



**FACULDADE DE TECNOLOGIA SENAI “ANCHIETA”
CURSOS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS EMBARCADOS**

EDUARDO ALVIM GUEDES ALCOFORADO

**UTILIZAÇÃO DE FPGA NO DESENVOLVIMENTO DE UM
MICROCONTROLADOR DE 32 BITS COM ARQUITETURA RISC-V E CONJUNTO
DE INSTRUÇÕES RV32IM**

**SÃO PAULO
2022**

EDUARDO ALVIM GUEDES ALCOFORADO

**UTILIZAÇÃO DE FPGA NO DESENVOLVIMENTO DE UM
MICROCONTROLADOR DE 32 BITS COM ARQUITETURA RISC-V E CONJUNTO
DE INSTRUÇÕES RV32IM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Tecnologia SENAI “Anchieta”
como requisito parcial para obtenção do título de
Especialista em Sistemas Embarcados.

Orientador: Professor Dr. Leandro Poloni
Dantas

SÃO PAULO

2022

ESTA PAGINA DEVERÁ CONTER A FICHA CATALOGRÁFICA
ELABORADA PELA(S) BIBLIOTECÁRIA(S) DA INSTITUIÇÃO.

ESTE ITEM DEVERÁ SER IMPRESSO NO VERSO DA PÁGINA ANTERIOR
(FOLHA DE ROSTO)

Na hora que essa ficha existir eu coloca ela no lugar disso

Obs. Essa ficha catalográfica deverá ser impressa na parte de trás da página anterior.

EDUARDO ALVIM GUEDES ALCOFORADO

**UTILIZAÇÃO DE FPGA NO DESENVOLVIMENTO DE UM
MICROCONTROLADOR DE 32 BITS COM ARQUITETURA RISC-V E CONJUNTO
DE INSTRUÇÕES RV32IM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Banca Examinadora como
requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Sistemas Embarcado.

Eduardo Alvim Guedes Alcoforado

Orientador

Prof. Dr. Leandro Poloni Dantas

Banca examinadora

Prof. Me/Dr. XXXXXXXX

Prof. Me/Dr. YYYYYYYY

São Paulo, ____ de _____ 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradeço muito ao meu orientador por ter me apresentado esse tema extremamente instigante. Agradeço aos colegas e professores da época das aulas presenciais pela paciência e pelos ensinamentos preciosos que recebi nessa época (afinal, só tendo uns parafusos a menos para fazer uma pós em Sistemas Embarcados sem nunca ter estudado eletrônica antes).

Também agradeço a todos os professores que apenas conheci nas aulas online do curso, principalmente nas horas em que eu estava achando que não sabia nada. Realmente sou muito grato pelas conversas extra com aquelas explicações que valeram ouro.

Ao colega da 7ª Turma Diego Salviano Nagai, cujas ajudas, dicas e sugestões foram inestimáveis para esse trabalho.

E claro, também agradeço também toda equipe da Faculdade de Tecnologia SENAI “Anchieta” por todo o suporte que me foi dado quando precisei!

“Vida é o que acontece enquanto você está ocupado fazendo outros planos”.

(Autor desconhecido)

UTILIZAÇÃO DE FPGA NO DESENVOLVIMENTO DE UM MICROCONTROLADOR DE 32 BITS COM ARQUITETURA RISC-V E CONJUNTO DE INSTRUÇÕES RV32IM

Eduardo Alvim Guedes Alcoforado¹

Orientador: Leandro Poloni Dantas²

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um microprocessador de 32 bits, baseado na arquitetura RISC-V e que implementa o conjunto de instruções RV32IM da ISA (*instruction set architecture*) RISC-V. O conjunto de instruções RV32IM contém as instruções do conjunto básico da ISA, mais as instruções referentes às operações de multiplicação e divisão de números inteiros. No tocante a microarquitetura, esta é do tipo “*single-cycle processor*”, na qual a CPU (*central processing unit*) executa uma instrução por vez e todas as instruções têm duração de um ciclo de *clock*. O desenvolvimento desse núcleo foi realizado por meio da utilização de FPGAs (*field-programmable gate array*) e descrições do hardware utilizando as HDLs (*hardware description languages*) SystemVerilog e Verilog. A CPU desenvolvida aqui foi testada em um kit FPGA Terasic® DE10-Lite, que possui um CI (Circuito Integrado) FPGA 10M50DAF484C7G, da família Max 10 da Altera® (atualmente Intel® Corporation). Em relação ao desenvolvimento em HDL da CPU foi utilizada a ferramenta oficial da Altera®/Intel® para desenvolvimento em FPGA, o programa Quartus® Prime Lite Edition (versão 20.1.1). Neste trabalho, foi criado um núcleo de CPU RISC-V totalmente funcional, com uma memória de dados (*data memory*), uma memória de programa (*program memory*) e o hardware necessário para a implementação de uma CPU; embora a maior parte desses componentes tenha sido construída por meio de elementos lógicos, também foram utilizados outros recursos adicionais disponíveis no FPGA Intel, como os blocos de memória M9K (para construir as memórias) e circuitos multiplicadores, que tornaram a implementação da CPU mais eficiente. Por fim, a verificação funcional da CPU foi feita através da execução de programas de teste, escritos em Assembly RISC-V, com registro dos resultados de suas operações em memória de dados, posteriormente avaliada.

PALAVRAS-CHAVE: RISC-V. Arquitetura de Computador. Conjuntos de instruções. FPGA. Verilog/SystemVerilog.

¹Pós-graduando em Sistemas Embarcados na Faculdade de Tecnologia SENAI Anchieta; email: dualcoforado@uol.com.br

²Professor doutor na Faculdade de Tecnologia SENAI Anchieta; email: leandro.poloni@sp.senai.br

USING FPGA IN THE DEVELOPMENT OF A 32-BIT MICROCONTROLLER WITH RISC-V ARCHITECTURE AND RV32IM INSTRUCTION SET

Eduardo Alvim Guedes Alcoforado

Leandro Poloni Dantas

ABSTRACT

This work aims to present the development of a 32-bit microprocessor, based on the RISC-V architecture and which implements the ISA (Instruction Set Architecture) RISC-V instruction set RV32IM. The RV32IM instruction set contains the instructions from the ISA base set, plus instructions for integer multiplication and division operations. In terms of microarchitecture, this is of the “*single-cycle processor*” type, in which the CPU (*Central Processing Unit*) executes one instruction at a time and all instructions last one clock cycle. The development of this core was carried out through the use of FPGAs (field-programmable gate array) and hardware descriptions using the HDLs (hardware description languages) SystemVerilog and Verilog. The CPU developed here was tested on a Terasic® DE10-Lite FPGA kit, which has a 10M50DAF484C7G FPGA IC (Integrated Circuit) from the Max 10 family from Altera® (currently Intel® Corporation). Regarding the HDL development of the CPU, the official Altera®/Intel® tool for FPGA development was used, the software Quartus® Prime Lite Edition (version 20.1.1). In this work, a fully functional RISC-V CPU core was created, with a data memory, a program memory and the necessary hardware for the implementation of a CPU; although most of these components were built using logic elements, other additional resources available in the Intel FPGA were also used, such as M9K memory blocks (to build the memories) and multiplier circuits, which made the CPU implementation more efficient. Finally, the functional verification of the CPU was carried out through the execution of test programs, written in RISC-V Assembly, with registration of the results of its operations in data memory, later evaluated.

KEYWORDS: RISC-V. Instruction Set Architecture. Instruction Sets. FPGA. Verilog/SystemVerilog.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto

A arquitetura (ISA - *instruction set architecture*) ou conjunto de instruções (*instruction set*) é um componente vital em qualquer processador e, sem ela, este seria incapaz de executar qualquer programa. Uma CPU (*central processing unit*) somente é capaz de executar instruções de máquina, codificadas em bits e de acordo com as diretrizes da ISA dessa CPU (HOOVER, 2021). Um conjunto de instruções pode ser compreendido como o conjunto de mnemônicos associados às instruções da linguagem Assembly da ISA e que, posteriormente, são traduzidas para as instruções binárias executadas pela CPU (HOOVER, 2021; NISSAM e SCHOCKEN, 2021).

De modo geral, o conjunto de instruções implementado em uma CPU pode ser desenvolvido pelo próprio fabricante do processador ou o fabricante poderá comprar de uma empresa a IP (*intellectual property*) da ISA de alguma outra empresa (BAINES, 2022). Exemplos de ISAs que seguem esses moldes, merecem destaque a ISA x86 (Intel®) e ARM® (Advanced RISC Machines). Mas essas não são as únicas formas.

Seguindo um modelo diferente dos citados no último parágrafo, a ISA RISC-V (*RISC Five*) vem aumentando exponencialmente a sua participação no mercado desde 2015, ano de sua fundação e vem sendo vista como uma grande inovação (URQUHART, 2021; BAILEY, 2022). O que a diferencia o RISC-V dos seus principais concorrentes é o fato de ser uma ISA de código aberto (*open-source ISA*) e isso proporciona dois diferenciais importantíssimos: 1) não há custo algum para utilizar a ISA e implementá-la em produtos novos; 2) a ISA pode ser livremente modificada e qualquer um poderá implementar modificações de acordo com suas necessidades (URQUHART, 2021; BAINES, 2022). Essa possibilidade de livre modificação da ISA é um dos principais alavancadores do RISC-V, principalmente no tocante à inovação e desenvolvimento de CPUs feitas sob medida para suas aplicações (BAILEY, 2022).

1.2. Objetivo do trabalho

O objetivo deste trabalho foi criar um núcleo de processador RISC-V de 32 bits que implementa um conjunto de instruções básico da ISA (RV32IM) e implementa uma microarquitetura de ciclo único (*single-cycle processor*), na qual o processador executa uma instrução a cada ciclo de *clock* (HARRIS e HARRIS, 2022). Esse processador desenvolvido aqui se baseia no modelo proposto em Harris e Harris (2022) e, por ser

algo simplificado, será referido aqui como sendo um microcontrolador ou MCU (*microcontroller unit*).

