

Projeto de uma Unidade de Controle

Versão 2026

OBJETIVOS

Após a conclusão desta experiência, os seguintes tópicos devem ser conhecidos pelos alunos:

- Projeto da unidade de controle de um circuito digital;
- Projeto hierárquico de circuitos digitais com fluxo de dados e unidade de controle;
- Codificação de uma máquina de estados em Verilog;
- Simulação com ModelSim;
- Síntese em uma placa FPGA, usando Intel Quartus Prime.

RESUMO

Esta experiência tem como objetivo o estudo do desenvolvimento do projeto da unidade de controle de um circuito digital simples usando Verilog. A estrutura da unidade de controle é desenvolvida a partir de um pseudocódigo. Essa unidade de controle deve ser usada em conjunto com um fluxo de dados baseado no circuito da Experiência 2 para compor um sistema digital completo.

1. PARTE EXPERIMENTAL

A parte experimental desta experiência visa desenvolver a unidade de controle de um circuito digital. O projeto deve ser sintetizado para a placa DE0-CV. Posteriormente, deve-se executar um estudo detalhado de seu funcionamento, através da execução de um plano de testes minucioso. Esta experiência será dividida em algumas atividades, onde o projeto será desenvolvido em algumas etapas, de forma incremental.

1.1. Atividade 1 – Projeto Lógico de um Sistema Digital

Nesta primeira atividade, será desenvolvido o projeto lógico da unidade de controle de um sistema digital simples, tendo como base os resultados dos estudos do fluxo de dados da Experiência 2.

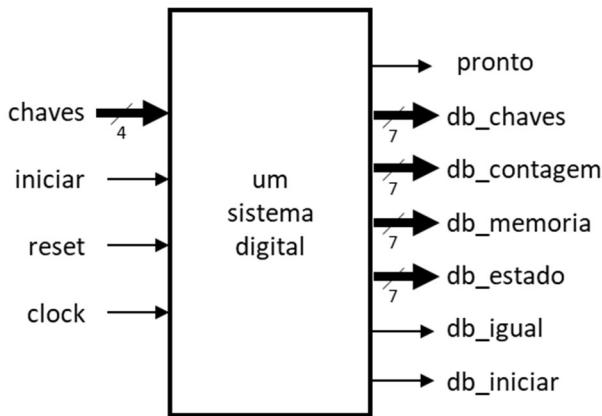
1.1.1. Especificação do Sistema Digital

Inicialmente apresentamos a especificação do sistema digital da experiência na forma de uma descrição funcional. A partir desta descrição, parte-se para a elaboração de um pseudocódigo.

- Considere um sistema digital simples com a interface externa de sinais conforme diagrama de blocos da Figura 1. As saídas de depuração `db_chaves`, `db_contagem`, `db_memoria` e `db_estado` devem ser apresentadas em displays de 7 segmentos da placa FPGA. O **funcionamento desse sistema digital**, cujas interfaces são representadas na Figura 1, deve seguir a **descrição** subsequente:

"O circuito do sistema digital sequencial inclui um conjunto de 16 dados de 4 bits que é armazenado em uma memória interna, cujos endereços são percorridos por meio de um contador interno. Depois do acionamento do sinal `reset`, o circuito deve aguardar o início de sua operação, que é realizado com o acionamento do sinal de entrada `iniciar`, replicada na saída de depuração `db_iniciar`. Depois de iniciar seu funcionamento, o circuito deve armazenar o valor das chaves de entrada (sinal `chaves`) e depois comparar o conteúdo armazenado das chaves com o respectivo dado da memória e deve indicar o resultado da comparação na saída de depuração `db_igual`. O conteúdo armazenado das chaves é apresentado na saída de depuração `db_chaves`. Em seguida, o contador interno deve ser incrementado para posicionar o endereçamento da memória para permitir o acesso ao próximo dado da memória. As saídas de depuração `db_contagem` e `db_memoria` indicam, respectivamente, o endereço e o dado armazenado pela memória, ao passo que a saída de depuração `db_estado`, por sua vez, deve indicar o código do estado vigente da Unidade de Controle em determinado instante do funcionamento do sistema digital¹. O ciclo de comparação e reposicionamento da memória deve prosseguir até que todos os 16 dados sejam verificados. Ao final da operação, o sinal de saída `pronto` deve ser acionado por um período de clock. Depois disso, o circuito deve voltar para o estado inicial para aguardar a próxima ativação de `iniciar`."

¹ Para mais detalhes sobre a codificação dos estados da Unidade de Controle, consulte o código fonte em Verilog.

