

Universidade de São Paulo

Escola Politécnica, Engenharia de Computação
PCS3645 - Laboratório Digital II
Turma 3 - Professor Paulo Cugnasca
Bancada B6



Experiência 01

Controle de um Servomotor – Relatório

Nome Completo	N USP
Henrique Freire da Silva	12555551
Mariana Dutra Diniz Costa	12550841

São Paulo, 05 de Setembro de 2023

Sumário

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Requisitos Funcionais	3
1.2	Requisitos Não Funcionais	3
2	DESCRIÇÃO DO PROJETO	3
2.1	Familiarização com a Descrição VHDL de um Modulador PWM	3
2.2	Projeto, Teste e Síntese do Circuito de Controle de um Servomotor	3
3	ATIVIDADES EXPERIMENTAIS	5
3.1	Familiarização com a Descrição VHDL de um Modulador PWM	5
3.2	Projeto e Teste do Circuito de Controle de um Servomotor	6
3.3	Verificação do Funcionamento de um Servomotor	7
4	DESAFIO	10
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	11

1 INTRODUÇÃO

Esta experiência consiste no estudo do funcionamento de um circuito simples para controle de um servomotor. Com o objetivo de manter o domínio sobre a posição do motor, o projeto comprehende uma etapa de familiarização com o tema, seguida da descrição do circuito em VHDL, simulação com o *ModelSim*, síntese com o *Quartus* e, finalmente, verificação por meio de testes práticos.

1.1 Requisitos Funcionais

O servomotor deve se deslocar em uma área predeterminada e para uma posição dependente da combinação de chaves selecionadas. No desafio, o avanço progressivo no curso do motor deve seguir o código de Gray na associação chave-posição.

1.2 Requisitos Não Funcionais

A arquitetura proposta deve descrever um modelo estrutural que especifique a aplicação pela instância de um componente genérico fornecido com configurações adequadas. O circuito deve ser de fácil teste, permitindo medições do sinal resultante e a transição direta entre posições do motor através das chaves adotadas na placa FPGA. Ademais, o projeto deve ser descrito em VHDL.

2 DESCRIÇÃO DO PROJETO

2.1 Familiarização com a Descrição VHDL de um Modulador PWM

O arquivo *circuito_pwm.vhd* descreve a geração de um sinal digital que segue a modulação PWM (*Pulse Width Modulation*). Ao realizar a simulação desse circuito pelo ModelSim conforme o *testbench* também fornecido, obtém-se as curvas de onda apresentadas na Figura 1.

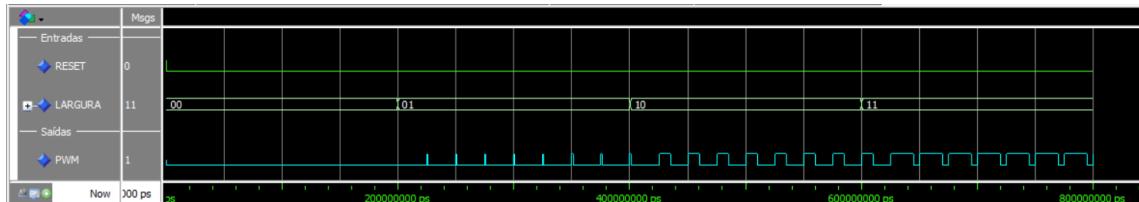


Figura 1: Formas de onda do sinal digital gerado pelo circuito PWM.

Como pode ser observado, o circuito estabelece um pulso periódico PWM que tem sua largura definida pela entrada de 2 bits. Pela análise do código, sabe-se que esse sinal tem a frequência de 4 kHz (para um *clock* de 50 MHz) e o tempo ativo do pulso pode variar entre 1 μ s, 10 μ s, 20 μ s ou nulo. É essa variação de tempo do sinal que permite o controle da posição do servomotor.

2.2 Projeto, Teste e Síntese do Circuito de Controle de um Servomotor

A partir do circuito PWM fornecido, pôde-se desenvolver um controlador que encapsula a instanciação desse componente para os parâmetros de trabalho esperados para o servomotor - ciclos de 50 Hz do sinal para 3 configurações de largura do pulso: 1, 1.5 e 2 ms.