O MCU desenvolvido aqui implementa o conjunto de instruções básico da ISA (RV32I), que é o conjunto de instruções mínimo da ISA, mais o subconjunto de instruções RV32M, que adiciona as instruções de multiplicação, divisão e resto da divisão (WATERMAN, 2016). Embora o conjunto de instruções implementado aqui contenha apenas os recursos mínimos da ISA RISC-V, este é relativamente completo e robusto o suficiente para a implementação de aplicações básicas na área de Sistemas Embarcados (LEDIN, 2020) e bastante adequado para ser incorporado em MCUs.

O núcleo desenvolvido aqui foi implementado e testado em um kit FPGA (*field-programmable gate array*) Terasic® DE10-Lite, que contém um CI (circuito integrado) FPGA da família MAX 10 (modelo 10M50DAF484C7G) da Altera® (atualmente Intel® Corporation). A ferramenta utilizada no desenvolvimento dessa CPU foi o software Intel® Quartus® Prime 20.1.1 Lite Edition. Por fim, o MCU desenvolvido aqui foi escrito usando as HDLs (*hardware description language*) Verilog e SystemVerilog.

1.3. RISC-V: O que é, como surgiu e missão

O conjunto de instruções é um componente intangível e não se refere a qualquer implementação física, mas sim a uma interface abstrata entre o hardware e o software de nível mais baixo (*lowest-level software*) e é formada por um conjunto de parâmetros fundamentais como conjunto de instruções, registradores, acessos de memória etc. (ASANOVÍĆ e PATTERSON, 2014), sem os quais a CPU não é capaz de executar os programas em linguagem de máquina.

Atualmente, a maioria das ISAs disponíveis são do tipo **proprietária** (*proprietary*), mas também existem algumas ISAs que adotam o formato **licenciável** (*licensable*) (CORDING, 2021), que é o caso das empresas ARM® e MIPS®. Quando uma ISA é do tipo proprietária, somente a empresa que desenvolveu a ISA poderá utilizá-la em seus produtos (CORDING, 2021). Já as ISAs licenciáveis são aquelas vendidas na forma de IPs (*intellectual properties*), onde a empresa adquirente paga *royalties* para utilizar a IP em seus produtos, mas, não possui autorização para realizar modificações nas IPs adquiridas (CORDING, 2021). Diferente desses dois casos, a ISA RISC-V é gratuita e de código completamente aberto e, portanto, qualquer pessoa pode adquirir a ISA e, também, poderá modificá-la de acordo com suas necessidades (LINUX FOUNDATION, 2021).

A ISA RISC-V se refere à quinta geração da família de arquiteturas RISC (*reduced instruction set computer*) (LINUX FOUNDATION, 2021). A arquitetura RISC nasceu em 1980, na University of California, Berkeley (UCB), e preconiza que um conjunto de instruções deve ser formado por apenas instruções simples e capazes de serem executadas rapidamente (PATTERSON e DITZEL, 1980). Isto é, o termo *Reduced* na sigla RISC deve ser entendido como redução na complexidade das instruções executadas pela CPU, mais simples de serem implementadas em hardware e que utilizam menos recursos da CPU (ENGHEIM, 2020). As instruções construídas sob essa filosofia RISC são otimizadas para serem utilizadas pelos compiladores e não por humanos (ENGHEIM, 2020).

O desenvolvimento do RISC-V começou em 2010, no Parallel Computing Lab da UCB, com um projeto interno da UC Berkeley, que desejava criar uma ISA para utilizar nos cursos e pesquisas ministrados pela universidade, e que sua utilização fosse livre de quaisquer restrições (ASANOVÍĆ e PATTERSON, 2014). Desde então a ISA passou a ser utilizada não apenas dentro da UCB, mas também por pessoas de fora da universidade, o que evidenciou a importância de uma arquitetura de computador de código aberto (PATTERSON e WATERMAN, 2017), uma vez que o RISC-V, desde a sua concepção, sempre foi uma arquitetura de código aberto e distribuído sob a licença “*creative commons licence*”, que dá ao usuário liberdade total para usar o código, bem como modificá-lo (LINUX FOUNDATION, 2021).

O passo seguinte ocorreu em 2014 com a publicação do *white paper* de Asanović e Patterson (2014), discorrendo sobre a importância de existir uma ISA aberta e, no ano seguinte, foi criada a RISC-V Foundation, uma fundação sem fins lucrativos cujo objetivo é “...manter a estabilidade do RISC-V, evolui-lo lenta e cuidadosamente, apenas por razões técnicas, e tentar torná-lo tão popular para o hardware quanto o Linux é para sistemas operacionais” (PATTERSON e WATERMAN, 2017). Com o intuito de manter a neutralidade com toda a comunidade no cenário geopolítico, em março de 2020, o nome da fundação mudou para RISC-V International e sua sede foi transferida para território Suíço (LINUX FOUNDATION, 2021).

Essa contextualização histórica de sucesso percorrida aqui somente se tornou realidade devido às vantagens da arquitetura RISC e do excelente projeto da arquitetura RISC-V em diversos aspectos, apresentados na próxima subseção.

1.4. A arquitetura e o conjunto de instruções RISC-V

Outra característica que torna a ISA RISC-V diferente da maioria das ISAs disponíveis é o fato desta ser uma **ISA modular** (PATTERSON e WATERMAN, 2017). Nas arquiteturas tradicionais, denominadas **ISAs Incrementais** (exemplo: x86 da Intel), sempre que a ISA é atualizada, ela é obrigada a ser compatível com as instruções antigas e, com isso, o número de instruções vai sempre aumentando a cada atualização, mesmo que instruções antigas já estejam em desuso (WATERMAN, 2016). Por causa dessa característica, o conjunto de instruções x86 possui mais de 1.500 instruções e a ISA ARM possui mais de 1.000 instruções (ENGHEIM, 2020), sendo que a maioria dessas instruções são pouquíssimo utilizadas e/ou estão em desuso (PATTERSON e WATERMAN, 2017; ENGHEIM, 2020).

Na arquitetura RISC-V, as instruções estão agrupadas em módulos (Tabela 1). Existe um conjunto de instruções básicos, o RV32I, que jamais será alterado (PATTERSON e WATERMAN, 2017) e, portanto, qualquer programa que utilize as instruções desse módulo base será compatível tanto com versões mais antigas, quanto com versões mais novas da mesma (MARENA, 2018).

Tabela 1 – Conjunto de instruções base do RISC-V e os módulos opcionais (32 bits).

Extensão	Descrição	Num. Instruções
RV32I	Conjunto de instruções básico da ISA	47
RV32M	Multiplicação/divisão de números inteiros	8
RV32A	Operações atômicas de memória	11
RV32F	<i>Single-precision floating point</i>	26
RV32D	<i>Double-precision floating point</i>	26
RV32C	Instruções compactadas (16 bits)	36
Especificar o conjunto de instruções utilizado:		
RV32I: Para usar apenas o conjunto de instruções básico (obrigatório).		
RV32IC: RV32I + Instruções compactas de 16 bits		
RV32IM: RV32I + multiplicação/divisão de inteiros.		
RV32IMF: RV32IM + <i>Single-Precision</i>		
RV32IMD: RV32IM + <i>Double-Precision</i>		
RV32IMFD: RV32IM + <i>Single-Precision</i> + <i>Double-Precision</i>		

Fonte: Kanter (2016) e Waterman (2016).

O conjunto RV32I é constituído por apenas 47 instruções (ENGHEIM, 2020), e se referem apenas de operações básicas de processamento e de operações aritméticas de adição e subtração de números inteiros (WATERMAN, 2016). Caso seja identificada a necessidade de utilização de operações de multiplicação e/ou divisão, usando números

inteiros, basta realizar a operação de carregamento de instruções RV32IM, que carrega as instruções do conjunto base (RV32I) e as instruções de multiplicação e divisão (RV32M) (PATTERSON e HENESSY, 2021). Da mesma forma, havendo uma necessidade de utilização de números decimais basta carregar o conjunto de instruções usando RV32IMF (para precisão simples) ou RV32IMD (para precisão dupla).

O RISC-V também possui uma extensão com instruções compactadas (RV32C), que contém instruções de 16 bits e, com isso, é possível gerar linhas de instruções com 32 bits, mas que executam duas instruções compactadas (WATERMAN, 2016). Para utilizar essas instruções, carregar o conjunto de instrução RV32IC.

Além das extensões listadas na Tabela 1, também existe o conjunto de instruções RV32E, que contém as instruções do conjunto RV32I, mas utiliza apenas 16 registradores (WATERMAN, 2016). Segundo Waterman (2016) o componente estrutural mais caro de um núcleo RISC-V é essa estrutura com 32 registradores. Sendo assim, em aplicações embarcadas em que não seja necessário a utilização de todos esses registradores, o conjunto básico RV32E oferece uma versão menos custosa (WATERMAN, 2016).

Essa estrutura modular do RISC-V é um dos principais diferenciais e motivos de sucesso da ISA, uma vez que possibilita a criação de processadores especializados para as aplicações que se destinam (URQUHART, 2021; BAYLEY, 2022; SPERLING, 2022). Uma evidência dessa característica como um fator crítico de sucesso da ISA se refere à grande adoção desta em aplicações de computação heterogênea, que se baseia na utilização de hardware especializado para a realização de diferentes atividades (ENGHEIM, 2022), como o desenvolvimento de CPUs dedicadas a operações de *machine learn* (aprendizado de máquina) e de microcontroladores (MCUs) (BAYLEY, 2022; MOORE, 2022). Engheim (2022) cita como possível exemplo disso a criação de SoCs (*Systems-on-a-Chip*) compostos por vários núcleos de CPU RISC-V, cada um especializado em um tipo de processamento.

Essa possibilidade de criação de núcleos especializados reduz os custos de fabricação dos chips, uma vez que este é proporcional à área (*die area*) do chip (ENGHEIM, 2022). Isto é, ao produzir um chip formado apenas pelo hardware necessário para sua aplicação, a área desse chip será menor e, com isso, será possível obter mais chips a partir de um único *wafer* (PATTERSON e WATERMAN, 2017) e, consequentemente, reduzir o custo unitário de cada chip produzido.

A próxima subseção apresenta mais sobre a adoção do RISC-V em pesquisas acadêmicas, bem como na criação de chips comerciais.