**Figura 1: Diagrama de Blocos da Interface Externa de Sinais do Circuito para a Atividade 1**

O funcionamento do sistema digital da Figura 1 pode ser descrito pelo **pseudocódigo** da Figura 2.

```

Algoritmo: um sistema digital simples
entradas: iniciar, chaves
saiadas: pronto
depuração: chaves, contagem, memória, estado, igual, iniciar
1. {
2.     while (verdadeiro) {
3.         espera acionamento do sinal iniciar
4.         inicia circuito para condições iniciais
5.         while (não atingiu o último dado) {
6.             compara chaves de entrada com dados armazenados e atualiza saídas
7.             incrementa contador interno
8.         }
9.         ativa saída pronto
10.    }
11. }
```

Figura 2: Pseudocódigo do Sistema Digital da Experiência

Adote a definição para a entidade principal do circuito conforme apresentada na Figura 3. O sinal de depuração `db_iniciar` é usado para verificar o acionamento da entrada `iniciar` do circuito sintetizado para a placa de desenvolvimento com FPGA DE0-CV.

```

module circuito_exp3 (
    input          clock,
    input          reset,
    input          iniciar,
    input [3:0]    chaves,
    output         pronto,
    output         db_igual,
    output         db_iniciar,
    output [6:0]   db_contagem,
    output [6:0]   db_memoria,
    output [6:0]   db_chaves,
    output [6:0]   db_estado
);
```

Figura 3: Módulo Principal do Sistema Digital da Atividade 1

Internamente, o circuito deve ser composto por dois componentes internos, um fluxo de dados e uma unidade de controle, conforme diagrama (gerado pela ferramenta RTL Viewer do Intel Quartus Prime) apresentado na Figura 4. Os codificadores para *displays* de 7 segmentos servem para que os sinais das saídas de depuração do circuito sejam visualizáveis nos *displays* da placa FPGA.

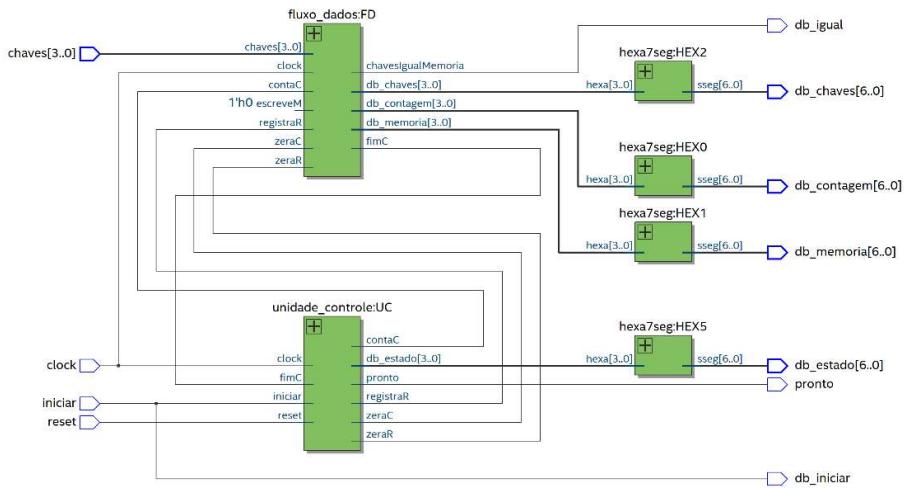


Figura 4: Diagrama de Blocos da Estrutura Interna do Circuito da Experiência

Nos itens seguintes, apresentam-se tarefas específicas para cada um dos componentes do circuito.

1.1.2. Adaptação do Projeto Lógico do Fluxo de Dados

Em primeiro lugar, o fluxo de dados estudado na Experiência 2 será adaptado para incluir um registrador e uma memória. Depois de um breve estudo dos componentes Verilog correspondentes, o circuito da experiência anterior deve ser adaptado para compor o projeto deste item.

Projeto Lógico do Fluxo de Dados

- b) A Figura 5 ilustra um diagrama de blocos do fluxo de dados da experiência. Compare-o com o fluxo de dados da experiência anterior e analise as diferenças.

