

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

RISC-V SiMPLE:

Projeto e desenvolvimento de processadores RISC-V
com a ISA RV32IMF usando as microarquiteturas
Uniciclo, Multiciclo e Pipeline em FPGA

Arthur de Matos Beggs

Brasília, Maio de 2021



**ENGENHARIA
MECATRÔNICA**
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASILIA
Faculdade de Tecnologia
Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

RISC-V SiMPLE: Projeto e desenvolvimento de processadores RISC-V com a ISA RV32IMF usando as microarquiteturas Uniciclo, Multiciclo e Pipeline em FPGA

Arthur de Matos Beggs

*Relatório submetido como requisito parcial de obtenção
de grau de Engenheiro de Controle e Automação*

Banca Examinadora

Prof. Marcus Vinicius Lamar, CIC/UnB _____
Orientador

Prof. Ricardo Pezzuol Jacobi, CIC/UnB _____
Examinador Interno

Prof. Marcelo Grandi Mandelli, CIC/UnB _____
Examinador Interno

Brasília, Maio de 2021

FICHA CATALOGRÁFICA

ARTHUR, DE MATOS BEGGS

RISC-V SiMPLE,

[Distrito Federal] 2021.

???, ???p., 297 mm (FT/UnB, Engenheiro, Controle e Automação, 2021). Trabalho de Graduação – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

1. RISC-V

2. Verilog

3. FPGA

I. Mecatrônica/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BEGGS, ARTHUR DE MATOS, (2021). RISC-V SiMPLE. Trabalho de Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Publicação FT.TG-nº???, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, ???p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Arthur de Matos Beggs

TÍTULO DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO: RISC-V SiMPLE.

GRAU: Engenheiro

ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste Trabalho de Graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse Trabalho de Graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Arthur de Matos Beggs

SHCGN 703 Bl G N° 120, Asa Norte

70730-707 Brasília – DF – Brasil.

RESUMO

Desenvolvimento e documentação de uma plataforma de ensino de arquitetura de computadores em *Verilog* sintetizável em *FPGA*, com foco em um processador com arquitetura do conjunto de instruções *RISC-V* implementado em três microarquiteturas para ser utilizado como recurso de laboratório na disciplina de Organização e Arquitetura de Computadores da Universidade de Brasília. A plataforma funciona nas *FPGAs terasIC DE1-SoC* disponíveis no laboratório da Universidade, possui periféricos de depuração como *display* dos registradores do processador na saída de vídeo, além de outros periféricos como *drivers* de áudio e teclado para uma experiência mais completa de desenvolvimento, e permite que o processador seja substituído por implementações de diversas arquiteturas de *32 bits* com certa facilidade.

Palavras Chave: RISC-V, Verilog, FPGA

ABSTRACT

Development and documentation of a computer architecture learning environment in Verilog synthesizable to FPGA, focusing in a computer processor using the RISC-V instruction set architecture implemented in three different microarchitectures. The project will be used as a lab resource on the Computer Architecture and Organization course at Universidade de Brasília. The platform works in FPGAs terasIC DE1-SoC available at the university lab, possess debugging peripherals such as an On Screen Display showing the contents of regfiles via video output, and other peripherals as audio and keyboard drivers delivering a full development experience. It allows with relative easiness the exchange of the core processor for other implementations of 32 bits architectures.

Keywords: RISC-V, Verilog, FPGA

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO	1
1.2	POR QUE RISC-V?.....	1
1.3	OBJETIVOS	2
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO.....	2
2	Revisão Teórica.....	3
2.1	ARQUITETURA DE COMPUTADORES	3
2.1.1	ARQUITETURAS <i>RISC</i> e <i>CISC</i>	4
2.1.2	ARQUITETURA MIPS.....	5
2.1.3	ARQUITETURA ARM	5
2.1.4	ARQUITETURA X86.....	6
2.1.5	ARQUITETURA AMD64	6
2.1.6	ARQUITETURA RISC-V	6
2.1.6.1	EXTENSÃO DE REGISTRADORES DE CONTROLE E ESTADO	7
2.1.6.2	EXTENSÃO DE MULTIPLICAÇÃO E DIVISÃO.....	7
2.1.6.3	EXTENSÕES DE PONTO FLUTUANTE	8
2.1.6.4	EXTENSÕES A E ZIFENCEI.....	8
2.1.6.5	NOMENCLATURA DO PROCESSADOR IMPLEMENTADO	8
2.1.6.6	OUTRAS EXTENSÕES.....	8
2.1.6.7	ARQUITETURA PRIVILEGIADA	9
2.1.6.8	FORMATOS DE INSTRUÇÕES.....	9
2.1.6.9	FORMATOS DE IMEDIATOS	10
2.2	MICROARQUITETURAS	12
2.2.1	UNICICLO	12
2.2.2	MULTICICLO.....	12
2.2.3	PIPELINE	12
2.3	REPRESENTAÇÃO DE HARDWARE	12
2.3.1	VHDL	12
2.3.2	VERILOG.....	12
2.4	SÍNTESE LÓGICA	12
2.4.1	ANÁLISE E SÍNTESE.....	12
2.4.2	FITTING	12

2.4.3	TIMING ANALYZER.....	12
2.5	FIELD PROGRAMMABLE GATE ARRAYS.....	12
2.5.1	ARQUITETURA GENERALIZADA DE UMA FPGA	13
2.5.2	ARQUITETURA DA FPGA CYCLONE V SoC	14
2.5.2.1	ADAPTATIVE LOGIC MODULES	14
2.5.2.2	EMBEDDED MEMORY BLOCKS	15
2.6	RARS - <i>IDE</i> PARA PROGRAMAR E SIMULAR ASSEMBLY <i>RISC-V</i>	15
2.7	ESTADO DA ARTE DOS PROCESSADORES <i>RISC-V</i>	15
2.8	OBSERVAÇÕES FINAIS DA REVISÃO TEÓRICA	17
3	Sistema Proposto	18
3.1	ORGANIZAÇÃO DO PROJETO	18
3.2	IMPLEMENTAÇÃO DOS <i>SOFT-CORES</i>	21
3.2.1	MICROARQUITETURA UNICICLO	21
3.2.2	MICROARQUITETURA MULTICICLO.....	23
3.2.3	MICROARQUITETURA <i>PIPELINE</i> DE 5 ESTÁGIOS	25
3.3	CHAMADAS DE SISTEMA	27
3.4	INTERFACE DE VÍDEO E DEPURAÇÃO	30
3.5	CONFIGURAÇÃO E SÍNTESE DO PROCESSADOR PELO QUARTUS	32
3.6	SIMULAÇÃO DO PROCESSADOR PELO QUARTUS E MODELSIM	32
3.7	SCRIPT <i>MAKE.SH</i>	34
3.8	USO DA FPGA DE1-SoC.....	34
4	Resultados	37
5	Conclusões.....	38
5.1	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	38
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		39
Anexos.....		43
I Descrição do conteúdo do CD		44
II Programas utilizados.....		45

LISTA DE FIGURAS

2.1	Abstração da arquitetura de um computador	4
2.2	Codificação de instruções de tamanho variável da arquitetura <i>RISC-V</i>	7
2.3	Formatos de Instruções da <i>ISA RISC-V</i>	9
2.4	Formatos de Instruções da <i>ISA MIPS32</i>	10
2.5	Formação do Imediato de tipo I	10
2.6	Formação do Imediato de tipo S	10
2.7	Formação do Imediato de tipo B	11
2.8	Formação do Imediato de tipo U	11
2.9	Formação do Imediato de tipo J	11
2.10	Abstração da arquitetura de uma <i>FPGA</i>	13
2.11	Funcionamento da chave de interconexão	14
2.12	Arquitetura da <i>FPGA</i> Intel Cyclone V SoC.....	14
2.13	Diagrama de blocos de um ALM	15
3.1	Diagrama de blocos do sistema.	21
3.2	Diagrama da implementação das <i>ISAs</i> RV32I e RV32IM na microarquitetura uniciclo.	22
3.3	Diagrama da implementação da <i>ISA</i> RV32IMF na microarquitetura uniciclo.	23
3.4	Diagrama da implementação das <i>ISAs</i> RV32I e RV32IM na microarquitetura multiciclo.	24
3.5	Diagrama da implementação da <i>ISA</i> RV32IMF na microarquitetura multiciclo.....	25
3.6	Diagrama da implementação das <i>ISAs</i> RV32I e RV32IM na microarquitetura <i>pipeline</i> de 5 estágios.....	26
3.7	Diagrama da implementação da <i>ISA</i> RV32IMF na microarquitetura <i>pipeline</i> de 5 estágios.	27
3.8	Exibição do <i>frame</i> de vídeo da <i>FPGA</i>	31
3.9	<i>Menu OSD</i> exibindo os valores dos registradores do processador.	31
3.10	<i>Intel Quartus Lite v18.1</i> com a janela de configurações do projeto.	32
3.11	Janela de configuração da simulação no <i>Quartus</i>	33
3.12	O <i>script</i> <i>NativeLink</i> invoca o <i>ModelSim</i> passando o <i>script</i> <i>.do</i> com as informações de como simular o sistema.....	34
3.13	Placa de desenvolvimento <i>terasIC DE1-SoC</i>	35

LISTA DE TABELAS

3.1 Tabela de <i>syscalls</i> implementadas.	28
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

ASIC	Circuito Integrado de Aplicação Específica — <i>Application Specific Integrated Circuit</i>
AWS	<i>Amazon Web Services</i>
BSD	Distribuição de Software de Berkeley — <i>Berkeley Software Distribution</i>
CISC	Computador com Conjunto de Instruções Complexo — <i>Complex Instruction Set Computer</i>
CSR	Registradores de Controle e Estado — <i>Control and Status Registers</i>
DSP	Processamento Digital de Sinais — <i>Digital Signal Processing</i>
FPGA	Arranjo de Portas Programáveis em Campo — <i>Field Programmable Gate Array</i>
hart	<i>hardware thread</i>
ISA	Arquitetura do Conjunto de Instruções — <i>Instruction Set Architecture</i>
MIPS	Microprocessador sem Estágios Intertravados de <i>Pipeline</i> — <i>Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages</i>
OAC	Organização e Arquitetura de Computadores
PC	Contador de Programa — <i>Program Counter</i>
PLL	Malha de Captura de Fase — <i>Phase-Locked Loop</i>
PCB	Placa de Circuito Impresso — <i>Printed Circuit Board</i>
RAS	Pilha de Endereços de Retorno — <i>Return Address Stack</i>
RISC	Computador com Conjunto de Instruções Reduzido — <i>Reduced Instruction Set Computer</i>
SBC	Computadores em Placa Única — <i>Single Board Computers</i>
SDK	Conjunto de Programas de Desenvolvimento — <i>Software Development Kit</i>
SSD	Unidade de Estado Sólido — <i>Solid State Driver</i>
SiMLE	Ambiente de Aprendizado Uniciclo, Multiciclo e <i>Pipeline</i> — <i>Single-cycle Multicycle Pipeline Learning Environment</i>
SoC	Sistema em um Chip — <i>System on Chip</i>
TSMC	<i>Taiwan Semiconductor Manufacturing Company</i>

Capítulo 1

Introdução

Até recentemente, a disciplina de Organização e Arquitetura de Computadores da Universidade de Brasília era ministrada em todas as turmas utilizando a arquitetura *MIPS32*. Apesar da arquitetura *MIPS32* ainda ter grande força no meio acadêmico (em boa parte devido a sua simplicidade e extensa bibliografia), sua aplicação na indústria tem diminuído consideravelmente na última década.

1.1 Motivação

O mercado de trabalho está a cada dia mais exigente, sempre buscando profissionais que conheçam as melhores e mais recentes ferramentas disponíveis. Além disso, muitos universitários se sentem desestimulados ao estudarem assuntos desatualizados e com baixa possibilidade de aproveitamento do conteúdo no mercado de trabalho. Isso alimenta o desinteresse pelos temas abordados e, em muitos casos, leva à evasão escolar. Assim, é importante renovar as matérias com novas tecnologias e tendências de mercado sempre que possível, a fim de instigar o interesse dos discentes e formar profissionais mais capacitados e preparados para as demandas da atualidade.

Embora a curva de aprendizagem de linguagens *assembly* de alguns processadores *RISC* seja relativamente baixa para quem já conhece o *assembly MIPS32*, aprender uma arquitetura atual traz o benefício de conhecer o *estado da arte* da organização e arquitetura de computadores.

Hoje, a disciplina também é ministrada na arquitetura *ARM*, bem como na *ISA RISC-V*, desenvolvida na Divisão de Ciência da Computação da Universidade da Califórnia - Berkeley, e será o objeto de estudo desse trabalho.

1.2 Por que RISC-V?

A *ISA RISC-V* (lê-se “*risk-five*”) é uma arquitetura *open source* [1] com licença *BSD*, o que permite o seu livre uso para quaisquer fins, sem distinção de se o trabalho possui código-fonte aberto ou proprietário. Tal característica possibilita que grandes fabricantes utilizem a arquitetura

para criar seus produtos, mantendo a proteção de propriedade intelectual sobre seus métodos de implementação e quaisquer subconjuntos de instruções não-*standard* que as empresas venham a produzir, o que estimula investimentos em pesquisa e desenvolvimento.

Empresas como Google, IBM, Nvidia, Samsung, Qualcomm e Western Digital são algumas das fundadoras e investidoras da *RISC-V Foundation*, órgão responsável pela governança da arquitetura. Isso demonstra o interesse das gigantes do mercado em seu sucesso e disseminação.

A licença também permite que qualquer indivíduo produza, distribua e até mesmo comercialize sua própria implementação da arquitetura sem ter que arcar com *royalties*, sendo ideal para pesquisas acadêmicas, *startups* e até mesmo *hobbyistas*.

O conjunto de instruções foi desenvolvido tendo em mente seu uso em diversas escalas: sistemas embarcados, *smartphones*, computadores pessoais, servidores e supercomputadores, o que pode viabilizar maior reuso de *software* e maior integração de *hardware*.