1.5. Posicionamento do RISC-V no mercado

O RISC-V é amplamente estudado no ambiente acadêmico, principalmente em instituições que recebem financiamento público e que não desejam desperdiçar recursos com projetos que lhes prendam a um produto específico, principalmente em casos em que esses produtos são fornecidos por empresas do tipo *for-profit*, que fornecem produtos com algum nível de restrição (TURLEY, 2020). Entretanto, a arquitetura também é bastante adotada em CPUs comerciais, produzidas por empresas como Espressif, SiFive e Sipeed.

A arquitetura RISC-V foi muito bem recebida desde o princípio. No mesmo ano que a *RISC-V Foundation* foi criada, a fundação se associou a três grandes empresas americanas de tecnologia: Google, HP e Oracle (MERRIT, 2015). Outra grande empresa que também se associou nesses primeiros anos foi a Western Digital, que em 2019 lançou o núcleo SweRV como sendo completamente de código aberto (HRUSKA, 2019; WESTERN DIGITAL, 2019). Essa chegada ao mercado com uma proposta inovadora também fez do RISC-V alvo de diversos ataques por parte da ARM, inclusive de um site criado por esta para difamar as arquiteturas de código aberto (HRUSKA, 2018; ENGHEIM, 2020).

Nesses primeiros anos de existência, houve pouco interesse de adoção do RISC-V pelas empresas chinesas, uma vez a arquitetura ARM tinha um domínio muito bem estabelecido entre os fabricantes desse país (EE TIMES, 2018). Entretanto, esse cenário vem mudando desde meados de 2019 quando os fabricantes chineses passaram a sofrer sanções dos principais fornecedores de tecnologia de processadores como a Intel e ARM (HRUSKA, 2019). Desde então diversos fabricantes chineses, como a AllWinner, passaram a desenvolver seus próprios núcleos de CPU usando a arquitetura RISC-V (EE TIMES, 2021).

Também visando diminuir a dependência de empresas como Intel e ARM, o governo russo investiu em 2021 30 bilhões de Rublos em uma parceria entre três empresas russas, com o objetivo de produzir novas CPUs RISC-V para serem usadas em laptops e servidores do próprio governo e, com isso, reduzir a dependência de tecnologias estrangeiras nessa área (HRUSKA, 2021) .

Por fim, o RISC-V tem ganhado ainda mais visibilidade nos anos de 2021 e 2022 por causa da Intel. Em 2021 a Intel estabeleceu uma parceria com a SiFive, uma das principais fabricantes de CPUs baseadas em RISC-V, com a criação da IFS (Intel® Foundry Services), oferecendo à SiFive a produção de CPUs RISC-V utilizando o processo de 7 nm (HRUSKA, 2021; HRUSKA, 2021). Já em 2022, a SiFive conseguiu levantar US\$ 175 milhões em fundos para investir no desenvolvimento de novos chips RISC-V com desempenho superior aos chips da ARM e, também, planeja futuramente realizar um IPO (*initial public offering*) para abrir o capital da empresa no mercado financeiro (DAHAD, 2022). Já a Intel, anunciou as suas novidades em fevereiro de 2022, que foi o anúncio de um fundo de desenvolvimento bilionário, voltado ao desenvolvimento de novas CPUs RISC-V, para serem fabricadas nas plantas da IFS (HRUSKA, 2022). O segundo anúncio da Intel nesse mesmo mês foi de que a empresa planeja licenciar CPUs híbridas que combinam os recursos das arquiteturas ARM, x86 e RISC-V (HRUSKA, 2022).

1.6. Sobre as próximas seções do trabalho

Dando prosseguimento ao trabalho, a próxima seção discorre sobre alguns aspectos importantes para seu desenvolvimento, que são as instruções da ISA RISC-V, estrutura do processador implementado aqui e um pouco sobre FPGAs e linguagens de descrição de hardware (HDLs). A terceira seção apresenta a implementação do processador no kit FPGA e a quarta seção encerra o trabalho.

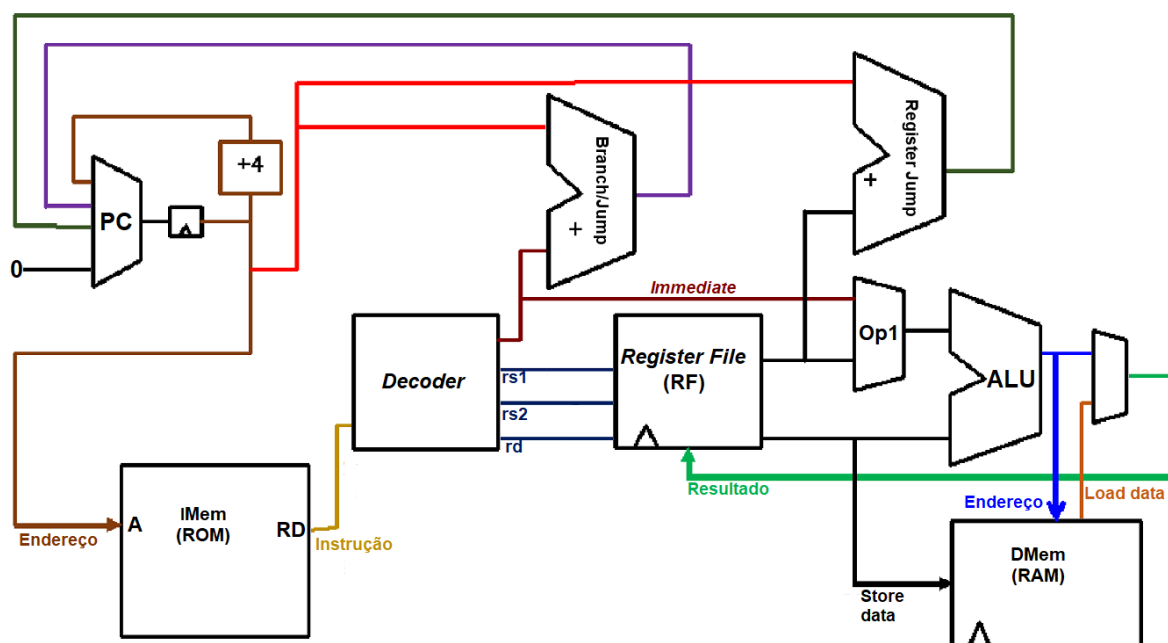
2. DESENVOLVIMENTO

Essa seção apresenta o desenvolvimento do microcontrolador RV32IM com microarquitetura *single-cycle*, baseado no conteúdo apresentado em Harris e Harris (2022). A primeira subseção descreve os componentes fundamentais de um processador e explica como são codificadas as instruções do Assembly RISC-V; a segunda apresenta o hardware e software utilizado nos testes e a terceira explica as HDLs utilizadas nos projetos, Verilog e SystemVerilog. Por fim, a quarta subseção apresenta as instruções implementadas no MCU analisado e o repositório com os projetos implementados nos testes realizados aqui.

2.1. Componentes Fundamentais de uma CPU e Formato das Instruções do Conjunto RV32IM

A Figura 1 apresenta o diagrama esquemático básico do MCU RISC-V baseado na ISA RV32IM e desenvolvido aqui. O MCU possui 33 registradores, um registrador cujo valor é sempre 0 (x0), 31 registradores de uso geral (registradores x1-x31) e um registrador para armazenar o endereço da próxima instrução a ser executada (registrador pc) (WATERMAN, 2016). Esses registradores são utilizados para armazenar os dados que serão utilizados nas operações das instruções e, também, valores utilizados com muita frequência (PATTERSON e WATERMAN, 2017). Os registradores do *Register File* (RF) são considerados as memórias mais rápidas de qualquer CPU (NISSAM e SCHOCKEN, 2021; HARRIS e HARRIS, 2022). No caso do MCU desse trabalho, o registrador pc e os 32 registradores do RF possuem 32 bits de comprimento.

Figura 1 – Diagrama de blocos do processador RV32I desenvolvido aqui.



Fonte: Material do curso on-line “Building a RISC-V CPU Core” (Hoover, 2021) – Modificado.

Como mostra a Figura 1, o RF não é a única memória disponível no MCU. Este possui outras duas memórias, com maior capacidade de armazenamento, mas com acessos mais lentos (HARRIS e HARRIS, 2022); uma memória do tipo ROM (*Read-Only Memory*) – bloco “IMem” na Figura 1 – para armazenar o programa em execução (*program memory*), e uma memória do tipo RAM (*Random-Access Memory*) – Bloco “DMem” na Figura 1 – para o armazenamento temporário de dados usados ao longo do programa executado (HARRIS e HARRIS, 2022).

Outro componente importante é o decodificador de instruções – bloco “Decoder” na Figura 1 – que é responsável por identificar o formato da instrução, os operandos e

outros campos desta (HOOVER, 2021; HARRIS e HARRIS, 2022). Como mostra a Tabela 2, o conjunto de instruções RV32I contém 47 instruções, subdivididas nos 6 tipos indicados na Tabela 2 (WATERMAN, 2016). Já o subconjunto RV32M contém mais 8 instruções e todas elas seguem o formato *R-Type* apresentado na primeira linha da Tabela 2 (PATTERSON e WATERMAN, 2017).

Tabela 2 – Formato das instruções do subconjunto de instruções RV32IM.

Tipo	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
R-Type	funct7							rs2					rs1				funct3				rd				OpCode							
I-Type	imm[11:0]												rs1				funct3				rd				OpCode							
S-Type	imm[11:5]							rs2					rs1				funct3				imm[4:0]				OpCode							
B-Type	{ imm[12], imm[10:5] }							rs2					rs1				funct3				{ imm[4:1], imm[11] }				OpCode							
U-Type								imm[31:12]													rd				OpCode							
J-Type								{ imm[20], imm[10:1], imm[11], imm[19:12] }													rd				OpCode							

Observações:
rd: Registrador de destino; é o registrador que recebe o resultado da instrução executada.
rs1: Registrador com o operando 1; é o registrador que armazena o valor utilizado no primeiro operando da instrução executada.
rs2: Registrador com o operando 2; é o registrador que armazena o valor utilizado no segundo operando da instrução executada.
imm: Valor da constante passada para a instrução.
OpCode: Os bits 0 e 1 (opcode[1:0]) são iguais a 1, para todas as instruções do subconjunto RV32I.
funct7: Esse parâmetro somente é utilizado nas instruções do subconjunto *R-Type*.

