

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**RÔMULO FELIPE EVERTON DE CASTRO
RUAN RAMOS DE FRANÇA LIMA**

**PROPOSTA DE MODELAGEM MATEMÁTICA, IDENTIFICAÇÃO E SIMULAÇÃO
DE UM SISTEMA HIDRÁULICO UTILIZANDO O *SOFTWARE MATLAB***

**VOLTA REDONDA
2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PROPOSTA DE MODELAGEM MATEMÁTICA, IDENTIFICAÇÃO E SIMULAÇÃO
DE UM SISTEMA HIDRÁULICO UTILIZANDO O *SOFTWARE MATLAB***

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenheiro Eletricista.

Aluno:

Rômulo Felipe Everton de Castro

Ruan Ramos de França Lima

Orientador:

Prof. D. Sc. Péricles Guedes Alves

VOLTA REDONDA

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Curso: Engenharia Elétrica

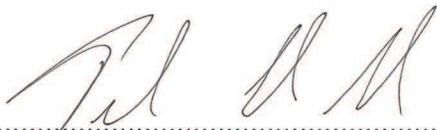
Acadêmico: Matrícula: Rômulo Felipe Everton de Castro 201511141; Ruan Ramos de França Lima 201410551

Título do TCC: Proposta de Modelagem Matemática, identificação e simulação de um sistema hidráulico utilizando o software matlab.

Apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica

Aprovada em 17 de NOVEMBRO de 2018

Banca Avaliadora:



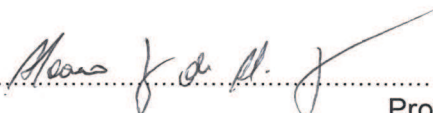
Professor Orientador

Péricles Guedes Alves, Doutor, UniFOA



Professor Avaliador

Edson de Paula Carvalho, Mestre, UniFOA



Professor Avaliador

Aloano Regio de Almeida Pereira, Especialista, UniFOA

RESUMO

Notoriamente, nas indústrias, aconteciam muitos erros e acidentes através da intervenção humana diretamente na linha de produção. Sendo assim, para solucionar os problemas causados e melhorias do processo industrial de fabricação, muito se discutiu a respeito da automatização no meio de produção. O assunto em questão obteve uma atenção especial pela falta de monitoramento e controle. O projeto propõe a aplicação de um modelo matemático capaz de realizar a simulação da dinâmica do sistema para uma possível automatização do mesmo e atenuação dos custos na expectativa de que os objetivos propostos sejam alcançados. Esta é uma necessidade específica encontrada na vila de Praia Brava da empresa Eletrobrás Eletronuclear. Devido ao cenário atual do sistema analisado possuir a inspeção e controle totalmente manuais, foi observado que a vazão de captação está no limite estabelecido de operação, além de o monitoramento ser realizado hora a hora não permitindo ações instantâneas, nem tão poucas ações previstas para contornar o aumento do consumo. Vale ressaltar que há a possibilidade de melhorias para garantir um controle eficiente e eficaz, sendo assim o projeto realizará a aplicação de um algoritmo para monitoramento do volume de consumo e tomar ações específicas para casos previstos, além de manter o reservatório dentro no nível seguro especificado pela empresa e manter também o controle de vazão da captação dentro dos limites de operação o maior tempo possível. Para isso, a proposta utilizará o *Matlab* para desenvolver o modelo matemático, através de identificação de sistema, que descreve e aproxima a curva de comportamento do sistema. Com o uso do *software* será possível criar uma rotina de trabalho com interface objetiva para demonstração da simulação do projeto já que este ainda não foi implantado. O conteúdo em questão está direcionado aos estudos de controle e automatização de sistemas, com uso de técnicas e ferramentas de engenharia.

Palavras-chave: Modelagem Matemática. Identificação de Sistema. Simulação.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
1.1. PROBLEMA ABORDADO E JUSTIFICATIVA.....	9
1.2. OBJETIVO.....	9
1.2.1. OBJETIVO GERAL.....	9
1.2.2. OBJETIVO ESPECIFICO	9
1.3. HIPÓTESES.....	10
1.4. METODOLOGIA.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. HIDRÁULICA.....	11
2.2. VAZÃO	11
2.3. MEDIDORES.....	12
2.3.1. MEDIDORES DE VAZÃO.....	12
2.3.2. MEDIDORES DE NÍVEL	15
2.4. MALHAS DE CONTROLE.....	17
2.4.1. SISTEMA DE CONTROLE A MALHA FECHADA	18
2.4.2. SISTEMA DE CONTROLE A MALHA ABERTA.....	19
2.4.3. SISTEMAS DE CONTROLE A MALHA FECHADA VERSUS SISTEMA DE CONTROLE A MALHA ABERTA	19
2.5. MODELO MATEMÁTICO.....	20
2.5.1. SISTEMAS LINEARES.....	20
2.5.1.1. SISTEMAS LINEARES INVARIANTES NO TEMPO E SISTEMAS LINEARES VARIANTES NO TEMPO	21
2.5.2. SISTEMAS NÃO-LINEARES.....	21
2.6. DIAGRAMAS DE BLOCOS	21
2.6.1. OPERAÇÕES COM DIAGRAMAS DE BLOCOS	23
2.6.2. DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA A MALHA FECHADA	23
2.6.3. PROCEDIMENTO PARA CONSTRUÇÃO DE UM DIAGRAMA DE BLOCOS	25
2.7. MODELAGEM NO ESPAÇO DE ESTADOS.....	25
2.7.1. VARIÁVEIS DE ESTADOS	26
2.7.2. VETOR DE ESTADO	26
2.7.3. ESPAÇO DE ESTADOS	26
2.7.4. EQUAÇÕES NO ESPAÇO DE ESTADOS.....	26

3. A EMPRESA	30
3.1. SEGURANÇA.....	30
3.2. TREINAMENTO	31
3.3. PLANO DE EMERGÊNCIA	32
3.4. REJEITO	32
3.5. COMBUSTÍVEL USADO	33
3.6. ENERGIA VERDE E RESPONSABILIDADE SOCIAL	34
4. O PROJETO.....	35
4.1. ESCOPO DO PROJETO.....	35
4.2. MODELAGEM DO SISTEMA.....	39
4.2.1. DADOS ANALISADOS.....	39
4.2.2. OBTENÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO.....	42
4.2.2.1. COMANDO “ <i>ident</i> ”.....	43
4.3. DIAGRAMA DE BLOCOS DO MODELO IDENTIFICADO	50
4.3.1. VALIDAÇÃO DO MODELO IDENTIFICADO	52
4.3.2. AJUSTE/REFINAMENTO DO MODELO IDENTIFICADO.....	54
4.3.3. VALIDAÇÃO DA MODELAGEM IDENTIFICADO AJUSTADO	54
4.4. CONTROLE PROPOSTO	55
4.4. COMANDO “ <i>guide</i> ”	57
4.4.1. SIMULAÇÕES E RESULTADOS	63
5. CONCLUSÃO.....	67
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
5.2. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXO A	70
APÊNDICE A.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Medidor de Vazão Tubo de Pitot [4].....	13
Figura 2 - Medidor de Vazão Disco Nutante [4].....	13
Figura 3 - Medidor Ultrassônico [5]	14
Figura 4 - Medidor de Nível com Flutuador [5]	16
Figura 5 - Medidor de Nível por Pressão Diferencial [5].....	16
Figura 6 - Sistema de Controle de Malha Fechada [7].....	18
Figura 7 - Sistema de Controle a Malha Aberta [7]	19
Figura 8 - Diagrama de Bloco [7].....	22
Figura 9 - Sistema em Malha Fechada [7]	23
Figura 10 - Sinal de Retroação [7].....	24
Figura 11 - Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto [9].....	30
Figura 12 - Inspeção de Segurança [9]	31
Figura 13 - Sala de Controle [9]	32
Figura 14 - Rejeitos Nucleares [9]	33
Figura 15 - Piscina de combustível [9]	34
Figura 16 - Situação Atual do Sistema [10]	36
Figura 17 - Operador Verificando nível do reservatório [11].....	36
Figura 18 - Marcações de Nível de Reservatório [11]	37
Figura 19 - Display do Medidor de Fluxo Ultrassônico de entrada [11].....	37
Figura 20 - Medidor de Fluxo Ultrassônico de Saída [11]	38
Figura 21 - Diagrama da Obtenção do Modelo Matemático [10]	39
Figura 22 - Descrição do Sistema [10]	41
Figura 23 - Interface Inicial do Matlab [10]	43
Figura 24 - Interface para Identificação no Matlab [10]	44
Figura 25 - Importação de Variáveis do Sistema [10].....	46
Figura 26 – Processo de Modelagem [10].....	47
Figura 27 - Escolha do Modelo [10].....	47
Figura 28 - Visualizador de Resposta dos Modelos [10]	48
Figura 29 - Resposta dos Modelos Identificados [10].....	49
Figura 30 - Aproximação do Modelo Escolhido [10]	50
Figura 31 - Diagrama de Blocos do Sistema [10].....	51
Figura 32 - Análise de Erro do Sistema Identificado [10]	53

Figura 33 - Diagrama de Blocos com Ganho [10]	54
Figura 34 - Proposta de Controle Automático do Sistema [10].....	55
Figura 35 - Diagrama de Instrumentação da Proposta de Controle Automático [10]	56
Figura 36 - Comando “guide” [10]	57
Figura 37 - Estrutura de Construção do Painel [10]	58
Figura 38 - Painel Montado [10]	59
Figura 39 - Painel de Simulação em Funcionamento [10].....	60
Figura 40 - Diagrama do Algoritmo de Condição [10]	63
Figura 41 - Resultados da Primeira Simulação [10]	64
Figura 42 - Resultados Segunda Simulação [10]	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos medidores de vazão [4]	12
Tabela 2 - Medidores [4]	17
Tabela 3 – Valores Obtidos para Identificação do Sistema [10]	45
Tabela 4 – Cálculo para Validação de Sistema [10]	53
Tabela 5 – Resposta da Simulação do Sistema [10]	55
Tabela 6 - Cálculo do Erro Aparente [10]	55
Tabela 7 - Valores Primeira Simulação [10]	64
Tabela 9 - Valores Segunda Simulação [10]	65

1. INTRODUÇÃO

Antigamente nas indústrias, aconteciam muitos erros e acidentes através da intervenção humana diretamente na linha de produção. Sendo assim, para a solução dos problemas causados e melhorias do processo industrial de fabricação, muito se discutiu a respeito da automatização do meio de produção. Vale ressaltar que esta discussão se firmou devido à rapidez e eficácia na produção e controle dos sistemas instalados.

Não obstante, com o crescimento da automação nas indústrias, aumentaria também a confiabilidade, observando que a partir deste momento, não haveria intervenção humana no processo. Os equipamentos elétricos dependem apenas da energia elétrica para realizar as funções nas quais foram programadas, sem risco de erros, diferentemente do serviço executado com ação humana.

Para exemplificar o exposto acima, tem-se então um sistema hidráulico puramente mecânico onde há o excesso de consumo de água. Os recursos do meio ambiente como a água por exemplo, são finitos, logo faz-se necessário um controle para que continue a existir ao longo dos anos, pois o mesmo é um recurso vital para a subsistência de vida na Terra. Dá-se então a importância de realizar este controle.

O assunto em questão obteve uma atenção especial devido ao sistema possuir monitoramento e controle totalmente manuais, necessitando de um operador para realizar a inspeção visual do nível do tanque, com base em uma metodologia, realizar os devidos ajustes da vazão de entrada. O projeto constitui no estudo de modelagem, além de simular o funcionamento real para uma futura automatização de sistema, afim de tornar o controle confiável e dinâmico.

O tema do trabalho surge então de uma necessidade específica encontrada na vila residencial de Praia Brava, da empresa Eletrobrás Eletronuclear, e todo desenvolvimento está embasado nas normas e critérios utilizados pela empresa em todos os seus projetos, para garantia da segurança de seus funcionários e a continuidade do serviço com as devidas melhorias.

1.1. PROBLEMA ABORDADO E JUSTIFICATIVA

Devido ao cenário atual do sistema analisado, ou seja, possuir a inspeção e controle totalmente manuais, foi observado que a vazão de captação não atende aos padrões estabelecidos pela empresa, além de que o monitoramento é realizado hora a hora, não permitindo uma ação instantânea, nem tão pouco ações previstas para contornar o aumento do consumo.

Havendo a possibilidade de melhorias para garantir um controle eficiente e eficaz, o projeto visa a aplicar um sistema de controle capaz de monitorar o volume de consumo, efetuando ações específicas para o caso previsto, mantendo o reservatório da captação da vila de Praia Brava, dentro no nível seguro especificado pela empresa Eletrobrás Eletronuclear e mantendo também o controle de vazão da captação dentro dos limites de operação.

Para o exposto acima, vale informar que o limite de operação estabelecido pela empresa, de 52 m³/h, respeita os padrões normatizados pelo INEA para o não comprometimento do manancial do local.

1.2. OBJETIVO

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Para a presente pesquisa, espera-se de modo geral que seja realizado o estudo para uma possível automatização futura na empresa. Com isso, se faz necessário adquirir alguns conhecimentos no *software Matlab*. Sendo assim, respeitando a particularidade da empresa, permitir manter controlada a vazão abaixo do limite de operação estabelecido, sem comprometer o nível do reservatório.

1.2.2. OBJETIVO ESPECIFICO

Além da fundamental importância da modelagem matemática para se ter um sistema automatizado, alguns pontos devem ser alcançados:

- ✓ Apresentação de uma modelagem matemática à empresa, que pretende automatizar o local;
- ✓ Realizar a identificação do sistema;
- ✓ Simular o sistema real afim de comprovar o modelo identificado, além de se certificar que o sistema em questão pode ser controlado e automatizado.

1.3. HIPÓTESES

Através dos levantamentos observados na estruturação de controle efetivo do sistema, algumas especificações esperam ser alcançadas:

- 1) Controle da Vazão para que permaneça dentro do valor estipulado pela operação da empresa;
- 2) Parametrização/Programação concisa mediante um estudo de campo minucioso, prevendo quaisquer situações possíveis de ação, permitindo que o sistema se adeque automaticamente às variações;

1.4. METODOLOGIA

O conteúdo em questão está direcionado aos estudos de uma proposta de realização de controle e automatização de sistemas, com uso de técnicas e ferramentas conhecidas na engenharia. A pesquisa possui o intuito de elaborar um modelo matemático que simule, juntamente com o algoritmo em segundo plano, a dinâmica de funcionamento controlada dos parâmetros expostos pela empresa Eletrobrás Eletronuclear.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por se tratar de um sistema hidráulico em que é feito monitoramento manual além de possuir a intenção de um estudo para uma possível automatização através de identificação de sistema para modelagem matemática, se faz necessário o conhecimento de alguns conceitos relevantes ao assunto.

2.1. HIDRÁULICA

A hidráulica, estudada os aspectos físicos dos fluidos dispostos no estado líquido, em repouso ou em movimento. Vale expor que é conhecida como Mecânica dos Fluidos, sendo responsável por descrever a conduta e aplicação dos fluidos confinados ou em defluência, como formas de funcionamento de sistemas transmissores de energia. [1]

Através de aprofundamento, é possível descrever as leis que mensuram o traslado, a conversão da energia, normatização e o controle dos fluidos que agem sob ação das variáveis como pressão, vazão, temperatura, viscosidade entre outros. Neste âmbito, a lei que embasa o conhecimento da hidráulica é que a pressão disposta em determinado ponto de um líquido em repouso é semelhante em todas as direções, aplicando forças iguais em áreas iguais. [1]

A hidráulica é, portando um conhecimento bastante exercido na área de ciências exatas, como no caso em questão, a engenharia. Principalmente para o desenvolvimento de sistemas que gerem energia através do movimento das águas, a chamada energia hidráulica. Além disso, estuda a utilização de líquidos confinados e sobre pressão, para transmitir movimento e multiplicar força. [2]

2.2. VAZÃO

Segundo [3], vazão pode ser conceituada como sendo a quantidade volumétrica ou mássica de um fluido que percorre através de uma seção tubular por unidade de tempo. Pode-se classificada a vazão como mostra a seguir:

- ✓ Vazão Volumétrica: É o quantitativo em volume que percorre em determinada secção em um período de tempo. As unidades volumétricas mais conhecidas são: m³/s, m³/h, l/h, l/min, GPM (galões por minuto), entre outras. [4]
- ✓ Vazão mássica: É o quantitativo em massa de um fluido qualquer que percorre em determinada secção em um período de tempo. As unidades mais comuns relativas a vazão mássica são: kg/s, kg/h, t/h, lb/h. [4]

2.3. MEDIDORES

Para melhor entendimento do procedimento a ser adotado na realização da simulação de uma possível automatização onde se faz necessário a compilação de dados para análise, se faz necessário a utilização de alguns dispositivos que permitem o *feedback* do sistema analisado.

