

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Modelagem e especificação do sistema de controle de velocidade de Bombas Funcionando
como Turbina pelo SISCOV[®] e lógica *Fuzzy*

ROGERIO OTTOBONI

Orientador: **Prof. Dr. Angelo Jose Junqueira Rezek**

Co-orientador: **Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho**

Itajubá/MG

2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

ROGERIO OTTOBONI

Modelagem e especificação do sistema de controle de velocidade de Bombas Funcionando como Turbina pelo SISCOV[®] e lógica *Fuzzy*

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Energia como requisito parcial à obtenção do título de *Mestre em Engenharia da Energia*

Área de concentração: Exploração do uso racional de recursos naturais e energia

Orientador: **Prof. Dr. Angelo Jose Junqueira Rezek**

Co-orientador: **Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho**

Itajubá/MG

2015

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Biblioteca Margareth Ribeiro – CRB_6/1700

C672g

Ottoboni, Rogerio

Modelagem e especificações do sistema de controle do SISCOV através da lógica *Fuzzy* / Rogerio Ottoboni – Itajubá, (MG): UNIFEI, 2015.

122 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, 2015

Orientador: Prof. Dr. Angelo Jose Junqueira Rezek

Co-orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

1. Bombas funcionando como turbina. 2. Sistemas de Controle. 3. Lógica *Fuzzy*. I. Rezek, Angelo José Junqueira. II. Universidade Federal de Itajubá III. Modelagem e especificações do sistema de controle do SISCOV através da lógica *Fuzzy*

CDD 658.5

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

ROGERIO OTTOBONI

Modelagem e especificação do sistema de controle de velocidade de Bombas Funcionando
como Turbina pelo SISCOV[®] e lógica *Fuzzy*

Dissertação aprovada por banca examinadora em 10 de agosto de 2015,
conferindo ao autor o título de *Mestre em Engenharia da Energia*

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Angelo Jose Junqueira Rezek

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho

Profa Dra Adriana Aparecida dos Santos Izidoro

Prof. Dr. José Carlos Grilo Rodrigues

Itajubá/MG

2015

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus pela força de espírito e a luz da sabedoria; aos meus pais, Tereza Maria Ottoboni e Basilio Ottoboni pela educação e valores transmitidos; a minha irmã, Celia Ottoboni pelas orientações e dicas; a minha amada, Letícia Silva pelo amor, incentivo e apoio; e a todos os professores que ajudaram no crescimento profissional durante essa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Tereza e Basilio, por indicar caminhos pelas quais devo trilhar com uma vida íntegra e dedicada ao bem.

A minha irmã Célia, que sempre apoiou e orientou nas minhas escolhas e é minha referência.

A minha amada Letícia, pelo seu amor, carinho, força e dedicação na correção de meu trabalho.

Ao meu orientador Professor Doutor Angelo Jose Junqueira Rezek, por nortear meu trabalho com suas orientações tornando possível a conclusão da dissertação.

Ao meu coorientador Professor Doutor Geraldo Lúcio Tiago Filho, pela oportunidade de realizar essa dissertação.

A todos os professores do curso, que permitiram meu desenvolvimento profissional.

Aos amigos e colegas, que colaboraram de alguma forma nessa caminhada.

EPIGRAFE

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”. (Albert Einstein)

Resumo

OTTOBONI, R. (2015), Modelagem e especificação do sistema de controle de velocidade de Bombas Funcionando como Turbina pelo SISCOV[®] e lógica *Fuzzy*, Itajubá, 122 p. Dissertação (Mestrado) - Engenharia da Energia, Universidade Federal de Itajubá.

A utilização de Bombas Funcionando como Turbinas - BFT e motores de indução como geradores para o aproveitamento de micro recursos hidroelétrico têm grandes vantagens devido ao baixo custo, disponibilidade e bom funcionamento e podem fornecer energia elétrica a comunidades rurais isoladas por meio do aproveitamento de pequenos recursos naturais. Uma dificuldade que se tem para seu uso é o controle da velocidade do rotor quando há variação das cargas. Uma das formas de se obter isso é o controle de vazão aduzida ao rotor com o uso de um obturador. O objetivo deste trabalho é a modelagem de um sistema de controle da rotação da BFT por meio da lógica *Fuzzy* e do uso de obturador cônico inserido na saída do fluxo de água para controlar sua vazão, denominado SISCOV[®]. O sistema de controle composto por microcontrolador programado em linguagem C com o uso de bibliotecas da lógica *Fuzzy* posiciona o obturador por meio de um atuador linear para subir e descer controlando a vazão da água e conseqüentemente a rotação da BFT possibilitando o controle da frequência do gerador em 60 Hz. A automação desse sistema eletromecânico permite a melhora significativa da estabilidade da frequência e da qualidade da energia elétrica fornecida a sistemas isolados.

Palavras-chave: Bomba Funcionando como Turbina – BFT. SISCOV[®]. Sistemas de Controle. Microcontrolador. Lógica *Fuzzy*

Abstract

OTTOBONI, R. (2015), Modeling and specification of pumps speed control system Operating as turbine by SISCOV[®] and Fuzzy logic, Itajubá, 122p. – Msc. Dissertation in Energy Engineering, Federal University of Itajubá.

The use of the pumps as turbine - PAT and induction motors as generators for the use of micro hydropower resources have great advantages due to low cost, availability and proper functioning and can provide electricity to isolated rural communities through the use of small natural resources. One difficulty that has to its use is the control of rotor speed when there is variation of loads. One way to achieve this is to put forward flow control rotor with the use of a shutter at the outlet of the suction tube controlling the flow. This work aims to the development of a rotation control system in pumps as turbine by Fuzzy Logic and by SISCOV[®], it's a conic obturator inserted in the water flow exit to control the water output. This equipment is used attached to small induction generators to provide electric energy to isolated rural communities through the utilization of a few natural resources. The system control is composed by a microcontroller programed in C language with the usage of libraries from Fuzzy Logic, to position the obturator through a linear actuator which allows a frequency in the generator's output approximately to 60 Hz. The automation performed allows significant improvement in the frequency stability and the quality of the electric energy provided to isolated systems.

Keywords — *Pumps As Turbine - PAT. SISCOV[®]. Control system. Microcontroller. Fuzzy Logic.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Produção de energia no mundo entre 1971 a 2011	8
Figura 2.2 - Produção de energia elétrica no mundo entre 1971 a 2011	9
Figura 2.3 - Consumo final por fonte no Brasil.....	9
Figura 2.4 - Oferta de energia elétrica por fonte	10
Figura 2.5 - Bomba centrífuga funcionando como bomba e como turbina.....	12
Figura 2.6 - Bomba Funcionando como Turbina acoplado a um gerador.....	13
Figura 2.7 - Máquina de indução operando em duas frequências diferentes	20
Figura 2.8 – Princípio básico do controlador eletrônico de carga.....	22
Figura 2.9 – Diagrama elétrico do regulador de tensão STATCOM.....	23
Figura 2.10 – STATCOM com bateria.....	23
Figura 2.11 - Controlador generalizado de impedância	24
Figura 2.12 – Diagrama elétrico de controlador com carga de lastro.....	25
Figura 2.13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle de carga.....	25
Figura 2.14 – Forma de onda da corrente de lastro para um de ângulo de fase	26
Figura 2.15 – Diagrama elétrica do controle da carga de lastro por ângulo.....	26
Figura 2.16 – Controlador de cargas ponderadas e as correntes possíveis.....	27
Figura 2.17 – Controlador marca-espaco trifásico.....	27
Figura 2.18 – Elementos de um controlador digital	28
Figura 2.19- Diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação.	29
Figura 2.20 – Resposta a um grau no processo de transição e estabilização.....	30
Figura 2.21 – Diagrama de blocos de um controlador PID.....	33
Figura 2.22 - Curva de resposta em forma de s	34
Figura 2. 23 – Arquitetura de controle <i>Fuzzy</i>	36
Figura 2. 24 – Variável temperatura com seus subconjuntos	37
Figura 2.25 – Função de pertinência triangular.....	37

Figura 2.26 – Função de pertinência trapezoidal.....	38
Figura 2.27 – Função de pertinência gaussiana.....	38
Figura 2.28 - Configuração e relações do controlador <i>Fuzzy</i>	41
Figura 2.29 - Representação gráfica de conjuntos <i>Fuzzy</i>	41
Figura 3. 1 - Estrutura Básica do Sistema de Controle de Vazão (Adaptado).....	45
Figura 3.2 – Circuitos de Ensaio.....	46
Figura 3.3 – Posição do cone x vazão para o ângulo de conicidade $\alpha = 60^\circ$ e 30°	48
Figura 3.4 – Velocidade de Escoamento para ângulo de conicidade de 30°	49
Figura 3.5 - Frequência do gerador em função da potência elétrica gerada.....	50
Figura 5.1 – Posição estimada do obturador para que gerador tenha frequência de 60 Hz (Adaptado).....	62
Figura 5.2 – Zonas de sem e com controle da vazão do SISCOV (Adaptado).....	63
Figura 5.3 – Posição do obturador.....	64
Figura 5.4 – Conjunto BFT acoplado ao gerador indução.....	64
Figura 5.5 – Componentes elétricos do atuador linear.....	65
Figura 5.6 - Posição física das chaves fim-de-curso e do atuador.....	66
Figura 5.7 – Terminais de conexão elétrica do transdutor.....	66
Figura 5.8 - Placa do Arduino UNO.....	67
Figura 5.9 – Placa de circuito impresso de interface.....	67
Figura 5.10 - Diagrama elétrico completo do sistema de controle pela frequência.....	68
Figura 5.11 – Diagrama elétrico regulador de tensão para gerador de indução.....	69
Figura 5.12 – Funções da variável Transdutor.....	70
Figura 5.13 – Funções da variável Setpoint.....	71
Figura 5.14 – Funções da variável Posicao.....	71
Figura 5.15 – Superfície de controle <i>Fuzzy</i>	72
Figura 5.16 – a) Modelo com gerador de sinal. b) Modelo com gerador de degrau.....	72
Figura 5.17 – Diagrama de blocos do sistema de controle.....	73