Fonte: RISC-V INTERNATIONAL (2022).

Quanto às instruções decodificadas em “*Decoder*”, é importante ressaltar aqui que todas as instruções armazenadas em “IMem” possuem, invariavelmente, 32 bits de comprimento (RISC-V INTERNATIONAL, 2022).

Outro bloco vital do MCU é o bloco “ALU” na Figura 1. O bloco “ALU” possui duas entradas que recebem os valores dos operandos da operação que será realizada pela instrução (HOOVER, 2021). Como mostra a Tabela 2, os valores das entradas de “ALU” podem ser dois valores armazenados em registradores (instruções no formato *R-Type*) (LEDIN, 2020; HOOVER, 2021) ou um valor armazenado em registrador e outro um valor imediato, ou “*immediate*” (formato *I-Type*) que é o caso dos formatos (LEDIN, 2020; HOOVER, 2021). Quanto as instruções que utilizam os outros formatos apresentados na Tabela 2, a maioria não utiliza a ALU.

No tocante ao valor imediato utilizado por alguns formatos de instruções da Tabela 2, esse valor é codificado de maneira diferente para cada tipo. A Tabela 3 mostra como é gerado o valor imediato de 32 bits para cada um dos tipos de instruções vistos na Tabela 2.

Tabela 3 – Formação do campo “*immediate*” das instruções.

imm[31:0]																																
Tipo	31	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
I-Type	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[30]	[29]	[28]	[27]	[26]	[25]	[24]	[23]	[22]	[21]	[20]
S-Type	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[30]	[29]	[28]	[27]	[26]	[25]	[11]	[10]	[9]	[8]	[7]
B-Type	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[7]	[30]	[29]	[28]	[27]	[26]	[25]	[11]	[10]	[9]	[8]	0
U-Type	[31]	[30]	[29]	[28]	[27]	[26]	[25]	[24]	[23]	[22]	[21]	[20]	[19]	[18]	[17]	[16]	[15]	[14]	[13]	[12]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
J-Type	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[31]	[19]	[18]	[17]	[16]	[15]	[14]	[13]	[12]	[20]	[30]	[29]	[28]	[27]	[26]	[25]	[24]	[23]	[22]	[21]	0
R-Type	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: RISC-V INTERNATIONAL (2022).

Por fim, no tocante ao registrador pc, o valor em sua saída pode ser um de 4 valores possíveis: 1) valor 0, caso a entrada reset seja ativada; 2) valor atual mais 4, quando instruído para executar a próxima instrução de “*IMem*”; 3) valor atual, mais *Branch*, caso seja recebida uma instrução de *branching* e a condição seja verdadeira; e 4) valor atual, mais deslocamento, caso tenha recebido uma instrução de salto incondicional (*jal* ou *jalr*) (HOOVER, 2021; HARRIS e HARRIS, 2022).

A próxima subseção apresenta o hardware e o software utilizados nos projetos.

2.2. Hardware e software utilizados

Os projetos que implementam a CPU RV32IM foram desenvolvidos para serem executados no kit FPGA Terasic DE10-Lite. Esse kit possui um CI FPGA Intel®/Altera® MAX 10 10M50DAF484C7G, o qual inclui alguns recursos muito importantes para o projeto desenvolvido nesse trabalho.

Dentre os recursos de maior interesse do CI FPGA 10M50DAF484C7G, este possui 49.760 elementos lógicos (LEs – *logic elements*), 288 blocos multiplicadores de 9 bits (*embedded multiplier 9-bit elements*), 1.677.312 bits distribuídos em 182 blocos de memória M9K (9.216 bits por bloco M9K) e suporte para até 360 pinos GPIO (TERASIC, 2020).

Nos projetos desenvolvidos aqui, os blocos M9K serão utilizados para criar tanto a memória de programa (ROM), quanto a memória de dados (RAM). A utilização fornece ao projeto uma memória rápida e que não utiliza os elementos lógicos do CI FPGA (CHU, 2012). Já os multiplicadores de 9 bits, estes são hardware específicos para operações de multiplicação, cuja utilização também reduz o uso de elementos lógicos (CHU, 2012).

Os projetos analisados mais adiante foram todos criados usando a ferramenta de desenvolvimento oficial da Altera®/Intel®, o software Quartus® Prime Lite Edition, versão 20.1.1. Quanto aos módulos do projeto, estes foram escritos em Verilog (memórias RAM e ROM e o Conjunto de Registradores) e SystemVerilog (todos os outros módulos).

O Quartus® Prime Lite Edition foi usado também para a realização dos testes dos projetos que executam *scripts* em Assembly RISC-V. No caso desses testes, é

necessário primeiro enviar o projeto compilado para o CI FPGA e, posteriormente, verificar os resultados na ferramenta In-System Memory Content Editor do Quartus® Prime.

A subseção a seguir apresenta uma breve história das linguagens Verilog e SystemVerilog.

2.3. Sobre as linguagens Verilog e SystemVerilog

A linguagem Verilog foi criada pela Gateway Design Automation em 1984, e era uma linguagem proprietária desta empresa (HARRIS e HARRIS, 2022). Em 1989 a Gateway foi comprada pela Cadence e, em 1990, a linguagem se tornou aberta (HARRIS e HARRIS, 2022). Por fim, desde 1995 a linguagem Verilog passou a ser normatizada pela IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), com o pronunciamento 1364-1995 e, posteriormente, atualizada em 2001 e em 2005 (IEEE Std. 1364-2001¹).

Já a linguagem SystemVerilog é uma linguagem derivada do Verilog, com a adição de novas funcionalidades para esta. Ela também é normatizada pelo IEEE desde 2005 (IEEE Std. 1800-2005) e a versão atual do pronunciamento que a normatiza é o IEEE Std. 1800-2009². Conforme já mencionado, o software Quartus® Prime possui suporte a ambas as linguagens.

A próxima subseção apresenta as instruções do conjunto RV32IM implementadas no projeto e sobre o repositório onde os projetos estão disponíveis.

2.4. Instruções Implementadas e Repositório com os projetos

A Tabela 4 apresenta as instruções do conjunto RV32IM que foram implementadas no núcleo de processamento desenvolvido aqui.

¹ Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1620780>

² Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5354441>

Tabela 4 – Instruções de Assembly RISC-V do conjunto de instruções RV32IM.

Tipo	Subgrupo	Formato	Instruções do grupo
R-Type	Aritmética	<instr> rd, rs1, rs2	add sub mul mulh mulhsu mulhu div divu rem remu
	Lógica	<instr> rd, rs1, rs2	xor or and
	Deslocamento	<instr> rd, rs1, rs2	sll srl sra
	Menor ou Igual	<instr> rd, rs1, rs2	slt sltu
S-Type	Store	<instr> rs1, imm(rs2)	sw
B-Type	Branch	<instr> rd, rs1, imm	beq bne blt bge bltu bgeu
U-Type	Load Data	<instr> rd, rs1	lui auipc
J-Type	Jump-and-Link	<instr> rd, imm	jal
I-Type	Jump-and-link Reg	<instr> rd, imm(rs1)	jalr
	Aritmética	<instr> rd, rs1, imm	addi
	Lógica	<instr> rd, rs1, imm	xori ori andi
	Deslocamento	<instr> rd, rs1, imm	slli srli srai
	Menor ou Igual	<instr> rd, rs1, imm	slti sltiu
	Load Data	<instr> rd, rs1, imm	lw

Fonte: Patterson e Henessy (2021); Harris e Harris (2022).

Foi criado um repositório no Github com todos os projetos usados nos testes desse trabalho³. Todos os projetos desse repositório foram testados no kit FPGA DE10-Lite e todos funcionaram corretamente. A próxima seção apresenta mais detalhes sobre os testes realizados para verificar o funcionamento do MCU desenvolvido aqui.

3. METODOLOGIA

A primeira subseção apresenta o conteúdo do repositório com o material desse trabalho, a segunda apresenta e explica o programa em Assembly RISC-V usado no primeiro teste do projeto da pasta Proj_RV32IM_03_De10Lite, enquanto a terceira subseção explica o segundo *script* usado no teste do projeto Proj_RV32IM_03_De10Lite.

3.1. Repositório com os arquivos do projeto

O primeiro projeto do repositório, pasta Proj_RV32I_01_ALU_RISC-V, contém um projeto que realiza uma depuração manual da ALU. Os códigos das instruções são selecionados por meio das chaves do kit DE10-Lite e o a das operações aparece nos displays de sete segmentos. O valor do primeiro operando da ALU é 23 e o valor do segundo operando é 3. O resultado dos testes dessa pasta estão disponíveis nos vídeos dentro da pasta.

³ Repositório: https://github.com/dualvim/Repo_TCC_SistEmb

O projeto da pasta Proj_RV32IM_02_De10Lite contém uma subversão do projeto final, onde o módulo principal é testado através do banco de testes descrito no arquivo `testbench.sv` por meio da ferramenta ModelSim®, que acompanha o software Quartus® Prime.

Por fim, o projeto final está na pasta Proj_RV32IM_03_De10Lite, nesta encontram-se os arquivos de descrição do MCU e os arquivos compilados com os programas testados. Os programas compilados realizam diversas operações na CPU e, então, salvam os resultados na memória RAM do MCU. O conteúdo da memória RAM é acessado através da ferramenta In-System Memory Content Editor do Quartus® Prime, após suas execuções.

A próxima subseção apresenta o primeiro programa em Assembly RISC-V usado nos testes.

3.2. Programa em Assembly RISC-V com o primeiro teste

O Quadro 1 apresenta um dos programas em Assembly, presente na pasta Proj_RV32IM_03_De10Lite, que realiza a soma de 0 a 9, armazena o resultado no registrador `x2`, que na sequência tem seu valor copiado para o registrador `x6`, do que é subtraído o valor 44 e o resultado é salvo no registrador `x7`. Por fim, os valores dos registradores `x1` a `x6` são salvos na memória RAM.

