



RENAN ANSELMO VILELA

**CONTROLE DE POSIÇÃO PARA DISPOSITIVO DE
CRESCIMENTO DE PLANTAS**

LAVRAS - MG

2022

RENAN ANSELMO VILELA

**CONTROLE DE POSIÇÃO PARA DISPOSITIVO DE CRESCIMENTO DE
PLANTAS**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Controle e Automação, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Fábio Domingues de Jesus
Orientador

**LAVRAS–MG
2022**

RENAN ANSELMO VILELA

**CONTROLE DE POSIÇÃO PARA DISPOSITIVO DE CRESCIMENTO DE
PLANTAS**

POSITION CONTROL FOR PLANT GROWTH DISPOSITIVE

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia de Controle e Automação, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADO em 28 de Julho de 2022.

Prof. Dr. Fábio Domingues de Jesus

Prof. Dr. Belisario Nina Huallpa

Prof. Dr. Paulo Vitor Grillo de Souza

UFLA

UFLA

UFLA

Prof. Dr. Fábio Domingues de Jesus
Orientador

**LAVRAS–MG
2022**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me conceder o apoio dos meus pares e a perseverança para concluir este trabalho.

Aos meus amados familiares pelo apoio e confiança.

Aos meus avós pelo exemplo de vida e seus ensinamentos.

A minha namorada Karen por seu amor e companhia nesta trajetória acadêmica.

Aos meus amigos de curso pelo apoio e companheirismo nesta jornada.

Ao professor Dr. Fábio Domingues de Jesus, meu Orientador, pelo compartilhamento de seus conhecimentos e sua paciência para realização deste trabalho.

Aos professores Dr. Belisario Nina Huallpa e Dr. Paulo Vitor Grillo de Souza por aceitarem fazer parte da banca avaliadora.

Aos funcionários e professores da UFLA a gratidão pelos conhecimentos que me foram passados nesta vida acadêmica.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

No intuito de fornecer nutrição adequada à determinada espécie de planta de forma automatizada, o presente trabalho teve como objetivo desenvolver um equipamento que possibilitasse o contato entre a planta e uma solução aquosa de nutrientes de modo temporizado, conforme a leitura de umidade do solo. Para isso, foi construída uma plataforma rotacional, onde encontra-se um recipiente com uma divisória separando a solução e a porção de terra onde se encontram as mudas. O movimento angular que o dispositivo realiza possibilita que o líquido escoe para o outro lado da divisória por pequenos furos presentes nessa. O código de operação do equipamento foi desenvolvido utilizando a IDE do Arduino e o micro controlador utilizado é o ATmega328P. Para melhor acompanhamento do processo, o dispositivo possui um display LCD que passa as informações sobre seus estados de funcionamento.

Palavras-chave: Controle de posição, Arduino, Crescimento de plantas.

ABSTRACT

In order to provide adequate nutrition to a particular plant species in an automated way, the present work aimed to develop an equipment that would allow the contact between the plant and an aqueous solution of nutrients in a timed manner, according to soil humidity measure. For this, a rotational platform was built, where there is a container with a partition separating the solution and the portion of land where the seedlings are. The angular movement that the device performs allows the liquid to flow to the other side of the partition through small holes present in it. The operating code of the equipment was developed using the Arduino IDE and the microcontroller used is the ATmega 328P. For better monitoring of the process, the device has an LCD display that provides information about its operating states.

Keywords: Position control, Arduino, Plant growth.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REFERENCIAL TEÓRICO	9
2.1	Alface	9
2.2	Automação da Irrigação	9
2.3	Controle	11
2.3.1	Modelagem do sistema	11
2.3.1.1	Modelo matemático do motor CC no domínio do tempo	12
2.3.1.2	Transformada de Laplace	13
2.3.1.3	Função de Transferência do motor CC	13
2.3.2	Sistema de controle em malha fechada	15
2.3.3	Controle PID	16
2.4	Componentes do circuito de controle	17
2.4.1	Motor CC	17
2.4.1.1	Motor AK510/8.5PF12R13SE	18
2.4.1.2	Chopper	19
2.4.2	Arduino	21
2.4.2.1	Arduino Uno	22
2.4.2.2	ATmega328P	22
2.5	Display LCD	23
3	MATERIAL E MÉTODOS	24
3.1	Montagem do equipamento	24
3.2	Sensor de posição	28
3.3	Higrômetro	28
3.4	Placas do circuito de controle	29
3.4.1	Placa de conexão de dispositivos	29
3.4.2	Placa de acionamento do motor	31
3.5	Código para acionamento do motor	32
3.6	Controle de Posição	33
3.6.1	Identificação do sistema	33
3.6.2	Parâmetros do controlador PI	36
3.6.3	Implementação do controle de posição no Arduino	38
3.7	Controle de Umidade	40
4	RESULTADOS	44
4.1	Resultados do Controle de Posição	44
4.1.1	Comparação entre Controle P x Controle PI	45
4.2	Resultados do Sistema de Irrigação	46
5	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

Em um planeta com recursos cada vez mais escassos, é necessário gerir e alocar estes com muita eficiência. Cada vez mais a humanidade busca produzir com menor custo e gerando menos poluição. Os avanços científicos obtidos nos últimos séculos vêm possibilitando atender as demandas da humanidade com uma gradual diminuição do impacto ambiental ocasionado por estas.

Uma das áreas que mais se beneficiou do desenvolvimento tecnológico foi a agricultura. O surgimento de novas técnicas e ferramentas permitiu um crescimento na produção de alimentos em espaços com dimensões mais restritas e utilizando-se de menor quantidade de insumos.

De modo geral, nos últimos anos, a automação vem sendo cada vez mais utilizada para auxiliar a produção agrícola. Seja em controle de qualidade dos grãos, no sensoriamento das condições do meio em que se encontram as plantas ou até mesmo nos processos de crescimento e reprodução destas.

Em determinados casos, por condições adversas como ataques de insetos e surgimento de ervas daninhas que competem em nutrientes, é necessário desenvolver as plantas em um ambiente mais propício antes de leva-las ao solo. Mas como pode-se realizar esse desenvolvimento de um modo mais eficiente, otimizando tempo e recursos gastos para tal?

O intuito desse projeto é desenvolver um equipamento capaz de proporcionar o crescimento de plantas de maneira automatizada e com um custo relativamente baixo. O foco é a implementação de um controle de posição, para que a porção de terra em que se encontram as plantas em desenvolvimento receba a quantidade necessária de irrigação.

Sistemas automatizados permitem maiores controle e observação sobre a produção. Outro fator positivo sobre estes sistemas está no fato de que requerem menor intervenção humana durante o processo de desenvolvimento vegetal. Neste contexto, esse trabalho traz uma ferramenta capaz de atender estes requisitos, tendo em vista que o equipamento consegue monitorar o nível de umidade do solo para, assim, ajustar o ângulo de funcionamento e, com isso, o fornecimento de água e nutrientes de modo autômato.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Alface

A alface (*Lactuca sativa*) é uma hortaliça folhosa originária da região do Mediterrâneo. Foi introduzida na Europa Ocidental por volta do século XV e, posteriormente, chegou às Américas pelas expedições dos países Ibéricos durante o período da Colonização (SALA; COSTA, 2012).

É uma herbácea que possui pequeno caule com folhas que crescem em formato de roseta em volta deste. Suas raízes são ramificadas e podem atingir até 60 cm de profundidade, a depender da forma de semeadura. Pode ter aspecto crespo ou liso, com variadas tonalidades de cores verde ou roxa (FILGUEIRA, 2003).

Durante a década de 80, houve uma expansão no cultivo de alface crespa no país em detrimento da alface lisa, tradicionalmente mais consumida anteriormente. Hoje, a alface crespa é a mais comercializada nacionalmente, correspondendo a 70% do mercado, sendo esse fato exclusivo do Brasil se comparado à alficultura mundial. Este tipo de alface é o que melhor se adequa ao cultivo de verão (COSTA; SALA, 2005).

A alface tem bom desenvolvimento em sua fase vegetativa em condições climáticas mais frias, o que pode ser explicado devido ao fato de ser originária de regiões de clima temperado. Porém, sua fase reprodutiva inicia-se em dias com maiores períodos de incidência de luz solar e de temperaturas mais elevadas (RESENDE et al., 2007).

O plantio de alface demanda razoável quantidade de água, sendo necessário que o processo de irrigação assegure uma distribuição mais uniforme, fazendo com que o processo de infiltração hídrica no solo ocorra com o menor nível de escoamento superficial (AZEVEDO et al., 2000). A faixa de pH do solo entre 6,0 e 6,8 é mais propícia à adaptação das plantas e a aplicação de nutrientes como nitrogênio, potássio e sódio pode aumentar a produtividade (FILGUEIRA, 2008).

2.2 Automação da irrigação

Romero et al. (2012), ao analisarem o estado da arte dos sistemas de automação de irrigação, ressaltam que o desafio da irrigação de precisão consiste em não somente buscar uma referência constante de umidade do solo, mas também buscar um volume ótimo de umidade no solo que se relacione com a variação da necessidade hídrica das plantas ao longo do seu ciclo. Em um sistema de automação, a ideia chave consiste no

conceito de feedback, que pode ser compreendido como um mecanismo, processo ou sinal que é operacionalizado como um controle de funcionamento do sistema (Zhu & Li, 2011).

No campo da automação da irrigação, medições de variáveis do solo, planta e atmosfera relacionadas ao status hídrico da cultura podem fornecer as informações necessárias para o cálculo da lâmina de irrigação, tornando possível a programação do funcionamento do sistema para a reposição hídrica necessária (Romero et al., 2012).

Uma maneira usual de se implementar o controle da irrigação denomina-se controle de malha aberta, onde nenhuma medição em relação ao consumo hídrico das plantas é fornecida para modificar os próximos acionamentos, ou seja, nenhum feedback é utilizado. Nessa classe de controle as decisões são tomadas com base no conhecimento do operador ou em uma programação de acionamento previamente estabelecida. O segundo caso consiste no sistema de controle de malha fechada, onde os controladores utilizam informações de variáveis que monitoram continuamente a resposta do ambiente ou da planta aos acionamentos anteriores e utilizam essa informação para calcular a próxima lâmina de irrigação a ser aplicada (Boutraa et al., 2011). Atualmente existem no mercado vários modelos de controladores de irrigação (Acclima®, Watermark®, Rain Bird®, Hunter®, etc.) que regulam o conteúdo de água no solo baseados em medidas realizadas por sensores e, portanto, operam como controladores de malha fechada. Estes controladores acionam a irrigação quando os sensores detectam leituras abaixo de um limiar pré-definido e desligam quando outro limiar é alcançado. Essa referência pode ser definida como um valor constante, baseado na capacidade de campo ou em relação à quantidade de água prontamente disponível às plantas (Mccarthy et al., 2011). CardenasLailhacar et al. (2008) afirmam que estes sistemas são capazes de aumentar a eficiência de uso da água em relação aos sistemas baseados no tempo de funcionamento da irrigação, desde que os limiares de acionamento e desligamento sejam obtidos de forma adequada.

A maioria dos trabalhos relacionados a controladores de irrigação desenvolvidos na última década têm como premissa, o acompanhamento do conteúdo de água no solo, seja com a presença ou ausência de estratégias de otimização das aplicações de água ao longo do ciclo de cultivo (Cáceres et al., 2007; Boutraa et al., 2011). Estes dispositivos são de custo relativamente elevado, além de apresentarem a limitação da necessidade de um número considerável de sensores para garantir a representatividade espaço-temporal da umidade do solo. Com o intuito de reduzir de custos e viabilizar o monitoramento da umidade do solo como prática de manejo de irrigação, pesquisas vêm sendo

desenvolvidas com a utilização de diferentes técnicas de monitoramento indireto da umidade do solo com utilização de sensores construídos ou adaptados, além de integração destes com micro controladores de código aberto (Almeida et al., 2017; Arruda et al., 2017; Hedley et al., 2013).

2.3 Controle

O controle automático tem sido cada vez mais importante nos avanços científicos e de engenharia. Está presente nos mais diversos processos industriais, desde controle de variáveis de processo como temperatura, pressão, vazão, entre outras, até ferramentas CNC. Sua utilidade também se estende a projetos robóticos, militares e aeroespaciais. O controle automático vem progressivamente aumentando o desempenho de sistemas dinâmicos (OGATA, 2003).

No controle e um processo alguns elementos podem ser destacados. O sistema é um conjunto de componentes que atuam de forma integrada com objetivo de executar alguma ação. A variável controlada é uma variável a qual realiza-se medições desta e busca-se leva-la a um determinado valor de referência, sendo geralmente a saída do sistema. A variável manipulada é a grandeza modificada pelo controlador visando conduzir a variável controlada ao nível desejado (OGATA, 2003). Neste projeto, o sistema é o motor de corrente contínua, a variável controlada é a posição e a variável manipulada é a tensão aplicada à armadura.

2.3.1 Modelagem do sistema

Um modelo matemático é um análogo matemático feito para representar determinadas características presentes em um sistema real. É preciso ter em mente que o modelo desenvolvido é uma aproximação do funcionamento real do sistema, permitindo que para um único sistema possam haver variados modelos, com diferenças quanto a complexidade e desempenho, ficando a escolha entre um destes ligada às necessidades do projeto (AGUIRRE, 2007).

Existem várias formas para se obter o modelo matemático de um sistema. A técnica para obter o modelo matemático com base nos fenômenos físicos ou naturais que ocorrem no processo é chamada de modelagem caixa branca. Para esse tipo de modelagem é necessário ter um conhecimento profundo dos fenômenos que ocorrem no sistema e, a partir daí, estabelecer as relações matemáticas que o descrevem. Um outro método possível é a modelagem caixa preta, onde se tem pouco ou nenhum conhecimento

sobre o sistema e sua identificação se dá por meio da comparação entre o sinal de entrada aplicado a este e a resposta produzida em sua saída. Este último método também é chamado de modelagem empírica (AGUIRRE, 2007).