Para o mesmo sinal de *clock* da etapa anterior, ajustou-se a constante *conf_periodo* para 10^6 tal que o sinal resultante corresponesse ao esperado. As configurações de largura do pulso são como segue na Tabela 1. Os fatores de forma foram obtidos segundo *Fator de forma = Largura do pulso × 100 / Período*, para um *Período* de 20 ns.

Pulso (ms)	Fator de forma	Ciclos de <i>clock</i>
1	5%	5×10^4
1.5	7.5%	7.5×10^4
2	10%	10^5

Tabela 1: Configuração do controlador proposto por largura de pulso.

A simulação a partir do *testbench* progressivo fornecido foi registrada nas Figuras 2 e 3, em que tem-se cursores à mostra na Figura 3 de forma a apresentar a escala de referência de cada divisão no eixo horizontal (2 ms).

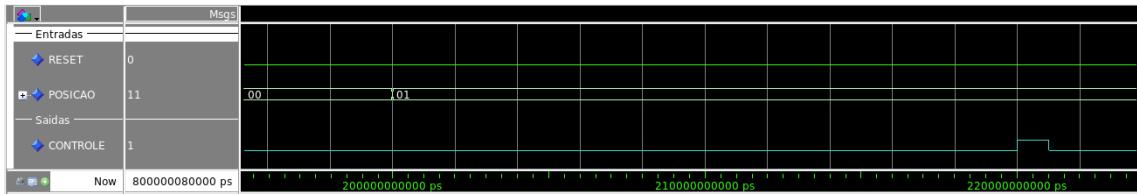


Figura 2: Início do pulso do circuito de controle do servomotor.



Figura 3: Transição da largura do pulso de 1.5 a 2 ms do circuito de controle do servomotor.

Em cada figura, percebe-se a mudança da largura de pulso no ciclo seguinte à troca da chave de posição do controlador. Isso se deve à forma com que o componente fornecido se comporta, atualizando a contagem de referência da largura ao fim de um ciclo.

Finalizadas as verificações dos circuitos (tanto o fornecido quanto o produzido) pôde-se realizar a síntese dos projetos e comprovar que o circuito controlador era equivalente àquele proposto - uma instância regulada do modulador PWM -, tal como comprova o diagrama RTL (*Register Transfer Level*) da Figura 4, em que o componente listado como "pwm" corresponde ao circuito PWM genérico, visualizado como um bloco combinatório na composição do sinal de controle.

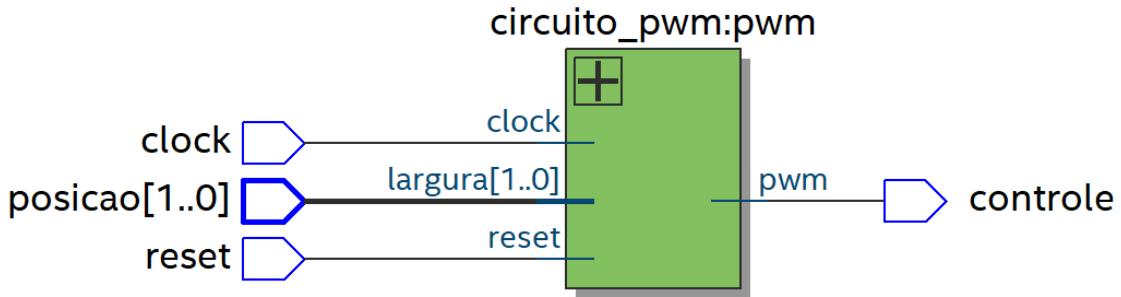


Figura 4: Diagrama RTL do circuito proposto.

3 ATIVIDADES EXPERIMENTAIS

3.1 Familiarização com a Descrição VHDL de um Modulador PWM

O circuito fornecido através da descrição VHDL do arquivo *circuito_pwm.vhd* foi sintetizado em laboratório na placa DE0-CV. Para isso, a seguinte pinagem foi designada durante a montagem experimental:

Sinal	Ligaçāo na placa FPGA	Pino na FPGA	Analog Discovery
clock	CLK_50	PIN_M9	-
reset	chave SW0	PIN_U13	-
largura[0]	chave SW1	PIN_V13	-
largura[1]	chave SW2	PIN_T13	-
pwm	GPIO_0_D1	PIN_B16	CH1

Tabela 2: Pinagem para a montagem experimental.