Quadro 1 – Script de teste 1: Soma dos valores 1 a 9.

```
# Início
addi x1, x0, 4
addi x2, x0, 0      # x2 = 0 + 0
addi x3, x0, 10     # x3 = 0 + 10
addi x4, x0, 1      # x13 = 0 + 1
addi x5, x0, 0
# Bloco 'loop'
loop:
add x2, x2, x4      # x14 = x13 + x14
addi x4, x4, 1      # x4 = x4 + 1
sub x5, x3, x4
beq x5, x0, label2
beq x4, x4, loop    # Se x4 < x3, voltar 2 linhas
# Linhas executadas após a última execução do bloco 'loop'
label2:
addi x6, x0, 0
add x6, x0, x2      # Copiar para x6 o valor em x2
addi x7, x0, 0
addi x7, x6, -44    # x7 = x6 - 44
# Salvar os dados na memória
sw x1, 0(x1)      # A - MEM[4 + 0] = 4 (0x04)
lw x10, 0(x1)
sw x2, 4(x1)      # B - MEM[4 + 4] = 45 (0x2D)
lw x10, 4(x1)
sw x3, 8(x1)      # C - MEM[4 + 8] = 10 (0x0A)
```

```

lw x10, 8(x1)
sw x4, 12(x1) # D - MEM[4 + 12] = 10 (0x0A)
lw x10, 12(x1)
sw x5, 16(x1) # E - MEM[4 + 16] = 0 (0x00)
lw x10, 16(x1)

sw x7, 20(x1) # F - MEM[4 + 20] = 45 (0x2D)
lw x10, 20(x1)
sw x6, 24(x1) # G - MEM[4 + 24] = 1 (0x01)
lw x10, 24(x1)
# Bloco 'end'
end: beq x0, x0, end # Encerra o programa

```

Fonte: Hoover (2021).

Nos comentários do Quadro 1, as letras “A” à “E” apresentam os valores dos resultados e os respectivos locais destes na Figura 3. A subseção a seguir apresenta o programa em Assembly do segundo teste.

3.3. Programa em Assembly RISC-V com o segundo teste

O Quadro 2 apresenta o segundo programa em Assembly, presente na pasta **Proj_RV32IM_03_De10Lite**, usado no segundo teste. O programa testa as instruções **addi**, **add**, **sub**, **and**, **or**, **xor**, **sll**, **srl**, **sra**, **mul**, **div** e **rem** e escreve os resultados dessas operações na memória RAM.

Quadro 2 – Script de teste 2: Instruções diversas.

```

# Registradores com os valores usados nas operacoes
addi x12, x0, 23
addi x13, x0, 3
# Salvar os valores dos registradores
sw x12, 4(x0) # A - x12 = 23 (0x17)
lw x3, 4(x0)
sw x13, 8(x0) # B - x13 = 3 (0x03)
lw x3, 8(x0)
# 'add'
add x2, x12, x13 # x2 = 26 (0x1A)
sw x2, 12(x0) # C - MEM[16] = 26 (0x1A)
lw x3, 12(x0)
# 'sub'
sub x2, x12, x13 # x2 = 20 (0x14)
sw x2, 16(x0) # D - MEM[20] = 20 (0x14)
lw x3, 16(x0)
# 'and' / 'andi'
and x2, x12, x13 # x2 = 3 (0x03)
sw x2, 20(x0) # E - MEM[24] = 3 (0x03)
lw x3, 20(x0)
# 'or' / 'ori'
or x2, x12, x13 # x2 = 23 (0x17)
sw x2, 24(x0) # F - MEM[28] = 23 (0x17)
lw x3, 24(x0)
# 'xor' / 'xori'
xor x2, x12, x13 # x2 = 20 (0x14)
sw x2, 28(x0) # G - MEM[32] = 20 (0x14)
lw x3, 28(x0)
# 'sll' / 'slli'
sll x2, x12, x13 # x2 = 184 (0xB8)
sw x2, 32(x0) # H - MEM[36] = 184 (0xB8)
lw x3, 32(x0)
# 'srl' / 'srti'
srl x2, x12, x13 # x2 = 2 (0x02)
sw x2, 36(x0) # I - MEM[40] = 2 (0x02)
lw x3, 36(x0)
# 'slt' / 'slti'

```

```

slt x2, x12, x13    # x2 = 0 (0x00)
sw x2, 40(x0)       # J - MEM[44] = 0 (0x00)
lw x3, 40(x0)
# 'sra' / 'srai'
sra x2, x12, x13    # x2 = 2 (0x02)
sw x2, 44(x0)       # K - MEM[48] = 2 (0x02)
lw x3, 44(x0)
# 'mul'
mul x2, x12, x13    # x2 = (x12 * x13)[31:0] = 69 (0x45)
sw x2, 48(x0)       # L - MEM[52] = 69 (0x45)
lw x3, 48(x0)
# 'mulh'
mulh x2, x12, x13   # x2 = (x12 * x13)[63:32] = 0 (0x00)
sw x2, 52(x0)       # M - MEM[56] = 0 (0x00)
lw x3, 52(x0)
# 'div'
div x2, x12, x13    # x2 = x12 / x13 = 7 (0x07)
sw x2, 56(x0)       # N - MEM[60] = 7 (0x07)
lw x3, 56(x0)
# 'rem'
rem x2, x12, x13    # x2 = x12 % x13 = 2 (0x02)
sw x2, 60(x0)       # O - MEM[64] = 2 (0x02)
lw x3, 60(x0)
# Bloco 'end'
end: beq x0, x0, end    # Encerra o programa

```

Fonte: Patterson e Henessy (2021) e Harris e Harris (2022).

Nos comentários do Quadro 2 – *Script* de teste 2: Instruções diversas., as letras “A” à “E” apresentam os valores dos resultados e os respectivos locais destes na Figura 4. Com essas explicações sobre os programas testados, a próxima seção apresenta os resultados dos testes apresentados nessa seção.

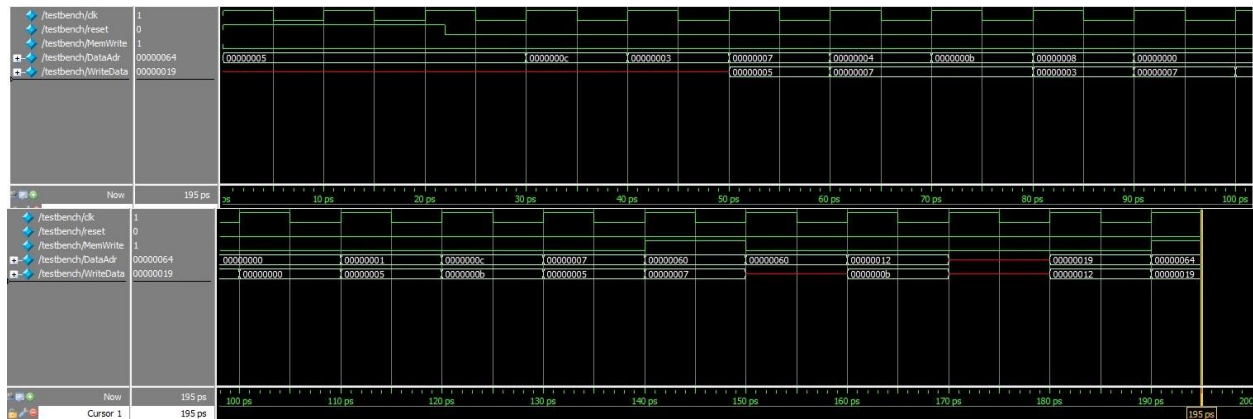
4. RESULTADOS E/OU DISCUSSÕES

A primeira subseção apresenta os testes do projeto da pasta Proj_RV32IM_02_De10Lite. A segunda e a terceira, apresentam os testes no projeto da pasta Proj_RV32IM_03_De10Lite. A última subseção apresenta os diagramas gerados no Quartus® Prime Lite Edition 20.1.1 com os diagramas esquemáticos do hardware criado aqui.

4.1. Resultado das formas de ondas (*waveforms*) da simulação

O projeto da pasta Proj_RV32IM_02_De10Lite é uma versão ampliada do projeto de CPU RV32I *Single-Cycle* apresentado em Harris e Harris (2022), cujo arquivo Assembly não foi apresentado nos quadros anteriores. O resultado da simulação desse projeto é apresentado nas formas de ondas exibidas na Figura 2.

Figura 2 – Forma de onda (*waveform*) da Simulação.



Fonte: Saída gerada pelo ModelSim®.

A Figura 2 apresenta uma simulação do comportamento do programa testado no CI FPGA. Os sinais utilizados na simulação são 1) *clk* (Sinais do *clock*), 2) *reset* (reset assíncrono), 3) *MemWrite* (sinal indicando que está sendo realizada uma operação de escrita), 4) *DataAdr* (endereço de memória onde será realizada uma operação de leitura ou de escrita) e 5) *WriteData* (conteúdo a ser escrito na memória). Conforme enfatizado aqui, o MCU simulado nessa figura é do tipo *single-cycle*, de forma que cada uma das instruções do programa é executada no período de um ciclo de *clock* (HARRIS e HARRIS, 2022). É possível observar que a CPU executa as instruções sempre nas bordas de subida do *clock* (*positive-edge triggered*). Logo, os valores dos sinais *DataAdr* e *WriteData* são atualizados sempre quando o sinal de *clock* é igual a 1.