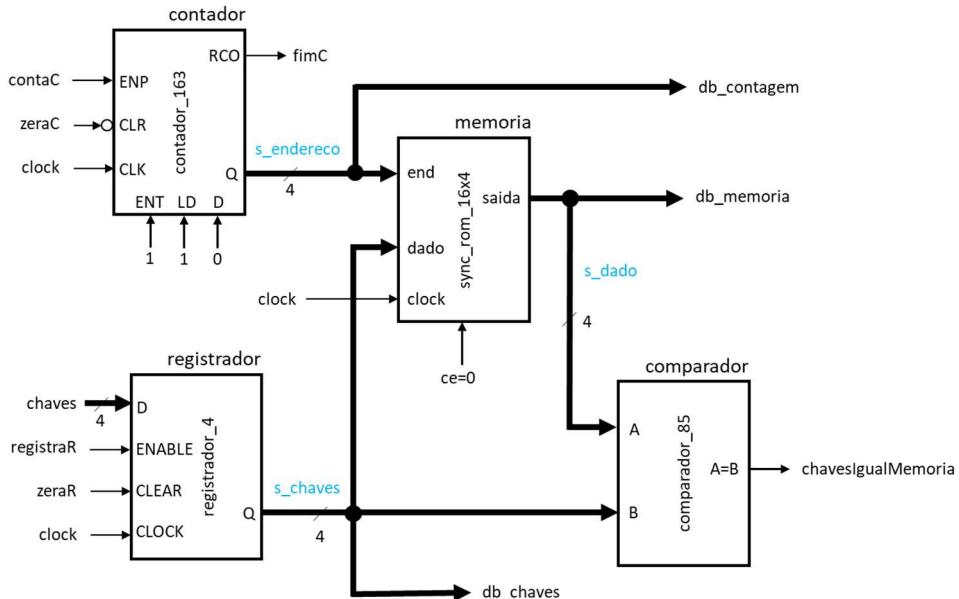


Figura 5: Diagrama de Blocos da Estrutura Interna do Fluxo de Dados

Estude o funcionamento dos componentes `registrarR_4.v` e `sync_rom_16x4.v` (fornecidos no e-Disciplinas) e seu uso em um projeto.

O código do fluxo de dados deve ser baseado no circuito projetado na experiência anterior. Revise o código, modifique as identificações da entidade e dos sinais, atualize-o para acrescentar o registrador e a memória

e armazene-o no arquivo `exp3_fluxo_dados.v` com uma adaptação do módulo Verilog conforme a definição subsequente (Figura 6).

```
module exp3_fluxo_dados (
    input      clock,
    input [3:0] chaves,
    input      zeraR,
    input      registraR,
    input      contaC,
    input      zeraC,
    output     chavesIgualMemoria,
    output     fimC,
    output [3:0] db_contagem,
    output [3:0] db_chaves,
    output [3:0] db_memoria
);

```

Figura 6: Módulo Verilog do Componente do Fluxo de Dados

Verificação do fluxo de dados e simulação com ModelSim

- c) O circuito do fluxo de dados pode ser verificado com o Plano de Testes da Tabela 1. Estude os testes e descreva no Planejamento como esse plano aciona todos os componentes e as ligações entre eles para verificar o correto funcionamento do circuito. Na tabela, alguns resultados relevantes estão marcados em azul.

Simule o circuito do fluxo de dados usando o arquivo de *testbench* fornecido (`exp3_fluxo_dados_tb.v`) com o ModelSim. Anexe as formas de onda obtidas e anote a figura² com algumas anotações dos resultados dos testes. Por exemplo, a Figura 7 exemplifica duas anotações na saída de formas de onda do ModelSim, mostrando o ponto em que o valor das chaves é registrado e a indicação do final do percurso da memória.

DICA: Garanta que sua figura seja legível no planejamento. Se necessário, divida a figura em partes, identificando os casos do plano de testes de cada porção (linhas da Tabela 1) no texto.



Figura 7: Exemplos de anotações na saída de formas de onda do ModelSim

² A anotação das formas de onda consiste em inserir explicações e pontos de destaque para explicitar certos detalhes de funcionamento e auxiliar a documentação do projeto. O uso de cores permite dar destaque e melhorar a visualização das anotações.

Tabela 1: Plano de Testes para o Circuito do Fluxo de Dados

#	Operação	Sinais de controle	Resultado esperado
c.i.	Condições iniciais (todas as entradas desativadas)	clock=0, zeraC=0, contaC=0, zeraR=0, registaR=0, chaves=0000	chavesIgualMemoria=0, fimC=0, db_contagem=0000, db_memoria=0001, db_chaves=0000
1	Zerar contador e registrador (manter outras entradas desativadas)	zeraC=1, zeraR=1, clock ↑	chavesIgualMemoria=0, fimC=0, db_contagem=0000, db_memoria=0001, db_chaves=0000
2	Verificar saídas com chaves=0001 (manter outras entradas desativadas)	zeraC=0, contaC=0, zeraR=0, registaR=0, chaves=0001, clock ↑	chavesIgualMemoria=0, fimC=0, db_contagem=0000, db_memoria=0001, db_chaves=0000
3	Registrar chaves com chaves=0001 (manter outras entradas desativadas)	chaves=0001, registrarR=1, clock ↑	chavesIgualMemoria=1, fimC=0, db_contagem=0000, db_memoria=0001, db_chaves=0001
4	Verificar saídas com chaves=0001 (manter outras entradas desativadas)	chaves=0001, clock ↑	chavesIgualMemoria=1, fimC=0, db_contagem=0000, db_memoria=0001, db_chaves=0001
5	Incrementar contador (manter outras entradas desativadas)	contaC=1, clock ↑	chavesIgualMemoria=0, fimC=0, db_contagem=0001, db_memoria=0010, db_chaves=0001
6	Registrar chaves com chaves=0010 (manter outras entradas desativadas)	chaves=0010 clock ↑	chavesIgualMemoria=1, fimC=0, db_contagem=0001, db_memoria=0010, db_chaves=0010
7	Verificar saídas com chaves=0010 (manter outras entradas desativadas)	chaves=0010 clock ↑	chavesIgualMemoria=1, fimC=0, db_contagem=0001, db_memoria=0010, db_chaves=0010
8	Incrementar contador (manter outras entradas desativadas)	contaC=1, clock ↑	chavesIgualMemoria=0, fimC=0, db_contagem=0010, db_memoria=0100, db_chaves=0010
9	Registrar chaves com chaves=1000 (manter outras entradas desativadas)	chaves=1000 clock ↑	chavesIgualMemoria=0, fimC=0, db_contagem=0010, db_memoria=0100, db_chaves=1000
10	Verificar saídas com chaves=1000 (manter outras entradas desativadas)	chaves=1000 clock ↑	chavesIgualMemoria=0, fimC=0, db_contagem=0010, db_memoria=0100, db_chaves=1000
11	Incrementar contador até final da contagem	contaC=1 clock ↑ (13x)	chavesIgualMemoria=0, fimC=1, db_contagem=1111, db_memoria=0100, db_chaves=1000