Figura 5.18 – Rotina para seleção do controle automático ou manual do SISCOV®	73
Figura 5.19 – Rotina para comando manual do SISCOV®	74
Figura 5.20 – Controle automático do SISCOV®.....	77
Figura 5.21 – Rotina de posicionamento do atuador	78
Figura 5.22 – Gráfico de relações entre as grandezas do SISCOV	80
Figura 5.23 – Montagem do sistema de controle.....	80
Figura 6.1 – Forma de onda do degrau de 50 aplicada na entrada	82
Figura 6.2 – Forma de onda do degrau de 60 aplicada na entrada	83
Figura 6.3 – Forma de onda do degrau de 70 aplicada na entrada	83
Figura 6.4 – Forma de onda senoidal na entrada e sua resposta.....	84
Figura 6.5 – Curva do deslocamento do atuador pela variação de tensão na entrada do controlador.....	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Diferenças entre turbinas convencionais e BFT	14
Quadro 2.2 - Regra de Ziegler-Nichols no primeiro método	34
Quadro 2.3 - Regra de Ziegler-Nichols no segundo método	34
Quadro 4.1 - Formas clássicas de classificação da pesquisa do ponto de vista.....	55
Quadro 4.2 - Classificação da pesquisa	57
Quadro 5.1 – Base de regras adotadas	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto	11
Tabela 2.2 – Campo de aplicação das BFTs.....	13
Tabela 2.3 – Velocidade típicas para geradores de indução.....	19
Tabela 3.1 – Condições ótimas da bomba funcionando como turbina.....	47
Tabela 3.2 – Comparação entre zonas sem ação de Controle para 60° e 30°	48
Tabela 3.3 – Comparação entre zonas com ação de Controle para 60° e 30°	49
Tabela 3.4 – Pontos onde o grupo gerador operou com máximo rendimento.....	50
Tabela 5.1 - Relação entre deslocamento, vazão e frequência	62
Tabela 5.2 – Características elétricas do gerador de indução.....	69
Tabela 5.3 – Conjuntos <i>Fuzzy</i> das variáveis.....	70
Tabela 5.4 – Testes com o modelo do controlador <i>Fuzzy</i>	79
Tabela 5.5 – Teste com o circuito controlador na bancada	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BFT – Bomba Funcionando como Turbina

CERPCH – Centro de Referências em Pequenas Centrais Hidrelétricas

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FIS - *Fuzzy Inference System*

IEA – *Internacional Energy Agency*

IGC – *Induction Generator Controller*

LHPCH – Laboratório Hidromecânico de Pequenas Centrais Hidrelétricas

LHDC - Laboratório Hidromecânico Didático Científico

MCH – Micro Centrais Hidrelétricas

ONU – Organização das Nações Unidas

PCH – Pequenas Centrais Hidrelétricas

PID - Proporcional, Integral e Derivativo

SISCOV – Sistema de Controle de Velocidade

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais.....	1
1.1. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo geral	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	4
1.2. Relevância da dissertação	4
1.3. Método de pesquisa	6
1.4. Estrutura do trabalho.....	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. Considerações iniciais.....	8
2.2. Micro e Pequenas Centrais hidrelétricas.....	10
2.3. Bombas funcionando como turbinas.....	12
2.4. Gerador de indução trifásico.....	15
2.4.1. Controle de velocidade do gerador.....	20
2.5. Microcontrolador	28
2.6. Sistemas de controle	29
2.7. Lógica <i>Fuzzy</i>	35
2.6.1. Conjuntos <i>Fuzzy</i>	36
2.6.2. Controlador Lógico <i>Fuzzy</i>	39
2.6.3. Considerações finais.....	43
3. SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE – SISCOV [®]	44
3.1. Considerações iniciais.....	44
3.2. Princípio de funcionamento de SISCOV [®]	44
3.3. Ensaio com o SISCOV [®]	45
3.4. Resultados dos ensaios com o SISCOV [®]	48

3.5.	Considerações finais	51
4	METODOLOGIA DE PESQUISA	52
4.1.	Considerações iniciais.....	52
4.2.	Classificação da pesquisa.....	54
4.3.	Justificativas do método selecionado.....	57
4.4.	Procedimento metodológico adotado.....	58
4.5.	Considerações finais	60
5	MODELAGEM E ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	61
5.1.	Considerações iniciais.....	61
5.1.1.	Estudo do comportamento do SISCOV [®] no controle da vazão	61
5.2.	Especificações elétricas do sistema de controle.....	64
5.2.1.	Regulador de tensão do gerador de indução.....	68
5.3.	Modelagem do controlador Fuzzy com auxílio do MatLab	70
5.4.	Modelagem e implementação do sistema de controle em linguagem C.....	73
5.5.	Coleta de dados	79
5.6.	Considerações finais	81
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS	82
6.1.	Considerações iniciais.....	82
6.2.	Discussão dos resultados	85
6.3.	Considerações finais	85
7	CONCLUSÃO	86
7.1.	Considerações finais	86
7.2.	Recomendações para trabalhos futuros.....	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
	ANEXO A – Tipos de memória	93
	ANEXO B – Microcontrolador ATmega 328 e a biblioteca eFLL	94
	ANEXO C – Software de controle do SISCOV [®]	96

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

O setor energético é um dos pilares estratégicos para qualquer país por ser um fator de competitividade no mercado. A combinação correta entre políticas, novas tecnologias e demandas de energia permitem a geração e consumo mais eficazes o que pode promover o desenvolvimento econômico, propiciar maior qualidade de vida às pessoas e influenciar a produtividade em todas as atividades e, dessa forma, desempenhar um papel decisivo na competição comercial com menor impacto ambiental e garantir a sua disponibilidade aos consumidores.

Um fator relevante no planejamento de políticas na área de energia é o crescimento da população mundial. Segundo projeções da ONU (2012), estima-se que em 2015 a população mundial ultrapassou 7,324 bilhões de pessoas e projeta-se um aumento de quase um bilhão de pessoas até o ano de 2025 quando deve alcançar 8,1 bilhões.

Segundo as diretrizes da Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012-2015 do Governo Federal, que estabelece a política industrial, tecnológica de serviços e de comércio exterior, devem-se aproveitar as oportunidades ambientais e de negócios na área de energia para que o país torne-se fornecedor de tecnologias, bens de capital e serviços associados a essa área com prioridades em petróleo, gás e energias renováveis. Para o Brasil, há uma previsão de aumento de 56% da geração de energia elétrica até 2020 devido ao aumento populacional, seguindo o que acontece em outros países emergentes com a demanda por energia crescente.

As fontes primárias de energia são diversificadas no mundo nas quais a viabilidade de exploração dá-se pela facilidade e quantidades disponíveis em cada região. As principais fontes de energia são o petróleo, gás natural, carvão mineral, biocombustível, nuclear e hidráulica sendo a última responsável por 2,3 % da oferta por fonte, com participação bem inferior ao do petróleo que oferece 36,1%, em 2012 (IEA, 2014). No entanto, no período de 1971 a 2012, a geração de energia elétrica no mundo dobrou, aumentando a demanda por fontes fósseis e uma maior participação de outros tipos. A geração de energia elétrica no mundo teve um grande crescimento das fontes fósseis e uma maior participação de outros tipos de fontes (IEA, 2014).

A energia elétrica pode ser produzida por diversas fontes não renovável ou renovável. Dentre as fontes de energia renovável, estão a bioenergia, geotérmica, das marés, solar, vento e hidrelétrica sendo que a última é uma fonte com base no ciclo natural da água. Essa produção é a mais madura, confiável e de baixo custo entre as tecnologias de geração renováveis disponíveis (BROWN, 2011).

No Brasil, a geração de energia elétrica é considerada predominante a renovável, sendo que, no passado, sua participação de geração hidrelétrica foi de 90%. Hoje, a oferta interna reduziu a 79,3% por razões como a diversificação da matriz elétrica, dificuldades em ofertar novos empreendimentos hidráulicos pela ausência de estudos, inventários e devido aos entraves jurídicos para o licenciamento ambiental. Somando-se com as importações, cuja origem também é renovável, a eletricidade no Brasil tem 85% de fontes consideradas renováveis. Em 2013, a capacidade total instalada de geração de energia elétrica do Brasil (centrais de serviço público e autoprodutoras) alcançou 126,7 [GW], acréscimo de aproximadamente 5,8 [GW]. O consumo de eletricidade em 2013 teve um crescimento de 6,2% no setor residencial; 0,2% no industrial; e o público, agricultura, comércio e transporte tiveram variação positiva de 4,8%, em relação ao de 2012 (EPE, 2014).