Tabela 5 – Instruções que geraram os resultados apresentados na Figura 2.

t	Instrução	DataAdr	WriteData	Sobre a Instrução
0 ps	main: addi x2, x0, 5	0x00000005	X	$x2 = 0 + 5 = 5$
30 ps	addi x3, x0, 12	0x0000000C	X	$x3 = 0 + 12 = 12$
40 ps	addi x7, x3, -9	0x00000003	X	$x7 = x3 - 9 = 12 - 9 = 3$
50 ps	or x4, x7, x2	0x00000007	0x00000005	$x4 = x3 \mid x7 = 3 \mid 5 = 7$
60 ps	and x5, x3, x4	0x00000004	0x00000007	$x5 = x3 \& x4 = 12 \& 7 = 4$
70 ps	add x5, x5, x4	0x0000000B	0x00000007	$x5 = x5 + x4 = 4 + 7 = 11$
80 ps	beq x5, x7, end	0x00000008	0x00000003	Se $11 < 7$, ir para "end"
90 ps	slt x4, x3, x4	0x00000000	0x00000007	$x4 = x3 < x4 = 12 < 7 = 0$
100 ps	beq x4, x0, around	0x00000000	0x00000000	Se $x4 == 0$, ir para "around"
110 ps	around: slt x4, x7, x2	0x00000001	0x00000005	$x4 = x7 < x2 = 3 < 5 = 1$
120 ps	add x7, x4, x5	0x0000000C	0x0000000B	$x7 = x4 + x5 = 1 + 11 = 12$
130 ps	sub x7, x7, x2	0x00000007	0x00000005	$x7 = x7 - x2 = 12 - 5 = 7$
140 ps	sw x7, 84(x3)	0x00000060	0x00000007	$DMem[84 + 12] = DMem[96] = 7$
150 ps	lw x2, 96(x0)	0x00000060	X	$x2 = DMem[96 + 0] = DMem[96]$
160 ps	add x9, x2, x5	0x00000012	0x0000000B	$x9 = x2 + x5 = 7 + 11 = 18$
170 ps	j al x3, end	X	X	Ir para "end"; $x3 = IMem[end]$
180 ps	end: add x2, x2, x9	0x00000019	0x00000012	$x2 = x2 + x9 = 7 + 18 = 25$
190 ps	sw x2, 0x20(x3)	0x00000064	0x00000019	$DMem[32 + x3] = DMem[100] = 25$

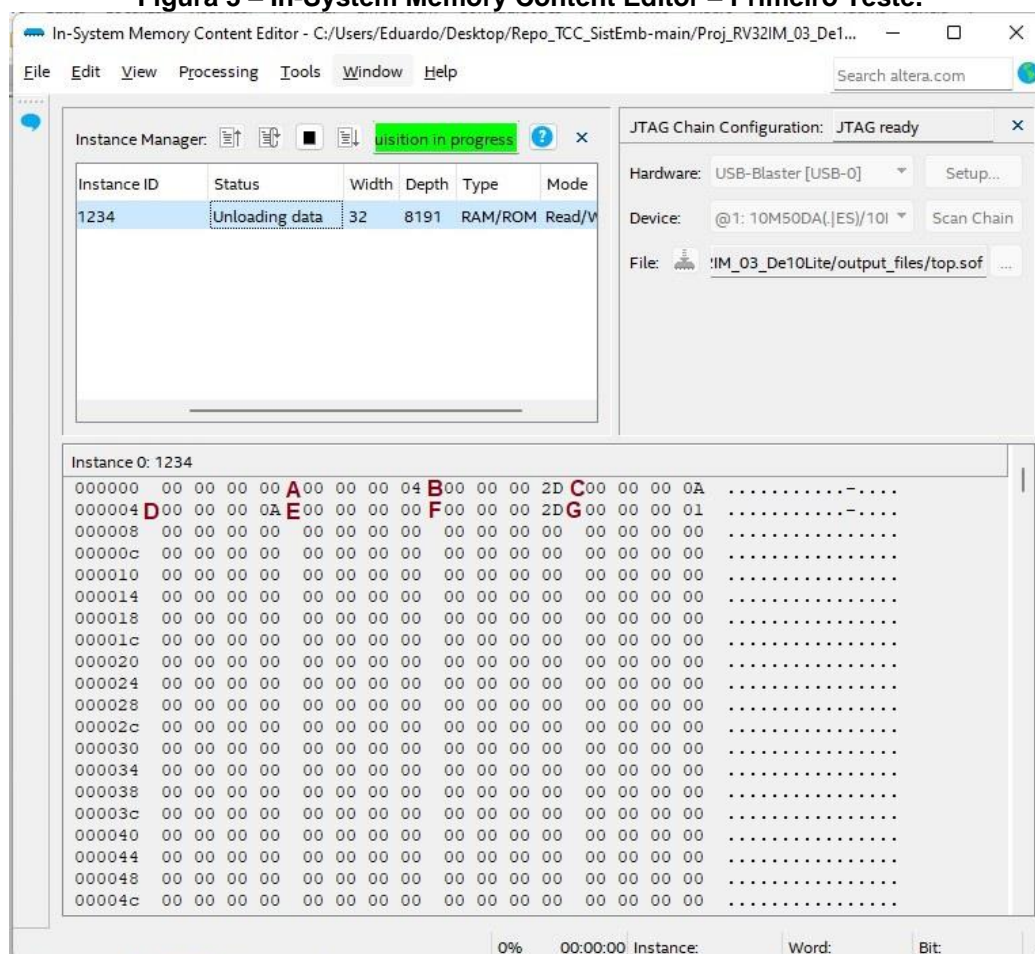
Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 5 apresenta as instruções executadas no início de cada ciclo de *clock* e os respectivos valores dos sinais *DataAdr* e *WriteData* após a execução de cada instrução, conforme ilustrado graficamente na Figura 2. Os resultados apresentados na figura e na tabela são iguais aos resultados obtidos na simulação do exemplo original e, com isso, indicam que o código do microcontrolador implementado aqui está correto e foi executado de acordo com o esperado. Com os resultados confirmados, a próxima etapa foi testar os programas em Assembly RISC-V criados para esse trabalho.

4.2. Projeto Proj_RV32IM_03_De10Lite, primeiro teste

Nesse primeiro teste, foi testado o programa que realiza a soma dos números de 0 a 9. No Quadro 1 foram indicados os valores esperados em cada endereço da memória de dados (memória RAM) ao final da execução. Destaque para o valor da soma, 45 (0x2D), que foi salvo nos endereços de memória 0x08 e 0x20. Na Figura 3 é possível confirmar esses resultados, onde cada letra nessa figura corresponde ao resultado indicado na respectiva instrução do Quadro 1.

Figura 3 – In-System Memory Content Editor – Primeiro Teste.



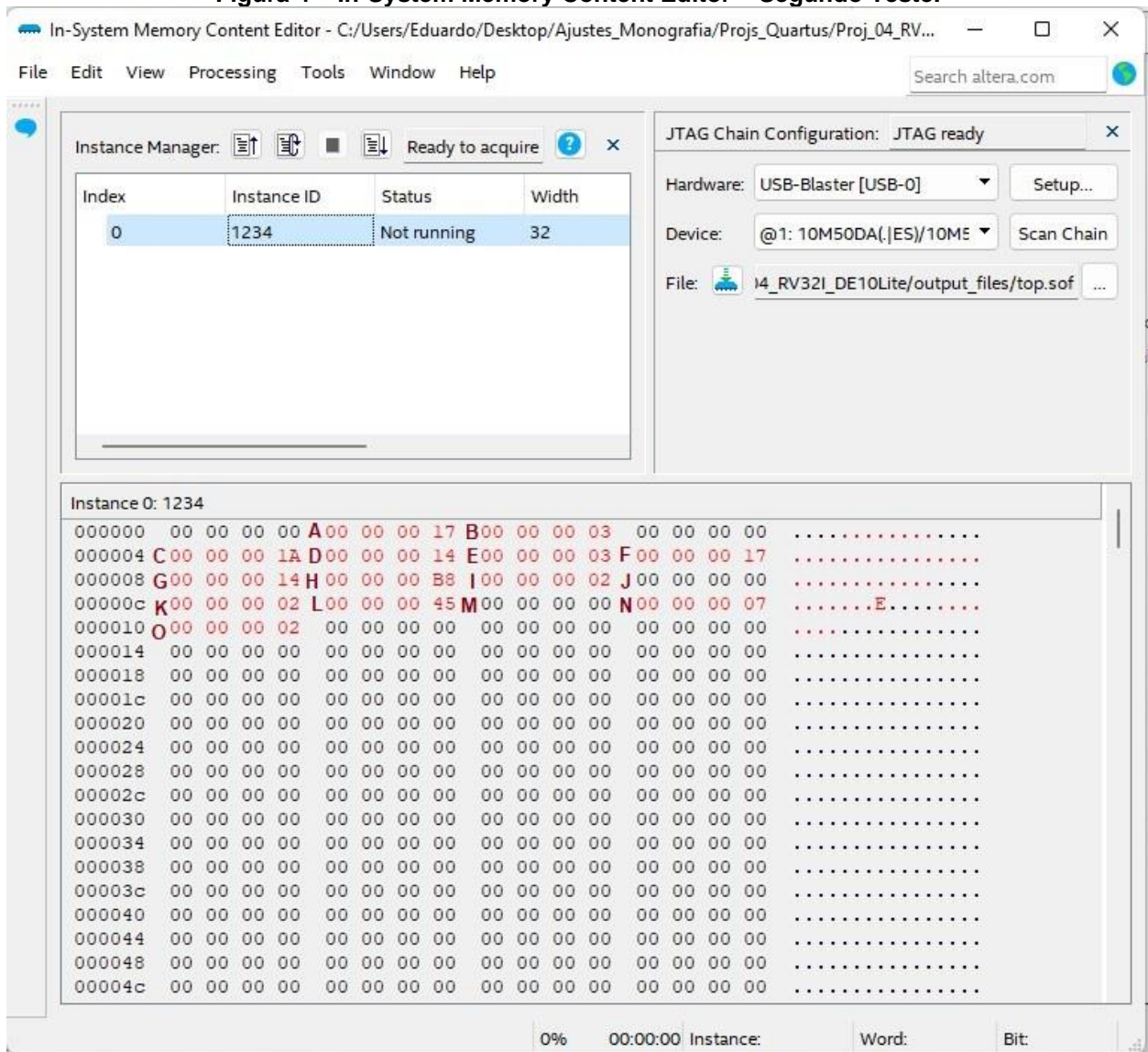
Fonte: Captura de tela do Quartus Prime 20.1.1 Lite Edition.

Esse primeiro programa apenas testa algumas poucas instruções elementares disponíveis no conjunto RV32IM. A próxima subseção realiza um teste mais abrangente, testando um número maior de instruções diferentes.

4.3. Projeto Proj_RV32IM_03_De10Lite, segundo teste

Os resultados da execução do segundo programa, apresentado no Quadro 2, estão apresentados na Figura 4. Assim como no exemplo da subseção anterior, os valores esperados indicados nas letras dos comentários das instruções do Quadro 2 foram exatamente os mesmos que foram salvos na memória RAM da CPU desenvolvida aqui.

Figura 4 – In-System Memory Content Editor – Segundo Teste.