1.1.3. Estudo do Projeto Lógico de uma Unidade de Controle

Agora, será introduzido como uma unidade de controle pode ser projetada a partir do pseudocódigo do sistema digital.

- d) O projeto da **Unidade de Controle (UC)** pode ser iniciado pelo pseudocódigo do circuito. Uma análise do algoritmo de funcionamento do circuito apresentado no item 1.1-a) resulta na **máquina de estados de alto nível** da Figura 8. Observe que, no diagrama, os estados possuem nomes, e todos os comandos (saídas da UC) e condições de transições (entradas da UC) estão escritos em linguagem natural.

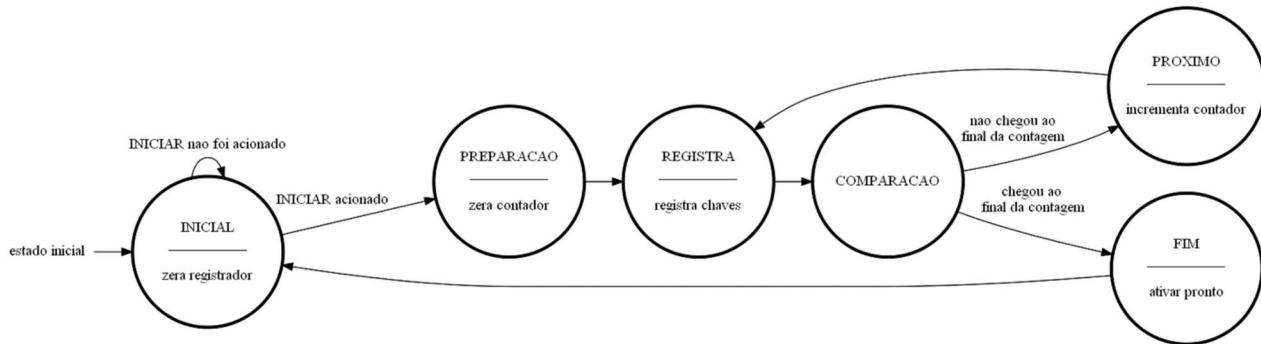


Figura 8: Diagrama de Transição de Alto Nível do Circuito para a Atividade 1

Repare que algumas operações internas do circuito (p.ex., comparação entre dados das chaves e da memória) não são apresentadas nesta máquina de estados por serem de responsabilidade do **fluxo de dados**. As operações apresentadas relacionam-se apenas aos **sinais de controle** do circuito, cuja geração automática fica sob responsabilidade da Unidade de Controle.

Os comandos de alto nível da máquina de estados devem ser traduzidos para sinais de controle³ dos elementos do fluxo de dados do circuito digital. O diagrama de transição de estados da unidade de controle resultante é apresentado na Figura 9.

