

CONTROLE DE UM SERVOMOTOR

Versão LabEAD 2021

RESUMO

Esta experiência tem como objetivo a familiarização e o projeto de um circuito de controle simples de um servomotor. A parte experimental inclui atividades de familiarização de um servomotor e depois a implementação de um circuito digital para controle de sua posição.

OBJETIVOS

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

- Funcionamento de um servomotor;
- Modulação PWM;
- Circuito de controle.

1. PARTE TEÓRICA

Um servomotor é um motor elétrico cuja principal diferença com outros motores é seu controle de posicionamento. É muito usado em aplicações, como automodelismo e aeromodelismo, onde o controle preciso de posicionamento de partes do equipamento é essencial para seu funcionamento. A figura 1 ilustra seu uso em aeromodelos, onde o servomotor é responsável pelo posicionamento dos controles de direção e ajuste de superfícies da asa.



Figura 1 – Exemplo de aplicação de servomotores.

Internamente, um servomotor é composto por diversos elementos (como ilustrado na figura 2):

- **Motor** – responsável pelo acionamento das engrenagens e eixo principal do servomotor;
- **Engrenagens** – responsáveis pela redução da rotação do motor e aumento do torque;
- **Encaixe de saída** – conexão de saída para controle;
- **Potenciômetro** – usado para monitorar a posição do servomotor;
- **Circuito de controle** – base do funcionamento do servomotor, monitora a saída do potenciômetro e a ativação do motor interno para manter a posição determinada pela entrada.



Figura 2 – Organização interna de servomotores.

O controle do servomotor é obtido por um sinal de entrada que apresenta níveis de tensão TTL e que especifica a sua posição. O formato deste sinal segue a modulação PWM (*Pulse Width Modulation* ou *Modulação por Largura de Pulso*), conforme ilustrado na figura 3. Uma informação é codificada em modulação PWM através da largura do pulso em nível alto em relação ao período total de oscilação, ou seja, através do seu fator de forma (*duty cycle*).

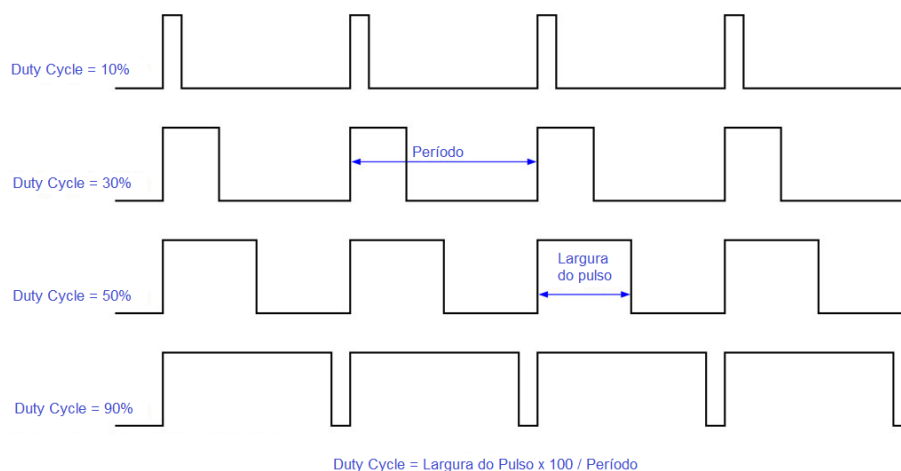


Figura 3 – Modulação PWM e Fator de forma.

A modulação PWM tem diversas aplicações. Uma aplicação simples é usá-lo para controlar a intensidade luminosa de um *led*, conhecida como “*dimmer de leds*”. Ao mudar a razão em que o sinal fica em nível alto é possível controlar o tempo em que o *led* fica iluminado e, assim, com uma frequência de oscilação adequada, temos a sensação de que é possível mudar sua intensidade luminosa.

Em um **servomotor**, a posição é controlada com um sinal com período de 50 Hz e pulsos com largura de 1 até 2 ms, conforme ilustrado na figura 4. Variando-se a largura do pulso a posição pode ser variada em até 180°.