Através do *Analog Discovery*, foi verificado se a saída *pwm* corresponde ao que é esperado pela descrição do circuito, isto é, um sinal periódico de frequência 40 kHz com largura do pulso variando entre 0, 1 us, 10 us e 20 us, conforme a Figura 5.

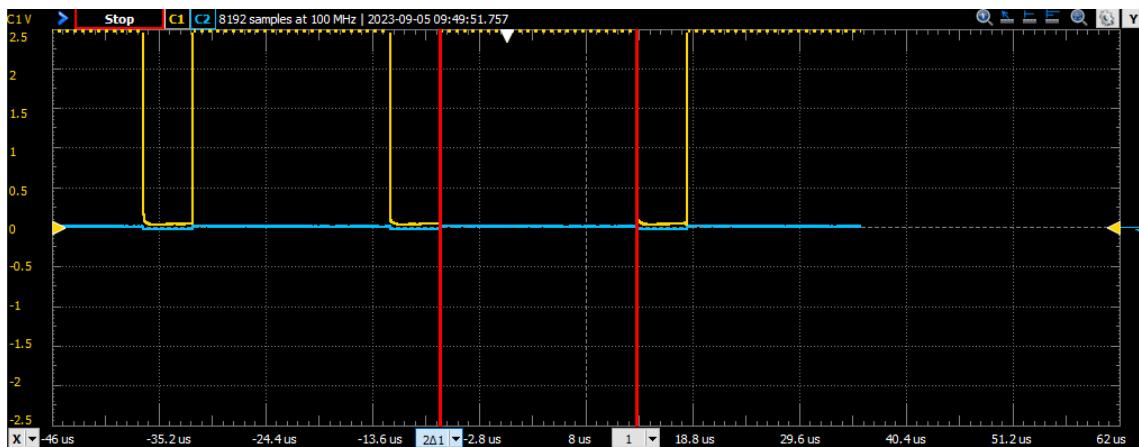


Figura 5: Forma de onda do circuito modulador PWM fornecido (pulso com largura de 20us).

3.2 Projeto e Teste do Circuito de Controle de um Servomotor

Da mesma forma que se testou o modulador PWM genérico, foi possível fazer a medição do circuito controlador projetado, de forma a atestar as dimensões de projeto. Para as 3 posições esperadas, obteve-se as Figuras 6, 7, 8, em ordem de largura do pulso.

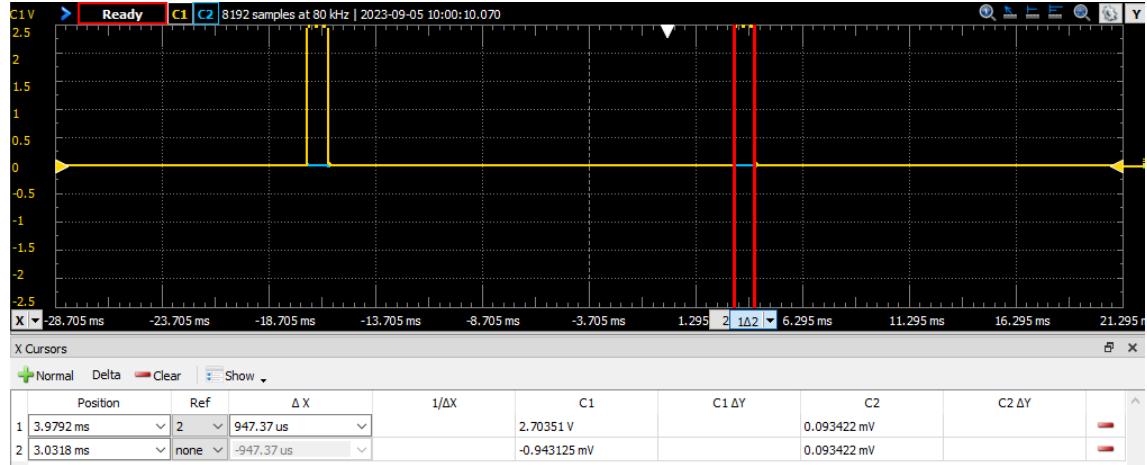


Figura 6: Forma de onda do circuito controlador (1ms de largura do pulso).