Outro fator que estimula o uso do *RISC-V* na disciplina é a modernização dos livros didáticos. A nova versão do livro utilizado em OAC, Organização e Projeto de Computadores, de David Patterson e John Hennessy, utiliza a *ISA RISC-V*. Além disso, com a promessa de se tornar uma das arquiteturas mais utilizadas nos próximos anos, a escolha do *RISC-V* para a disciplina de OAC se mostra ideal no momento.

1.3 Objetivos

O projeto *RISC-V SiMPLE (Single-cycle Multicycle Pipeline Learning Environment)* consiste no aprimoramento e documentação do processador com conjunto de instruções *RISC-V*, sintetizável em *FPGA* e com *hardware* descrito em *Verilog* utilizado como material de laboratório de uma das turmas da disciplina de OAC. O objetivo é ter uma plataforma de testes e simulação bem documentada e para servir de referência na disciplina. O projeto implementa três microarquiteturas que podem ser escolhidas a tempo de síntese: uniciclo, multiciclo e *pipeline*, todas as três com um *hart* e caminho de dados de 32 bits.

Os processadores contém o conjunto de instruções I (para operações com inteiros) e as extensões M (para multiplicação e divisão de inteiros) e F (para ponto flutuante com precisão simples conforme o padrão IEEE 754 - 2008). A síntese das extensões M e F é opcional, sendo que ao optar pelo uso da extensão F, a M também é incluída. Assim, pela nomenclatura da arquitetura, os processadores desenvolvidos são chamados de *RV32I*, *RV32IM* ou *RV32IMF*. Todas as versões implementam exceções e chamadas de sistema (*syscalls*) [2].

1.4 Estrutura do texto

A monografia possui cinco capítulos, sendo eles a presente introdução, um capítulo dedicado a revisar os assuntos pertinentes ao trabalho, o seguinte para descrever o sistema proposto, o penúltimo para apresentar os resultados obtidos e o último para as ponderações finais.

Capítulo 2

Revisão Teórica

Alguns conceitos são essenciais para compreender o projeto proposto, sua implementação e seus resultados. Esse capítulo abordará o que é arquitetura e organização de computadores, tratará brevemente sobre as arquiteturas mais conhecidas e se aprofundará na especificação da arquitetura *RISC-V*. Além disso, serão expostos os conceitos de síntese de *hardware* e do funcionamento das *FPGAs*, em especial o modelo que será utilizado para desenvolver o trabalho. Por fim, o “estado da arte” da arquitetura *RISC-V* será discutido.

2.1 Arquitetura de Computadores

Para nos comunicarmos, necessitamos de uma linguagem, e no caso dos brasileiros, essa linguagem é o português. Como toda linguagem, o português possui sua gramática e dicionário que lhe dá estrutura e sentido. Línguas humanas como o português, inglês e espanhol são chamadas de linguagens naturais, e evoluíram naturalmente a partir do uso e repetição. [3]

Por causa da excelente capacidade de interpretação e adaptação da mente humana, somos capazes de criar e entender novos dialetos que não seguem as regras formais das linguagens naturais que conhecemos. Porém, fora da comunicação casual é importante e às vezes obrigatório que nos expressemos sem ambiguidade. Línguas artificiais como a notação matemática e linguagens de programação possuem semântica e sintaxe mais rígidas para garantir que a mensagem transmitida seja interpretada da maneira correta. Sem essa rigidez, os computadores de hoje não seriam capazes de entender nossos comandos.

Para a comunicação com o processador de um computador, utilizamos mensagens chamadas de instruções, e o conjunto dessas instruções é chamado de Arquitetura do Conjunto de Instruções (*ISA*). Um processador só é capaz de entender as mensagens que obedecem as regras semânticas e sintáticas de sua *ISA*, e qualquer instrução que fuja das suas regras causará um erro de execução ou realizará uma tarefa diferente da pretendida. A linguagem de máquina é considerada de baixo nível pois apresenta pouca ou nenhuma abstração em relação à arquitetura.

As instruções são passadas para o processador na forma de código de máquina, sequências de

dígitos binários que correspondem aos níveis lógicos do circuito. Para melhorar o entendimento do código e facilitar seu desenvolvimento, uma outra representação é utilizada, o *assembly*. Um código *assembly* é transformado em código de máquina por um programa montador (*assembler*), e o processo inverso é realizado por um *disassembler*. As linguagens *assembly*, dependendo do *assembler* utilizado, permitem o uso de *macros* de substituição e pseudo-instruções (determinadas instruções inexistentes na *ISA* que são expandidas em instruções válidas pelo montador) e são totalmente dependentes da arquitetura do processador, o que normalmente impede que o mesmo código binário executável funcione em arquiteturas diferentes.

A Figura 2.1 é uma representação simplificada de um processador. A unidade de controle lê uma instrução da memória e a decodifica; o circuito de lógica combinacional lê os dados dos registradores, entrada e memória conforme necessário, executa a instrução decodificada e escreve no banco de registradores, na memória de dados ou na saída se for preciso; a unidade de controle lê uma nova instrução e o ciclo se repete até o fim do programa. A posição de memória da instrução que está sendo executada fica armazenada em um registrador especial chamado de Contador de Programa (*PC*). Algumas instruções modificam o *PC* condicionalmente ou diretamente, criando a estrutura para saltos, laços e chamada/retorno de funções.

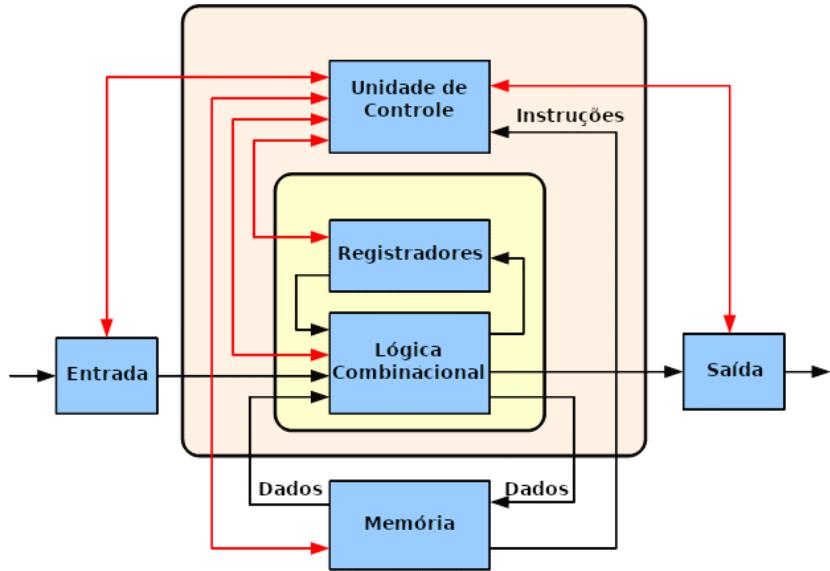


Figura 2.1: Abstração da arquitetura de um computador. Fonte: [4]

2.1.1 Arquiteturas *RISC* e *CISC*

Historicamente, as arquiteturas são divididas em *ISAs RISC* (*Reduced Instruction Set Computer*) e *CISC* (*Complex Instruction Set Computer*). Na atualidade, a principal diferença entre elas é que as *ISAs RISC* acessam a memória por instruções de *load/store*, enquanto as *CISC* podem

acessar a memória diretamente em uma instrução de operação lógica ou aritmética. [5]

Algumas arquiteturas *RISC* notáveis são a *RISC-V*, objeto de estudo desse trabalho, a *ARM* e a *MIPS*. Quanto às *CISC*, a *x86* e sua extensão de 64 bits, a *AMD64*, são as mais conhecidas e amplamente utilizadas.

2.1.2 Arquitetura MIPS

Durante seus 36 anos de existência, a *ISA MIPS* (*Microprocessor without Interlocked Pipelined Stages*) teve diversas versões produzidas, atendendo às demandas de diversos segmentos do mercado. Usado em supercomputadores na década de 90 e nos famosos *videogames Nintendo 64*, *PlayStation*, *PlayStation 2* e *PlayStation Portable*, a arquitetura atendia a vários segmentos do mercado.

A *MIPS32*, uma de suas versões lançada em 1999 [6], é amplamente utilizada no meio acadêmico, utilizando livros como as diversas edições do *Computer Organization and Design* [7] e o clássico *See MIPS run* [8] como livros-texto das disciplinas de arquitetura de computadores.

Na última década, o uso de processadores *MIPS* têm se limitado a sistemas automotivos e roteadores de *internet* [9], e a empresa detentora dos direitos da arquitetura anunciou o fim do desenvolvimento de novas iterações. [10]

2.1.3 Arquitetura ARM

A arquitetura *ARM* (*Advanced RISC Machines*) é considerada extremamente eficiente no consumo de energia e possui boa dissipação de calor sem comprometer seu desempenho [11], e com isso é predominante no mercado de *smartphones* [12]. Presente também nos *videogames Nintendo 3DS* e *Nintendo Switch*, nos *Single Board Computers (SBCs) Raspberry Pi*, entre outros dispositivos, a arquitetura tem enorme força em aplicações embarcadas.

Porém, isso não a impede de atender a outros setores do mercado. Atualmente, o supercomputador mais potente do mundo utiliza a arquitetura *ARM*. [13] A *Apple* recentemente lançou seus primeiros *notebooks* e *desktops* com seu processador *Apple M1*, considerado hoje o processador de computadores pessoais com maior eficiência por watt. [14] O serviço de computação em nuvem *Amazon Web Services (AWS)* também oferece máquinas equipadas com seu processador *AWS Graviton* para computação geral.

A empresa *ARM* opera licenciando o uso do seu conjunto de instruções e de projetos de implementação, mas não produz *chips*. A manufatura do processador fica a cargo da empresa licenciante, como a *Qualcomm*, *NXP*, *Samsung* e *Apple*.

Por ser uma das arquiteturas prevalentes da atualidade, a *ISA ARM* era uma forte candidata para ser utilizada no presente trabalho. Porém, a *ISA ARM* não é uma arquitetura aberta, sendo necessário obter uma licença para desenvolvimento e distribuição de implementações.

2.1.4 Arquitetura x86

A *ISA x86*, também conhecida como *IA-32* é uma arquitetura *CISC* de 32 bits criada em 1985 pela *Intel* para uso no seu processador *80386*, renomeado para *i386*. Um diferencial da *ISA x86* é que versões mais novas do conjunto de instruções mantém a compatibilidade com as versões anteriores. Assim, programas desenvolvidos para versões mais antigas continuam funcionando em sistemas modernos. Essa característica fez com que processadores *x86* dominassem o mercado de computadores pessoais e *workstations*.

Apesar de criada pela *Intel* para a manufatura de seus próprios processadores, a *ISA* foi licenciada para outras empresas como a *AMD*.

2.1.5 Arquitetura AMD64

A arquitetura *AMD64* também conhecida como *x86-64* é a extensão de 64 bits da *IA-32*, criada pela *AMD* em 1999. A *Intel* criou sua própria extensão para a *IA-32*, a *IA-64* da linha de processadores *Itanium*. Porém, a extensão criada pela *AMD* teve mais tração e a *Intel* também adotou a *AMD64*. A característica de iterações mais novas manterem compatibilidade com *softwares* desenvolvidos para versões anteriores também faz parte da especificação da arquitetura.

Hoje, a maioria predominante dos computadores pessoais modernos, *workstations* e servidores utilizam processadores *x86-64*.

2.1.6 Arquitetura RISC-V

Conforme descrito na Seção 1.2, a *RISC-V* é uma arquitetura de especificação aberta e licença livre, o que permite que qualquer indivíduo ou entidade produza, distribua e/ou comercialize processadores que a utilizem sem haver cobrança de *royalties*.

A *RISC-V* é uma arquitetura modular, sendo o módulo base de operações com inteiros mandatório em qualquer implementação. Esse módulo será o **I** (de *Integer*) para a maioria das implementações. Ele possui 32 registradores, sendo 31 de uso geral e um *hardwired* para o valor *zero*. Mas também existe o módulo **E** (de *Embedded*) para aplicações embarcadas, que possui metade dos registradores presentes nas outras implementações (15 de uso geral mais o *zero*) e é limitado a registradores de 32 bits de largura. As demais extensões são de uso opcional.

O módulo **I** pode ser implementado com registradores de 32, 64 ou 128 bits de largura. O módulo com registradores de 128 bits é um planejamento para o futuro quando 64 bits não forem mais suficientes para o endereçamento de memória do sistema, fazendo com que a arquitetura não tenha que ser reprojetada para se adequar às novas demandas. Assim, os possíveis conjuntos de instrução base são: *RV32I*, *RV32E*, *RV64I* e *RV128I*.

O *design* do módulo visa reduzir o *hardware* necessário para uma implementação mínima, bem como ser um alvo de compilação satisfatório, sendo capaz de emular por *software* as extensões **M** (de *Multiplication and Division*), **F** (de *Single-Precision Floating-Point*) e **D** (de *Double-Precision*

Floating-Point). Para isso, são implementadas instruções de *load/store* para transferir dados entre a memória e os registradores, operações lógicas e aritméticas entre dados de registradores, instruções para transferência de controle (*jumps* e *branches* condicionais) e chamadas de sistema (*syscalls*).

Diferente de outras arquiteturas como a *ARM*, as instruções de multiplicação e divisão não fazem parte do conjunto básico, uma vez que necessitam de circuito especializado e por isso encarecem o desenvolvimento e produção dos processadores.

A arquitetura foi projetada para aceitar instruções de tamanho variável. A codificação do tamanho das instruções é mostrada na Figura 2.2. As instruções do módulo **I** seguem o *encoding* de instruções de 32 bits. A extensão **C** (de *Compact*) especifica instruções utilizando a codificação de 16 bits. As demais extensões previstas pela especificação da arquitetura também utilizam a codificação de 32 bits. As codificações para instruções com mais de 32 bits de largura foram projetadas para acomodar necessidades futuras e para permitir que projetistas extendam a arquitetura com módulos proprietários.

