

Thais Valdés González

**SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CONTROLE DA
SOLUÇÃO NUTRITIVA PARA UM CULTIVO HIDROPÔNICO
DOMÉSTICO.**

São Paulo

2024

Thais Valdés González

**SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CONTROLE DA
SOLUÇÃO NUTRITIVA PARA UM CULTIVO HIDROPÔNICO
DOMÉSTICO.**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

São Paulo
2024

Thais Valdés González

**SISTEMA AUTOMATIZADO PARA CONTROLE DA
SOLUÇÃO NUTRITIVA PARA UM CULTIVO HIDROPÔNICO
DOMÉSTICO.**

Versão Corrigida


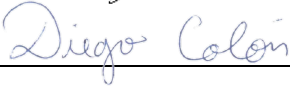
Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas.

Orientador:
Prof. Dr. Diego Colón.

São Paulo
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.	
São Paulo, <u>03</u> de <u>Julho</u> de <u>2024</u>	
Assinatura do autor:	
Assinatura do orientador:	

Catálogo-na-publicação

<p>González, Thais Valdés Sistema Automatizado Para Controle Da Solução Nutritiva Para Um Cultivo Hidropônico Doméstico. / T. V. González -- versão corr. -- São Paulo, 2024. 82 p.</p> <p>Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.</p> <p>1.Hidroponia 2.Agricultura Vertical 3.Sistemas de Controle I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II.t.</p>
--

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pela confiança depositada em mim para realizar cada um dos meus sonhos, principalmente à mulher mais forte que conheço, minha mãe. Aos meus amigos por estarem presentes em todos os momentos. E à Universidade de São Paulo pela qualidade de ensino e apoio sempre prestado, e a todos os docentes, membros e assistentes das secretarias e bibliotecas, em especial ao Prof. Dr. Diego Colón.

RESUMO

O sistema de agricultura tradicional é dependente do meio físico natural, além disso é um grandessíssimo consumidor de recursos naturais como terra e água. Isso, juntamente com o crescimento acelerado da população, traz a necessidade de buscar alternativas para produzir vegetais para a grande demanda de alimentos a nível mundial. Um sistema hidropônico ajuda não só no aumento da produção, também melhora a qualidade dos cultivos. Pois esse método agrícola permite controlar o ambiente para obter resultados específicos em cada vegetal, isso consegue-se com o monitoramento da solução nutritiva que é fornecida aos vegetais, a temperatura e humidade do ar e o ajuste da qualidade e quantidade de luz que chega a cada cultivo. Então o seguinte projeto de pesquisa está orientado a desenvolver um sistema de controle de qualidade de solução nutritiva para uma pequena horta doméstica.

Palavras-chaves: Sistemas hidropônico, Solução Nutritiva, Sistemas de Controle.

ABSTRACT

The traditional farming system is dependent on the natural physical environment, besides that it is a huge consumer of natural resources such as land and water. This, together with the accelerated population growth, brings the need to seek alternatives to produce vegetables for the great demand for food globally. A hydroponic system not only helps to increase production, it also improves the quality of crops. Because this agricultural method allows to control the environment to obtain specific results for each vegetable, this is achieved by monitoring the nutrient solution that is supplied to the vegetables, the temperature and humidity of the air and the adjustment of the quality and quantity of light that reaches each cultivation. So the following research project is aimed at developing a nutrient solution quality control system for a small home farm.

Keywords: Hydroponic systems, Nutrient Solution, Control Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sistema hidropônico.....	23
Figura 2.2 - Distribuição dos canais de cultivo.	25
Figura 3.1 Esquema com a composição do sistema responsável pela monitorização dos níveis nos diferentes contentores.....	32
Figura 3.2 - Comportamento do nível da soluções A e B	33
Figura 3.3 - Diagrama de rede de distribuição simplificado	34
Figura 3.4 - Princípio de Bernoulli	35
Figura 3.5 - Curva de titulação obtida experimentalmente.....	41
Figura 4.1 - Diagrama geral de um sistema de controle	45
Figura 4.2 - Saída de controlador do tipo on-off	46
Figura 4.3 - Diagrama de fluxo.....	47
Figura 4.4 - Simulação da dinâmica da variável nível para a abertura e fechamento da válvula.....	48
Figura 4.5 - Análise da dinâmica do processo de fluxo da solução nutritiva. a) Diagrama de Bode, b) Resposta a um degrau na entrada c) Lugar geométrico das raízes.	49
Figura 4.6 - Resposta em frequência de um compensador por avanço de fase.	50
Figura 4.7 - Resposta do sistema com o compensador de avanço de fase.....	51
Figura 4.8 - Curva de reação do processo em malha aberta.....	53
Figura 4.9 - Resposta do sistema com controladores projetados. a) Ziegler e Nichols, b) Cohen-Coon, c) 3C, d) CHR.	56
Figura 4.10 - Resposta do sistema com controladores projetados com 3C. a) Resposta completa, b) Zoom para erro na resposta.	56
Figura 4.11 - Diagrama em blocos do controlador pelo modelo interno.....	60
Figura 5.1 - Comparação das respostas do sistema de controle de pH da água tratada discretizado com diferentes métodos.	68
Figura 5.2 - Comparação das respostas do sistema de controle de pH da solução nutritiva discretizado com diferentes métodos	68
Figura 5.3 - Comparação das respostas do sistema de controle de pH da água tratada discretizado com diferentes métodos	71
Figura 6.1 - Estrutura de um Arduino UNO.....	72
Figura 6.2 - Conexão entre o microcontrolador Arduino e a porta serial simulada no Proteus.	73
Figura 6.3 - Diagrama de blocos do sistema de fluxo conectado às portas seriais simulando a planta real no Simulink.	74
Figura 6.4 - Saída do sistema de vazão com compensador de fase programado no Arduino UNO.....	74
Figura 6.5 - Saída da planta de pH da água tratada, com controle IMC programado no Arduino UNO.....	75
Figura 6.6 - Saída da planta de pH da solução nutritiva, com controle IMC programado no Arduino UNO.....	76
Figura 6.7 - Diagrama de conexão para simulação do controle de nível dos recipientes de solução nutritiva A e B	77
Figura 6.8 - Saída da planta de nível dos recipientes A e B, com controle On-off programado no Arduino UNO.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Exemplos de consumo per capita de solução nutritiva para diferentes espécies.	24
Tabela 2-2 - Compostos químicos necessários para as plantas	28
Tabela 2-3 - Sais fertilizantes	29
Tabela 3-1 - Comparação entre o pH calculado pela expressão matemática e o pH medido experimentalmente	42
Tabela 4-1- Parâmetros de sintonia pelo método de Curva de Reação de Ziegler e Nichols	53
Tabela 4-2 - Parâmetros de sintonia pelo método de Curva de Reação de CHR	54
Tabela 4-3 - Parâmetros de sintonia pelo método de Curva de Reação de Cohen-Coon	54
Tabela 4-4 - Parâmetros de sintonia pelo método de Curva de Reação de 3C	54
Tabela 4-5 Parâmetros dos controladores projetados com a Curva de Reação	55
Tabela 4-6 - Análise da resposta de tempo do sistema com os diferentes controladores	57
Tabela 4-7 - Resultado dos cálculos dos critérios de avaliação do desempenho	57
Tabela 4-8 - Ajuste do controlador PID usando método de síntese direta	59
Tabela 4-9 - Parâmetros PID para controle da concentração (pH) da água natural	59
Tabela 4-10 - Parâmetros PID para controle da concentração (pH) da solução nutritiva	59
Tabela 4-11 - Sintonia de controlador PID pelo método IMC para o modelo de primer ordem com atraso	61
Tabela 4-12 - Comparação dos controladores para o controle de pH da água tratada	62
Tabela 4-13 - Comparação dos controladores para o controle de pH da solução nutritiva	62
Tabela 4-14 - Tempo de acomodação para diferentes valores de T_f no controle de pH da água tratada	63
Tabela 4-15 - Tempo de acomodação para diferentes valores de T_f no controle de pH da solução nutritiva	63
Tabela 5-1 - Métodos para transformar do domínio "s" a "z"	65
Tabela 5-2 - Discretização do controlador de pH da água tratada pelo método IMC	66
Tabela 5-3 - Discretização do controlador de pH da solução nutritiva pelo método IMC	66
Tabela 5-4 - Discretização do modelo interno do IMC para controle de pH da água tratada	67
Tabela 5-5 - Discretização do modelo interno do IMC para controle de pH da solução nutritiva	67
Tabela 5-6. Discretização do compensador de fase para controle a vazão	70

SÚMARIO

AGRADECIMENTOS	7
RESUMO	8
ABSTRACT.....	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
1. Capítulo 1 Introdução	14
1.1 Introdução.....	14
1.2 Justificação	15
1.3 Problema a resolver	16
1.4 Objetivo geral.....	16
1.5 Objetivos específicos	16
1.6 Tarefas	16
1.7 Trabalhos Publicados	17
1.8 Revisão Literatura.....	17
1.9 Estrutura do trabalho	20
2. Capítulo 2 Descrição do sistema	22
2.1 Introdução.....	22
2.2 Descrição do processo.....	22
2.2.1 O tanque coletor	23
2.2.2 Canais de Cultivo.....	24
2.2.3 Bombas	25
2.2.4 Rede de distribuição	26
2.2.5 Tubo Coletor	26
2.2.6 Sistema hidropônico	26
2.3 Solução nutritiva	27
2.3.1 Elementos químicos necessário para um cultivo.....	27
2.3.2 Formulação da solução nutritiva	28
2.3.3 Gestão da solução nutritiva.....	29
3. Capítulo 3 Obtenção dos modelos matemáticos	31
3.1 Introdução.....	31
3.2 Modelo de Nível.....	31
3.2.1 Nível do tanque armazenador de solução nutritiva.....	32
3.2.2 Nível nos recipientes armazenador de solução A e B	33
3.3 Modelo de fluxo.....	34
3.3.1 Função de transferência da vazão em um cano horizontal.	34
3.3.2 Função de transferência da eletroválvula.....	38

3.3.3	Função de transferência do sensor medidor de vazão.....	39
3.4	Modelo de pH	39
3.4.1	Curva de titulação.....	40
3.4.2	Modelos da dinâmica de pH para o tratamento de água e solução nutritiva....	40
3.4.3	Função de transferência da eletroválvula.....	43
3.4.4	Função de transferência do sensor medidor	44
4.	Capítulo 4 Obtenção dos controladores	45
4.1	Introdução.....	45
4.2	Controle de nível.....	46
4.3	Controle de vazão.....	48
4.3.1	Compensador de Fase	49
4.3.2	Controle PID	51
4.3.3	Método da Curva de Reação do processo.	52
4.3.4	Controladores projetados.....	55
4.3.5	Análises da resposta de tempo e índices de desempenho.....	56
4.4	Controle de pH.....	58
4.4.1	Controle por Síntesis Directa.	58
4.4.2	Controle pelo Modelo Interno.....	59
4.4.3	Comparação entre controladores.....	62
5.	Capítulo 5 Discretização dos controladores	64
5.1	Introdução.....	64
5.2	Controle de pH.....	66
5.3	Controle de vazão.....	70
6.	Capítulo 6 Programação do Sistema de Controle no Microprocessador.....	72
6.1	Introdução.....	72
6.2	Sistema de controle de Vazão	73
6.3	Sistema de controle de pH.....	74
6.4	Sistema de controle de Nível	76
7.	Conclusões	78
7.1	Recomendações.....	79
	Referências.....	80

1. Capítulo 1 Introdução

1.1 Introdução

Estima-se que a agricultura tenha surgido aproximadamente dez mil anos atrás. Desde esse período até o início do século XX, os efeitos ambientais causados pela agricultura aparentemente não tiveram grande impacto; No entanto, desde a Revolução Industrial no século XVIII e a "revolução verde"¹, o impacto da agricultura no meio ambiente e na saúde humana teve um impacto notável.

Mas, na realidade, os problemas derivados das práticas agrícolas são tão antigos quanto a própria agricultura, mas a magnitude que estão alcançando atualmente mantém o mundo em alerta, porque, com o desejo de aumentar a produtividade e a lucratividade agrícola, a deterioração ambiental está aumentando gradualmente.(Reca & Echevarría, 1998)

Para reafirmar o exposto acima, os seguintes dados podem ser usados (FAO, 2018):

- Total global de terras aptas para a agricultura: 4 400 milhões de hectares.
- Terra agrícola mundial de sequeiro²: 80% (1 200 milhões de hectares).
- Área total atualmente cultivada: 1,6 milhões de hectares, dos quais 20% (300 milhões de hectares) estão em terras marginalmente adequadas³.
- A proporção global de terras degradadas é de 25% e a proporção de terras em condições moderadas de degradação é de 8%.
- Em várias regiões, mais da metade da área agrícola básica enfrenta limitações na qualidade do solo, principalmente na África Subsaariana, na América do Sul, no sudeste da Ásia e no norte da Europa.
- Percentagem da água total extraída de aquíferos, rios e lagos para agricultura: 70%
- Porcentagem da população mundial que mora hoje em regiões onde existe escassez de água: 40%.

¹ "Revolução Verde" significa mudanças tecnológicas e a maneira de praticar a agricultura como resultado da transferência, inovação e disseminação de desenvolvimentos tecnológicos na agricultura

² A agricultura de sequeiro é aquela em que o ser humano não contribui para a irrigação dos campos, mas usa apenas o que vem da chuva.

³ Terrenos que não são adequados para o cultivo porque são arborizados, têm declives altos ou solos pobres.

- Número de países que atualmente alocam mais de 40% de seus recursos hídricos para irrigação anualmente, um limite considerado crítico: 11.
- Número de países que estão retirando 20% de seus recursos hídricos por ano, indicando pressão considerável e escassez iminente de água: 8.
- Percentagem de recursos hídricos renováveis atualmente usados na Líbia, Arábia Saudita, Iêmen e Egito: 100%.

Além disso, a FAO estima que o número de pessoas que sofrem de desnutrição crônica no mundo seja de 815 milhões e a população total em todo o mundo deve aumentar 25% antes de 2030, de 3,5 bilhões para quase 4,5 bilhões de habitantes. E as populações urbanas crescerão a uma taxa duas vezes mais rápida e passarão de 1,3 bilhão para 2 bilhões. (FAO, 2017)

Outro problema na agricultura atual é que, apesar de vários anos de "revolução verde" e de pesquisas realizadas sobre os riscos que pode trazer uma agricultura com base no uso de produtos não naturais, o uso exagerado de pesticidas e produtos químicos para fertilização, levou os países em desenvolvimento a usar 25% dos pesticidas produzidos no mundo e a sofrer quase o total das mortes devido a intoxicação aguda por pesticidas, pois os resíduos agrícolas podem lograr atingir e contaminar os reservatórios de água para consumo humano. (BENÍTEZ-DÍAZ e MIRANDA-CONTRERAS, 2013).

1.2 Justificação

Portanto, surgem desafios globais que os governos e a sociedade como um todo precisam enfrentar, e esses são satisfazer à demanda por alimentos e manter níveis sustentáveis de recursos naturais (solo, água, vegetação, fauna). (PÉREZ VÁZQUEZ e LANDEROS SÁNCHEZ, 2009)

E é aí que entra a agricultura urbana, especificamente a agricultura vertical. Esse modelo foi proposto com o objetivo de aumentar a quantidade de terras agrícolas "Construindo em direção à vertical". Em conclusão, a área cultivável efetiva para as culturas pode ser aumentada através da construção de um imóvel de vários níveis usando o mesmo pedaço de terra.

Partindo do fato de que o modelo vertical de cultivo é essencialmente uma fazenda coberta, também é possível que essa fazenda nem precise de terra se for

usada a hidroponia, uma técnica de cultivo que envolve o cultivo de plantas sem o uso do solo e usando apenas as soluções nutritivas recirculadas e o uso inovador da água reciclada.

Além disso, essas fazendas hidropônicas, por serem um sistema fechado e isolado, pode ter um ambiente controlado no qual é possível adicionar um controle automático da temperatura e umidade do ar, controle da água de uma planta de dessalinização, assim como seu pH e iluminação LED ajustável por 24 horas. (MARULANDA e IZQUIERDO, 2003).

1.3 Problema a resolver

Projetar um sistema de controle para uma fazenda modelo hidropônica com o objetivo de permitir ao agricultor mais facilidades e também alcançar uma agricultura mais eficiente, tanto em recursos quanto no tempo de cultivo.

1.4 Objetivo geral

Projetar um sistema de controle capaz de garantir condições adequadas para a solução nutritiva e sua distribuição no cultivo hidropônico.

1.5 Objetivos específicos

- Obter os modelos para cada uma das variáveis a serem controladas (nível, vazão, pH).
- Projetar controladores analógicos para variáveis de nível e pH.
- Discretizar os controladores analógicos e, se necessário, obter controladores discretos mais eficientes.
- Programar controladores discretos em um microcontrolador.

1.6 Tarefas

- Revisão bibliográfica.
 - Situação atual da agricultura.
 - Hidroponia, sistemas Nutrient Film Technique.
 - Fotossíntese e espectros de luz.
 - Identificação e modelagem do sistema
 - Projeção dos controladores
- Obtenção de modelos para cada faixa operacional das variáveis.
 - Modelo de sistema de nível para o tanque da água tratada.

- Modelo de sistema de nível para recipientes de solução nutritiva.
- Modelo de dinâmica de fluxo da solução nutritiva pelos canais de cultivo.
- Levantamento da curva de titulação do pH da água tratada e da solução nutritiva
- Projeção dos controladores.
 - Controle de PH para tratamento de água e tratamento de solução nutritiva.
 - Controles de nível
 - Controle de vazão.
- Validação dos controladores:
 - Levantamento de curvas de resposta do sistema e análise de resultados experimentais.

1.7 Trabalhos Publicados

Anterior à dissertação um trabalho foi desenvolvido por GONZÁLEZ T. V. (2023) na Revista Cubana de Ingeniería e inscrito por GONZÁLEZ T. V.; COLÓN D (2024) no Congresso Brasileiro de Automática.

O trabalho corresponde à implementação de um controlador lógico fuzzy numa estação de tratamento de pH, com base em conhecimentos prévios obtidos a partir da operação numa planta piloto, nutrindo assim o conhecimento necessário para obter o modelo e garantir os valores necessários dos parâmetros que Eles controlam a qualidade da solução nutritiva do sistema hidropônico a ser analisado, sendo o mais importante o pH da referida solução.

1.8 Revisão Literatura

Utilizando a base de dados da plataforma Scopus, foi feita uma pesquisa pelos documentos mais notáveis relacionados com o tema de estudo, principalmente nos últimos 10 anos e sobre temas relacionados com a agricultura, o efeito do crescimento populacional, a escassez de recursos, a urbanização, os métodos agrícolas verticais, avanços tecnológicos associados e as vantagens que eles proporcionam.

Os humanos começaram como caçadores e coletores nômades. Mas há milhares de anos desenvolveram técnicas agrícolas básicas, que garantiam a obtenção de recursos sem a necessidade de estar em constante movimento, permitindo-lhes se estabelecessem em um local e produzir alimentos suficientes para sobreviver. E como tudo, a agricultura também se desenvolveu, tendo sua evolução marcada por dois

períodos principais: a evolução agrícola global, 1650-1850, e a revolução agrícola moderna, 1950-presente, incluindo a revolução verde (PREITE, SOLARI e VIGNALI, 2023).

O negócio agrícola é uma das áreas mais importantes da economia mundial e um dos maiores consumidores de água (WICKRAMAARACHCHI, BALASOORIYA, *et al.*, 2020). Além disso, o solo é normalmente o meio de cultivo mais disponível para o cultivo, fornecendo a ancoragem, os nutrientes e a água necessários para o crescimento bem-sucedido das plantas; mas, em função do elevado consumo de recursos hídricos, é um dos maiores problemas deste setor (LU e GRUNDY, 2017). Menos de 12% do solo terrestre tem as características necessárias para agricultura e o restante necessita de tratamento para poder ser aproveitado, Lu e Grunfy asseguram em seus estudos; em 2019 por exemplo, a área utilizada para atividades agrícolas foi de 4,75 milhões de hectares. Entre 2000 e 2019, a quantidade de terras aráveis utilizadas principalmente para cultivo irrigado duplicou, enquanto a de cultivo de sequeiro aumentou apenas 2,6% (PREITE, SOLARI e VIGNALI, 2023).

Somado a isso, a população mundial aumenta a cada dia e deverá aumentar de 7,3 bilhões em 2015 para 9,7 bilhões em 2050 (CHOWDHURY e KHANDAKAR, 2020). Além disso, as tendências indicam que a urbanização continuará e que até esse ano espera-se que entre 60% e 70% residem em áreas urbanas (LU e GRUNDY, 2017), esta informação também é mencionada por Matthew Gentry em seu artigo de 2019. E este crescimento populacional e urbano indica uma perda de terras agrícolas, diminuindo mais de 20% nas terras disponíveis per capita para atividades no setor (PREITE, SOLARI e VIGNALI, 2023). Mas este crescimento nas cidades não só afeta desta forma, também cria uma maior procura por produtos frescos, mesmo produtos que muitas vezes têm que percorrer um longo caminho desde o campo até à cozinha do consumidor, e neste percurso não só a qualidade dos alimentos diminui, também aumenta significativamente o custo de produção dos mesmos, pois é necessário o consumo de combustíveis fósseis para o transporte e consumo de recursos para o armazenamento dos produtos em condições adequadas (GENTRY, 2019). Somando os efeitos das mudanças climáticas, que dificultam o cultivo em ambientes que antes eram possíveis, a alimentação dessa população, que cresce excessivamente (NASKALI, PINARER e TOLGA, 2021), torna-se um problema porque é preciso

produzir mais com menos terra e recursos disponíveis, e isso é um problema inegável na produção global de alimentos.