2.3.1. MEDIDORES DE VAZÃO

Resumidamente, é possível classificar os medidores de vazão, conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Classificação dos medidores de vazão [4]

Medidores Indiretos	Perda de Carga Variável (Área Constante)	Tubo Pitot
		Tubo de Venturi
		Tubo de Dall
		Annubar
		Placa de Orifício
	Perda de Carga Constante	Rotâmetro
Medidores Diretos	Deslocamento Positivo	Disco Nutante
		Pistão Flutuante
		Rodas Ovais
		Roots
	Velocidade	Tipo Hélice
		Tipo Turbina
Medidores Especiais	Eletromagnetismo	
	Vortex	
	Ultrassônico	
	Calha Parshall	
	Coriolis	

Como pode ser observado na tabela 1, tem-se basicamente três formas de se medir a vazão. Para melhor ilustrar, segue abaixo alguns exemplos de medidores mais comuns para cada forma:

- Medidor de Vazão Indireto Tubo de Pitot:

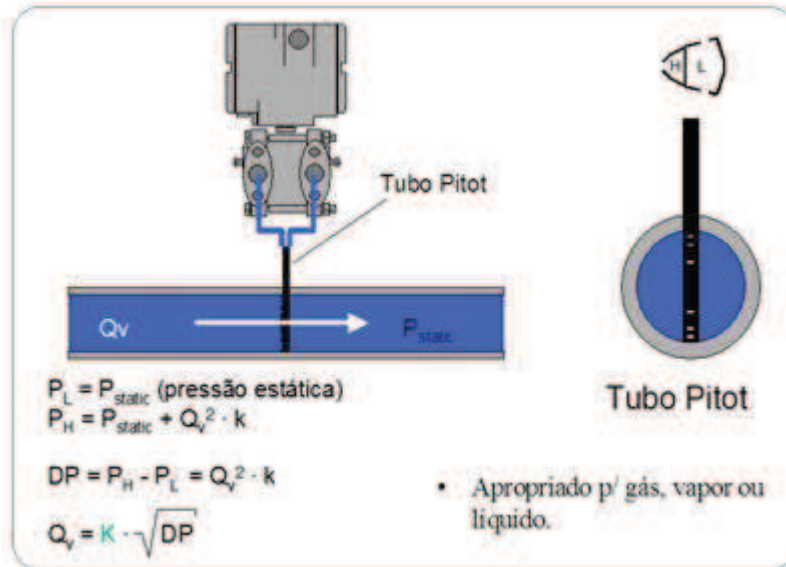


Figura 1 - Medidor de Vazão Tubo de Pitot [4]

- Medidor de Vazão Direto Disco Nutante:

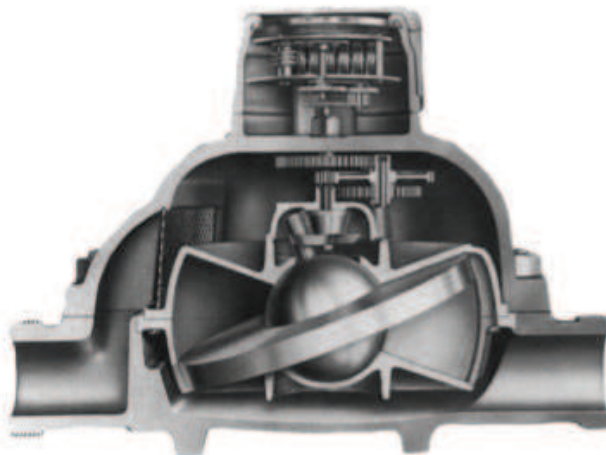


Figura 2 - Medidor de Vazão Disco Nutante [4]

Este tipo de medidor é utilizado principalmente para de vazão de água, sendo muito encontrado em resistências.

- Medidor de Vazão Especial Ultrassônico



Figura 3 - Medidor Ultrassônico [5]

Vale ressaltar que no local, alvo do estudo deste trabalho, foi encontrado um medidor similar ao exposto na figura 3. Trata-se de um medidor utilizado para sistemas automáticos e de valor elevado.

Para se ter o valor exato da vazão, pode ser aplicado a Equação da Conservação da Massa, assim como a Equação da Conservação da Energia, mas esta última na forma simplificada, que é a Equação de Bernoulli como mostrado a seguir. [6]

$$\frac{V_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{V_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (2.1)$$

Onde:

V é o volume

p é a pressão

ρ é a massa específica

Sendo a equação (2.1), a primeira parcela representa a energia cinética, a segunda a energia dada pela pressão, oriunda do trabalho de escoamento, já terceira parcela representa a energia potencial. Quanto a esta igualdade, explicita que a soma das parcelas é uma constante ao longo de uma linha de corrente, não considerando as perdas por atrito. [6]

2.3.2. MEDIDORES DE NÍVEL

Uma das maneiras mais usuais para definição de nível é considerarmos como a altura do fluido de um reservatório, através do qual torna-se possível mensurar o volume acumulado deste fluido, pontuando e controlando a quantidade de material em procedimento físico e/ou químico, tendo ainda a preocupação de levar em conta a segurança, onde o nível do fluido em questão não pode transpor os limites estabelecidos. Além disso, tem-se a condição de monitoração visando o controle operacional e/ou de custo e proteção ambiental. [4]

Os três tipos fundamentais para medição de nível são:

- 1) Direto;
- 2) Indireto;
- 3) Descontínuo.

A medição direta pode ser realizada aferindo diretamente a distância entre o nível do fluido e um referencial previamente estabelecido. Nesta medição pode-se utilizar a técnica visual, como por exemplo, réguas, gabaritos, visores de nível, boia ou flutuador, ou até mesmo através da reflexão de ondas ultrassônicas. [4]

A seguir uma ilustração de um medidor direto:

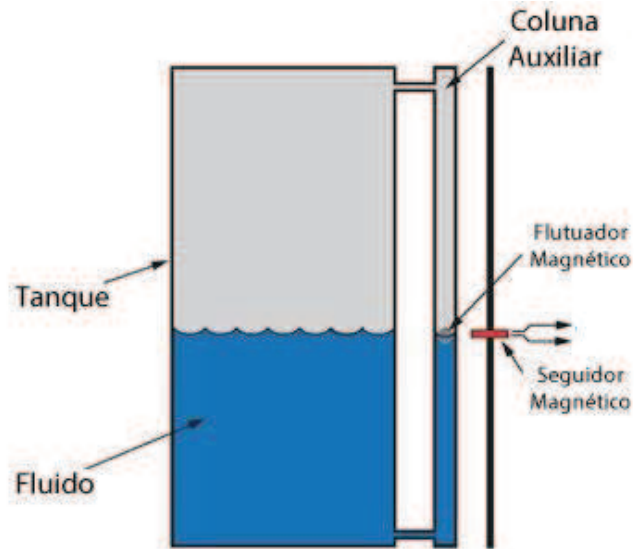


Figura 4 - Medidor de Nível com Flutuador [5]

Na medição indireta, o nível é mensurado indiretamente em função de grandezas físicas relacionadas, como por exemplo, pressão (manômetros de tubo em U, níveis de borbulhador, níveis de diafragma, células de pressão diferencial, dentro outros), empuxo (níveis de deslocador) e propriedades elétricas (níveis capacitivos, detector de nível condutivo, níveis radioativos, níveis ultrassônicos, entre outras). [4]

Na figura a seguir, pode-se observar a ilustração de um medidor indireto:

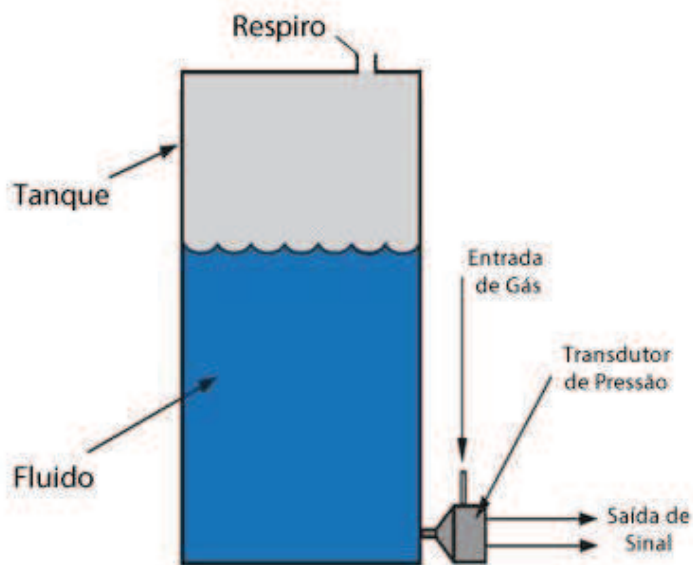


Figura 5 - Medidor de Nível por Pressão Diferencial [5]

Na medição descontínua, tem-se a compilação indicada somente quando o nível alcança os pontos especificados, como por exemplo, em condições onde se tem alarmes de nível alto ou nível baixo. [4]

A tabela abaixo mostra alguns tipos de medidores de nível:

Tabela 2 - Medidores [4]

Medidores Diretos	Visor de Nível
	Boias e Flutuadores
	Contatos de Eletrodos
Medidores Indiretos	Capacitância
	Empuxo
	Ultrassom
	Pressão Diferencial

2.4. MALHAS DE CONTROLE

Nas malhas de controle é preciso saber diferenciar algumas características como será mostrado a seguir.

Variável controlada é a grandeza que é mensurada e controlada. A variável manipulada é a grandeza variada através do controlador com o intuito de afetar o valor da variável controlada, normalmente é a variável de saída do sistema. [7]

Controlar significa conhecer o valor da variável controlada e destinar o valor conveniente ao sistema afim de corrigir ou limitar a diferença entre o valor medido e o valor ideal da variável controlada. [8]

Um sistema é uma associação de componentes que atuam juntos e realizam um determinado objetivo. Em alguns sistemas, encontram-se distúrbios ou perturbações que são caracterizados por um sinal que tende a modificar de modo adverso a grandeza da variável de saída de um sistema. Se um distúrbio for originado internamente no sistema, este é conhecido como um distúrbio interno. No

caso do distúrbio externo, é gerado fora do sistema e se comporta como sinal de entrada no sistema. [7]

2.4.1. SISTEMA DE CONTROLE A MALHA FECHADA

Controle com retroação ou malha fechada diz respeito a uma operação que, em presença de distúrbios, encaminha-se a reduzir a diferença entre os sinais de saída do sistema e o dado como referência, e que procede com base nesta diferença. Sendo assim, as perturbações conhecidas ou previsíveis podem sempre ser compensadas no sistema. [7]

O sinal de erro, é a diferença entre os sinais de entrada e o de retroação (que pode ser o próprio sinal de saída ou o caso de uma função do sinal de saída e de suas derivadas e/ou integrais.), gera uma excitação no controlador de modo a sanar o erro e destinar a grandeza do sinal da saída para o almejado. A expressão controle com malha fechada acarretará sempre o uso de retroação a fim de diminuir o erro do sistema. [7]

Abaixo uma ilustração simplificada do sistema de malha Fechada:

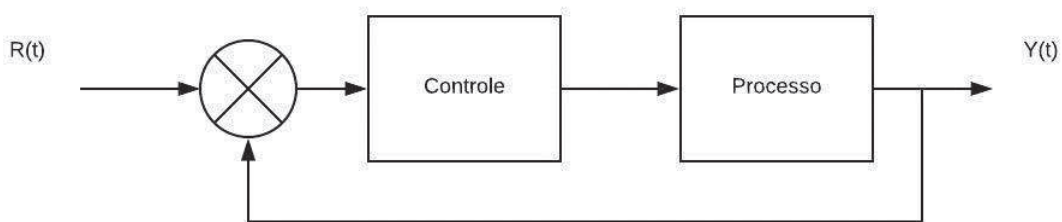


Figura 6 - Sistema de Controle de Malha Fechada [7]

Um exemplo simples disso seria um sistema com controle de temperatura em um determinado ambiente. Medindo-se a temperatura do ambiente e comparando com a temperatura definida como de referência, o termostato aciona o equipamento de calefação ou de refrigeração, ligando ou desligando cada um deles, de tal forma que a temperatura do ambiente permaneça na faixa de conforto estabelecida, a despeito das condições externas. [7]

2.4.2. SISTEMA DE CONTROLE A MALHA ABERTA

Os sistemas em que o sinal de saída não influencia a ação de controle são conhecidos como sistemas de controle com malha aberta. Em outras palavras, em um sistema de controle com malha aberta, não se compara a grandeza do sinal de saída tampouco este sinal é destinado para comparação com o sinal de entrada, como pode-se observar a figura a seguir: [7]

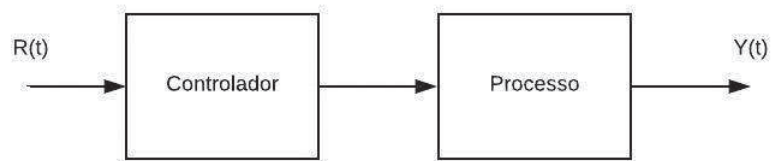


Figura 7 - Sistema de Controle a Malha Aberta [7]

Nos sistemas de controle com malha aberta, cada sinal de referência na entrada corresponde uma a uma determinada ação de operação fixa, como resultado, a exatidão do sistema depende da calibração. Na presença de distúrbios, os sistemas de controle a malha aberta não desempenham a tarefa desejada. [8]

Na forma prática, os sistemas de controle de malha aberta são usados somente quando é conhecido a relação entre os sinais de entrada e saída do processo a controlar e quando não há distúrbios internos e externos. [7]

2.4.3. SISTEMAS DE CONTROLE A MALHA FECHADA VERSUS SISTEMA DE CONTROLE A MALHA ABERTA

Uma vantagem do sistema de controle com malha fechada é o caso em que a retroação pode deixar a resposta do sistema relativamente insensível às perturbações externas e às variações internas dos parâmetros do sistema. É, portanto, razoável a utilização de componentes de baixo custo e sem muita exatidão na medição para obter o controle exato de um determinado processo, o que é irrealizável com o controle a malha aberta. [7]

Do ponto de vista de estabilidade, é mais fácil construir sistemas a malha aberta, devido a estabilidade destes tipos de sistemas ser menos problemática. Por outro lado, a estabilidade em sistema de controle de malha fechada normalmente é sempre um grande problema pela tendência na correção de erros além do necessário, o que pode resultar em oscilações de amplitude constante ou até crescente com o tempo. [7]

2.5. MODELO MATEMÁTICO

No estudo de sistema de controle, se faz necessário ter a capacidade de modelar sistemas dinâmicos assim como analisar características dinâmicas. A modelagem matemática de um sistema dinâmico pode ser definida como sendo um conjunto de equações que descrevem a dinâmica do sistema com precisão, ou pelo menos, de uma maneira bastante aceitável. [7]

Dependendo do sistema, um modelo matemático pode ser mais adequado do que outro. Por exemplo, em problemas como de controle ótimo, é bastante vantajoso usar aproximações com representações no espaço de estados. Por outro lado, para análise de resposta transitória ou de resposta de frequência de sistema monovariáveis (uma entrada e uma saída), a representação por aproximação de função de transferência pode ser a mais conveniente. [8]

Uma vez explicitado um modelo matemático de determinado sistema, várias ferramentas analíticas e de computador podem ser utilizadas para fins de análise e de síntese. [8]

2.5.1. SISTEMAS LINEARES

Um sistema é chamado linear quando a ele se aplica o princípio da superposição. O princípio da superposição determina que a resposta gerada pela aplicação simultânea de duas excitações específicas é igual à soma das duas respostas a cada uma das excitações. Conseqüentemente, para os sistemas lineares, o retorno a várias entradas pode ser adquirido considerando-se uma única entrada por vez e adicionando-se os resultados encontrados. [7]

É este princípio que permite a criação de soluções complicadas para equações diferenciais lineares oriundas de soluções simples. Em uma análise experimental de um sistema dinâmico, se causa e efeito forem proporcionais, a que o princípio da superposição seja cabível, então o sistema pode ser classificado linear. [7]

2.5.1.1. SISTEMAS LINEARES INVARIANTES NO TEMPO E SISTEMAS LINEARES VARIANTES NO TEMPO

Uma equação diferencial é considerada linear se os coeficientes permanecerem constantes ou funções apenas das variáveis independentes. Sistemas dinâmicos que são formados de componentes lineares a parâmetros concentrados e invariantes no tempo consegue ser explicitados por equações diferenciais lineares invariantes no tempo. [7]

Os sistemas aproximados por representações em equações diferenciais cujos coeficientes permanecem em funções do tempo são conhecidos como sistemas lineares variantes no tempo. Um exemplo de um sistema de controle variante no tempo pode ser um sistema de controle de uma nave espacial, pois a massa de uma nave espacial altera devido ao consumo de combustível. [7]

2.5.2. SISTEMAS NÃO-LINEARES

Um sistema é considerado não-linear se a ele não se aplica o princípio da superposição. Assim, nos sistemas não-lineares a resposta a duas entradas não pode ser calculada tratando uma entrada por vez e adicionando-se os resultados respectivamente. [7]

2.6. DIAGRAMAS DE BLOCOS

Um sistema de controle pode constituir um determinado número de componentes. Em engenharia de controle, para mostrar as funções realizadas por cada componente, costuma-se usar os diagramas de blocos.