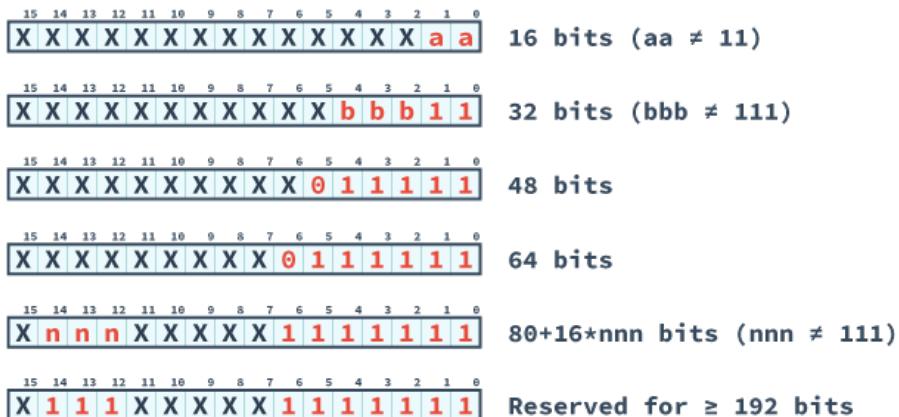


Figura 2.2: Codificação de instruções de tamanho variável da arquitetura *RISC-V*

2.1.6.1 Extensão de Registradores de Controle e Estado

A extensão **Zicsr** implementa o banco de *Control and Status Registers (CSRs)* e as instruções para acessá-los. Esses registradores contemplam um relógio de tempo real (*RTC*), contadores de instruções processadas e *ticks* do *clock*, além de habilitar/desabilitar funcionalidades do processador e checar seu estado.

2.1.6.2 Extensão de Multiplicação e Divisão

As operações aritméticas de multiplicação, divisão e resto são implementadas pela extensão **M**.

2.1.6.3 Extensões de Ponto Flutuante

A extensão **F** implementa instruções de ponto flutuante *IEEE 754 - 2008* de precisão simples que adiciona no processador um banco de 32 registradores de 32 *bits* usado para suas operações e um *CSR* para controlar o modo de arredondamento e identificar anormalidades na execução de uma instrução e.g. divisão por zero.

Suas instruções contemplam *load/store* no banco de registradores de ponto flutuante, transferência de dados entre os registradores de ponto flutuante e os de números inteiros (com ou sem conversão para inteiro), operações aritméticas e comparações.

A extensão **D** requer a implementação da extensão **F** e adiciona suporte para operações de ponto flutuante de precisão dupla, aumentando a largura do banco de registradores de ponto flutuante para 64 *bits*. Há ainda a extensão **Q** para operações de ponto flutuante com precisão quádrupla, que depende da extensão **D** estar implementada e extende a largura do banco de registradores de ponto flutuante para 128 *bits*.

2.1.6.4 Extensões A e Zifencei

A extensão **A** implementa instruções de acesso atômico a memória, enquanto a extensão **Zifencei** implementa *fencing* para escrita e leitura da memória de instruções em um *hart*.

2.1.6.5 Nomenclatura do processador implementado

A nomenclatura de um processador *RISC-V* segue a seguinte estrutura: as letras **RV** seguidas da largura do banco de registradores (**32/64**), da letra do módulo base (**I/E**), conforme visto na Seção 2.1.6, e em seguida as outras extensões implementadas.

As extensões **M**, **A**, **F**, **D**, **Zicsr** e **Zifencei** utilizadas com o módulo **I** constituem um conjunto considerado um alvo razoável para o desenvolvimento de um processador de uso geral. Pela convenção de nomenclatura, um processador de 64 *bits* com essa implementação se chamará **RV64IMAFDZicsr_Zifencei**. Para uma melhor apresentação, o conjunto **IMAFD-Zicsr_Zifencei** pode ser abreviado para **G** (de *General-purpose*). Assim, o processador descrito pode ser chamado de **RV64G**.

2.1.6.6 Outras Extensões

Existem propostas de adição de algumas extensões na especificação da *ISA*, como a **B** para manipulação de **Bits** e a **V** para operar **Vetores**, mas ainda não foram ratificadas.

Há também a possibilidade de se desenvolver extensões próprias. A regra de nomenclatura para esse caso é iniciar o nome da extensão com um **X** seguido por um nome alfabético e.g. **Xhwacha**.

2.1.6.7 Arquitetura Privilegiada

Para a *ISA RISC-V*, existem quatro níveis de privilégio de acesso, sendo eles: o de máquina (nível *bare-metal* que em implementações mais simples trata *syscalls*), o de usuário (o nível onde a aplicação do usuário é executada), o de supervisor (nível do sistema operacional) e o de hipervisor (virtualização).

O nível privilegiado de máquina adiciona alguns *CSRs* importantes como o `misa` (*Machine ISA register*), que indica as capacidades do processador como largura dos registradores e extensões implementadas codificados em *bit fields*, o `mstatus` que controla o estado operacional do *hart* como a habilitação de interrupções, o `mtvec` que contém o endereço de memória do tratamento de *traps*, o `mepc` que guarda o endereço de memória onde uma instrução causou uma exceção e o `mcause` que indica a causa da exceção.

2.1.6.8 Formatos de Instruções

As instruções da arquitetura podem ser separadas em subgrupos de acordo com os operadores necessários para o processador interpretá-la. A Figura 2.3 apresenta os formatos das instruções do módulo I da *ISA RISC-V*, e, para efeitos de comparação, a Figura 2.4 mostra os formatos de instruções equivalentes na arquitetura *MIPS32*.

Apesar dos formatos das instruções da *RISC-V* serem mais complicados que os da *MIPS32* do ponto de vista de um humano, para uma máquina eles são muito mais eficientes. Os campos do `opcode`, do `funct3`, dos registradores `rs1`, `rs2` e `rd`, e alguns bits dos imediatos `imm` sempre se encontram na mesma posição na instrução. Isso reduz a complexidade dos multiplexadores de geração de imediatos e da lógica de decodificação da instrução. Além disso, por utilizar imediatos de 12 bits (ou 20 no caso das instruções do tipo **U**) em vez de imediatos de 16 bits (ou 28 nas instruções do tipo **J**), a *ISA RISC-V* possui mais *bits* disponíveis para codificar mais instruções.

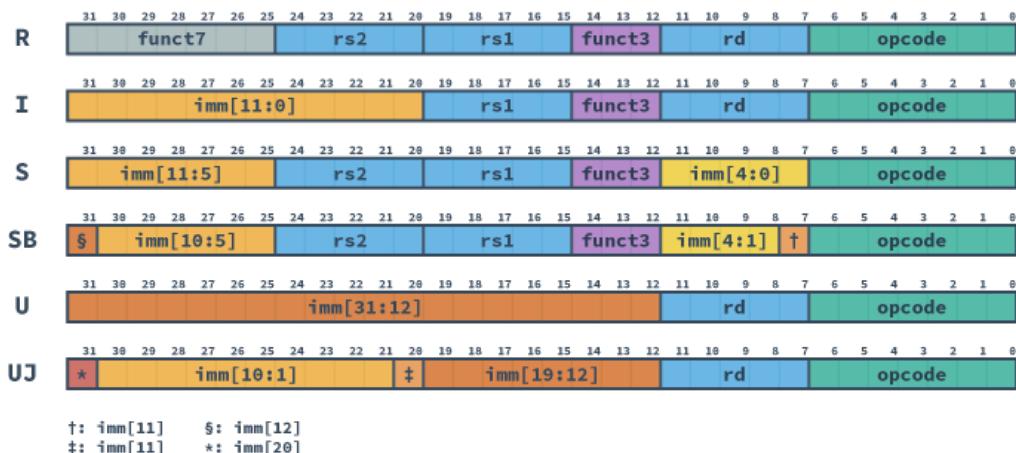


Figura 2.3: Formatos de Instruções da *ISA RISC-V*

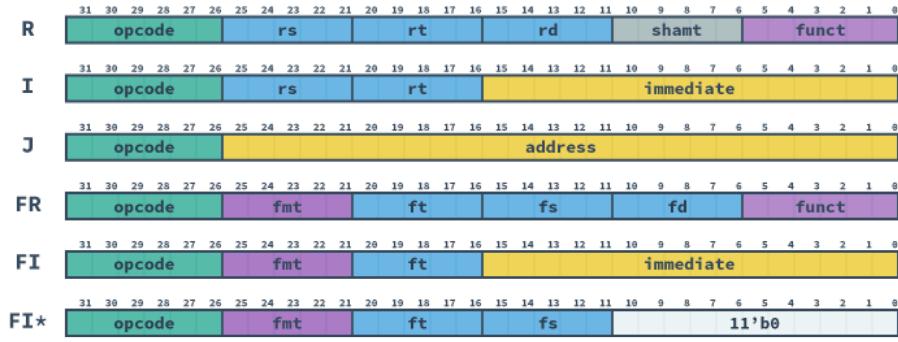


Figura 2.4: Formatos de Instruções da *ISA MIPS32*

2.1.6.9 Formatos de Imediatos

Os imediatos são operandos descritos na própria instrução em vez de estarem contidos em um registrador. Como os operandos necessitam ter a mesma largura que o banco de registradores, algumas regras são utilizadas para gerar os imediatos. As figuras a seguir mostram a formação de cada tipo de imediato dos formatos das instruções apresentadas na Figura 2.3.

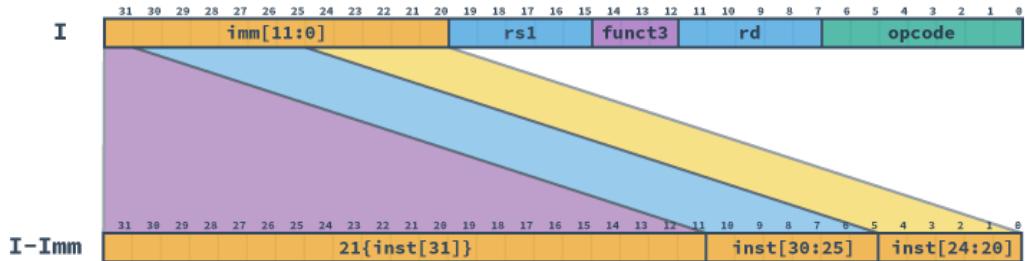


Figura 2.5: Formação do Immediato de tipo I

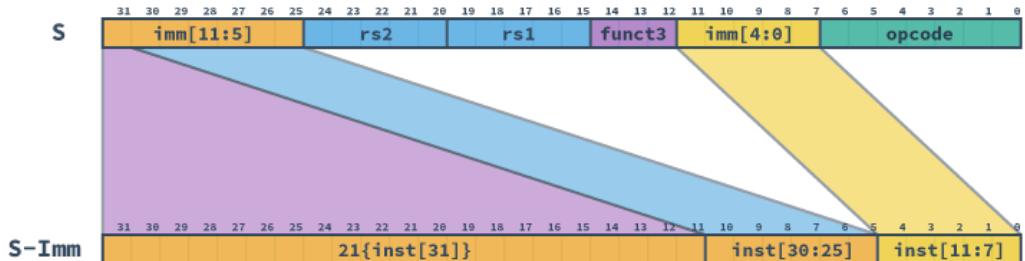


Figura 2.6: Formação do Immediato de tipo S

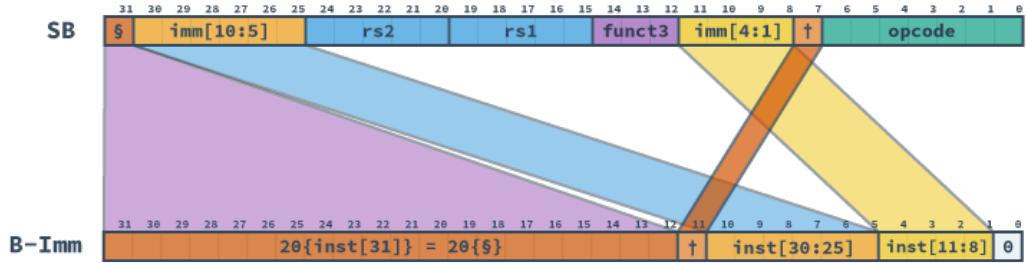


Figura 2.7: Formação do Imediato de tipo B

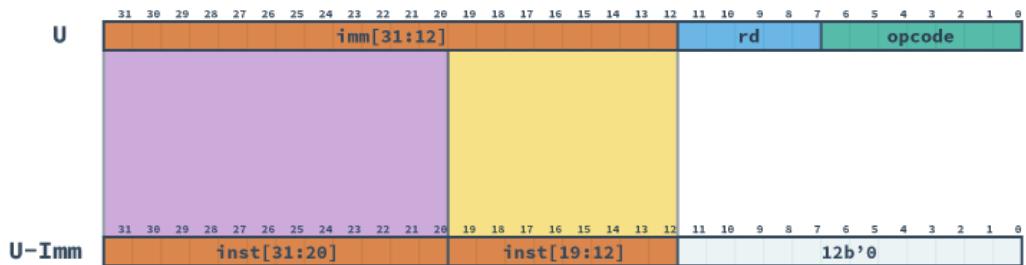


Figura 2.8: Formação do Imediato de tipo U

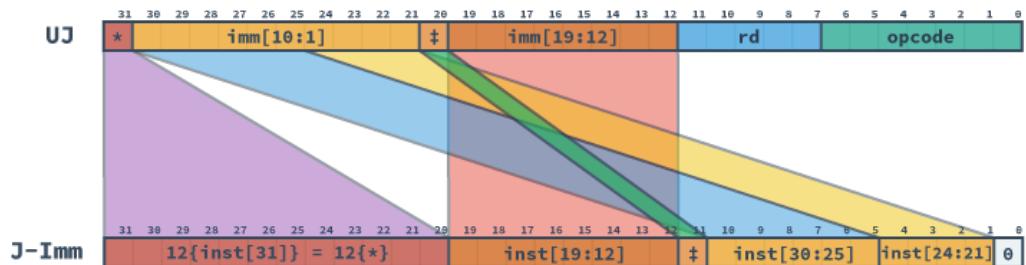


Figura 2.9: Formação do Imediato de tipo J

2.2 Microarquiteturas

2.2.1 Uniciclo

2.2.2 Multiciclo

2.2.3 Pipeline

2.3 Representação de Hardware

2.3.1 VHDL

2.3.2 Verilog

2.4 Síntese Lógica

2.4.1 Análise e Síntese

2.4.2 Fitting

2.4.3 Timing Analyzer

2.5 Field Programmable Gate Arrays

Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) são circuitos integrados que permitem o desenvolvimento de circuitos lógicos reconfiguráveis. Por serem reprogramáveis, as *FPGAs* geram uma grande economia em tempo de desenvolvimento e em custos como os de prototipagem, validação e manufatura do projeto em relação aos circuitos de aplicações específicas, os *ASICs*, e aos projetos *full-custom*. As *FPGAs* podem ser tanto o passo intermediário no projeto de um *ASIC* ou *full-custom* quanto o meio final do projeto quando a reconfigurabilidade e os preços muito mais acessíveis forem fatores importantes.