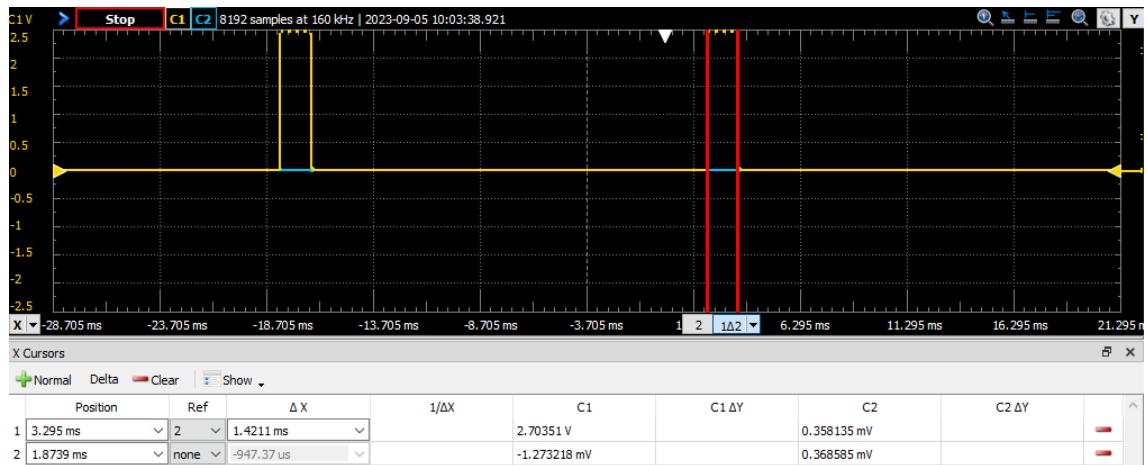


Figura 7: Forma de onda do circuito controlador (1.5ms de largura do pulso).

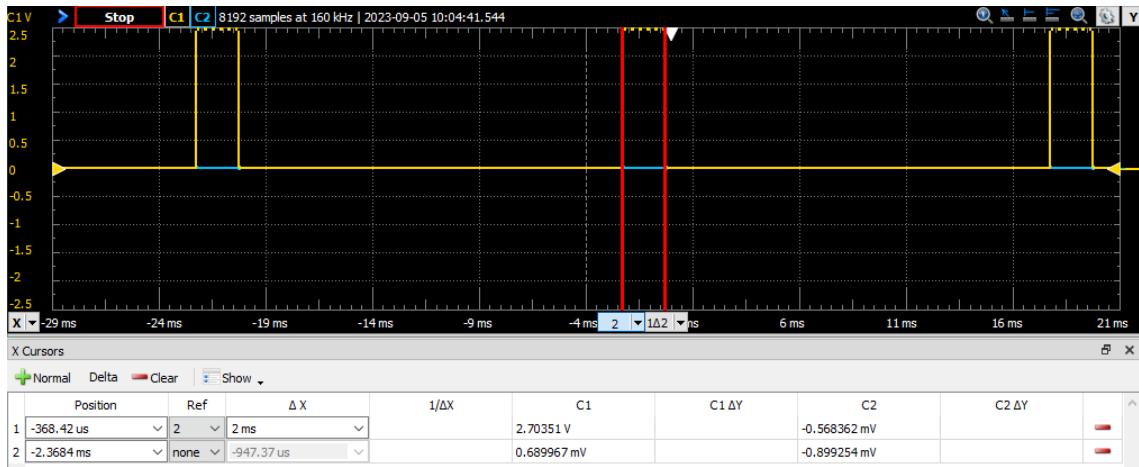


Figura 8: Forma de onda do circuito controlador (2ms de largura do pulso).

3.3 Verificação do Funcionamento de um Servomotor

Com a devida validação do circuito de controle e seus limites, trocou-se a ponta de medição na saída de controle pela entrada do próprio servomotor, além de realizar a apropriada alimentação desse pelos acessos VCC e GND da GPIO.

A demonstração do deslocamento do motor se encontra nas Figuras 9 a 12, em que, a princípio, o sistema se encontra estático (posição 0 das chaves) e segue a sequência natural de acionamento das chaves, indicadas pelo destaque nas figuras.