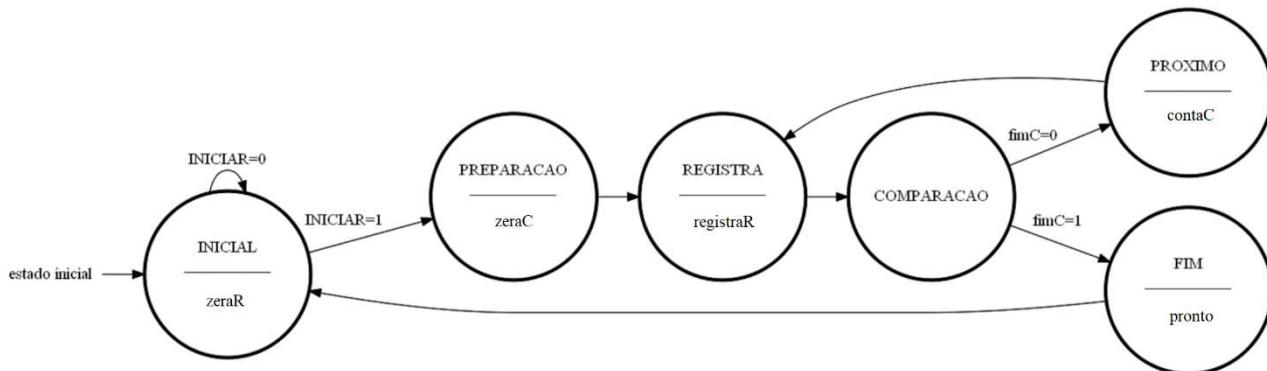


Figura 9: Diagrama de Transição de Estados da Unidade de Controle do Circuito para a Atividade 1

Repare, também, que o diagrama de transição de estados da Figura 9 apresenta os sinais de controle do fluxo de dados associados ao respectivo comando de alto nível do diagrama da Figura 8. Em seguida, note que, nas transições de estados, cada sinal avaliado corresponde ou a um sinal gerado pelo fluxo de dados⁴ (cada sinal desses é, também, conhecido como **sinal de condição**), ou a um sinal de entrada de controle do circuito (p.ex., *iniciar*).

³ Cada comando de alto nível deve ser traduzido pelo sinal de controle correspondente. Por exemplo, o comando *zerar registrador* é traduzido pelo sinal *zeraR*. Os sinais de controle de todos os elementos do fluxo de dados podem ser verificados na Figura 5.

⁴ A Figura 5 mostra o diagrama de blocos do fluxo de dados, no qual o sinal de condição *fimC* é gerado pelo contador interno. Verifique que essa saída é originada do sinal RCO de *contador_163*.

- e) O componente Verilog da unidade de controle segue a definição subsequente (Figura 10). Seu código-fonte (arquivo `exp3_unidade_controle.v`) está disponível no material da experiência no e-Disciplinas.

```
module exp3_unidade_controle (
    input      clock,
    input      reset,
    input      iniciar,
    input      fimC,
    output reg zeraC,
    output reg contaC,
    output reg zeraR,
    output reg registraR,
    output reg pronto,
    output reg [3:0] db_estado
);
```

Figura 10: Módulo Verilog do componente da unidade de controle

Estude o código Verilog fornecido e analise a tradução dos elementos da máquina de estado da Unidade de Controle (memória de estado, lógica de próximo estado e lógica de saída) para comandos Verilog. **Verifique se há alguma inconsistência nessa tradução.** Anote suas conclusões no Planejamento.

1.1.4. Projeto do Sistema Digital

Em seguida, conclui-se o projeto do circuito da experiência elaborando o componente principal. A verificação funcional do circuito será realizada por meio de simulações usando o software ModelSim.

- f) Elabore o projeto do componente principal do circuito da experiência usando a definição da entidade apresentada na Figura 3. Adote uma descrição estrutural tal como ilustrado na Figura 4.
- g) Considere o **Plano de Testes** da Tabela 2 para o circuito da Experiência. Estude os testes propostos e complete a tabela com os sinais de controle necessários para executar cada operação e os resultados esperados. Considere que esses testes devem ser executados sequencialmente.

Execute uma simulação do circuito com o **ModelSim** usando o arquivo de *testbench* fornecido (`circuito_exp3_tb.v`). Verifique os resultados previstos no Plano de Testes com as saídas das formas de onda do simulador. Elabore uma análise dessa verificação no Planejamento. Faça anotações nas formas de onda e assegure a legibilidade das figuras e das anotações. A Figura 11 ilustra uma parte de uma saída possível de análise das formas de onda geradas pela simulação.

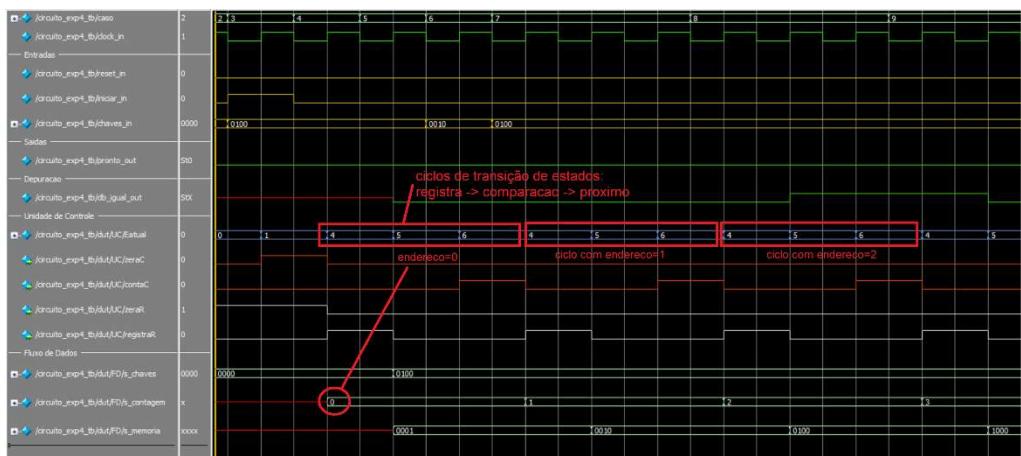


Figura 11: Trecho anotado das formas de onda da simulação do circuito da experiência