Cada fabricante de *FPGAs* possui seu *software* de desenvolvimento, ou *SDKs*. A indústria de *hardware* é extremamente protecionista com sua propriedade intelectual (tanto que os *designs* de módulos ou circuitos completos são chamados de *IPs*, termo derivado de *Intellectual Property*), sendo a maioria dessas ferramentas de código proprietário. Para a Intel Altera, essa plataforma é o Quartus Prime.

FPGAs mais modernas possuem, além do arranjo de portas lógicas, blocos de memória, *Phase-Locked Loops (PLLs)*, *Digital Signal Processors (DSPs)* e *System on Chips (SoCs)*. Os blocos de memória internos funcionam como a memória *cache* de um microprocessador, armazenando os dados próximo ao seu local de processamento para diminuir a latência. Os *PLLs* permitem criar sinais de *clock* com diversas frequências a partir de um relógio de referência, e podem ser recon-

figurados a tempo de execução. *DSPs* são responsáveis pelo processamento de sinais analógicos discretizados, e podem ser utilizados como multiplicadores de baixa latência. Já os *SoCs* são microprocessadores como os ARM presentes em celulares, e são capazes de executar sistemas operacionais como o Linux.

Além de disponíveis na forma de *chips* para a integração com placas de circuito impresso customizadas (*PCBs*), as *FPGAs* possuem *kits* de desenvolvimento com diversos periféricos para auxiliar no processo de criação de soluções. Esses *kits* são a principal ferramenta de aprendizagem no universo dos circuitos reconfiguráveis. No Laboratório de Informática da UnB, as placas *terasIC DE1-SoC* com a *FPGA Intel Cyclone V SoC* estão disponíveis para os alunos de OAC desenvolverem seus projetos.

2.5.1 Arquitetura Generalizada de uma FPGA

De forma genérica, uma *FPGA* possui blocos lógicos, chaves de interconexão, blocos de conexão direta e portas de entrada e saída, conforme apresentado na Figura 2.10.

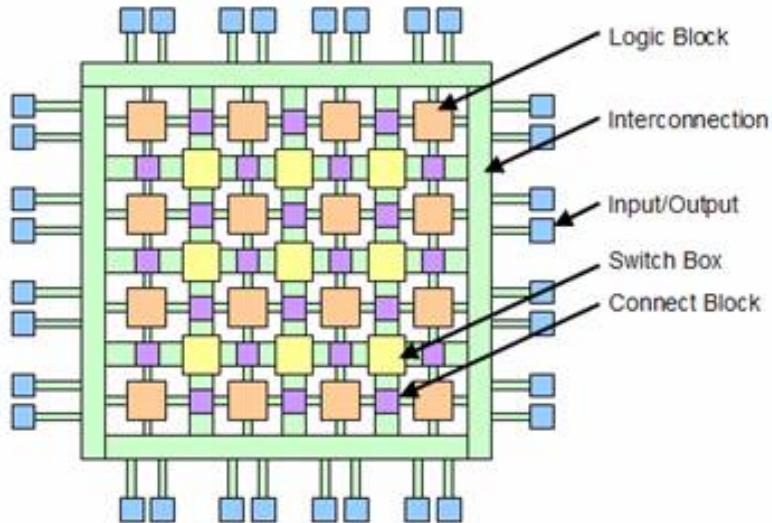


Figura 2.10: Abstração da arquitetura de uma FPGA. Fonte: [15]

Os blocos lógicos possuem *lookup tables*, registradores, somadores e multiplexadores. É neles que a lógica reconfigurável é implementada. Já as chaves de interconexão são responsáveis por conectar os diversos blocos lógicos da *FPGA*. A Figura 2.11 exemplifica como é feito o roteamento da malha de interconexão. Os blocos de conexão direta são um tipo especial de chave de interconexão, e sua função é ligar blocos lógicos adjacentes. Por fim, as portas de entrada e saída conectam a *FPGA* ao “mundo externo” e.g. *drivers* de áudio e vídeo.

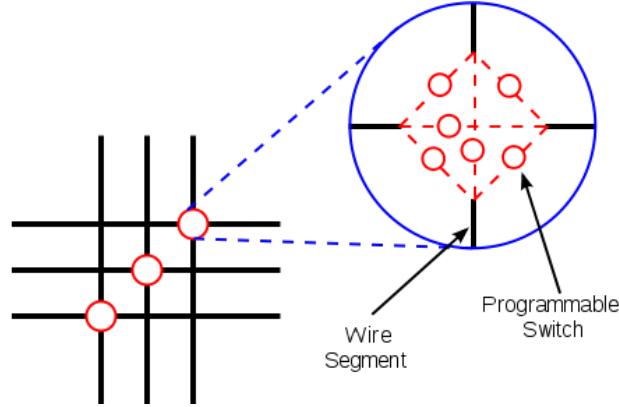


Figura 2.11: Funcionamento da chave de interconexão. Fonte: [16]

2.5.2 Arquitetura da FPGA Cyclone V SoC

A Figura 2.12 apresenta a arquitetura da *FPGA Cyclone V SoC*. O *chip* possui um processador *ARM* integrado, blocos de memória embutidos, *DSPs* para acelerar operações como multiplicação de números ou processamento de sinais genéricos, diversos pinos para integrar o *chip* a um projeto de circuito mais complexo, *PLLs* para gerar diversos sinais de *clock*, entre outras funcionalidades.

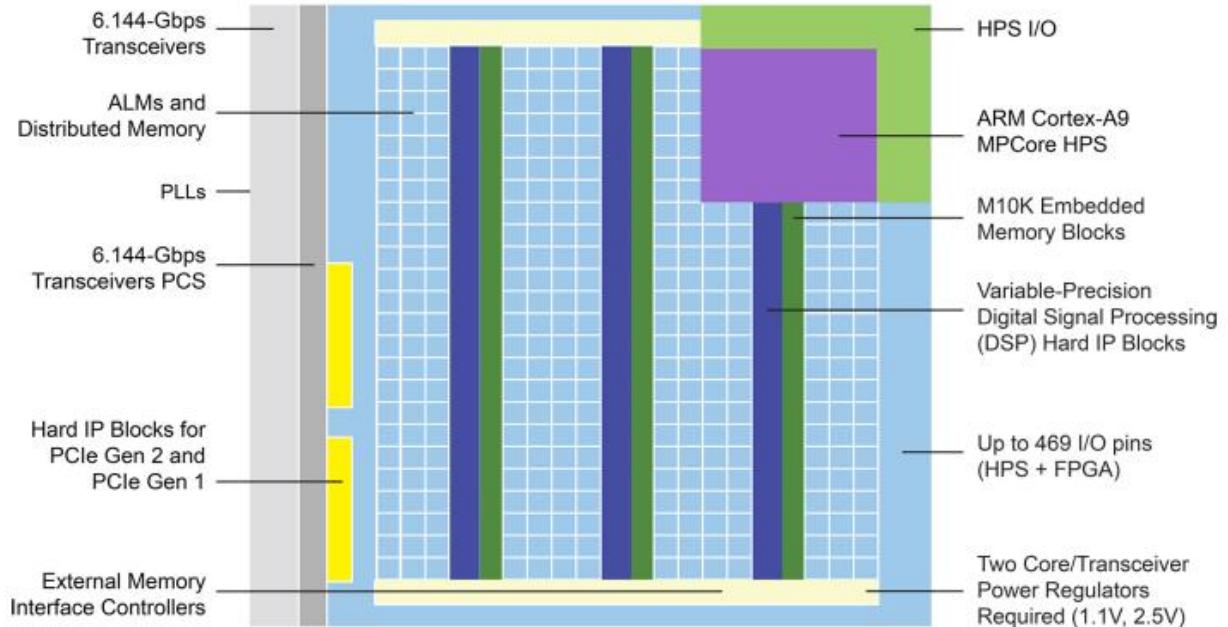


Figura 2.12: Arquitetura da *FPGA Altera Cyclone V SoC*. Fonte: [17]

2.5.2.1 Adaptative Logic Modules

Os blocos lógicos, como mostrados na abstração da Figura 2.10 são implementados na *FPGA Cyclone V SoC* como *Adaptative Logic Modules*, conforme a Figura 2.13. Como os *ALMs* são

blocos genéricos, há um *trade-off* entre configurabilidade e performance.

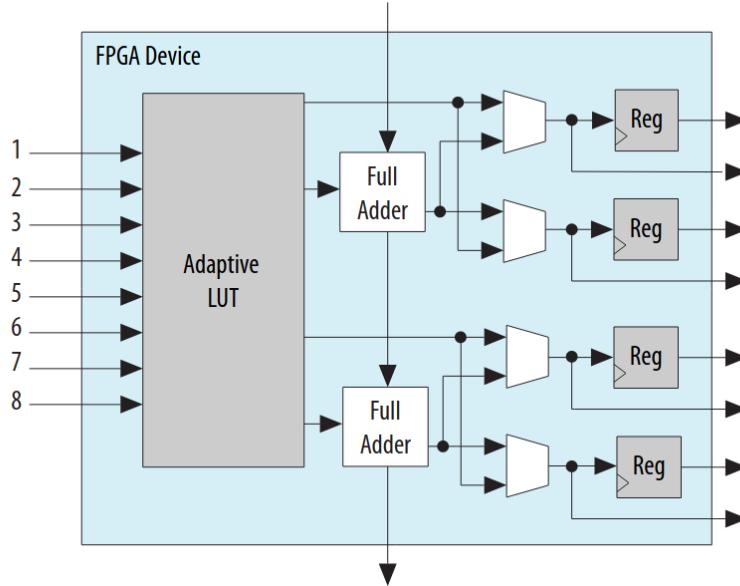


Figura 2.13: Diagrama de blocos de um ALM. Fonte: [18]

2.5.2.2 Embedded Memory Blocks

Como mostrado na Figura 2.12, existem blocos de memória embutidos na *FPGA*. Esses blocos são o equivalente a uma memória *cache L1*, sendo a camada de memória mais próxima dos registradores. Para utilizá-los no *design* do circuito, blocos do *IP* de memória são configurados e instanciados pelo programa de desenvolvimento para gerar um módulo integrável no resto do *design*.

As placas de desenvolvimento podem possuir outros tipos de memória, como as *SRAM* e *DRAM*. Apesar de possuírem capacidade de armazenamento bem maiores que os blocos embutidos, seus módulos controladores são mais complexos e apresentam latência maior para leitura e escrita de dados. Para seu uso eficiente, é necessário implementar camadas de *caching* para que as operações de *input* e *output* (*IO*) não se tornem um gargalo que comprometa o resto do *design*.

2.6 RARS - IDE para programar e simular *assembly RISC-V*

2.7 Estado da Arte dos processadores RISC-V

Por alguns anos, processadores com arquitetura *RISC-V* só podiam ser utilizados por meio de emuladores como o *qemu* [19] ou em *FPGAs*. Diversos *soft-cores open source*, tanto experimentais (como o desenvolvido neste trabalho) quanto de alto desempenho podem ser encontrados na *internet* e utilizados por qualquer pessoa interessada. Um dos processadores alto desempenho disponíveis é o *BOOM* [20], processador com execução *Out of Order* desenvolvido na universidade

americana *UC Berkeley* pelo mesmo departamento onde surgiu a arquitetura *RISC-V*, o *Berkeley Architecture Research* [21]. O processador pode ser sintetizado em instâncias *EC2 F1* da *AWS* [22], eliminando a necessidade de possuir uma *FPGA* de alto desempenho para usufruir do projeto.

Outro projeto *open source* notável é o *Shakti* [23], ecossistema desenvolvido na universidade indiana *IIT-Madras* com diversas implementações para os mais diversos usos, que variam desde microcontroladores de 32 *bits*, superescalares de 64 *bits* para aplicação em *desktops* e servidores até processadores de alta performance com mais de 32 *cores* [24].

Porém, a presença apenas de *soft-cores* limita as possíveis aplicações da arquitetura. Algumas fabricantes já divulgaram planos para começar a usar microcontroladores com a arquitetura em seus produtos, como é o caso dos controladores de discos rígidos e *SSDs* da *Western Digital* [25] e da *Nvidia* como o substituto dos controladores *Falcon* de suas placas de vídeo [26]. Ainda não se sabe se as empresas já utilizam os controladores em seus *hardwares*, se a adoção ainda está em fase de projeto ou se a ideia foi abandonada.

Porém, começam a surgir no mercado microcontroladores e *Single Board Computers (SBCs)* com preços acessíveis. Placas como a linha *Sipeed* da *Seed* se equiparam aos *MCUs ESP32* [27], e outras como a *SiFive HiFive1* se assemelham aos *arduinoss* [28].