A grande maioria dos projetos hidrelétricos na primeira metade do século XX foi instalada na Região Sudeste. Já na segunda metade, espalhou-se para outras regiões, decorrente da melhoria na tecnologia de transmissão. A evolução da concentração dos empreendimentos hidrelétricos no país que, até 1950, estavam concentradas próximas ao litoral, entre os Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais, atualmente, há uma dispersão mais acentuada, cujo centro de massa está localizado entre os Estados de São Paulo, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Goiás (ANEEL, 2003).

Com o óbvio esgotamento dos grandes recursos naturais próximos aos grandes centros consumidores e pela preocupação com impacto ambiental tem-se incentivado a geração de energia elétrica de maneira distribuída pelo aproveitamento de pequenas fontes primárias com o uso de micro e pequenas centrais hidrelétricas.

As micro hidrelétricas são sistemas que possuem potência de saída menor que 100 [kW] para uso doméstico em pequenas comunidades, situadas normalmente em área rural. Estas são fáceis de implantar, manter e operar. Para potências inferiores a 50 [kW] é recomendado o uso de bombas funcionando como turbina - BFT por apresentarem vantagens sobre as turbinas

convencionais, tais como a facilidade na instalação, manutenção, operação. Seu comportamento nestas condições de uso é conhecido desde a década de 30 (VIANA, 2004).

Uma dificuldade que ocorre com as BFTs, é o controle da velocidade do rotor quando há variação das cargas. Uma forma de se obter isso é o controle de vazão aduzida ao rotor com o uso de um obturador na saída do tubo de sucção controlando a vazão. Segundo Medeiros (2004), recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de controle da rotação da BFT a fim de evitar o disparo da máquina em caso de rejeição de carga.

O CERPCH – Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas, desenvolveu um sistema de controle de velocidade (SISCOV® - Sistema de Controle da Vazão) capaz de controlar a velocidade de rotação pelo controle da vazão na saída do tubo de sucção da BFT (SANTOS, 2009).

Um dos parâmetros para garantir a qualidade da energia é o monitoramento da frequência na saída do gerador acoplado a BFT. Conforme a estabelecido pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (2010) os sistemas de distribuição e geração de energia elétrica em condições normais e em regime permanente devem operar com frequência entre os limites de 59,5 [Hz] a 60,5 [Hz], sendo que na ocorrência de distúrbios ela deve recuperar o equilíbrio no prazo de 30 segundos após sair da faixa. O sistema de controle do obturador deve aumentar ou diminuir a vazão de água e, conseqüentemente, variar a velocidade do eixo do gerador.

Devido a isso, esse estudo possui por objetivo o desenvolvimento de um modelo de controle que mantenha a frequência dentro do intervalo recomendado no uso das bombas funcionando como turbina e do SISCOV® para garantia da qualidade da geração de energia elétrica em sistemas distribuídos e isolados.

1.1 Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Desenvolver um sistema eletrônico que posicione o obturador a fim de manter a velocidade do eixo da turbina constante por meio do monitoramento da frequência da saída de um gerador de indução.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analisar os experimentos e simulações computacionais realizados em laboratório do SISCOV[®];
- Estudar o funcionamento e parâmetros das bombas centrífugas funcionando como turbina;
- Elaborar modelo de um sistema de controle de velocidade em lógica *Fuzzy*;
- Desenvolver e montar circuito elétrico;
- Implementar um *software* de controle em linguagem C.

1.2 Relevância da dissertação

A implantação de micro centrais hidrelétricas é uma das soluções para suprir com energia comunidades pequenas e isoladas, situadas normalmente na área rural (SANTOS, 2009).

A utilização de bombas comuns funcionando como turbinas apresentam várias vantagens em relação às turbinas convencionais para geração de energia em micro hidrelétrica. O seu uso é justificado por serem mais fáceis de instalar, manter e operar (VIANA, 2004).

Para viabilização de projetos em centrais de pequeno porte, o CERPCH, da UNIFEI desenvolveu um sistema de controle de velocidade, SISCOV[®], capaz de controlar a velocidade de rotação por meio do controle de vazão na saída do tubo de sucção da BFT. Este equipamento é composto de um obturador cônico ligado a um servomecanismo por meio de uma haste que se desloca verticalmente. A variação de carga propiciada pela resistência da água varia a velocidade de rotação no eixo. Caso haja aumento da carga, a velocidade de rotação diminui (SANTOS, 2009).

Segundo Medeiros (2004), recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de controle da rotação da BFT a fim de evitar o disparo da máquina em caso de rejeição de carga.

Um sistema de controle permite que uma variável de saída, responsável pelo controle de um processo, diminua a diferença em relação à entrada de referência na ocorrência de um distúrbio mantendo-o dentro dos parâmetros desejados (OGATA, 2011).

De acordo com Nascimento e Yoneyama (2004) o controle é uma estratégia de atuação sobre um sistema para que se comporte de forma conveniente. Suas especificações envolvem conceitos de estabilidade, rejeição de distúrbios, robustez a incertezas no modelo, forma de resposta a um determinado sinal de entrada, simplicidade de implementação, custo de operação, dentre outras. Para alcançar as especificações desejadas, faz-se necessária a utilização de modelos.

A modelagem de um sistema de controle são representações úteis do sistema em estudo que pode ser usada no desenvolvimento de ensaios e experimentos que facilitam os trabalhos e a redução de custos, seja usando métodos matemáticos ou heurísticos. O primeiro tem como base equações, que em sistemas lineares, possibilita o emprego de técnicas conhecidas de maneira direta. Para os sistemas não lineares tem-se que utilizar técnicas para linearização, um exemplo é o controlador denominado PID – Proporcional-Integral-Derivativo. O segundo tem como base a experiência de operação do sistema com regras práticas e lógicas de tal forma que, se dada uma condição, então, tem-se uma consequência, como ocorre com o controlador Fuzzy (SIMÕES, 1999).

À medida que os sistemas modernos de controle com muitas entradas e saídas se tornam mais complexas, a descrição de um sistema de controle requer um grande número de equações, sendo que a teoria clássica de controle trata somente de uma entrada e uma saída (OGATA, 2011).

Segundo Simões (1999), o advento da lógica *Fuzzy* foi causado pela necessidade de um método capaz de expressar de uma maneira sistemática quantidades imprecisas, vagas e mal definidas.

O autor observa que a implementação por lógica *Fuzzy* são muito mais eficientes devido aos seguintes pontos:

- Uma implementação linguística é mais fácil de programar pela utilização da experiência e dos experimentos;
- Envolve um número grande de entradas, a maioria das quais relevantes apenas para condições especiais. Tais entradas são ativadas apenas quando condições específicas prevalecem. Quando ocorrer algumas condições raras ou excepcionais podem ser incorporadas com pouquíssimo overhead computacional e ainda assim a estrutura de *software* permanece transparente e compreensível.

- A implementação em produtos comerciais, voltadas para o mercado de massa, deveria ser de custo baixo. Comparadas com soluções convencionais de controle, a lógica *Fuzzy* é frequentemente mais eficiente ao se comparar a codificação e o tempo computacional de execução.

Como ferramenta de modelagem de sistemas de controle, tanto para um controlador PID quanto para um *Fuzzy*, pode-se utilizar o software MatLab, que foi especialmente concebido para a computação científica e de engenharia, com capacidade para realizar todos os tipos de cálculos e visualização de dados com ilustrações gráficas. Ele possui recursos para o desenvolvimento de aplicações com base em rede neural, sistemas *Fuzzy* e algoritmos genéticos (SIVANANDAM et al, 2007).

Devido a essas afirmações, justifica-se o desenvolvimento de um sistema de controle que possa servir de objeto de ensaios aos usuários do Laboratório Hidromecânico Didático Científico - LHDC da Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI e oferecer à sociedade sistemas de geração de energia elétrica que aproveitem micros potenciais para autoprodutores.

1.3 Método de pesquisa

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento do modelo de um sistema eletrônico que regule o obturador e mantenha a velocidade do eixo da turbina constante.

A metodologia de pesquisa proposta centra-se no uso de um sistema de controle em malha fechada com lógica Fuzzy para o posicionamento do obturador. O projeto possui, como base dados de pesquisas e aplicações desenvolvidas anteriormente para modelagem de escoamento no tubo de sucção de uma máquina hidráulica motora que controla a velocidade do rotor.

Com esse trabalho, espera-se que o sistema evite o disparo, mantenha a velocidade dentro dos valores configurados, seja de fácil implantação em campo, economicamente viável, com interfaces amigáveis ao usuário e com menor necessidade de suporte. Esse trabalho está dividido como descrito a seguir.

1.4 Estrutura do trabalho

Esse trabalho está organizado em seis capítulos e a referência bibliográfica. O primeiro capítulo é destinado à introdução cujo objetivo é fornecer uma visão geral do setor de energia e, mais especificamente, na geração e consumo de energia elétrica e apresenta os objetivos e relevância da pesquisa, o método de pesquisa utilizado e introduz os capítulos posteriores.