Como pode ser visto, os métodos agrícolas tradicionais poderão tornar-se obsoletos no futuro, principalmente no ambiente urbano (TOLENTINO, SANTOS e EBBAY, 2021). A eficiência destes métodos de cultivo baseados no solo tem sido analisada há anos e muitos estudos indicam que estes podem não ser os mais eficazes em termos de rendimento. Para garantir sistemas agrícolas sustentáveis e resilientes, são necessárias novas abordagens, inovações, técnicas e processos e nesta urbanização e agricultura urbana, a organoponia, greenhouse e outras áreas verdes foram desenvolvidas em locais como telhados, terraços ou outros locais urbanos habitados; isso introduz o conceito de agricultura sem solo em camadas empilhadas verticalmente ou simplesmente agricultura vertical, eliminando a dependência da terra para o cultivo (DUTTA, GUPTA, *et al.*, 2023). E daqui surgem alguns métodos de cultivo como os sistemas hidropônico, aeropônico e aquapônico (NASKALI, PINARER e TOLGA, 2021).

A agricultura hidropônica vertical é uma combinação de dois métodos, que são o método vertical e o método hidropônico. Pesquisas e estudos modernizaram-no e adaptaram o método. Hidroponia é um método hortícola de cultivo de plantas usando uma solução nutritiva mineral em um meio sem solo. Foi comprovado que as plantas não precisam de solo, desde que os nutrientes essenciais, minerais e pH adequado sejam mantidos estáveis dentro de uma certa faixa dentro da água (CHOWDHURY e KHANDAKAR, 2020). As raízes das plantas terrestres são cultivadas diretamente imersas em solução nutritiva ou em meio agregado inerte como perlita, cascalho, areia, turfa, lã mineral ou outros substratos (LU e GRUNDY, 2017). Chowdhury e Khandakar também falam sobre os diferentes tipos de sistemas hidropônicos, como sistema de pávio, sistema de gotejamento, técnica de filme nutriente (NFT) ou técnica de fluxo profundo.

Outro aspecto mencionado por Chowdhury e Khandakar é a estrutura de um sistema hidropônico típico, que consiste em tubos hidropônicos, soluções nutritivas, que contém mais de 10 tipos diferentes de elementos importantes para o crescimento completo das plantas; recipientes de armazenamento de nutrientes, soluções nutritivas e soluções de ajuste de pH; bomba de água. Cada elemento deve ser selecionado para garantir a maior eficiência e conforto do sistema hidropônico.

Os sistemas hidropônicos são uma boa opção porque são fáceis de adaptar às novas tecnologias e podem ser um sistema automatizado. Utilizando sensores para controlar as condições do ambiente e dos elementos que fazem parte deste sistema hidropônico, um microcontrolador como cérebro do processo para monitorar níveis ideais da solução, níveis de pH, temperatura, fluxo (TOLENTINO, SANTOS e EBBAY, 2021). Aplicar diferentes algoritmos de aprendizado de máquina, como lógica fuzzy, k-nearest neighbor, regressão Lasso, rede Bayesiana e outros tipos de redes neurais para otimizar recursos; ou usar a visão computacional para acompanhar o crescimento das culturas em todas as fases (SANKET SALVI e SAWARGAONKAR, 2021).

Estas técnicas agrícolas verticais baseadas na hidroponia e na inovação inteligente acessível demonstraram ter os seguintes benefícios (POPKOVA, 2022):

- A possibilidade de estabelecer e implementar uma agricultura mais eficiente em áreas urbanas, independentemente do clima e de outras condições
- Aumento da produtividade.
- Não dependem do ciclo agrícola para muitos cultivos e aumentam ligeiramente o seu rendimento ao diminuir esse ciclo.
- As plantas cultivadas crescem mais rápido e são mais saudáveis do que as plantas cultivadas no solo, e melhoram as propriedades nutricionais
- Reduz o consumo de água em 95%, proporcionando um alto índice de sustentabilidade (TOLGA, GAMSIZ e BASAR, 2019)

Nem tudo é vantagem, existem estudos que consideram outras categorias de impacto ambiental; consistentemente o uso da energia necessária para resfriar e aquecer as instalações em que a hidroponia foi utilizada, e as fontes de energia e as emissões relacionadas aos gases de efeito estufa. Embora alguns sistemas hidropônicos utilizem fontes de energia renováveis, a maioria depende da rede elétrica e são concebidos principalmente para aplicações comerciais em vez de residenciais. Mas como o foco deste trabalho é um sistema doméstico é possível ignorar estas desvantagens.

1.9 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1 Introdução: Este capítulo tem como fim descrever a situação da agricultura e o meio ambiente na atualidade e o motivo pelo qual é importante ter alternativas como a hidroponia na agricultura urbana. Também aqui são apresentados os objetivos e tarefas do projeto de pesquisa, assim como o cronograma de trabalho e a estrutura do presente texto.
- Capítulo 2 Descrição do sistema: Nesta seção são descritos cada um dos componentes de um sistema hidropônico, assim como as considerações que estes devem cumprir para obter uma produção de qualidade. Também se descreve qual o efeito das diferentes longitudes de onda da luz nas plantas.
- Capítulo 3 Obtenção dos modelos matemáticos: Este capítulo tem como objetivo descrever a metodologia com a qual foram obtidas as funções de transferência que mostram a dinâmica de cada uma das variáveis a controlar.
- Capítulo 4 Obtenção dos controladores: Descrição e análise da metodologia necessária para fazer o design dos controladores por diferentes métodos. Comparação e seleção do melhor controlador para cada variável.
- Capítulo 5 Discretização dos controladores: Esta seção está destinada a otimizar os parâmetros dos controladores selecionados e além de fazer sua discretização para poder fazer a implementação de eles em um microcontrolador.
- Capítulo 6 Análise das provas práticas: Comprovação dos controladores mediante experimentos em microcontroladores.

2. Capítulo 2 Descrição do sistema

2.1 Introdução

O termo hidroponia surge do grego, em que 'hidro' significa água e 'ponos', trabalho, portanto seria 'trabalho na água'. A hidroponia pode então ser definida como a ciência do cultivo de plantas sem uso da terra, em um ambiente inerte, sendo este meio água ou mesmo um substrato que não o solo, por exemplo: arroz, cascalho, carvão ou pedra vulcânica, entre outros. A este meio é adicionada uma solução nutritiva que contém todos os elementos essenciais exigidos pela planta para o crescimento normal, que eram anteriormente fornecidos pela terra (MARULANDA e IZQUIERDO, 2003).

Os sistemas hidropônicos são classificados como abertos (uma vez que a solução nutritiva é aplicada às raízes das plantas, não é reutilizada) ou fechados (a solução nutritiva em excesso é recuperada, regenerada e reciclada). E combinando os critérios para classificar as técnicas hidropônicas, elas podem ser classificadas em técnicas em meio líquido (não adicionado), e dentro estão as técnicas de filme nutritivo ou NFT⁴, hidroponia flutuante e aeroponia (FAO, 1996).

O sistema NFT foi desenvolvido no Glasshouse Crop Research Institute, na Inglaterra, nos anos sessenta. O princípio deste sistema consiste na circulação de um fluxo laminar fino de solução nutritiva que passa pelas raízes, pois o sistema consiste em feedback e não apresenta perda ou saída para o exterior da solução nutritiva, portanto, pode ser descrito como um sistema de tipo fechado. Outra característica do sistema é a necessidade de ter uma inclinação da área de cultivo, pois, com isso, é possível a recirculação da solução nutritiva (FAO, 1996) .

2.2 Descrição do processo

Um sistema hidropônico NFT básico está composto por (FAO, 1996)

- Tanque coletor
- Canais de cultivo
- Bombas de reforço
- Rede de distribuição

⁴ Do inglês Nutrient Film Technique

- Tubo coletor

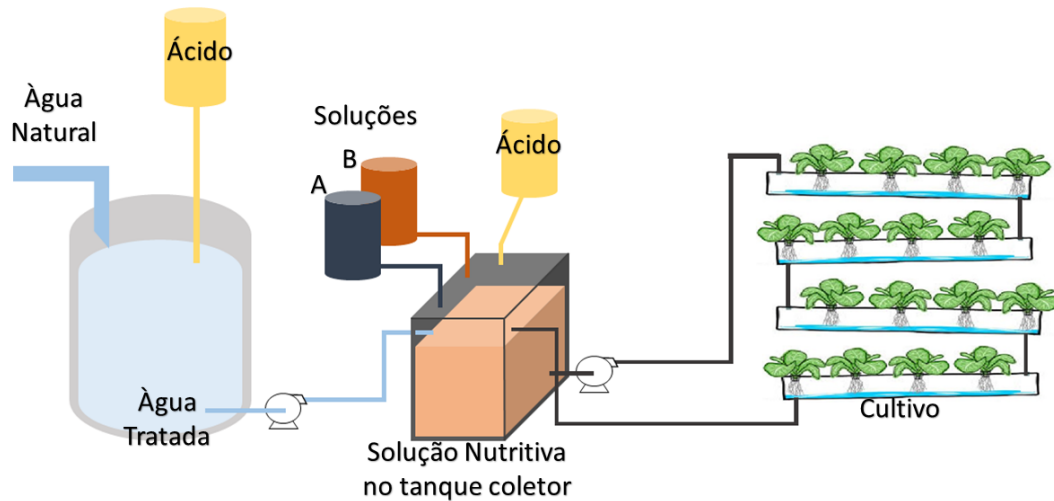


Figura 2.1 - Sistema hidropônico

2.2.1 O tanque coletor

O tanque de coleta tem a função de armazenar a solução nutritiva para o período de crescimento. Sua seleção deve ser baseada no tipo de material, dimensão e isolamento. Se a reação do material com a solução nutritiva é desconhecida, é necessário realizar um teste com antecedência para avaliar a reação química entre ambos. Isso não nos interessa na análise deste trabalho, pois pressupõe-se que a seleção já seja adequada.

O volume do tanque depende diretamente do número de plantas, espécies a serem cultivadas e da modalidade de correção química da solução nutritiva (sistema de correção manual ou automática). Um exemplo de consumo por espécie pode ser visto na tabela 2.1.

Na medida em que houver um tanque de pequena capacidade, o volume da solução diminuirá rapidamente, de modo que as correções da solução serão mais frequentes, chegando a mais de uma correção por dia, o que torna o sistema praticamente inoperante. Por esta razão, devem ser escolhidos volumes de solução que pelo menos dupliquem as necessidades diárias de colheita. Por sua vez, se houver um tanque coletor de grande volume, as mudanças de temperatura da solução nutritiva serão mais graduais em relação à temperatura ambiente. (FAO, 1996).

Tabela 2-1 - Exemplos de consumo per capita de solução nutritiva para diferentes espécies.
Fonte: (FAO, 1996)

Espécies	Volume aproximado de solução consumida (1 planta / dia)	Densidade de planta (planta/m²)	Capacidade aproximada do tanque (2) (l/m²)
Alface	0.3	24	9
Tomate	2.5	5	16
Pepino	3.0	5	19

De preferência, o recipiente coletor deve ser de uma cor opaca e também deve ser coberto, tudo isso para evitar o aparecimento de algas que podem afetar a composição da solução e o nível de oxigênio e dióxido de carbono da mesma (LOMBRICOMPOST e BOKASHI, 2010-20015).

2.2.2 Canais de Cultivo

O sistema NFT se caracteriza por não utilizar nenhum tipo de substrato, pois é um sistema estritamente hidropônico, ou seja, é cultivado diretamente em água com sais minerais dissolvidos. Portanto, o suporte das plantas é proporcionado pelos canais de cultivo e pelas perfurações neles feitas, de modo que as plantas permanecem sujeitas aos referidos canais sem necessidade de ajuda externa.

A segunda função dos canais e de importância igual ou até maior ao anterior, é permitir que a solução nutritiva passe livremente através deles. É necessário que a superfície dos canais seja lisa para facilitar o movimento rápido da solução através do canal de cultivo (FAO, 1996).

Esses canais de cultivo são distribuídos de diferentes maneiras, alguns deles são observados na Figura 2.2. Eles podem ser posicionados na vertical, como nas duas imagens superiores, ou na horizontal, como na imagem inferior. No primeiro caso, a solução nutritiva é fornecida a cada uma das seções verticais, enquanto no segundo caso é fornecida apenas ao canal superior e, através das conexões entre as diferentes seções, a solução circula para as demais. Em todos os casos, o excesso de solução nutritiva que é devolvida ao recipiente coletor é coletado (PERALTA e JIMENEZ, 2016).

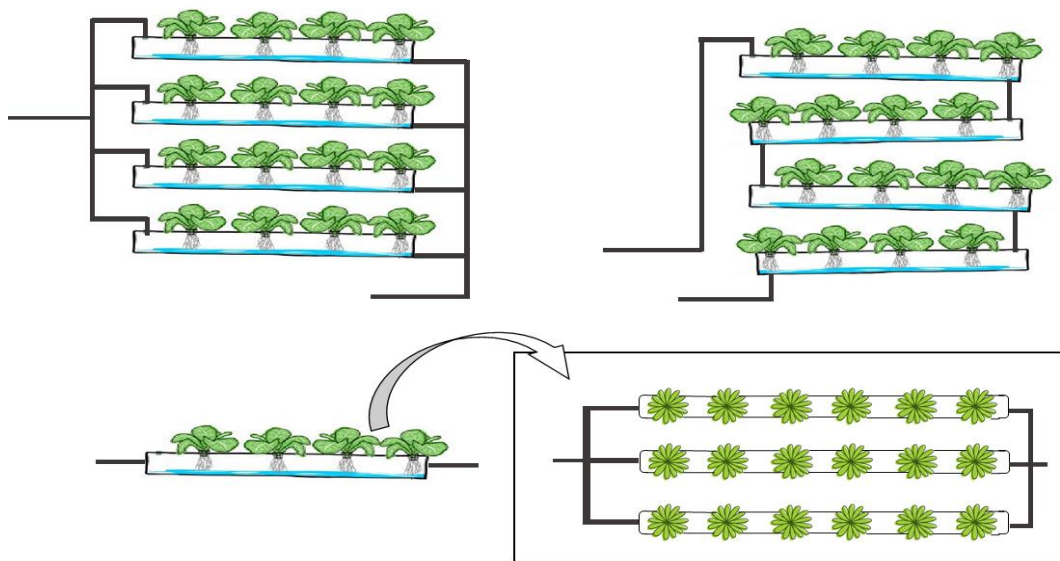


Figura 2.2 - Distribuição dos canais de cultivo.

2.2.3 Bombas

As bombas correspondem a um dos principais componentes do sistema. Sua função é adicionar constantemente a solução nutritiva do tanque coletor para o topo dos canais de cultura. Portanto, dependendo da magnitude do módulo de produção⁵ e do grau de supervisão, devem ser considerados dispositivos de alarme que indiquem uma interrupção indesejada, o que pode resultar em perda total da produção. Acrescente-se que é importante lembrar a existência da outra bomba presente no sistema cuja função seria transportar a água tratada do seu recipiente de armazenamento até o recipiente onde é preparada e armazenada a solução nutritiva. Esta bomba não necessita de mecanismo de controle complexo, só será acionada quando for necessário iniciar o preparo da solução nutritiva.

Para a seleção da bomba, aspectos como resistência do fluido e vazão operacional devem ser considerados. No caso do primeiro aspecto, isso ocorre devido à ação corrosiva da solução nutritiva ao longo do tempo; se a bomba não for resistente à corrosão, sua vida útil diminuirá rapidamente. Para o segundo parâmetro de seleção, vazão operacional, é analisada a vazão necessária nos canais de cultivo em relação à queda manométrica e eficiência exigidas.

A bomba deve ser capaz de conduzir de forma eficiente (pressão manométrico) uma vazão máxima equivalente ao produto da vazão que é tratado para cada canal

⁵ Magnitude do módulo de produção é aquele valor associado à quantidade de canais de cultivo que vai a ter o sistema a implementar, por enquanto também está relacionado com a quantidade de plantas a ser cultivadas

de cultivo (2-3 litros por minuto no máximo segundo os especialistas) pelo número de canais de cultivo. Esse valor deve ser aumentado em 20% como uma margem de segurança contra demandas mais altas de algumas espécies que eventualmente são cultivadas no sistema.

É importante considerar que o módulo de produção pode ser ampliado, para isso, pode-se considerar, desde o início, a aquisição de uma bomba maior, ou simplesmente ter outra unidade de acordo com o aumento da área de produção. (FAO, 1996)

2.2.4 Rede de distribuição

A solução nutritiva é distribuída através de uma rede composta por tubos e mangueiras de PVC ou borracha, da bomba do impulsor até o topo dos canais de cultivo. Nenhuma liga metálica é usada, pois interagem com os elementos minerais que compõem a solução nutritiva. A seleção de sua dimensão depende do volume a ser transportado pelo sistema, no entanto, como a vazão necessária não deve exceder 2 a 3 litros por minuto, normalmente o diâmetro dos tubos é de 1 polegada.

Se o trabalho for com sistemas de cultivo de pequena escala (menores que 100 m²), não é necessário o uso de tubos de PVC e bastaria utilizar mangueiras de jardim, com diâmetro interno de 1 a 2 cm, para distribuir a solução nutritiva (FAO, 1996).

2.2.5 Tubo Coletor

O tubo coletor coleta a solução nutritiva dos canais de cultivo e a traz de volta para ao tanque, fechando o processo de recirculação. Este tubo deve estar localizado em um nível mais baixo do que a altura mais baixa dos canais, dessa maneira a solução nutritiva desce por gravidade e é oxigenada. Além disso, é aconselhável que este tubo esteja em uma inclinação descendente em direção ao tanque coletor, para não precisar usar um elemento extra para conduzir a solução em seu caminho de volta. No final, é necessário colocar um cotovelo para facilitar a queda do líquido no tanque coletor. (PERALTA e JIMENEZ, 2016)

2.2.6 Sistema hidropônico

A Figura 2.1 mostra um diagrama de um sistema hidropônico geral e seu funcionamento é descrito na continuação.

Como primeiro passo do processo temos que o tanque armazenador precisa ser fornecido com água natural, depois deve ser submetida a um tratamento com o uso de ácido nítrico diluído, o objetivo é conseguir que esse pH atinja valores entre 6.0 e 6.4. Além disso, a condutividade da água deve ser medida para estar ciente da concentração de sais dissolvidos nela.

Depois a água tratada é propelida para o tanque coletor até atingir um determinado nível. Para isso é usada uma bomba impulsora.

O terceiro passo consiste em adicionar duas soluções conhecidas como A e B que possuem as concentrações apropriadas de compostos químicos que as plantas precisam para sua subsistência. Eles são fornecidos de acordo com uma proporção previamente calculada que depende do nível de água tratada adicionada ao tanque coletor.

A continuação a quarta etapa é então executada, um novo tratamento de pH deve ser realizado para atingir um valor entre 5,5 e 6,5, de preferência 6, essa parte do procedimento é muito importante porque um controle inadequado dessa variável pode afetar as plantas e toda a produção pode ser perdida.

O quinto passo em fazer em fazer chegar a solução nutritiva às plantas, com o uso de uma das bombas de acionamento, a solução circula pelos canais de cultivo por um período predeterminado de tempo, entre 10 e 15 minutos normalmente, para atingir cada uma das plantas (BARROS, 1999). O excesso de líquido é devolvido ao tanque coletor, o processo acima é repetido enquanto houver plantas nos canais de cultura.

Quando o nível de solução nutritiva não é suficiente para uma próxima recirculação pelos canais, o processo descrito desde o segundo até o quarto passo deve ser executado novamente.

2.3 Solução nutritiva

O aspecto mais importante da hidroponia é a solução nutritiva, pois dela depende a nutrição das plantas e, portanto, a qualidade e quantidade da produção.

2.3.1 Elementos químicos necessário para um cultivo

Muitos pesquisadores e especialistas da área mencionam que, além dos recursos que as plantas extraem do ar e da água, como carbono, hidrogênio e

oxigênio, eles consomem os elementos mostrados na Tabela 2.2 com graus variados de intensidade. (LOMBRICOMPOST e BOKASHI, 2010-20015)

*Tabela 2-2 - Compostos químicos necessários para as plantas
Fonte: (LOMBRICOMPOST e BOKASHI, 2010-20015)*

Elemento mineral	Símbolo Químico
Macronutrientes	
Nitrogênio	N
Fósforo	P
Potássio	K
Mesonutrientes	
Cálcio	Ca
Magnésio	Mg
Enxofre	S
Micronutrientes	
Ferro	Fe
Manganês	Mn
Zinco	Zn
Boro	B
Cobre	Cu
Molibdênio	Mo
Cloro	Cl

Os elementos classificados como macronutrientes são aqueles essenciais para as plantas, os mesonutrientes são indispensáveis em níveis intermediários, enquanto os micronutrientes são indispensáveis em pequenas quantidades.

2.3.2 Formulação da solução nutritiva

Os compostos químicos não são fornecidos diretamente da maneira natural como podem ser encontrados, mas são adicionados à solução nutritiva na forma de sais de fertilizantes. A tabela a seguir lista alguns dos sais mais necessários em hidroponia com suas respectivas fórmulas químicas.