Um diagrama de blocos referente a um sistema é a representação pictórica das funções desempenhadas pelos componentes e do fluxo de sinais entre eles. Diferindo de uma representação matemática que é puramente abstrata, o diagrama de blocos possui a vantagem de constatar mais facilmente os fluxos de sinais no sistema real. [7]

Em um diagrama de blocos, todas as variáveis do sistema são ligadas umas às outras através de blocos funcionais. O bloco funcional é um símbolo da operação matemática sobre o sinal de entrada do bloco que produz sinal de saída. As funções de transferência dos componentes são normalmente introduzidas nos blocos correspondentes, que são interligados por setas para expor o sentido do fluxo dos sinais. [7]

As vantagens de se usar a representação pelo diagrama de blocos está no fato de que é mais ilustrativo formar o diagrama de blocos global do sistema simplesmente conectando os blocos dos componentes de acordo com o fluxo do sinal, sendo possível detectar a contribuição de cada componente para o desempenho geral do sistema. A figura abaixo exemplifica um diagrama de blocos simplificado. [7]

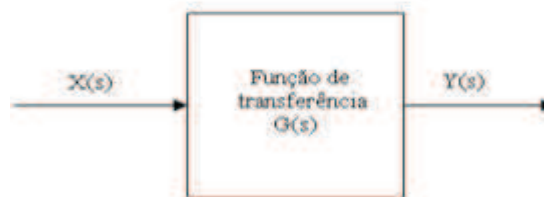


Figura 8 - Diagrama de Bloco [7]

Deve-se atentar de que nos diagramas de blocos a fonte para alimentação de energia não é exibida explicitamente e que o mesmo em um dado sistema não é único. Inúmeros diagramas de blocos diferentes podem ser desenvolvidos para um mesmo sistema, dependendo do ponto de vista analisado. [7]

2.6.1. OPERAÇÕES COM DIAGRAMAS DE BLOCOS

Em referência ao diagrama de blocos, um círculo com um X é a simbologia para indicação de uma operação de soma. Sendo assim, o sinal de mais ou de menos em cada segmento destinado indica se o sinal deve ser adicionado ou subtraído. É importante que as grandezas a serem somadas ou subtraídas tenham as mesmas grandezas dimensionais e unidades. [7]

Ainda em referência ao diagrama, é um ponto a partir do qual o sinal proveniente de um bloco vai ao mesmo tempo para outros blocos ou pontos somadores. [7]

2.6.2. DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM SISTEMA A MALHA FECHADA

A figura 9 mostra um exemplo de diagrama de blocos de um sistema de malha fechada. Na saída $C(s)$ ocorre a retroação ao ponto de soma, onde é realizado a comparação com o sinal de entrada de referência $R(s)$. A natureza de malha fechada do sistema está nitidamente indicada através da figura 9. O sinal de saída do bloco, $C(s)$ para este caso, é adquirido através da multiplicação da função de transferência $G(s)$ com o sinal de entrada do bloco, $E(s)$. Qualquer sistema de controle linear pode ser ilustrado por um diagrama de blocos constituído por pontos de soma e pontos de derivação. [7]

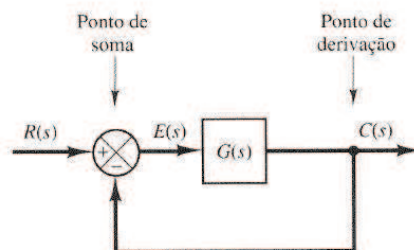


Figura 9 - Sistema em Malha Fechada [7]

Quando um sinal de saída retroage ao ponto de soma para comparação com a entrada, é necessário converter sua natureza física na mesma natureza do sinal de entrada. Por exemplo, um sistema de controle de temperatura, o sinal de saída é

normalmente a temperatura controlada. O sinal de saída, que possui o módulo da temperatura, precisa ser codificado como força, posição ou tensão elétrica. Esta conversão é realizada através do elemento de retroação ao qual a função de transferência é indicada por $H(s)$, conforme mostrado na figura 10. [7]

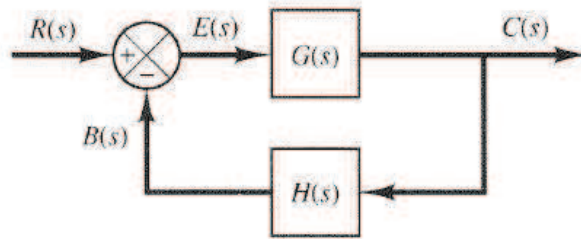


Figura 10 - Sinal de Retroação [7]

A função do elemento de retroação é alterar a grandeza do sinal de saída antes que seja equiparado com o sinal de entrada. Na maior parte dos casos, o elemento de retroação é um sensor responsável por medir o valor de grandeza de saída do processo a controlar. O sinal de saída do sensor é equiparado com o sinal de entrada, gerando-se o sinal de erro operante. [7]

No exemplo mostrado na figura anterior, o sinal de retroação que retorna ao ponto de soma para comparação com o sinal de entrada é $B(s) = H(s)C(s)$.

Para esse sistema, o sinal de saída $C(s)$ e o sinal de entrada $R(s)$ estão relacionados como se segue:

$$C(s) = G(s)E(s) \quad (2.2)$$

$$E(s) = R(s) - B(s) \quad (2.3)$$

$$E(s) = R(s) - H(s)C(s) \quad (2.4)$$

$$C(s) = G(s)[R(s) - H(s)C(s)] \quad (2.5)$$

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \quad (2.6)$$

A função de transferência que relaciona a entrada e saída, ou seja, $C(s)$ a $R(s)$ é denominada função de transferência com malha fechada. Esta função de transferência relaciona à dinâmica do sistema a malha fechada ao comportamento dos elementos de ação direta e dos elementos de retroação. A equação a seguir ilustra o sinal de saída. [7]

$$C(s) = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} \cdot R(s) \quad (2.7)$$

Assim, o sinal de saída do sistema de malha fechada depende claramente da função de transferência com malha fechada como também do tipo do sinal de entrada. [7]

2.6.3. PROCEDIMENTO PARA CONSTRUÇÃO DE UM DIAGRAMA DE BLOCOS

Para se construir um diagrama de blocos, escrevem-se primeiramente as equações que irão descrever a dinâmica de cada um dos componentes. Obtém-se na sequência, através da transformada de Laplace de cada equação, supondo condições iniciais nulas, e representa-se individualmente, em forma de blocos, cada equação transformada por Laplace. Finalmente, pode-se juntar os elementos em um diagrama de blocos completo. [7]

2.7. MODELAGEM NO ESPAÇO DE ESTADOS

O estado de um sistema dinâmico é a menor junção de valores de variáveis de estado sendo que o conhecimento destes valores em que $t = t_0$, junto com o conhecimento dos valores do sinal de entrada para $t \geq t_0$, determina completamente o comportamento do sistema em qualquer instante $t \geq t_0$. [8]

2.7.1. VARIÁVEIS DE ESTADOS

As variáveis de estado em um sistema dinâmico são grandezas onde o conjunto de valores define o estado do sistema. Se forem necessárias pelo menos n variáveis x_1, x_2, \dots, x_n , para descrever de forma completa o comportamento de um sistema dinâmico, de modo que uma vez conhecidos os valores do sinal de entrada para $t \geq t_0$ e especificado o estado inicial em $t = t_0$, o estado futuro do sistema esteja determinado, então tais n variáveis são um conjunto de variáveis de estados. [8]

2.7.2. VETOR DE ESTADO

Se n variáveis de estado são necessárias para representar por completo o comportamento de um dado sistema, então estas n variáveis de estado devem ser relacionadas como as n componentes de um vetor X . Um tal vetor é conhecido como vetor de estado. Um vetor de estado é, portanto, um vetor que determina de forma única o estado $x(t)$ do sistema para qualquer instante $t \geq t_0$, uma vez conhecidos o estado em $t = t_0$ e a função de entrada $u(t)$ para $t \geq t_0$. [8]

2.7.3. ESPAÇO DE ESTADOS

O espaço n -dimensional sendo que os eixos coordenados residem nos eixos x_1, x_2, \dots, x_n é chamado espaço de estados. Qualquer estado pode ser exibido por um ponto no espaço de estados. [8]

2.7.4. EQUAÇÕES NO ESPAÇO DE ESTADOS

A análise no espaço de estados circunda três tipos de variáveis na modelagem de sistemas dinâmicos: variáveis de entrada, variáveis de saída e de estado. Os sistemas dinâmicos precisam envolver elementos que guardem os valores de excitação para $t \geq t_1$. Uma vez que os integradores atuam nos sistemas de controle contínuo no tempo como dispositivos de memória, os sinais de resposta na saída de tais integradores podem ser considerados como os valores das variáveis que determinam o estado interno de sistemas dinâmicos. Assim, as variáveis de saída dos integradores convêm como variáveis de estado. A quantidade

de variáveis de estado indispensáveis na definição completa do comportamento de um sistema é igual a quantidade de integradores envolvidos. [8]

Admita-se que um sistema multivariável envolva n integradores. Suponha-se que haja r sinais de entrada $u_1(t), u_2(t), \dots, u_r(t)$, e m sinais de saída $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$. Definam-se as n variáveis de saída dos integradores como sendo variáveis de estado com valores: $x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)$. O sistema pode, então, ser descrito como na equação a seguir:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n; t) \\ \dot{x}_2(t) &= f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n; t) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \dot{x}_n(t) &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n; t) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Os valores dos sinais de saída $y_1(t), y_2(t), \dots, y_m(t)$ do sistema são dados como mostra a equação 2.9:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n; t) \\ y_2(t) &= g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n; t) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ y_m(t) &= g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_n; t) \end{aligned} \quad (2.9)$$

Definindo então como na próxima equação.

$$\mathbf{x}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ \cdot \\ x_n(t) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \begin{bmatrix} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \vdots \\ \cdot \\ f_n(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) = \begin{bmatrix} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n; u_1, u_2, \dots, u_r; t) \end{bmatrix}, \mathbf{u}(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \\ \vdots \\ u_r(t) \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Sendo assim, as equações acima se tornam:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (2.12)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) \quad (2.13)$$

Se as funções vetoriais \mathbf{f} ou \mathbf{g} envolverem explicitamente a variável t , então o sistema será dito variante no tempo. [7]

Se as equações forem linearizadas em torno do estado de operação, resultam as seguintes equações lineares para o estado e para a saída na equação a seguir:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{u}(t) \quad (2.14)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}(t)\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}(t)\mathbf{u}(t) \quad (2.15)$$

Onde $\mathbf{A}(t)$ é determinada a matriz do sistema, $\mathbf{B}(t)$ a matriz de entrada, $\mathbf{C}(t)$ considerada como a matriz de saída, por fim, $\mathbf{D}(t)$ a matriz de transmissão direta. [7]

Para o caso em que \mathbf{y} seja a única saída e \mathbf{u} a única entrada. As transformadas de Laplace das equações são:

$$s\mathbf{X}(s) = \mathbf{A}\mathbf{X}(s) + \mathbf{B}\mathbf{U}(s) \quad (2.16)$$

$$\mathbf{Y}(s) = \mathbf{C}\mathbf{X}(s) + \mathbf{D}\mathbf{U}(s) \quad (2.17)$$

Onde \mathbf{B} é uma matriz $n \times 1$. Nota-se que nesta ocasião não foram incluídas condições iniciais, pois neste momento procura-se a função de transferência do sistema. Reordenando a equação 2.16, obtém-se:

$$(sI - A)X(s) = BU(s) \quad (2.18)$$

Como $[sI - A]^{-1} = \varphi(s)$, tem-se

$$X(s) = \varphi(s)BU(s) \quad (2.19)$$

Substituindo-se $X(s)$ na equação 2.17 resulta em:

$$Y(s) = C\varphi(s)BU(s) + DU(s) \quad (2.20)$$

Portanto a função de transferência $G(s) = Y(s)/U(s)$ é:

$$G(s) = C\varphi(s)B + D \quad (2.21)$$

3. A EMPRESA

Conforme publicação no site Eletrobrás Eletronuclear, a criação da empresa ocorreu no ano de 1997, com o objetivo de construir e operar usinas termonucleares. A Eletronuclear é uma empresa de valor agregado mista a Eletrobrás e responde pela geração aproximada de 3% da energia consumida no Brasil. Através do sistema elétrico interligado no país, essa energia se destina aos altos centros de consumo e corresponde a mais de 30% da energia consumida no Rio de Janeiro.



Figura 11 - Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto [9]

Atualmente está em operação a usina Angra 1 desde 1985, que possui capacidade para gerar 640 megawatts, e Angra 2 desde 2001, de 1350 megawatts. Angra 3 será praticamente réplica de Angra 2, incorporando os avanços tecnológicos ocorridos desde a construção da usina de Angra 2, tem previsão de gerar 1405 megawatts. [9]

3.1. SEGURANÇA

Apesar do funcionamento das usinas nucleares serem complexas, não oferecem risco se operadas com a segurança necessária. A Eletronuclear tem como princípio fundamental sua Política de Gestão Integrada da Segurança que diz: "A

Segurança Nuclear é prioridade e precede a produtividade e a economia, não devendo em hipótese alguma ser comprometida por qualquer razão”. [9]

A Eletrobrás Eletronuclear se orgulha de ter uma Cultura de Segurança alinhada com os princípios que direcionam a sua Política de Segurança e busca de forma contínua divulgá-la entre seus empregados e colaboradores. Mais de 20 anos gerando energia nuclear, as usinas em Angra, nunca provocaram nenhum acidente ou evento indesejado que pusesse em risco os trabalhadores, a população ou o meio ambiente. Na figura 12 segue exemplo de como é realizada uma inspeção de segurança. [9]



Figura 12 - Inspeção de Segurança [9]

3.2. TREINAMENTO

Os indicadores de desempenho das usinas, têm relação direta com a capacitação técnica dos colaboradores e empregados da Eletrobrás Eletronuclear.

Um moderno centro de treinamento instalado na Vila Residencial de Mambucaba (localizada no município de Paraty) conta com locais apropriados para o ensino prático de tarefas de manutenção e com um simulador (Figura 13) que reproduz a sala de controle de Angra 2, onde são treinados, além dos operadores da empresa, operadores de usinas estrangeiras. [9]



Figura 13 - Sala de Controle [9]

3.3. PLANO DE EMERGÊNCIA

As usinas nucleares têm vários sistemas redundantes para segurança, que impossibilitam a liberação de radiação para o meio ambiente, protegendo a saúde e a integridade física de todos os funcionários e da população que vive nas suas proximidades. Ainda assim, existe um plano de emergência externo que, por sua vez, abrange uma área com raio de quinze quilômetros em torno da CNAAA. Esse plano, que envolve diversas organizações, contempla a necessidade de evacuação organizada devido a isso, periodicamente são feitos exercícios para testes e melhorias do plano. [9]

3.4. REJEITO

A indústria nuclear é uma das poucas movimentações com intervenção humana que tem habilidade para controlar, por inteiro, os rejeitos que produz. Devido às particularidades do material radioativo, a empresa controla e armazena em tempo integral os rejeitos gerados nas usinas de Angra. [9]

Os rejeitos são apontados de acordo com seu teor de radioatividade. Nas usinas, os rejeitos classificados como de baixo teor de radioatividade são materiais empregados na operação das usinas, como sapatilhas, luvas, roupas especiais. Depois de coletados e separados, tais materiais passam por um sistema de descontaminação no intuito de reduzir seus níveis de radioatividade. Alguns materiais são triturados e prensados, para redução de espaço e acondicionados em recipientes que impedem a fuga da radiação. [9]

Os resíduos de médio teor de radioatividade, compostos de filtros, efluentes líquidos solidificados e resinas são acondicionados em uma matriz sólida de cimento, sendo mantidos dentro de recipientes de aço apropriados. [9]

Com o passar do tempo, esses materiais perdem sua radioatividade, porém até lá, deve ser o mesmo encapsulado e armazenado em depósitos isolados e monitorados. [9]



Figura 14 - Rejeitos Nucleares [9]

3.5. COMBUSTÍVEL USADO

Os rejeitos de alta radioatividade, são os elementos combustíveis utilizados na geração de energia termonuclear. Por permitir o reaproveitamento no futuro, depois de reprocessados, não chegam a ser considerados propriamente rejeitos. Enquanto isso, os elementos combustíveis já utilizados para geração de energia

permanecem armazenados em piscinas especiais (Figura 15) acomodadas nos prédios de segurança das usinas. [9]

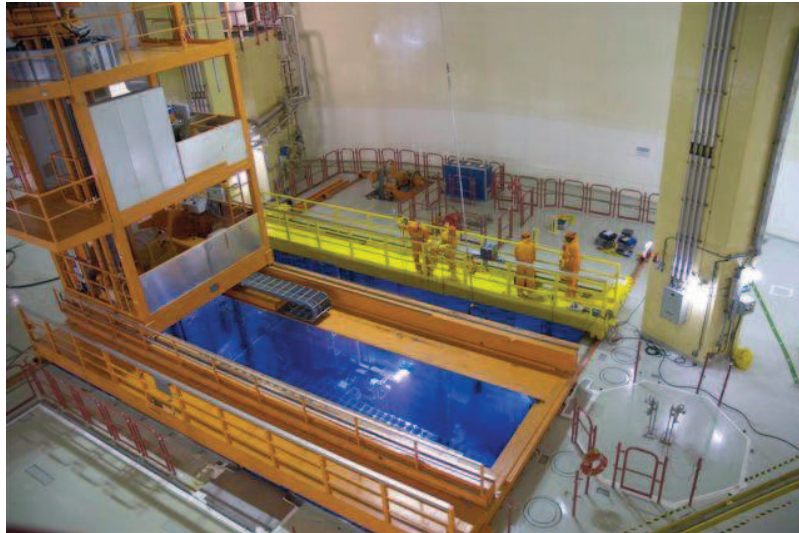


Figura 15 - Piscina de combustível [9]

3.6. ENERGIA VERDE E RESPONSABILIDADE SOCIAL

A energia de origem nuclear é hoje uma das formas de geração de eletricidade em larga escala, que causa um menor impacto ao meio ambiente. Usinas nucleares funcionam em áreas relativamente pequenas, não liberam gases, que provocam aquecimento da atmosfera, sendo todos os seus resíduos são mantidos em instalações com constante monitoramento. A indústria nuclear, surgiu antes do Protocolo de Kyoto, mas com os mesmos princípios de respeito e compromisso com o meio ambiente.