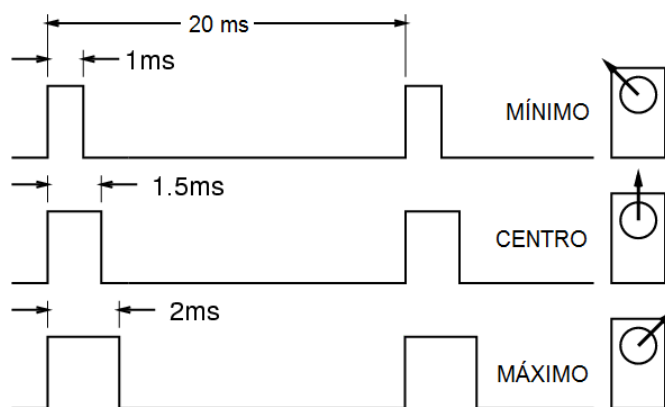


Figura 4 – Sinais de controle de um servomotor.

A conexão do servomotor pode adotar alguns padrões diferentes, dependendo do fabricante. A figura 5 mostra a conexão do fabricante JR. Contudo, todas as conexões de servomotores apresentam três sinais:

- Terminal – ou TERRA;
- Terminal + ou VCC (5V);
- Sinal de controle: sinal PWM com nível de tensão compatível com TTL.

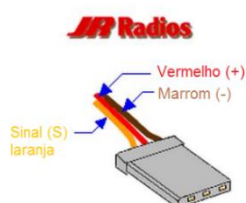


Figura 5 – Conexões de um servomotor.

2. PARTE EXPERIMENTAL

Esta experiência foi planejada para ser executada de forma remota, usando os recursos disponíveis na plataforma LabEAD. A bancada remota no Laboratório Digital inclui computador, uma placa FPGA DE0-CV, um Analog Discovery e os componentes do LabEAD (placa ESP8266/Wemos D1 mini, *webcam* e outros componentes). A figura 6 apresenta uma imagem de uma bancada remota.

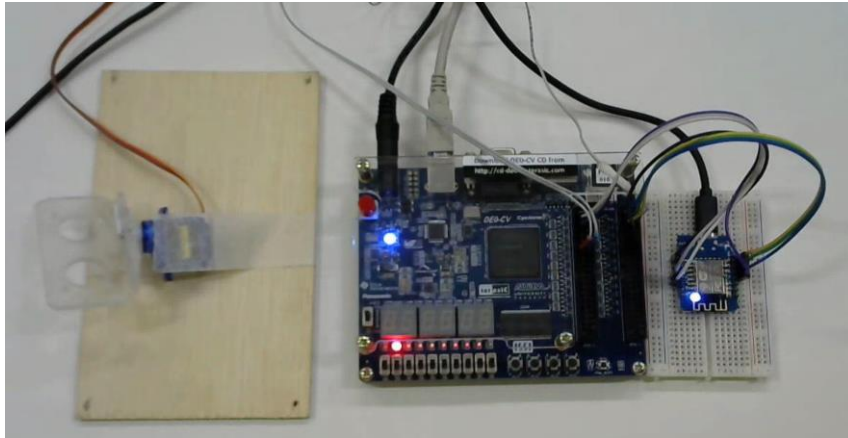


Figura 6 – Imagem da Bancada remota do Laboratório Digital.

2.1. Atividade 1 – Familiarização com a Descrição VHDL de um Modulador PWM

Esta atividade usará o recurso de acesso remoto à bancada no Laboratório Digital usando o software AnyDesk. Detalhes do procedimento serão disponibilizados no site da disciplina no e-disciplinas.

- Esta atividade usa a descrição VHDL fornecida (`circuito_pwm.vhd`) para gerar um sinal digital modulado em PWM. Estude seu código fonte.
- Nesta atividade deverá projetado um circuito de controle de um servomotor com formas de onda conforme apresentado na figura 4 (frequência do sinal de 50Hz e largura do pulso em nível alto de 1ms a 2ms). A especificação da interface do circuito de controle de um servomotor é mostrada na figura 7 (entidade `controle_servo`).

```
entity controle_servo is
port (
    clock    : in  std_logic;
    reset    : in  std_logic;
    posicao   : in  std_logic_vector(1 downto 0);
    pwm      : out std_logic );
end controle_servo;
```

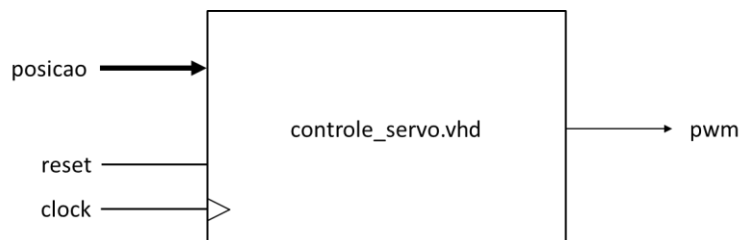


Figura 7 – Interface do circuito de controle de um servomotor.