- h) Crie um projeto no Intel Quartus Prime referente ao circuito da experiência. Documente o projeto elaborado no Planejamento. Execute a ferramenta **RTL Viewer** do Intel Quartus Prime e verifique se a saída produzida é similar ao diagrama da Figura 4. Documente a saída obtida no Planejamento.

Tabela 2: Plano de Teste para o Circuito da Experiência

#	Operação	Sinais de controle	Resultado esperado
c.i.	Condições iniciais	clock=0 reset=0 iniciar=0 chaves=0000	pronto=0 db_igual=0 db_contagem=0000 db_memoria=0001 db_chaves=0000 db_estado=0000
1	"Resetar" circuito e observar a saída da memória	reset=1 clock ↑	pronto=0 db_igual=0 db_contagem=0000 db_memoria=0001 db_chaves=0000 db_estado=0000
2	Acionar sinal de clock 5 vezes com iniciar=0	reset=0 iniciar=0 clock ↑ (5x)	(permanece no estado inicial) pronto=0 db_igual=0 db_contagem=0000 db_memoria=0001 db_chaves=0000 db_estado=0000
3	Ajustar chaves para 0100, ativar iniciar=1 e acionar clock 1x	chaves=0100 iniciar=1 clock ↑	(muda para estado preparação) <completar todas as saídas>
4	Mantém chaves em 0100 e acionar clock 1x	chaves=0100 iniciar=0 clock ↑	(muda para estado registra) <completar todas as saídas>
5	Mantém chaves em 0100 e acionar clock 1x	chaves=0100 iniciar=0 clock ↑	(muda para estado comparação) db_igual=0 db_contagem=0000 db_memoria=0001 db_chaves=0100 <completar todas as saídas>
6	Mantém chaves em 0100 e acionar clock 1x	chaves=0100 clock ↑	(muda para estado próximo) <completar todas as saídas>
7	Mantém chaves em 0100 e acionar clock 3x	chaves=0100 clock ↑ (3x)	(passa pelos estados registra, comparação e próximo) pronto=0 db_igual=0 db_contagem=0001 db_memoria=0010 db_chaves=0100
8	Mantém chaves em 0100 e acionar clock 3x	chaves=0100 clock ↑ (3x)	(passa pelos estados registra, comparação e próximo) pronto=0 db_igual=1 db_contagem=0010 db_memoria=0100 db_chaves=0100
9	Mantém chaves em 0100 e acionar clock 9x	chaves=0100 clock ↑ (9x)	(passa 3x pelos estados registra, comparação e próximo) pronto=0 db_igual varia 0-1-0 db_contagem varia 0011-0100-0101 db_memoria varia 1000-0100-0010 db_chaves=0100
10	Ajustar chaves para 0001 e acionar clock 6x	chaves=0001 clock ↑ (6x)	<completar todas as saídas>
11	Ajustar chaves para 0010 e acionar clock 6x	chaves=0010 clock ↑ (6x)	<completar todas as saídas>
12	Ajustar chaves para 0100 e acionar clock 6x	chaves=0100 clock ↑ (6x)	<completar todas as saídas>
13	Ajustar chaves para 1000 e acionar clock 6x	chaves=1000 clock ↑ (6x)	<completar todas as saídas>
14	Ajustar chaves para 0000 e acionar clock 3x	chaves=0001 clock ↑ (3x)	<completar todas as saídas>
15	Mantém chaves em 0000 e acionar clock 3x	chaves=0010 clock ↑ (3x)	(passa pelo estado fim) pronto=1 <completar todas as saídas>
16	Mantém chaves em 0000 e acionar clock	chaves=0000 clock ↑	(termina no estado inicial) <completar todas as saídas>

1.2. Atividade 2 – Síntese e Teste do Circuito na Placa FPGA

Esta atividade tem como objetivo a implementação e a síntese do circuito da experiência na placa FPGA DE0-CV. Em seguida, este circuito deve ser estudado e seu comportamento deve ser validado conforme projetado.

- i) Prepare a síntese do projeto do circuito no FPGA Cyclone V 5CEBA4F23C7N da placa FPGA DE0-CV, com a designação de pinos da placa DE0-CV da Tabela 3 e complete-a com os dados faltantes no Planejamento. DICA: use o arquivo com a tabela de pinos da placa FPGA disponível no e-Disciplinas.

Note que a Tabela 3 apresenta sugestões para designação de sinais de depuração adicionais. Sugere-se que os grupos adicionem tais sinais para a verificação de funcionamento do circuito da experiência.