A empresa Eletrobrás Eletronuclear, consciente de suas responsabilidades sociais, investe em educação, saúde, saneamento básico, conservação de estradas, restauração do patrimônio histórico, aparelhamento dos órgãos de segurança nos municípios de proximidade a sua área de influência. [9]

4. O PROJETO

4.1. ESCOPO DO PROJETO

A empresa ELETROBRÁS ELETRONUCLEAR S.A. é mantenedora de vilas para a moradia de seus funcionários. Para o abastecimento de água, é feito captação em nascentes próximas. Em uma de suas vilas está ocorrendo problemas quanto ao sistema, pois este excede o valor de operação estabelecido pela empresa de 52 m³/h de vazão.

A estação de tratamento de água possui um sistema de captação para que se possa realizar o tratamento desta água e, logo após a distribuição da água tratada. Esta captação é outorgada pelo INEA que estabelece através do seu consumo, o quanto a empresa pode retirar em m³/h do manancial do local.

Atualmente o sistema de abastecimento de água é totalmente manual, sendo da parte de captação de água até o tratamento feito para classificação da qualidade da água a ser fornecida para os moradores.

O sistema em questão possui vários pontos para melhoria, porém, o ponto analisado é a captação e abastecimento de água. Com isso, vale expor os elementos analisados que são:

- ✓ Nível de reservatório;
- ✓ Vazão de entrada na ETA;
- ✓ Vazão de saída na ETA.

Como mencionado anteriormente, o sistema é totalmente manual, então abaixo está o diagrama de blocos atual na Figura 16.

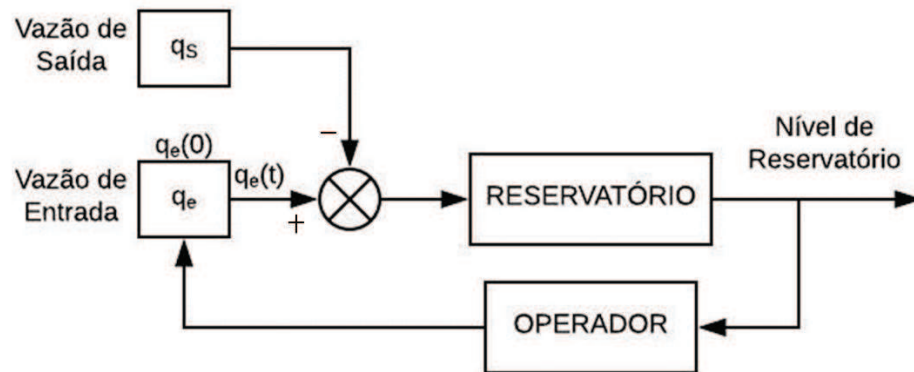


Figura 16 - Situação Atual do Sistema [10]

Mostrado na figura acima, de acordo com a vazão de entrada, o reservatório terá alteração de nível. Este nível será observado pelo operador que fará a devida regulagem da válvula de entrada para alterar o fluxo de água. Com isso, a figura 17 mostra como é feito a leitura de nível de reservatório.



Figura 17 - Operador Verificando nível do reservatório [11]

Com a Figura 17 pode ser observado como é feito a análise do tanque, com a Figura 18 a seguir é possível verificar as marcações de nível no tubo guia do reservatório.



Figura 18 - Marcações de Nível de Reservatório [11]

Continuando, para a verificação da vazão de entrada, o operador precisa observar um display de um medidor de fluxo ultrassônico como mostra a seguir na Figura 19



Figura 19 - Display do Medidor de Fluxo Ultrassônico de entrada [11]

Assim como na entrada, a saída do reservatório possui um medidor de fluxo ultrassônico onde o operador pode verificar a vazão de consumo da vila mostrado na figura 20.



Figura 20 - Medidor de Fluxo Ultrassônico de Saída [11]

Sendo assim, para que se possa aumentar a confiabilidade do sistema além de não depender apenas da ação do operador quando acontecer alguma situação adversa, esta pesquisa visa a automatização da ETA, porém, como *start-up* para isto, optou-se em começar pela modelagem do sistema para conhecer seu comportamento.

Para isso é necessário ter alguns conhecimentos prévios para tal ação. O processo requerido pela pesquisa será mostrado a seguir, assim poderá ser analisado o quê de fato a pesquisa trata a fundo.

Além da modelagem matemática, a presente pesquisa visa controlar a vazão de entrada na válvula principal, permanecendo então dentro dos limites de operação da empresa, através de simulações do sistema real.

Sendo assim, espera-se que a vazão permaneça dentro do “range” de outorga sem que o nível do reservatório baixe de maneira significativa e falte água para os moradores da vila.

4.2. MODELAGEM DO SISTEMA

Para se conseguir êxito na automatização do sistema proposto, é preciso conhecer as variáveis relacionadas para que se possa então modelar o sistema e a partir daí, realizar os ajustes dos parâmetros de controle.

4.2.1. DADOS ANALISADOS

Para realizar a modelagem, primeiramente é necessário selecionar os dados a serem observados para conhecer o comportamento do sistema. Os dados analisados são aqueles que influenciam o processo de abastecimento e consumo da água do reservatório. Tais variáveis precisam ser estudadas, analisando os efeitos de cada uma delas no processo de controle. Sendo assim, a forma com que será feita a modelagem matemática está exposta na Figura 21 a seguir.

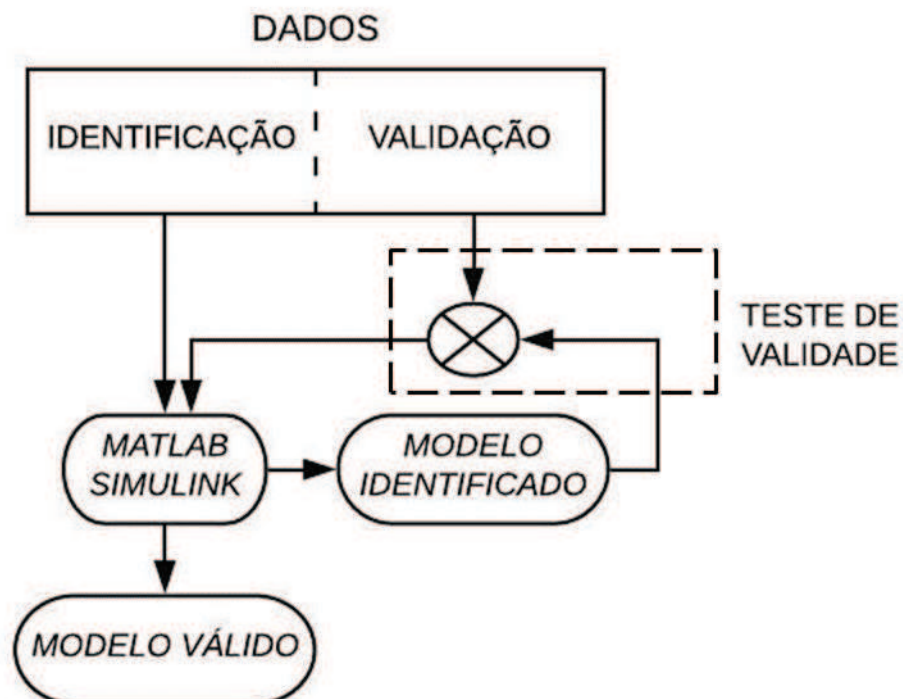


Figura 21 - Diagrama da Obtenção do Modelo Matemático [10]

Dessa forma, primeiramente se obtém os dados de identificação para a análise do *Matlab*, feito isso, após o modelo identificado, serão realizados alguns testes e comparados com dados de validação que são diferentes da identificação. Caso o erro entre os resultados do modelo identificado e os dados de validação estiver dentro de tolerância aceitável, então o modelo estará validado.

De maneira geral, pela equação de conservação de massa, tudo que entra em um sistema deverá sair em um determinado momento como mostra na equação a seguir.

$$\frac{dm}{dt} = \varphi_e - \varphi_s \quad (4.1)$$

Sendo que:

$$\varphi = \frac{\rho \cdot V}{t} \quad (4.2)$$

$$m = \rho \cdot V \quad (4.3)$$

Então, com base na equação 4.1, através das equações 4.2 e 4.3 obtém-se a equação 4.4 abaixo:

$$\rho \frac{dV}{dt} = \frac{\rho \cdot V_e}{t} - \frac{\rho \cdot V_s}{t} \quad (4.4)$$

Sabendo que:

$$V = A \cdot h \quad (4.5)$$

$$q = \frac{V}{t} \quad (4.6)$$

Obtém-se então a equação 4.7 que dita quais variáveis devem ser analisadas no sistema.

$$A \frac{dh}{dt} = q_e - q_s \quad (4.7)$$

Sendo assim, as principais variáveis analisadas para a obtenção do modelo de comportamento do sistema foram as seguintes:

- ✓ Vazão de Entrada - q_e
- ✓ Vazão de Saída - q_s
- ✓ Nível do Reservatório - h

Com isso, na figura 22 abaixo, estão expostas estas variáveis a serem analisadas de forma ilustrativa no sistema.

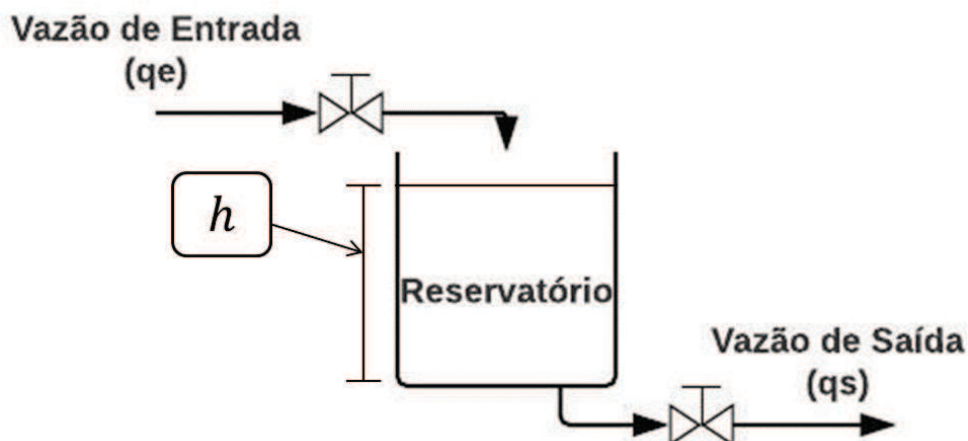


Figura 22 - Descrição do Sistema [10]

A variável vazão de entrada influencia diretamente no nível do reservatório no momento de preenchimento, ou seja, no aumento de nível. Continuando, como na entrada, a variável vazão de saída influencia no nível do reservatório, porém agora, no momento de esvaziamento, ou seja, na diminuição do nível do mesmo. [12]

As variáveis vazão de entrada e vazão de saída, influenciam diretamente a variável nível do reservatório, sendo assim, o que se pretende controlar é o nível

deste reservatório sob o ajuste da variação da vazão de entrada mediante uma vazão de saída variável de acordo com o aumento ou diminuição do consumo da vila ao longo do tempo. [12]

Os dados analisados para a obtenção do modelo matemático foram os expostos acima pois conforme a equação de conservação de massa, estas variáveis que afetam diretamente no funcionamento/operação do reservatório em questão.

4.2.2. OBTENÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

Como auxílio à geração do modelo matemático do sistema utilizou-se o *software Matlab*. Este é um *software* muito utilizado para as seguintes funções: [13]

- ✓ Aprendizagem profunda;
- ✓ Visão computacional;
- ✓ Processamento de sinal;
- ✓ Financiamento quantitativo e gestão de risco;
- ✓ Robótica;
- ✓ Controle de sistemas.

No intuito do exposto acima, vale ressaltar que o ambiente de trabalho deste *software* possui como unidade fundamental de dados, a matriz. Sendo assim, ao iniciar o *MATLAB*, diversas ferramentas para gerenciar arquivos, variáveis e aplicações dentro do *software* ficam disponíveis. As principais ferramentas disponíveis ao abrir o software e que podem ser acessadas são as seguintes: [14]

- ✓ Janela de Comandos;
- ✓ Janela de Histórico de Comandos;
- ✓ Espaço de Lançamento;
- ✓ Janela de Edição/Depuração;
- ✓ Janela de Figuras;
- ✓ Navegador do Espaço de Trabalho e Editor de Matrizes;
- ✓ Navegador de Ajuda;
- ✓ Navegador do Diretório Corrente.

Além de ser um poderoso *software*, o *Matlab* possui uma interface gráfica muito interessante como mostra a Figura 23 e é também bastante utilizado nos cursos de Engenharia.

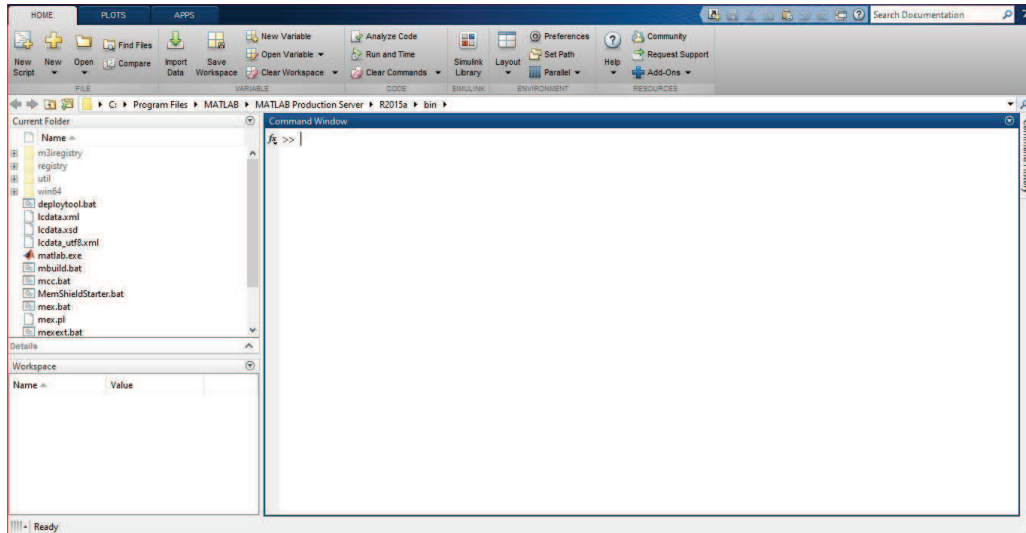


Figura 23 - Interface Inicial do *Matlab* [10]

Prosseguindo com a interface inicial do *software* onde são inseridos os comandos a serem utilizados. Com isso, utilizou-se então o comando *ident*.

4.2.2.1. COMANDO “*ident*”

Este comando permite, através de um console, realizar análises com amostras do sistema. A Figura 24 a seguir mostra a interface inicial do comando *ident*.