Tabela 2-3 - Sais fertilizantes
Fonte: FAO,2016.

Nome Químico	Fórmula Química
Nitrato de cálcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$
Nitrato de potássio	KNO_3
Nitrato de magnésio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Fosfato monopotássico	KH_2PO_4
Sulfato de magnésio	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Sulfato de potássio	K_2SO_4
Sulfato de manganês	MnSO_4
Ácido bórico	H_3BO_3
Sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Sulfato de zinco	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Molibdato de amônio	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

Como é possível ver na tabela, existem vários sais fertilizantes que fornecem os mesmos produtos, por isso é necessário selecionar uma formulação específica. Um dos aspectos a considerar é a incorporação mínima de elementos minerais não essenciais para o crescimento das plantas (sulfatos, por exemplo), uma vez que seu acúmulo aumenta desnecessariamente a concentração de sais, que, se atingir um nível limite, inibe a absorção de água pelas plantas. Dessa forma, a formulação escolhida deve conter os fertilizantes que contribuem em maior proporção com os elementos essenciais e, em pequena quantidade, os indesejados. (FAO, 1996)

2.3.3 Gestão da solução nutritiva.

A água usada para obter a solução nutritiva deve ser analisada quimicamente para determinar se há uma contribuição significativa de alguns elementos minerais. Porque para diferentes áreas e épocas do ano, o conteúdo de alguns elementos na água varia, então alguns pesquisadores indicam o ajuste da formulação da solução (FAO, 1996) (LOMBRICOMPOST e BOKASHI, 2010-20015).

Se a concentração de cálcio e / ou magnésio na água local excede o valor de 30 partes por milhão, a solução nutritiva poderá ser ajustada para que não haja excesso de nenhum deles. Amostrar a solução nutritiva constantemente e levá-la para análise em laboratório é uma tarefa complicada e custosa; portanto, é mais

conveniente estimar a concentração total de elementos nutricionais dissolvidos na solução por meio de condutividade elétrica. A faixa de condutividade elétrica geralmente necessária para o crescimento adequado da colheita está entre um fator de 15 a 30. (FAO, 1996)

As soluções A ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ e Fe) e B ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e micronutrientes), são distribuídas para que não reajam entre si, e quando são adicionadas à água para obter a solução nutritiva, a A deve ser adicionada primeiro e depois a B, com proporções de 1 litro e 400 mililitros por 200 litros de água, respectivamente. Lembrando sempre que esta proporção pode diminuir dependendo da condutividade da água conforme mencionado anteriormente.

Outro parâmetro que deve ser controlado para manter os elementos nutricionais disponíveis na solução nutritiva é o pH. O intervalo em que os nutrientes estão disponíveis ocorre entre 5,5 e 6,5. As correções de pH geralmente são feitas para acidificar a solução na faixa ideal mencionada acima. Para baixar o pH para um valor mínimo de 5,5, é adicionada uma solução ácida, composta por uma mistura de ácido nítrico (HNO_3) preparada a 5%. Se for necessário alcalinizar a solução nutritiva, ou seja, aumentar o pH para a faixa ideal, uma solução básica de 10% de hidróxido de potássio (KOH) deve ser preparada para aplicar um pequeno volume à solução (FAO, 1996).

3. Capítulo 3 Obtenção dos modelos matemáticos

3.1 Introdução

Para controlar qualquer sistema, é útil ter conhecimento prévio do comportamento dinâmico do processo. Então é necessário traduzir esse conhecimento em um modelo de sistema, tornando este o primeiro passo na análise de um sistema de controle.

Há duas maneiras de obter o modelo matemático de um processo. Um é baseado nas leis químicas e físicas que regem o sistema. No entanto, modelos teóricos podem não ser aceitáveis para os processos complexos, se o processo requer um grande número de equações diferenciais com um grande número de parâmetros desconhecidos. Como alternativa é obter um modelo a partir de dados experimentais coletados, essa técnica é chamada de identificação do sistema.

Por sua vez, a identificação pode ser dividida em duas formas, a paramétrica e a não paramétrica. Este projeto trabalha com o segundo caso. Basicamente, esse tipo de identificação usa curvas de resposta do processo quando é excitado com um degrau, impulso ou sinal senoidal. A partir dessa curva, modelos de baixa ordem podem ser obtidos, descrevendo o comportamento dinâmico do processo. Esses modelos podem ser imprecisos, mas são suficientes para entender como o sistema funciona, como responde a diferentes situações transitórias e também ser usado para fazer uma pré-sintonia de controladores (GARCÍA, 2017).

3.2 Modelo de Nível.

O componente mais importante do sistema hidropônico é a solução nutritiva, pois, para o sistema em questão, os sais dissolvidos serão nitrato de cálcio, ferro quelatizado, nitrato de potássio, sulfato de magnésio e o restante dos micronutrientes amostrados na tabela 2-2. Esses componentes são divididos em duas soluções diferentes, A e B, e devem ser adicionados à água tratada que deve ter sido fornecida anteriormente ao recipiente de armazenamento de solução nutritiva do sistema. A proporção das soluções A e B são de aproximadamente 500 ml y 200 ml por cada 100 L de água respectivamente. Portanto, é necessário conhecer o comportamento do nível em cada um dos 3 recipientes de armazenamento, para realizar o controle adequado; a figura 3.1 permite ter uma ideia de onde estaria conectado cada um dos

componentes responsáveis por monitorar e controlar os níveis de líquido dentro de cada recipiente do sistema: sensores (S1, S2, S3) e válvulas.

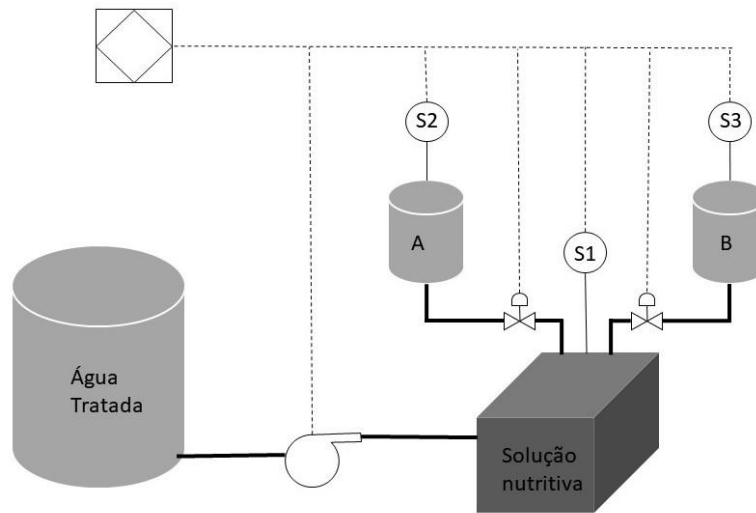


Figura 3.1 Esquema com a composição do sistema responsável pela monitorização dos níveis nos diferentes contentores

3.2.1 Nível do tanque armazenador de solução nutritiva.

Este tanque possui uma área de seção transversal de $0,15\text{m}^2$ e altura de $0,7\text{m}$, o que permite armazenar um volume de $0,105\text{m}^3$ equivalente a 105 litros de solução nutritiva. Mas a bomba a ser usada é do tipo submersa, com dimensões aproximadas de $0,2\text{m} \times 0,2\text{m} \times 0,2\text{m}$, ocupando assim um volume de $0,008\text{m}^3$, de modo que o volume da solução a ser armazenada diminui a $0,097\text{m}^3$.

O sensor de nível a ser usado neste caso é do tipo ultrassônico e é capaz de medir em uma faixa de $0,05\text{m}$ a $2,2\text{m}$ com saída de 0 a 10 volts, embora, neste caso, ele só meça valores de até $0,65\text{m}$ equivalentes a cerca de 90L, estes já incluem a diferença contribuída pelo volume de água deslocado pela estrutura da bomba de acordo com o princípio de Arquimedes.

Nesta seção do sistema, não é necessário ter conhecimento de como o nível se comporta em todos os momentos; é necessário apenas saber quando atingiu seu nível mínimo e quando máximo, e qual volume exato de água tratada entrou no tanque, porque o volume das soluções A e B a serem adicionadas a solução nutritiva depende desse valor.

3.2.2 Nível nos recipientes armazenador de solução A e B

O recipiente de armazenamento de cada uma das soluções atende às mesmas condições, pois elas têm as mesmas dimensões e suas saídas de drenagem têm o mesmo comportamento. A altura real do contêiner é de 0,1m e sua área é de 0,05m², atingindo um volume de armazenamento de 0,005m³, equivalente a 5L, no entanto, 80% de sua capacidade é utilizada, pois apenas 4L são armazenados.

Começaremos descrevendo brevemente o sensor a ser usado para medir o nível da solução, este é um componente eletrônico de utilização universal com saída analógica compatível mesmo com diferentes plataformas microcontroladoras. Para maior durabilidade a superfície do sensor, este passa por processos químicos para aumentar sua condutividade elétrica e resistência à corrosão. A área de contato tem 0,08 m de altura e sua tensão de saída varia de 0V a 2,3V quando é totalmente submerso no líquido. Quando a válvula está aberta, o nível do tanque se comporta como no gráfico da figura 3.2 (GARCÍA, 2009) (OGATA, 2010).

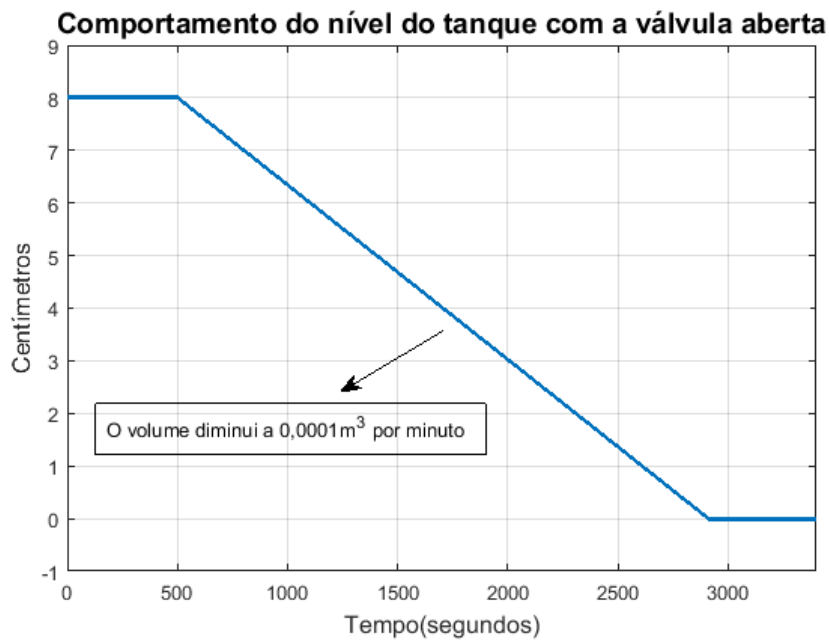


Figura 3.2 - Comportamento do nível da soluções A e B

A expressão matemática 3.1 descreve o comportamento do nível com a válvula aberta, como é possível apreciar, é uma linha reta com um pendente negativo.

$$h(t) = -\frac{K}{A}t + h_0 \quad (3.1)$$

K sendo o volume de líquido drenado do recipiente em um segundo, A , sua área de seção transversal e h_0 o valor inicial da altura no momento em que a válvula é

aberta. Para o caso em estudo, o valor de K é $1,66 * 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ e o de A é $0,05\text{m}$ como foi mencionado acima.

3.3 Modelo de fluxo.

A rede de distribuição é outro elemento do sistema hidropônico muito importante, como mencionado no capítulo 2, é através disso que a solução nutritiva pode ser retirada do tanque de armazenamento para os canais de cultivo. É importante esclarecer que, no caso de estudo, essa rede possui um T incorporado para adicionar um canal de recirculação ao armazenamento de soluções nutritiva. Essa característica tem um duplo objetivo, pois divide o fluxo em duas direções, reduzindo sua velocidade e, quando a válvula solenoide do lado direito é fechada, pode desempenhar a função de misturar corretamente a solução A com o B e com a água tratada, evitando a necessidade de incluir um agitador, que é um elemento que torna o sistema mais complexo. Essa estrutura pode ser vista na Figura 3.3.

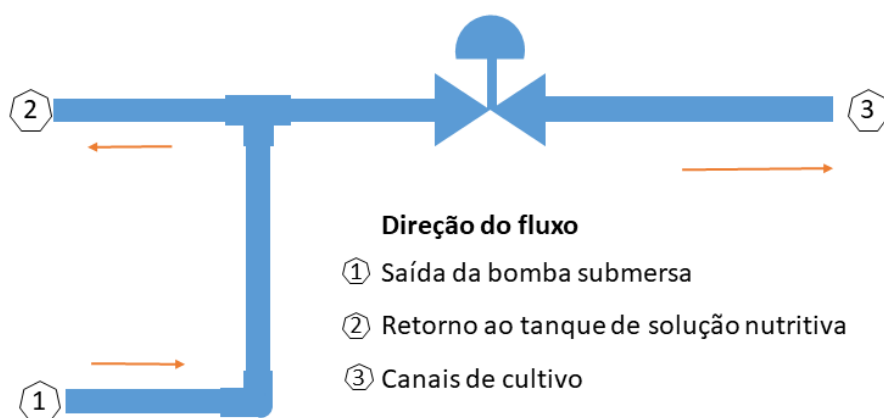


Figura 3.3 - Diagrama de rede de distribuição simplificado

3.3.1 Função de transferência da vazão em um cano horizontal.

Para obter o modelo matemático do sistema, somente a seção do tubo após a válvula e terminando no ponto 3 da Figura 3.3 deve ser levada em consideração. Para obter a função de transferência do processo, é realizada uma análise exaustiva das leis físico-químicas que esta seção do cano completamente horizontal atende, primeiramente, é apresentada a equação 3.2, conhecida como princípio de Bernoulli, esta equação relaciona as alterações de pressão com mudanças na velocidade e altura ao longo de uma linha de fluxo e pode ser aplicada entre dois pontos dessa linha, sempre que o fluxo seja considerado estável, incompressível e sem atrito. (MOTT, 2006)

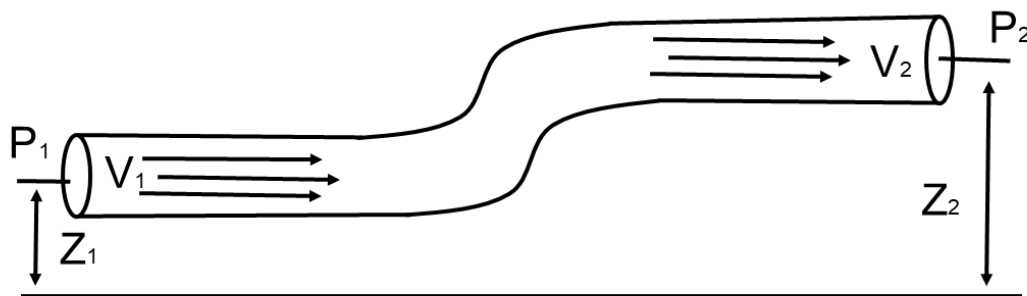


Figura 3.4 - Princípio de Bernoulli
Fonte: MOTT, 2006

$$\frac{P_1}{\rho} + gZ_1 + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + gZ_2 + \frac{V_2^2}{2} = \text{constante} \quad (3.2)$$

Sendo:

- Z = altura na direção da gravidade desde um ponto de referência.
- V = velocidade do fluido na seção considerada.
- P = pressão no ponto de análise.
- ρ = densidade do fluido.
- g = aceleração da gravidade.

Mas na prática o sistema não é ideal e de um ponto do tubo a outro, energia é perdida. Essa perda pode ser representada tanto pela expressão 3.3 quanto pela expressão 3.4.

$$h_{pf} = f \frac{L v^2}{D 2g} \quad (3.3)$$

$$h_{pf} = f \frac{\Delta P_{pf}}{2g\rho} \quad (3.4)$$

Sendo:

- L = comprimento do cano.
- D = diâmetro do cano.
- f = fator de fricção.
- ΔP_{pf} = perda de pressão pelo atrito.

O fator o coeficiente de fricção (f) é um parâmetro adimensional que é utilizado para calcular a perda de carga em sistemas hidráulicos. O cálculo do fator de atrito e a influência de dois parâmetros principalmente, número de Reynolds Re e rugosidade relativa.

O número de Reynolds, abreviado como Re , é um valor adimensional usado para o cálculo do regime de escoamento de determinado fluido sobre uma superfície e está determinado pela fórmula 3.5. Em o caso do sistema em estudo o regímen necessário é laminar, assim, o valor do coeficiente de fricção é calculado usando a fórmula 3.6.

$$Re = \frac{D\rho v}{\mu} \quad (3.5)$$

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.6)$$

Sendo:

- μ = viscosidade do fluido.
- v = velocidade média do fluido.

Para obter o modelo deve ser verificado se o processo atende às condições para ser linearizado. Estas considerações iniciais são:

- A capacidade volumétrica do cano não varia quando a pressão do fluido varia, o seja, não se deforma.
- O fluxo é incompressível e isotérmico (é um líquido).
- O cano é horizontal com fluxo a valor constante, então as variações serão pequenas em torno de um ponto operacional fixo.

É definido $Q(t)$ como variável de saída e $\Delta P(t)$ como a diferença de pressão entre dois pontos e como uma variável de entrada do sistema. Além disso, variáveis ou desvios independentes, como os das equações 3.7 e 3.8, são usados.

$$\Delta Q(t) = Q(t) - Q'(t) \quad (3.7)$$

$$\Delta \Delta P(t) = \Delta P(t) - \Delta P'(t) \quad (3.8)$$

$Q'(t)$ y $\Delta P'$ são os valores médios nos que trabalha o sistema. Sendo $\Delta P'$ a variação de pressão dada pelas perdas por atrito. Ao procurar um modelo linear, as pesquisas previas de outras instituições nesta área oferecem como resposta a função de transferência do sistema mostrada na expressão 3.9, já que segundo as informações dadas por elas, o sistema reage como um sistema de primeira ordem.

$$Gq(s) = \frac{\Delta Q(s)}{\Delta \Delta P(s)} = \frac{Kq}{Tqs + 1} \quad (3.9)$$

Considerando o equilíbrio hidrodinâmico da altura no sistema, levando em consideração a expressão 3.2 e o conceito de perda que a expressão 3.3 oferece, a expressão 3.10 é obtida.

$$\frac{P_1}{\rho} + gZ_1 + \frac{V_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + gZ_2 + \frac{V_2^2}{2} = hpf \quad (3.10)$$

Tendo em conta as condições de linearização, pode-se observar que:

- O cano é horizontal então $z_1 = z_2$.
- O fluxo é de valor constante então $v_1 = v_2$.
- A diferencia de pressão entre os pontos só pode ser dada por perdas por atrito então $P_1 - P_2 = \Delta Pf$

A partir de 3.3 e 3.4, é obtida uma expressão para ΔPpf de modo que dependa de valores conhecidos. e fazendo as alterações levantadas na equação 3.10, as expressões 3.11 e 3.12 são obtidas para calcular os valores de Kq e Tq que pertencem à função de transferência na expressão 3.9 (CORRIPIO e SMITH, 1997).

$$Kq = \frac{\pi^2 D^5}{16\rho f L Q'} \quad (3.11)$$

$$Tq = \frac{\pi^2 D^5}{4f(1 + N)Q'} \quad (3.12)$$

Onde $(1 + N)$ é uma expressão dependente do comprimento do tubo reto e seu equivalente em acessórios (cotovelos, T, etc.), como o tubo é completamente horizontal, a expressão é substituída pelo valor numérico 1 (CORRIPIO e SMITH, 1997). O diâmetro do tubo é de 1 polegada, equivalente a 0,0254m e seu comprimento é de 1m. E a vazão esperada depende da quantidade de canais de cultivo no sistema,

que pode ser de 1 a 4, dependendo da configuração vertical ou horizontal escolhida, como mostra a figura 2.1. A velocidade que o fluxo deve ter em cada canal de cultivo deve ser de aproximadamente $4,17 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$. Substituindo os valores das expressões 3.11 e 3.12 para um sistema de 1 canal e um sistema de 4 canais, obtêm-se os mesmos valores de Kq e Tq para ambos os casos, sendo estes 0,05176 e 5,093, respectivamente. Portanto, a função de transferência para o modelo de comportamento de fluxo é:

$$Gq(s) = \frac{0.05176}{5.093 s + 1}$$

3.3.2 Função de transferência da eletroválvula.

Para controlar a vazão, neste caso, uma válvula solenoide RainBird da série DV é usada como atuador, permitindo uma vazão de 0,05 a 5,0 m^3/h para uma faixa de tensão na entrada de 7,2V a 24,0V. A função de transferência deste componente do sistema é dada pela expressão 3.13, porque o comportamento dinâmico da válvula é representado por um sistema de primeira ordem.

$$Gv(s) = \frac{KaKcv}{Tvs + 1} \quad (3.13)$$

Sendo

- Ka = ganho do atuador.
- Kcv = ganho do corpo da válvula.
- Tv = constante de tempo da válvula.