2.3.1.1 Modelo matemático do motor CC no domínio do tempo

Para obter o modelo matemático do motor de corrente contínua é preciso analisar seus funcionamentos elétrico e mecânico. As relações entre corrente e torque e velocidade angular e força contra eletromotriz serão necessárias para a elaboração do modelo. Partindo da análise das tensões no circuito elétrico e da análise mecânica no eixo é possível chegar às equações que descrevem seu comportamento (NISE,2010).

Equação (1): Força contra eletromotriz em função de velocidade

$$e_g(t) = K_b \omega(t)$$

Onde e_g [V] é a força contra eletromotriz, K_b [V.s/rad] é a constante de velocidade e ω [rad/s] a velocidade angular.

Equação (2): Relação entre velocidade e posição

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt}$$

Onde θ [rad] é a posição angular.

Equação (3): Circuito elétrico equivalente de um motor CC

$$L_a \frac{di_a(t)}{dt} + R_a i_a(t) + e_g(t) = v_a(t)$$

Onde L_a [H], i_a [A], R_a [Ω] e v_a [V] são, respectivamente, indutância, corrente, resistência e tensão da armadura.

Equação (4): Análise de torques atuantes no eixo

$$T_m(t) = T_L(t) + \beta \frac{d\theta}{dt} + J \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

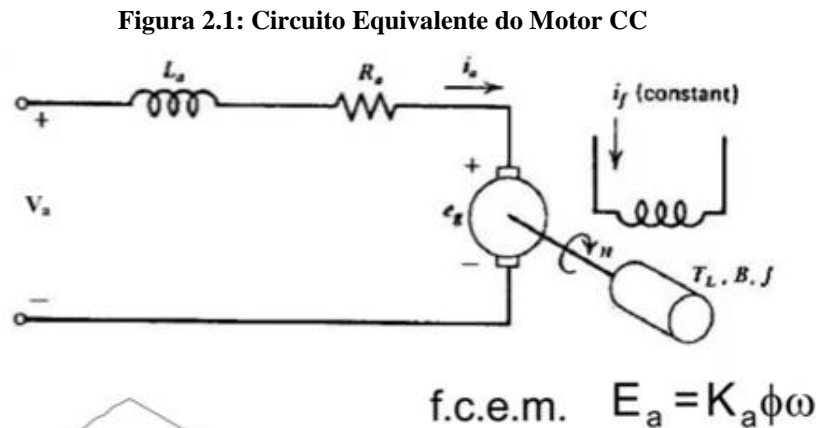
Onde T_m e T_L [N.m] são, respectivamente, os torques mecânico e da carga, β [N.m.s/rad] é o coeficiente de atrito/amortecimento cinético no eixo e J [kg.m²] o momento de inércia.

Equação (5): Relação entre torque e corrente

$$T_m(t) = K_t i_a(t)$$

Onde K_t [N.m/A] é constante de torque.

A figura 2.1 apresenta o circuito equivalente de um motor de corrente contínua:



Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=BMcvwp3dqu8>

2.3.1.2 Transformada de Laplace

A transformada de Laplace é um método para resolução de equações diferenciais lineares, que se utiliza da variável complexa s . Em vez de se resolver as equações com derivadas e integrais no domínio do tempo, é possível resolver o mesmo sistema em expressões algébricas no domínio da frequência (OGATA, 2003).

Ao passar uma equação para o domínio de Laplace, as variáveis que antes estavam em função do tempo t passam a ser expressas em função da variável de frequência s . Nas derivadas, multiplica-se s elevado à potência igual à ordem da derivada. Já nas integrais, a operação é de divisão de s elevado à potência correspondente à ordem da integral (NISE, 2010).

2.3.1.3 Função de transferência do motor CC

A função de transferência pode ser definida com a relação entre a entrada e a saída do sistema. Desse modo é possível obter uma representação do sistema no domínio da frequência, onde a ordem do sistema é dada pelo grau da maior potência do denominador da função (OGATA, 2003).

A função de transferência de um sistema é comumente escrita como $G(s)$ e pode também ser representada por um diagrama de blocos com a saída à sua direita e a entrada à sua esquerda (NISE, 2010).

O motor de corrente contínua pode ser descrito como um sistema de primeira ordem sem que haja perda de informação para o projeto do sistema de controle. A entrada do sistema é a tensão da armadura e a saída, a velocidade. Para obter a posição, basta adicionar um integrador à saída do sistema (OGATA, 2003).

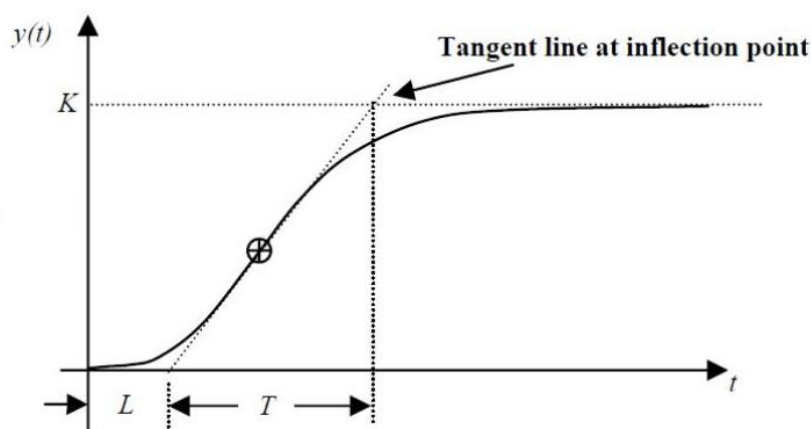
A função $G(s)$ tem três parâmetros a serem encontrados: o ganho em malha aberta (K), que corresponde à razão entre a saída e a entrada do sistema, o tempo morto (L), sendo este o tempo que o sistema demora a começar a atuar sobre a saída, e a constante de tempo (T), que representa o tempo característico da resposta dinâmica do sistema (OGATA, 2003).

Equação (6): Função de transferência do motor CC (Saída: velocidade)

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Existem algumas formas para se obter esses parâmetros. Uma delas é utilizando o método de Ziegler-Nichols. Para se encontrar o ganho, divide-se a amplitude da saída pela amplitude de entrada do sistema. Para a constante de tempo, encontra-se a reta tangente à curva de resposta e, em seguida, demarca-se os pontos onde a reta cruza o eixo do tempo e o valor limite da resposta. Por fim, o tempo morto é o espaço de tempo entre o tempo inicial do gráfico e o início da marcação da constante de tempo. A figura abaixo demonstra como encontrar os parâmetros de Ziegler-Nichols em um gráfico de resposta de um sistema de primeira ordem:

Figura 2.2: Gráfico de resposta do sistema para aplicação do método Ziegler-Nichols

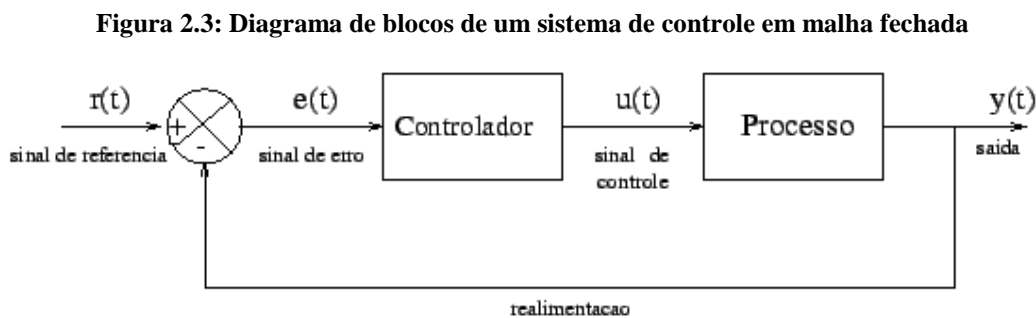


https://www.researchgate.net/figure/Response-Curve-of-Ziegler-Nichols-Method_fig1_343664936

2.3.2 Sistema de controle em malha fechada

Os sistemas de controle em malha fechada, também conhecidos com sistemas de controle com realimentação, são aqueles que fazem a comparação entre o sinal de saída e a entrada de referência. Esta diferença é conhecida como erro e seu sinal é aplicado ao controlador para que a saída do sistema se aproxime o máximo possível do valor de referência (OGATA, 2003). É uma boa ferramenta para se compensar distúrbios e ajustar o erro em estado estacionário (NISE, 2010).

O sensor é o elemento que medirá a variável de saída e converterá esse valor para uma forma que possa ser utilizado pelo controlador. Este último, com base na referência e na leitura feita pelo sensor, gera um sinal a ser aplicado no atuador, que por sua vez age no valor da saída do sistema (NISE, 2010). A seguinte figura apresenta o diagrama de blocos de uma malha de controle:



Fonte: <http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node6.html>

Equação (7): Erro do sistema em malha fechada

$$E(s) = R(s) - Y(s)$$

Com $E(s)$ sendo o erro, $R(s)$ a referência e $Y(s)$ a saída do sistema.

Equação (8): Saída do sistema como função do erro

$$Y(s) = C(s)G(s)E(s)$$

Onde $C(s)$ é a função de transferência do controlador e $G(s)$, a do motor.

Equação (9): Função de transferência do sistema em malha fechada

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G(s)}$$

2.3.3 Controle PID

Os controladores PID (Proporcional, Integral, Derivativo) são muito utilizados devido à sua aplicabilidade à maioria dos tipos de sistema de controle, podendo estar presentes em processos de controle eletrônicos, hidráulicos, pneumáticos, entre outros. Esse tipo de controlador permite uma sintonia mais precisa no que se refere à resposta transitória do sistema (OGATA, 2003).

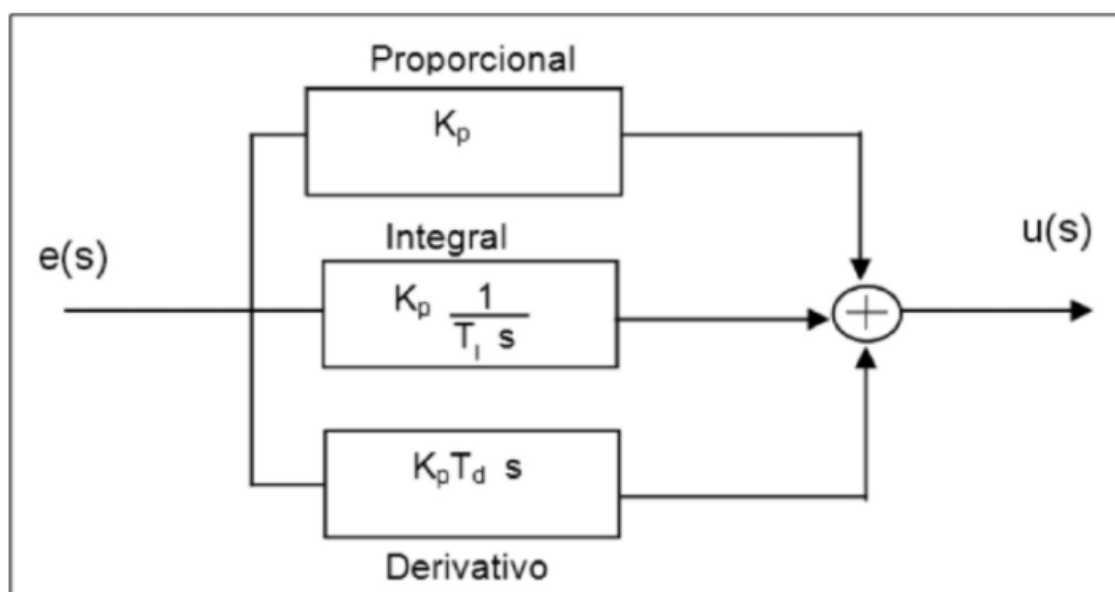
Seu funcionamento ocorre da seguinte maneira: o sinal de erro advindo da comparação entre a entrada de referência e a saída do sistema é aplicado na entrada do controlador. A partir desse ponto, o erro passa por três ramificações, sendo uma onde é aplicada a este o ganho proporcional (K_p), outra onde esse sinal é integrado e multiplicado pelo ganho integral (K_i) e na última o sinal de erro é derivado e multiplicado pelo (K_d). Por fim, os valores de saída dessas operações são somados e o resultado, também conhecido como sinal de controle, é aplicado ao processo (NISE, 2010).

Equação (10): Função de transferência em malha fechada com controlador PID

$$\frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{KdKs^2 + KpKs + KiK}{Ts^3 + (KdK + 1)s^2 + KpKs + KiK}$$

A figura 2.4 apresenta um diagrama de blocos que exemplifica o funcionamento do controlador PID:

Figura 2.4: Estrutura de um controlador PID



2.4 Componentes do circuito de controle

Abaixo são apresentadas descrições sobre os componentes utilizados no trabalho.