No capítulo 2, são apresentadas as características do setor elétrico, das micro e pequenas centrais hidrelétricas e das bombas centrífugas funcionando como turbina, as características de máquinas de indução como gerador, os conceitos sobre sistemas de controle e da lógica *Fuzzy* com uso em microcontroladores.

O capítulo 3 aborda a estrutura, o funcionamento e os resultados dos estudos anteriores realizados com o sistema de controle de vazão na saída do tubo de sucção da BFT para manter a rotação constante.

No capítulo 4, são abordadas as metodologias consideradas no procedimento de pesquisa com base na classificação, técnica e etapas adotadas para essa dissertação.

No capítulo 5, apresenta-se a modelagem e simulação do controlador *Fuzzy* com auxílio do software MatLab, a especificação dos componentes elétricos, a montagem do circuito elétrico, a implementação do software de controle em linguagem C e testes em bancada do sistema.

No capítulo 6, são apresentados os resultados dos testes efetuados, sendo analisados os resultados da simulação do controlador lógico *Fuzzy* e resultados obtidos com os testes em bancada.

No capítulo 7, estão as conclusões referentes às dificuldades e desafios encontrados nas simulações, desenvolvimento e montagem do protótipo e análise de resultados obtidos por meio de experimentos realizados. São tratadas, também, as recomendações para trabalhos futuros para a implantação desse sistema em campo para a validação em situação real de aplicação.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentadas as características do setor elétrico, das micro e pequenas centrais hidrelétricas e das bombas centrífugas funcionando como turbina, as características de máquinas de indução com gerador, os conceitos sobre sistemas de controle e da lógica *Fuzzy* com uso em microcontroladores.

2.1 Considerações iniciais

As fontes primárias de energia são diversificadas no mundo nas quais a viabilidade de exploração dá-se pela facilidade e quantidade disponível em cada região. As principais fontes de energia são o petróleo, gás natural, carvão mineral, biocombustível, nuclear e hidráulica. A figura 2.1 mostra a evolução da geração de energia de acordo com a fonte primária entre os anos de 1971 a 2011, em Mtep que significa Mega tonelada equivalente de petróleo. As fontes de energia primária geotérmica, solar, eólica estão incluídas em outros.

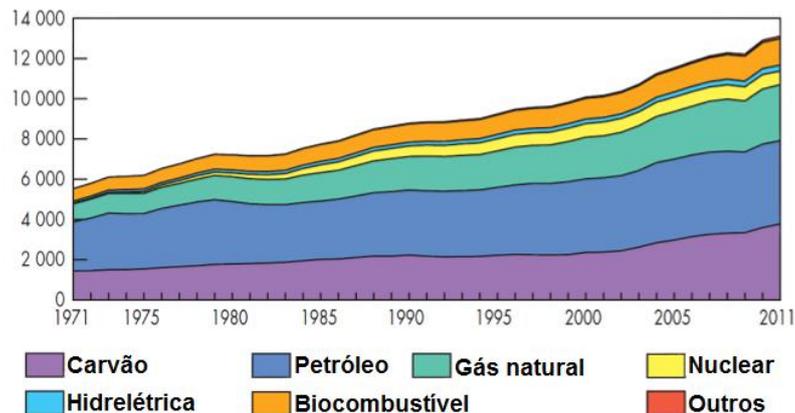


Figura 2.1 - Produção de energia no mundo entre 1971 a 2011

Fonte: IEA (2014)

No intervalo de 1971 a 2011, a geração de energia elétrica no mundo teve um grande crescimento das fontes fósseis e uma maior participação de outros tipos de fontes. A produção mundial de energia para atender a demanda dobrou no período de 1971 a 2010, passando de 64.000 TWh para 139.000 TWh (IEA,2014). A figura 2.2 mostra a evolução da geração de energia a partir de energias primárias como combustíveis fósseis produzidas essencialmente a partir de centrais térmicas, nuclear e hidráulica.

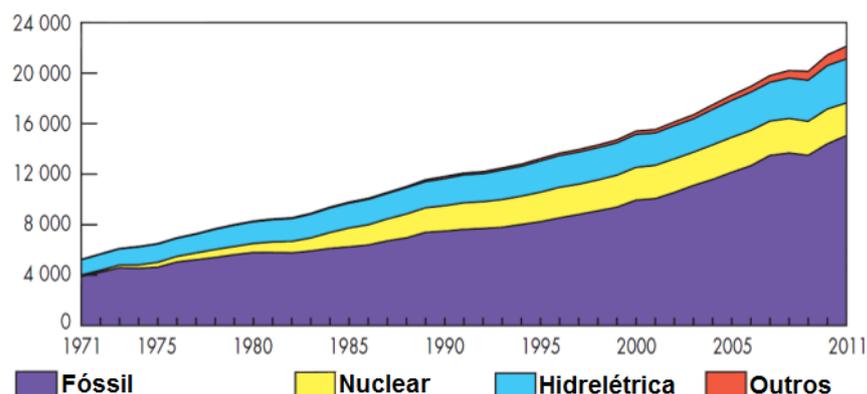


Figura 2.2 - Produção de energia elétrica no mundo entre 1971 a 2011

Fonte: IEA (2014)

Um fator relevante no planejamento de políticas na área de energia é o crescimento da população mundial. Segundo projeções da ONU, estima-se que em meados de 2013 a população mundial ultrapassou 7,2 bilhões de pessoas e projeta-se um aumento de quase um bilhão de pessoas até o ano de 2025 quando deve alcançar 8,1 bilhões.

A energia elétrica desempenha importante papel e pode ser produzida por diversas fontes não renováveis ou renováveis. Dentre as fontes de energia renováveis estão a bioenergia, geotérmica, das marés, solar, vento e hidrelétrica.

No Brasil, a tendência de crescimento econômico e populacional, segue o que acontece em outros países emergentes com a demanda por energia crescente. A figura 2.3 mostra a série histórica do consumo de energia de várias fontes, entre os anos de 1970 a 2013, como derivados do petróleo, bagaço de cana, álcool, eletricidade e outras.

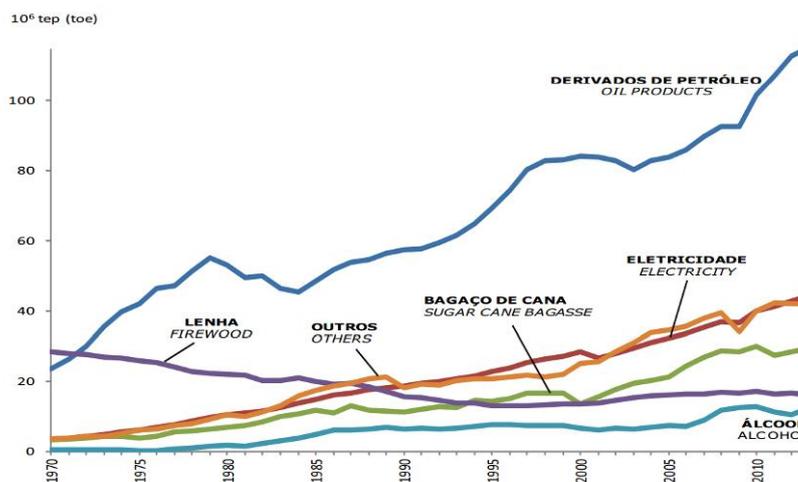


Figura 2.3 - Consumo final por fonte no Brasil

Fonte: EPE (2014)

A geração de energia elétrica no Brasil, incluindo centrais de serviço público, autoprodutores e importações atingiu 609,9 [TWh] em 2013, resultado 2,9% superior ao de 2012. A capacidade total instalada de 126,7 [MW] com acréscimo 5,8 [GW] (EPE, 2014).

A geração de energia elétrica é considerada predominante a renovável no país, sendo que, no passado, sua participação de geração hidrelétrica foi de 90 [%]; hoje, a oferta interna reduziu-se a 79,3 [%], somando-se com as importações, cuja origem também é renovável, por razões como a diversificação da matriz elétrica, dificuldades em ofertar novos empreendimentos hidráulicos pela ausência de estudos e inventários e devido aos entraves jurídicos para o licenciamento ambiental (EPE, 2014).

A figura 2.4 apresenta a oferta de energia elétrica por fonte, sendo renovável, a eólica, a biomassa e a hidráulica; e não renováveis, gás natural, derivados de petróleo, nuclear e carvão fontes.

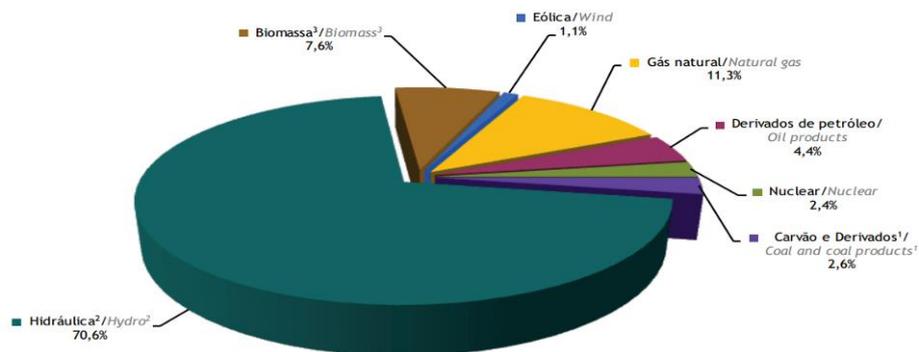


Figura 2.4 - Oferta de energia elétrica por fonte

Fonte: EPE (2014)

A energia hidrelétrica corresponde a 12,5 [%] da oferta interna de energia por fonte segundo a EPE (2014), com participação bem inferior ao do petróleo de derivados que oferece 39,3 [%]. Os produtos da cana e gás natural oferecem uma porcentagem próxima a da eletricidade, 16,1 [%] e 12,8 [%], respectivamente.