Ka sendo a proporção de quanto o deslocamento da haste varia em relação à tensão de entrada. E Kcv a razão entre o deslocamento da haste e a velocidade do fluido que flui através da válvula. Portanto, a expressão final para o cálculo de $KaKcv$ é (GARCÍA, 2009):

$$KaKcv = \frac{Q_{max} - Q_{min}}{U_{max} - U_{min}} = \frac{\Delta Q}{\Delta U} \quad (3.14)$$

Tv tem um valor muito menor que 1, portanto é depreciável e a função de transferência da válvula fica como um ganho.

$$Gv(s) = 0.08191$$

3.3.3 Função de transferência do sensor medidor de vazão.

Para medir a vazão, é usado um fluxometro, que é um sensor que permite medir a quantidade de água que flui através de um tubo. Consiste em uma caixa de plástico e um rotor com palhetas no interior. Quando o fluido flui através do interior, o sensor de fluxo gira o rotor, a velocidade de rotação é determinada por um ímã conectado ao rotor, que é detectado por um sensor de hall externo ao alojamento. A saída do sensor é uma onda quadrada cuja frequência é proporcional ao fluxo que responde pela expressão 3.15

$$f(\text{Hz}) = Q(\text{L}\backslash\text{min}) * K \quad (3.15)$$

O valor de K depende do modelo de sensor e o diâmetro do tubo, neste caso, é de 3,5. Também é sabido pelo fabricante que leva aproximadamente 1 segundo para que o valor medido seja estabelecido, portanto sua constante de tempo é 4 vezes menor. A dinâmica deste sensor é uma função de primeira ordem, como a expressão 3.9 ou a expressão 3.13. E a função de transferência final é (OGATA, 2010):

$$Gq(s) = \frac{3.5}{0,25s + 1}$$

3.4 Modelo de pH

Nos estudos de reações ácido-base em dissoluções aquosas a concentração do íon hidrogênio é muito importante. As concentrações dos íons H^+ e OH^- em estas dissoluções com frequência são números muito pequenos, portanto é difícil trabalhar com eles. Mas Soren Sorensen fez como proposta uma medida mais prática chamada pH e este é definido como o logaritmo negativo da concentração do íon hidrogênio em mol/L , o pH é uma variável adimensional. Tendo em conta os valores de pH as dissoluções podem ser classificadas geralmente em ácidas aquelas com um pH menor que 7, básicas para as maiores que 7 e neutras para as que atingem esse valor. Com o logaritmo negativo da concentração de íons hidróxidos de uma solução é obtida uma escala de pOH, que é análoga ao pH. Em geral em uma dissolução a soma de pH e pOH deve ser 14.

Os ácidos e bases podem ser fracos ou fortes. Os ácidos e bases fortes são eletrólitos fortes que, para fins práticos, eles devem ionizar completamente a água.

Mas as maiores quantidades das bases e dos ácidos são fracos, e são ionizado de forma limitada na água (CHANG, 2002).

3.4.1 Curva de titulação.

A titulação é uma técnica analítica que permite a determinação quantitativa de uma substância específica, analito, dissolvida em uma amostra. É baseada em uma reação química completa entre o analito e o reagente de concentração conhecida que é adicionado à amostra. As reações ácido/base são muito rápidas, e o equilíbrio químico é estabelecida muito rapidamente. Reações ácido/base em soluções aquosas são, portanto, ideais para titulações.

As curvas de titulação ilustram o progresso qualitativo de uma titulação. Possui basicamente duas variáveis: o volume do titulante, como a variável independente e como a variável dependente tem o sinal da solução, por exemplo, o pH para titulações ácidas/básica. Outra definição importante a ter em conta na teoria de titulação é a de ponto de equivalência, que atingido quando as concentrações do titulante e do titulado estão nas proporções estequiométricas da reação. Na titulação ácido/base existem quatro combinações diferentes, mas as seguintes três são as mais estudadas (CHANG, 2002):

- Titulação Ácido forte/Base forte aqui o ponto de equivalência se dá aproximadamente em pH 7, pois o ácido ioniza-se praticamente na totalidade e a base se dissocia praticamente na totalidade, seja, o número de íons H^+ são iguais aos de OH^- . Quando os íons H_3O^+ e OH^- reagem, formam água.
- Titulação Ácido fraco/Base forte: Neste tipo de titulação, o ponto de equivalência se dá em um pH superior a 7, devido à hidrólise do ânion do ácido fraco, que é uma hidrólise que origina íons OH^- .
- Titulação Base fraca/Ácido forte: neste tipo de titulação, o ponto de equivalência se dá em um pH inferior a 7, devido à hidrólise do cátion resultante ser ácido.

3.4.2 Modelos da dinâmica de pH para o tratamento de água e solução nutritiva

Para um melhor estudo de dissolução, utiliza-se uma titulação que permite a determinação quantitativa de uma substância específica em solução dissolvida em uma amostra. Neste projeto trabalhamos com curvas de titulação que ilustram o progresso qualitativo de uma titulação, e permitem controlar a determinação das faixas de trabalho da variável.

As duas seções do sistema se comportam de maneira semelhante. Na primeira etapa, a água natural tem valor de pH muito próximo de 7 e deve atingir um valor entre 6 e 6,4. Na outra etapa do processo quando os componentes químicos são adicionados à água tratada, no tanque coletor de solução nutritiva, o pH volta a valores próximos de 7, sendo necessário novamente trazê-lo para valores inferiores, neste estágio o valor resultante deve estar entre 5,5 e 6,5. Disto obtemos que a faixa de trabalho da variável é de aproximadamente 7,2 a 5,3.

Primeiramente, a quantidade de 0,5 ml de HNO_3 diluído a 5% foi adicionada manualmente a cada 30 segundos em 200ml, 400ml e 600ml de água e solução nutritiva, respectivamente. Conhecendo o comportamento do pH de acordo com este experimento, ele é repetido para obter a melhor curva de titulação possível, mas agora o volume de água utilizado é de 10L e são adicionados 2ml de ácido diluído a cada 30 segundos. As medições são realizadas até que o pH atinja um valor muito próximo de 5. Assim, desta forma são obtidas 27 amostras e o gráfico da figura 3.5, em que é apresentada a curva de titulação para as soluções em estudo, desta forma é possível perceber que, para os valores da zona de trabalho do processo, o pH tem uma relação praticamente linear com o volume de ácido nítrico presente na solução.

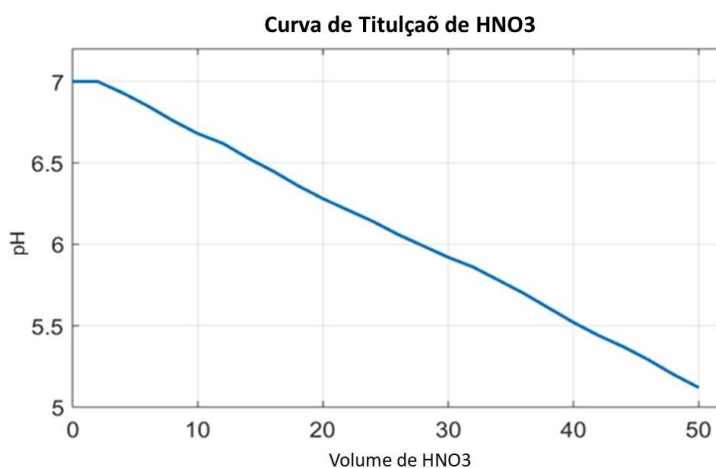


Figura 3.5 - Curva de titulação obtida experimentalmente.

Como é sabido o pH é uma medida da concentração de hidrogênio na dissolução, é por isso que o modelo matemático a ser obtido será relacionado à concentração e não a pH, pois a fórmula matemática do mesmo tem um logaritmo o que o tornaria um sistema não-linear.

Como a água natural e a solução nutritiva não tratada tem um comportamento de bases fracas por ter um valor de pH perto de 7, é possível afirmar que a concentração de hidrogênio presente nas mesmas será a mesma que a concentração de hidrogênio adicionada com a dissolução de ácido nítrico e é representada pela expressão 3.16.

$$c(H) = \frac{m}{V} \frac{1 \text{ mol}}{63 \text{ g}} \quad (3.16)$$

Sendo m a massa em gramas de ácido puro que contem a dissolução, V o volume em litros da dissolução e os 63g é a massa em gramas de um mol de HNO_3 . A expressão não é linear de modo que será linearizada usando-se a aproximação de Taylor para um ponto com 0g de HNO_3 e V_0 como volume do recipiente armazenador da dissolução. É obtida a expressão 3.18.

$$c(m, V) \approx c(m_0, V_0) + \frac{dc}{dm}(m_0, V_0)(m - m_0) + \frac{dc}{dV}(m_0, V_0)(V - V_0) \quad (3.17)$$

$$c(m, V) \approx \frac{1}{63 * V_0} m \quad (3.18)$$

Para verificar se a expressão 3.16 descreve o processo corretamente na faixa de pH 7 a 5, foi utilizado um recipiente de 1L de água ao qual foi adicionado 0,2 ml de HNO_3 dissolvido a 5% a cada 1 minuto, e o resultado a ser comparado com os valores obtido com a expressão matemática e o resultado é mostrado na tabela 1; em que é possível verificar que a expressão está matematicamente correta. No caso do cálculo do pH da primeira amostra, o cálculo não foi feito porque o HNO_3 ainda não havia sido adicionado, e a concentração mostrada na tabela é calculada conhecendo o pH da solução após a medição.

Tabela 3-1 - Comparação entre o pH calculado pela expressão matemática e o pH medido experimentalmente

Volume de HNO_3 adicionado (ml)	Masa do HNO_3	$c(H)$ (10^{-3})	pH calculado	pH medido
0.00	0	0,013	-	6,9864
2	0,1	0,0794	6,1004	6,1023
4	0,2	0,1587	5,7993	5,8001
6	0,3	0,2381	5,6232	5,6230
8	0,4	0,3175	5,4983	5,4977
10	0,5	0,3968	5,4014	5,4126

Para o recipiente de água tratada o valor de V_0 é 200L e para o tanque coletor de solução nutritiva é 90L. Além disso com testes experimentais também é determinado o tempo de acomodação para cada parte do processo, o tempo é medido desde que é adicionado a quantidade de ácido até que o pH atinge o valor final, sendo 60s para a primeira e 25s para a segunda. Sabendo que os dois processos são de primeira ordem, obtêm-se duas funções de transferência, utilizando o critério de que o tempo de acomodação de um sistema de primeira ordem é 4 vezes a constante de tempo do sistema aproximadamente, e que além disso o ganho é a constante resultante quando é substituído o valor de volume do recipiente em cada caso.

O resultado é a seguinte função de transferência, que relaciona concentração e massa na dissolução para descrever o comportamento do pH, para o modelo de comportamento da água tratada:

$$\frac{C(s)}{M(s)} = \frac{7,94 \cdot 10^{-5}}{15s + 1}$$

E para o tanque de coleta de solução nutritiva seria o seguinte:

$$\frac{C(s)}{M(s)} = \frac{1,76 \cdot 10^{-4}}{6,25s + 1}$$

3.4.3 Função de transferência da eletroválvula

O atuador para controlar os dois processos de pH é uma válvula solenóide da série RainBird DV semelhante à mostrada na seção 3.3.2, mas com diferentes prestações. O procedimento para obter seus parâmetros é o mesmo que foi mencionado nesta seção

Como o HNO_3 está diluído a 5% e a variação da vazão na válvula é $8.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ conforme dados do fabricante, então a variação da vazão mássica na válvula é $8.3 \cdot 10^{-9}$, a variação de tensão na válvula entrada é 5V. Também é sabido pelos dados do fabricante da válvula que o valor de T_v é muito inferior a 1s. Com esta informação, a função de transferência obtida é uma constante que representa o ganho.

$$Gv(s) = 8,3 \cdot 10^{-9}$$

3.4.4 Função de transferência do sensor medidor

Segundo o fabricante, o sensor com modelo PH-4502C foi desenvolvido para ser compatível com microcontroladores, possui comportamento de sistema de primeira ordem com ganho unitário e tempo de resposta de 5s. Então, a função de transferência deste elemento é apresentada na seguinte expressão, novamente utilizando o critério de que o tempo de acomodação é 4 vezes a constante de tempo do sistema.

$$G(s) = \frac{1}{1.25s + 1}$$

4. Capítulo 4 Obtenção dos controladores

4.1 Introdução

O modo de continuamente manter certas variáveis de um processo nos valores desejados, sem ação humana direta, e chamada controle automático. Todo sistema de controle tem uma variável controlada, que é medida via sensor-transmissor, uma variável manipulada, sobre a qual se atua por médio de elemento final de controle, além do controlador. Na figura 4.1 é possível apreciar um diagrama básico de um sistema de controle (GARCÍA, 2017).

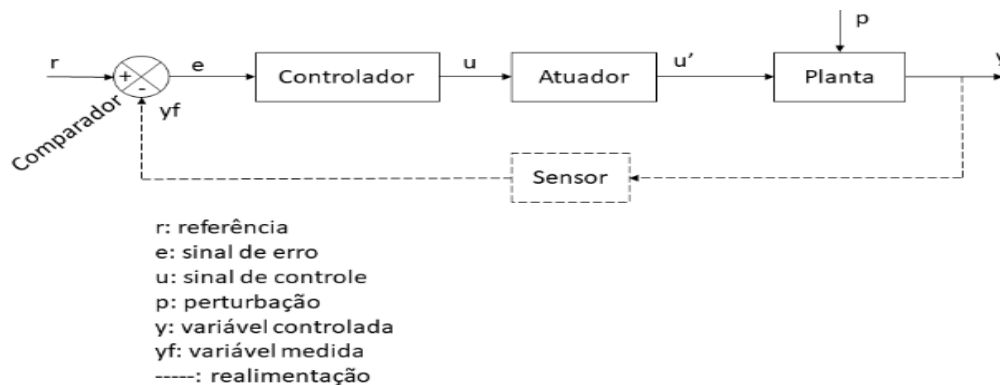


Figura 4.1 - Diagrama geral de um sistema de controle
Fonte: GARCÍA, 2017; OGATA, 2010

A função de controlador além de manter a variável controlada no valor desejado, ou próximo a este, tem como objetivo que o sistema em malha fechada tenha certas características de resposta transitória e estacionária. Algumas dessas características são (OGATA, 2010):

Sobressinal:

$$Mp(\%) = \frac{y(tp) - y(\infty)}{y(\infty)} = e^{-\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)} \quad (4.1)$$

Tempo de subida:

$$Tr = \frac{\pi - \theta}{\omega d} \quad (4.2)$$

Tempo de acomodação:

$$Ts(2\%) = \frac{4}{\zeta \omega d} \quad Ts(5\%) = \frac{3}{\zeta \omega d} \quad (4.3)$$

Erro de estado estacionário:

$$E_{ee} = \frac{y(\infty) - y_e}{y(\infty)} \quad (4.4)$$

Sendo y a saída de sistema, ζ o fator de amortecimento, ωd a frequência amortecida do sistema e y_e o valor que se deseja que tenha o sistema.

4.2 Controle de nível

Dependendo do volume de água com o qual o recipiente de armazenamento foi preenchido, será o volume da solução A e B que precisa ser adicionado à solução nutritiva. Quando esse volume é conhecido, é muito fácil colocar um ponto de referência que represente o valor para o qual precisamos que o nível de líquido no recipiente caia. Então, para o projeto deste controle, se escolha um controlador on-off, que é o modo mais simples de controle não linear. Neste caso, a saída do controlador pode assumir apenas dois estados, ligado ou desligado e muda toda vez que a variável controlada cruza o valor desejado como se vê na figura 4.2. A função do controlador on-off é abrir a válvula quando necessário e fechá-la quando atingir o valor do ponto de ajuste. No fluxograma da Figura 4.3 pode ser visto o procedimento a seguir depois que o nível do tanque armazenador de solução nutritiva atingiu o valor mínimo (GARCÍA, 2017).

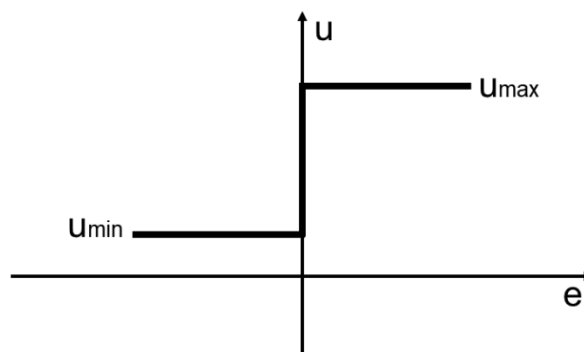


Figura 4.2 - Saída de controlador do tipo on-off
Fonte: GARCÍA, 2017

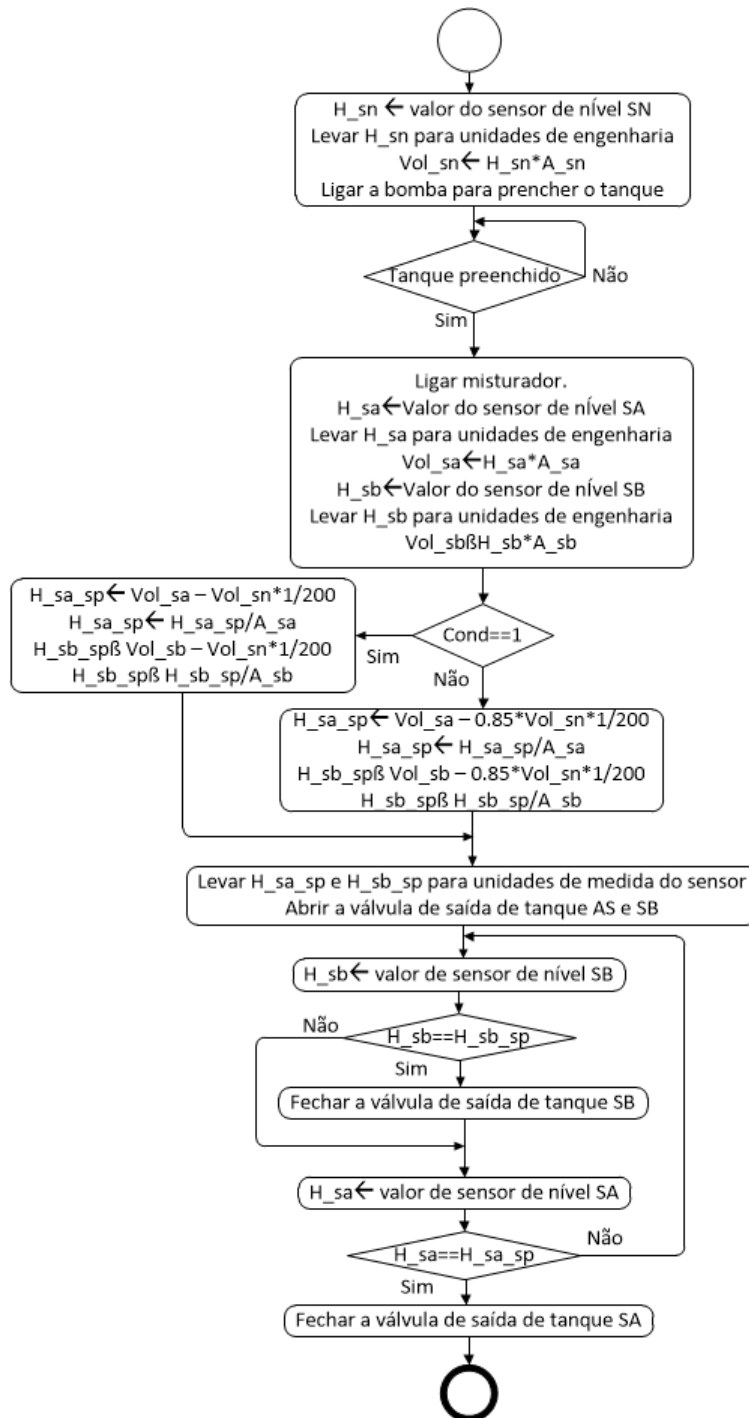


Figura 4.3 - Diagrama de fluxo

É necessário lembrar que o misturador é simplesmente a combinação de fechar completamente a válvula de controle de fluxo da solução nutritiva e ligar a bomba submersa, e que esse mecanismo funciona o tempo todo durante o qual as soluções A e B são adicionadas e o pH é regulado.

Com a expressão 3.1, é conhecida a dinâmica do comportamento do nível dentro do recipiente quando a válvula é aberta, uma vez que a vazão é constante. Para as soluções A e B, esses comportamentos podem ser vistos nas Figuras 4.4 a) e 4.4 b),

respectivamente. Nestas, uma simulação de como o ponto de ajuste varia e como o nível diminui enquanto a válvula está aberta.