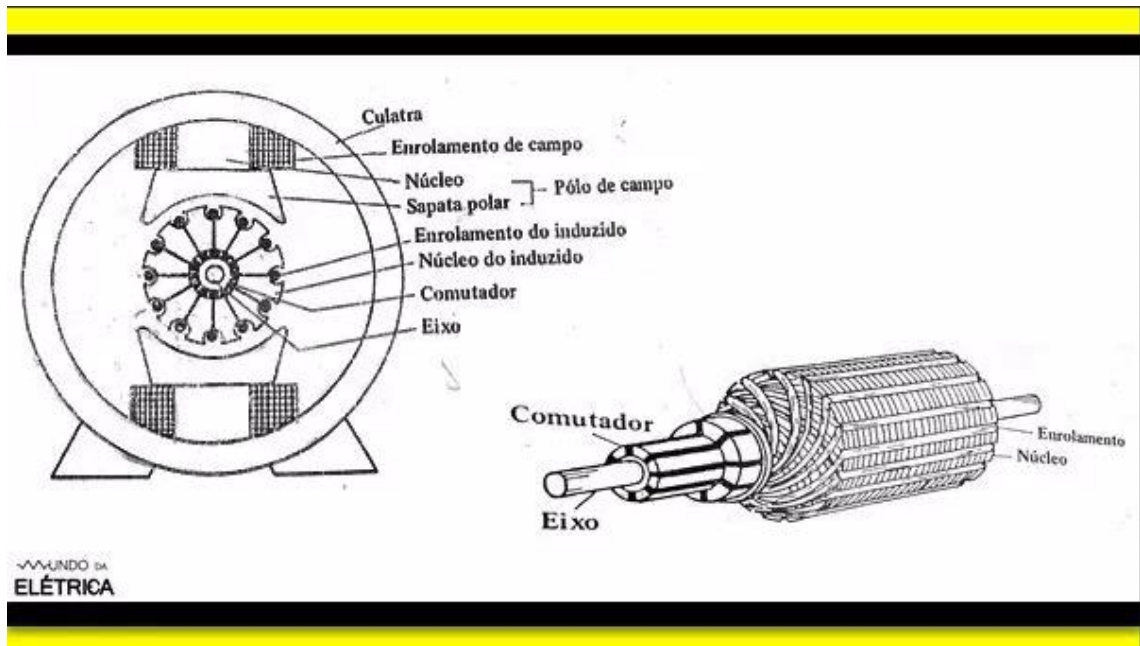
2.4.1 Motor CC

O motor de corrente contínua é uma máquina elétrica capaz de converter em rotação a energia elétrica fornecida à esta por fonte de corrente contínua (KOSOW, 1982). Motores CC são equipamentos muito versáteis quanto à sua aplicação. As relações entre tensão, corrente, velocidade e torque possibilitam que sejam implementados sistemas de controle com alto grau de precisão (FITZGERALD et al., 2005). Duas partes que compõem esse mecanismo podem ser destacadas, que são o rotor, parte girante do motor, e estator, parte estática onde se forma o campo magnético (KOSOW, 1982).

O rotor é constituído de eixo, núcleo e enrolamento da armadura e comutador. O eixo da armadura proporciona rotação aos demais itens do rotor. O núcleo da armadura é feito de lâminas de aço, de modo a reduzir correntes parasitas e manter baixa relutância magnética entre os polos. O enrolamento é formado por bobinas isoladas entre si e entre o núcleo. O comutador é uma estrutura de segmentos de cobre ligados às bobinas e isolados do eixo e entre si que realizam o chaveamento necessário ao passo que o motor gira (KOSOW, 1982).

Situada ao entorno do rotor, encontra-se a estrutura do estator. Dentre as partes componentes deste, pode-se destacar alguns itens. A carcaça suporta a estrutura interna do motor e provê retorno de fluxo para o circuito magnético gerado pelos enrolamentos do campo, sendo que estes geram uma força magneto motriz para produzir fluxo magnético necessário para acarretar em força mecânica. Os polos são as regiões presas à carcaça onde esses enrolamentos estão inseridos e possuem sapatas curvadas para distribuição mais uniforme do fluxo. O interpolo fica localizado entre polos, tem tamanho menor que estes e possui um enrolamento de fio grosso e poucas espiras ligado em série ao circuito da armadura (KOSOW, 1982). Na figura 2.5 tem-se uma representação da estrutura funcional de um motor CC:

Figura 2.5: Representação de Rotor e Estator de Motor CC



Fonte: <https://www.mundodaeletrica.com.br/motor-de-corrente-continua-caracteristicas-e-aplicacoes/>

Os motores de corrente contínua possuem características que facilitam sua controlabilidade. O torque mecânico no eixo é diretamente proporcional à corrente elétrica da armadura e a velocidade de rotação é linearmente dependente da força contra eletromotriz gerada (FITZGERALD et al., 2005).

Em 2016, o mercado mundial de motores elétricos foi avaliado em mais de US\$ 20 bi. Largamente utilizado nas mais diversas aplicações industriais, esse segmento de mercado tende a crescer ainda mais devido ao aumento do número de veículos de motores elétricos (GRAND VIEW RESEARCH, 2017).

2.4.1.1 Motor AK510/8.5PF12R13SE

O motor AK 510/8.5PF12R13SE é um modelo de micromotor fabricado pela empresa Akiyama Motors. Sua tensão nominal é 12 V, mas pode operar em uma faixa entre 6 e 15 V. No momento de partida, a corrente atinge 4.4 A e o torque chega a 55kgf.cm. Sem carga, apresenta velocidade de 13 rpm e corrente de 140 mA. Em seu máximo rendimento, a corrente é de 300 mA, o torque 8.5 kgf.cm, a velocidade 11.7 rpm e a potência 3.7 W (TECHMAKERS). A figura 2.6 mostra a vista da parte externa do referido micromotor:

Figura 2.6: Micromotor AK 510/8.5PF12R13SE



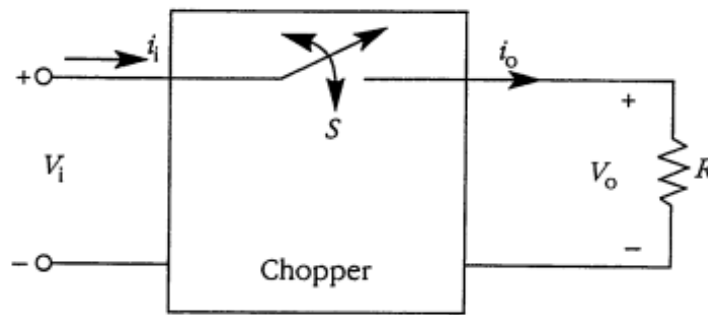
Fonte: <https://www.techmakers.com.br/produto/micro-motor-dc-akiyama-com-caixa-de-reducao-12v-13rpm-8-50kgf-cm-ak510-8-5pf12r13se-70128>

2.4.1.2 Chopper

O chopper é um circuito utilizado para obter uma saída de tensão CC variável por meio de uma fonte de tensão CC. Por esta razão também são chamados de conversor CC-CC. Para que seja possível realizar essa conversão, o circuito apresenta um indutor e/ou um capacitor e um semicondutor, para promover o chaveamento (AHMED, 2000).

Para critérios de projeto, assume-se a tensão de entrada do conversor como uma fonte ideal, ou seja, com zero impedância interna. A parte da saída é definida como uma carga, que no caso do motor elétrico pode ser expressa como um indutor em série com um resistor. Um semicondutor atua como uma chave, conectando e desconectando a fonte de tensão e a carga. O nível a tensão de saída pode ser controlado para atingir um nível desejado, tendo como base a tensão de entrada. Esse controle é feito de acordo com o tempo em que chave fica ligada ou desligada (MOHAN et al., 1995). A figura 2.7 apresenta o circuito de um conversor CC-CC:

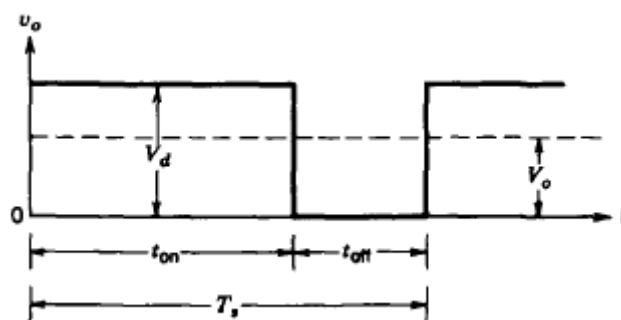
Figura 2.7: Circuito básico para representação de um conversor CC-CC



Fonte: AHMED, 2000

O método utilizado para realizar o controle desse chaveamento chama-se PWM (*Pulse Width Modulation*). Esse sistema consiste em configurar o tempo em que a chave fica ligada ou desligada durante um ciclo de operação do circuito. A razão entre o tempo em que a chave fica acionada e o período total é chamada de *Duty Cycle*. O período do ciclo é inversamente proporcional à frequência de chaveamento do circuito. A figura abaixo demonstra graficamente como funciona o PWM, onde V_d = tensão de entrada, V_o = valor médio da tensão de saída, T_s = período do ciclo, T_{on} = tempo em que a chave fica ligada e T_{off} = tempo em que a chave fica desligada (MOHAN et al., 1995). Na figura abaixo, o gráfico do PWM ao longo do tempo:

Figura 2.8: Gráfico de PWM

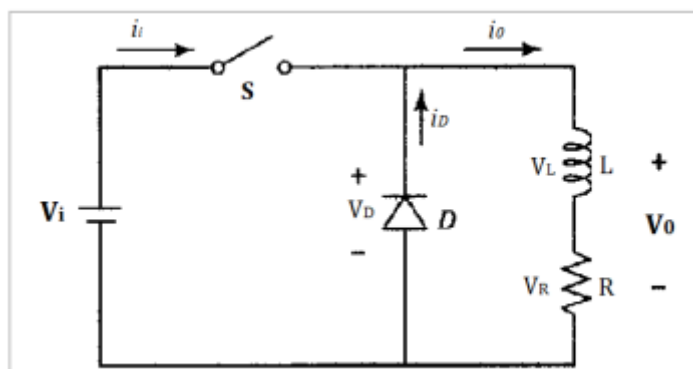


Fonte: MOHAN et al., 1995

Um dos tipos de conversor CC-CC é chamado de chopper *step-down* ou *buck*. É utilizado em circuitos de acionamento de motores CC para controlar o valor de tensão na carga entre 0 V e o valor de tensão da fonte, variando-se assim a velocidade de rotação. Essa configuração de circuito apresenta um indutor L e um diodo D, além dos demais componentes do circuito básico (AHMED, 2000).

O funcionamento ocorre da seguinte maneira: enquanto a chave S está ligada, a carga é alimentada pela fonte de tensão V_i e a ramificação do diodo não tem passagem de corrente. Assim que a chave fecha, o indutor passa a fornecer uma corrente decrescente com o tempo, que agora passa a circular pelo diodo, e assim, alimenta a carga, mesmo sem a circulação de corrente da fonte. Nessa configuração, a tensão de saída é proporcional ao valor de *Duty Cycle* (AHMED, 2000). Uma representação de um circuito chopper *step-down* pode ser vista na figura abaixo:

Figura 2.9: Circuito Equivalente Para Chopper Buck



Fonte: <https://www.qconcur.com/questoes-de-concur/questoes/2b9ff2f2-af>

2.4.2 Arduino

Inicialmente desenvolvido como uma ferramenta de auxílio ao ensino, O Arduino vem a ser lançado comercialmente por Massimo Banzi e David Cuartielles. Acabou por se tornar um sucesso entre fabricantes e estudantes por ter boa durabilidade e ser de fácil utilização (MONK, 2013).

O Arduino é um pequeno dispositivo programável, capaz de processar entradas e saídas capaz de interagir com componentes externos conectados a este. É uma plataforma embarcada, o que significa pode comunicar-se por hardware e software com o ambiente a sua volta (MCROBERTS, 2011).

Um outro fator que impulsiona seu sucesso é o fato de que os projetos com Arduino estão disponíveis de forma gratuita. Devida ao tipo de licença Creative Commons, diversas placas similares, com a mesma funcionalidade e custo mais baixo podem ser fabricadas, porém apenas o nome Arduino está protegido por lei (MONK, 2013).

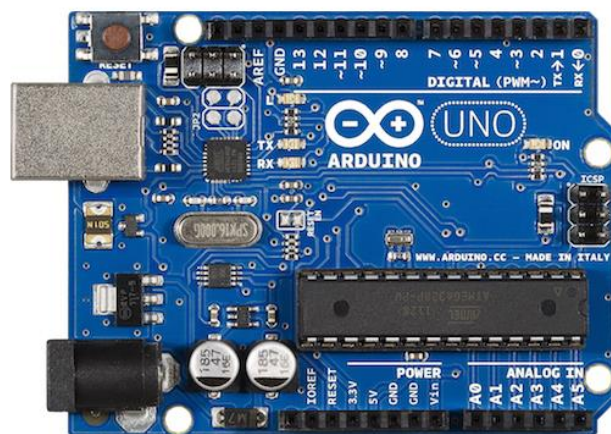
O IDE (*Integrated Development Environment*) do Arduino é o software onde o código a ser enviado para o dispositivo é desenvolvido. Possui as ferramentas para edição,

teste, compilação e comunicação com a placa do Arduino. A linguagem e programação é baseada em C e o software possui versões para rodar nos diversos Sistemas Operacionais. O código desenvolvido também pode ser chamado de sketch (MCROBERTS, 2011).