2.2 Micro e Pequenas Centrais hidrelétricas

A energia hidrelétrica é uma fonte renovável com base no ciclo natural da água. Essa produção é a mais madura, confiável e de baixo custo entre as tecnologias de geração renováveis disponíveis (BROWN, 2011).

As pequenas centrais hidrelétricas podem ser classificadas quanto a sua potência e quanto à queda de projeto. A tabela 2.1 apresenta estas características considerando esses parâmetros.

Tabela 2.1 - Classificação das PCH quanto à potência e quanto à queda de projeto

Classificação das centrais	Potência [kW]	Queda de projeto – Hd [m]		
		Baixa	Média	Alta
Micro	$P < 100$	$Hd < 15$	$15 < Hd < 50$	$Hd > 50$
Mini	$100 < P < 1.000$	$Hd < 20$	$20 < Hd < 100$	$Hd > 100$
Pequenas	$1.000 < P < 30.000$	$Hd < 25$	$25 < Hd < 130$	$Hd > 130$

Fonte: ELETROBRAS, 2000

De acordo a resolução 652 da ANEEL (2003), os limites para a classificação de pequenas centrais hidrelétricas para geração de energia elétrica, caracteriza-se pelo aproveitamento hidrelétrico com potências entre 1000 [kW] e igual ou inferior a 30.000 [kW], destinado à produção independente, autoprodução ou produção independente autônoma, com área do reservatório inferior a 3,0 [km²].

As micro centrais hidrelétricas possuem a potência de saída inferior a 100 [kW] projetadas para atender o uso doméstico ou pequenas comunidades e apresenta como principais componentes:

- Mecanismo de filtragem de água;
- Comporta com válvula;
- Turbina;
- Dispositivo de conversão de potência (Gerador).

As turbinas hidráulicas convencionais empregadas em usinas hidrelétricas de pequeno porte podem ser do tipo Francis, Pelton e Axiais (hélices, Kaplan, Tubulares, Bulbo) (MACINTYRE,1983).

2.3 Bombas funcionando como turbinas

As Bombas Centrífugas funcionando como turbinas podem ser aplicadas em vilas e fazendas remotas onde a carga principal é a iluminação e, durante o dia, no uso de equipamentos como serra circular, secador da colheita, irrigação, bombas de água, dentre outros (WILLIAMS, 1997).

Quando a água entra pela descarga de uma bomba centrífuga e a saída faz-se pela sucção, diz que ela está operando como turbina. Portanto, o sentido do fluxo de escoamento da água é invertido e há a inversão no sentido de rotação de seu eixo. A figura 2.5 apresenta a ilustração na qual a bomba centrífuga opera como bomba e como turbina.

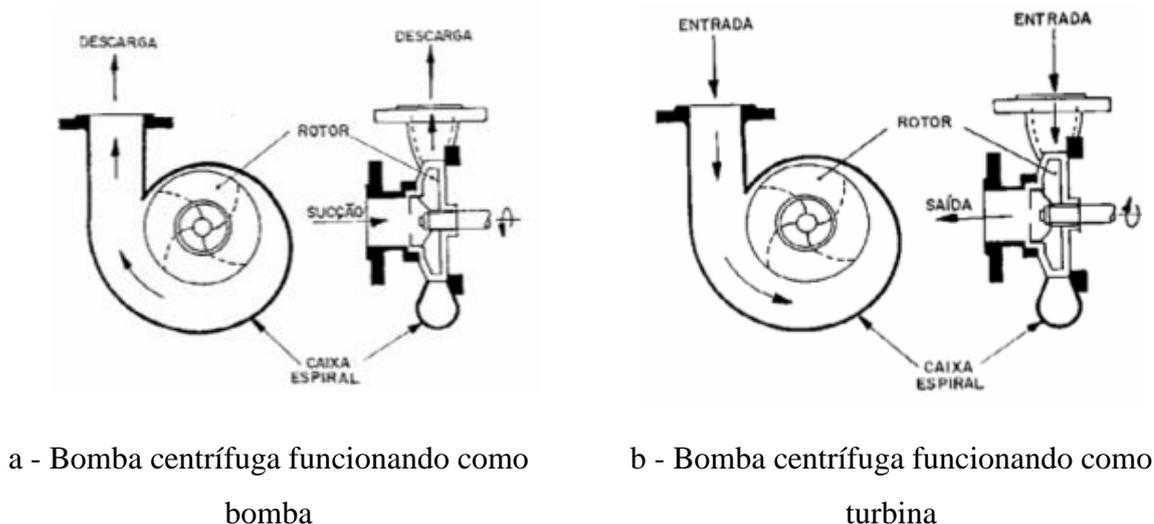


Figura 2.5 - Bomba centrífuga funcionando como bomba e como turbina
Fonte: VIANA, 2004

No caso do funcionamento como bomba, mostrado na Figura 2.5a, o líquido entra na sucção à baixa pressão, transforma energia de velocidade em pressão pelo rotor e sai pela descarga. No funcionamento como turbina, mostrado na Figura 2.5b, o líquido entra com energia de pressão, aciona o rotor em reverso e sai com baixa pressão.

As BFTs são utilizadas em países como Estados Unidos, Alemanha e França substituindo turbinas Pelton, Hélice e Francis por bombas hidráulicas de fluxo desde as centrífugas de vários estágios até as axiais para gerar energia em pequenos recursos hidrelétricos nas quais as turbinas convencionais possuem muita limitação. Isso se deve ao bom funcionamento e baixos custos se comparados com turbinas convencionais para a mesma potência. Para este uso, inverte-se o sentido do fluxo de escoamento da água e, conseqüentemente, haverá a inversão no sentido de rotação (VIANA, 2004).

No Brasil, em 1988, surgiu o projeto BFT, coordenado pela então Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), com o objetivo de desenvolver pesquisas e testes com vários tipos de bombas e apresentá-las como uma alternativa simples para a eletrificação do meio rural (SANTOS, 2009).

Pesquisas realizadas por VIANA (1987), com bombas centrífugas, mostram a viabilidade de utilizar BFTs, mas recomendam utilizá-las com potências abaixo de 50 [kW]. O campo de aplicação de uma turbina é feita em função das condições de vazão e de queda existentes no local. Segundo VIANA (1997), o que é indicado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Campo de aplicação das BFTs

Tipo de Turbina	Faixa de quedas (m)	Vazões (m ³ /s)	Faixa de potência (kW)
BFT	6 - 100	0,02 a 0,25	< 50

Fonte: VIANA, 1997

A Figura 2.6 apresenta o esboço de uma instalação de BFT no qual os acessórios necessários para o funcionamento adequado dessa instalação são: uma curva de 90° com diâmetro igual ao diâmetro da boca de entrada da bomba, destinada a operar a turbina e um tubo de sucção cônico divergente com ângulo central de 12°, tendo o diâmetro menor igual ao diâmetro da curva de 90° e com comprimento suficiente para submergir 30 cm a partir do nível de água do canal de fuga.

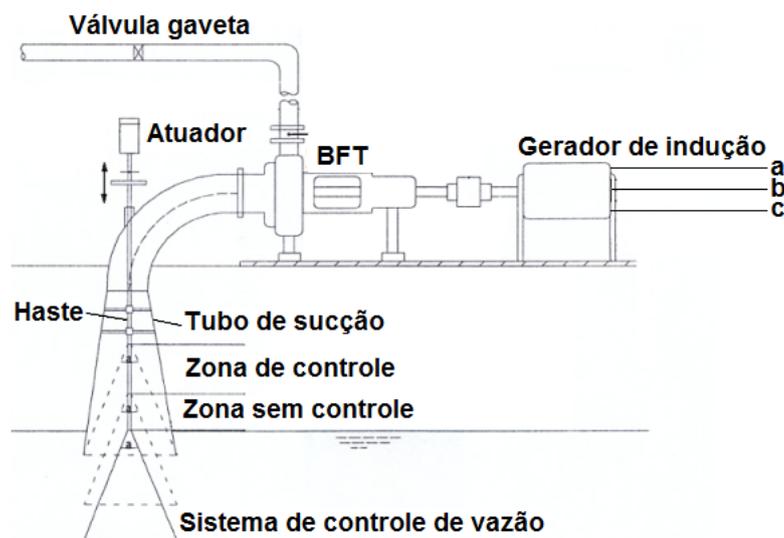


Figura 2.6 - Bomba Funcionando como Turbina acoplado a um gerador
Fonte:(SANTOS, 2009)

Segundo Willians (1997), as bombas operando como turbina apresentam inúmeras vantagens sobre as convencionais. As principais são:

- Bomba e motor integrados podem ser adquiridos para uso como uma turbina e gerador;
- Disponível para uma ampla gama de queda de projeto e fluxos;
- Disponível em uma grande variedade de tamanhos padronizados;
- Baixo custo;
- Curto prazo de entrega;
- Peças de reposição, tais como selos e rolamentos estão facilmente disponíveis;
- Fácil instalação – usa acessórios para tubos padrão.