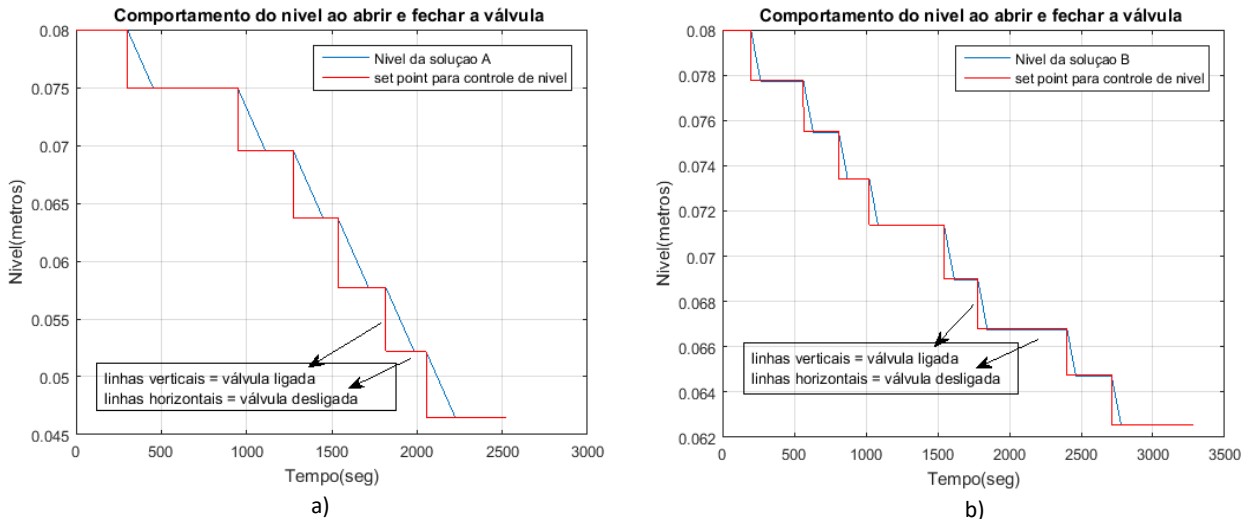


Figura 4.4 - Simulação da dinâmica da variável nível para a abertura e fechamento da válvula

No caso da solução B a diminuição é menor porque a proporção da solução B e o volume de água é menor do que no caso da solução A.

4.3 Controle de vazão

Para que os cultivos sejam capazes de absorver os sais minerais da solução nutritiva e suas raízes não sejam prejudicadas, a velocidade de fluxo dentro dos canais pode variar entre 2 e 3 L/min. O modelo matemático que simula a dinâmica do sistema é já conhecido.

Ao analisar o Diagrama de Bode e o lugar geométrico das raízes deste modelo, pode-se observar que o sistema é estável, mas não atinge os valores necessários. Não possui margem de ganho nem margem de fase finito. Ao observar a resposta do sistema no item b da Figura 4.5, pode-se apreciar que o sistema é autorregulado, o que permite o uso do método da curva de reação do processo para projetar do controlador (GARCÍA, 2017).

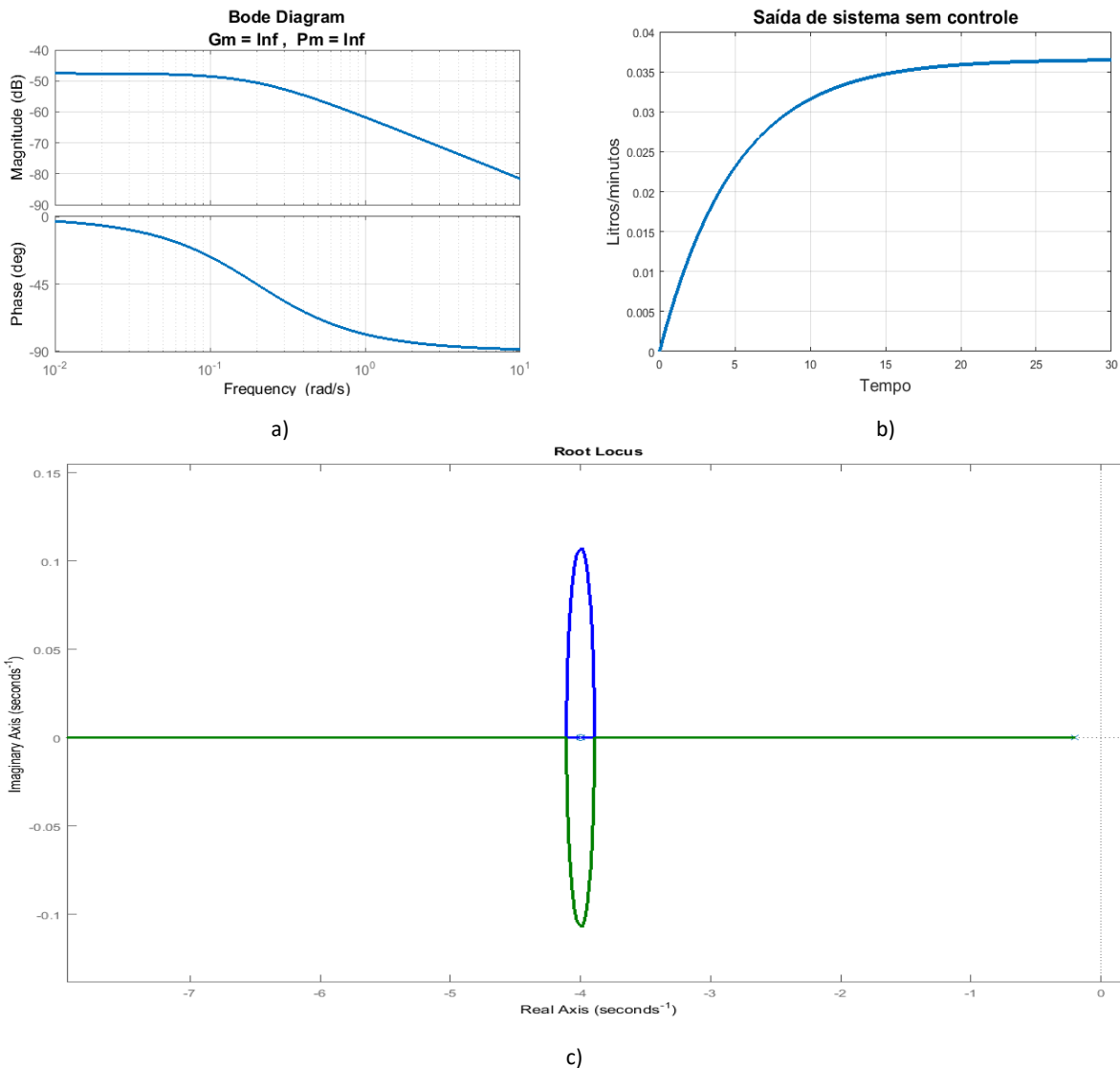


Figura 4.5 - Análise da dinâmica do processo de fluxo da solução nutritiva. a) Diagrama de Bode, b) Resposta a um degrau na entrada c) Lugar geométrico das raízes.

É desejável que a resposta do sistema tenha uma porcentagem de sobressinal menor que 30%, um tempo de acomodação menor que 5 segundos e um erro de estado estacionário máximo de 2%.

4.3.1 Compensador de Fase

O compensador de avanço de fase serve basicamente para aumentar o ganho em altas frequências da planta em malha aberta, podendo ao mesmo tempo melhorar a sua margem de fase. Uma vez que se feche a malha isso tem por efeito uma melhor resposta transitória do sistema, com pouca influência na situação de regime permanente. A estrutura de um compensador é observada na expressão 4.5, na qual $\alpha > 1$.

$$G_c(s) = \frac{K_{oc}(1 + s\alpha T_c)}{1 + sT_c} \quad (4.5)$$

O projeto de compensador de fase consiste na escolha adequada de valores de K_{oc} , α e T_c de forma que a resposta do sistema em malha fechada atenda certas especificações de desempenho (GARCÍA, 2017).

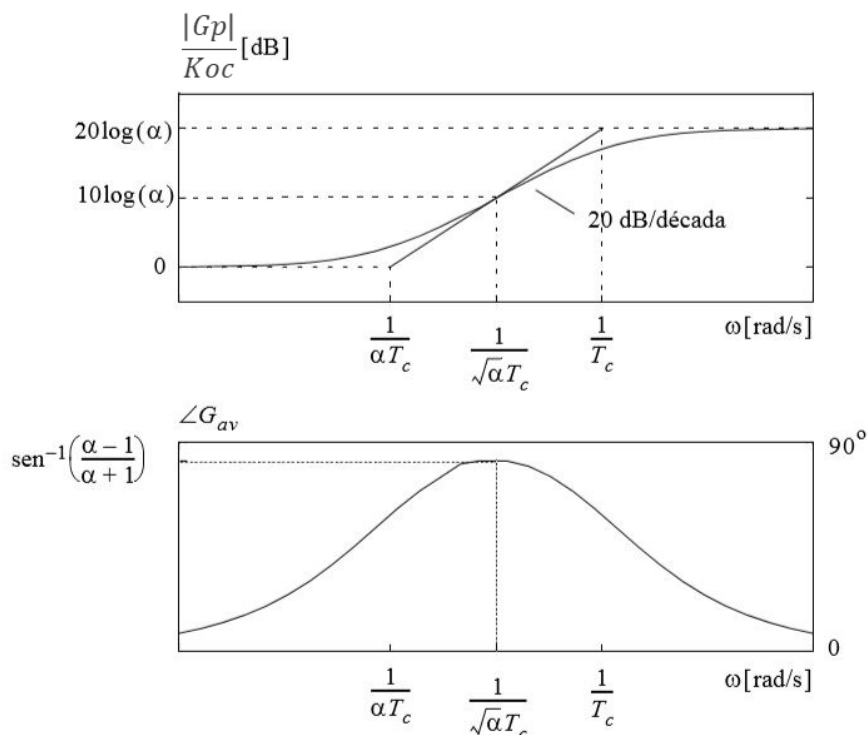


Figura 4.6 - Resposta em frequência de um compensador por avanço de fase.
Fonte: GARCÍA, 2017.

Utilizando o software MatLab, calcula-se a função de transferência resultante da colocação em série das expressões do atuador (seção 3.3.2), da planta (3.3.1) e do sensor (3.3.3) que descrevem o sistema de fluxo; e quando o compensador é associado em série com esta nova planta obtida, a função de transferência em malha aberta é a representada na expressão 4.6.

$$G_c(s)G_f(s) = \frac{K_{oc}(1+s\alpha T_c)}{1+sT_c} \frac{0.01484}{1.273 s^2 + 5.343 s + 1} \quad (4.6)$$

Então escolhendo adequadamente os valores de α e T_c e possível cancelar um dos polos da planta de modo que se tenha:

$$G_c(s)G_f(s) = \frac{K_{oc}}{1+sT_c} \frac{0.01484}{ps + 1} \quad (4.7)$$

Com esse compensador, a dinâmica de malha aberta passa a depender do valor de T_c , e a função de transferência é uma função de segunda ordem do jeito da expressão 4.8. Onde a adição de T_c e p tem como resultado $2\zeta\omega_n$ (CASTRUCCI e BITTAR, 2011).

$$G_c(s)G_f(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (4.8)$$

Já é previamente conhecido o comportamento desejado na resposta da planta, portanto com esta informação e as expressões matemáticas (4.1 até 4.4) oferecidas na introdução do capítulo e possível fazer os cálculos necessários para obter o valor do fator de amortecimento assim como da frequência natural do sistema, ω_n , e com eles obter depois os valores apropriados para T_c , K_{oc} e também α . Novamente, utilizando as ferramentas oferecidas pelo MatLab calculamos cada um dos valores necessários sendo obtida a função de transferência seguinte e a resposta de tempo do sistema pode ser observada na figura 4.7, este gráfica tem uma sobressinal de 19,23% e um erro de estado estacionário de 1.73%.

$$G(s) = \frac{687.3(1+4.00s)}{(1+2.3931 s)}$$

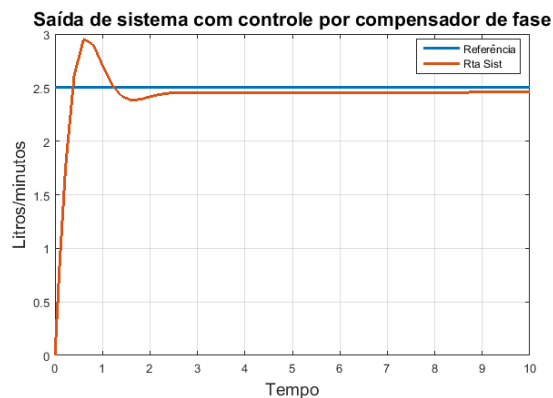


Figura 4.7 - Resposta do sistema com o compensador de avanço de fase

4.3.2 Controle PID

Com o uso de nova tecnologia digital de ponta continua a busca de novas técnicas de controle, mas em processos industriais o algoritmo de controle mais usado é o PID (proporcional, integral, derivativo). Isso se deve a sua fácil implementação, que junto com sua versatilidade oferece resultados muito satisfatórios, mesmo com variações apreciáveis nas características de processos e nos distúrbios. A atuação que tem em relação ao erro $e(t)$ é da seguinte jeito:

- O ganho K_c (modo proporcional) afeta o sinal de saída do controlador $u(t)$ de modo que seja proporcional ao erro.
- O parâmetro T_i (modo integral) afeta proporcionalmente à velocidade de $\frac{du(t)}{dt}$ para que seja proporcional ao erro.
- O parâmetro T_d (modo derivativo) afeta a amplitude do sinal $u(t)$ para que seja proporcional à velocidade de $\frac{de(t)}{dt}$.

As principais vantagens do controlador PID são que não requer um conhecimento profundo da planta, pois um modelo aproximado já é suficiente no projeto de sistema de controle; além disso é um algoritmo de controle universal baseado na realimentação, é versátil e robusto. O controle PID não tem um desempenho satisfatório para processo com constante de tempo muito grandes ou com atrasos puros longos. O modelo de planta de vazão não tem nenhuma das últimas condições, portanto é possível projetar um controle PID para obter uma resposta satisfatória (OGATA, 2010) (GARCÍA, 2017) (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 2009).

A expressões que modelam o algoritmo de controle são as 4.9 e 4.10, a primeira no domínio do tempo e a segunda no domínio da frequência.

$$u(t) = K_c(e(t) + T_i \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.9)$$

$$U(s) = K_c(e(s) + \frac{1}{T_i s} + T_d \frac{Ns}{s+N}) \quad (4.10)$$

4.3.3 Método da Curva de Reação do processo.

Este método é baseado em um único teste experimental com o sistema em malha aberta e o processo em equilíbrio. Aplica-se um degrau na entrada de atuador e a resposta, curva de reação do processo, é registrada. Dois parâmetros representam a resposta do processo: S que é a inclinação da tangente no ponto de inflexão da curva, e θ o tempo morto.

Para não precisar traçar a tangente a curva, aproxima-se essa curva por um sistema de primeira ordem com tempo morto com uma função de transferência como a expressão 4.11 (GARCÍA, 2017).

$$Gv(s) = \frac{Ke^{\theta s}}{Ts + 1} \quad (4.11)$$

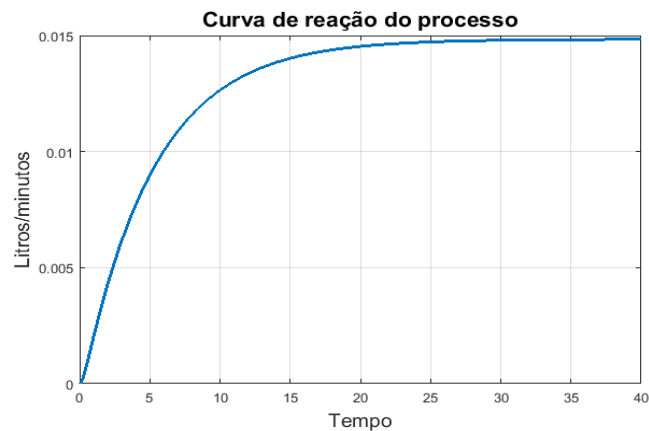


Figura 4.8 - Curva de reação do processo em malha aberta

Utilizando recursos do Matlab como o Simulink, obtém-se como resposta a curva da figura 4.8, e com ela também uma tabela de amostras das leituras dos valores da curva, que são utilizadas para calcular os valores de K , θ e T com um simples script. Tendo K com um valor de 0,01478, θ é 0.8 e T tem um valor de 18.82. Com estes números são calculados os parâmetros dos controladores usando as tabelas de 4-1 até a 4-4 (GARCÍA, 2017).

Tabela 4-1- Parâmetros de sintonia pelo método de Curva de Reação de Ziegler e Nichols
Fonte: GARCÍA,2017.

Tipo de controlador	Kc	Ti	Td
P	$\frac{T}{K\theta}$		
PI	$\frac{0,9T}{K\theta}$	$\frac{10\theta}{3}$	
PID	$\frac{1,2T}{K\theta}$	2θ	$\frac{\theta}{2}$

Tabela 4-2 - Parâmetros de sintonia pelo método de Curva de Reação de CHR
 Fonte: GARCÍA,2017.

Tipo de controlador	Kc	Ti	Td
P	$\frac{0,3T}{K\theta}$		
PI	$\frac{0,35T}{K\theta}$	1.16T	
PID	$\frac{0.6T}{K\theta}$	T	$\frac{\theta}{2}$

Tabela 4-3 - Parâmetros de sintonia pelo método de Curva de Reação de Cohen-Coon.
 Fonte: GARCÍA,2017.

Tipo de controlador	Kc	Ti	Td
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{T}{\theta} + \frac{1}{3} \right)$		
PI	$\frac{1}{K} \left(\frac{0,9T}{\theta} + \frac{1}{12} \right)$	$3\theta \frac{10 + \frac{\theta}{T}}{9 + \frac{20\theta}{T}}$	
PD	$\frac{1}{K} \left(\frac{1,25T}{\theta} + \frac{1}{6} \right)$		$2\theta \frac{10 - \frac{\theta}{T}}{22 + \frac{3\theta}{T}}$
PID	$\frac{1}{K} \left(\frac{4T}{3\theta} + \frac{1}{4} \right)$	$\theta \frac{32 + \frac{6\theta}{T}}{13 + \frac{8\theta}{T}}$	$\frac{4\theta}{11 + \frac{2\theta}{T}}$

Tabela 4-4 - Parâmetros de sintonia pelo método de Curva de Reação de 3C.
 Fonte: GARCÍA,2017.

Tipo de controlador	Kc	Ti	Td
P	$\frac{1,208}{K} \left(\frac{T}{\theta} \right)^{0,956}$		
PI	$\frac{0,928}{K} \left(\frac{T}{\theta} \right)^{0,946}$	$0,928T \left(\frac{\theta}{T} \right)^{0,956}$	
PID	$\frac{1,370}{K} \left(\frac{T}{\theta} \right)^{0,950}$	$0,740T \left(\frac{\theta}{T} \right)^{0,956}$	$0,365T \left(\frac{\theta}{T} \right)^{0,956}$

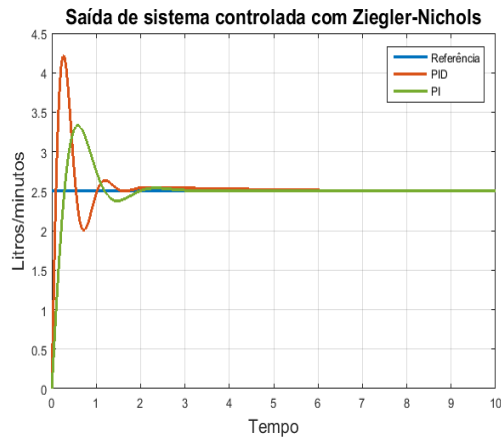
4.3.4 Controladores projetados

São obtidos quatro controladores PI e quatro PID com os parâmetros mostrados na tabela 4-5. E na figura da 4.9 são apreciáveis os gráficos de resposta do sistema a um degrau de amplitude 2.5 na entrada.

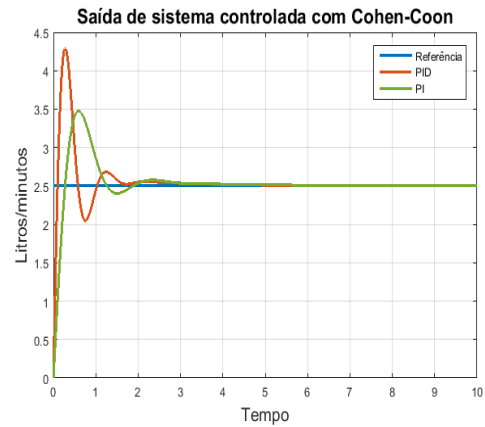
*Tabela 4-5 Parâmetros dos controladores projetados com a Curva de Reação
Fonte: autor*

Controlador	Kc	Ti	Td
PI_ZN	$1.4332 * 10^3$	0.2400	-
PID_ZN	$1.9110 * 10^3$	0.4000	0.4000
PI_CC	$1.4389 * 10^3$	0.4087	
PID_CC	$2.1402 * 10^3$	0.5170	0.2887
PI_CHR	557.3625	0.0458	-
PID_CHR	955.4785	0.0531	0.4000
PI_3C	$1.8630 * 10^3$	0.0091	-
PID_3C	$1.2461 * 10^3$	0.007	138.0620

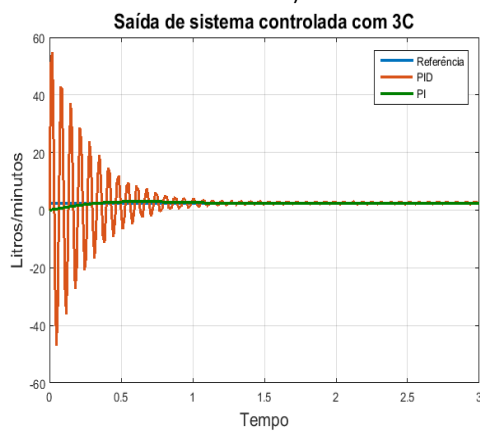
Ao observar a resposta de tempo obtida com os controladores projetados por o método de 3C, é seguro afirmar que estes não oferecem um resultado factível, dado pelo carácter oscilatório da curva de resposta com o PID e pelo erro de estado estacionário pouco satisfatório do PI obtido com o mesmo método.