O sinal de controle PWM do servomotor é gerado a partir de dois sinais de entrada:

- **posicao**: sinal de 2 bits que permite especificar a posição do servomotor. Os valores de entrada permitem ajustar o servo para a posição mínima (01), central (10) e máxima (11). O valor 00 deverá gerar uma saída nula¹ na saída.
- **clock**: sinal de *clock* de 50MHz da placa DE0-CV.

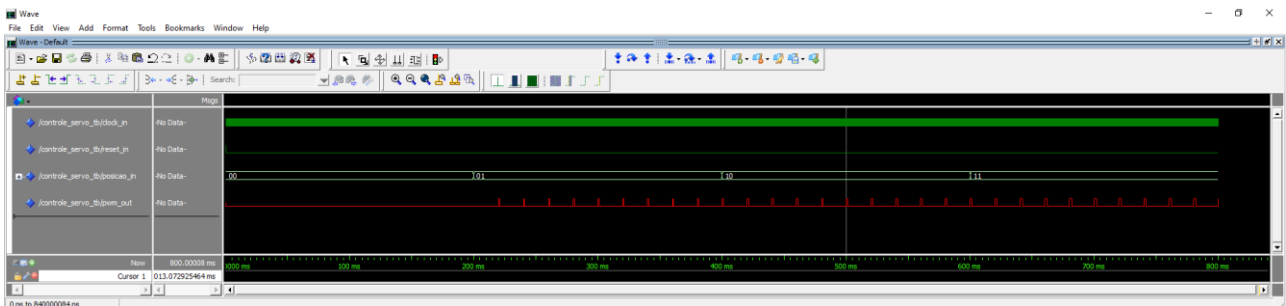
- c) Considerando um sinal de clock de 50MHz (período de 20ns), quantos ciclos de relógio correspondem ao período do sinal de controle do servomotor? Em seguida, preencha a tabela abaixo com o número de ciclos de relógio para cada largura de pulso.

Largura (ms)	Ciclos de clock
1	
1,5	
2	

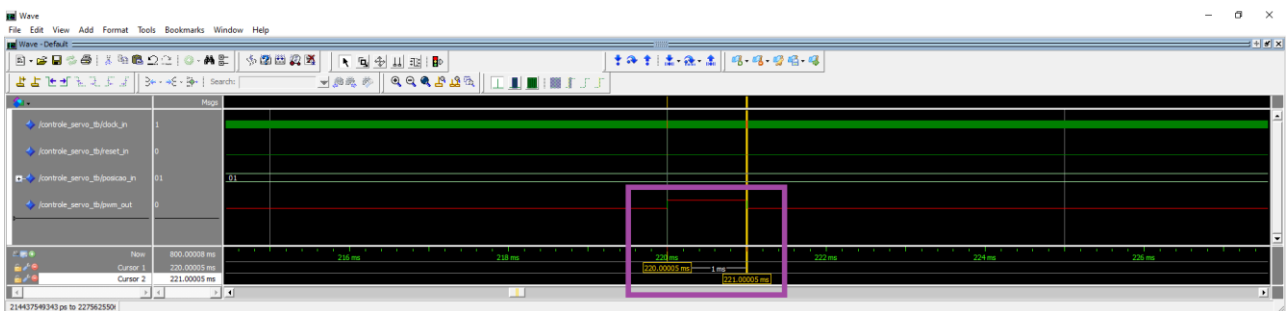
- d) **Documente** o funcionamento do projeto no Planejamento. Incluir cartas de tempo com a geração de diversas saídas com os diferentes fatores de forma.

DICAS:

- 1) Use um *tesbench* para gerar as formas de onda da saída do circuito usando o ModelSim (fig.8.a).
- 2) Use a funcionalidade dos **cursores** no ModelSim para verificar as larguras dos pulsos gerados a cada valor das entradas (figura 8.b).
- 3) Procure documentar o circuito de forma a permitir uma futura alteração do projeto.



a) Saída do ModelSim para o *Testbench* do circuito de controle do servo.



b) Uso de cursores do ModelSim para analisar os pulsos de saída.