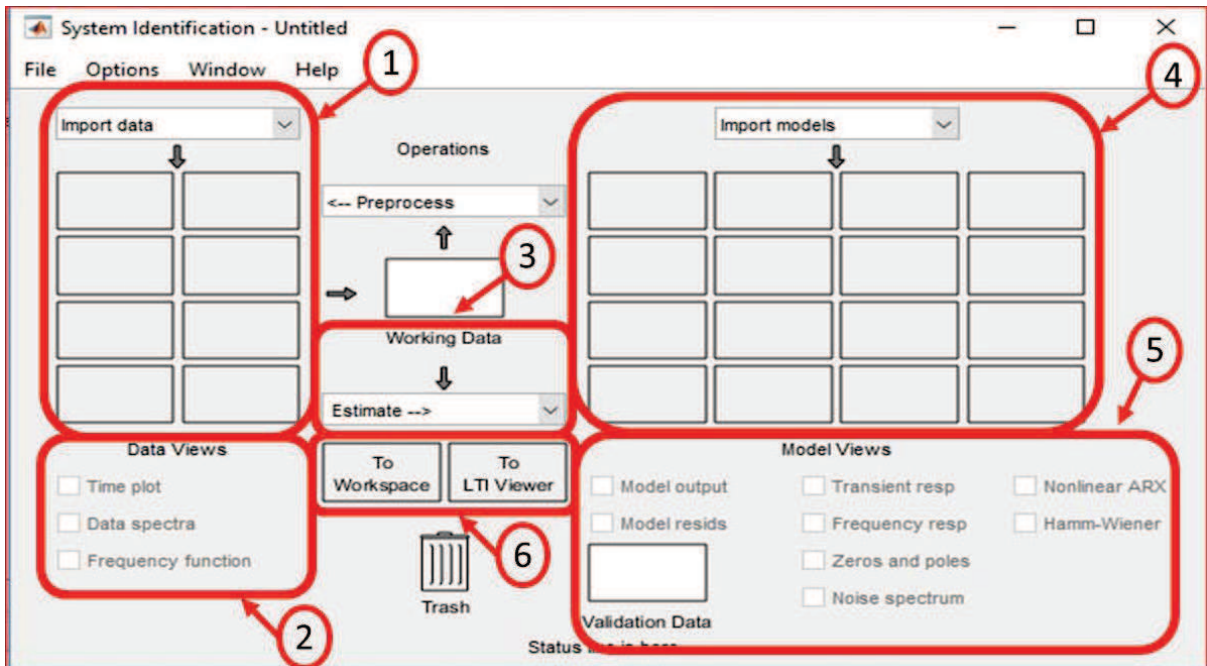


Figura 24 - Interface para Identificação no Matlab [10]

Neste primeiro momento vale ressaltar o que é possível realizar com os dados. Sendo assim, a imagem anterior foi separada em etapas que serão explicitadas a seguir:

- ✓ Etapa 1: Importação dos dados a serem analisados e identificados;
- ✓ Etapa 2: Visualização dos dados importados no domínio do tempo, frequência e em forma espectral;
- ✓ Etapa 3: Forma que se deseja trabalhar os dados importados, seja em função de transferência, espaço de estados e etc;
- ✓ Etapa 4: Local que se localiza a quantidade de modelos gerados e identificados em forma de gráficos de estabilidade do sistema;
- ✓ Etapa 5: Visualização dos modelos gerados e identificados no domínio do tempo, frequência, polos e zeros, e etc.

Através dessa interface inicial é possível importar os dados para que seja ilustrado o comportamento do sistema real analisado. Os dados de importação para a identificação do sistema estão seguindo a equação abaixo.

$$N_n = \frac{Q}{A} + N_{(n-1)} \quad (4.8)$$

Onde:

N_n – Contribuição da vazão em relação ao nível;

Q – Vazão;

$N_{(n-1)}$ – Nível anterior;

A – Área do reservatório (56,25 m²)

Vale ressaltar que a altura máxima do reservatório é de 3,2 metros e que os dados tiveram que ser calculados devido à inconsistência na folha do operador quanto ao nível de reservatório com relação a entrada de água. Sendo assim os valores obtidos para identificação do sistema estão explicitados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3 – Valores Obtidos para Identificação do Sistema [10]

HORA	ALTURA DE COLUNA D'AGUA (m)		
	10 m ³ /h	20 m ³ /h	30 m ³ /h
1	0,1778	0,3556	0,5333
2	0,3556	0,7111	1,0667
3	0,5333	1,0667	1,6
4	0,7111	1,4222	2,1333
5	0,8889	1,7778	2,6667
6	1,0667	2,1333	3,2
7	1,2444	2,4889	-
8	1,4222	2,8444	-
9	1,6	3,2	-
10	1,7778	-	-
11	1,9556	-	-
12	2,1333	-	-
13	2,3111	-	-
14	2,4889	-	-
15	2,6667	-	-
16	2,8444	-	-
17	3,0222	-	-
18	3,2	-	-

Na identificação citada acima, foram consideradas vazão e altura de coluna d'água no reservatório. A Figura 25 a seguir ilustra a interface do comando após a importação dos dados.

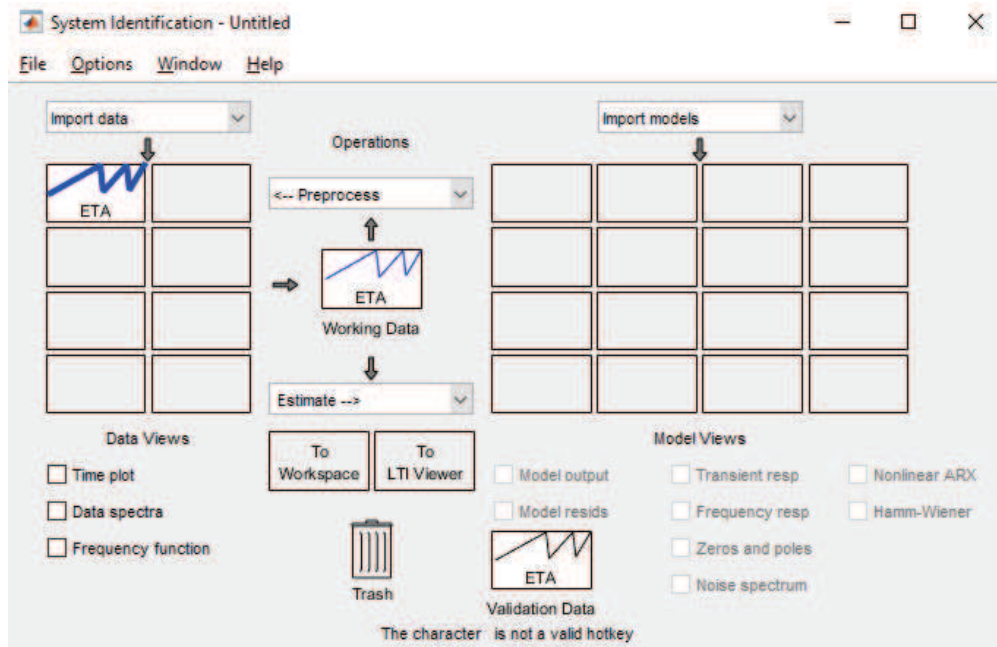


Figura 25 - Importação de Variáveis do Sistema [10]

Continuando, como é um sistema dinâmico monovariável, a modelagem mais indicada é através de função de transferência. Com isso, a Figura 26 apresenta o local da escolha do modelo. [7]

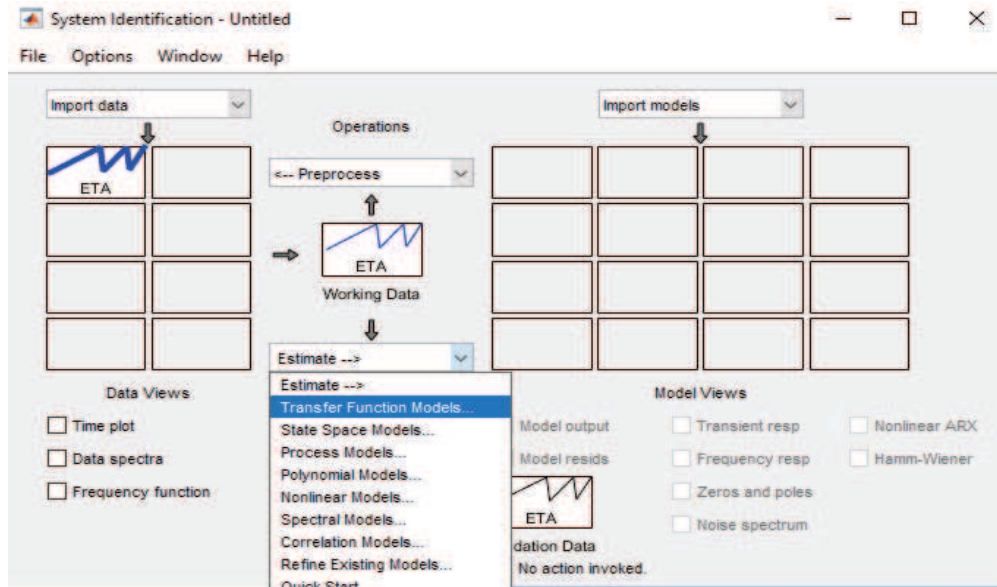


Figura 26 – Processo de Modelagem [10]

Este é um momento crucial para a pesquisa pois escolhe-se a ordem da função a ser trabalhada. Os polos e zeros como citados em capítulos anteriores, influenciam diretamente na estabilidade da função. Sendo assim, existe um ponto ótimo em que o sistema se aproxima do real analisado sem entrar em instabilidade ou oscilação. A próxima figura expõe a interface do comando *ident* após a escolha dos polos e zeros.

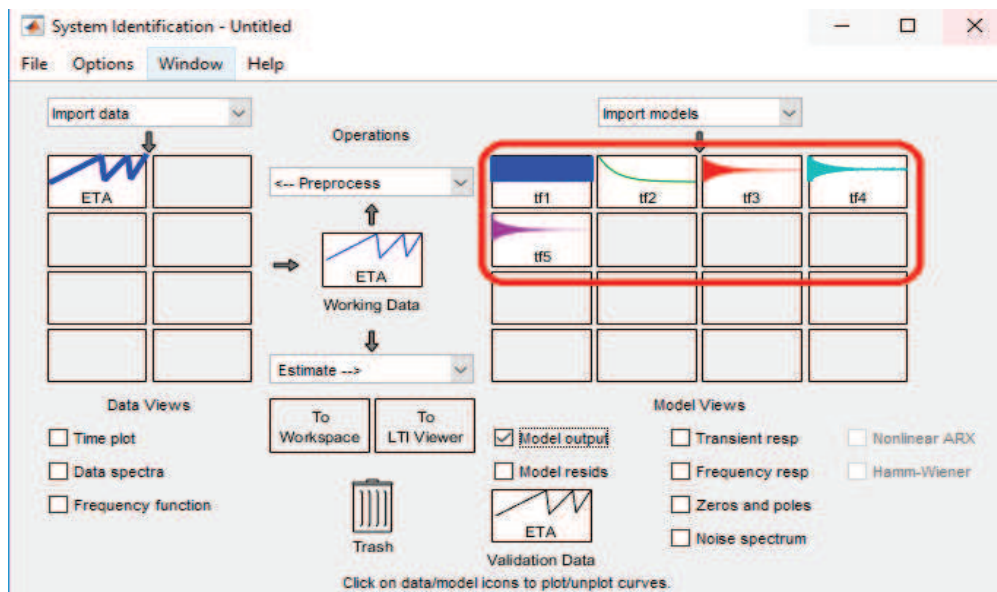


Figura 27 - Escolha do Modelo [10]

Com a figura exposta é possível verificar que foram feitas algumas escolhas de polos e zeros para que seja exemplificado a aproximação do sistema.

Por fim, se pode analisar a função modelada para que se tenha uma aproximação do sistema real. Sendo assim, a figura 28 apresenta o local onde se faz as escolhas de resposta da modelagem adquirida.

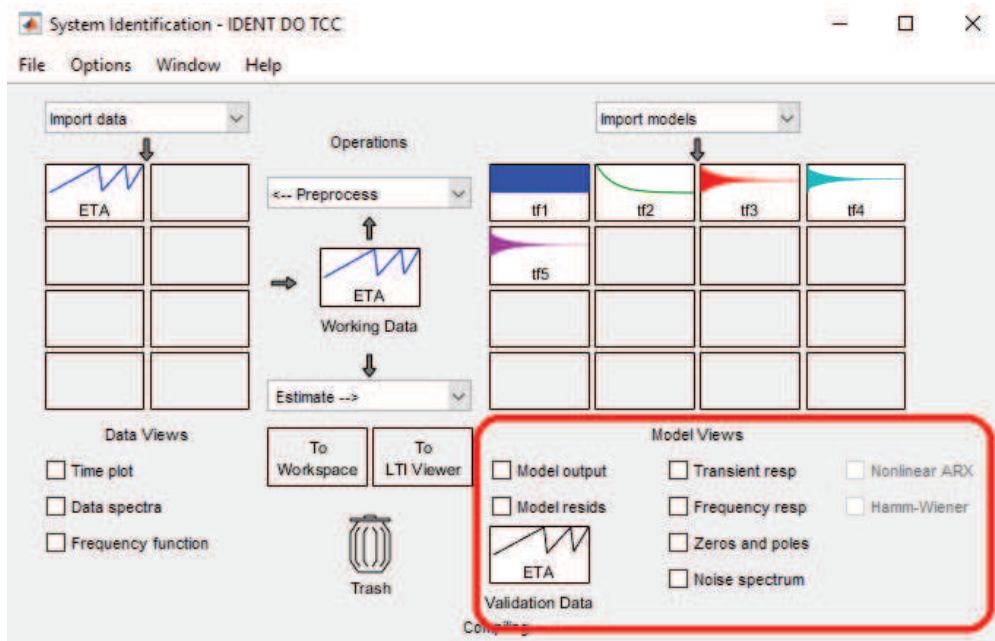


Figura 28 - Visualizador de Resposta dos Modelos [10]

Através do comando *ident*, após a escolha dos polos e zeros, é possível realizar a verificação da modelagem. Com isso, a figura 29 a seguir mostra a aproximação de cada modelo encontrado com as escolhas feitas com elevação de grau gradativo e em ordem crescente até que se chegue no modelo ideal de 6 polos e 5 zeros.

Na Figura 29, o termo “tf” significa *transfer function* pois a escolha foi feita a partir de função de transferência devido ao fato de o sistema possuir apenas uma entrada e uma saída. Este termo “tf” é acompanhado de um número que é a sequência na qual foi escolhido os polos e zeros da equação para se obter a melhor aproximação do sistema sendo representada através de percentual ao lado de cada “tf”. Com isso, quanto maior o percentual, mais próxima a modelagem se encontra do sistema real.

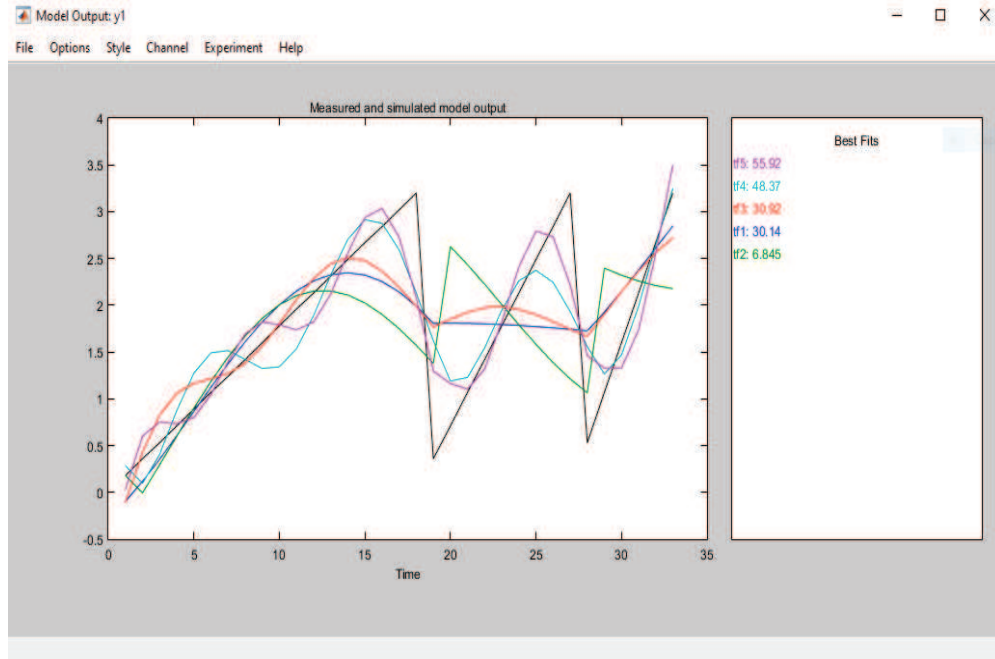


Figura 29 - Resposta dos Modelos Identificados [10]

Como pode ser observado na equação (4.9), a aproximação mais adequada ao sistema real é com 6 polos e 5 zeros. Por esse motivo, ela exibe o modelo matemático encontrado através desta escolha.

$$\frac{0,06767s^5 - 0,01841s^4 + 0,05484s^3 - 0,003611s^2 + 0,009843s + 0,0002032}{s^6 + 0,2313s^5 + 0,993s^4 + 0,121s^3 + 0,2509s^2 + 0,00289s + 0,005685} \quad (4.9)$$

O comando *ident* permite que a saída do sistema seja analisada conforme a entrada, mostrando em porcentagem de aproximação. Sendo assim, a figura 30 apresenta a aproximação feita pelo comando com o modelo escolhido.