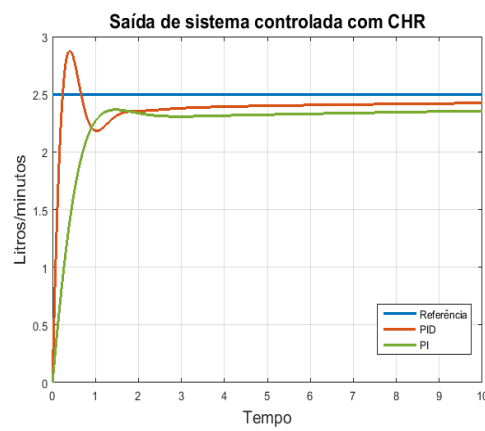
a)



b)

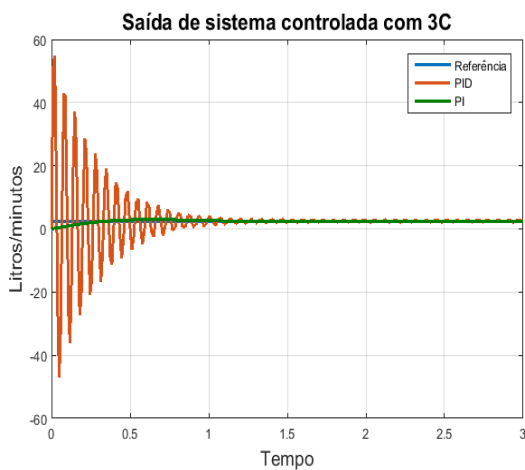


c)

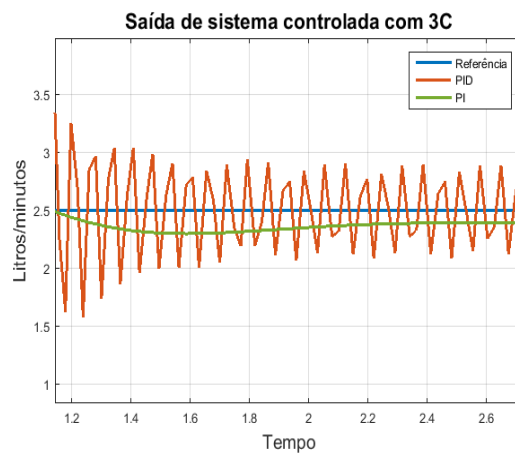


d)

Figura 4.9 - Resposta do sistema com controladores projetados. a) Ziegler e Nichols, b) Cohen-Coon, c) 3C, d) CHR.



a)



b)

Figura 4.10 - Resposta do sistema com controladores projetados com 3C. a) Resposta completa, b) Zoom para erro na resposta.

4.3.5 Análises da resposta de tempo e índices de desempenho

Para avaliar a qualidade dos controladores, o valor da porcentagem de sobressinal, o tempo de acomodação e o erro na resposta são levados em

consideração. Todos esses dados podem ser extraídos dos gráficos anteriores e calculados com as expressões 4.1, 4.3 e 4.4.

Tabela 4-6 - Análise da resposta de tempo do sistema com os diferentes controladores.

Controlador	%Mp	Ts	Erro(%)
PI_ZN	33,24	1,8	0
PID_ZN	68,69	1,5	0
PI_CC	39,05	1,7	0
PID_CC	71,68	1,4	0
PI_CHR	-	1,3	2,48
PID_CHR	16,43	1,7	1,98
Compensador de fase	19,23	2	1,73

Para fazer a melhor seleção entre estas configurações de controle são também analisados dois critérios para avaliar o desempenho, correspondendo estes à maneira como eles respondem a variações no valor desejados ou na carga. O objetivo ao otimizar um controle e diminuir seu valor o mais que seja possível (GARCÍA, 2017).

- ISE - erro quadrático integrado ($\int_0^{\infty} e^2(t)dt$): a elevação ao quadrado evita o cancelamento de um erro positivo e por um negativo e também penaliza mais fortemente os grandes erros.
- ITAE – integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo ($\int_0^{\infty} t|e(t)| dt$): um erro inicial grande é ponderado com pequeno peso, e erros que ocorrem mais tarde são bastante penalizados.

Os resultados obtidos são tabulados, para uma mais fácil interpretação.

Tabela 4-7 - Resultado dos cálculos dos critérios de avaliação do desempenho.

Controlador	ITAE	ISE
PI_ZN	3,0409	18,8538
PID_ZN	2,8454	10,7660
PI_CC	3,8630	19,4628
PID_CC	2,3713	11,2829
PI_CHR	158,9945	39,9318
PID_CHR	79,4676	5,3632
Compensador de fase	43,4142	31,3447

Então depois de fazer a análise das tabelas 4-6 e 4-7, se tem como conclusão que todos aqueles controladores que tem como sobressinal um valor maior que 30% são descartados. Do resto dos controladores, o mais apropriado é o compensador de fase e o PID obtido com CHR. Pois embora as respostas de tempo do sistema têm um erro diferente de 0, este valor é menor que o requerido. Além de isso mostram uma melhor combinação ITAE, ISE, %Mp e Eee.

4.4 Controle de pH

O controle de pH é outra parte importante do sistema de controle de este sistema hidropônico.

Para o controle da variável pH é preciso que os gráficos da resposta de tempo dos dois sistemas tenham um comportamento de um sistema de primer ordem. Pois a variável manipulada é o fluxo de ácido nítrico, e se a resposta de tempo da dinâmica de pH apresenta sobressinal, na realidade não tem como ser diminuída.

A água usada para obter a solução nutritiva precisa ter um valor de pH entre 6 e 6,4. Como este sistema não é rápido, então é desejável que o tempo de acomodação seja menor que 60 segundos e um erro máximo de 1%

Antes de fornecer a solução nutritiva para os cultivos, o pH dela deve ser ajustado para um valor que não afete a qualidade da produção. Neste caso a dinâmica do processo controlado também deve ter um comportamento de um sistema de primer ordem. E é desejável que o tempo de acomodação seja menor que 30 segundos e que tenha um erro máximo de 1%.

Os controladores a serem projetados são um controle PID pelo método de síntese direta ou sintonia lambda; e controle pelo modelo interno. A metodologia utilizada é a descrita nos livros de Claudio García e Katsuhiko Ogata.

4.4.1 Controle por Síntesis Directa.

Primeiramente, modelos aproximados de cada um dos processos são obtidos utilizando Simulink e o método da curva de reação, como feito na seção 4.3.3, e com as funções de transferência obtidas nas seções 3.4.2, 3.4.3 e 3.4.5. Os modelos obtidos são de primeira e segunda ordem sem atraso. E os valores dos parâmetros de um PID para eles são mostrados na Tabela 4-8.

Tabela 4-8 - Ajuste do controlador PID usando método de síntese direta.
 Fonte: GARCÍA,2017

Modelo	Parâmetros do controlador PID		
	Kc	Ti	Td
$\frac{K}{Ts + 1}$	$\frac{T}{K \cdot Tc}$	T	0
$\frac{K}{(T1s + 1)(T2s + 1)}$	$\frac{T1 + T2}{K \cdot Tc}$	$T1 + T2$	$\frac{T1 \cdot T2}{T1 + T2}$

Sendo Tc a constante de tempo desejada para o sistema, neste caso os valores são 60 e 30 segundos respectivamente, conforme declarado no início da seção 4.4. Estes são os tempos calculados para que os demais processos do sistema hidropônico não sejam afetados por uma falha de tempo que pode atrasar ou interromper todo o sistema de fornecimento de solução nutritiva. As Tabelas 4-9 e 4-10 mostram os parâmetros calculados para os dois processos de controle de pH: água tratada e solução nutritiva.

Tabela 4-9 - Parâmetros PID para controle da concentração (pH) da água natural.

Modelos	Kc	Ti	Td
1er ordem	2,8087.1012	8,0	0
2do ordem	5,7051.1012	16,25	1,1538

Tabela 4-10 - Parâmetros PID para controle da concentração (pH) da solução nutritiva.

Modelos	Kc	Ti	Td
1er ordem	1,3107.1012	7,8	0
2do ordem	1,3631.1012	7,5	1.1538

4.4.2 Controle pelo Modelo Interno.

Primeiramente se projeta um controlador pelo modelo interno. O diagrama do IMC é constituído por duas funções de transferência sem incluir o processo real, como mostrado na figura 4.11. Uma das vantagens do IMC está na simplicidade de seu design prático. Partindo do princípio de um modelo do processo $\hat{G}_p(s)$, o primeiro passo consiste em dividir o modelo em dois componentes: o invertível $\hat{G}_p(s)^+$ e o não-invertível $\hat{G}_p(s)^-$, que contém os termos que investidos trarão problemas de estabilidade ou realização, digamos, termos que eles contêm zeros no semiplano direito, que quando invertidos dão origem a um polo instável e atrasos que, se

invertidos, levam a um avanço que não é realizável (GARCÍA, 2017) (MANFRED e EVANGHELOS, 2007).

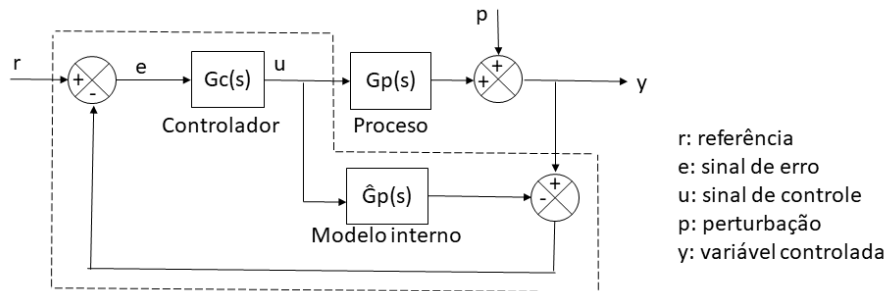


Figura 4.11 - Diagrama em blocos do controlador pelo modelo interno
 Fonte: GARCIA, 2017

O controlador seria igual ao inverso da parte invertível. Para melhorar a robustez do sistema de controle, é necessário mitigar os efeitos do uso de um modelo do processo nesse loop. Além disso, um filtro passa-baixos é introduzido para reduzir o efeito das diferenças geradas entre a resposta do modelo e o processo real em altas frequências. Dessa maneira, o controlador IMC é projetado como o inverso do modelo serial com um filtro passa-baixos.

O diagrama geral do IMC pode ser reduzido à clássica estrutura de controle de retroalimentação com um PID. No caso de que a parte não invertível tenha um término de atraso, é possível usar dois métodos para sua aproximação (GARCÍA, 2017):

- Aproximação por series de Taylor: o término de atraso é aproximado por

$$e^{-\theta s} \approx 1 - \theta s \quad (4.12)$$

- Aproximação de Pade: o término de atraso é aproximado por

$$e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} \quad (4.13)$$

Não necessariamente o método IMC gera um PID. Mas se o processo é de primer a segunda ordem, o filtro passa-baixos será de primer ordem e é possível obter os parâmetros de PID de um jeito muito simples com ajuda de uma tabela que oferece expressões matemáticas para o cálculo dos parâmetros. Só é preciso conhecer a estrutura do modelo interno a ser usado. Neste caso os modelos internos usados são funções de transferência de primer ordem sem atraso.

Na tabela 4-11 é mostrada ditas expressões. E aqui a seleção do novo parâmetro, T_c , é essencial. Em geral um aumento de seu valor produz um controlador mais conservativo pois K_c diminui e T_i aumenta, como pode ser analisado na tabela. Para

um sistema de primeira ordem com atraso diversas recomendações foram publicadas, por exemplo:

- $T_c/\theta > 0,8$ e $T_c > T/10$. Rivera-Morari.
- $T > T_c > \theta$. Chien-Fruehauf.
- $T_c = \theta$. Skotgestad

O objetivo é escolher um valor de T_c que atenda a qualquer uma das 3 condições anteriores sendo T e θ , os parâmetros da função de transferência da planta real, não os do modelo interno usado (GARCÍA, 2017).

Tabela 4-11 - Sintonia de controlador PID pelo método IMC para o modelo de primer ordem com atraso.
Fonte: GARCÍA,2017

Modelo \hat{G}_p	K_c	T_i	T_d
$\hat{G}_p(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{T s + 1} \quad e^{-\theta s} \approx 1 - \theta s$	$\frac{T}{K(T_c + \theta)}$	T	0
$\hat{G}_p(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{T s + 1} \quad e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s}$	$\frac{1}{K} \frac{2T + \theta}{2T_c + \theta}$	$T + \frac{\theta}{2}$	$\frac{T\theta}{2T + \theta}$

Para o modelo interno em ambos processos, controle da concentração (pH) da água natural e controle da concentração (pH) da solução nutritiva, é usado o modelo de primeira ordem sem atraso de transporte, obtido pelo método da curva de reação na seção 4.4.1. Os controles obtidos são as funções inversas dos modelos. Além disso, um filtro passa-baixos é introduzido para reduzir o efeito das diferenças geradas entre a resposta do modelo e o processo real em altas frequências, o filtro precisa ser no mínimo de segunda ordem pois o sistema original tem dois polos (Garcia, 2017). Então os controladores obtidos têm as seguintes funções de transferências, Onde T_f é a constante de tempo desejada para cada processo. Sendo 4.14 a função do controlador para a água tratada, e 4.15 a expressão para o controle de pH do tanque coletor de solução nutritiva:

$$G_{c1}(s) = \frac{8s + 1}{4,74 \cdot 10^{12} (T_f s + 1)^2} \quad (4.14)$$

$$G_{c2}(s) = \frac{7.8s + 1}{1,91 \cdot 10^{13} (T_f s + 1)^2} \quad (4.15)$$

4.4.3 Comparação entre controladores

Para fazer a melhor seleção entre estas configurações de controle são analisados o erro de estado estacionário, Eee, e dois critérios para avaliar o desempenho, o erro quadrático integral, ISE, e a integral do erro absoluto multiplicado pelo tempo, ITAE (GARCIA, 2017)

Tabela 4-12 - Comparação dos controladores para o controle de pH da água tratada
Fonte: Autor

Controlador	Eee (%)	ISE	ITAE
PID sínteses direta 1ra ordem	26	$1,64 \cdot 10^{-10}$	0,0329
PID sínteses direta 2da ordem	14	$1,03 \cdot 10^{-10}$	0,0257
IMC	0.01	$7,99 \cdot 10^{-11}$	0,0164

Tabela 4-13 - Comparação dos controladores para o controle de pH da solução nutritiva
Fonte: Autor

Controlador	Eee (%)	ISE	ITAE
PID sínteses direta 1ra ordem	26	$1,55 \cdot 10^{-10}$	0,0322
PID sínteses direta 2da ordem	23	$1,59 \cdot 10^{-10}$	0,0325
IMC	0,05	$1,48 \cdot 10^{-10}$	0,0297

Levando em consideração o valor do estado estacionário para cada um dos controladores em cada processo, podemos observar que a melhor opção para ambos os casos é o controlador projetado pelo método IMC. Acrescentando que os valores do ISE e do ITAE também reforçam a seleção feita

Para obter melhores respostas dos sistemas, vários testes são realizados alterando o valor de T_f diminuindo seu valor para obter um menor tempo de acomodação. As tabelas 4-14 e 4-15 apresentam os resultados obtidos para diferentes valores.

Tabela 4-14 - Tempo de acomodação para diferentes valores de Tf no controle de pH da água tratada.

Tf	60	50	40	30	20
Ts(s)	58	49.7	40.6	33.5	28

Para este processo a melhor resposta é obtida para um Tf de valor 20, pois esta curva tem o menor tempo de acomodação.

Tabela 4-15 - Tempo de acomodação para diferentes valores de Tf no controle de pH da solução nutritiva.

Tf	30	25	20	15	10
Ts(s)	29.2	24.7	19.8	17.3	15

Como foi mencionado desde o início os dois processos são muito similares e só diferem em pequenos dados então como deve ser lógico aqui também ficou melhor a resposta com o menor Tf, neste caso 10, pois esta curva também tem o menor tempo de acomodação.

5. Capítulo 5 Discretização dos controladores

5.1 Introdução

Nos sistemas de controle atuais, o controlador é geralmente um elemento digital. Isto implica que as leis de controle sejam implementadas através de software ou linguagem de máquina, onde as ações a serem executadas em um sistema sob controle funcionam em tempo discreto.

A discretização é o processo de transformações de funções contínuas, modelos, variáveis e equações de tempo contínuo em tempo discreto. Além de isso para obter resultados satisfatórios e preciso também aplicar corretamente o teorema de amostragem ou também conhecido simplesmente como teorema de Nyquist, que é enunciado da seguinte forma: o tempo de amostragem deve ser duas vezes menor que a menor constante de tempo do sistema que será amostrado.

Para realizar a discretização é preciso aplicar uma transformação do domínio de S , tempo contínuo, ao domínio de Z , tempo discreto. Para isso é usada a seguinte expressão

$$Z\{x[kT]\} = X(z) = \sum_{-\infty}^{+\infty} x[kT]z^{-n} \quad (5.1)$$

A transformada definida pela equação anterior é chamada unilateral, pois considera-se que apenas $x(kT)$ é definido para $k \geq 0$; para o caso definido a partir de $-\infty$. A transformada de aplicação a sistemas de tempo discreto tem uma grande analogia com a transformada de Laplace de aplicação a sistemas de tempo contínuo.

Tendo em conta a correspondência entre sistemas contínuos e discretos, as mesmas metodologias que se aplicam aos sistemas de tempo contínuo podem ser propostas para estes. Em concreto:

- O conceito de função de transferência discreta por analogia com a função de transferência contínua
- A solução de equações de diferença por analogia com a solução de equações diferenciais
- Obter a função de transferência discreta do modelo de estado discreto simplesmente alterando s para z .

Em virtude do exposto, a função de transferência de um sistema linear e invariante em tempo discreto é definida como a relação entre a transformada da variável de saída e a transformada da variável de entrada, assumindo que todas as condições iniciais são igualadas.

Existem métodos simples que permitem obter a transformada Z de uma função de tempo contínuo e é obtida pela substituição de s da função de transferência por estas possíveis aproximações (OGATA, 1995):

Tabela 5-1 - Métodos para transformar do domínio "s" a "z"
Fonte: OGATA, 1995

Método	Aproximações
Forward	$s = \frac{z - 1}{T_s}$
Backward	$s = \frac{z - 1}{T_s \cdot z}$
Trapezoidal	$s = \frac{2(z - 1)}{T_s(z + 1)}$

O método forward, também conhecido como método forward Euler, é uma técnica de discretização que usa o valor atual da função para aproximar o próximo valor. Este método é simples, mas pode ser instável para certos tipos de sistemas.

O método backward, também conhecido como método de Euler reverso, usa o valor futuro da função para aproximar o valor atual. Este método é mais estável que o método direto.

O método trapezoidal, também conhecido como Regra do Trapézio, utiliza a média das inclinações atuais e futuras para aproximar a função. É um método implícito que combina as vantagens dos métodos forward e backward.

Voltando à ideia de selecionar um tempo de amostragem, também é essencial considerar os requisitos de desempenho do sistema, limitações de hardware, custo e eficiência energética, tempo de execução de cada etapa e de todo o processo, para garantir um projeto de controle eficaz e eficiente.

5.2 Controle de pH

Levando em consideração a constante de tempo do sistema para o Teorema de Nyquist, e a experiência pessoal e de outros especialistas que já trabalharam com controle da variável pH em processos semelhantes, seleciona-se o valor de 0,5 segundos como período de amostragem. Então fazendo uso de cada um dos, foram obtidas as funções de transferência dos controladores. Nas tabelas 5-2 e 5-3 estão resumidos os resultados obtidos.

Tabela 5-2 - Discretização do controlador de pH da água tratada pelo método IMC

Método	Função
Forward	$\frac{16z - 15}{7,152 \cdot 10^{-11} z^2 - 1,395 \cdot 10^{-10} z + 6,799 \cdot 10^{-11}}$
Backward	$\frac{17z - 16}{7,514 \cdot 10^{-11} z^3 - 1,466 \cdot 10^{-10} z^2 + 7,152 \cdot 10^{-11} z}$
Trapezoidal	$\frac{33z^3 + 35z^2 - 29z - 31}{2,93 \cdot 10^{-10} z^3 - 2,79 \cdot 10^{-10} z^2 - 2,93 \cdot 10^{-10} z + 2,79 \cdot 10^{-10}}$

Tabela 5-3 - Discretização do controlador de pH da solução nutritiva pelo método IMC

Método	Função
Forward	$\frac{15,6z - 14,6}{7,6 \cdot 10^{-11} z^2 - 1,444 \cdot 10^{-10} z + 6,859 \cdot 10^{-11}}$
Backward	$\frac{8,3z - 7,8}{4,189 \cdot 10^{-11} z^2 - 7,98 \cdot 10^{-11} z^2 + 3,8 \cdot 10^{-11} z}$
Trapezoidal	$\frac{32,2z^3 + 34,2z^2 - 28,2z - 30,2}{2,93 \cdot 10^{-10} z^3 - 2,88 \cdot 10^{-10} z^2 - 3,19 \cdot 10^{-10} z + 2,89 \cdot 10^{-10}}$

Também são discretizados os modelos internos usados no IMC. Os resultados são apresentados nas tabelas 5-4 e 5-5.