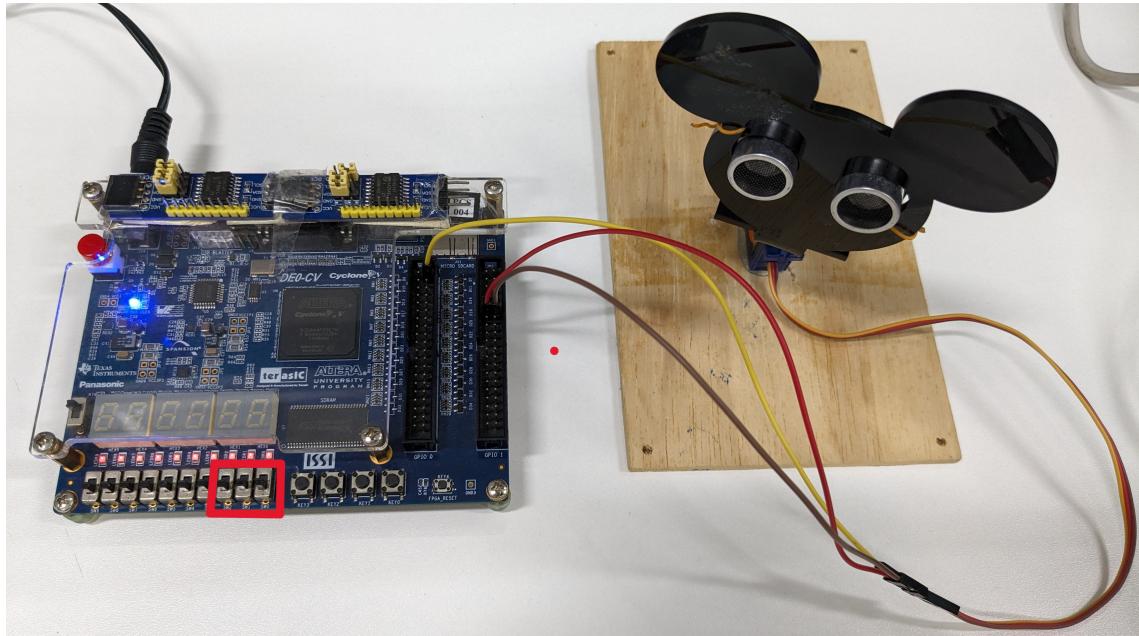


Figura 9: Posicionamento inicial do servomotor (chave 0)