2.4.2.1 Arduino Uno

O Arduino Uno é um dos modelos mais populares das placas Arduino. Possui uma porta USB para comunicação com outros dispositivos e o microcontrolador presente nesta placa é o ATmega328 (MONK, 2013). Possui 6 entradas analógicas, 14 pinos digitais configuráveis como entrada ou saída, sendo que 6 dessas podem ser utilizadas como saída PWM, e opera em uma frequência de 16 MHz (ARDUINO). A figura 2.10 exibe a vista superior de uma placa de Arduino Uno:

Figura 2.10: Placa Arduino Uno

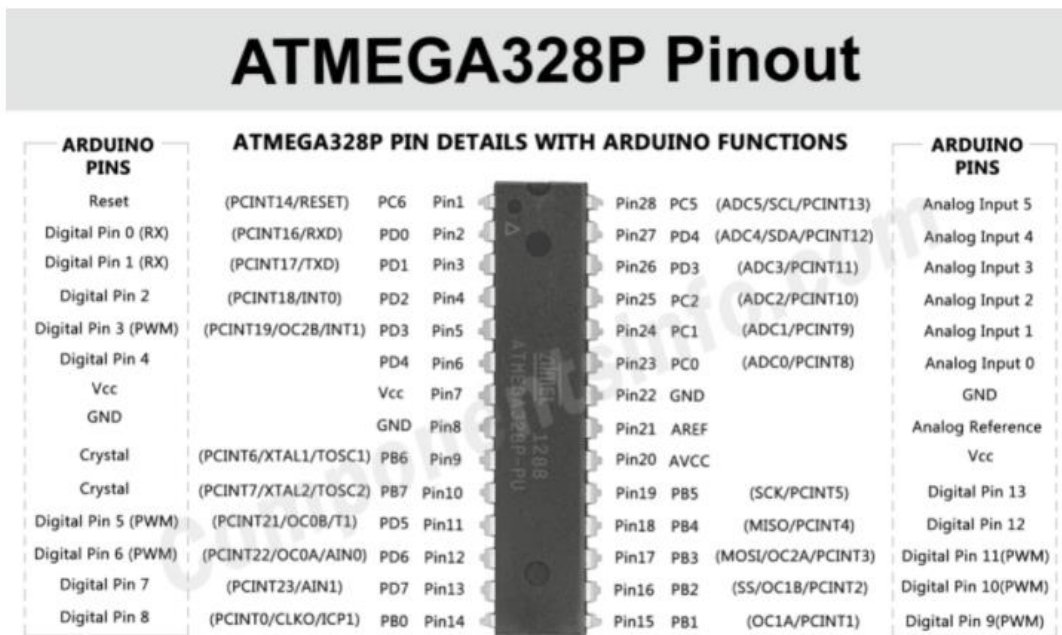


Fonte: <https://blog.smartkits.com.br/arduino-uno/>

2.4.2.2 ATmega328P

O ATmega328P é um modelo de microcontrolador de 8 bits desenvolvido pela empresa Atmel. Possui 32K bytes de memória flash, 2 Kbytes de memória SRAM e 1 Kbyte de memória EEPROM (memória que não se apaga quando a energia é desconectada). Tem 23 pinos de entrada e/ou saída de uso geral, 32 registradores de uso geral, 6 portas conversoras analógico digital de 10 bits. Opera com uma tensão de alimentação entre 2,7 V e 5,5 V (ATMEL, 2015). A figura abaixo apresenta a configuração dos pinos no chip ATmega328P:

Figura 2.11: Descrição dos pinos do microcontrolador ATmega328P



Fonte: <https://www.componentsinfo.com/atmega328p-pinout-configuration-datasheet/>

2.5 Display LCD

O módulo LCD é uma interface de saída que pode ser associada a um sistema microprocessado. Seu projeto é feito de modo que seja possível conectar-se com a grande maioria dos modelos de CPU, bastando que a CPU consiga operar de acordo com a temporização de escrita e leitura do display LCD (BARBACENA, FLEURY, 1996).

Um dos tipos de displays LCD disponíveis no mercado é o módulo a caracteres. Apresenta um número de linhas por colunas para exibição de texto, sendo que um caractere ocupa uma posição dessa matriz. A quantidade de pinos para conexão desse tipo de dispositivo se dá de acordo com o número de colunas e linhas que possui (BARBACENA, FLEURY, 1996). A imagem do visor de um display LCD pode ser vista logo abaixo:

Figura 2.12: Display LCD de 16 colunas x 2 linhas



Fonte: <https://www.usinainfo.com.br/display-arduino/display-lcd-16x2-com-fundo-azul-2304.html>

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi desenvolvido em cinco etapas: na primeira foi realizada a montagem do protótipo de irrigação das plantas. Na segunda, a construção das placas de controle. Na terceira foi feita a modelagem do sistema de controle. Na quarta foi implementado o código no microcontrolador. Por fim, foram realizados os testes.

3.1 Montagem do equipamento

Para iniciar a montagem do dispositivo é necessário fazer um furo de 22mm no centro da largura e em 260mm no comprimento em cada uma das tábuas de madeira 380 mm x 100mm, para inserção do rolamento. A profundidade do furo deve ser o suficiente para que o rolamento não fique ressaltado na chapa, mas também não seja passante.

Em uma dessas tábuas deve ser fixada a placa de plástico onde vai o motor. A placa fica presa à tábua utilizando as duas barras roscadas de ¼", 8 porcas de ¼" e 8 arruelas. Na placa deve ter o furo para o eixo do motor e os furos para parafusar o motor na mesma, além da furação para as barras roscadas.

Em seguida, a base das tábuas de 380mm x 100mm deve ser parafusada no centro da largura da tábua maior e a haste de 8 mm posicionado de forma a passar entre os rolamentos das duas tábuas, ficando esse último paralelo aos 340mm de comprimento da tábua maior.

Após esse procedimento, a luva deve ser soldada na ponta do tubo correspondente ao lado da chapa com a placa de plástico para acoplamento do motor. Posteriormente, fixa-se a luva ao eixo do motor utilizando o parafuso prisioneiro. A fixação do motor pode ser vista na figura abaixo:

Figura 3.1: Estrutura da tábua o motor

Fonte: Do Autor (2022)

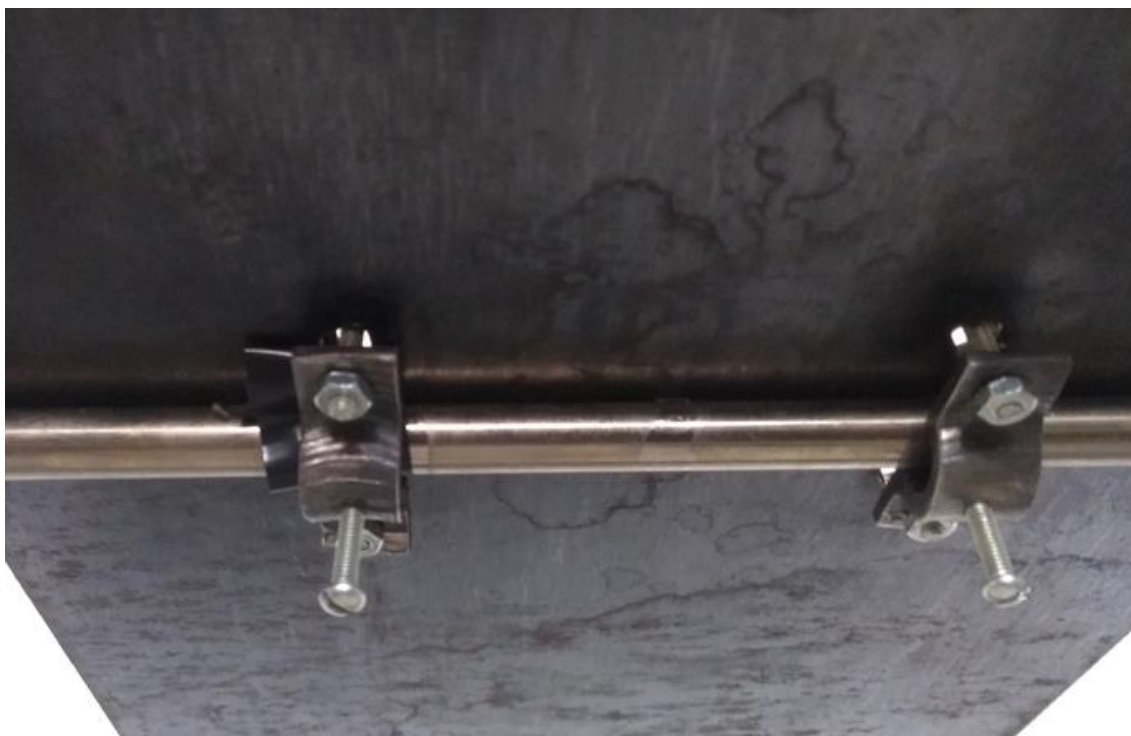
Na tábua oposta ao motor, o potenciômetro deve ser acoplado à ponta da haste. Para tal, utiliza-se a chapa fina de alumínio para prender o potenciômetro na chapa. É necessário fazer um furo para o parafuso de $\varnothing 5\text{mm}$ para madeira em uma das pontas e um furo para o eixo rotacional na outra ponta dessa chapa. Esta deve ser dobrada em formato de S de modo que o parafuso a fixe na madeira e o eixo rotacional do potenciômetro esteja alinhado com a haste para a fixação destes dois últimos. A figura 3.2 mostra como o potenciômetro foi fixado:

Figura 3.2: Fixação do potenciômetro

Fonte: Do Autor (2022)

A chapa de aço de 300mm x 200mm deve ser fixada à haste de modo que sua largura esteja alinhada com o eixo, ficando, assim, 150mm para cada um dos lados. A chapa fixa-se à haste por meio das alças de aço, que precisam ter furos rosqueados de 1/8” em suas pontas e no centro de suas curvas, e dos parafusos, que 2 deles prendem as alças à haste e os outros 4 prendem a chapa às hastes. A vista inferior da chapa de aço carbono, onde se encontra a conexão entre a chapa, a haste e as alças, está representada na figura abaixo:

Figura 3.3: Vista inferior da conexão entre eixo, chapa, alças e parafusos



Fonte: Do Autor (2022)

No recipiente de plástico devem ser feitos alguns furos ao longo da divisória à uma altura de 20mm do fundo desta. Por fim, prende-se a recipiente à chapa de aço carbono, de maneira que a divisória fique posicionada no centro da chapa. Em um dos lados do recipiente ficará a água, em um nível pouco abaixo ao dos furos e na outra parte, uma pequena bandeja com mudas de alface, onde o sensor de umidade será posicionado. A seguinte figura demonstra como fica o posicionamento do recipiente na chapa:

Figura 3.4: Recipiente posicionado sobre a chapa



Fonte: Do Autor (2022)

Na tabela 3.1 estão listados os componentes utilizados na montagem:

Tabela 3.1: Lista de componentes estruturais

Item	Quantidade	Descrição
Haste de aço	01	390mm x Ø8mm
Luva de aço	01	40mm x Ø6mm interno
Tábua de madeira MDF	01	340mm x 300mm x 20mm
Tábua de madeira MDF	02	380mm x 100mm x 15mm
Chapa de aço carbono	01	300mm x 200mm x #3/16"

Recipiente de plástico com divisória	01	288mm x 165mm x 40mm
Rolamento	02	608 2Z
Barra roscada	02	#Ø1/4" x 110mm
Porca	08	#Ø1/4"
Arruela	08	#Ø1/4"
Parafuso para madeira	04	30mm x Ø2,8mm
Parafuso pra madeira	01	30mm x Ø5mm
Chapa de alumínio	01	80mm x 20mm x 1,5mm
Alça de aço	02	40mm x #1/2" x 12mm
Parafuso	06	Ø1/8" x #3/4" BSW
Potenciômetro	01	5kΩ
Motor CC 12V	01	AK510/8.5PF12R13SE

3.2 Sensor de posição

A posição é obtida por meio do potenciômetro de 5kΩ acoplado ao eixo. A leitura deste é feita pela porta analógica A0 e seu valor de leitura pode variar entre 0 e 1023 (10 bits). O deslocamento máximo do potenciômetro é de 270°, sendo que o valor 0 representa -135° e 1023 significa 135°.

3.3 Higrômetro

Para medição da umidade do solo, utiliza-se o módulo do higrômetro. O valor deste sensor é lido pela porta analógica A3 e, assim como no caso do potenciômetro, tem sua indicação feita em 10 bits. Porém, a leitura obtida por esse sensor não varia ao longo de todo intervalo de 0 a 1023, ficando compreendida no intervalo entre 777 e 1023. Uma imagem do módulo de sensor de umidade pode ser vista a seguir:

Figura 3.5: Módulo higrômetro

Fonte: Do Autor (2022)

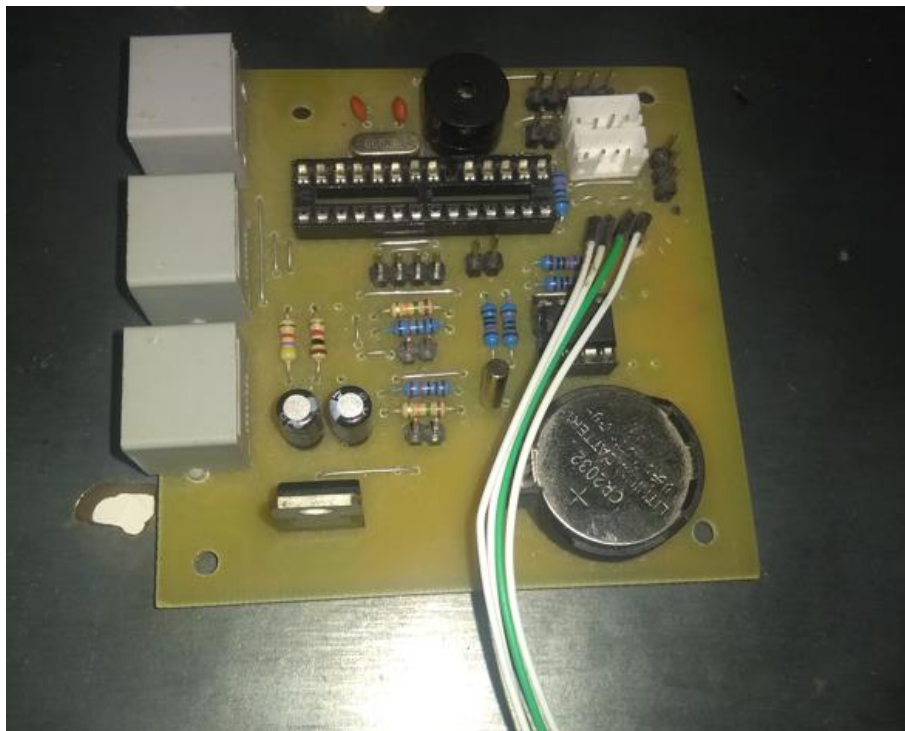
A leitura do sensor diminui à medida que o solo recebe mais água. O que significa que o valor 1023 representa um solo seco e 777 indica máximo índice de umidade presente. Com base nisso, realiza-se um escalonamento desses valores para determinar o ângulo que o motor precisa alcançar para que seja despejada a quantidade necessária de água. Os valores de ângulo estão compreendidos entre 0° e 15° para serem passados como parâmetro ao sistema de controle.