Tabela 5-4 - Discretização do modelo interno do IMC para controle de pH da água tratada

Método	Função
Forward	$\frac{4,47 \cdot 10^{-14}}{16z - 15}$
Backward	$\frac{4,47 \cdot 10^{-14}z}{17z - 16}$
Trapezoidal	$\frac{4,47 \cdot 10^{-14}z - 4,47 \cdot 10^{-14}}{33z - 31}$

Tabela 5-5 - Discretização do modelo interno do IMC para controle de pH da solução nutritiva

Método	Função
Forward	$\frac{1,90 \cdot 10^{-13}}{15,6z - 14,6}$
Backward	$\frac{9,5 \cdot 10^{-14}z}{8,3z - 7,8}$
Trapezoidal	$\frac{1,90 \cdot 10^{-13}z - 1,90 \cdot 10^{-13}}{32,2z - 30,2}$

Quando são simuladas as respostas dos sistemas no caso do controle de pH para água tratada no método Backward o resultado obtido não foi satisfatório, pelo que não vai ser analisado. Para os outros dois métodos as curvas de respostas obtidas são apresentadas na figura 5.1. É possível apreciar que a melhor dinâmica é aquela obtida pelo método Forward, pois a o erro é menor.

No controle de pH para a solução nutritiva foi o método Trapezoidal o que deu uma resposta muito deferente da desejada, motivo pelo que não vai ser analisado. Para os outros dois métodos as curvas de respostas obtidas são apresentadas na figura 5.2. É possível apreciar que a melhor dinâmica novamente é aquela obtida pelo método Forward, pois a o erro neste caso é mais próximo a 0.

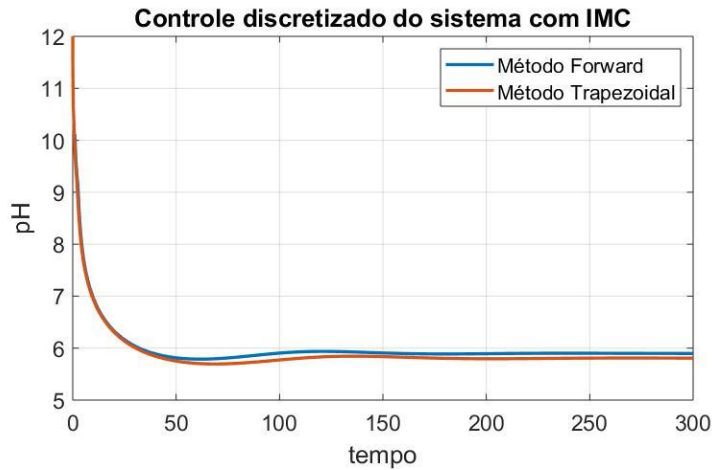


Figura 5.1 - Comparação das respostas do sistema de controle de pH da água tratada discretizado com diferentes métodos.

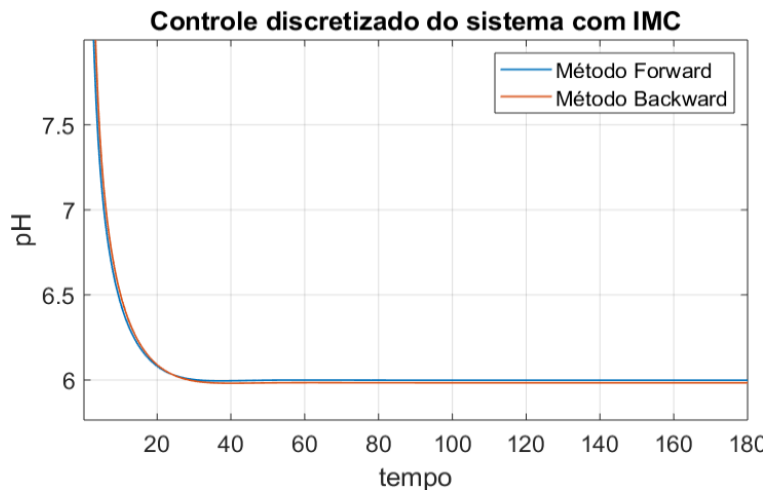


Figura 5.2 - Comparação das respostas do sistema de controle de pH da solução nutritiva discretizado com diferentes métodos

Conhecendo as funções de transferência em tempo discreto é possível obter as equações diferenciais de cada uma, e com estas obter um pseudocódigo que permitirá futuramente programar um microcontrolador para que o controle do pH possa ser realizado em um dispositivo digital programável.

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{16z - 15}{7,152 \cdot 10^{-11} z^2 - 1,395 \cdot 10^{-10} z + 6,799 \cdot 10^{-11}} \quad (5.2)$$

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{15,6z - 14,6}{7,6 \cdot 10^{-11} z^2 - 1,444 \cdot 10^{-10} z + 6,859 \cdot 10^{-11}} \quad (5.3)$$

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{4,47 \cdot 10^{-14}}{16z - 15} \quad (5.4)$$

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{1,90 \cdot 10^{-13}}{15,6z - 14,6} \quad (5.5)$$

As expressões 5.2 e 5.3 descrevem as funções de transferência dos controladores de pH para a água tratada e a solução nutritiva, respectivamente. E as expressões 5.4 e 5.5 são as dos modelos internos obtidos em cada caso. Primeiramente, as expressões são ajustadas para que os expoentes de z sejam negativos, obtendo-se expressões de 5.6 a 5.9.

$$U(z)[7,152 \cdot 10^{-11} - 1,395 \cdot 10^{-10}z^{-1} + 6,799 \cdot 10^{-11}z^{-2}] = E(z)[16 - 15z^{-1}] \quad (5.6)$$

$$U(z)[7,6 \cdot 10^{-11} - 1,444 \cdot 10^{-10}z^{-1} + 6,859 \cdot 10^{-11}z^{-2}] = E(z)[15,6 - 14,6z^{-1}] \quad (5.7)$$

$$Y(z)[16 - 15z^{-1}] = U(z)[4,47 \cdot 10^{-14}] \quad (5.8)$$

$$Y(z)[15,6 - 14,6z^{-1}] = U(z)[1,90 \cdot 10^{-13}] \quad (5.9)$$

Agora é necessário calcular U(z) nas expressões 5.6 e 5.7, e Y(z) nas expressões 5.8 e 5.9, e depois transformar para o domínio do tempo contínuo. Os resultados são apresentados nas expressões de 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13.

$$u(n) = 2,23 \cdot 10^{11}e(n) - 2,09 \cdot 10^{11}e(n-1) + 1,95u(n-1) - 0,95u(n-2) \quad (5.10)$$

$$u(n) = 2,05 \cdot 10^{11}e(n) - 1,92 \cdot 10^{11}e(n-1) + 1,9u(n-1) - 0,90u(n-2) \quad (5.11)$$

$$y(n) = 2,79 \cdot 10^{-15}u(n) - 0,938y(n-1) \quad (5.12)$$

$$y(n) = 1,21 \cdot 10^{-14}u(n) - 0,93y(n-1) \quad (5.13)$$

Os pseudocódigos que traduzem as expressões acima para uma linguagem mais lógica são

Para controle de pH da água tratada

Variáveis:

Entrada: e=0

Auxiliar: e_1=0; u_1=0; u_2=0; y_1=0

Saídas: u; y

$$u = 2,23 \cdot 10^{11}e - 2,09 \cdot 10^{11}e_1 + 1,95u_1 - 0,95u_2;$$

$$u_2 = u_1;$$

$$u_1 = u;$$

$$e_1 = e;$$

$$y = 2,79 \cdot 10^{-15}u - 0,938y_1;$$

$$y_1 = y;$$

Para controle de pH da solução nutritiva

Variáveis:

Entrada: $e=0$

Auxiliar: $e_{-1}=0; u_{-1}=0; u_{-2}=0; y_{-1}=0$

Saídas: $u; y$

$$u = 2,05 \cdot 10^{11} e - 1,92 \cdot 10^{11} e_{-1} + 1,9 u_{-1} - 0,90 u_{-2};$$

$$u_{-2} = u_{-1};$$

$$u_{-1} = u;$$

$$e_{-1} = e;$$

$$y = 1,21 \cdot 10^{-14} u - 0,93 y_{-1};$$

$$y_{-1} = y;$$

Sendo 'e' em ambos os casos calculado com a expressão 5.14. Onde pHs é o pH medido pelo sensor e pHr é o valor de pH na referência. Isso porque o modelo matemático obtido na seção 3.4.2 para representar o processo foi determinado com base na concentração de H⁺ e não diretamente na variável pH.

$$e = 10^{-pHr} - 10^{-pHs} \quad (5.14)$$

5.3 Controle de vazão

O valor do tempo de amostragem da variável anterior é repetido, garantindo assim que todo o sistema que será projetado funcione sob os mesmos valores. Agora aplicaríamos os mesmos passos para o compensador de fase projetado na seção 4.3.1 e utilizando as expressões da tabela 5-1 com um tempo de amostragem de 0,5 segundos, obtendo os seguintes controles discretos para cada método do mesmo.

Tabela 5-6. Discretização do compensador de fase para controle a vazão

Método	Função
Forward	$\frac{879.7 z - 78.08}{z - 0.3022}$
Backward	$\frac{687.3 z + 114.3}{z - 0.3022}$
Trapezoidal	$\frac{860.1 z}{z - 0.2513}$

Quando são simuladas as respostas dos sistemas no caso do controle de vazão é possível apreciar que a melhor dinâmica é aquela obtida pelo método Forward, que além de ter um tempo de acomodação melhor, também é um sinal mais estável. Isso pode ser visto na figura 5.3.

Novamente, como conhecemos a função de transferência em tempo discreto, é possível obter a equação de diferenças, e com isso obter um pseudocódigo que

permitirá no futuro programar um microcontrolador para que o controle de vazão possa ser realizado em um dispositivo digital programável. Primeiro, a expressão é ajustada para que os expoentes de z sejam negativos, obtendo-se a expressão 5.15

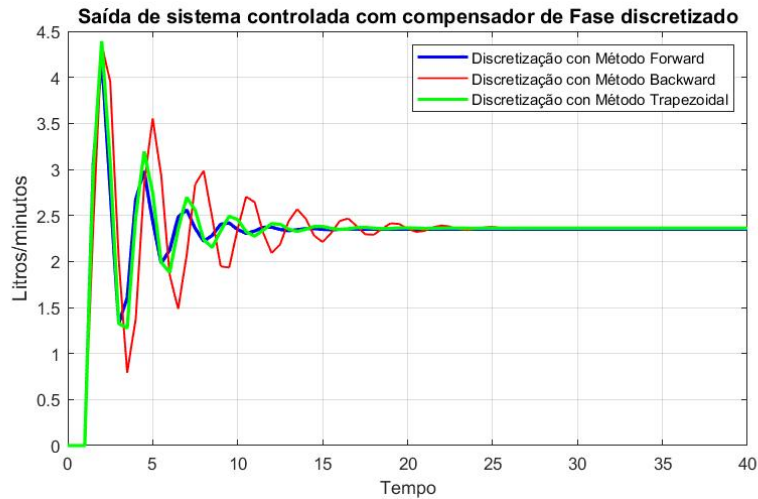


Figura 5.3 - Comparação das respostas do sistema de controle de pH da água tratada discretizado com diferentes métodos

$$\frac{U(z)}{E(z)} = \frac{879.7 - 78.08z^{-1}}{1 - 0.3022z^{-1}} \quad (5.15)$$

Agora é necessário calcular U(z) na expressão 5.16.

$$U(z) = E(z)[879.7 - 78.08z^{-1}] + 0.3022U(z)[z^{-1}] \quad (5.16)$$

Para então transformar para o domínio de tempo contínuo.

$$u(n) = 879.7e(n) - 78.08e(n - 1) + 0.3022u(n - 1) \quad (5.17)$$

O pseudocódigo que traduz a expressão anterior para uma linguagem mais lógica seria

Para controle de vazão

Variáveis:

Entrada: e=0

Auxiliar: e_1=0; u_1=0;

Saídas: u;

*u = 879.7 * e - 78.08 * e_1 + 0.3022 * u_1;*

u_1=u;

e_1=e

Sendo 'e' a diferença entre o valor colocado como referência e o valor medido pelo sensor.

6. Capítulo 6 Programação do Sistema de Controle no Microprocessador.

6.1 Introdução

Tendo as expressões dos controladores em pseudocódigo, o próximo passo seria escolher um microcontrolador para programá-los. No caso deste projeto, foi selecionada a família Arduino.

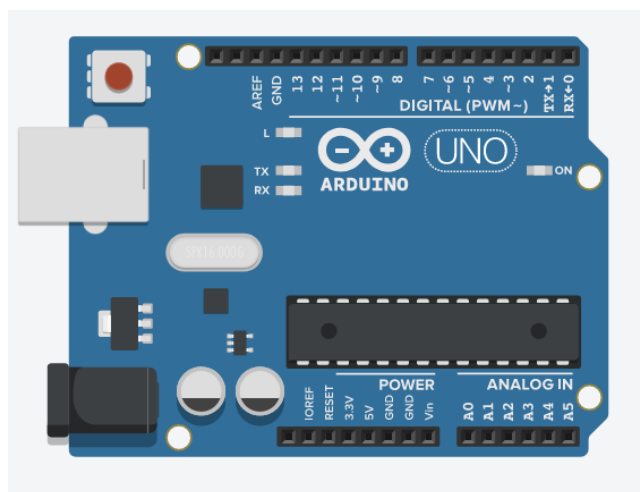


Figura 6.1 - Estrutura de um Arduino UNO.
Fonte: (Arduino - Home, 2022)

Especificamente, o modelo selecionado para a realização dos testes experimentais é o Arduino UNO, cuja estrutura é mostrada na figura 6.1. Esta é uma placa microcontroladora baseada em ATmega328P. Possui 14 pinos de entrada/saída digital (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um ressonador cerâmico de 16 MHz, uma conexão USB, um conector ICSP e um botão de reset. Arduino UNO é a melhor placa para começar em eletrônica e codificação, pela sua simplicidade e facilidade de acesso a tutoriais e programas capazes de simulá-los virtualmente.

Utilizando o programa Proteus para simular o Arduino, cuja função será armazenar as configurações do controlador; o Matlab irá simular o comportamento de cada uma das plantas a serem controladas. E ambos os programas serão comunicados via porta serial virtual.

6.2 Sistema de controle de Vazão

O primeiro passo para programar o controlador de fluxo no microcontrolador Arduino é preparar a porta serial e os dados que ela envia e recebe para que não haja erros na comunicação, neste caso foi configurado para 9600 baud e 8 bits. O projeto da conexão é tão simples quanto o mostrado na figura 6.2. O compensador de fase é programado no microcontrolador utilizando lógica baseada no pseudocódigo obtido no final da seção 5.3.

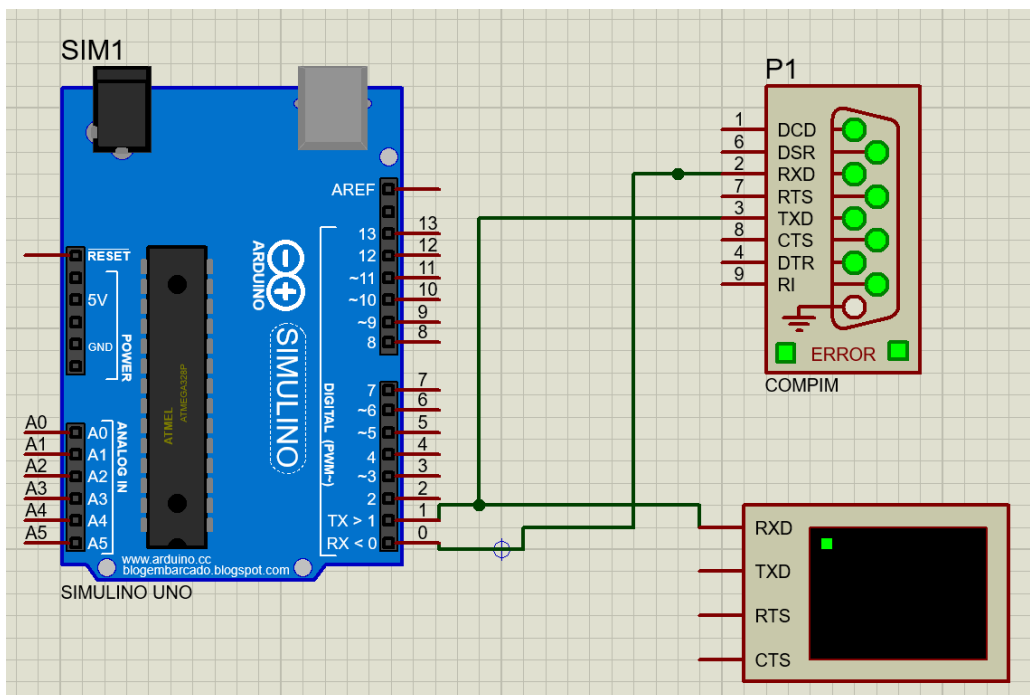


Figura 6.2 - Conexão entre o microcontrolador Arduino e a porta serial simulada no Proteus.

O sistema que descreve o funcionamento da planta de fluxo será executado em Matlab, onde também foi necessário configurar a porta serial com as mesmas características daquela conectada ao microcontrolador. Deixando um sistema como aquele da figura 6.3.

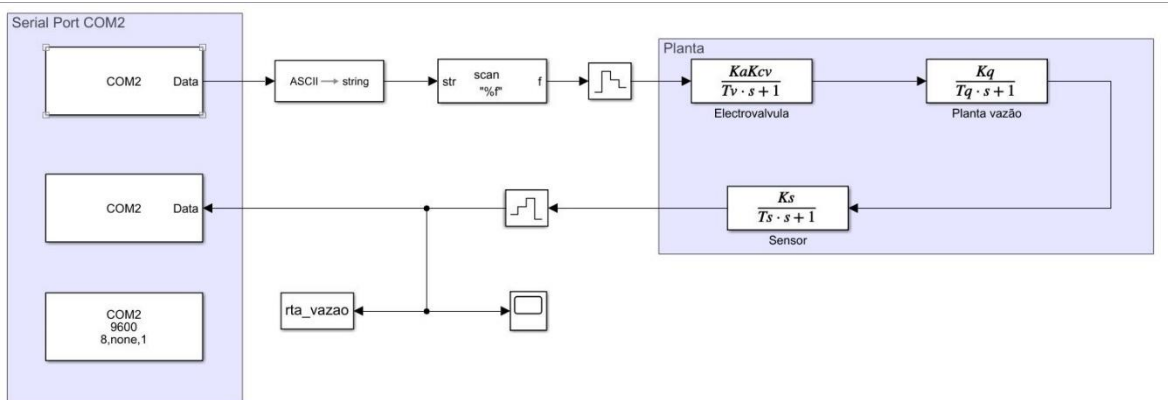


Figura 6.3 - Diagrama de blocos do sistema de fluxo conectado às portas seriais simulando a planta real no Simulink.

Conforme explicado no capítulo 2, a vazão a ser medida no sistema hidropônico é a da rede de distribuição. A solução nutritiva deverá circular pelos canais por aproximadamente 2 a 3 minutos a cada 40 minutos ou 1 hora, ficando a critério do usuário. Em seguida, para verificar o funcionamento do controlador projetado, é simulado um sistema cíclico que emula o comportamento real por 700 segundos, no qual a solução nutritiva fluirá por um tempo equivalente a 2 minutos, a válvula é completamente fechada para evitar a passagem de líquido através dos canais e após um descanso de 3 minutos, a válvula é reaberta.

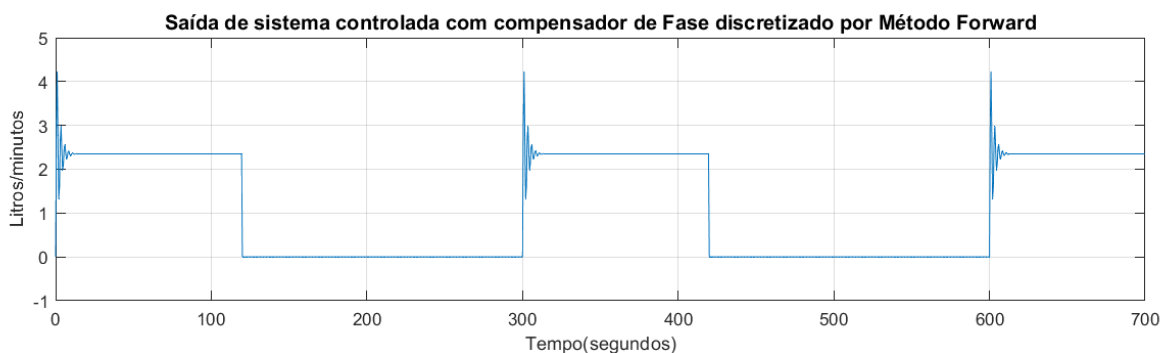


Figura 6.4 - Saída do sistema de vazão com compensador de fase programado no Arduino UNO

O tempo de simulação escolhido permitiu que o controle de vazão fosse executado 3 vezes, obtendo uma resposta favorável em cada ciclo.

6.3 Sistema de controle de pH

Para controle de pH não é feita nenhuma alteração na conexão do microcontrolador, mantendo a estrutura da figura 6.2 e figura 6.3. As alterações realizadas são aquelas para ajustar as funções que simulam a planta e a programação do microcontrolador, para que siga a lógica dos pseudocódigos obtidos na seção 5.2.