Há uma expectativa de *SBCs* mais robustos, capazes de rodar um sistema operacional de uso geral, como um *Raspberry Pi*. Existem alguns pré-lançamentos de placas para atender essa demanda, como a *SiFive HiFive Unmatched* [29] e a *BeagleV* [30].

A empresa *SiFive*, liderada pelos criadores da arquitetura, produzirá em parceria com a *TSMC* (*Taiwan Semiconductor Manufacturing Company*) o primeiro processador *RISC-V* de 32 *bits* em tecnologia de 5nm [31]. A *TSMC* é a *foundry* líder em manufatura de circuitos integrados no mundo.

Atualmente, compilar códigos em *C/C++* para *targets RISC-V* não envolve mais a instalação de *toolchains* complicadas e frágeis. Tanto o *gcc* [32] quanto o *clang* [33] já oferecem suporte para o *RISC-V*, eliminando assim uma barreira para a adoção da arquitetura.

Uma outra característica essencial para o uso do *RISC-V* em sistemas de uso geral é a existência de sistemas operacionais que funcionem na plataforma. Desde a versão 4.15, o *kernel* do *linux* oferece suporte para a arquitetura [34]. *Distros* como *Fedoras* [35], e *Alpine* [36] já possuem suporte experimental. A chinesa *Alibaba* fez o *port* do *OS Android* para um de seus *SoCs RISC-V* [37]. Alguns ecossistemas mais robustos possuem *ports* completos, como é o caso do *Haiku-OS* [38] e do *microkernel seL4* [39], possibilitando o uso em ambientes industriais e áreas que exigem maior robustez do sistema operacional.

Uma das surpresas na adoção da arquitetura *RISC-V* nos seus *designs* veio da *MIPS Technologies*, detentora das patentes das arquiteturas *MIPS*. Em 2013, a empresa foi adquirida pela *Imagination Technologies* [40], e lançou alguns *development kits* voltados a visão computacional e microcontroladores, mas não conseguiu dar tração aos projetos. Em 2017 a companhia foi novamente vendida para a *Tailwood Venture Capital* [41], que tentou capitalizar em cima dos *royalties* da arquitetura. Porém, em 2018 a companhia foi vendida novamente para a *Wave Computing* [42],

companhia voltada para aplicações de inteligência artificial. Em 2020, a *Wave Computing* declara falência [10], demitindo todos os seus funcionários. Em março desse ano, a empresa conseguiu se recuperar da falência, mudou o nome da companhia para *MIPS* e anunciou que seus novos *designs* serão baseados na arquitetura *RISC-V* [43]. Atualmente, a empresa *MIPS* integra a *RISC-V Foundation* como Membro Estratégico.

2.8 Observações finais da Revisão Teórica

O capítulo abordou os conceitos que formam o alicerce do trabalho. O capítulo seguinte apresentará a proposta do projeto, descrevendo sua implementação e documentando o processo de execução e modificação do produto final a fim de permitir sua reprodução e reuso.

Capítulo 3

Sistema Proposto

O sistema proposto consiste em um *soft-core* da *ISA RISC-V* de 32 bits com as extensões **I**, **M** e **F**, podendo ser sintetizado nas versões *RV32I*, *RV32IM* ou *RV32IMF*. A extensão *Zicsr* com os Registradores de Controle e Estado (*CSR*) é parcialmente implementada em todas as três configurações.

Cada uma das combinações da *ISA* pode ser realizada em três microarquiteturas diferentes: uniciclo, multiciclo ou *pipeline* de cinco estágios. Assim, o processador pode ser sintetizado em nove combinações diferentes.

O projeto utiliza a placa de desenvolvimento *terasIC DE1-SoC* contendo diversos periféricos e um *SoC Intel Altera Cyclone-V*. A maioria dos periféricos presentes na plataforma tem controladores implementados com Entradas e Saídas Mapeadas em Memória (*MMIO*) para que o *soft-core* possa utilizá-los. A síntese dos controladores dos periféricos, como a saída de vídeo, entrada de teclado e barramento *RS-232*, é opcional.

3.1 Organização do projeto

O projeto é organizado seguindo o seguinte arranjo de pastas:

core	(arquivos que implementam o soft-core)
clock	(arquivos de interface e controle de sinais de clock do processador)
memory	(arquivos de interface/controle de memória)
misc	(módulos como somador e multiplexador de largura definidas por parâmetros)
peripherals	(interfaces e controladores para os periféricos da FPGA)
risc_v	(projeto do processador RISC-V)
CPU.v	(arquivo top-level do processador)
Control_*.v	(módulos de controle de cada microarquitetura)

<pre> └── Datapath_*.v └── ... └── config.v └── default_data.mif └── default_framebuffer.mif └── default_text.mif └── fpga_top.sdc └── fpga_top.v </pre>	<p>(módulos do caminho de dados de cada <code>param</code>) (demais módulos do processador)</p> <p>(arquivo de configuração de versão do processador a implementar, seus periféricos e endereçamento de memória das interfaces MMIO)</p> <p>(arquivo de inicialização de memória de dados usado na síntese do projeto)</p> <p>(arquivo de inicialização de memória de vídeo usada na síntese do projeto)</p> <p>(arquivo de inicialização de memória de texto usado na síntese do projeto)</p> <p>(restrições desejadas de temporização do sistema sintetizado)</p> <p>(interface verilog entre o soft-core e a placa de desenvolvimento)</p>
<pre> └── doc └── project └── de1_soc ├── db ├── incremental_db ├── output_files ├── fpga_top.qpf ├── fpga_top.qsf └── ... </pre>	<p>(documentação e guias do projeto)</p> <p>(arquivos de projeto do Quartus)</p> <p>(arquivos de saída intermediários do Quartus; pasta ignorada pelo git)</p> <p>(arquivos de saída intermediários do Quartus; pasta ignorada pelo git)</p> <p>(arquivos de saída do Quartus; os logs de síntese gerados pelo script "make.sh" ficam aqui, bem como o .sof da última síntese completa; ignorada pelo git)</p> <p>(arquivo de projeto do Quartus indicando a versão do projeto)</p> <p>(arquivo de projeto do Quartus contendo as configurações do projeto)</p> <p>(outros arquivos de projeto do Quartus)</p> <p>(outros modelos de FPGA)</p>
<pre> └── system </pre>	<p>(códigos em assembly RISC-V implementando as chamadas de sistema e macros)</p>
<pre> └── test ├── assembly_testbench └── gtkwave </pre>	<p>(códigos em assembly RISC-V para testar o funcionamento correto das instruções do processador)</p> <p>(formas de onda predefinidas para visualizar os arquivos .vcd gerados pelo ModelSim usando o GTKwave)</p>

```

    └── mif_library      (testbenches assembly compilados para o
                           formato .mif para gravação na memória
                           da FPGA)
    └── simulation       (arquivos de saída da simulação pelo
                           ModelSim; pasta ignorada pelo git)
    └── simulation_scripts (scripts .do para que o ModelSim simule o
                           sistema corretamente)
    └── sof_library      (arquivos .sof das versões do processador
                           prontos para gravação na FPGA)
    └── verilog_testbench (testbench usado para simular as entradas
                           da FPGA, inicializá-la e definir o
                           tempo de simulação)
    └── tools
        └── bitmap_converter (conversor de imagens para uso na FPGA)
        └── rars              (montador e simulador de assembly RISC-V)
    └── vendor
        └── ...
    └── LICENSE           (licença do sistema implementado)
    └── make.sh            (script para síntese e simulação de todas
                           as variantes do processador)
    └── README.md          (README sobre o que é o projeto e como
                           utilizá-lo)

```

O trabalho também é organizado de forma a facilitar a migração para placas de desenvolvimento diferentes da *DE1-SoC* ou trocar o *soft-core* desenvolvido por outra implementação, independente da sua *ISA*. O *soft-core* implementado se encontra no caminho `core/risc_v`. Assim, os demais módulos presentes na pasta `core` não dependem da arquitetura do processador, exceto a tela de *debug* presente na interface de vídeo. No entanto, a tela de *debug* foi projetada de modo a ser relativamente fácil customizá-la para uso em outra arquitetura.

O arquivo `core/config.v` possui todas as opções de configuração, definição de parâmetros e endereçamento de memória dos módulos, facilitando escolher as extensões, microarquitetura e periféricos sintetizados.



Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema.

3.2 Implementação dos *soft-cores*

Todos os *soft-cores* implementados possuem execução em ordem, sem *branch prediction*, sem *caching* de memória e sem *Return Address Stack*. O processador é escalar e possui um único *hart*. Como a implementação atual só utiliza blocos de memória presentes no chip da FPGA, sem utilizar as memórias *SRAM* e *DRAM* externas presentes na placa de desenvolvimento, e também não faz uso de memória secundária, as operações de *load* e *store* transferem dados diretamente entre os registradores e os blocos de memória *M10K*.

3.2.1 Microarquitetura Uniciclo

Os processadores uniciclo com extensões I e IM são implementados conforme o diagrama da Figura 3.2. O módulo de controle é implementado somente com lógica combinacional, e a frequência máxima de operação é limitada pela instrução mais lenta do processador.

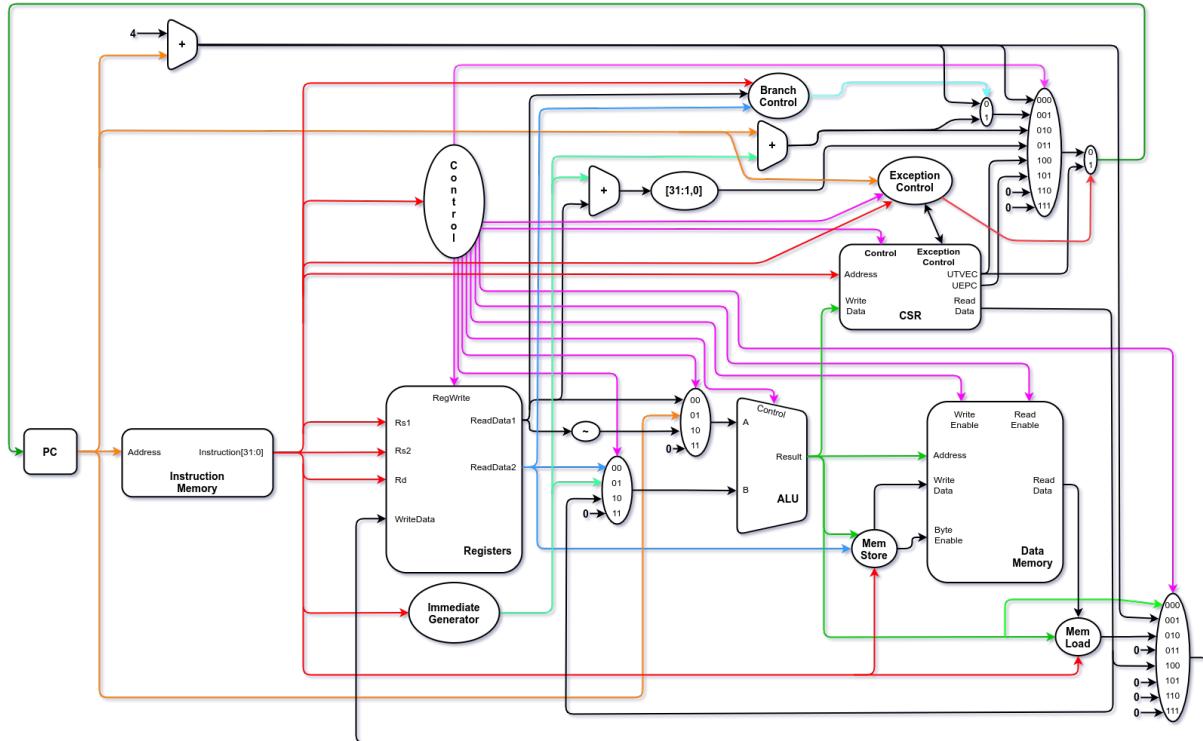


Figura 3.2: Diagrama da implementação das *ISAs* RV32I e RV32IM na microarquitetura uniciclo.

O processador uniciclo com extensão IMF é implementado conforme o diagrama da Figura 3.3. A unidade lógica e aritmética de ponto flutuante utiliza uma frequência de *clock* maior que a do resto do processador, e é o único módulo da implementação uniciclo que utiliza mais de um ciclo de relógio para realizar sua operação. A frequência máxima de operação do *clock* principal do processador continua limitada pela operação mais lenta.

