 add      x23, x23, x24      # x23 += x24
111 flt.e.s  x24, f11, f14      # x23 = (f0 <= f14) ? 1 : 0
112 add      x23, x23, x24      # x23 += x24
113 add      x1, x23, x1          # x1 += x23
114 fcvt.wu.s x23, f3          # x23 = uint(f3)

```

```

115    fsgnjn.s   f3, f3, f3      # f4 = abs(f3) * -sgn(f3)
116    fcvt.w.s   x24, f3        # x24 = int(f3)
117    add       x23, x24, x23    # x23 += x24 -> x23 = 0
118    fcvt.s.w   f17, x7        # f17 = fp(int(x7))
119    fclass.s   x24, f8        # x24 = class(f8)
120    fcvt.s.wu  f18, x7        # f18 = fp(uint(x7)) ##### error en el fp_converter
121
122    addi      x17, x0, 10      # syscall para terminar el programa
123    ecall

```

fibonacci_simple.s: Código de prueba específico para verificar el *core complex* y el *SoC*, se carga para ejecutar el *test bench tb_TOP.sv*.

```

1 .eqv INIT_ARG     3
2 .eqv MAX_ARG     7
3
4 .text
5
6 main:
7    sw    s0, (sp)          # se guarda s0 en la dirección apuntada por el stack pointer
8    add   s0, x0, sp        # s0 = sp
9    addi  sp, sp, -16       # se reserva espacio para 4 words (4bytes*4=16): sp -= 16
10   addi  a1, x0, INIT_ARG # a1 = INIT_ARG
11   sw    a1, -4(s0)        # Se guarda a1
12   addi  a2, x0, MAX_ARG # a2 = MAX_ARG
13   sw    a2, -8(s0)        # Se guarda a2
14   # Hay espacio sin utilizar para otra variable en -12(s0).
15   # Pero el stack pointer debe ser "16-byte aligned" (https://riscv.org/wp-content/uploads/2015/01/riscv-calling.pdf P3)
16 loop:
17   add   a0, x0, a1        # a0 = a1 -> permite mostrar a1 (el argumento de entrada a
18   # la función fibonacci)
19   li    x17, 1             # syscall 1: PrintInt
20   ecall
21   jal   ra, fibonacci
22   lw    a1, -4(s0)         # Se llama la función, recibe arg en a0
23   li    x17, 1             # Se recupera el arg de entrada a la función
24   ecall
25   addi a1, a1, 1           # syscall 1: PrintInt
26   sw    a1, -4(s0)         # # arg++
27   ble   a1, a2, loop
28 done:
29   li    x17, 10            # syscall 10: Exit
30   ecall
31
32 # int fibonacci(int n){ if(n <= 2) return 1; else return fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2); }
33 fibonacci: # Recibe n en a0 y retorna el resultado en el mismo registro
34   # Se almacenan los registros
35   sw    s0, (sp)          # se guarda s0 en la dirección apuntada por el stack pointer
36   add   s0, x0, sp        # s0 = sp
37   # Se necesita 1 variable local + sp + ra: 3 words en el stack

```

```

38 # 3 words*4 bytes/address = 12 bytes, pero el sp debe apuntar al siguiente espacio
    ↪ disponible: sp-16
39 addi sp, sp, -16
40 sw ra, -4($0)          # Se guarda: Dirección de retorno
41 sw a0, -8($0)          # Se guarda: Argumento de entrada
42 addi a1, x0, 2          # a1 = 2
43 ble a0, a1, fib_basecase # if(n <= 2) -> fib_basecase
44 # 1era llamada recursiva: fibonacci(n-1)
45 addi a0, a0, -1          # n-1
46 jal ra, fibonacci        # a0 <- fib(n-1)
47 sw a0, -12($0)          # -12($0) <- a0
48 # 2da llamada recursiva: fibonacci(n-2)
49 lw a0, -8($0)          # a0 <- n
50 addi a0, a0, -2          # n-2
51 jal ra, fibonacci        # a0 <- fib(n-2)
52 # return fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2);
53 lw a1, -12($0)          # a1 <- fib(n-1)
54 add a0, a0, a1          # a0 <- fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2)
55 jal x0, fib_ret
56 fib_basecase: # if(n <= 2) return 1;
57 addi a0, x0, 1          # a0 = 1
58 fib_ret:   # return
59 lw ra, -4($0)          # Se restaura la dirección de retorno
60 lw s0, ($0)             # Se recupera el stack pointer
61 jalr x0, ra, 0          # Se vuelve a la dirección donde se invocó la función

```

fibonacci_inputs.s: Código de prueba para ser ejecutado en *hardware*, se basa en *fibonacci_simple.s* pero añadiendo mayor interacción con el usuario.