3.4 Placas do circuito de controle

3.4.1 Placa de conexão de dispositivos

A placa de conexão dos dispositivos tem a função de interligar o microcontrolador, o cristal oscilador e o regulador de tensão entre si e realizar a comunicação do ATmega328P com o display LCD, os sensores de posição e umidade e a placa de acionamento o motor. A função do cristal oscilador é de estabelecer a frequência de Clock do ATmega328P, já o regulador de tensão é necessário para fornecer uma tensão de 5V para o microcontrolador, utilizando a entrada de 12V da fonte. A figura 3.6 apresenta a vista a placa de conexão de circuitos já pronta:

Figura 3.6: Placa de conexão de circuitos



Fonte: Do Autor (2022)

Abaixo apresenta-se a tabela de componentes eletrônicos necessários para a construção da placa de conexão:

Tabela 3.2: Lista de componentes da placa de conexão do dispositivo

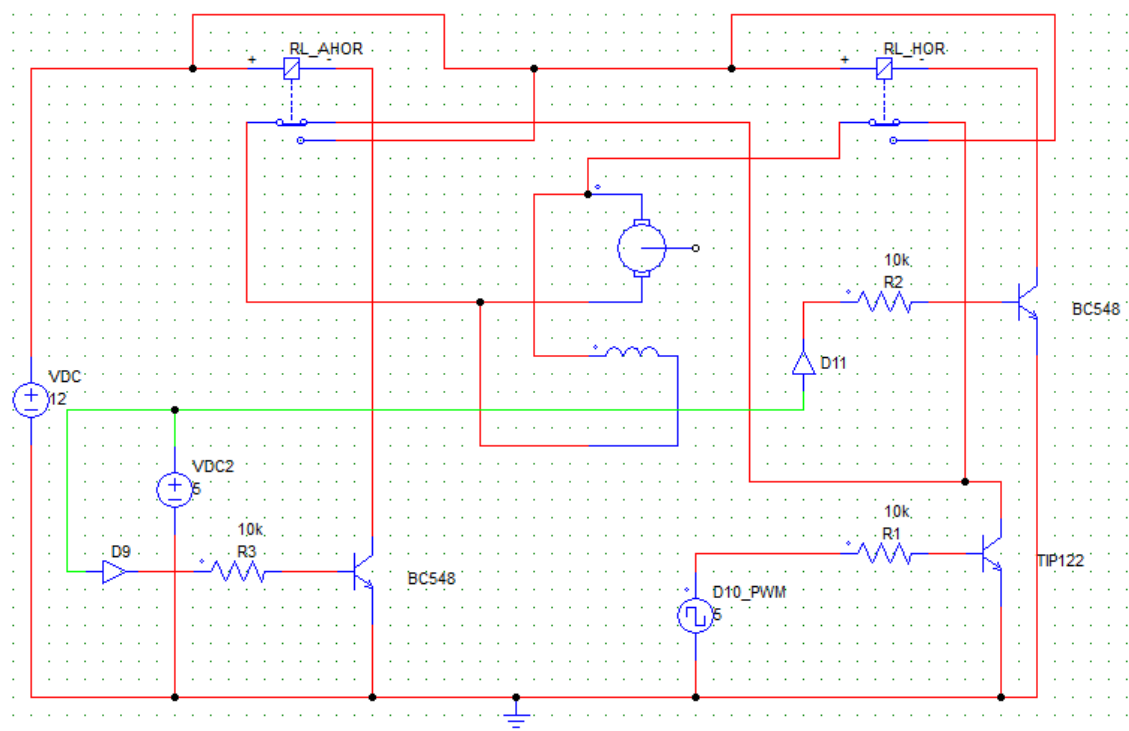
Item	Quantidade	Descrição
Placa de circuito impresso	01	100mm x 100mm
Capacitor eletrolítico	01	0,33 μ F
Capacitor eletrolítico	01	0,1 μ F
Capacitor cerâmico	02	1nF
Resistor	07	10k Ω , precisão 1%;
Resistor	02	15k Ω
Resistor	01	4.7k Ω
Resistor	01	1k Ω
Regulador de tensão 12V-5V	01	LM7805
Módulo Display LCD	01	I2C
Chip Microcontrolador	01	ATmega328P
Suporte para microcontrolador	01	28 pinos

Cristal oscilador	01	16kHz
-------------------	----	-------

3.4.2 Placa de acionamento do motor

A placa de acionamento do motor é onde os valores de saída do microcontrolador são aplicados para controlar a velocidade e o sentido de giro do motor. Seu funcionamento pode ser descrito no esquemático abaixo:

Figura 3.7: Representação do circuito eletrônico da placa de acionamento do motor



Fonte: Do Autor (2022)

Tabela 3.3: Lista de componentes da placa de acionamento do motor

Item	Quantidade	Descrição
Placa de circuito impresso	01	100mm x 100mm
Resistor	03	10 k Ω
Relé 12V	02	AZ1RC2
Transistor	02	BC548
Transistor	01	TIP122

3.5 Código para acionamento do motor

O movimento do motor é controlado por meio de três portas do microcontrolador ATmega328P, sendo essas portas os pinos digitais 9, 10 e 11. O pino 10 é por onde o sinal PWM para acionamento do motor é enviado e os pinos 9 e 11 são responsáveis por fornecer a orientação de giro do motor, onde o 9 aciona o relé de sentido anti-horário e o 11, o de sentido horário.

O sinal enviado pelos pinos D9 ou D11, que define o de sentido de rotação, é aplicado na base de transistores BC548, para realizar o acionamento da bobina do relé de sentido horário ou anti-horário. Os contatos do tipo normal aberto dos relés ficam conectados aos 12V da fonte, os contatos do tipo normal fechado são ligados ao emissor do transistor TIP122 e o contato comum de cada relé fica vinculado à um dos polos de ligação do motor.

A função de controle de giro, responsável por coordenar a velocidade e o sentido de giro do motor, recebe dois números inteiros como parâmetro: o sinal de controle e a orientação. O sinal de controle é um valor entre 0 e 255 (8 bits) representando a saída PWM do pino 10. Se o valor da variável orientação for 0, o pino 9 recebe 0V, o pino 11 recebe 5V, fazendo o motor girar no sentido horário. Caso o valor de orientação seja 1, o pino 11 vai para 0V e o 9 para 5V, levando o motor a movimentar-se em sentido anti-horário. E qualquer outra possibilidade de valor para orientação, os 3 pinos são levados a 0V. O código da função se apresenta na figura a seguir:

Figura 3.8: Código da função de controle de giro

```
void girCtrl(int s_ctrl, int ori){ //Função de acionamento do motor
//Rcebe o sinal de controle e a orientação de giro como parâmetros
if(ori == 1){ //Se a orientação for 1 (anti-horário)...
    digitalWrite(pinH,LOW); //Desativa bobina do relé de sentido horário
    digitalWrite(pinAH,HIGH); //Ativa bobina do relé de sentido anti-horário
    analogWrite(tpl,s_ctrl); //Envia o sinal PWM de controle para o pino do TIP122
}
else{
    if(ori == 0){
        digitalWrite(pinAH,LOW); //Desativa bobina do relé de sentido anti-horário
        digitalWrite(pinH,HIGH); //Ativa bobina do relé de sentido horário
        analogWrite(tpl,s_ctrl); //Envia o sinal PWM de controle para o pino do TIP122
    }
    else{
        digitalWrite(pinAH,LOW); //Desativa bobina do relé de sentido anti-horário
        digitalWrite(pinH,LOW); //Desativa bobina do relé de sentido horário
        analogWrite(tpl,0); //Envia o sinal zero para o pino do TIP122
    }
}
}
```

Fonte: Do Autor (2022)

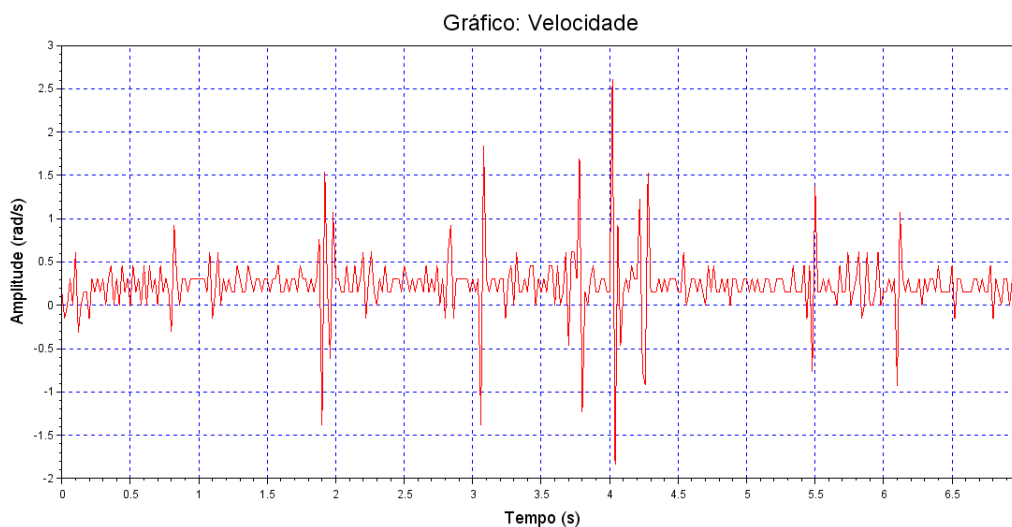
3.6 Controle de Posição

3.6.1 Identificação do sistema

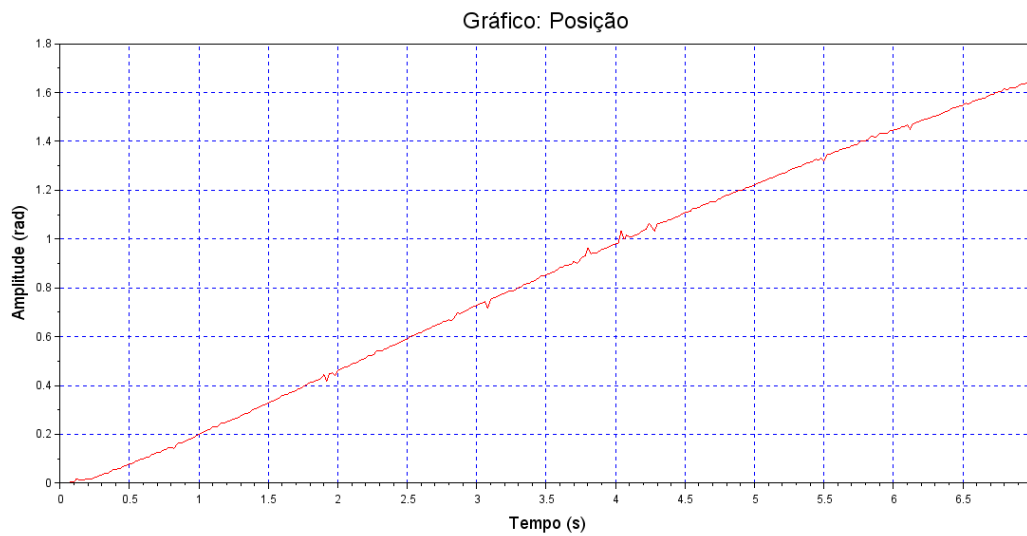
Para se encontrar os parâmetros do sistema do motor CC, foi aplicada uma entrada de 1,5V de tensão, o que equivale a 0,125 de Duty Cycle para o PWM. Por meio das medidas obtidas pelo potenciômetro, utilizando um intervalo de amostragem de 20 milissegundos e aplicando a tensão de 1,5V durante um período de 7 segundos, obteve-se os valores de resposta de posição em malha aberta. Os dados foram obtidos utilizando o Monitor Serial do Arduino.

Os valores de leitura do potenciômetro obtidos foram transferidos para um vetor. Em seguida, foram convertidos da escala de 10 bits de leitura do Arduino para radianos e, para fins de normalização, os valores do vetor foram divididos pelo módulo da entrada (1,5). Com essas operações, utilizando o software Scilab, traçou-se os seguintes gráficos, exibidos nas figuras 3.9 e 3.10:

Figura 3.9: Gráfico de resposta de velocidade

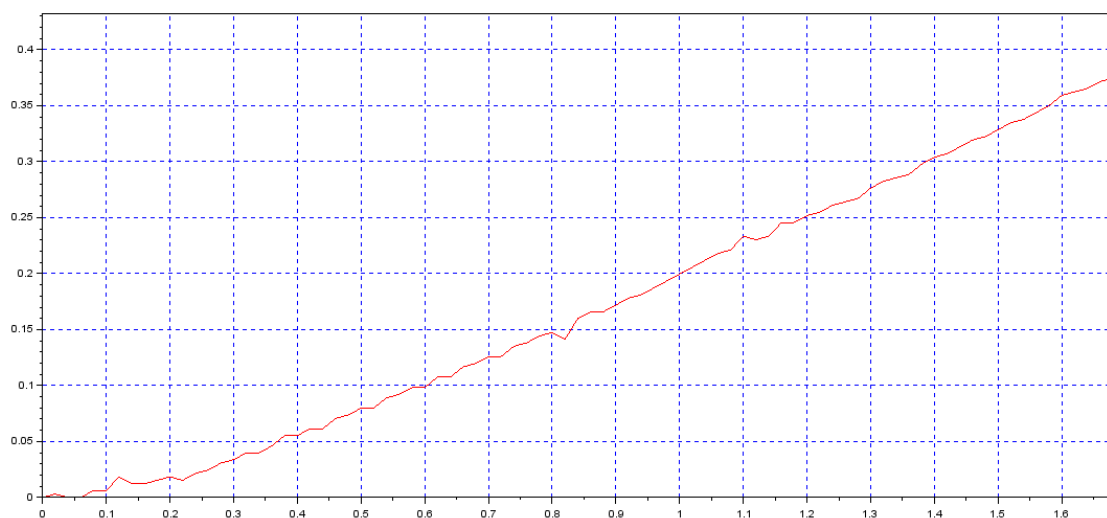


Fonte: Do Autor (2022)