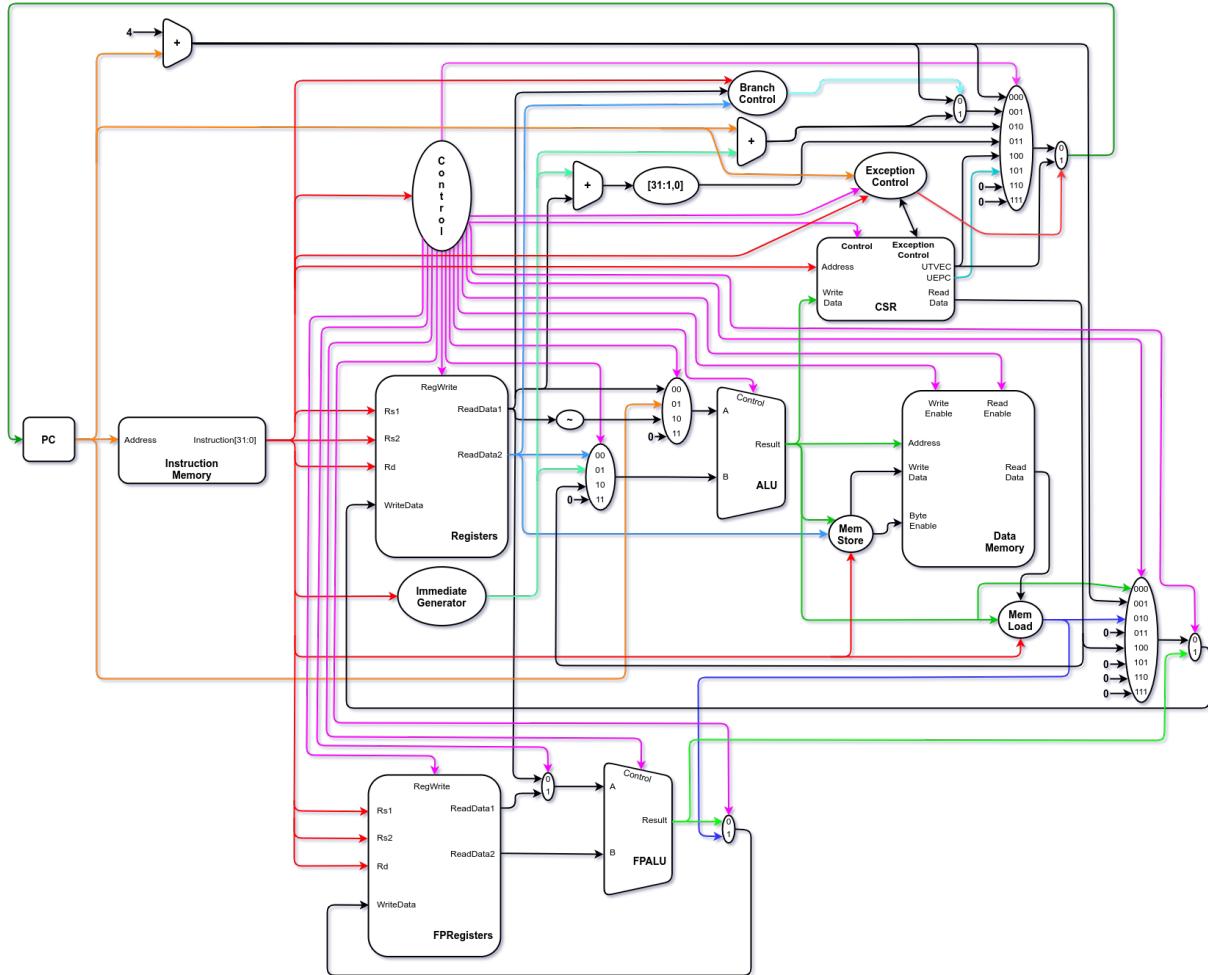


Figura 3.3: Diagrama da implementação da ISA RV32IMF na microarquitetura uniciclo.

3.2.2 Microarquitetura Multiciclo

Os processadores multiciclo com extensões I e IM são implementados conforme o diagrama da Figura 3.4. A unidade de controle é implementada utilizando microcódigo para executar as instruções. Com isso, a frequência de operação do processador depende da operação mais lenta do microcódigo, e não da execução da instrução completa.

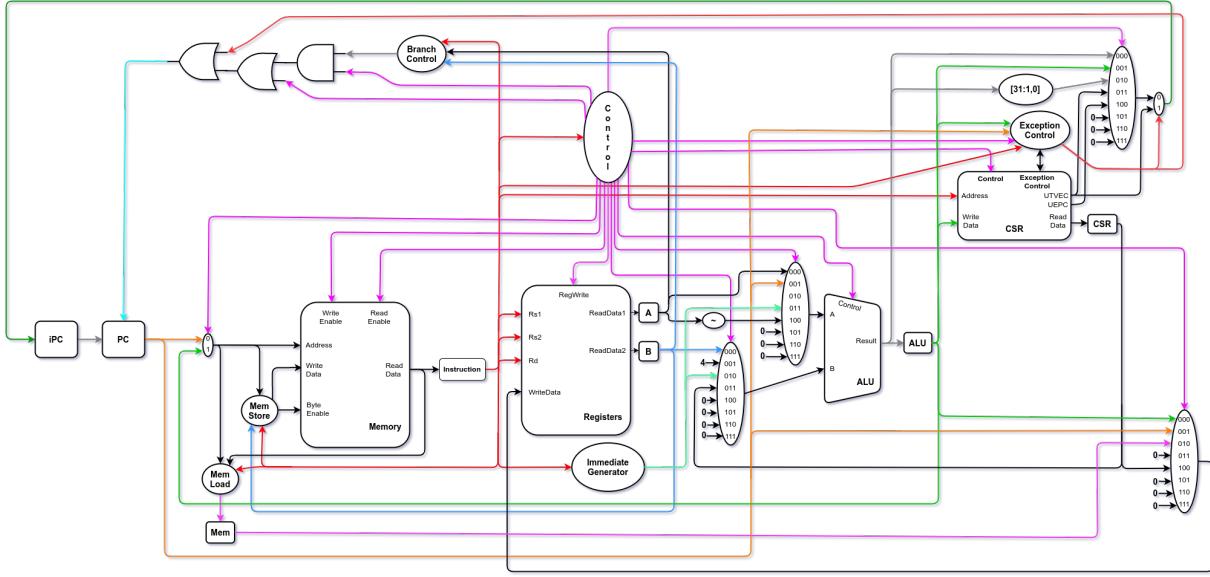


Figura 3.4: Diagrama da implementação das *ISAs* RV32I e RV32IM na microarquitetura multiciclo.

O processador multiciclo com extensões IMF é implementado conforme o diagrama da Figura 3.5. A unidade lógica e aritmética de ponto flutuante utiliza uma frequência de *clock* mais alta que a do resto do processador, e possui um sinal de *ready* que causa o *stall* do clock principal do processador enquanto a operação de ponto flutuante não completa. Assim, a frequência do *clock* do processador é variável, já que em operações de ponto flutuante o ciclo do relógio é mais longo que em outras operações.

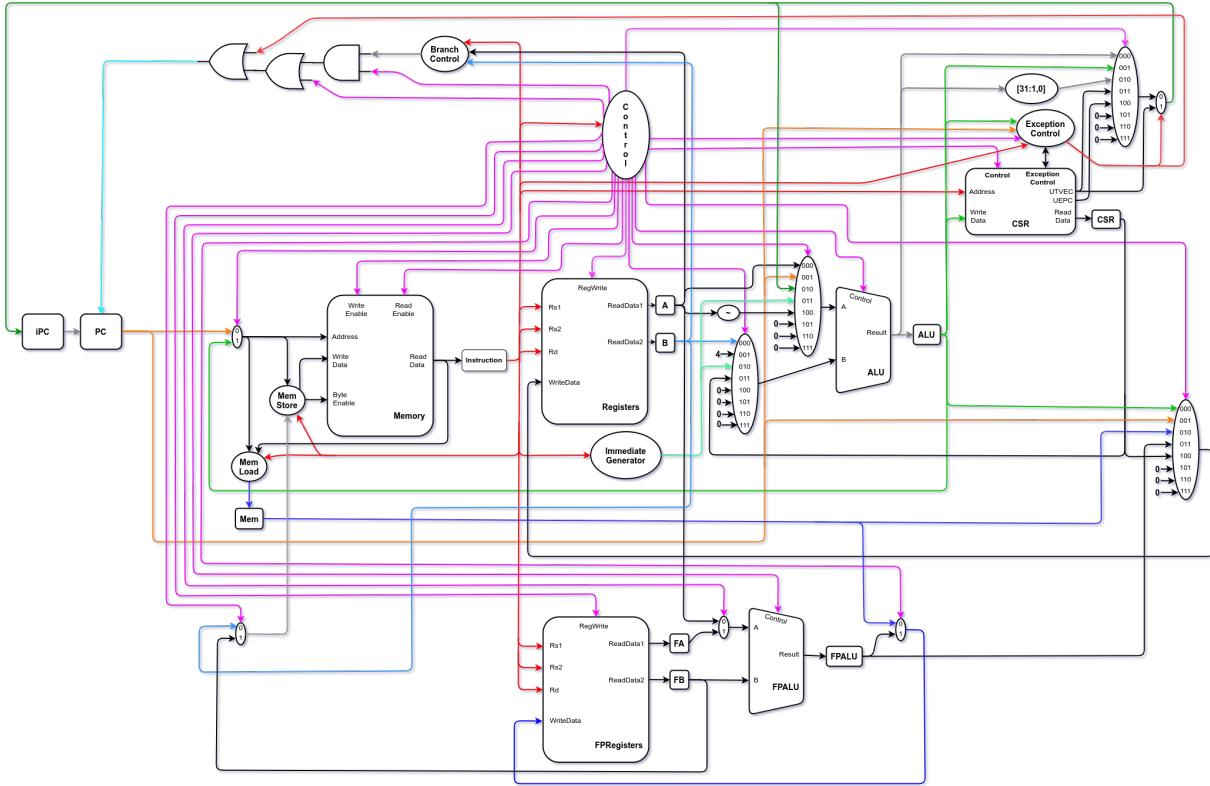


Figura 3.5: Diagrama da implementação da ISA RV32IMF na microarquitetura multiciclo.

3.2.3 Microarquitetura *Pipeline* de 5 Estágios

Os processadores *pipeline* com extensões I e IM são implementados conforme o diagrama da Figura 3.6. Seus cinco estágios são:

1. *Instruction Fetch*
2. *Instruction Decode*
3. *Execution*
4. *Memory Stage*
5. *Write Back*

A frequência máxima do seu *clock* é limitada pela operação mais lenta da unidade lógica e aritmética na terceira etapa do *pipeline*.



Figura 3.6: Diagrama da implementação das *ISAs* RV32I e RV32IM na microarquitetura *pipeline* de 5 estágios.

O processador *pipeline* com extensões IMF é implementado conforme o diagrama da Figura 3.7.



Figura 3.7: Diagrama da implementação da *ISA* RV32IMF na microarquitetura *pipeline* de 5 estágios.

3.3 Chamadas de sistema

A pasta `system` contém a implementação das chamadas de sistema do processador. O código *assembly* deve incluir o arquivo `system/MACROSV21.s` no início do programa e o arquivo `system/SYSTEMv21.s` ao final do programa.

```
# Inicio do programa
.include "MACROSV21.s"

# Dados do programa
.data
...

# Instrucoes do programa
.text
...

# Chamadas de sistema
.include "SYSTEMv21.s"
```

O arquivo `MACROSV21.s` insere macros para testar se o programa está sendo executado no Rars ou na FPGA ou no ModelSim para decidir o uso de determinadas *syscalls*, e também fornece a implementação por *software* de algumas instruções caso a extensão necessária não esteja implementada no processador.

Os endereços de memória dos periféricos acessados por *MMIO* também estão presentes como definições `.eqv` a fim de facilitar a implementação do programa. Por fim, o endereço inicial do nível privilegiado do sistema é gravado no *CSR UTVEC* e as interrupções são ativadas. Como o processador implementado não possui memória reservada para o *kernel*, a posição inicial de memória varia de acordo com o tamanho do programa implementado.

Já o arquivo `SYSTEMV21.s` implementa o *kernel* do sistema, tratando exceções e executando as *syscalls*. As chamadas de sistema implementadas são apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Tabela de *syscalls* implementadas.

<i>syscall</i>	a7	Argumentos	Operação
Print Integer	1 ou 101	a0 = inteiro a1 = coluna a2 = linha a3 = cores a4 = frame	Imprime no <i>frame</i> a4 o número inteiro a0 (complemento de 2) na posição (a1,a2) com as cores a3[7:0] de <i>foreground</i> e a3[15:8] de <i>background</i> .
Print Float	2 ou 102	fa0 = float a1 = coluna a2 = linha a3 = cores a4 = frame	Imprime no <i>frame</i> a4 o número de ponto flutuante fa0 na posição (a1,a2) com as cores a3[7:0] de <i>foreground</i> e a3[15:8] de <i>background</i> .
Print String	4 ou 104	a0 = endereço da string a1 = coluna a2 = linha a3 = cores a4 = frame	Imprime no <i>frame</i> a4 a <i>string</i> iniciada no endereço a0 e terminada em <i>NULL</i> na posição (a1,a2) com as cores a3[7:0] de <i>foreground</i> e a3[15:8] de <i>background</i> .
Read Int	5 ou 105		Retorna em a0 o valor do inteiro em complemento de 2 lido do teclado.
Read Float	6 ou 106		Retorna em a0 o valor do <i>float</i> com precisão simples lido do teclado.
Read String	8 ou 108	a0 = endereço do buffer a1 = número máximo de caracteres	Escreve no <i>buffer</i> iniciado em a0 os caracteres lidos, terminando com um caractere <i>NULL</i> .

<i>syscall</i>	a7	Argumentos	Operação
Exit	10 ou 110		Retorna ao sistema operacional. Na <i>DE1-SoC</i> , trava o processador.
Print Char	11 ou 111	a0 = char ASCII a1 = coluna a2 = linha a3 = cores a4 = frame	Imprime no <i>frame</i> a4 o caracter a0 na posição (a1,a2) com as cores a3[7:0] de <i>foreground</i> e a3[15:8] de <i>background</i> .
Read Char	12 ou 112		Retorna em a0 o valor ASCII do caracter lido do teclado.
Time	30 ou 130		Retorna o tempo do sistema em <i>ms</i> , com os 32 <i>bits</i> menos significativos em a0 e os 32 <i>bits</i> mais significativos em a1.
MIDI Out Assíncrono	31 ou 131	a0 = pitch a1 = duração (<i>ms</i>) a2 = instrumento a3 = volume	Gera o som definido e retorna imediatamente.
Sleep	32 ou 132	a0 = duração (<i>ms</i>)	Coloca o processador em <i>sleep</i> por a1 <i>ms</i> .
MIDI Out Síncrono	33 ou 133	a0 = pitch a1 = duração (<i>ms</i>) a2 = instrumento a3 = volume	Gera o som definido e retorna após o término da execução da nota.
Print Integer	34 ou 134	a0 = inteiro a1 = coluna a2 = linha a3 = cores a4 = frame	Imprime no <i>frame</i> a4 o número inteiro a0 em formato hexadecimal na posição (a1,a2) com as cores a3[7:0] de <i>foreground</i> e a3[15:8] de <i>background</i> .
Print Integer Unsigned	36 ou 136	a0 = inteiro a1 = coluna a2 = linha a3 = cores a4 = frame	Imprime no <i>frame</i> a4 o número inteiro a0 sem sinal na posição (a1,a2) com as cores a3[7:0] de <i>foreground</i> e a3[15:8] de <i>background</i> .
Rand	41 ou 141		Retorna um número pseudorandômico de 32 <i>bits</i> em a0.