```

1 .text
2
3 main:
4 sw s0, ($sp)           # se guarda s0 en la dirección apuntada por el stack pointer
5 add s0, x0, sp          # s0 = sp
6 addi sp, sp, -16         # se reserva espacio para 4 words (4bytes*4=16): sp -= 16
7 li x17, 5               # syscall 5: GetInt
8 ecall                  # Get int: INIT_ARG en a0
9 add a1, x0, a0          # a1 = a0
10 sw a1, -4($0)          # Se guarda a1
11 ebreak                 # Simplemente para ayudar a diferenciar cada input
12 li x17, 5               # syscall 5: GetInt
13 ecall                  # Get int: MAX_ARG en a0
14 add a2, x0, a0          # a2 = a0
15 sw a2, -8($0)          # Se guarda a2
16 # Hay espacio sin utilizar para otra variable en -12($0).
17 # Pero el stack pointer debe ser "16-byte aligned" (https://riscv.org/wp-content/uploads/2015/01/riscv-calling.pdf P3)
18 loop:
19 add a0, x0, a1          # a0 = a1 -> permite mostrar a1 (el argumento de entrada a
    ↪ la función fibonacci)
20 jal ra, fibonacci       # Se llama la función, recibe arg en a0
21 lw a1, -4($0)          # Se recupera el arg de entrada a la función

```

```

22 li    x17, 1          # syscall 1: PrintInt
23 ecall
24 addi   a1, a1, 1      # Print int de la respuesta ya almacenada en a0
25 sw    a1, -4($0)      # arg++
26 ble   a1, a2, loop
27 done:
28 li    x17, 10         # syscall 10: Exit
29 ecall
30
31 # int fibonacci(int n){ if(n <= 2) return 1; else return fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2); }
32 fibonacci:    # Recibe n en a0 y retorna el resultado en el mismo registro
33     # Se almacenan los registros
34 sw    s0, ($p)          # se guarda s0 en la dirección apuntada por el stack pointer
35 add   s0, x0, $p        # s0 = sp
36     # Se necesita 1 variable local + sp + ra: 3 words en el stack
37     # (recordar: el stack pointer debe ser "16-byte aligned")
38     # 3 words*4 bytes/address = 12 bytes, pero el sp debe apuntar al siguiente espacio
            ↪ disponible: sp-16
39 addi  sp, $p, -16
40 sw    ra, -4(s0)        # Se guarda: Dirección de retorno
41 sw    a0, -8(s0)        # Se guarda: Argumento de entrada
42 addi  a1, x0, 2        # a1 = 2
43 ble   a0, a1, fib_basecase  # if(n <= 2) -> fib_basecase
44     # 1era llamada recursiva: fibonacci(n-1)
45 addi  a0, a0, -1        # n-1
46 jal   ra, fibonacci    # a0 <- fib(n-1)
47 sw    a0, -12(s0)       # -12(s0) <- a0
48     # 2da llamada recursiva: fibonacci(n-2)
49 lw    a0, -8(s0)        # a0 <- n
50 addi  a0, a0, -2        # n-2
51 jal   ra, fibonacci    # a0 <- fib(n-2)
52     # return fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2);
53 lw    a1, -12(s0)       # a1 <- fib(n-1)
54 add   a0, a0, a1        # a0 <- fibonacci(n-1) + fibonacci(n-2)
55 jal   x0, fib_ret
56 fib_basecase:  # if(n <= 2) return 1;
57 addi  a0, x0, 1        # a0 = 1
58 fib_ret:    # return
59 lw    ra, -4(s0)        # Se restaura la dirección de retorno
60 lw    s0, ($0)          # Se recupera el stack pointer
61 jalr  x0, ra, 0        # Se vuelve a la dirección donde se invocó la función

```

operating_fp.s: Código de prueba para ser ejecutado en *hardware* con enfoque en el testeo de las operaciones de punto flotante e interacción con el usuario.