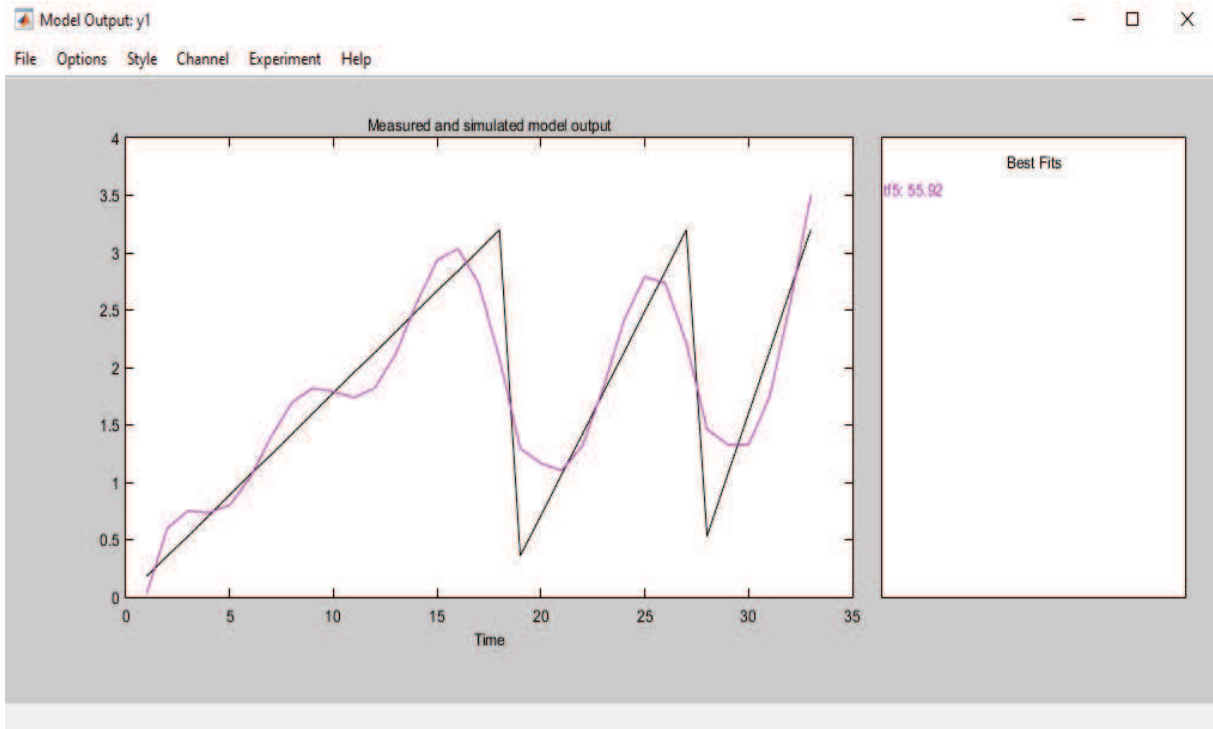


Figura 30 - Aproximação do Modelo Escolhido [10]

Após realizada a aproximação do sistema, verificou-se que era aceitável o modelo identificado, sendo que a curva na cor preta mostra o sistema real. Assim, foi dado continuidade no processo de simulação do controle do sistema da ETA, pois o modelo matemático se aproximou bastante do sistema real.

4.3. DIAGRAMA DE BLOCOS DO MODELO IDENTIFICADO

Após todas as considerações anteriormente expostas para realização da modelagem do sistema, o modelo escolhido precisa ser estruturado e ajustado, para então poder de fato corresponder às expectativas do funcionamento pretendido de automatização.

Com o uso do *Simulink*, uma ferramenta do *Matlab* que permite realizar a montagem do sistema em Blocos, é então gerado o diagrama conforme figura 31 a seguir, onde as funções de transferência expostas são representações do sistema com entrada em vazão e saída em altura de coluna d'água.

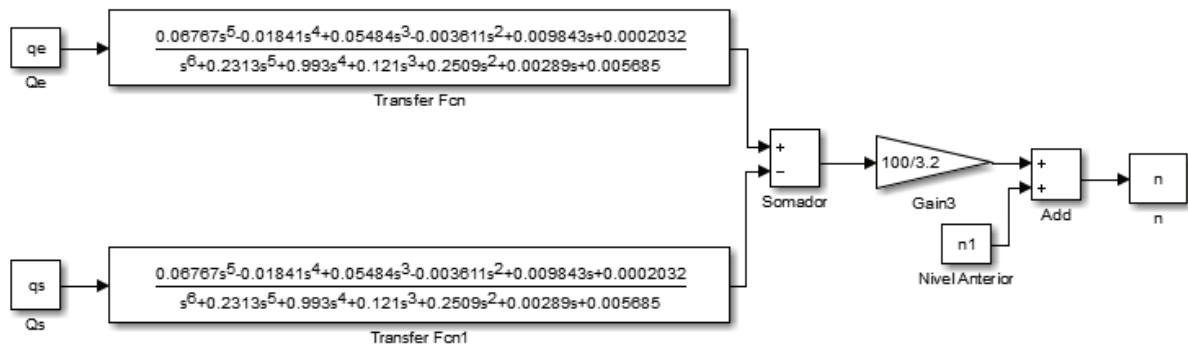


Figura 31 - Diagrama de Blocos do Sistema [10]

Como pode ser visto na figura 31, a forma como é realizado o diagrama de blocos, respeita as condições previamente observadas nos dados analisados demonstrados em equações anteriormente.

Para melhor entendimento do diagrama na figura 31, nos blocos iniciais Q_e e Q_s , correspondem as vazões de entrada e saída, respectivamente, do reservatório. Estas vazões poderão ser escolhidas livremente para simular as condições calculadas de funcionamento do sistema real.

Conforme [15], o bloco “*Transfer Fcn*” na mesma figura 31, é onde foi inserido o modelo matemático escolhido para o sistema, seguidas de um somador, para realizar a subtração do nível em relação as vazões. A vazão de entrada Q_e possui uma representatividade no nível de reservatório positiva e ao contrário desta, a vazão de saída Q_s possui uma negativa. Vale destacar que na modelagem, o nível está relacionando as vazões simultaneamente, pois ao mesmo tempo que o tanque é abastecido, ocorre também o consumo por parte dos moradores na vila.

Em concordância com o exposto acima, com entrada de vazão e saída em altura de coluna d’água na função de transferência, faz-se necessário um ajuste para conversão do nível de reservatório em porcentagem para melhor visualização e posteriormente validação do modelo matemático, sendo assim foi utilizado um ganho após o somador onde o numerador representa o percentual de 100% e o denominador a altura máxima de coluna d’água que é 3,2 metros. Com isso, após o

ganho, o sistema estará sendo representado em percentual de nível real de acordo com entrada q_e e saída q_s do sistema.

Por fim, o último bloco é a captura do nível gerado, onde a seguir será exposto o ajuste do diagrama a partir dos dados obtidos.

4.3.1. VALIDAÇÃO DO MODELO IDENTIFICADO

A validação do sistema é de grande importância, pois caso não se alcance valores satisfatórios, dependendo do quanto esses valores não se aproximem do esperado, é necessário que todo o processo de criação do modelo matemático seja refeito, realizando novas análises concernentes ao histórico de medições das variáveis estudadas, ou até mesmo reanálise de quais variáveis serão usadas no processo de criação do novo modelo.

Para validação do sistema, foi estimada a altura da coluna de água do reservatório mediante as vazões de entrada e saída. Essa estimativa é possível devido às informações, de medida, exatas do reservatório.

O reservatório possui uma área fixa de $56,25 \text{ m}^2$, sendo as vazões de entrada e saída variáveis entre 0 a $100 \text{ m}^3/\text{h}$. Dessa maneira pode-se realizar o seguinte cálculo:

$$N_e = \frac{Q_e}{A} + N_0 \quad (4.10)$$

$$N_s = \frac{Q_s}{A} + N_0 \quad (4.11)$$

$$\Delta N = N_e - N_s \quad (4.12)$$

Onde:

ΔN – Variação de Nível a partir da entrada e saída do sistema

N_e - Contribuição da Entrada em relação ao Nível

N_s - Contribuição da Saída em relação Nível

N_0 - Nível Anterior

Q_e - Vazão de Entrada

Q_s - Vazão de Saída

Com base nas equações 4.10, 4.11 e 4.12, pode-se gerar a seguinte tabela:

Tabela 4 – Cálculo para Validação de Sistema [10]

Q_e (m ³ /h)	50	65	85	70	50	40
N_e (m)	0,8889	1,1556	1,5111	1,2444	0,8889	0,7111
Q_s (m ³ /h)	30	10	50	60	45	25
N_s (m)	0,5333	0,1778	0,8889	1,0667	0,8000	0,4444
ΔN (m)	0,3556	0,9778	0,6222	0,1778	0,0889	0,2667

Com a Tabela 4, pôde ser visto a variação de nível em relação a entrada e saída do sistema em cada caso para posteriormente ser validado na simulação feita na Figura 32.

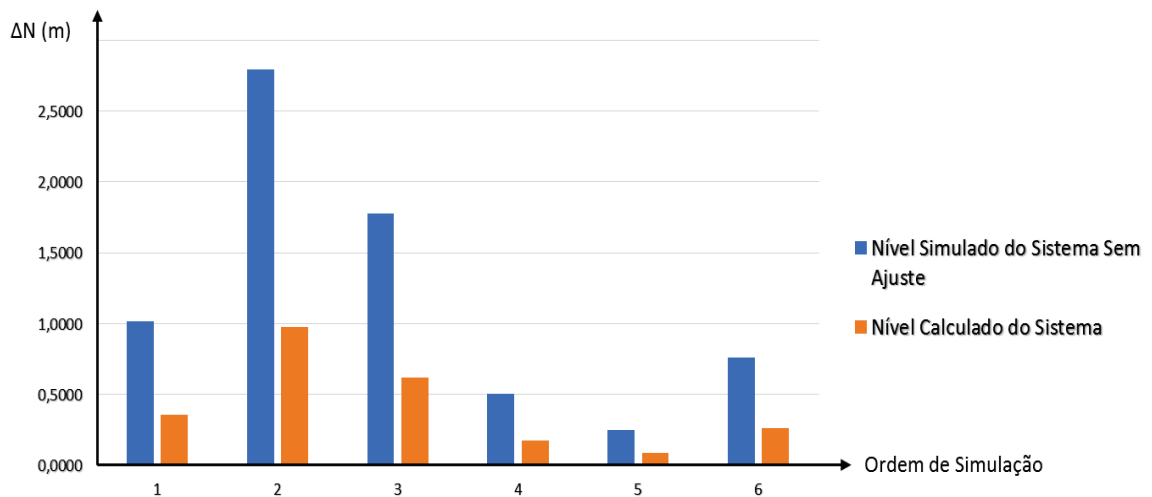


Figura 32 - Análise de Erro do Sistema Identificado [10]

A figura 32 deixa claro que o sistema precisa de algum ajuste para que a resposta do sistema se aproxime dos valores base do sistema real. Com isso, a seguir será mostrado o ajuste feito para tal.

4.3.2. AJUSTE/REFINAMENTO DO MODELO IDENTIFICADO

Como mencionado anteriormente, após a elaboração diagrama de blocos do sistema, precisa-se efetuar os devidos ajustes para que os resultados obtidos tenham maior aproximação do sistema desejado.

Durante os testes para ajuste foi encontrada a necessidade de ser adicionado um ganho às vazões de entrada e saída por serem notadas perdas devido a modelagem possuir uma amostragem sem transitórios. Este ganho foi encontrado empiricamente após alguns testes de simulação. Logo o sistema criado no *Simulink* sofreu uma alteração, conforme figura 33.

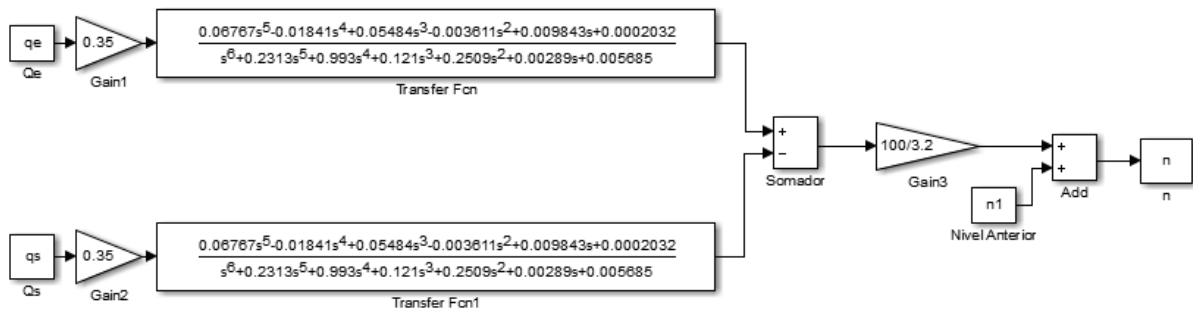


Figura 33 - Diagrama de Blocos com Ganho [10]

Com o ajuste acima, notou-se que o sistema apresenta uma resposta satisfatória, com uma aproximação de 99,87%. No tópico seguinte será exposto os cálculos para que através de teste no *Simulink*, chegou-se ao valor de ganho ideal na forma de tentativa e erro.

4.3.3. VALIDAÇÃO DO MODELO IDENTIFICADO AJUSTADO

O cálculo para validação do sistema identificado foi o mesmo, porém a resposta do sistema está exposta seguir na Tabela 5.

Tabela 5 – Resposta da Simulação do Sistema [10]

Q_e (m ³ /h)	50	65	85	70	50	40
N_e (m)	0,8891	1,1560	1,5110	1,2450	0,8891	0,7113
Q_s (m ³ /h)	30	10	50	60	45	25
N_s (m)	0,5334	0,1778	0,8891	1,0670	0,8002	0,4445
ΔN (m)	0,3557	0,9782	0,6219	0,1780	0,0889	0,2668

Para todos os valores de entrada e saída de vazão informados ao sistema, obteve-se os resultados esperados, provando que o sistema modelado simula satisfatoriamente o funcionamento real com um erro máximo de 0,1248% conforme pode-se observar na Tabela 6 a seguir:

Tabela 6 - Cálculo do Erro Aparente [10]

N Calculado (m)	0,3556	0,9778	0,6222	0,1778	0,0889	0,2667
N Simulado (m)	0,3557	0,9782	0,6219	0,1780	0,0889	0,2668
Erro (%)	0,0406	0,0432	-0,0518	0,1248	0,0125	0,0500

4.4. CONTROLE PROPOSTO

Após realizar a validação do sistema, faz-se necessária a inserção do controle proposto para tal. Sendo assim, a Figura 34 a seguir ilustra o diagrama de blocos da proposta de controle.

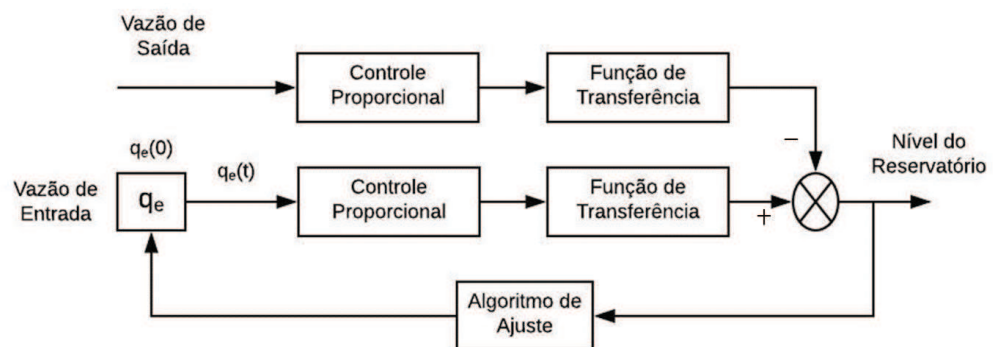


Figura 34 - Proposta de Controle Automático do Sistema [10]

Com esta proposta, a vazão de entrada que possui um *setpoint* será imposta ao sistema, passando pelo controle proporcional e a função de transferência chegando pelo lado positivo do somador pois sua contribuição é positiva em relação ao nível. A vazão de saída, por sua vez, passa pelo controle proporcional e função de transferência chegando ao somador pelo lado negativo devido sua influência ao nível. Após a compensação das vazões sob o nível, este será retornado no algoritmo de ajuste por meio da retroação para que a vazão de entrada seja ajustada e retornada ao sistema.

Ainda como forma de proposta de controle, a seguir na Figura 35 está sendo ilustrado o diagrama de instrumentação do mesmo sistema.

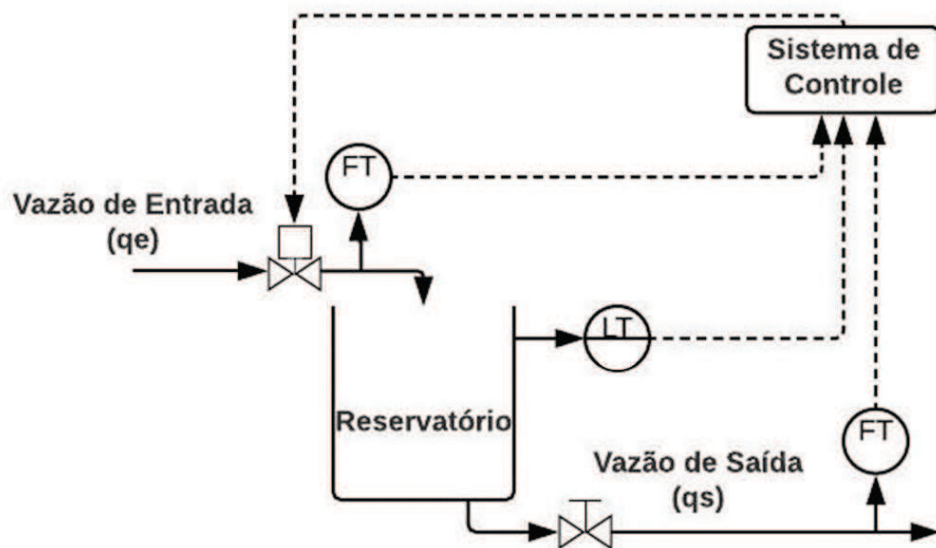


Figura 35 - Diagrama de Instrumentação da Proposta de Controle Automático [10]

Esta proposta com diagrama de instrumentação segue o diagrama de blocos sendo que neste, é ilustrado os valores de nível de reservatório e vazões de entrada e saída sendo inseridos no sistema de controle sendo que a saída do sistema é o ajuste a ser compilado na válvula motorizada para regulagem da vazão de entrada.