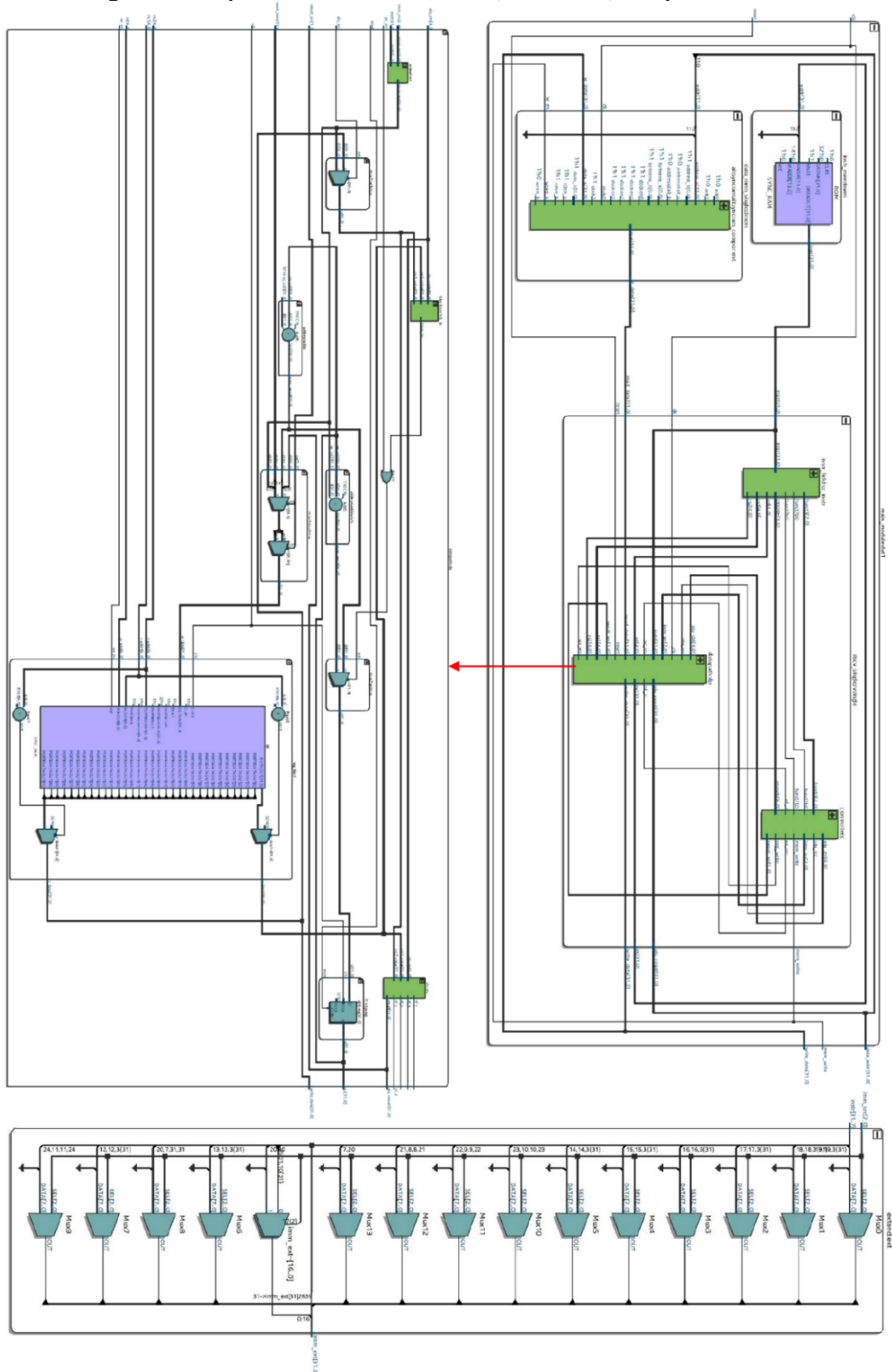
Fonte: Captura de tela do Quartus Prime 20.1.1 Lite Edition.

Os resultados obtidos demonstram que o MCU desenvolvido aqui é capaz de executar as instruções do conjunto base da ISA RISC-V (RV32I) e, também, as instruções de multiplicação, divisão e resto do subconjunto RV32M, instruções essas exclusivas para números inteiros.

4.4. Diagramas esquemáticos do projeto

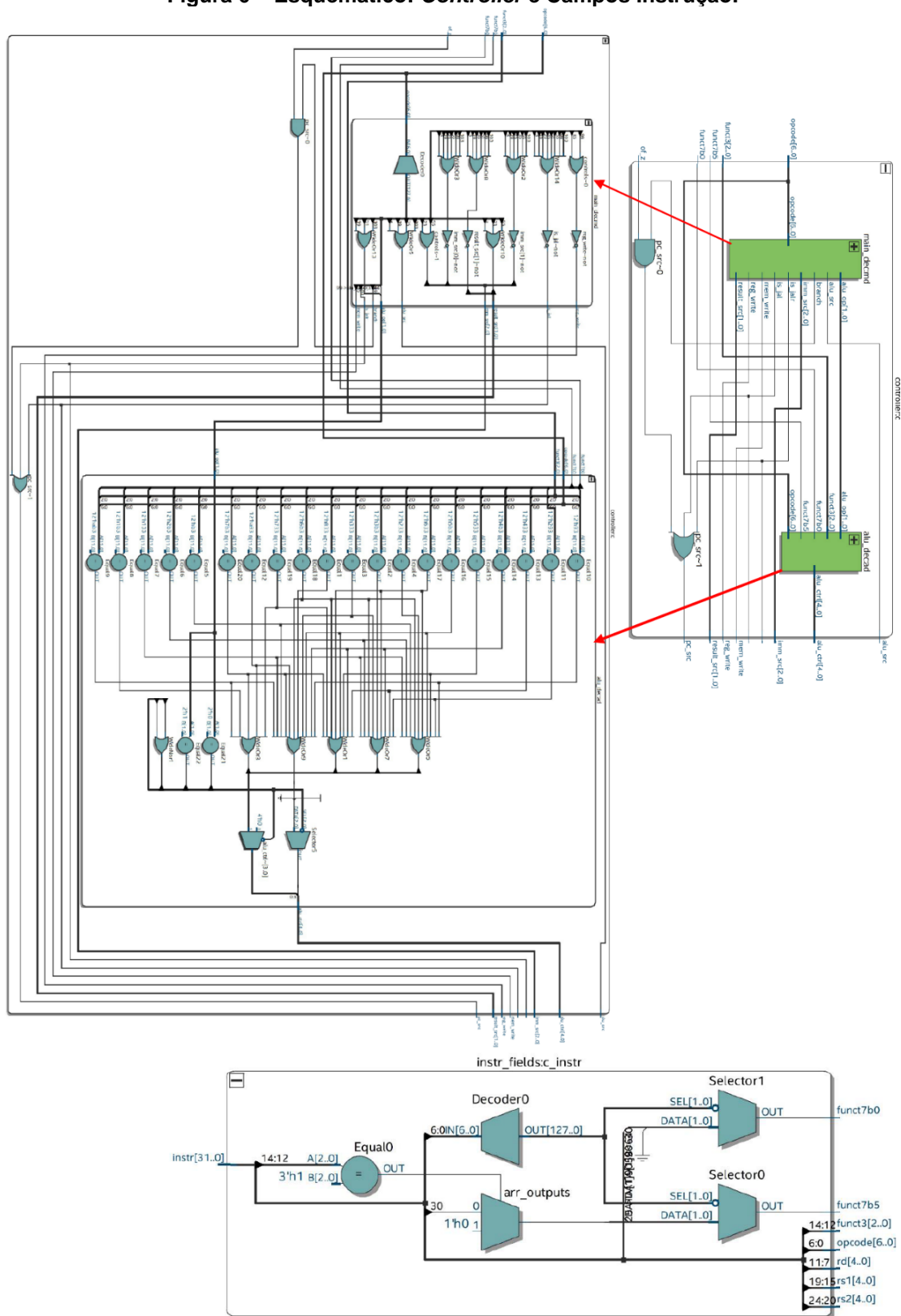
A Figura 5 e a Figura 6 apresentam os diagramas esquemáticos da CPU e dos principais módulos desenvolvidos. Eles foram gerados por meio da ferramenta RTL Viewer do Quartus® Prime Lite Edition. Apesar da inclusão dessas figuras aqui, somente é possível obter uma visão melhor e mais detalhada desse conteúdo através da ferramenta RTL Viewer.

Figura 5 – Esquemático: Núcleo do MCU, Memórias, *Datapath* e extend.



Fonte: Diagrama gerado no RTL Viewer do Quartus Prime 20.1.1 Lite Edition.

Figura 6 – Esquemático: **Controller e Campos Instrução.**



Fonte: Diagrama gerado no RTL Viewer do Quartus Prime 20.1.1 Lite Edition.

5. CONCLUSÃO

O trabalho apresentou o desenvolvimento de um MCU (microcontrolador) RISC-V de 32 bits que implementa o conjunto de instruções básico da ISA, mais as operações de divisão e multiplicação (conjunto de instruções RV32IM). O núcleo desenvolvido possui uma microarquitetura do tipo “*single-cycle*”, que executa uma única instrução a cada ciclo de *clock*, algo razoavelmente adequado considerando o contexto de um microcontrolador.

Toda validação deste desenvolvimento foi feita utilizando-se um CI FPGA da família Altera®/Intel® MAX 10 presente no kit DE10-Lite. Para isso, *scripts* em Assembly RISC-V foram enviados para a CPU, que após executá-los, salvou os resultados das operações em sua RAM. Esta foi analisada através da ferramenta In-System Memory Content Editor e pode-se confirmar 100% de sucesso na interpretação, execução e armazenamento dos resultados.

Os resultados obtidos qualificam o microcontrolador desenvolvido de acordo com a ISA RISC-V como funcional e apto a executar as instruções do conjunto RV32IM. Para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de versões mais robustas da CPU, como a inclusão de *pipelines*, de modo a melhorar o desempenho da CPU criada aqui. Além disso, sugere-se o uso em aplicações reais e comparativos com outras arquiteturas já consolidadas e amplamente utilizadas no meio profissional e acadêmico.