<i>syscall</i>	a7	Argumentos	Operação
Draw Line	47 ou 147	a0 = x_0 a1 = y_0 a2 = x_1 a3 = y_1 a4 = cor a5 = frame	Desenha no <i>frame</i> a5 uma linha reta do ponto (a0,a1) até o ponto (a2,a3) com as cores a3[7:0] de <i>foreground</i> e a3[15:8] de <i>background</i> .
Read Char	48 ou 148	a0 = cor a1 = frame	Preenche o <i>frame</i> a1 com a cor a0.

As *ecalls* 1XX são utilizadas no *Rars* pelas ferramentas *Bitmap Display Tool* e *Keyboard Display MMIO Tool*, que foram customizadas para funcionar de maneira idêntica quando o programa é executado na *FPGA*.

3.4 Interface de vídeo e depuração

A interface de vídeo possui resolução de 320x240 *pixels* com 8 *bits* de cor para cada pixel. Efectivamente, a interface de vídeo possui 255 cores diferentes e uma cor utilizada como transparência, o magenta 0xC7. Ela também conta com dois *framebuffers*, permitindo renderizar duas imagens diferentes e alternar entre elas, ou se aplicado em um jogo, permite a transição de *frames* sem *flickering*: enquanto um *frame* é exibido, o outro *framebuffer* é construído com as imagens do próximo *frame*, e quando pronto, a tela é atualizada com o novo *frame* completamente renderizado.

A conexão do vídeo do sistema é feita por interface VGA, podendo se conectar a qualquer monitor com entrada VGA. A resolução real da interface é de 640x480 *pixels* com taxa de atualização de 59 Hz por questões de compatibilidade com os monitores. Cada *pixel* da interface de vídeo representa uma célula de 4 *pixels* na saída de vídeo real. A saída de vídeo VGA também possui 24 *bits* de cor, pois o controlador faz a conversão das cores em 8 *bits* para três canais de 8 *bits*, um verde, um vermelho e um azul.



Figura 3.8: Exibição do *frame* de vídeo da *FPGA*.

Acionando um *switch* da *FPGA*, é mostrado por cima do *frame* um *menu On Screen Display* que mostra o valor atual contido nos bancos de registradores do processador, incluindo os *CSRs* e, caso a extensão F esteja implementada, outro *switch* permite alternar entre a visualização dos registradores de ponto flutuante e os de ponto fixo.

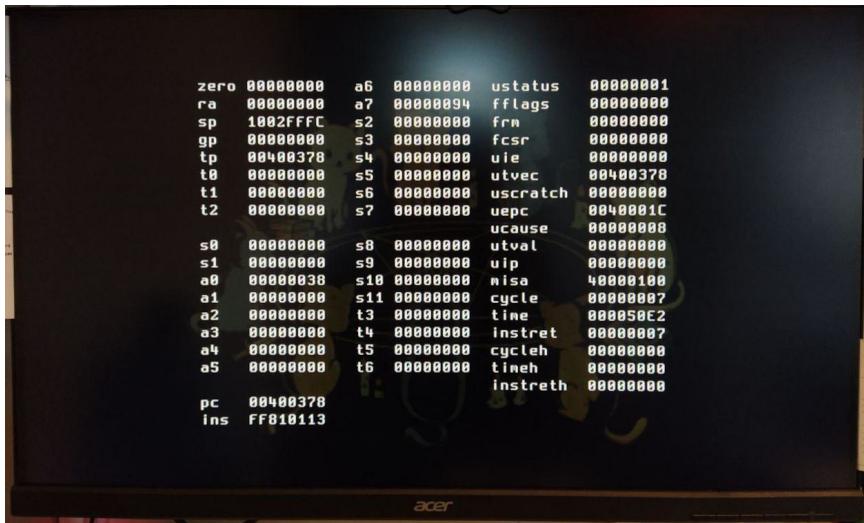


Figura 3.9: *Menu OSD* exibindo os valores dos registradores do processador.

O *menu OSD* é implementado como uma matriz de 52x24 caracteres monoespaçados. Na matriz, os caracteres que não mudam com o tempo, como é o caso do nome dos registradores, são representados com um parâmetro correspondente ao próprio caractere. Já os valores que se alteram, como o valor dos registradores, são representados por um parâmetro *placeholder* e o valor a ser mostrado na tela é obtido usando uma tabela de *lookup*. O projeto do *menu OSD* foi pensado de forma que possa ser modificado para expansão ou utilização em outras arquiteturas de processadores de maneira simples.

3.5 Configuração e síntese do processador pelo Quartus

O software utilizado para a síntese do processador, fornecimento de *IPs* como as de memória e operações de ponto flutuante, gravação do *soft-core*, dentre outras funcionalidades é o *Intel Quartus Lite v18.1*. Versões superiores são compatíveis com menos sistemas operacionais e/ou não possuem todos os *IPs* necessários para a síntese do processador.

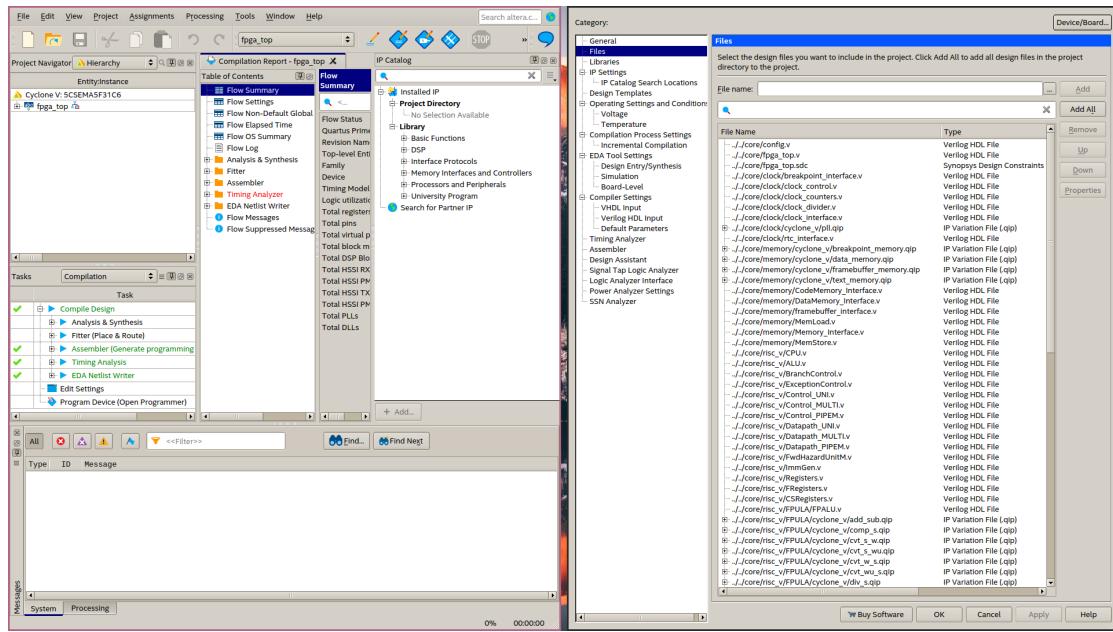


Figura 3.10: *Intel Quartus Lite v18.1* com a janela de configurações do projeto.

Todas as configurações do projeto também podem ser alteradas manualmente no arquivo `project/de1_soc/fpga_top.qsf`. Para ativar ou desativar os pinos do *chip* da *FPGA* que conectam os periféricos da placa, é preferível que a edição seja feita diretamente no arquivo de configuração, comentando ou descomentando a declaração dos pinos.

Para realizar a síntese completa do processador para poder utilizá-lo na *FPGA*, basta acessar o menu **Processing > Start Compilation** ou utilizar o atalho **Ctrl + L** ou clicar no ícone de *"Play"* na barra de tarefas do programa. Assim, as etapas de Análise e Síntese, *Placing* e *Routing*, *Assembler* e *Timing Analysis* serão realizadas, e no caso de não ocorrerem erros durante o processo, o *soft-core* estará pronto para ser gravado na *FPGA* utilizando o arquivo *.mif* gerado.

3.6 Simulação do processador pelo Quartus e ModelSim

O projeto possui um *testbench* em *Verilog* para simular as entradas e saídas da *FPGA* que o usuário operaria, como os botões e *switches*. Ele configura a rotina de reinicialização da placa após o *power-up* e define por quanto tempo a simulação será executada.

O script `test/simulation_scripts/de1_soc_rtl.do` é necessário para realizar a simulação de forma correta. O script gerado automaticamente pelo Quartus apresenta problemas que im-

pedem que a simulação seja executada corretamente, além de não gerar o arquivo de saída da simulação no formato desejado.

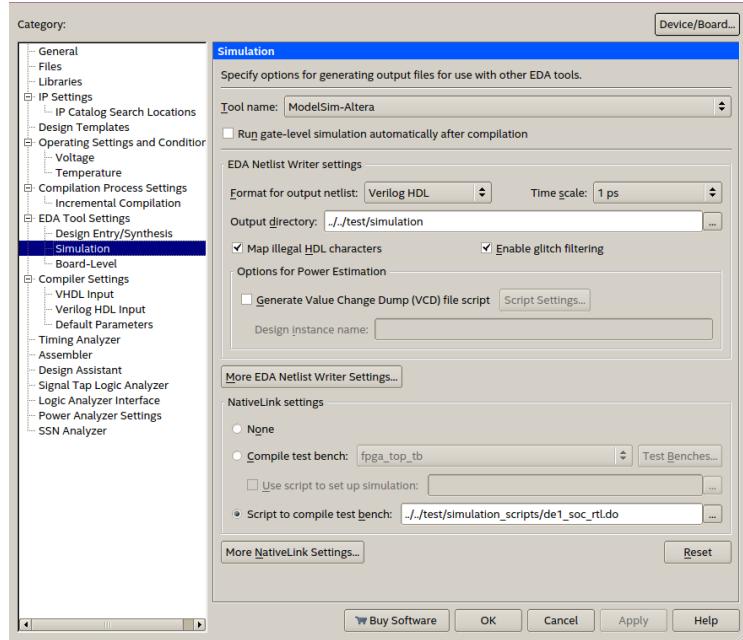


Figura 3.11: Janela de configuração da simulação no *Quartus*.

Por limitações do *Quartus*, não é possível simular *FPGAs Cyclone V* a nível de portas lógicas, somente sendo possível fazer a simulação *RTL*. Por outras limitações no programa, o *script .do* produzido manualmente só é executado usando o menu *Tools > Run Simulation Tool > Gate Level Simulation...*, que apesar do nome, executará uma simulação *RTL*. A opção *Tools > Run Simulation Tool > RTL Simulation*, utiliza o script gerado automaticamente e não funciona.

Ao executar a simulação, os *scripts NativeLink* iniciarão o programa *ModelSim*, carregando o *script .do* customizado, conforme mostrado na Figura 3.12. Ao finalizar a simulação, um arquivo *.vcd* será gerado e poderá ser analisado em *softwares* de visualização de formatos de onda, como o *GTKWave* ou o próprio *ModelSim*.

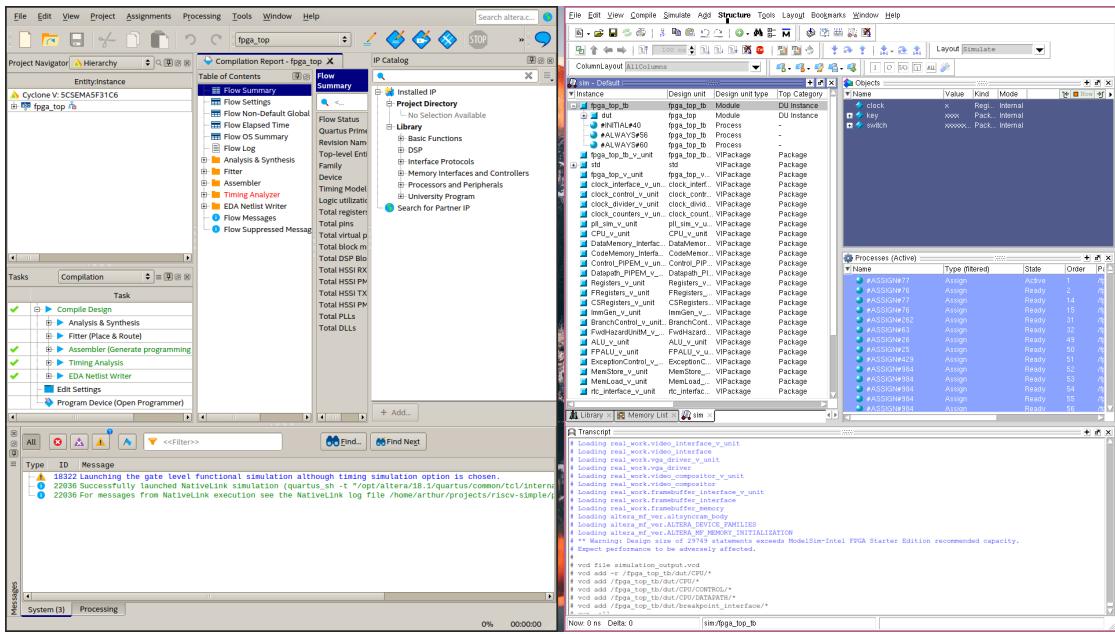


Figura 3.12: O *script NativeLink* invoca o *ModelSim* passando o *script .do* com as informações de como simular o sistema.