Além disso, possui estoque de suprimentos para bombas de diferentes características, adequados à vasta gama de quedas e fluxos de água. Apesar das vantagens citadas, ela possui limitações se comparados aos tipos de custo mais alto de turbina, sendo a principal, a faixa de fluxo, que só pode operar em valores inferiores ao de uma turbina convencional (WILLIAMS, 1997).

O quadro 2.1 apresenta algumas das principais diferenças entre os sistemas BFT e turbinas convencionais.

Quadro 2.1 – Diferenças entre turbinas convencionais e BFT

	Turbina convencional	BFT
Vantagens	Bem documentado	Custo/eficiência
	Melhor eficiência	Amplamente disponível localmente e no exterior
	Guia variável palhetas das variações de caudal	Simples construção e fácil manutenção
Desvantagens	Caro	Difícil encontrar curvas de operação da turbina correta
	Muito poucas fontes locais	Baixa eficiência

	Projeto complexo e pode exigir manutenção especializada	Não há guia variável palhetas das variações de caudal
		Não é bem documentada como turbinas

Fonte: WILLIAMS, 1997

De acordo com Williams (1997), a principal desvantagem dos sistemas com BFT é que as curvas características em modo de turbina não são normalmente fornecidos com a folha de dados das bombas. Isso torna difícil a escolha da bomba correta para cada aplicação e assim vários métodos foram desenvolvidos para prever as características em modo de turbina.

Uma dificuldade adicional é o controle da velocidade do rotor quando há variação das cargas. Uma forma de se obter isso é o controle de vazão aduzida ao rotor por meio de um obturador na saída do tubo de sucção controlando a vazão. Muitas bombas estão disponíveis com um motor de indução diretamente acoplado e pode ser usado como gerador auto excitado. Esta unidade pode apresentar um custo mais baixo do que uma BFT separada e geradores separados (WILLIAMS, 1997).

Para a operação de BFT acoplados em geradores síncronos ou assíncronos em velocidade variável na qual a vazão varia, deve-se manter constante a vazão na entrada. A viabilidade da velocidade variável ou constante depende da comparação do incremento de potência de saída com o aumento do custo devido ao sistema de controle eletrônico (ALVES, 2009).

2.4 Gerador de indução trifásico

A utilização de máquina de indução na geração de energia elétrica é conhecida há muitos anos podendo fornecer potência ativa para carga. É um elemento importante para micro centrais hidrelétricas em substituição às máquinas síncronas, suprindo de energia elétrica vilas e comunidades rurais isoladas onde não há fornecimento de energia pela rede elétrica das concessionárias (SMITH, 2001).

As máquinas de indução são compostas por uma parte fixa denominada estator, e uma rotativa, denominada rotor. No estator estão os enrolamentos formados por espiras de fio de cobre isolado e fixado em ranhuras no núcleo formando um enrolamento semelhante ao

utilizado em geradores síncronos. O rotor, que gira no centro, é composto por gaiola de esquilo. Ela possui uma estrutura cilíndrica e composta por folhas finas de aço e condutores em forma de barras de alumínio que são curto-circuito em cada extremidade por anéis de alumínio (SMITH, 2001).

As grandes vantagens da utilização das máquinas de indução substituindo as máquinas síncronas é a disponibilidade, baixo custo, maior robustez e ausência de escovas reduzindo a necessidade de manutenção. (VIANA, 1987).

Os motores de indução possuem maior disponibilidade no mercado, podendo recondicionar máquinas de segunda mão. O custo da máquina com capacitores de excitação são mais baratos especialmente para os de baixa potência. Eles são robustos e de construção simples, pois não possuem escovas, anéis e diodos. São máquinas com grau de proteção contra sujeira e líquidos compatíveis a condições de uso industrial em ambientes áridos (SMITH, 2001).

Suas desvantagens como gerador de indução são a tensão nominal e a partida. A tensão nominal nem sempre possui disponibilidade de tensões nominais apropriados para utilização como geradores, o que necessita de modificações para as ligações dos enrolamentos ou em casos extremos rebobinagem. Exige cálculos e montagem de capacitores adequados para seu funcionamento como gerador, enquanto geradores síncronos podem ser comprados prontos para uso. Na partida de geradores de indução podem ocorrer quedas de tensão ou perdas na excitação.

Segundo Smith (2001), a seleção de um motor de indução para o uso como gerador pode ser feita com base nas seguintes características:

Tipo de rotor: Pode ser gaiola de esquilo, que são os mais comuns e com rotor bobinado que possui terminais adicionais para ligação das bobinas do rotor por meio de anéis e escovas.

Local de utilização: De acordo com o tipo de sólidos e líquidos presentes no ambiente deve-se classificar a proteção contra a penetração na máquina por meio do grau de proteção, representado por dois números nos quais o primeiro indica a proteção contra a penetração de sólidos e o segundo contra líquidos.

Temperatura e isolamento: quanto maior a energia consumida pelo gerador, maior a temperatura de funcionamento e, portanto, menor a vida de seus enrolamentos. A vida útil do

equipamento depende das horas de funcionamento por dia, da qualidade do material de isolamento e da temperatura de funcionamento.

Eficiência: Quando máquinas de indução estão operando como gerador apresentam uma menor eficiência.

Faixa de potência: Recomenda-se a operação do motor como gerador com funcionamento abaixo da plena carga para assegurar uma longa vida de enrolamento.

Tensão Nominal: Em alguns casos é possível que a máquina seja utilizada diretamente com sua tensão nominal e em outros casos são necessárias modificações no enrolamento.

Frequência de operação: Se a frequência de operação aumentar, a corrente de excitação irá reduzir atingindo uma tensão nominal que melhora a eficiência e a potência máxima. Uma restrição é no caso de motores como carga que aumenta significativamente a potência. No uso de motores de indução há o aumento da velocidade do eixo da maneira linear com a frequência, mas em ventiladores a potência aumenta aproximadamente o cubo da velocidade.

Se a frequência diminuir, a corrente de magnetização aumentará e fará com que a potência dissipada no enrolamento do estator também aumente provocando o superaquecimento e, conseqüentemente, podendo danificar os equipamentos. Dessa forma, recomenda-se que a operação da frequência abaixo da nominal seja evitada. Alguns equipamentos necessitam de que a frequência seja regulada como motores trifásicos e transformadores sendo que o desempenho do motor depende do tipo. Para os equipamentos mais modernos as fontes internas fazem a correção internamente.

O aumento de 10 % da frequência é aceitável, mesmo se a carga depender da velocidade devido às seguintes razões:

- O aumento da corrente de carga é compensado se a frequência de operação eleva-se reduzindo a corrente da magnetização;
- O aumento da velocidade do eixo aumenta o resfriamento da máquina.

No caso de motores que não são muito dependentes da velocidade o limite superior é de 20 % da frequência nominal. Para cargas resistivas não há limites de frequência sendo que o limite superior é determinado pela operação estável do gerador, que é a frequência em que a máquina não está saturada para a saída de tensão desejada.

Segundo Smith (2001), a menor eficiência e maior temperatura ocorrem quando uma máquina de indução operando como gerador apresenta a mesma tensão e frequência do que um projeto com uso como motor para uma potência equivalente visto que há o aumento da saturação e, conseqüentemente, o aumento da corrente de magnetização. Recomenda-se uma seleção cuidadosa das tensões nominal e de funcionamento, bem como da frequência uma vez que pode reduzir a saturação e resultar nas seguintes vantagens:

- Melhoria da eficiência do gerador;
- O aumento da potência máxima do gerador (dentro de limites térmicos);
- Aumento da vida útil do enrolamento;
- Custos reduzidos de capacitores.

Segundo Williams (1997), a relação entre velocidade de rotação, número de polos e frequência são obtidas pelas equações a seguir.

Nos geradores síncronos a velocidade fixa pode ser calculada com a fórmula da equação 2.1:

$$N_s = (120 / p)f \quad (2.1)$$

Onde: N_s é a velocidade síncrona, em rpm;

p é o número de polos;

f é a frequência, Hz.

Nos motores de indução a velocidade síncrona é maior que a velocidade de rotação. Assim, a equação 2.2 considera uma pequena fração na qual as velocidades são diferentes, conhecida como escorregamento (s).

$$N_m = (120 / p)f(1 - s) \quad (2.2)$$

Onde: N_m é a velocidade, em rpm;

p é o número de polos;

f é a frequência, Hz.

s é a escorregamento que corresponde a uma fração pequena (0,02-0,05)

Quando o motor de indução é convertido para gerador, sua velocidade de rotação fica um pouco acima da síncrona. A equação 2.3 mostra essa relação:

$$N_{gen} = (120 / p)f(1 + s) \quad (2.3)$$

Onde: N_{gen} é a velocidade, em rpm;

p é o número de polos;

f é a frequência, Hz.

s é a escorregamento que corresponde a uma fração pequena (0,02-0,05)

Pode-se obter uma relação entre a velocidade do motor e gerador por meio da equação 2.4.

$$N_{gen} = (240 / p)f - N_m \quad (2.4)$$

Normalmente, são disponibilizados motores com dois ou quatro polos. A tabela 2.3 apresenta as velocidades de motores como geradores de indução relacionados aos números de polo e frequência.