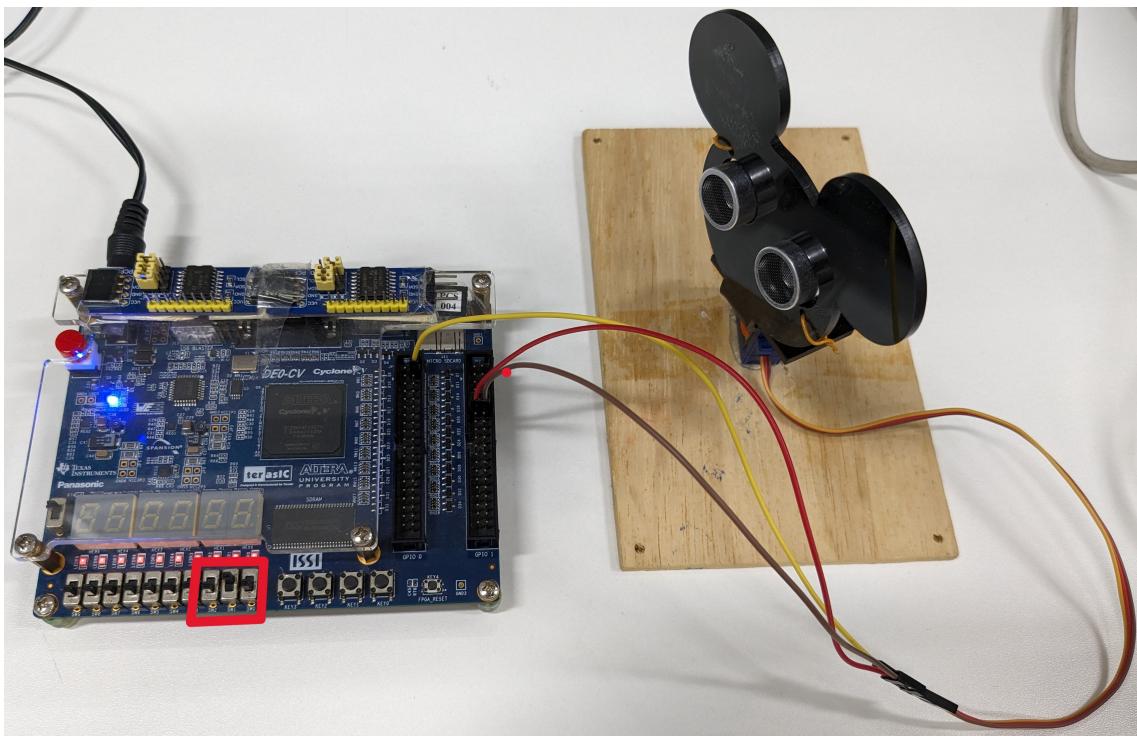


Figura 10: Posicionamento do servomotor para chave 1

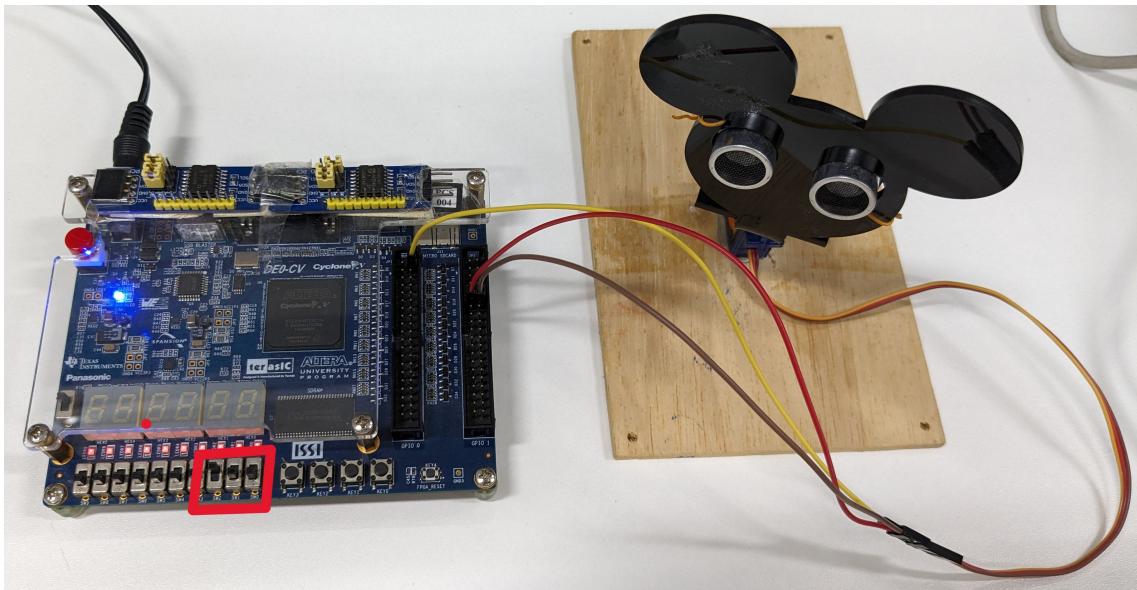


Figura 11: Posicionamento do servomotor para chave 2

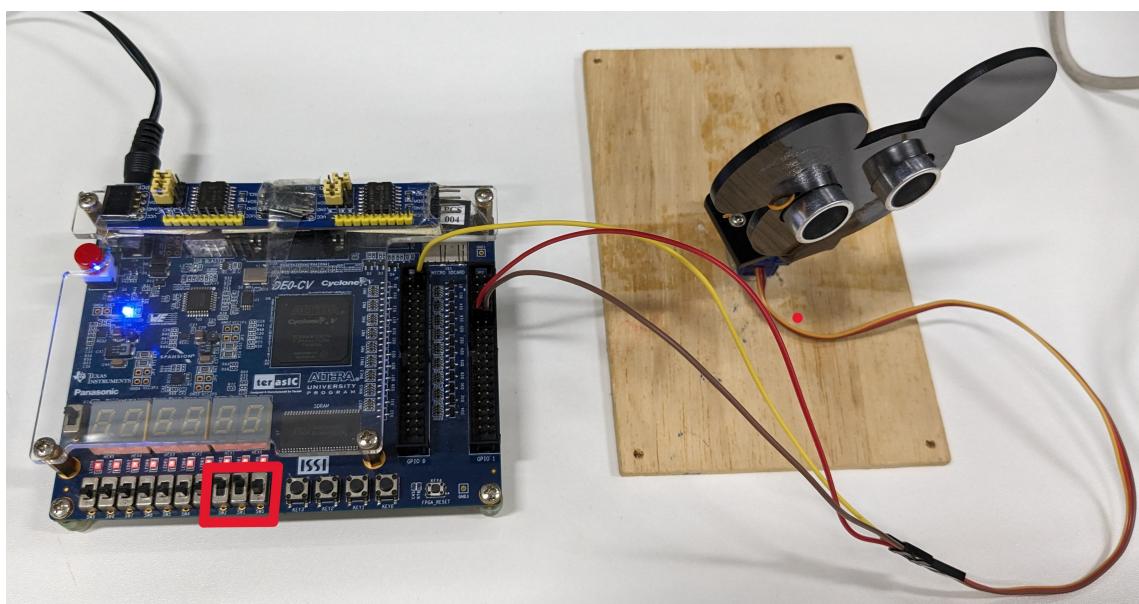


Figura 12: Posicionamento do servomotor para chave 3

4 DESAFIO

O desafio proposto em laboratório foi evoluir o projeto de controle do servomotor de forma a comportar mais posições intermediárias, totalizando 7 opções de direcionamento do motor. Para isso, foi necessário adaptar a descrição VHDL para uma entrada de 3 bits seguindo a sequência formulada pelo Código de Gray, tal que a mudança manual da posição fosse direta - sem transições dispensáveis.

A alteração aplicada sobre o circuito inicial de controle do servomotor envolve a instância de um segundo modulador PWM e a configuração das constantes auxiliares à contagem de ciclos de *clock* por pulso. Como os moduladores base permitiam a emissão de 4 pulsos distintos, a solução implementada envolveu permutar entre os sinais gerados pelos dois componentes, de forma a gerar um pulso correspondente à chave acionada.