Figura 3.10: Gráfico de resposta de posição

Fonte: Do Autor (2022)

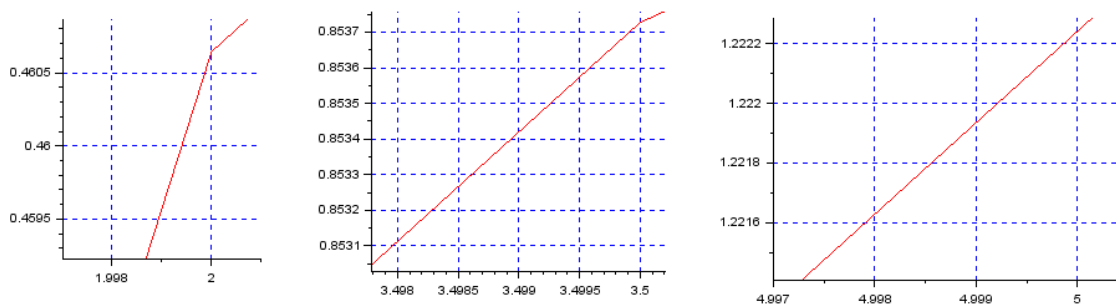
O gráfico de velocidade apresentou muitos ruídos e oscilações, entretanto, analisando-se o gráfico de posição, é possível obter as informações necessárias para identificação do sistema e elaboração de seu modelo. O tempo morto não foi percebido, então $L = 0$, a constante de tempo T pôde ser obtida pegando como base o tempo ao qual a curva de resposta leva para se aproximar de uma reta e o valor de ganho K pôde ser encontrado pela razão entre a variação da posição e a variação do tempo. A figura abaixo mostra o intervalo do gráfico utilizado para obter o tempo morto e a constante de tempo:

Figura 3.11: Recorte gráfico para obtenção de parâmetros de tempo

Fonte: Do Autor (2022)

A constante de tempo do sistema obtida foi $T = 0,25$ segundos. Já para calcular o ganho, foram analisados 3 instantes de tempo (2, 3,5 e 5 segundos) e as respectivas posições correspondentes a esses tempos (0,4606, 0,8537 e 1,2222). O ganho foi obtido por meio da média da razão das diferenças de posição pelas diferenças de tempo nos dois intervalos analisados. A figura 3.12 apresenta os recortes dos três pontos utilizados para encontrar o ganho:

Figura 3.12: Recortes gráficos para obtenção do valor do ganho



Fonte: Do Autor (2022)

Equação (11): Cálculo do ganho de malha aberta

$$K = \frac{\frac{\Delta y_1}{\Delta t_1} + \frac{\Delta y_2}{\Delta t_2}}{2} = \frac{\frac{(0,8537 - 0,4606)}{(3,5 - 2)} + \frac{(1,2222 - 0,8537)}{(5 - 3,5)}}{2} = 0,254$$

Ao fim da análise gráfica, as funções de transferência obtida foram as seguintes:

Equação (12): Função de Transferência de malha aberta (Saída: Velocidade)

$$G_V(s) = \frac{0,254}{0,25s + 1}$$

Equação (13): Função de Transferência de malha aberta (Saída: Posição)

$$G(s) = \frac{0,254}{0,25s^2 + s}$$

A comparação entre o modelo obtido e o gráfico da resposta medida do sistema pode ser visto na figura 3.11:

Figura 3.13: Gráfico de comparação modelo obtido e resposta do sistema (Posição)



Fonte: Do Autor (2022)

3.6.2 Parâmetros do controlador PI

Já identificados os parâmetros do sistema, prosseguiu-se para as definições dos parâmetros do controlador. O controle utilizado no sistema foi o PI (Proporcional - Integral), fazendo com que não haja componente derivativo neste ($K_d = 0$). Esse modelo de controlador foi escolhido por sua característica de minimizar o erro em estado permanente.

Equação (14): Função de Transferência de malha fechada do sistema

$$\frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{K_p K s + K_i K}{T s^3 + s^2 + K_p K s + K_i K}$$

Por utilizar uma forma de acionamento por meio de relés, não é desejável um sistema com muitas oscilações. Portanto, os polos do sistema devem estar localizados no eixo real do plano s . A função de transferência em malha fechada é de 3ª ordem, com 3 polos e 1 zero. As frequências do sistema foram escolhidas com valores próximos, para que a resposta transitória seja mais rápida.

Equação (15): Polinômio do denominador da FT utilizando os componentes “a”, “b”, “c”

$$s^3 + \frac{1}{T} s^2 + \frac{K_p K}{T} s + \frac{K_i K}{T} = (s + a)(s + b)(s + c) = 0$$

Para que o sistema tenha uma resposta mais lenta, evitando movimentações bruscas de posição, e que os valores dos ganhos do controlador fiquem em um intervalo cujo sistema de controle funcione de acordo com os parâmetros de projeto, selecionou-se os valores de frequência $s = -0,25$ e $s = -0,5$ para duas das três raízes do polinômio, de modo que sejam dominantes na resposta transitória do sistema. Com isso, atribuiu-se os valores de 0,25 e 0,5 aos componentes “a” e “b”, respectivamente.

Equação (16): Reescrevendo a equação polinomial da função de transferência

$$s^3 + \frac{1}{T}s^2 + \frac{KpK}{T}s + \frac{KiK}{T} = s^3 + (a + b + c)s^2 + (ab + ac + bc)s + abc$$

Equação (17): Determinação do valor de “c”

$$c = \frac{1}{T} - (a + b) = 3,25$$

Equação (18): Valor do ganho Kp

$$Kp = \frac{(ab + ac + bc)T}{K} = 2,522$$

Equação (19): Valor do ganho Ki

$$Ki = \frac{abcT}{K} = 0,400$$

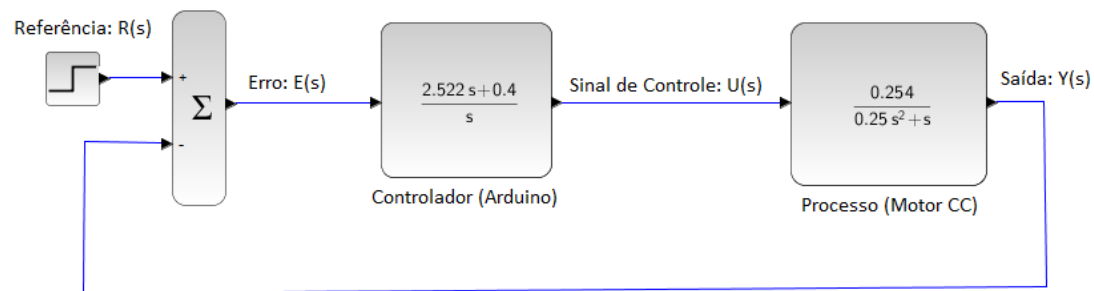
Finalizando-se os cálculos, encontrou-se a Função de Transferência em malha fechada para o sistema. O valor encontrado para o terceiro polo foi de $s = -3,25$. Com os valores de Kp e Ki já definidos, obteve-se também o valor do zero da função de transferência em $s = -0,159$.

Equação (20): Função de Transferência final do sistema em malha fechada

$$\frac{\theta(s)}{R(s)} = \frac{6,308s + 1}{0,615s^3 + 2,462s^2 + 6,308s + 1}$$

Com o controlador já projetado, é possível descrever a malha completa de controle e posição de acordo com o diagrama e blocos da figura a seguir:

Figura 3.14: Diagrama de blocos final da malha de controle



Fonte: Do Autor (2022)

3.6.3 Implementação do Controle de Posição no Arduino

A função de controle de posição implementada recebe como parâmetro um valor inteiro para ângulo de referência. Esse valor é convertido de uma escala entre -135° e 135° (intervalo de rotação do potenciômetro) para uma escala de 0 a 1023 (escala de leitura do ATmega328P), de modo que o valor de leitura do potenciômetro possa ser comparado com a referência.

O tempo de amostragem é de 20 milissegundos, o mesmo utilizado para identificar o sistema. São criadas 5 variáveis do tipo *double* para operações com decimais. Essas variáveis são os ganhos do controlador K_p e K_i , os operadores P e I, que representam os componentes proporcional e integral do sistema, e o valor de controle, sendo esse último a soma dos dois componentes anteriores para formar o sinal de saída.

A função calcula o erro subtraindo a leitura do potenciômetro da referência. Enquanto o valor de erro possuir módulo maior que 5 (aproximadamente 0,5% do intervalo de leitura do potenciômetro, equivale a 1.32°), a função de controle de giro é chamada, passando para essa o sentido de rotação (sentido horário quando o erro é positivo ou anti-horário, quando negativo) e o sinal de controle. Este último corresponde ao valor de controle convertido da escala de 10 bits (0 a 1023) de leitura para 8 bits (0 a 255) de escrita do ATmega328P. A figura 3.15 exhibe o código da função do controle de posição implementado no equipamento:

Figura 3.15: Código da função de controle de posição

```

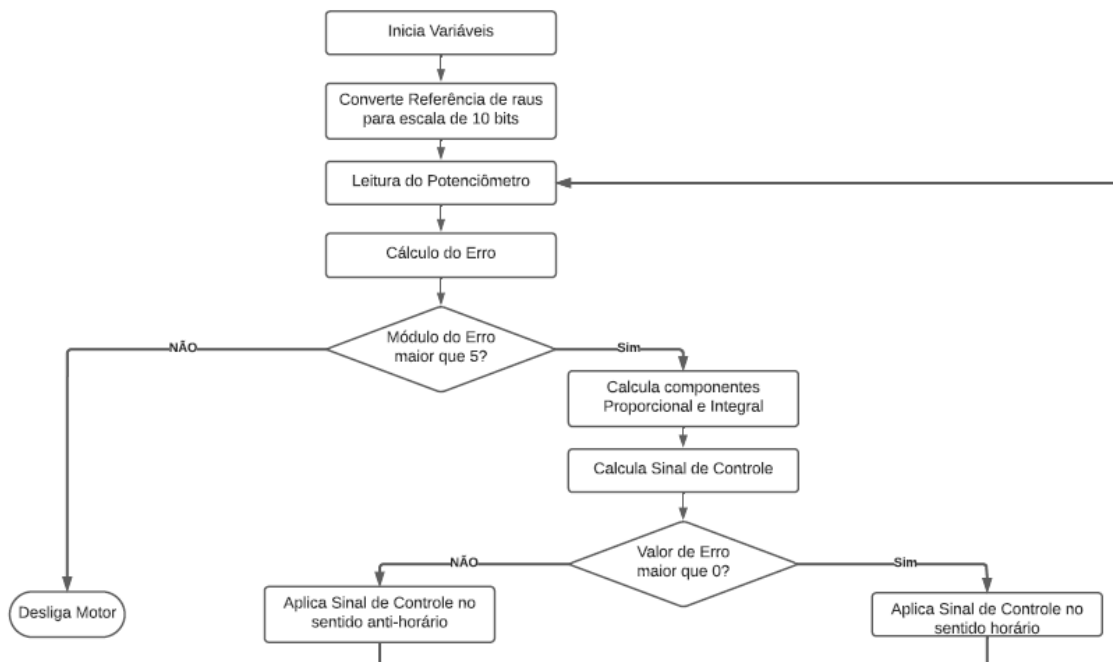
void Controle(int posRef){ //Função de controle de posição
  //Recebe a posição de referência (em graus) como parâmetro
  unsigned long t = 0; //Inicia variável de tempo (em milissegundos)
  double Kp = 2.522; //Inicia variável de gnho proporcional
  double Ki = 0.406; //Inicia variável de ganho integral
  double P = 0.0; //Inicia variável para cálculo do fator proporcional
  double I = 0.0; //Inicia variável para cálculo do fator integral
  int dT = 20; //Inicia variável de intervalo de amostragem (20 milissegundos)
  double valCtrl = 0.0; //Inicia variável de valor do sinal de controle
  int sinCtrl = 0; //Inicia variável do sinal de controle (final)
  int posR = map(posRef,-135,135,0,1023);
  //Converte a referência de graus para escala de 10 bits (0 a 1023)
  int posSensor = analogRead(sensorPos); //Inicia variável para leitura de posição
  int erro = posR - posSensor; //Inicia variável para cálculo do erro
  while((erro > 5) || (erro < -5)){
    //Executa as operações abaixo enquanto o módulo do erro for maior que 5
    posSensor = analogRead(sensorPos); //Leitura de posição
    erro = posR - posSensor; //Cálculo do erro
    if((millis() - t) > dT){
      //Se o tempo de execução for maior que o intervalo de tempo do controlador...
      P = Kp*erro; //Cálculo do fator proporcional
      I = I + (Ki*erro*dT/1000.0); //Cálculo do fator integral
      valCtrl = P + I; //Soma dos fatores para obter o valor do sinal de controle
      if(erro > 0){ //Se o erro for positivo...
        sinCtrl = map(valCtrl,0,1023,0,255);
        //Converte o valor do sinal de controle da escala de 10 bits para a
        //escala de saída de 8bits (0 a 255) e atribui o valor a sinal de controle
        girCtrl(sinCtrl,0); //Aciona o motor usando a função de controle de giro
        //Aciona no sentido horário e PWM descrito pelo sinal de controle
      }
      else{ //Se o erro for negativo...
        valCtrl = (-1)*valCtrl; //Inverte o sinal do valor de controle
        sinCtrl = map(valCtrl,0,1023,0,255);
        girCtrl(sinCtrl,1);
        //Aciona no sentido anti-horário e PWM descrito pelo sinal de controle
      }
      t = millis();
      //Atribui à variável de tempo o valor do tempo decorrido de execução
    }
  }
  girCtrl(0,2); //Manda sinal 0 (desativar) para afunção de controle de giro
}

```

Fonte: Do Autor (2022)

O funcionamento do sistema de controle também pode ser explicado de maneira mais simplificada na figura 3.16:

Figura 3.16: Fluxograma básico de funcionamento do controle de posição



Fonte: Do Autor (2022)

3.7 Controle de Umidade

Com o controle de posição já desenvolvido, elabora-se o controle de umidade. Este último é formado por três etapas: Irrigação, Absorção e Retorno. Cada uma dessas etapas dura 20 segundos e tem um valor de posição diferente entre si.