Tabela 2.3 – Velocidade típicas para geradores de indução

Polos	50 Hz		60 Hz	
	Motor	Gerador	Motor	Gerador
2	2900	3100	2500	3700
4	1450	1550	1750	1850

Fonte: WILLIAMS, 1997

O controle da frequência em geradores de indução pode ser feito mantendo-se a velocidade constante sendo que uma máquina de quatro polos vai gerar energia com frequência de 60 [Hz] a plena carga com uma velocidade acima de 1800 [rpm] (MEDEIROS, 2004).

Segundo a ANEEL (2010), a frequência da rede elétrica deve atender algumas recomendações para garantia da qualidade de energia. Em instalações de geração, conectadas à distribuição, sua variação deve estar dentro da faixa de 59,5 [Hz] a 60,5 [Hz]. Fora desse intervalo, a correção do distúrbio deve ocorrer dentro de trinta segundos após o momento que sair para garantia do equilíbrio carga-geração.

Nos casos de desligamento da geração ou de carga recomenda-se:

- a) não pode exceder 66 [Hz] ou ser inferior a 56,5 [Hz] em condições extremas;
- b) pode permanecer acima de 62 [Hz] por no máximo trinta segundos e acima de 63,5 [Hz] por no máximo dez segundos;
- c) pode permanecer abaixo de 58,5 [Hz] por no máximo dez segundos e abaixo de 57,5 [Hz] por no máximo cinco segundos.

2.4.1. Controle de velocidade do gerador

Nos primeiros sistemas de gerador de indução mantinha-se a carga quase constante ligando ou desligando todas de uma vez só, pois não havia um sistema de controle adequado. O controlador do gerador de indução (IGC) de baixo custo foi desenvolvido permitindo uma ampla variação de cargas (SMITH, 2001).

O aumento da carga na turbina faz a velocidade da turbina cair, o que resulta na redução correspondente na frequência e uma queda de tensão devido à redução da excitação. A velocidade da turbina e tensão gerada vai cair até um valor em que a potência de saída atinja um valor igual ao da carga. A figura 2.7 mostra a curva para máquina de indução operando em duas frequências diferentes sem nenhuma característica de carga de excitação.

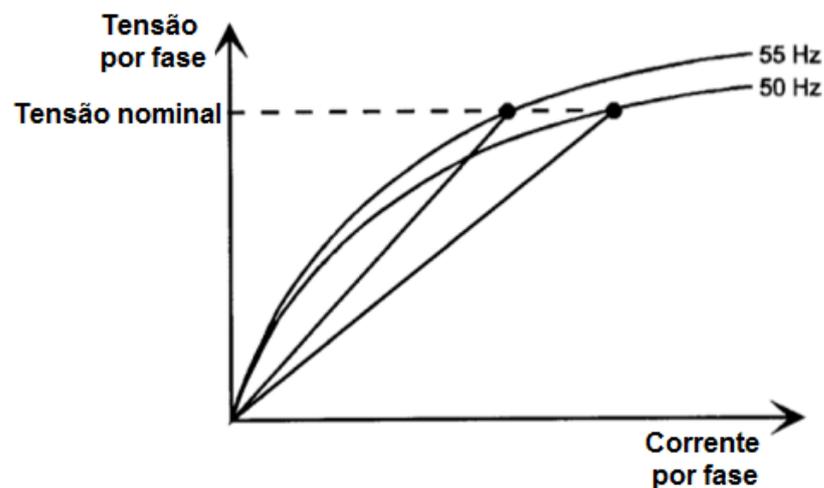


Figura 2.7 - Máquina de indução operando em duas frequências diferentes
Fonte: SMITH, 2001

Na situação em que a carga resistiva for reduzida, a tensão e a velocidade da turbina vão subir. Se a carga do gerador for desligada, a velocidade aumenta até que a perda do gerador se iguale à potência de saída da turbina. Observa-se que é necessário o controle da carga resistiva para que haja a regulação da tensão e da frequência.

Com carga indutiva na saída do gerador, irá provocar um aumento de frequência devido ao aumento da velocidade da turbina, pois há uma redução de excitação capacitiva que provoca uma queda de tensão e uma temporária redução de potência em outras cargas. À medida que a velocidade aumenta, a tensão também irá aumentar até que haja um equilíbrio em que a potência de saída da turbina seja igual a de carga. Se a carga indutiva, como os motores de indução, ligada à excitação do gerador for muito grande, haverá um colapso.

No sistema não controlado, a tensão depende da característica da velocidade da turbina. Se sua potência de saída não variar sensivelmente entre as velocidades iniciais e finais, não ocorrerão mudanças significativas na tensão. Se a carga for capacitiva, vai diminuir a frequência, podendo prejudicar o gerador ou cargas (SMITH, 2001).

Os sistemas hidrelétricos mais simples possuem uma carga fixa e são constituídos, normalmente, por lâmpadas que ligam e desligam ao mesmo tempo mantendo a tensão e velocidade da turbina constantes. Esses sistemas são mais baratos, mas têm a desvantagem de ser inflexíveis. Se a tensão for mantida no intervalo de -25 [%] a 10 [%], e a frequência acima até 5 % do valor nominal é pouco provável que danifiquem as cargas. Para cargas fixas, existem quatro maneiras de controlar o gerador (WILLIAMS, 1997).

1. Controle mecânico: esse sistema não é adequado para um BFT por não haver controle do fluxo na turbina;
2. Controle manual da turbina: O controle da válvula é feito um operador que ajusta a válvula de acordo com as variações de tensão e frequência;
3. Controle eletrônico de carga: Esse sistema de controle utiliza uma carga de lastro mantendo a carga constante. Pode ser utilizado para geradores síncronos, que precisam de um regulador de tensão automático (AVR), bem como, um controlador eletrônico de carga (ELC), ou geradores de indução, requer um único controlador conhecido como IGC.
4. Controle manual da carga elétrica: um operador liga ou desliga um conjunto de cargas de lastro a fim de manter a tensão constante.

Os sistemas com cargas fixas apresentam uma série de desvantagens, como são mostrados a seguir (SMITH, 2001):

1. Dificuldade de assegurar-se uma carga constante;
2. Disparo do sistema no caso de sobretensão;
3. Deve-se evitar comutação de cargas, bem como cargas variáveis;

4. Menor eficiência da potência disponível.

Para grandes variações de carga podem-se utilizar sistemas eletrônicos de controle superando as desvantagens de sistemas com carga fixa, pois o controlador compensa eventuais variações com cargas de lastro que mantêm constante a carga total. Na figura 2.8 apresenta-se um controlador básico (SMITH, 2001).

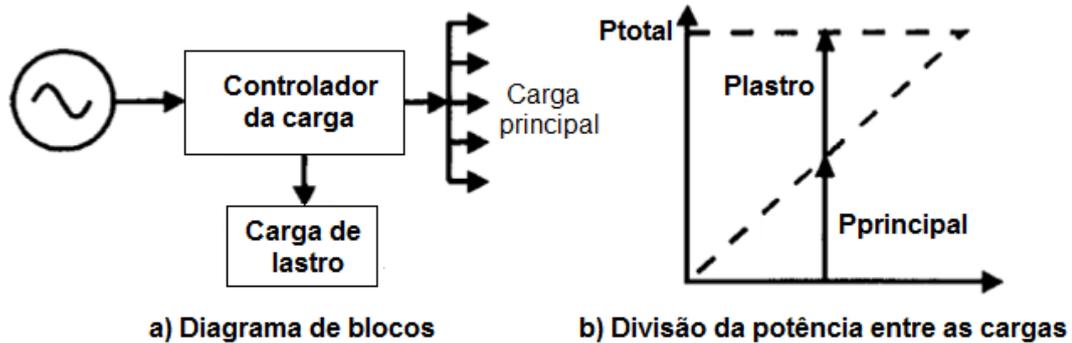


Figura 2.8 – Princípio básico do controlador eletrônico de carga
Fonte: SMITH, 2001

Esses sistemas regulam a frequência e o controle da tensão não é necessária porque os geradores síncronos possuem reguladores de tensão embutido. Na ausência de um controlador a frequência varia com as mudanças de carga e sob nenhuma condição de carga será muito maior do que a frequência nominal.

Segundo Singh et al (2013), a aptidão para regulação da tensão e frequência é um fator chave na decisão na escolha do controlador a ser utilizado entre as várias opções, tais como:

- O compensador Estático (STATCOM) é constituído por um inversor de tensão, baseado em IGBTs para controle de corrente, conectado a um dispositivo de armazenamento de energia que pode gerar ou absorver energia reativa com a mesma corrente nominal operando tanto com cargas capacitivas ou indutivas. Este sistema atua como uma fonte de corrente que a retarda ou adianta para manter constante a tensão caso haja variação da carga. A tensão gerada depende da velocidade da turbina, capacitância e carga. Na figura 2.9 apresenta-se o diagrama elétrico do regulador de tensão STATCOM.
- Sistema STATCOM com bateria é um conversor bidirecional com o uso de bateria para armazenamento de energia para geradores, constituído de dois conversores DC-DC, filtro ativo, regulador para balanceamento de carga e tensão alternada. Este sistema permite, também, a regulação da frequência do lado da tensão

alternada, atenua nas correntes harmônicas, compensando potência reativa e equilibra as correntes enquanto o sistema de armazenamento de energia armazena ou injeta potência ativa e, se necessário, a carga DC controlado dissipa a energia gerada restante mantendo tensão e frequência sob diferentes condições de carga. Além disso, aumenta a eficiência e a disponibilidade do sistema. Na figura 2.10 é demonstra-se o sistema STATCOM com bateria.