Figura 8 – Simulação com ModelSim.

- e) Prepare a síntese do projeto do circuito para a placa FPGA DE0-CV com Cyclone V 5CEBA4F23C7N. Para isto, adote a seguinte designação de pinos. O sinal *pwm* deve ser designado ao pino da GPIO_1 ligado no canal 1 da ferramenta *Scope* do Analog Discovery.

¹ A saída nula é um sinal com valor 0V.

Sinal	Ligação na placa FPGA	Pino na FPGA	Analog Discovery
clock	CLK_50	PIN_M9	-
reset	GPIO_0_D27	PIN_P18	DIO0
largura[0]	GPIO_0_D29	PIN_R17	DIO1
largura[1]	GPIO_0_D31	PIN_T20	DIO2
pwm	GPIO_1_D27	PIN_F15	CH1+

- f) Envie o projeto para a bancada remota no Laboratório Digital e compile o projeto.
- g) Programe o circuito na placa FPGA DE0-CV e verifique a saída `pwm` usando a ferramenta **Scope** do Analog Discovery. Note que a saída `pwm` deve ser mapeada no pino da GPIO_1 que está ligada ao canal 1 da ferramenta Scope do Analog Discovery,
- h) Anexe as formas de onda no Relatório, junto com uma descrição de funcionamento do circuito.

2.2. Atividade 2 - Verificação do Funcionamento do Circuito de Controle de um Servomotor

Após as formas de onda geradas pelo circuito da atividade 1 tiverem sido validadas usando um osciloscópio, executaremos os testes de funcionamento controlando a posição de um servomotor.

- i) Prepare a síntese do projeto do circuito para a placa FPGA DE0-CV com Cyclone V 5CEBA4F23C7N. Para isto, adote a designação de pinos a seguir.

Note que a única designação modificada é a designação do sinal `pwm` que visa conectá-lo ao pino da GPIO_1 ligado no servomotor na bancada do Laboratório Digital.

Sinal	Ligação na placa FPGA	Pino na FPGA	Analog Discovery
clock	CLK_50	PIN_M9	-
reset	GPIO_0_D27	PIN_P18	DIO0
largura[0]	GPIO_0_D29	PIN_R17	DIO1
largura[1]	GPIO_0_D31	PIN_T20	DIO2
pwm	GPIO_1_D35	PIN_K16	-

- j) Programar o projeto modificado na placa FPGA DE0-CV.
- k) Executar os testes necessários para mostrar o correto funcionamento do circuito projetado. Observar a posição do servomotor pela imagem da *webcam* da bancada remota.
DICA: registre as imagens para serem inseridas no Relatório.
- l) Documente os testes no Relatório.

2.3. Atividade 3 - Controle de um Servomotor via MQTT

Neste item, o circuito de controle na placa FPGA deverá ser controlado remotamente usando a infraestrutura do LabEAD com MQTT.

- m) Inicialmente, modifique o projeto do MQTT Dash usado na experiência anterior para a seguinte configuração de *widgets* (vide figura 9):
 - *Widget* configurado como `switch/button` na entrada E0;
 - *Widget* configurado como `switch/button` na entrada E1;
 - *Widget* configurado como `switch/button` na entrada E2.

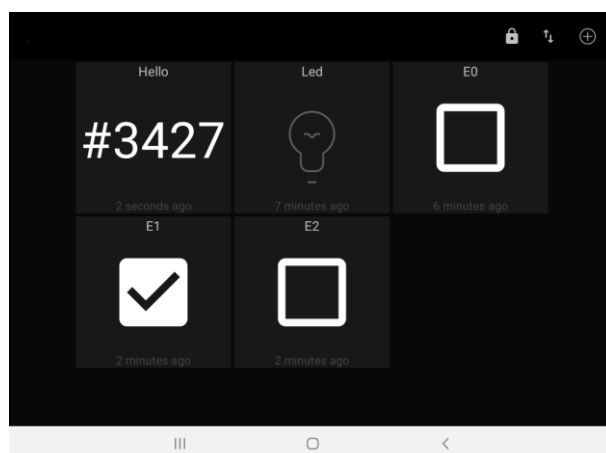


Figura 9 – Tela do projeto no MQTT Dash para controle do servo.