O princípio que permitiu uma simples organização dessa arquitetura foi o de equivalência entre o bit mais significativo na representação binária convencional e na sequência codificada. Dessa forma, o bit mais significativo serviu como sinal seletor em um multiplexador com duas entradas: os moduladores componentizados; e os demais bits eram efetivamente usados na escolha interna de largura em cada circuito PWM. O circuito resultante é apresentado em forma de diagrama na Figura 13.

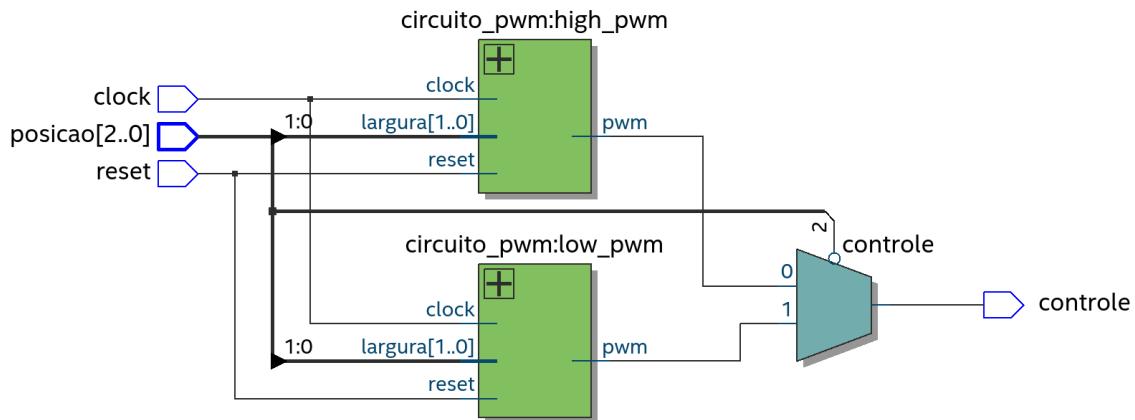


Figura 13: Diagrama RTL do controlador de 7 posições.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Desde a etapa de estudo e análise do circuito inicial, houve certo cuidado em compreender a modulação do sinal na proposta de implementação de um servomotor, bem como recordar sobre o uso das ferramentas de análise, simulação e síntese de VHDL e sobre os meios de descrição de diferentes arquiteturas e padrões de circuitos digitais.

Ademais, a revisão do código de Gray como um método de reduzir erros induzidos pela simulação manual de um sistema de controle (manipulando combinações de chaves físicas) apresentou uma perspectiva interessante para simplificar experimentos de componentes intermediários - em que se espera entradas de componentes externos, porém que são apenas simuladas para isolar os testes aplicados.