4.4. COMANDO “*guide*”

Segundo [13], o comando “*guide*” permite através de um console montar um painel de execução de tarefas diversas. Relacionado ao estudo proposto, foi utilizado pra criação de um display, onde é possível entrar com valores de vazão de entrada e saída do sistema e nível, no intuito de simular e obter-se a resposta do controle realizado no modelo anteriormente gerado.

Ao digitar no *Matlab* o comando “*guide*”, será exibido a seguinte tela:

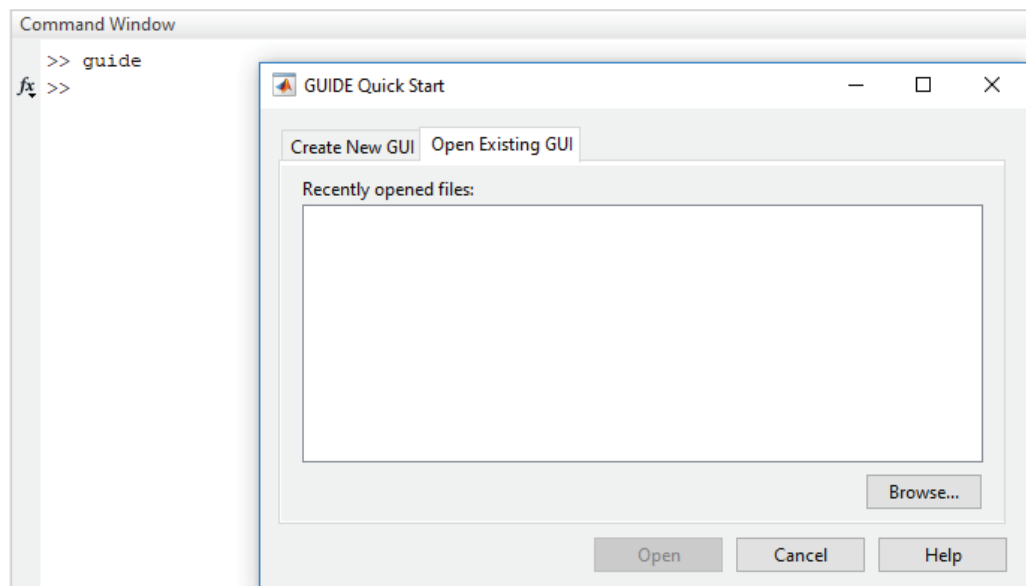


Figura 36 - Comando “*guide*” [10]

Na figura 36, é possível criar um novo painel ou realizar buscas de algum painel criado anteriormente através do *browser*. A figura 37 mostra o console onde é criado o painel desejado, de acordo com a necessidade de quem está projetando.

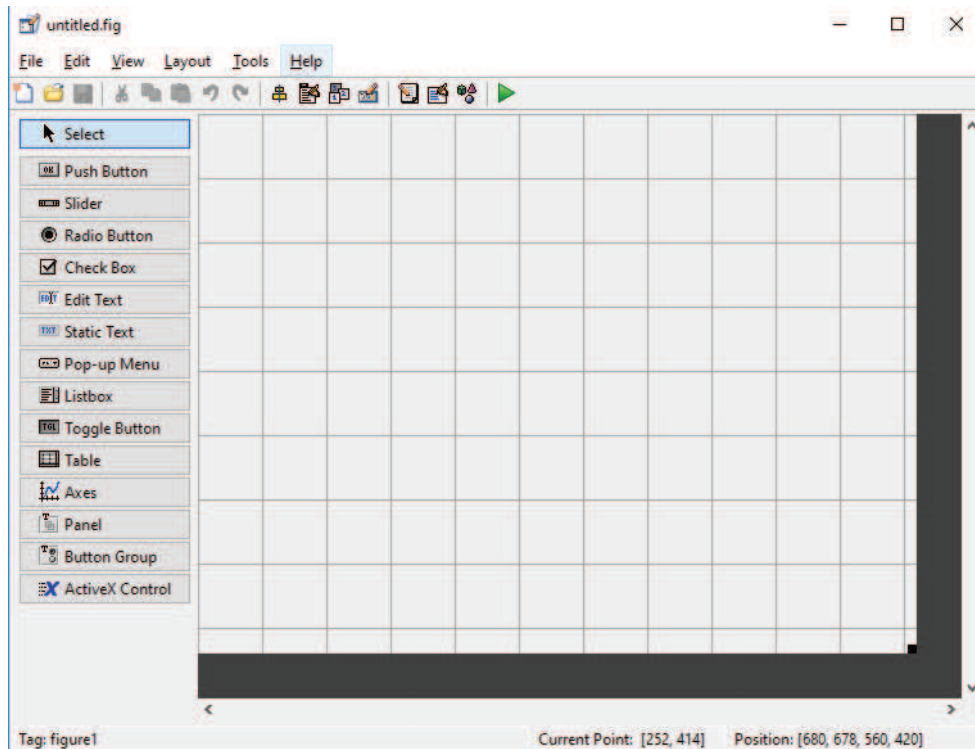


Figura 37 - Estrutura de Construção do Painel [10]

Com relação a estruturação do painel, destaca-se alguns elementos importantes para elaboração do *display* desejado. Existem elementos diversos que nos permitem realizar comandos, exibir gráficos, dentre outras funções. Esses elementos estão disponíveis para construção na lateral esquerda do modo de desenvolvimento. Para construção do Painel em questão utilizou-se os seguintes elementos:

- ✓ *Push Button* – Elemento que permite executar ações com cliques sob o mesmo. É possível atribuir um algoritmo com comandos a serem realizados com o acionamento do mesmo. [13]
- ✓ *Edit Text* – Através do *edit text* é possível criar campos para digitação de informações. Dependendo do objetivo que desejar, poderá importar para um sistema, números, textos ou até mesmo expressões matemáticas para os fins cabíveis. No projeto utilizou-se o elemento em questão, para importar valores de vazão e nível. [13]

- ✓ *Static Text* – Muito utilizado para referenciar/descrever informações do painel de uso do sistema. São textos estáticos que estarão visíveis sempre que desejar no *display*. [13]
- ✓ *Axes* – O elemento permite gerar gráficos de estimativas criadas internamente na configuração do painel. Através do comando *plot*, por exemplo, pode-se exibir resultados de variáveis manipuladas. [13]

Após a elaboração do painel adequado ao projeto, chegou-se a seguinte estrutura apresentada na Figura 38, onde permite simular quaisquer situações no reservatório e assim obter-se a resposta da automatização sugerida ao sistema estudado.

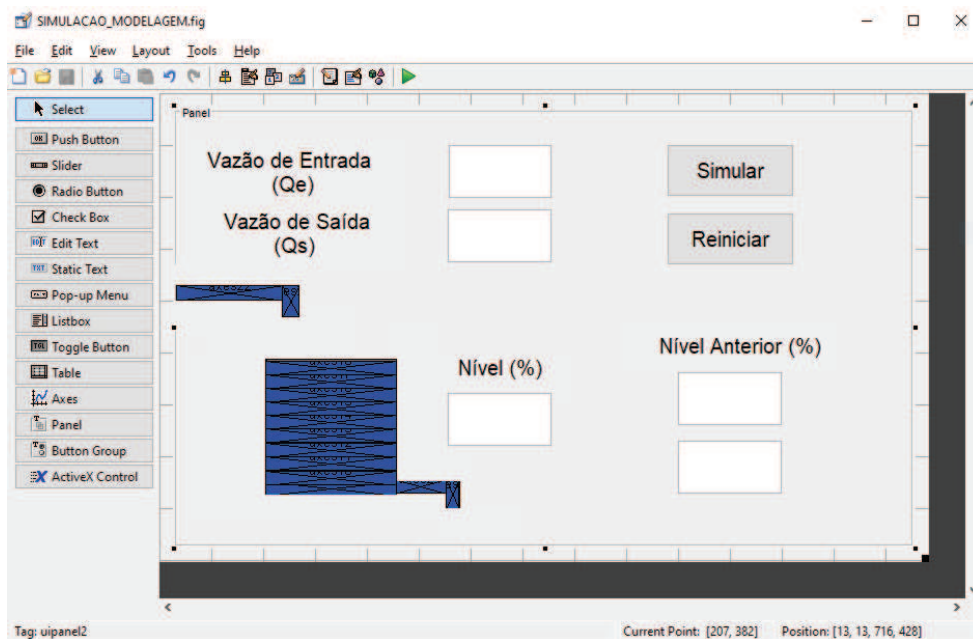


Figura 38 - Painel Montado [10]

O display em questão conta internamente com uma lógica de programação que informa, ao sistema, os valores inseridos, simula no diagrama de blocos e com os resultados obtidos entra em estruturas de condição, onde de acordo com o estado lido, toma uma determinada ação, afim de regular o abastecimento do reservatório mantendo um monitoramento contínuo.

Esse resultado é explicitado no display, mostrando a ação tomada e o nível atual do reservatório após o ajuste. Juntamente a isso, é exibido também no display o histórico do nível anterior do reservatório.

A seguir é exibido, na figura 39, o painel de simulação em funcionamento na etapa inicial.

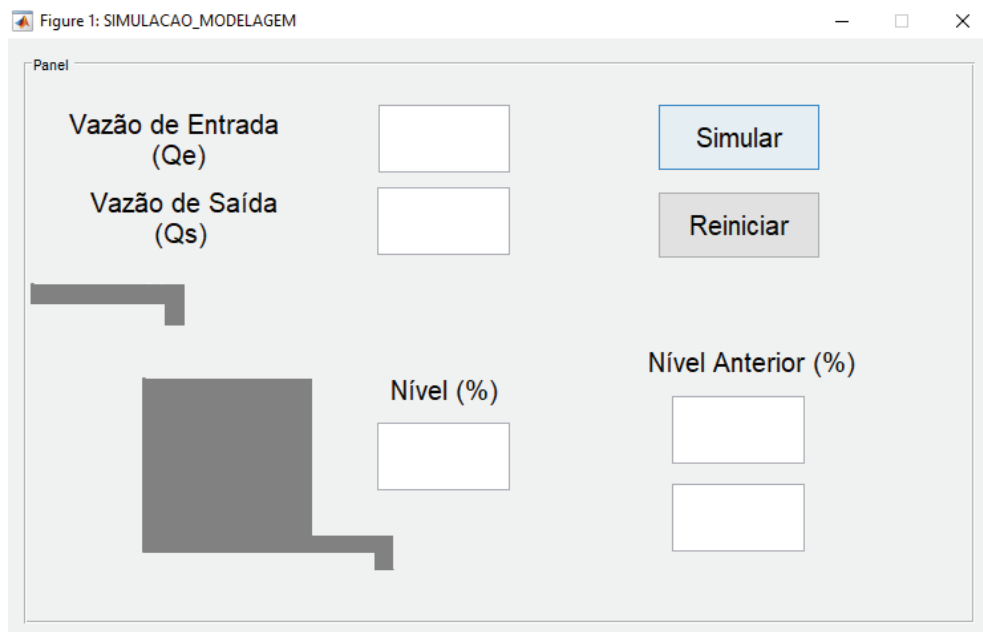


Figura 39 - Painel de Simulação em Funcionamento [10]

Conforme dito anteriormente, para que os elementos usados respeitem a necessidade do sistema, é necessário que se crie um algoritmo. Com isso, será explicitado alguns fragmentos da elaboração do algoritmo e então explicado ponto a ponto.

O fragmento a seguir foi retirado da parte inicial do algoritmo, com a intenção de capturar o valor numérico digitado em uma *EditText* no painel de operação para variável “qe”, destinada a receber o valor de vazão de entrada. Para isso o comando *get* é responsável por essa captura e o comando *str2num* faz a conversão do carácter digitado em número. Como forma de associação dos comandos usados no elemento para que seja realizado na variável em questão foi utilizado o comando *handles*.

```
qe = str2num(get(handles.qe, 'string'));
```

O comando *assignin* é responsável por “escrever” o valor digitado atribuído à variável “qe” no *workspace* do *Matlab*. Dessa maneira é possível que a variável seja acessada através do diagrama de blocos, que é executado em segundo plano com a modelagem gerada para o sistema. Este comando é mostrado a seguir.

```
assignin('base', 'qe', qe);
```

A linha de comando *load_system* é responsável por carregar em segundo plano o diagrama de blocos que contém a modelagem do sistema a ser executada. A linha seguinte de comando, está efetivamente executando a simulação dos dados obtidos no diagrama de blocos através do *Simulink*.

```
load_system('SIMULACAO_COMPLETA_FASE_ALFA');
sim('SIMULACAO_COMPLETA_FASE_ALFA');
```

É importante informar que, o *Simulink* só irá conseguir trabalhar com as variáveis informadas se as mesmas estiverem no *workspace*. Sem isso, o *Simulink* não identificará as variáveis informadas, tornando impossível realizar a simulação.

O *set* é utilizado para se realizar atribuição. No caso acima ele atribui à *textbox* “qe” o valor obtido em “qee”, ou seja, no painel de simulação ele mudará o valor que está sendo exibido ou o valor que foi digitado anteriormente, pelo valor atribuído com uso do comando *set* como ilustrado abaixo.

```
set(handles.qe, 'string', qee);
```

A variável “qee” e “qss” na programação, são utilizadas para armazenar o valor máximo da vazão de entrada e saída respectivamente.

Por fim, pode-se exibir o algoritmo desenvolvido para que o sistema realize algumas condições de acordo com a necessidade simulada. Com isso, no bloco de lógica a seguir, está sendo realizada as condições para que o sistema seja regulado ao máximo de tempo possível no limite de operação de 52 m³/h estabelecido pela empresa.

Então, na estrutura de condição abaixo, está sendo realizado primeiramente a observação do nível do reservatório. Neste caso, se o reservatório estiver com determinado nível, fechará a válvula de entrada.

Após isso, o algoritmo analisa se o nível está acima de 85%. Se estiver nesta condição, a estrutura fará outra análise, porém, agora com a vazão de saída. Após a análise da condição exposta abaixo, o algoritmo ajusta a vazão de entrada.

```
if nn >= 98
    qe = [0 0];
else
    if nn >= 85
        if qsi < 52
            qe = qs;
        else
            qe = [0 52];
        end
    else
        qe = qs * 1.10;
    end
end
```

Onde:

- “nn” é o nível em percentual a ser verificado para ações dispostas na estrutura de condição;
- “qs” é a vazão de saída do sistema em m³/h;
- “qsi” é a vazão inicial em m³/h;
- “qe” é a vazão de entrada em m³/h.

Em conformidade com o algoritmo acima, a figura 40 abaixo expõe em um diagrama para melhor entendimento.

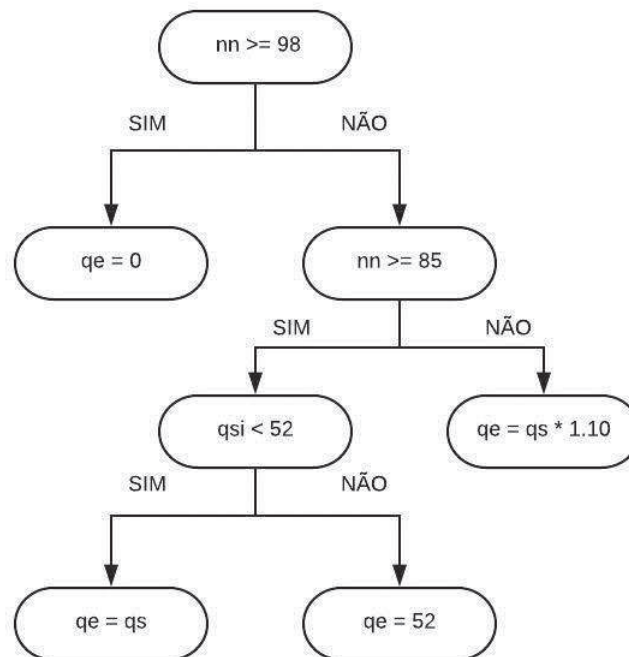


Figura 40 - Diagrama do Algoritmo de Condição [10]

Com esse algoritmo, o sistema mantém a vazão de entrada e nível de reservatório em um range satisfatório para o sistema, seguindo sempre as especificações da empresa.

4.4.1. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Com o término do desenvolvimento do sistema de simulações através do *Matlab*, para fins de verificar que a automatização executará operações satisfatórias, realizou-se testes em situações variadas de funcionamento, com o intuito de observar se ainda haveria algum ajuste a ser considerado no projeto.