A primeira etapa é a Irrigação. Com base no valor de leitura do higrômetro, será definido um valor de posição. Quanto maior o valor de leitura (solo mais seco), maior será a inclinação da chapa de aço e, conseqüentemente, maior o deslocamento de água para a parte onde ficam as plantas. A mensagem exibida pelo display durante essa etapa é “Irrigando Sistema”.

Em seguida, vem a fase de Absorção. Nesta, o sistema se desloca para uma posição neutra (0°), fazendo com que o líquido fique no mesmo nível na região em que se encontram as mudas, proporcionando um processo mais homogêneo de absorção de água. A mensagem exibida pelo display durante essa etapa é “Absorvendo Líquido”.

A última etapa é a de retorno de líquido. A posição relacionada à esta fase tem mesmo módulo que a da fase de irrigação, porém com valor negativo. Sua função é devolver ao lado sem planta do recipiente a quantidade de fluido não absorvido durante o processo. A mensagem exibida pelo display durante essa etapa é “Retornando Líquido”.

Ao fim das três etapas, o sistema retorna à posição neutra. O sistema atua apenas quando a umidade está abaixo da média, ou seja, a leitura de umidade está acima de 910. Isso faz com que os deslocamentos estejam entre 7,5° e 15°. O algoritmo da função de controle de umidade pode ser observado na figura seguinte:

Figura 3.17: Código da função de controle de umidade

```
void Umidade(){ //Função de controle de umidade
  unsigned long t = 0; //Defin a variável d contagem de tempo t
  int umi = analogRead(sensorUmi); //Atribui leitura de umidade à variável umi
  int posRef = map(umi,777,1023,0,15); //Ajuste da posição de referência
  //Coloca a referência em uma escala de acordo com a leitura de umidade
  Controle(posRef); //Gira, por controle, o motor até a posição de referência
  int posSensor = analogRead(sensorPos); //Valor de leitura de posição
  //Variável posSensor recebe o valor de leitura do potenciômetro após o controle
  int pos = map(posSensor,0,1023,-135,135);
  disp.clear(); //Limpa display
  disp.setCursor(3,0); //Leva cursor para Coluna 3, Linha 0
  disp.print("Posicao:"); //Exibe "Posicao" na linha superior
  disp.setCursor(5,1); //Leva cursor para Coluna 5, Linha 1
  disp.print(pos); //Exibe o valor de posição lido na linha inferior
  delay(500); //delay de 500 milissegundos
  t = millis(); //Variável de tempo recebe o tempo decorrido em milissegundos
  while((millis() - t) < 20000){ //Enquanto o tempo decorrido da etapa de irrigação
  //for menor que 20 segundos...
    disp.clear(); //Limpa display
    disp.setCursor(2,0); //Leva cursor para Coluna 2, Linha 0
    disp.print("Irrigando"); //Exibe "Irrigando" na linha superior
    disp.setCursor(3,1); //Leva cursor para Coluna 3, Linha 1
    disp.print("Sistema"); //Exibe "Sistema" na linha inferior
    delay(500); //delay de 500 milissegundos
  }
  disp.clear(); //Limpa display
  Controle(0); //Gira, por controle, o motor até a posição neutra
  t = millis(); //Variável de tempo recebe o tempo decorrido em milissegundos
  //for menor que 20 segundos...
  disp.clear(); //Limpa display
  disp.setCursor(2,0); //Leva cursor para Coluna 2, Linha 0
  disp.print("Absorvendo"); //Exibe "Absorvendo" na linha superior
  disp.setCursor(3,1); //Leva cursor para Coluna 3, Linha 1
  disp.print("Liquido"); //Exibe "Liquido" na linha inferior
  delay(500); //delay de 500 milissegundos
}
disp.clear(); //Limpa display
Controle(-posRef); //Gira, por controle, o motor até o valor negativo da referência
disp.setCursor(2,0); //Leva cursor para Coluna 2, Linha 0
disp.print("Retornando"); //Exibe "Retornando" na linha superior
disp.setCursor(3,1); //Leva cursor para Coluna 3, Linha 1
disp.print("Liquido"); //Exibe "Liquido" na linha inferior
delay(20000); //delay de 20 segundos
Controle(0); //Gira, por controle, o motor até a posição neutra
}
```

Fonte: Do Autor (2022)

O bloco principal tem seu código descrito na figura 3.18:

Figura 3.18: Código do bloco principal do programa implementado

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h> //Inclui biblioteca de display LCD

LiquidCrystal_I2C disp(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE); //Atribui e configura pinos do display LCD

// ----- Definir entradas e saidas -----
#define tpl 10 //Define tpl (saida PWM) como pino 10
#define pinAH 9 //Define pinAH (pino de acionamento do relé anti-horário) como pino 9
#define pinH 11 //Define pinAH (pino de acionamento do relé horário) como pino 11
#define sensorPos A0 //Define sensorPos (leitura do potenciômetro) como entrada analógica A0
#define sensorUmi A3 //Define sensorUmi (leitura de umidade) como entrada analógica A3

//----- Definir variaveis globais -----

int pos_0; //Inicia variável posição 0 (posição neutra)
int umid; //Inicia variável para litura de umidade

// -----
void setup()
{
    disp.begin(16,2); //Inicia display passando número de colunas e linhas

    pinMode(tpl,OUTPUT); //Define tpl como saída
    pinMode(pinH,OUTPUT); //Define pinH como saída
    pinMode(pinAH,OUTPUT); //Define pinAH como saída

    digitalWrite(pinAH,LOW); //Leva o pinAH a zero
    digitalWrite(pinH,LOW); //Leva o pinH a zero

    pos_0 = 0; //Atribui 0 graus à posição 0
}

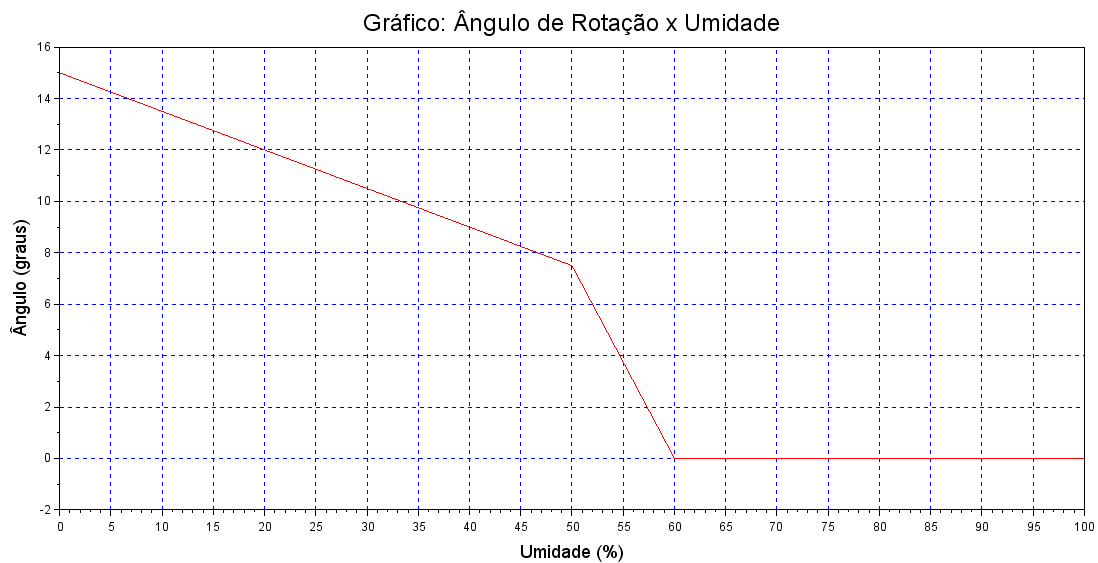
void loop()
{
    disp.setBacklight(HIGH); //Acende as luzes d fundo do display