3.7 Script make.sh

A pasta `test/sof_library` contém os arquivos `.sof` com as nove variações da última versão do processador, prontos para serem gravados na *FPGA*. Para facilitar a geração das nove variantes, o *bash script* `make.sh` foi criado para automatizar a síntese e salvar a nova versão na pasta `test/sof_library`. O *script* também permite realizar somente a etapa de análise das variantes para confirmar que alterações feitas no código não introduziram erros de compilação, uma vez que é um processo muito mais ágil que realizar a síntese completa.

O *script* também faz a simulação *RTL* de todas as variantes do processador, salvando os *logs* e arquivos `.vcd` na pasta `test/simulation`, que é ignorada pelo *git*.

3.8 Uso da FPGA DE1-SoC

A placa de desenvolvimento *terasIC DE1-SoC* utilizada no projeto é mostrada na Figura 3.13.

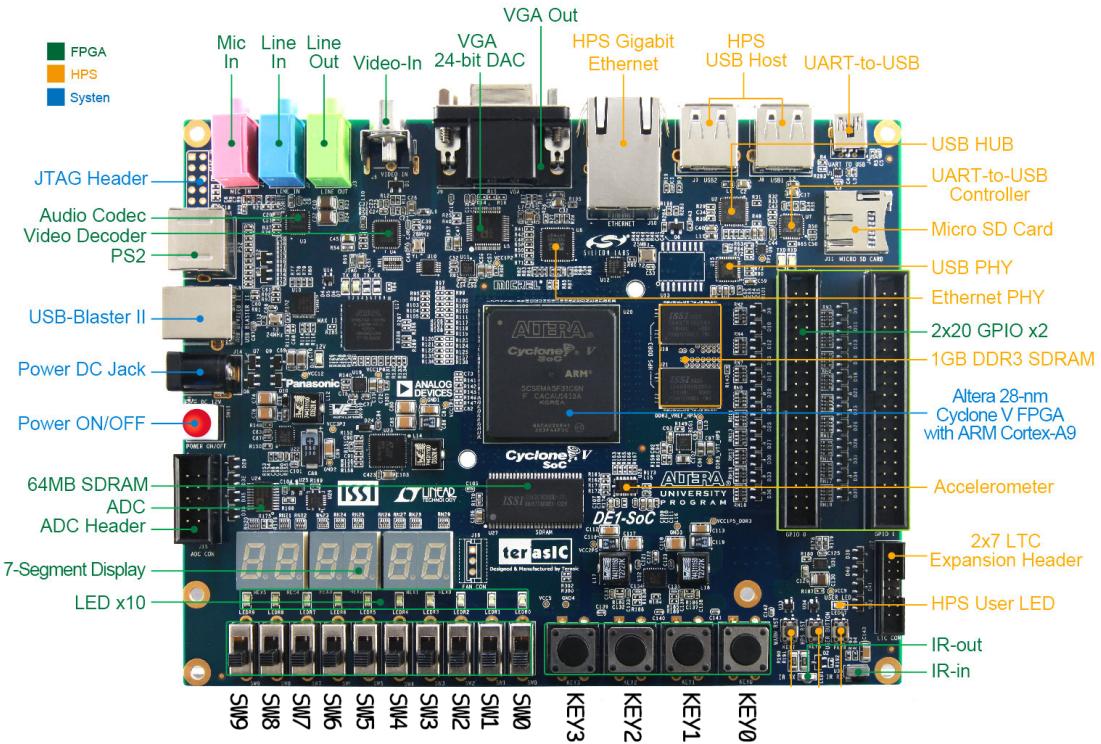


Figura 3.13: Placa de desenvolvimento *terasIC DE1-SoC*. Fonte: [44]

Os botões e *switches* mostrados na Figura 3.13 são utilizados para controlar as características do *clock* do processador, fazer seu *reset* e controlar o *menu OSD* de depuração. A função de cada *input* é:

- KEY0: Reset do processador;
- KEY1: Seletor de divisor de *clock* lento ou rápido;
- KEY2: Seletor de *clock* manual ou automático;
- KEY3: Gerador de *clock* manual;
- SW0: Bit [0] do divisor de *clock*;
- SW1: Bit [1] do divisor de *clock*;
- SW2: Bit [2] do divisor de *clock*;
- SW3: Bit [3] do divisor de *clock*;
- SW4: Bit [4] do divisor de *clock*;
- SW5: Temporizador para *stall* do processador;
- SW6: Seletor de *framebuffer* a ser exibido;
- SW7: Seletor de banco de registradores no *menu OSD*;

- SW8: Sem função;
- SW9: Habilita o *menu OSD*;

O procedimento recomendado para inicialização do processador após o *Programmer* do *Quartus* programar a *FPGA* com um novo arquivo *.mif* é: Pressionar e soltar a KEY2 para ativar o *clock* automático; pressionar e soltar a KEY0 para dar o *reset* dos estados do processador e, caso queira uma execução mais rápida, pressionar e soltar a KEY1 para mudar para um divisor de *clock* mais veloz. A frequência máxima de operação do *clock* é de 50MHz, e ocorre na opção de divisor rápido com o divisor 5'b1.

Utilizando a saída de vídeo, o sistema pode executar programas gráficos como jogos, ou pode ser usado simplesmente como ferramenta de *debug*. Ativando o *menu OSD* e utilizando o *clock* manual, é possível ver a progressão dos registradores do processador instrução por instrução.

O processador também pode receber *inputs* do usuário utilizando um teclado *PS/2*. A leitura do teclado é realizada por meio de *polling* do endereço do *buffer* do teclado.

A interface *RS-232* também pode ser utilizada para enviar e receber dados provenientes de outro computador, permitindo contornar a limitação de pouca memória disponível na *FPGA*, enviando novos dados e instruções à medida em que forem necessários e/ou requisitados pelo processador.

Capítulo 4

Resultados

Capítulo 5

Conclusões

5.1 Perspectivas Futuras

Com o recente sucesso dos processadores *ARM M1* lançados pela *Apple*, e com os processadores *ARM Graviton* disponíveis no serviço de servidores em nuvem da *Amazon*, é uma possibilidade forte que o desenvolvimento de plataformas *RISC-V* para uso geral desacelere.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] WATERMAN, A. et al. *The RISC-V Instruction Set Manual, Volume I: User-Level ISA Version 20191213*. 2019.
- [2] WATERMAN, A. et al. *The RISC-V Instruction Set Manual, Volume II: Privileged Architecture Version 20190608*. 2019.
- [3] LYONS, J. *Natural language and universal grammar*. Cambridge England New York: Cambridge University Press, 1991. ISBN 9780521246965.
- [4] LAMBTRON. *Block diagram of a basic computer with uniprocessor CPU. (CC BY-SA 4.0)*. 2015. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/File:ABasicComputer.gif>>.
- [5] BLEM, E. et al. Isa wars: Understanding the relevance of isa being risc or cisc to performance, power, and energy on modern architectures. *ACM Trans. Comput. Syst.*, Association for Computing Machinery, 2015. ISSN 0734-2071. Disponível em: <<https://doi.org/10.1145/2699682>>.
- [6] MIPS Technologies, Inc. Enhances Architecture to Support Growing Need for IP Re-Use and Integration. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20181201180124/https://www.thefreelibrary.com/MIPS+Technologies%2c+Inc.+Enhances+Architecture+to+Support+Growing+Need...-a054531136>>.
- [7] PATTERSON, D. *Computer organization and design : the hardware/software interface*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2014. ISBN 9780124077263.
- [8] SWEETMAN, D. *See MIPS run*. [S.l.]: Morgan Kaufmann Publishers, 1999. ISBN 1558604103.
- [9] MIPS architecture: Uses. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/MIPS_architecture#Uses>.
- [10] WAVE Computing and MIPS Wave Goodbye. Disponível em: <<https://semiwiki.com/ip/284876-wave-computing-and-mips-waves-goodbye>>.
- [11] SOME facts about the Acorn RISC Machine. Disponível em: <https://groups.google.com/g/comp.arch/c/hPsDLEPf2eo/m/nvJR_d7nnnyYJ>.
- [12] ARM'S Reach: 50 Billion Chip Milestone. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20160624003846/http://www.broadcom.com/blog/chip-design/arms-reach-50-billion-chip-milestone-video/>>.

- [13] NEW 1 Supercomputer: Fugaku in Japan, with A64FX, take Arm to the Top with 415 Peta-FLOPs. Disponível em: <<https://www.anandtech.com/show/15869/new-1-supercomputer-fujitsus-fugaku-and-a64fx-take-arm-to-the-top-with-415-petaflops>>.
- [14] APPLE M1 Benchmarks Are Here – Apple Delivered Performance and Efficiency. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20201228121118/https://borderpolar.com/2020/11/21/apple-m1-benchmarks>>.
- [15] COLLEGE, A.; DOYLE, C.; RYNNING, A. *FPGA Flexible Architecture - Olin College of Engineering*. Disponível em: <http://ca.olin.edu/2005/fpga_dsp/images/fpga001.jpg>.
- [16] STANNERED. *Switch Box*. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Switch_box.svg>.
- [17] INTEL. *Cyclone V SoC FPGA Architecture*. Disponível em: <<https://www.intel.com/content/www/us/en/products/details/fpga/cyclone/v.html>>.
- [18] INTEL. *ALM High-Level Block Diagram for Cyclone V Devices*. Disponível em: <https://www.intel.com/content/dam/www/programmable/us/en/pdfs/literature/hb/cyclone-v/cv_5v2.pdf>.
- [19] DOCUMENTATION/PLATFORMS/RISCV. Disponível em: <<https://wiki.qemu.org/Documentation/Platforms/RISCV>>.
- [20] RISC-V BOOM - The Berkeley Out-of-Order RISC-V Processor. Disponível em: <<https://boom-core.org>>.
- [21] UC Berkeley Architecture Research. Disponível em: <<https://bar.eecs.berkeley.edu/>>.
- [22] BOOM Open Source RISC-V Core Runs on Amazon EC2 F1 Instances. Disponível em: <<https://www.cnx-software.com/2018/12/13/boom-risc-v-core-amazon-ec2-f1>>.
- [23] SHAKTI - Open Source Processor Development Ecosystem. Disponível em: <<https://shakti.org.in>>.
- [24] SHAKTI RISC-V based Processor: the First Open Source Indian Chip. Disponível em: <<https://www.open-electronics.org/shakti-risc-v-based-processor-the-first-open-source-indian-chip>>.
- [25] WESTERN Digital to Use RISC-V for Controllers, Processors, Purpose-Built Platforms. Disponível em: <<https://www.anandtech.com/show/12133/western-digital-to-develop-and-use-risc-v-for-controllers>>.
- [26] RISC-V in Nvidia. Disponível em: <<https://riscv.org/wp-content/uploads/2017/05/Tue1345pm-NVIDIA-Sijstermans.pdf>>.
- [27] NEW Part Day: A RISC-V CPU For Eight Dollars. Disponível em: <<https://hackaday.com/2019/02/14/new-part-day-a-risc-v-cpu-for-eight-dollars/>>.

- [28] HIFIVE1 Rev B. Disponível em: <<https://www.sifive.com/boards/hifive1-rev-b>>.
- [29] HIFIVE Unmatched. Disponível em: <<https://www.sifive.com/boards/hifive-unmatched>>.
- [30] BEAGLEV The First Affordable RISC-V Computer Designed to Run Linux. Disponível em: <<https://beaglev.seeed.cc/>>.
- [31] SIFIVE Tapes Out First 5nm TSMC 32-bit RISC-V Chip with 7.2 Gbps HBM3. Disponível em: <<https://www.tomshardware.com/news/openfive-tapes-out-5nm-risc-v-soc>>.
- [32] GCC RISC-V Options. Disponível em: <<https://gcc.gnu.org/onlinedocs/gcc/RISC-V-Options.html>>.
- [33] LLVM Clang RISC-V Now Supports LTO. Disponível em: <<https://riscv.org/news/2019/10/llvm-clang-risc-v-now-supports-lto-michael-larabel-phoronix>>.
- [34] RISC-V Port Merged to Linux. Disponível em: <<https://groups.google.com/a/groups.riscv.org/g/sw-dev/c/2-u-c3kyZlc>>.
- [35] FEDORA - Architectures/RISC-V. Disponível em: <<https://fedoraproject.org/wiki/Architectures/RISC-V>>.
- [36] PORTING Alpine Linux to RISC-V. Disponível em: <<https://drewdevault.com/2018/12/20/Porting-Alpine-Linux-to-RISC-V.html>>.
- [37] ANDROID 10 ported to homegrown multi-core RISC-V system-on-chip by Alibaba biz, source code released. Disponível em: <https://www.theregister.com/2021/01/21/android_riscv_port>.
- [38] MY Haiku RISC-V port progress. Disponível em: <<https://discuss.haiku-os.org/t/my-haiku-risc-v-port-progress/10663/85>>.
- [39] SEL4 is verified on RISC-V. Disponível em: <<https://microkerneldude.wordpress.com/2020/06/09/sel4-is-verified-on-risc-v>>.
- [40] TECHNOLOGIES, I. *Acquisition of MIPS Technologies completed.* Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20131002214436/http://www.imgtec.com/news/Release/index.asp?NewsID=724>>.
- [41] BLOOMBERG. *Imagination Technologies Agrees to Takeover by Canyon Bridge.* Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-09-22/imagination-technologies-agrees-to-takeover-by-canyon-bridge>>.
- [42] MIPS Acquired by AI Startup Wave Computing. Disponível em: <<https://www.top500.org/news/mips-acquired-by-ai-startup-wave-computing>>.
- [43] WAIT, What? MIPS Becomes RISC-V. Disponível em: <<https://www.eejournal.com/article/wait-what-mips-becomes-risc-v>>.

[44] TERASIC. *DE1-SoC Board*. Disponível em: <https://www.terasic.com.tw/attachment/archive/836/image/image_67_thumb.jpg>.

ANEXOS

I. DESCRIÇÃO DO CONTEÚDO DO CD

Descrever CD.

II. PROGRAMAS UTILIZADOS

Quais programas foram utilizados?