6. REFERÊNCIAS

- ASANOVIĆ, K.; PATTERSON, D. A. **Instruction Sets Should Be Free: The Case For RISC-V**. UC Berkeley. Berkeley, p. 7. 2014.
- BAILEY, B. Why RISC-V Is Succeeding. **Semiconductor Engineering**, 24 abr. 2022. Disponível em: <<https://semiengineering.com/why-risc-v-is-succeeding/>>.
- BAINES, R. Differentiation And Architecture Licenses In RISC-V, 26 maio 2022. Disponível em: <<https://semiengineering.com/differentiation-and-architecture-licenses-in-risc-v/>>.
- BAYLEY, B. Why RISC-V Is Succeeding. **Semiconductor Engineering**, 24 abr. 2022. Disponível em: <<https://semiengineering.com/why-risc-v-is-succeeding/>>.
- CHU, P. P. **Embedded SOPC Design with NIOS II Processor and Verilog Examples**. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012. ISBN 978-1-118-01103-4.
- CORDING, S. What Is RISC-V? An In-Depth introduction to the RISC-V Instruction Set Architecture. **Elektor Magazine**, 2021. Disponível em: <<https://www.elektormagazine.com/articles/what-is-risc-v>>.
- DAHAD, N. SiFive Raises \$175M To Quicken ‘Arm Intercept’ Strategy. **EE Times**, 16 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.eetimes.com/sifive-raises-175m-to-quicken-arm-intercept-strategy/>>.
- EE TIMES. Why RISC-V Lags in China. **EE Times**, 15 nov. 2018. Disponível em: <<https://www.eetimes.com/why-risc-v-lags-in-china/>>.
- EE TIMES. Allwinner launches the first RISC-V application processor. **EE Times**, 15 abr. 2021. Disponível em: <<https://www.eetimes.com/allwinner-launches-the-first-risc-v-application-processor/>>.
- ENGHEIM, E. What Does RISC and CISC Mean in 2020? **Medium**, 27 jul. 2020. Disponível em: <<https://medium.com/swlh/what-does-risc-and-cisc-mean-in-2020-7b4d42c9a9de>>.
- ENGHEIM, E. What Is Innovative About RISC-V? **Medium**, 24 dez. 2020. Disponível em: <<https://medium.com/swlh/what-is-innovative-about-risc-v-a821036a1568>>.
- ENGHEIM, E. RISC-V Is The King of Heterogenous Computing. **Medium**, 06 jan. 2022. Disponível em: <<https://erik-engheim.medium.com/risc-v-the-king-of-heterogenous-computing-11b47649e691>>.
- ENGHEIM, E. The Case for RISC-V on Desktops and Servers. **Medium**, 06 jan. 2022. Disponível em: <<https://erik-engheim.medium.com/the-case-for-risc-v-on-desktops-and-severs-60b0106c636b>>.
- HARRIS, S. L.; HARRIS, D. M. **Digital Design and Computer Architecture - RISC-V Edition**. Cambridge, MA: Morgan Kaufmann, 2022. ISBN 978-0-12-820064-3.
- HOOVER, S. Building a RISC-V CPU Core. **Linux Foundation/edX**, 2021. Disponível em: <<https://www.edx.org/course/building-a-risc-v-cpu-core>>.
- HRUSKA, J. Intel Announces Billion-Dollar Development Fund, Boosts RISC-V Processors. **ExtremeTech**, 09 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.extremetech.com/extreme/331461-intel-announces-billion-dollar-development-fund-boosts-risc-v-processors>>.

HRUSKA, J. Intel Plans to License Hybrid Chips That Combine ARM, RISC-V, and x86. **ExtremeTech**, 2022. Disponivel em: <<https://www.extremetech.com/computing/331740-intel-plans-to-license-cores-that-combine-arm-risc-v-and-x86>>.

HRUSKA, J. ARM Kills Its RISC-V FUD Website After Staff Revolt. **ExtremeTech**, 12 ago. 2018. Disponivel em: <<https://www.extremetech.com/computing/273236-arm-kills-its-risc-v-fud-website-after-staff-revolt>>.

HRUSKA, J. Cut Off From ARM, x86, What CPU Architectures Can Huawei Use? **ExtremeTech**, 23 maio 2019. Disponivel em: <<https://www.extremetech.com/computing/291875-cut-off-from-arm-x86-what-cpu-architectures-can-huawei-actually-use>>.

HRUSKA, J. Western Digital's RISC-V 'Swerv' Core Now Available for Free. **ExtremeTech**, 15 fev. 2019. Disponivel em: <<https://www.extremetech.com/computing/285856-western-digitals-risc-v-swerv-core-now-available-for-free>>.

HRUSKA, J. Intel Will Offer SiFive RISC-V CPUs on 7nm, Plans Own Dev Platform. **ExtremeTech**, 24 jun. 2021. Disponivel em: <<https://www.extremetech.com/computing/324075-intel-will-offer-sifive-risc-v-cpus-on-7nm-plans-own-dev-platform>>.

HRUSKA, J. Rumor: Intel May Buy RISC-V CPU Designer SiFive to Fend off ARM. **ExtremeTech**, 11 jun. 2021. Disponivel em: <<https://www.extremetech.com/computing/323647-rumor-intel-may-buy-risc-v-cpu-designer-sifive-to-fend-off-arm>>.

HRUSKA, J. Russia to Build 8-Core RISC-V CPUs for Laptops, Government Systems. **ExtremeTech**, 15 jul. 2021. Disponivel em: <<https://www.extremetech.com/computing/324735-russia-to-build-8-core-risc-v-cpus-for-laptops-government-systems>>.

LEDIN, J. **Modern Computer Architecture and Organization**: Learn x86, ARM, and RISC-V architectures and the design of smartphones, PCs, and cloud servers. Birmingham: Packt Publishing, 2020. ISBN 978-1-83898-439-7.

LINUX FOUNDATION. **Introduction to RISC-V**. [S.l.]: [s.n.], 2021. Disponivel em: <<https://www.edx.org/course/introduction-to-risc-v>>.

MARENA, T. 11 Myths About the RISC-V ISA. **Electronic Design**, 31 jan. 2018. Disponivel em: <<https://www.electronicdesign.com/technologies/embedded-revolution/article/21806096/11-myths-about-the-riscv-isa>>.

MERRIT, R. Google, HP, Oracle Join RISC-V. **EE Times**, 28 dez. 2015. Disponivel em: <<https://www.eetimes.com/google-hp-oracle-join-risc-v/>>.

MOORE, S. K. RISC-V AI Chips Will Be Everywhere. **IEEE Spectrum**, 24 fev. 2022. Disponivel em: <<https://spectrum.ieee.org/risc-v-ai>>.

NISSAM, N.; SCHOCKEN, S. **The Elements of Computing Systems**. 2a. ed. Cambridge: The MIT Press, 2021. ISBN 9780262539807.

PATTERSON, D. A.; DITZEL, D. R. The Case for the Reduced Instruction Set Computer. **ACM SIGARCH Computer Architecture News**, 8, n. 6, 1980. 25–33.

PATTERSON, D. A.; HENESSY, J. L. **Computer Organization and Design - RISC-V Edition**. 2a. ed. Cambridge: Morgan Kaufmann, 2021. ISBN 978-0-12-820331-6.

PATTERSON, D.; WATERMAN, A. S. **Guia Prático RISC-V: Atlas de uma arquitetura aberta**. 1a. ed. San Francisco: Strawberry Canyon LLC, 2017. ISBN 978-0-9992491-1-6.

RISC-V INTERNATIONAL. **The RISC-V Instruction Set Manual - Unprivileged ISA**. Berkeley: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://riscv.org/technical/specifications/>>.

SPERLING, E. Which Processor Is Best? **Semiconductor Engineering**, 01 mar. 2022. Disponível em: <<https://semiengineering.com/which-processor-is-best/>>.

TERASIC. **DE10-Lite User Manual**. [S.l.]: [s.n.], 2020.

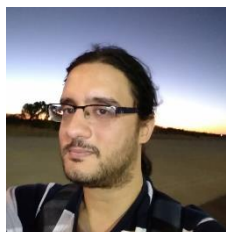
TURLEY, J. Why Universities Want RISC-V. **EE Journal**, 27 out. 2020. Disponível em: <<https://www.eejournal.com/article/why-universities-want-risc-v/>>.

URQUHART. Is RISC-V The Future? **Semiconductor Engineering**, 29 jul. 2021. Disponível em: <<https://semiengineering.com/is-risc-v-the-future/>>.

WATERMAN, A. S. **Design of the RISC-V Instruction Set Architecture**. University of California, Berkeley. Berkeley, p. 117. 2016.

WESTERN DIGITAL. **RISC-V and Open Source Hardware Address New Compute Requirements**. Western Digital. San Jose, p. 8. 2019.

7. SOBRE OS AUTORES



Eduardo Alvim Guedes Alcoforado

Possui graduação em 'Economia Empresarial e Controladoria' (ECEC) pela Universidade de São Paulo (2011), especialização em 'Data Science' por Johns Hopkins University-Coursera (2016), Mestrado em Ciências Contábeis pela Universidade Federal de Uberlândia (2017). Pós-Graduado (*Latu Sensu*) em Sistemas Embarcados pela Escola SENAI Anchieta (2022), com monografia defendida na área de FPGAs (*Field-Programmable Gate Array*) e desenvolvimento de CPUs RISC-V. Possui experiência prática em projetos usando microcontroladores e, também, no desenvolvimento de sistemas e soluções computacionais nas áreas de Contabilidade, Economia, Finanças e Investimentos em geral.

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/0205554239317512>



Leandro Poloni Dantas (Orientador)

Doutor em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário FEI, cuja tese apresenta proposta arquiteturas alternativas para projetos de processadores e microcontroladores com foco em sistemas de tempo real. Possui

graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica (2004) e mestrado também em Engenharia Elétrica na área de Dispositivos Eletrônicos Integradas (2008) ambos pelo Centro Universitário FEI. Dissertou sobre estudo de distorção harmônica em transistores MOSFET de porta circular. Atuou por 15 anos na indústria eletrônica no desenvolvimento de novos produtos para diferentes segmentos, com foco principal no projeto de equipamentos eletrônicos para o mercado de segurança eletrônica e automação predial. Desde 2009, vem lecionando em cursos de pós-graduação, graduação e de nível técnico em diferentes instituições paulistanas. Publicou livros sobre eletrônica digital e microcontroladores.

Currículo Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6255986062207024>