    umid = analogRead(sensorUmi); //Atribui leitura de umidad à umid
    if(umid > 910){ //Se o nível e umidade estiver abaixo da média...
        Umidade(); //Chamada da função de controle de umidade
    }
    disp.clear(); //Limpa display
}
}
```

Fonte: Do Autor (2022)

O valor de umidade lido pelo sensor é utilizado para definir o ângulo de referência do sistema de controle de posição. Além de que todas as etapas do controle de umidade precisam acessar a função de controle de posição durante seu funcionamento. A relação entre o ângulo de rotação e a umidade o solo pode ser descrita pelo seguinte gráfico:

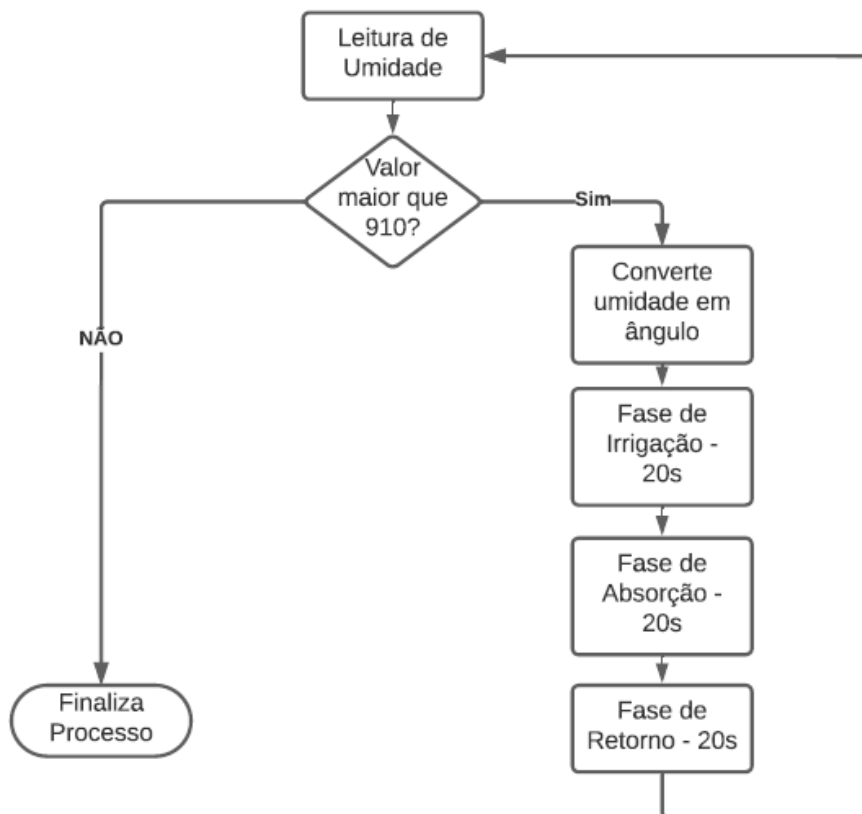
Figura 3.19: Gráfico da relação entre a umidade e o ângulo de rotação definido para essa



Fonte: Do Autor (2022)

O funcionamento simplificado do sistema e umidade pode ser descrito pelo fluxograma da figura 3.20:

Figura 3.20: Fluxograma básico do controle de umidade



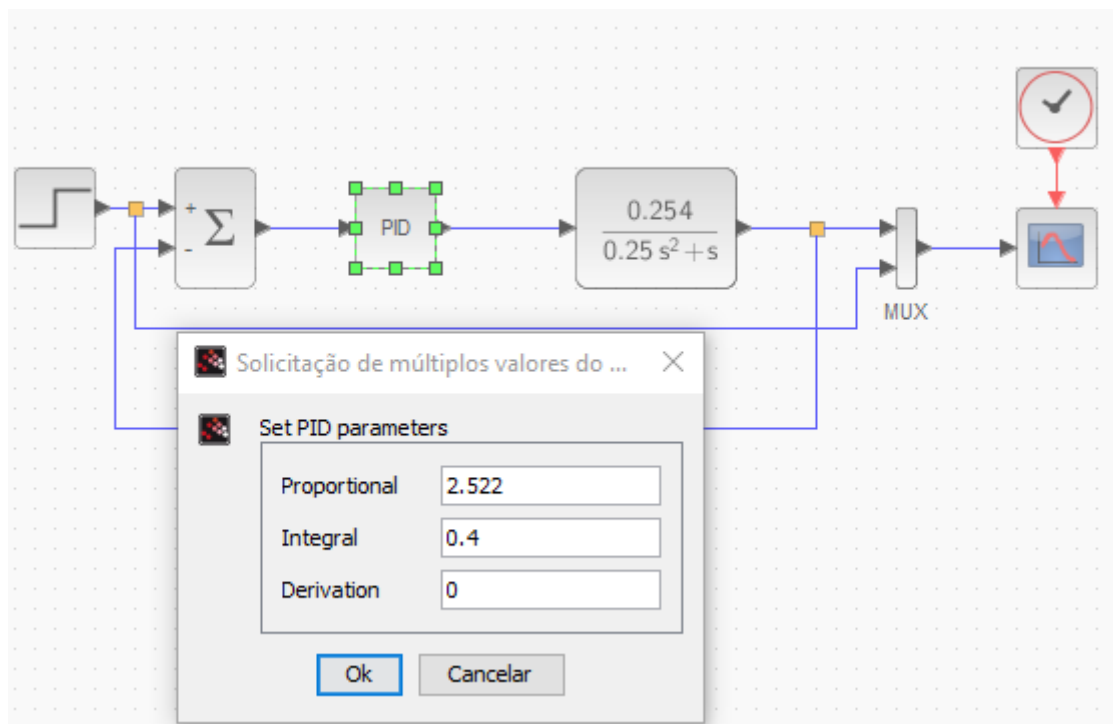
Fonte: Do Autor (2022)

4 RESULTADOS

4.1 Resultados do Controle de Posição

Antes de executar o controle de posição no dispositivo, utilizando a ferramenta Xcos do software Scilab, montou-se o diagrama de blocos completo do sistema. O diagrama pode ser visto na figura abaixo:

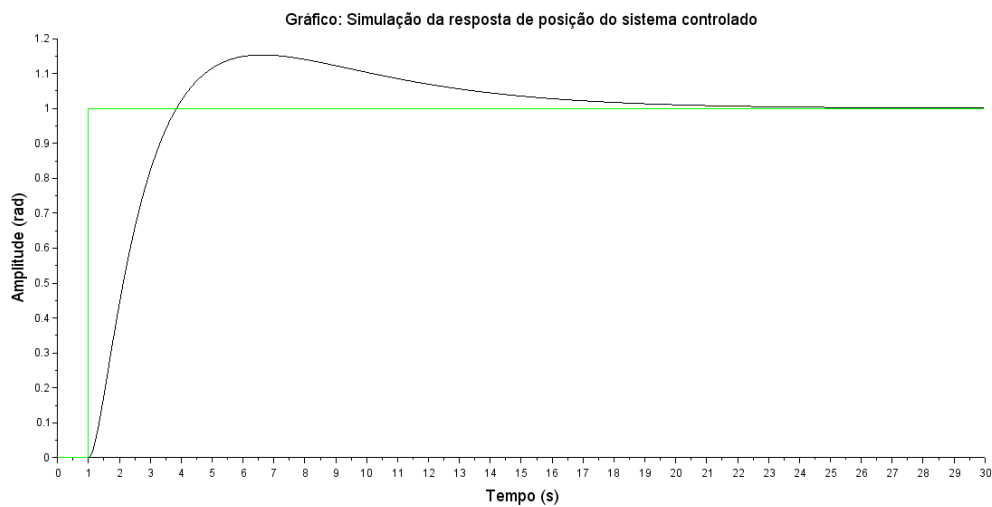
Figura 4.1: Diagrama de blocos no Xcos



Fonte: Do Autor (2022)

Por meio do diagrama de blocos, foi feita a simulação da resposta do sistema e gerado o gráfico de comparação entre a entrada (posição de referência) e a saída (posição real). Nele, o sistema tem um pico de ultrapassagem inferior à 20% e estabiliza no valor desejado após aproximadamente 24 segundos. O gráfico pode ser visto a seguir:

Figura 4.2: Gráfico da simulação do Sistema (entrada em verde, saída em preto)



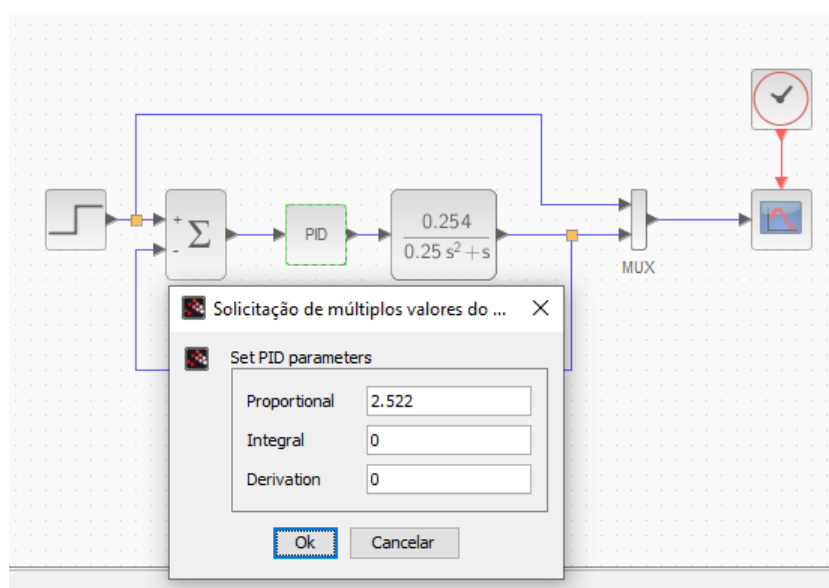
Fonte: Do Autor (2022)

Entretanto, a aplicação prática de controle no dispositivo não teve sobressaltos de posição e apresentou valores de erro que chegavam de 2° a 3° para sua posição neutra, que deveria ser de 0° e com tolerância de 1.32° estabelecido no código implementado.

4.1.1 Comparação entre Controle P x Controle PI

Elaborou-se um diagrama de blocos similar ao do tópico anterior, com a diferença sendo apenas o valor de ganho integral (valor 0 para esse caso), como mostrado na figura abaixo:

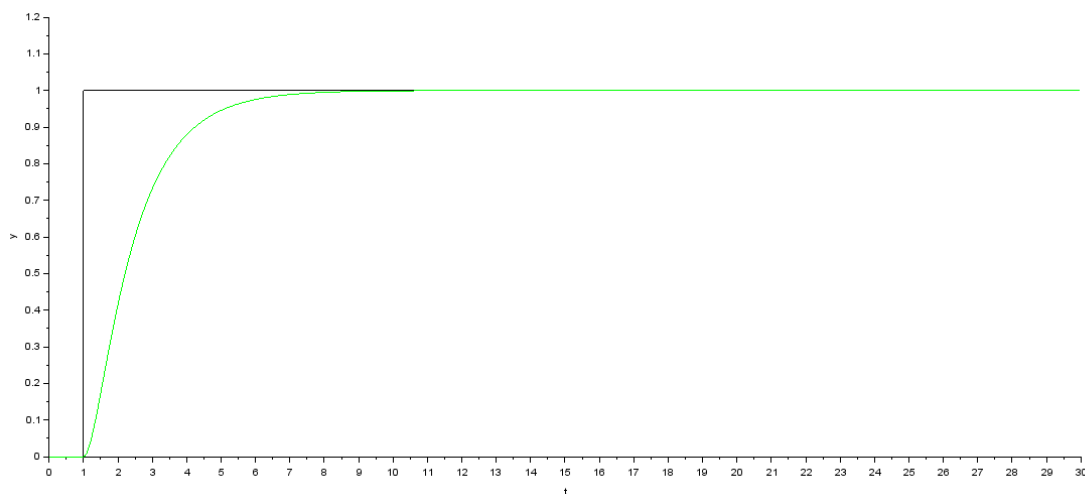
Figura 4.3: Diagrama de blocos para o Controle Proporcional no Xcos



Fonte: Do Autor (2022)

Partindo-se dessa configuração, obteve-se o resultado visto na figura 4.4:

Figura 4.4: Gráfico de simulação do Controle Proporcional (entrada em verde, saída em preto)



Fonte: Do Autor (2022)

Comparando as duas simulações, o Controle P apresentou um tempo de aproximadamente 8 segundos para atingir o valor de regime permanente (três vezes mais rápido que o Controle PI), não possui pico de ultrapassagem e nem erro de estado estacionário, tendo uma função de transferência mais simples (um polo e um zero a menos).

Todavia, a aplicação prática do Controle Proporcional não obteve bom resultado, visto que o valor de posição lido pelo potenciômetro não alcançava o valor definido para referência, ficando acima do limiar de parada do código, impossibilitando a saída do loop. O motor era acionado com um valor de tensão insuficiente para realizar o movimento e não havia o componente integral para ajustar os incrementos na tensão.

4.2 Resultados do Sistema de Irrigação

O dispositivo como um todo apresentou um bom resultado no que se refere ao seu funcionamento. A estrutura física foi consistente para fornecer rigidez e estabilidade durante as rotações. Quanto aos componentes eletrônicos, as operações dos sensores, do controlador e do atuador aconteceram em conformidade com o que havia sido projetado. Por fim, os deslocamentos de água entre as partes do recipiente durante as etapas de irrigação e retorno ocorreram sem nenhum tipo de transbordamento e apenas no momento

em que deveriam, ou seja, com o sistema não executando movimento quando o nível de umidade das mudas de alface fosse maior que a média.

No que se refere ao fluxo de líquido entre as duas partes do recipiente, quando o solo das plantas apresentava baixa umidade e os parâmetros de ângulos do sistema de controle se aproximavam do valor máximo (15°), a movimentação de água ocorria de forma efetiva, tanto quanto ao nível deslocado como ao aumento o valor de umidade que seria lido em seguida. Entretanto, quando os ângulos para rotação estavam mais perto do mínimo ($7,5^\circ$), o fluxo de água era muito baixo, o que acarretava em múltiplos ciclos das 3 etapas de controle de umidade até que se atingisse o valor de parada.

5 CONCLUSÃO

Ao fim desse projeto, foi possível colocar em prática os conhecimentos adquiridos em diversas disciplinas ao longo do curso. Os objetivos foram atingidos, visto que o dispositivo para crescimento de plantas foi desenvolvido e o sistema de controle de posição implementado.

No que se refere ao mecanismo de controle de posição, houve uma pequena divergência de valores quanto aos limites de tolerância de erro devido a variações durante a leitura do potenciômetro, porém insuficientes para prejudicar a aplicabilidade do sistema de controle. Uma melhoria possível é substituir o potenciômetro atual por um outro modelo mais preciso ou um encoder.

Quanto ao controle de umidade do dispositivo de crescimento de plantas, o higrômetro teve bom desempenho e pôde operar de acordo com a funcionalidade necessária. A diferença no volume de líquido deslocado dentro do intervalo de ângulos gerado pelo sistema de controle foi um ponto a ser observado, entretanto não comprometeu o funcionamento do dispositivo. Uma solução para esse problema seria reduzir a altura em que os furos da divisória do recipiente foram feitos em aproximadamente 5 mm.

Também é possível adicionar a este os sistemas de controle de temperatura e luminosidade para um ainda melhor desenvolvimento das plantas. Esses sistemas possibilitariam o direcionamento da produção de mudas, seja para o aumento da dimensão das folhas (níveis mais baixos de temperatura e luminosidade são mais propícios) ou para acelerar a chegada da fase reprodutiva (melhores resultados em dias mais quentes e longos períodos de exposição à luz solar).

REFERÊNCIAS

- AGUIRRE, Luis Antonio. **INTRODUÇÃO À IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS: Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação**. 3 ed. UFMG, 2007.
- AHMED, Ashfaq. **Eletrônica de potência / Ashfaq Ahmed**; Tradução: Bazán Tecnologia e Linguística; Revisão técnica: João Antonio Martino. São Paulo, Prentic Hall, 2000.
- ARDUINO. <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>. Acesso em: 20 fevereiro 2022.
- ATMEL. https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf . 2015. Acesso em 20 fevereiro 2022.
- AZEVEDO, Hamilton J.; BERNARDO, Salassier; RAMOS, Marcio M.; SEDIYAMA, Gilberto C.; CECON, Paulo R. **Influencia de fatores climáticos e operacionais sobre a uniformidade de distribuição de água, em sistema de irrigação por aspersão de alta pressão**. Revista Brasileira Engenharia AgrícolaAmbiental. Campina Grande, v.4, n.2, p. 152-158, 2000.
- BARBACENA, Ilton L.; FLEURY, Claudio Afonso. **Display LCD**. Unicamp. out. 1996. Disponível em: <<http://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/ea079/complementos/Lcd.pdf>> .
- COSTA, Cyro P.; SALA, Fernando C. **A evolução da alfacultura brasileira**. Horticultura Brasileira, Brasília, v. 23, n. 1, jan. /mar. 2005. Verso da capa.
- “Datasheet: Micromotor DC Com Caixa De Redução – 12 V 13 RPM 8.5 Kgf.cm”**, Tech Makers. Disponível em [https://recursos.techmakers.com.br/MediaCenter/Datasheet Datasheet Micro Motor DC 12V 13RPM P-N-AK510-8.5PF12R13SE.pdf](https://recursos.techmakers.com.br/MediaCenter/Datasheet%20Micro%20Motor%20DC%2012V%2013RPM%20P-N-AK510-8.5PF12R13SE.pdf). Acesso em 15 fevereiro 2022.
- “Electric DC Motors Market Size, Share & Trends Analysis By Type, By Voltage, By End Use and Segmented Focus.”**, Grand View Research, Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-dc-motor-market> , Data de publicação: agosto de 2017. Acesso em: 14 fevereiro 2022.
- FILGUEIRA, Fernando A. R. **Novo manual de olericultura: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 3ª ed., UFV, 2008.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Electric Machinery**. 6ª ed., McGraw-Hill, 2005.
- KOSOW, Irving L., 1919. **Máquinas elétricas e transformadores**. Vol. 1. Tradução de Felipe Luís Daiello e Percy Antônio. Porto Alegre, Globo, 1982.
- MCRROBERTS, Michael. **Arduino básico / Michael McRoberts**. Tradução: Rafael Zanolli. São Paulo, Novatec Editora, 2011.
- MOHAN, Ned. **Power electronics: coverters, applications, and design / Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins**. 2 ed. John Wiley and Sons, 1995.
- MONK, Simon. **Programação com Arduino: começando com Sketches / Simon Monk**. Tradução: Anatólio Laschuk. – Dados eletrônicos. Porto Alegre; Bookman, 2013.
- NISE, Norman S. **Control Systems Engineering**. 6 ed. John Wiley and Sons, 2010.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4 ed. Prentice Hall, 2003.

RESENDE, Francisco V.; SAMINÊZ, Tereza C. O.; VIDAL, Mariane C.; SOUZA, Ronessa B.; CLEMENTE, Flávia M. V. **Cultivo de alface em sistema orgânico de produção**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2007. 16 p. (Embrapa Hortaliças. Circular Técnica, 56).

SALA, Fernando C.; COSTA, Cyro P. **Retrospectiva e tendência da alfacicultura brasileira**. **Horticultura Brasileira**. Brasília, DF, v. 30, p. 187-194, 2012.