- j) Submeta o arquivo QAR do projeto (exp3_TxByy_atividade1.qar) junto com o Planejamento.

Tabela 3: Designação de Pinos para a Atividade 2

Sinal	Pino na Placa DE0-CV	Pino no FPGA	Analog Discovery
CLOCK	GPIO_0_D0	consulte	StaticIO – Button 0/1
RESET	GPIO_0_D1	consulte	StaticIO – Button 0/1
INICIAR	chave SW0	consulte	-
CHAVES(0)	chave SW1	consulte	-
CHAVES(1)	chave SW2	consulte	-
CHAVES(2)	chave SW3	consulte	-
CHAVES(3)	chave SW4	consulte	-
PRONTO	led LEDR0	consulte	-
DB_IGUAL	led LEDR1	consulte	-
DB_INICIAR	led LEDR2	consulte	-
DB_ZERAC	led LEDR4	consulte	-
DB_CONTAC	led LEDR5	consulte	-
DB_FIMC	led LEDR6	consulte	-
DB_ZERAR	led LEDR8	consulte	-
DB_REGISTRAR	led LEDR9	consulte	-
DB_CONTAGEM	display HEX0	consulte	-
DB_MEMORIA	display HEX1	consulte	-
DB_CHAVES	display HEX2	consulte	-
DB_ESTADO	display HEX5	consulte	-

- k) **No Laboratório Digital**, sintetize o circuito e execute as atividades práticas da implementação e teste do circuito na bancada:

DICA: Para armazenar os arquivos do projeto do Intel Quartus Prime do grupo na bancada do Laboratório Digital, abra o arquivo QAR do projeto da experiência em uma subpasta chamada **circuito_exp3** dentro da pasta da experiência (p.ex. C:\Projetos\TxByy\Exp3).

- Programe o projeto sintetizado na placa DE0-CV;
 - Interligue os sinais dos canais digitais do Analog Discovery nos pinos da GPIO_0 da DE0-CV. DICA: ligue primeiro o fio GND do Analog Discovery no pino GND da GPIO_0;
 - Execute o acionamento da sequência de sinais de controle do Plano de teste do circuito da experiência. Anote os resultados experimentais obtidos e documente etapas de verificação com fotos dos sinais de saída em LEDs e displays da placa FPGA;
 - Analise os resultados obtidos e elabore um resumo do funcionamento do circuito estudado.
- l) Ao final da execução da atividade de teste, submeta o arquivo QAR final desta atividade (exp3_TxByy_atividade2.qar) junto com o Relatório.

1.3. Atividade 3 – Desafio: Modificação do Sistema Digital

Esta atividade adicional tem como objetivo a familiarização com o projeto de circuitos em que o sistema digital é a composição de um fluxo de dados e uma unidade de controle. O sistema digital da Atividade 1 deve ser modificado a partir da especificação apresentada.

- m) O funcionamento de um sistema digital modificado é descrito pelo pseudocódigo da Figura 12. As modificações introduzidas no circuito da atividade 1 estão sinalizadas em azul.

```

Algoritmo: sistema digital simples modificado
entradas: iniciar, chaves
saídas: pronto, acertou, errou
depuração: contagem, memória, estado, igual
1. {
2.     while (verdadeiro) {
3.         espera acionamento do sinal iniciar
4.         inicia circuito para condições iniciais
5.         while (não atingiu o último dado e acertou todos os dados) {
6.             // continua enquanto chaves=dado e não chegou no
7.             // final da memória
8.             compara chaves de entrada com dados armazenados
9.             incrementa contador interno
10.            ativa acertou se acertou todos os dados da memória
11.            ativa errou se errou um dado
12.            ativa saída pronto
13.        }
}

```

Figura 12: Pseudocódigo do Sistema Digital do Desafio

Os sinais de saída **acertou** e **errou** devem ser ativados em '1' somente por um período de *clock*, junto com o sinal **pronto**, para indicar o final da operação do circuito e o resultado final.

Adote a seguinte definição para a entidade principal do circuito modificado (Figura 13).

```

module circuito_exp3_desafio (
    input          clock,
    input          reset,
    input          iniciar,
    input [3:0]    chaves,
    output         pronto,
    output         acertou,
    output         errou,
    output         db_igual,
    output         db_iniciar,
    output [6:0]   db_contagem,
    output [6:0]   db_memoria,
    output [6:0]   db_chaves,
    output [6:0]   db_estado
);

```

Figura 13: Entidade Verilog para o Desafio

Projete a modificação do sistema digital e documente as modificações necessárias tanto no Fluxo de Dados quanto na Unidade de Controle no Relatório.

DICA IMPORTANTE: não use o mesmo diretório ou pasta para armazenar os arquivos do novo projeto do Intel Quartus Prime na bancada do Laboratório Digital. Crie uma subpasta chamada exp3_desafio na pasta da experiência (p.ex. C:\Projetos\TxByy\Exp3).