Ao executar a simulação para controle da água tratada, obtém-se como resposta a figura 6.5. Onde é possível perceber que o controle consegue estabilizar a variável em menos dos 60 segundos desejados desde o início e em um valor de pH dentro da faixa também desejada entre 6 e 6,4.

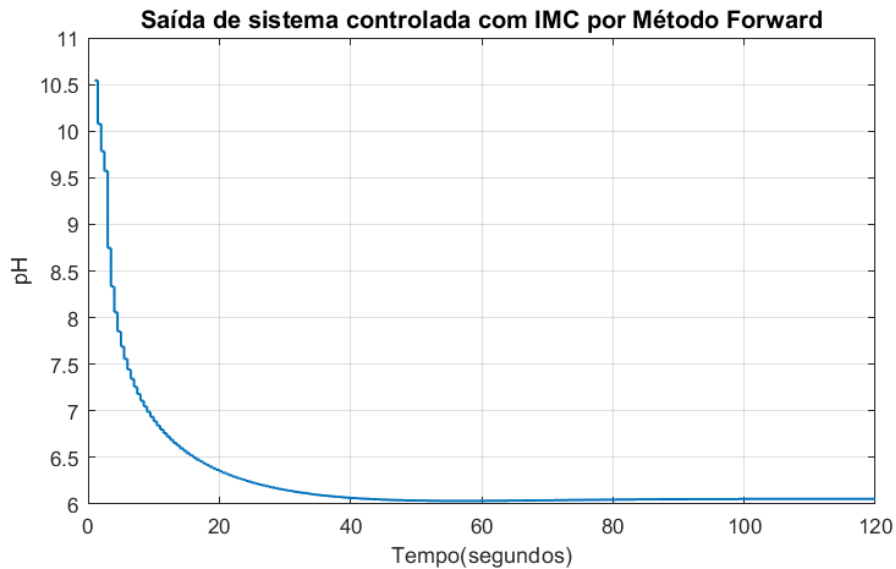


Figura 6.5 - Saída da planta de pH da água tratada, com controle IMC programado no Arduino UNO

É importante lembrar que no caso do controle de pH no microcontrolador, o código não descreve apenas o controlador obtido, mas também inclui o modelo interno.

Para simular o controle do pH na solução nutritiva, são feitas alterações nos valores do diagrama que simula a planta real para ajustá-la aos parâmetros que a descrevem. E a lógica de programação também é alterada para aquela necessária para controlar a variável neste caso. A resposta obtida é mostrada na figura 6.6.

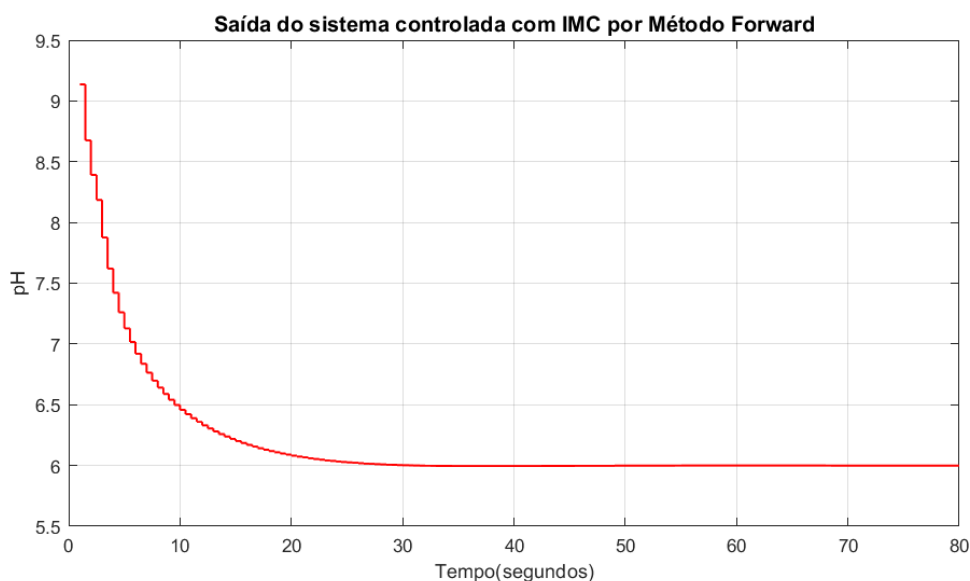


Figura 6.6 - Saída da planta de pH da solução nutritiva, com controle IMC programado no Arduino UNO

Mais uma vez obtivemos uma resposta satisfatória visto que o pH atingiu um valor desejável dentro da faixa de 5,5 a 6,5 e com tempo de estabelecimento inferior a 30 segundos.

6.4 Sistema de controle de Nível

Para simular o comportamento da planta de nível e seu controle, é utilizada a estrutura mostrada na figura 6.7. E a programação do microcontrolador é baseada nos fluxogramas da figura 4.3. Onde os potenciômetros conectados ao microcontrolador representam os sensores de nível dos recipientes de armazenamento da solução nutritiva, solução A e solução B, com comportamento descrito na seção 3.2. Neste caso, os dados necessários para a obtenção do gráfico mostrado na figura 6.8 são enviados via porta serial. Nele é possível ver como foi respeitado o passo a passo do processo, em que deve-se adicionar primeiro a solução A e depois a solução B. Além de ver que a solução A demora mais para atingir seu valor final, pois como foi indicado nos capítulos anteriores, a solução nutritiva contém mais deste líquido do que aquele armazenado no recipiente B.

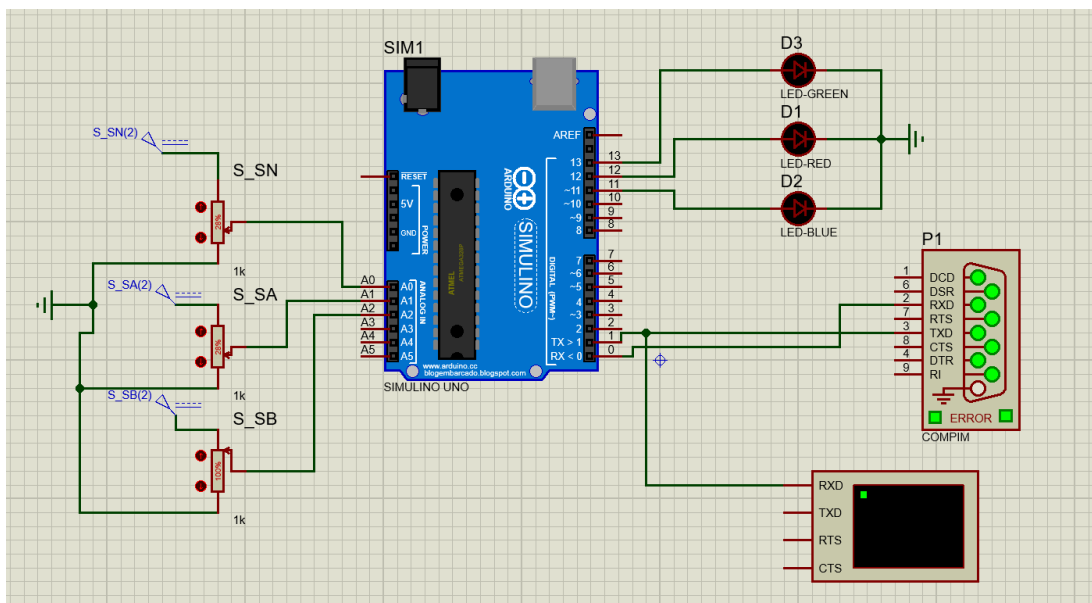


Figura 6.7 - Diagrama de conexão para simulação do controle de nível dos recipientes de solução nutritiva A e B

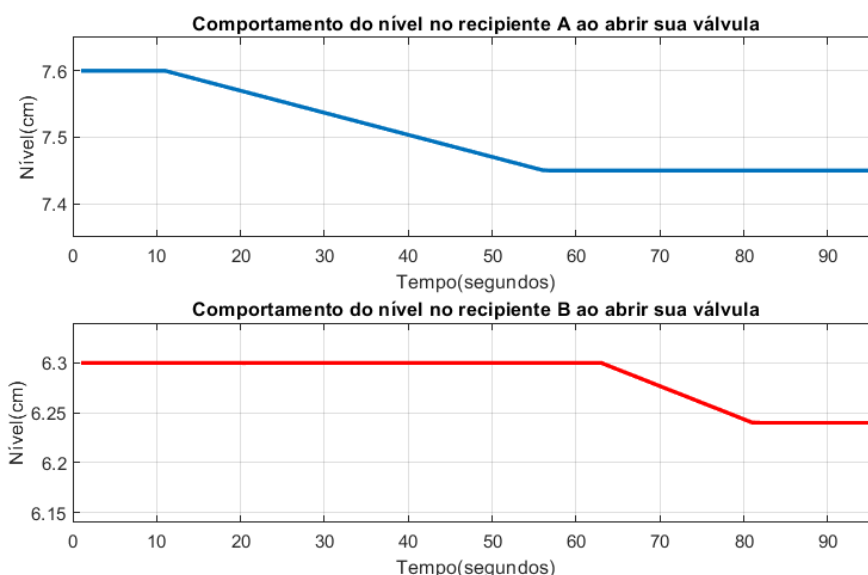


Figura 6.8 - Saída da planta de nível dos recipientes A e B, com controle On-off programado no Arduino UNO

É importante lembrar que em cada um dos controladores programados no microcontrolador foi necessário realizar conversões de variáveis devido à utilização de unidades de engenharia de acordo com os sensores, válvulas e demais elementos selecionados para a estrutura do sistema hidropônico. Caso haja alguma alteração na seleção destes elementos, além de reajustar as funções de transferência dos modelos obtidos, é também importante ter em conta o detalhe anteriormente mencionado.

7. Conclusões

Este projeto teve como foco a concepção, desenvolvimento e implementação de um sistema de controle para uma mini fazenda hidropônica. O principal objetivo foi criar um ambiente controlado que permitisse otimizar as condições de cultivo, especificamente o nível de líquido nos diferentes recipientes, o fluxo da solução nutritiva e o seu pH. Através de uma abordagem interdisciplinar que combinou engenharia de controle e hidroponia, foram alcançados avanços significativos na automatização e melhoria da produção agrícola nestes tipos de sistemas.

Primeiramente, foram realizadas extensas investigações para obter modelos matemáticos que descrevem as principais variáveis do sistema: nível, vazão e pH. Esses modelos foram essenciais para compreender o comportamento das variáveis e desenvolver estratégias de controle eficazes.

A etapa seguinte consistiu no desenho e projeção de um conjunto de controladores para cada uma das variáveis mencionadas. Várias técnicas de controle foram exploradas, incluindo controle proporcional-integral-derivativo (PID), Controle de Modelo Interno (IMC), compensadores de fase e controles On-Off; com o objetivo de selecionar a estratégia mais adequada para cada caso. Esta etapa envolveu um rigoroso processo de avaliação e seleção de controladores, levando em consideração critérios de desempenho e eficiência.

Uma vez selecionados os controladores, eles foram discretizados, adaptando as estratégias de controle ao ambiente digital de um microcontrolador Arduino. Esta fase incluiu a implementação de algoritmos e a programação dos controladores no microcontrolador, o que permitiu a automatização e o controle em tempo real das variáveis do sistema.

Os resultados obtidos neste projeto foram satisfatórios. Conseguindo desenvolver um algoritmo de passos a serem executados caso você queira implementar uma fazenda hidropônica.

Este projeto demonstra o potencial da engenharia de controle na otimização de sistemas de cultivo hidropônico. A combinação de modelos matemáticos, estratégias

de controle e implementação em microcontroladores permite atingir um nível de automação e eficiência que pode beneficiar significativamente a produção de alimentos em ambientes controlados. Além disso, este projeto estabelece as bases para futuras pesquisas e melhorias para projetos dentro da mesma área de pesquisa.

7.1 Recomendações

Implementar no futuro a proposta do sistema hidropônico como uma planta real. Desta forma, obter-se-ia uma melhor validação dos controles projetados. Além disso, novas funcionalidades podem ser adicionadas como a incorporação de painéis LED para garantir a luz que as plantas necessitam para os seus processos metabólicos caso se pretenda que a fazenda hidropônica seja instalada em ambiente interior; incorporar alarmes para quando houver problemas na fazenda, ou for necessário repor soluções nutritivas ou manutenção de componentes; ou desenhar um aplicativo para computador ou celular para poder saber o estado de todo o sistema a qualquer momento.

Referências

- ALBRIGHT, Lyle. **Albright's Chemical Engineering Handbook**. [S.l.]: [S.n.], 2008.
- ARDIANSAH, Irfan; SURYADI, Edy. Greenhouse Monitoring and Automation Using Arduino: a Review on Precision Farming and Internet of Things (IoT). **International Journal on Advanced Science Engineering and Information Technology**, abr. 2020.
- ARDUINO - Home, 2022. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>. Acesso em: 05 mar. 2022.
- ÅSTRÖM, K.J.; HÄGGLUND, T. **Control PID Avanzado**. [S.l.]: Prentice Hall, 2009. ISBN 8483225115.
- ATKINS, Peter; DE PAULA, Julio. **Physical Chemistry**. 9. ed. New York: [S.n.], 2010. ISBN 1-4292-1812-6.
- BARROS, Patricia. **¿La hidroponía?. pero si es muy fácil**. [S.l.]: [S.n.], 1999. Disponível em: <http://www.librosmaravillosos.com/hidroponia/index.html>.
- BELTRANO, José; GIMENEZ, Daniel O. **Cultivo en Hidroponía**. La Plata: EDULP, (2009-2015).
- BENÍTEZ-DÍAZ, Pedro; MIRANDA-CONTRERAS, Leticia. CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUPERFICIALES POR RESIDUOS DE PLAGUICIDAS EN VENEZUELA Y OTROS PAÍSES DE LATINOAMÉRICA. **Revista Internacional de Contaminación Ambiental**, México, v. 29, 2013.
- CASTRUCCI, PLINIO L.; BITTAR, ANSELMO. **Controle Automático**. [S.l.]: [S.n.], 2011.
- CHANG, Raymond. **Química General**. 7. ed. [S.l.]: MCGRAW HILL INTERAMERICANA, 2002.
- CHOWDHURY, Muhammad E. H.; KHANDAKAR, Amith. Design, Construction and Testing of IoT Based Automated Indoor Vertical Hydroponics Farming Test-Bed in Qatar. **Sensors**, 2 out. 2020.
- CORRIPIO, Carlos A.; SMITH, Armando B. **Principles and Practice of Automatic Process Control**. 2. ed. [S.l.]: Wiley, 1997.
- DARKO, E. *et al.* Photosynthesis under artificial light: the shift in primary and secondary metabolism. **Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci**, 19 Apr 2014.
- DUTTA, M. *et al.* Monitoring Root and Shoot Characteristics for the Sustainable Growth of Barley Using an IoT-Enabled Hydroponic System and AquaCrop Simulator. **Sustainability**, Marzo 2023.
- EMERSON, M. P. **Básico do Controle de pH**. EE UU: [S.n.], 1991.
- FAO. **La empresa hidropónica de mediana escala: La Técnica de la Solución Nutritiva Recirculante (NFT)**. Talca, Chile: [S.n.], 1996.
- FAO. **El estado mundial de la agricultura**. [S.l.]: ONU-FAO, 2017. ISBN 978-92-5-309873-6.
- FAO. **El estado mundial de la agricultura**. [S.l.]: [S.n.], 2018. ISBN 978-92-5-130967-4.
- GARCIA, Claudio. **Modelagem e simulação**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2009.
- GARCÍA, Claudio. **Modelagem e simulação**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2009.
- GARCIA, Claudio. **Controle de processos industriais. Estratégias convencionais**. [S.l.]: Edgar Blücher Ltda, v. 1, 2017. ISBN 978-85-212-1185-3.
- GENTRY, Matthew. Local heat, local food: Integrating vertical hydroponic farming with distric the atingin Sweden. **Elsevier**, Febrero 2019.

- HOSSEINPOUR, S.; MARTYNENKO, A. Application of fuzzy logic in drying: A review. **Drying Technology**, Noviembre 2020.
- KIM, Hyeon-Hye *et al.* Green-light Supplementation for Enhanced Lettuce Growth under Red- and Blue-light-emitting Diodes, 2004.
- KONDAVEETI, Hari K. *et al.* A systematic literature review on prototyping with Arduino: Applications, challenges, advantages, and limitations. **Computer Science Review**, v. 40, n. 100364, maio 2021.
- LOMBRICOMPOST; BOKASHI. **Efecto de dos soluciones nutritivas de origen orgánico sobre el rendimiento y calidad del cultivo de lechuga (Lactuca sativa L. var. longifolia Compositae) en hidroponía.** [S.l.]: [S.n.], 2010-20015.
- LU, Chungui; GRUNDY, Steven. Urban Agriculture and Vertical Farming. **Elsevier**, 2017.
- MANFRED, Morari; EVANGHELOS, Zafiriou. **Robust Process Control.** [S.l.]: Prentice Hall, 2007. ISBN 0137821530.
- MARTIN, Michael; BUSTAMANTE, Maria J. Growing-Service Systems: New Business Models for Modular Urban-Vertical Farming. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 5, 29 Noviembre 2021.
- MARULANDA, César; IZQUIERDO, Juan. **La huerta hidropónica popular.** Santiago, Chile: ONU-FAO. 2003.
- MENDES DE PAULA, FELIPE D. S.; DA SILVEIRA CASTRO, LUAN F.; DE GODOI BUENO, LUIS A. **SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA CULTIVO DE BABY LEAF COM ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL.** UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO. Campinas. 2015.
- MITTAL, K. *et al.* A comprehensive review on type 2 fuzzy logic applications: Past, present and future. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, n. 95, octubre 2020.
- MOTT, Robert L. **Mécanica de Fluidos.** Tradução de Pablo Miguel Guerrero Rosas. 6. ed. México: PEARSON EDUCACIÓN, 2006.
- NASKALI, A. T.; PINARER, Ozgun; TOLGA, A. C. Vertical Farming: Under Climate Change Effect, Marzo 2021.
- NGUYEN, A.-T. *et al.* Fuzzy Control Systems: Past, Present and Future. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 14, n. 1.
- OGATA, Katsuhiko. **Discrete-Time Control System.** 2. ed. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1995. ISBN 978-84-8322-660-5.
- OGATA, Katsuhiko. **INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA.** 5. ed. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, 2010. ISBN 978-84-8322-660-5.
- OGATA, Katsuhiko. **Ingeniería de Control Moderna.** 5. ed. Madrid: Pearson Educación, 2010. ISBN 978-84-8322-660-5.
- OH, Soojin; LU, Chungui. Vertical farming - smart urban agriculture for enhancing resilience and sustainability in food security. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, Noviembre 2022.
- PERALTA, Laura; JIMENEZ, María F. **Manual de producción hidróponica para hortalizas de hoja en sistema NFT.** Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2016. ISBN 978-9968-641-32-6.

PÉREZ VÁZQUEZ, Arturo; LANDEROS SÁNCHEZ, Cesáreo. Agricultura y deterioro ambiental. **Revista de Ciencia y Cultura Elementos**, v. 16, n. 73, 2009.

POPKOVA, Elena G. Vertical Farms Based on Hydroponics, Deep Learning, and AI as Smart Innovation in Agriculture. In: _____ **Smart Innovation, Systems and Technologies**. [S.l.]: [s.n.], v. 264, 2022.

PREITE, L.; SOLARI, F.; VIGNALI. Technologies to Optimize the Water Consumption in Agriculture: A Systematic Review. **Sustainability**, Marzo 2023.

RAMOS GONZALIAS, Yesid; RAMIREZ LASSO, Eduardo. Development of an artificial LED lighting system for indoor farming, 2016. ISSN 0122-056X.

RECA, Lucio G.; ECHEVARRÍA, Ruben G. **Agricultura medio ambiente y pobreza rural en América Latina**. Washigton: Banco Interamericano de Desarrollo, 1998. ISBN 1886938326.

SANKET SALVI, Savitha; SAWARGAONKAR, Samyak. **HydroIoT**: An IoT and Edge Computing based Multi-Level Hydroponics System. IEEE International Conference on Computation System and Information Technology for Sustainable Solutions (CSITSS). [S.l.]: [s.n.]. 2021.

STEPHANOPOULOS, George. **Chemical Process Control An Introduction to Theory and Practice**. Houston: Prentice Hall, 1983.

TOLENTINO, Lean K. S.; SANTOS, Rachelle B. D.; EBBAY, Nikka M. V. **HyLo**: Implementation of LoRaWAN in an Automated Hydroponics System. IEEE International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNWC). [S.l.]: [s.n.]. 2021.

TOLGA, A. C.; GAMSIZ, Berkan; BASAR, Murat. **Evaluation of Hydroponic System in Vertical Farming via Fuzzy EDAS Method**. [S.l.]: [s.n.]. 2019.

WICKRAMAARACHCHI, Piyumi *et al.* **Real-Time Greenhouse Environmental Conditions Optimization Using Neural Network and Image Processing**. 20th International Conference on Advances in ICT for Emerging Regions. [S.l.]: [s.n.]. 2020.

ZÁRATE, Margarita A. **Manual de hidroponia**. [S.l.]: Instituto de Biología de UNAM, 2014.