- n) Realize a configuração do *script* do LabEAD da bancada remota com as informações de login/senha do usuário da bancada (*grupoX-bancadaYY*).
- o) Prepare a síntese do projeto do circuito para a placa FPGA DE0-CV com Cyclone V 5CEBA4F23C7N. Para isto, adote a seguinte designação de pinos. Modifique o arquivo de pinos

Sinal	Ligação na placa FPGA	Pino na FPGA	ESP8266 (MQTT)
clock	CLK_50	PIN_M9	-
reset	GPIO_0_D2	PIN_N16	E0
posicao[0]	GPIO_0_D0	PIN_B16	E1
posicao[1]	GPIO_0_D1	PIN_M16	E2
pwm	GPIO_1_D35	PIN_K16	-

- p) Execute a compilação e programação da placa FPGA.
- q) Execute os testes necessários para mostrar o correto funcionamento do circuito projetado. Observe a posição do servomotor pela imagem da webcam da bancada remota.
DICA: registre as imagens para serem inseridas no Relatório.
- r) Documente os testes no Relatório.
- s) Anote os resultados obtidos e analise o funcionamento do servomotor no Relatório.
- t) Submeta o arquivo QAR (*exp1_TxBy.qar*) do projeto do Intel Quartus Prime junto com o Relatório.

2.4. Atividade 4 – Desafio

Neste item é proposta uma atividade complementar.

- u) Uma atividade **adicional** relacionada ao projeto do circuito da experiência será proposta pelo professor. Estude esta modificação e verifique como implementá-la.
- v) Documente a implementação da modificação no Relatório. Descreva como a modificação foi incluída no código VHDL do circuito de controle do servomotor.
- w) Implemente o circuito no Intel Quartus Prime e sintetize-o na placa FPGA DE0-CV. Documente as modificações necessárias na designação de pinos e projeto do MQTT Dash.
- x) Teste o circuito modificado.
- y) Documente os resultados obtidos nos testes experimentais realizados.
- z) Submeter o arquivo QAR desta atividade (*exp1_desafio_TxBy.qar*) junto com o Relatório.

2.5. Atividade 5 – Atividades Pós-Laboratório

aa) Responder as questões abaixo no Relatório.

1. Como garantir que o sinal PWM do circuito de controle do servomotor não apresente pulsos com largura fora dos limites de funcionamento correto do servo? Explique.
2. Explique como seria um sistema de controle de um sistema com dois ou mais servomotores?

3. BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, F.V. de; SATO, L.M.; MIDORIKAWA, E.T. **Tutorial para criação de circuitos digitais 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.
- ALTERA. **DE0-CV User Manual**. 2015.
- ALTERA. **Quartus Prime Introduction Using VHDL Designs**. 2016.
- ALTERA. **Quartus Prime Introduction to Simulation of VHDL Designs**. 2016.
- D'AMORE, R. **VHDL - descrição e síntese de circuitos digitais**. 2ª edição, LTC, 2012.
- MEALY, B.; TAPPERO, F. **Free Range VHDL** - The no-frills guide to writing powerful code for your digital implementations. Free Range Factory, Janeiro de 2018 (v.1.21).
- TOCCI, R. J.; WIDMER, N. S.; MOSS, G. L. **Digital Systems: principles and applications**. 11th ed., Prentice-Hall, 2011.
- WAKERLY, J. F. **Digital Design Principles & Practices**. 4th edition, Prentice Hall, 2006.

4. EQUIPAMENTOS NECESSÁRIOS

- 1 computador com software Intel Quartus Prime.
- 1 placa de desenvolvimento FPGA DE0-CV com o dispositivo Cyclone V 5CEBA4F23C7N.
- 1 dispositivo Analog Discovery da Digilent ou equivalente.
- 1 kit Lab do LabEAD (para implementação do acesso remoto).

Histórico de Revisões

E.T.M./2014 – versão inicial.

E.T.M./2015 – revisão.

E.T.M./2019 – reorganização da experiência.

E.T.M./2020 – revisão e reorganização da experiência para acesso remoto.

E.T.M./2021 – revisão e atualização para o LabEAD com MQTT.