- n) Elabore um Plano de Testes para estudar o funcionamento do circuito. Considere ao menos dois **cenários de teste** para o circuito modificado: um com o **acerto dos 16 dados da memória** e outro com **erro na comparação do 4º dado da memória**. Para cada cenário, gere uma tabela com o Plano de testes seguindo a estrutura da Tabela 4 e complete-a com os sinais de controle necessários para executar cada operação e os resultados esperados.

Nota Importante: Cada cenário de teste deve ser executado separadamente. Deve haver uma tabela com o Plano de Testes específico para cada cenário exercitado.

Tabela 4: Modelo de Tabela para os Cenários do Plano de Testes do Desafio

Cenário #n – Descrição do Cenário				
#	Operação	Sinais de controle	Resultado esperado	Resultado observado
c.i.	Condições Iniciais			
1				
2				
3				
...				
n				

- o) Execute adaptações ao arquivo de *testbench* da experiência para criar os *tesbenches* de cada cenário. Realize algumas simulações do projeto do Desafio com o ModelSim, executando os diversos cenários de testes definidos no item anterior. Inclua as formas de onda obtidas na documentação da experiência.
- p) Sintetize o projeto do circuito no FPGA Cyclone V 5CEBA4F23C7N. Para isto, adote a designação mínima de pinos da Tabela 5 e complete-a com os dados faltantes. Sinais adicionais de depuração podem ser incluídos conforme a necessidade (consulte a designação de pinos disponível no e-Disciplinas e documento no relatório).

Tabela 5: Designação Mínima de Pinos para o Desafio

Sinal	Pino na Placa DE0-CV	Pino no FPGA	Analog Discovery
CLOCK	GPIO_0_D0		StaticIO – Button 0/1
RESET	GPIO_0_D1		StaticIO – Button 0/1
INICIAR	chave SW0		-
CHAVES(0)	chave SW1		-
CHAVES(1)	chave SW2		-
CHAVES(2)	chave SW3		-
CHAVES(3)	chave SW4		-
PRONTO	Led LEDR0		-
DB_IGUAL	Led LEDR1		-
DB_INICIAR	Led LEDR2		-
ACERTOU	Led LEDR8		-
ERROU	Led LEDR9		-
DB_CONTAGEM	Display HEX0		-
DB_MEMORIA	Display HEX1		-
DB_CHAVES	Display HEX2		-
DB_ESTADO	Display HEX5		-

- q) Programe o projeto na placa DE0-CV, execute as ligações de sinais do Analog Discovery e execute o acionamento da sequência de sinais de controle do Plano de teste. Anote os resultados experimentais obtidos.
- r) Submeta o arquivo QAR final desta atividade (exp3_TxByy_desafio.qar) e os arquivos de *testbench* de cada cenário de teste junto com o Relatório.

2. BIBLIOGRAFIA

- [1] ALMEIDA, F.V. de; SATO, L.M.; MIDORIKAWA, E.T. **Tutorial para criação de circuitos digitais em Verilog no Quartus Prime 20.1.** Apostila de Laboratório Digital. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Escola Politécnica da USP. Edição de 2024.
- [2] ALMEIDA, F.V. de; SATO, L.M.; MIDORIKAWA, E.T. **Tutorial para criação de circuitos digitais hierárquicos em VHDL no Quartus Prime 16.1.** Apostila de Laboratório Digital. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, Escola Politécnica da USP. Edição de 2017.
- [3] ALTERA / Intel. **DE0-CV User Manual.** 2015.
- [4] ALTERA / Intel. **Quartus Prime Introduction Using Verilog Designs.** 2016.
- [5] ALTERA / Intel. **Quartus Prime Introduction to Simulation of Verilog Designs.** 2016.
- [6] Ricardo Menotti, Ricardo dos Santos Ferreira. **Introdução à Lógica Digital com Verilog: uma abordagem prática.** Kindle. 2023
- [7] WAKERLY, John F. **Digital Design Principles & Practices.** 5th edition, Prentice Hall, 2018.

3. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

- 1 computador pessoal com os softwares Intel Quartus Prime e ModelSim.
- 1 placa de desenvolvimento com FPGA DE0-CV com o dispositivo Cyclone V 5CEBA4F23C7N.
- 1 dispositivo Analog Discovery da Digilent ou equivalente.

Histórico de Revisões

- E.T.M. / 2018 (versão inicial)
- E.T.M. & A.V.S.N / 2021 (revisão e adaptação para ensino remoto)
- E.T.M. / 2022 (revisão e adaptação)
- E.T.M. / 2023 (revisão, reorganização e adaptação para ensino presencial)
- E.T.M. / 2024 (revisão e adaptação para Verilog)
- E.T.M. / 2025 (revisão)
- E.T.M. & A.V.S.N. / 2026 (revisão)