Abaixo segue valores simulados no sistema desenvolvido para que se possa obter a resposta e realizar análise das condições de operação.

Tabela 7 - Valores Primeira Simulação [10]

Q_e (m ³ /h)	10
Q_s (m ³ /h)	90
N (%)	80

Na primeira simulação realizada, os valores das variáveis estão de acordo com a tabela 7. Pode-se observar que a vazão de entrada é mais baixa do que a vazão de saída. A intenção deste caso é simular um aumento de consumo de forma extremamente crítica.

Através da primeira simulação, tem-se então a Figura 41 como resposta do sistema ajustando a vazão de entrada e variando o nível de reservatório.

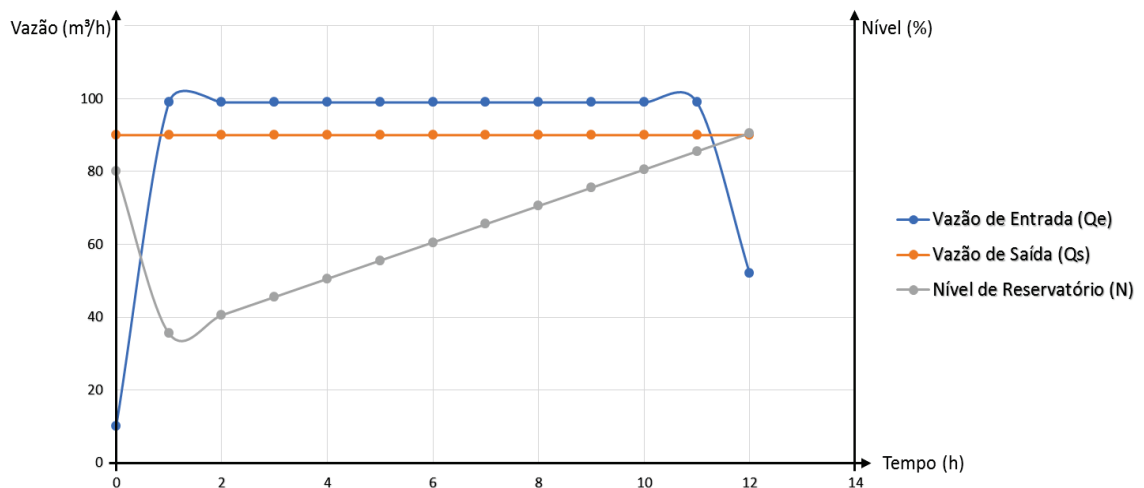


Figura 41 - Resultados da Primeira Simulação [10]

Com base na tabela 7, observa-se então que devido ao consumo extremamente alto, para que não ocorra a falta de água no reservatório. O sistema abriu a válvula que regula a vazão de entrada até atingir um nível de tanque de 90,56%. No algoritmo, isto é considerado nível alto de tanque e assim ajusta a vazão para 52 m³/h.

Caso o consumo não diminua, o nível de reservatório vai diminuir pois a vazão foi ajustada no nível alto. Assim que o nível sair da condição de elevado, a vazão será ajustada para 10% maior que o consumo da vila como mostrado no

algoritmo anteriormente. O sistema realizará ajustes mantendo a estabilidade de nível de reservatório para que não haja falta de água para os consumidores.

Vale lembrar que essa manobra de redução da vazão de entrada e monitoramento ao longo do tempo é uma situação desejada, pois se pretende manter esta vazão dentro do limite de operação sempre que possível.

Na segunda simulação realizada, os valores iniciais de simulação estão na tabela 8 abaixo.

Tabela 8 - Valores Segunda Simulação [10]

Q_e (m ³ /h)	70
Q_s (m ³ /h)	50
N (%)	42

Nesta simulação, pretende-se exibir o funcionamento do reservatório em uma situação oposta, quando o consumo reduz em um determinado instante e se tem a vazão de entrada superior a vazão de saída sendo o nível do reservatório próximo a metade da capacidade.

Como primeiro ajuste realizado pelo sistema, conforme Figura 42, a vazão de entrada foi reduzida para 55 m³/h, permanecendo 10% acima da vazão de saída, permitindo dessa maneira que o nível do reservatório aumente gradativamente.

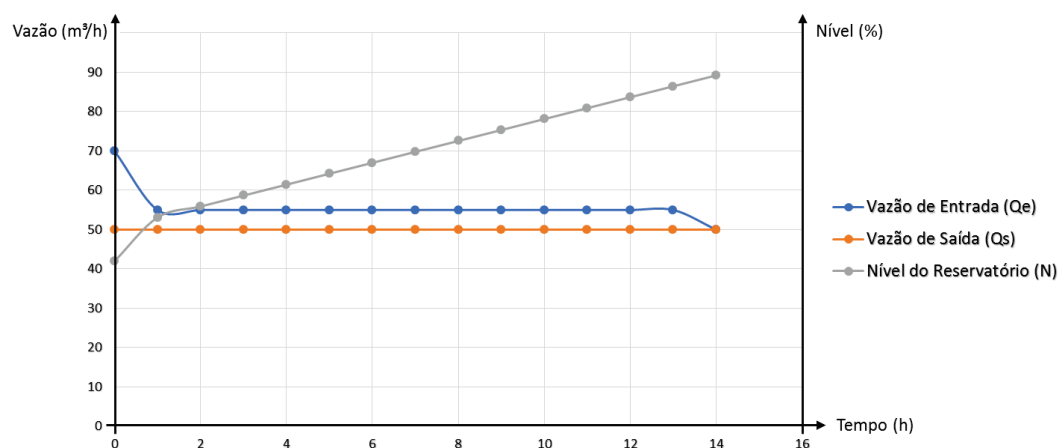


Figura 42 - Resultados Segunda Simulação [10]

O sistema manteve a vazão anteriormente ajustada até o momento em que o reservatório chega ao nível considerado alto. A partir de então, é reajustada a vazão de entrada igual a vazão de saída, diferente da primeira simulação realizada, onde o consumo é crítico e pretende-se manter uma vazão de entrada controlada, dentro dos limites de operação estipulados.

Na segunda simulação, a vazão de entrada se iguala a de saída devido ao fato de a vazão de consumo estar abaixo de $52 \text{ m}^3/\text{h}$. Logo pode-se permitir um nível de vazão mais baixo mantendo o reservatório no nível de 89,23%, que é considerado alto, ao mesmo tempo mantendo a vazão de entrada o mais baixo possível em situações normais de operação.

5. CONCLUSÃO

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de modelagem de sistema possui uma gama de vertentes a serem exploradas, porém, sempre com o objetivo de encontrar um modelo matemático que se aproxime ao máximo do sistema real. Sendo assim, esta pesquisa procurou mostrar a modelagem matemática de um sistema de abastecimento de água em uma das vilas residenciais mantidas pela empresa Eletrobrás Eletronuclear.

Contudo, para tal feito, procurou-se por algumas ferramentas que auxiliam nesta pesquisa. Com isso, foi então utilizado o *software MATLAB* que realiza diversas manobras matemáticas relacionando conceitos complexos do dia a dia do engenheiro.

Para melhor expor o resultado obtido pela pesquisa realizada, este projeto contou com a utilização do comando *guide*. Com este comando foi possível executar um algoritmo em segundo plano conjugado com o plugin do *MATLAB*, *Simulink*, com o diagrama de blocos, que demonstrou o funcionamento real do sistema em questão.

Por fim, após diversos testes, foi possível chegar à conclusão de que o sistema pode ser modelado e controlado com conhecimentos de engenharia de sistemas de controle. Não obstante, é oportuno ressaltar que o objetivo da pesquisa foi alcançado com êxito, sendo possível realizar a implementação do sistema em campo utilizando dispositivos eletroeletrônicos que realizam o envio e recebimento de sinais para um microprocessador capaz de realizar o algoritmo criado e as devidas ações nas condições atuais do sistema.

5.2. PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o estudo de modelagem de sistemas e o conhecimento adquirido durante a pesquisa para realização do projeto em questão, surgiu a certeza da possibilidade de implementação da automatização do sistema em questão.

Como proposta para trabalhos futuros, esta pesquisa oferece a automatização, sendo necessária a cotação dos equipamentos eletroeletrônicos para o sistema e a escolha do envio/recebimento dos sinais no microprocessador escolhido na proposta futura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DRAPINSK, J, **Hidráulica e Pneumática Industrial e Móvel**. São Paulo, Editora McGraw Hill, 1977.
- [2] LIMA, J. L. M., **Avaliação Experimental de um Controlador Fuzzy em um Sistema Eletro-Hidráulico**. Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014
- [3] FIALHO, A. B, **Automação Hidráulica**. São Paulo, Editora Érica Ltda, 6ª Edição, 2013.
- [4] Disponível em: www.smar.com. Acesso em: 18 de Abril de 2018.
- [5] Disponível em: www.citisystems.com.br. Acesso em 20 de Novembro de 2018.
- [6] MACINTYRE, A. J, **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro, Editora LTC S.A. 2ª Edição
- [7] OGATA, K, **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro, Editora LTC S.A. 3ª Edição.
- [8] DORF, R. C. e BISHOP, R. H., **Sistemas de Controle Modernos**. Rio de Janeiro, Editora LTC S.A. 8ª Edição.
- [9] Disponível em: www.Eletronuclear.gov.br. Acesso em: 16 de Junho de 2018.
- [10] CASTRO, R. F. E. e LIMA, R. R. F, **Proposta de Modelagem, Identificação e Simulação de Sistema Hidráulico Utilizando o Software Matlab**. Rio de Janeiro, 2018.
- [11] ELETRONUCLEAR, **Guia Rápido de Operação ETA de Praia Brava**. Rio de Janeiro, 2018.
- [12] FOX, R. W. e PRITCHARD, P. J. e McDONALD, A. T., **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. Rio de Janeiro, Editora LTC S. A. 7ª Edição, 2010.
- [13] HANSELMAN, D. e LITTLEFIELD, B., **Matlab 6 Curso Completo**. São Paulo, Editora Pearson Prentice Hall. 2003.
- [14] CHAPMAN, S. J., **Programação em MATLAB para Engenheiros**. São Paulo, Editora CENGAGE Learning. 2009.
- [15] MATSUMOTO, E. Y., **Guia Prático Simulink 7.2**. São Paulo, Editora Érica Ltda. 1ª Edição, 2008.

ANEXO A

TABELA DE TRANSFORMADAS DE LAPLACE		
	$f(t)$	$F(s) = L \{f(t)\} = \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt$
1	1	$\frac{1}{s}$
2	$t^n \ (n=1,2,\dots)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
3	$t^p \ (p>-1)$	$\frac{\Gamma(p+1)}{s^{p+1}}$
4	e^{at}	$\frac{1}{s-a}$
5	$e^{at}t^n \ (n=1,2,\dots)$	$\frac{n!}{(s-a)^{n+1}}$
6	$\sin bt$	$\frac{b}{s^2 + b^2}$
7	$\cos bt$	$\frac{s}{s^2 + b^2}$
8	$\sinh bt$	$\frac{b}{s^2 - b^2}$
9	$\cosh bt$	$\frac{s}{s^2 - b^2}$
10	$e^{at}\sin bt$	$\frac{b}{(s-a)^2 + b^2}$
11	$e^{at}\cos bt$	$\frac{s-a}{(s-a)^2 + b^2}$
12	$u(t-c)$	$\frac{e^{-cs}}{s}$
13	$u(t-c)f(t-c)$	$e^{-cs}F(s)$
14	$t \sin at$	$\frac{2as}{(s^2 + a^2)^2}$

15	$t \cos at$	$\frac{s^2 - a^2}{(s^2 + a^2)^2}$
16	$\sin at - at \cos at$	$\frac{2a^3}{(s^2 + a^2)^2}$
17	$\sin at + at \cos at$	$\frac{2as^2}{(s^2 + a^2)^2}$
18	$\int_0^t f(t-\tau)g(\tau)d\tau$	$F(s)G(s)$
19	$\delta(t-c)$	e^{-cs}
20	$f^{(n)}(t)$	$s^n F(s) - s^{n-1}f(0) - \dots - f^{(n-1)}(0)$
21	$t^n f(t)$	$(-1)^n F^{(n)}(s)$
22	$f(t+T)=f(t)$	$\frac{\int_0^T e^{-st} dt}{1 - e^{-sT}}$

APÊNDICE A

```

function varargout = SIMULACAO_MODELAGEM(varargin)
% SIMULACAO_MODELAGEM MATLAB code for SIMULACAO_MODELAGEM.fig
%     SIMULACAO_MODELAGEM, by itself, creates a new SIMULACAO_MODELAGEM or
raises the existing
%     singleton*.
%
%     H = SIMULACAO_MODELAGEM returns the handle to a new
SIMULACAO_MODELAGEM or the handle to
%     the existing singleton*.
%
%     SIMULACAO_MODELAGEM('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls
the local
%     function named CALLBACK in SIMULACAO_MODELAGEM.M with the given
input arguments.
%
%     SIMULACAO_MODELAGEM('Property','Value',...) creates a new
SIMULACAO_MODELAGEM or raises the
%     existing singleton*. Starting from the left, property value pairs
are
%     applied to the GUI before SIMULACAO_MODELAGEM_OpeningFcn gets
called. An
%     unrecognized property name or invalid value makes property
application
%     stop. All inputs are passed to SIMULACAO_MODELAGEM_OpeningFcn via
varargin.
%
%     *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
instance to run (singleton)".
%
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES

% Edit the above text to modify the response to help SIMULACAO_MODELAGEM

% Last Modified by GUIDE v2.5 11-Oct-2018 19:57:20

% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @SIMULACAO_MODELAGEM_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @SIMULACAO_MODELAGEM_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

```

```

% --- Executes just before SIMULACAO_MODELAGEM is made visible.
function SIMULACAO_MODELAGEM_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles,
varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to SIMULACAO_MODELAGEM (see VARARGIN)

% Choose default command line output for SIMULACAO_MODELAGEM
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% UIWAIT makes SIMULACAO_MODELAGEM wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = SIMULACAO_MODELAGEM_OutputFcn(hObject, eventdata,
handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function qe_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to qe (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of qe as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of qe as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function qe_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to qe (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function qs_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to qs (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of qs as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of qs as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function qs_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to qs (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%         See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on slider movement.
function slider1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of
slider

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on slider movement.
function slider2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'Value') returns position of slider
%         get(hObject,'Min') and get(hObject,'Max') to determine range of
slider

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function slider2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to slider2 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: slider controls usually have a light gray background.
if isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor',[.9 .9 .9]);
end

% --- Executes on button press in pushbutton1.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)

qe = str2num(get(handles.qe,'string'));
qs = str2num(get(handles.qs,'string'));
n = str2num(get(handles.n,'string'));

nn = n;
qei = qe;
qsi = qs;

qe=[0 qe];
qs=[0 qs];
n=[0 n];
assignin('base','qe',qe);
assignin('base','qs',qs);
assignin('base','n',n);

if nn >= 98
    qe = [0 0];
else
    if nn >= 85
        if qsi < 52
            qe = qs;
        else
            qe = [0 52];
        end
    else
        qe = qs * 1.10;
    end
end

load_system('SIMULACAO_COMPLETA_FASE_ALFA');
sim('SIMULACAO_COMPLETA_FASE_ALFA');
assignin('base','qe',qe);
assignin('base','qs',qs);
assignin('base','n',n);
assignin('base','nf',nf);

a = nf;

if qei > qsi
    nv = max(a);
else
    nv = min(a);
end

```



```

                                end
                            end
                        end
                    end
                end
            end

a = get(handles.n1,'string');
set(handles.n2,'string',a);
set(handles.n1,'string',nn);

% hObject    handle to pushbutton1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

function n_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to n (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of n as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of n as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function n_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to n (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%       See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function n1_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to n1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of n1 as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of n1 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function n1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to n1 (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

```

```

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton3.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
a=get(handles.n,'string')
set(handles.n1,'string',a)
% hObject     handle to pushbutton3 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

function n2_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to n2 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of n2 as text
%       str2double(get(hObject,'String')) returns contents of n2 as a
double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function n2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject     handle to n2 (see GCBO)
% eventdata   reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles     empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%     See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'),
get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in pushbutton4.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
set(handles.qe,'string',[]);
assignin('base','qe',[]);
set(handles.qs,'string',[]);
assignin('base','qs',[]);
set(handles.n,'string',[]);
assignin('base','n',[]);
set(handles.n1,'string',[]);
assignin('base','n1',[]);
set(handles.n2,'string',[]);

set(handles.axes2,'visible','off')
set(handles.axes10,'visible','off')
set(handles.axes11,'visible','off')
set(handles.axes12,'visible','off')
set(handles.axes13,'visible','off')
set(handles.axes14,'visible','off')

```

```
set(handles.axes15,'visible','off')
set(handles.axes16,'visible','off')
set(handles.axes17,'visible','off')
set(handles.axes18,'visible','off')
set(handles.axes22,'visible','off')
set(handles.axes23,'visible','off')
set(handles.axes24,'visible','off')
set(handles.axes25,'visible','off')
```