```

1 .data
2
3 begin_msg:    .word 0xBBBBBBBB
4 end_msg:      .word 0xEEEEEEEE
5
6 .text
7

```

```

8 main:
9    lw      a0, 0(x0) #begin_msg
10   li     x17, 1  # syscall 1: PrintInt
11   ecall
12 get_fps:
13   fmv.w.x x0, ft0 # ft0=0 por algún motivo en rars los operandos deben estar al revés solo
14   ↪ para esta instrucción
14   li     x17, 6  # syscall 1: GetFp
15   ecall
16   fadd.s ft1, fa0, ft0  # ft1 operando 1
17   li     x17, 6  # syscall 1: GetFp
18   ecall
19   fadd.s ft2, fa0, ft0  # ft2 operando 2
20 operations:
21   fmul.s   ft3, ft1, ft2      # ft3 = ft1*ft2
22   fadd.s   ft4, ft1, ft2      # ft4 = ft1+ft2
23   fsub.s   ft5, ft3, ft4      # ft5 = ft3-ft4
24   fdiv.s   ft6, ft4, ft1      # ft6 = ft4/ft1
25   fsqrt.s  ft7, ft3          # ft7 = sqrt(ft3)
26   fmadd.s  ft8, ft3, ft6, ft1 # ft8 = ft3*ft6+ft1
27   fmsub.s  ft9, ft3, ft6, ft1 # ft9 = ft3*ft6-ft1
28   fnmadd.s ft10, ft3, ft6, ft1 # ft10 = -ft3*ft6+ft1
29   fnmsub.s ft11, ft3, ft6, ft1 # ft11 = -ft3*ft6-ft1
30 printing_res:
31   fadd.s  fa0, ft0, ft3
32   li     x17, 2  # syscall 2: PrintFp
33   ecall
34   fadd.s  fa0, ft0, ft4
35   li     x17, 2  # syscall 2: PrintFp
36   ecall
37   fadd.s  fa0, ft0, ft5
38   li     x17, 2  # syscall 2: PrintFp
39   ecall
40   fadd.s  fa0, ft0, ft6
41   li     x17, 2  # syscall 2: PrintFp
42   ecall
43   fadd.s  fa0, ft0, ft7
44   li     x17, 2  # syscall 2: PrintFp
45   ecall
46   fadd.s  fa0, ft0, ft8
47   li     x17, 2  # syscall 2: PrintFp
48   ecall
49   fadd.s  fa0, ft0, ft9
50   li     x17, 2  # syscall 2: PrintFp
51   ecall
52   fadd.s  fa0, ft0, ft10
53   li    x17, 2  # syscall 2: PrintFp
54   ecall
55   fadd.s  fa0, ft0, ft11
56   li    x17, 2  # syscall 2: PrintFp
57   ecall
58 done:

```

```

59    lw    a0, 4(x0)#end_msg
60    li    x17, 1 # syscall 1: PrintInt
61    ecall
62    li    x17, 10 # syscall 10: Exit
63    ecall

```

4.1 *Script* conversor de palabras

Los programas en lenguaje ensamblador presentados anteriormente se ejecutan en *RARS* para contrastar su funcionamiento con el de las simulaciones y el de las pruebas sobre *hardware*. Esta misma herramienta se utiliza para compilar el programa y cargarlo en el *SoC* implementado. Sin embargo, hace falta el siguiente programa en *Python*:

singleWord2fourWords.py: *Script* de *Python* 2.7 encargado de recibir la memoria de programa y de datos compilados en texto hexadecimal (cada linea del archivo contiene 8 dígitos hexadecimales). Este programa recibe dos archivos, *text_in* y *data_in*, correspondientes a la memoria de programa y datos respectivamente. Luego retorna una versión convertida de los mismos, *text_in_formatted* y *data_in_formatted* respectivamente. Esta nueva versión reordena las palabras en 3906 filas de 4 *words* ordenadas de derecha a izquierda, para esto lee línea por línea los respectivos archivos de entrada y rellena con ceros las filas que no se completen.

```

1 # correr con Python 2.7
2 # total_words = words_per_line * number_of_lines
3 def singleWordPerLine2newFormat(words_per_line, number_of_lines, name_file_in,
4                                 name_file_out):
5     fr = open(name_file_in, 'r')
6     fw = open(name_file_out, 'w')
7     new_line = range(words_per_line)
8     for i in range(number_of_lines):
9         for j in range(words_per_line):
10            new_line[words_per_line-1-j] = fr.read(8)
11            if(new_line[words_per_line-1-j]==','):
12                new_line[words_per_line-1-j] = '00000000'
13                fr.read(1)
14            for j in range(words_per_line):
15                fw.write(new_line[j])
16            fw.write('\n')
17    fr.close()
18    fw.close()
19 # 3906 lineas de 4 palabras => total_words = 3906*4 = 15624
20 singleWordPerLine2newFormat(4, 3906, "text_in", "text_in_formatted")
21 singleWordPerLine2newFormat(4, 3906, "data_in", "data_in_formatted")

```