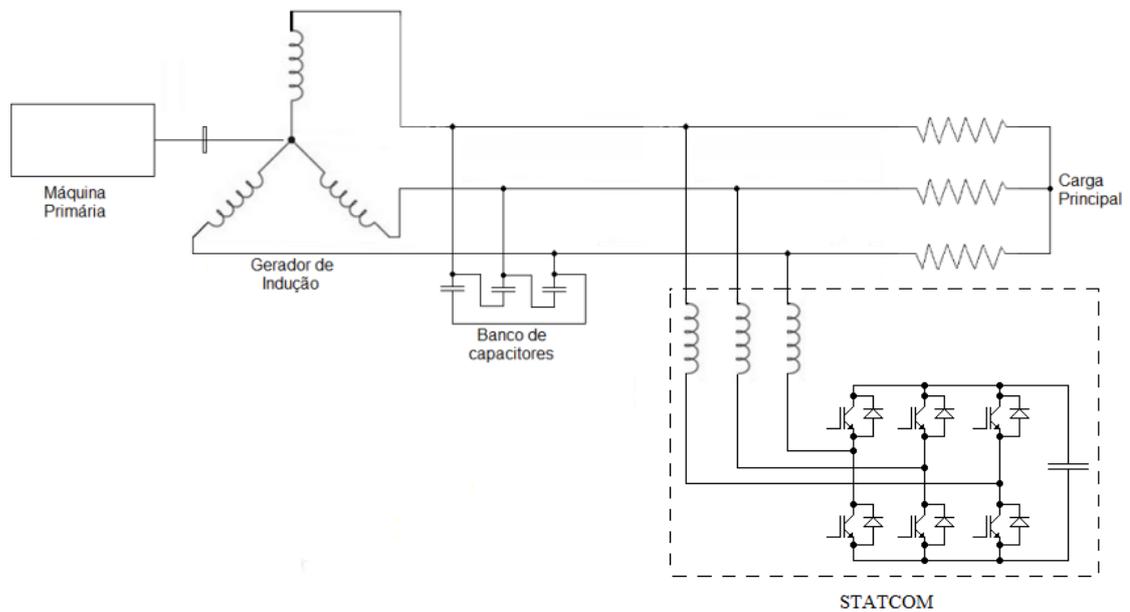


Figura 2.9 – Diagrama elétrico do regulador de tensão STATCOM
Fonte: SINGH, 2013

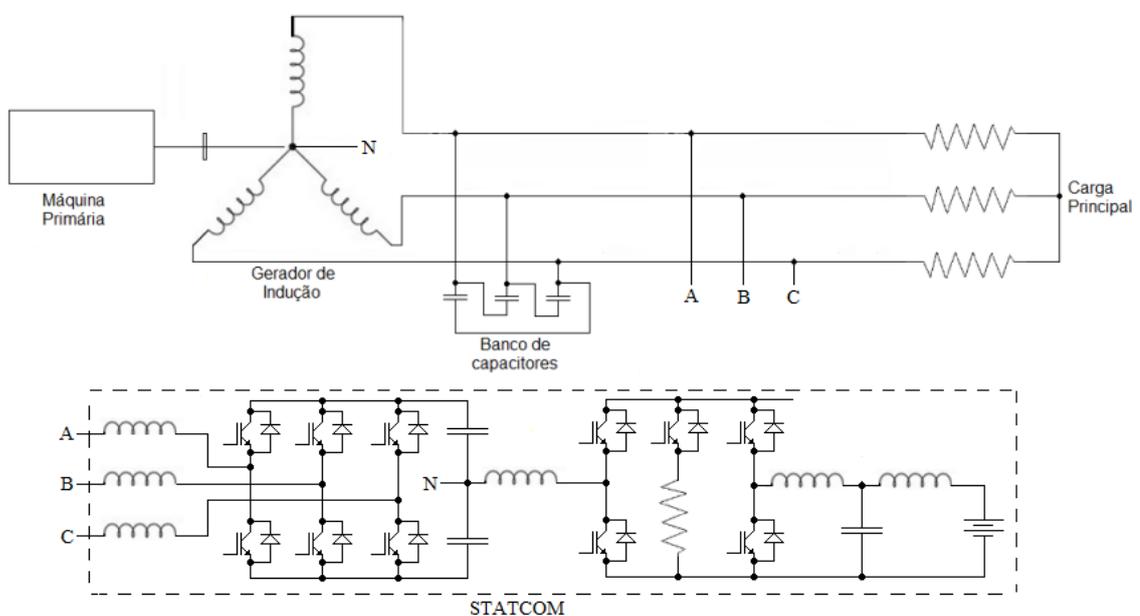


Figura 2.10 – STATCOM com bateria
Fonte: SINGH, 2013

- Controlador generalizado de impedância fornece fluxo controlado bidirecional de potência ativa e reativa. Possui um inversor PWM bidirecional com um banco de baterias que modula a largura de pulsos controlando a impedância de acordo com as condições de carga. O excesso de energia gerado armazena-se na bateria. A vantagem desse sistema é a substituição do resistor utilizado por um banco de baterias que aumenta a eficiência do sistema. No entanto, é mais complexo, pois há necessidade de manter a voltagem da bateria em uma faixa de segurança, sem comprometer a capacidade de regulação de tensão. Na figura 2.11 é mostrado o diagrama elétrico.

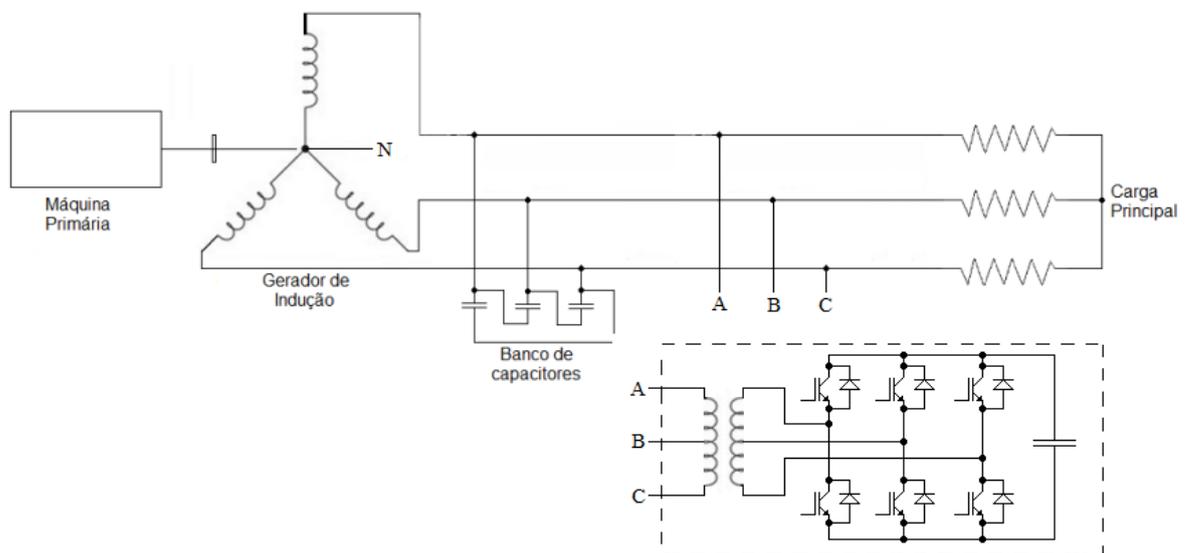


Figura 2.11 - Controlador generalizado de impedância
Fonte: SINGH, 2013

- Controlador de carga é um sistema eletrônico que busca manter constante a carga no gerador mesmo que haja mudanças na carga do consumidor mantendo tensão e frequência constantes. Uma maneira de se fazer isso é utilizando um retificador não controlado e uma carga de lastro. Na figura 2.12 apresenta-se o diagrama elétrico desse tipo de controlador.

Nos geradores de indução, as características são diferentes uma vez que a tensão e a frequência irão variar se houver a mudança de carga. Nos primeiros sistemas de controle havia um controlador para a tensão, para excitação controlada variando a quantidade de capacitância ligada; e o controlador de frequência, que varia a carga resistiva, semelhante aos controladores dos geradores síncronos (SMITH, 2001).

Para um sistema gerador de indução em que a carga aumenta ocorrerá um decréscimo da tensão e da frequência. Se ocorrer a diminuição da carga, a tensão e frequência aumentarão o que é um aspecto indesejável, sendo necessário incluir um sistema de regulação de tensão que utilizam um sistema de controle de carga de lastro paralelo com a principal (BRAGA, 2002).

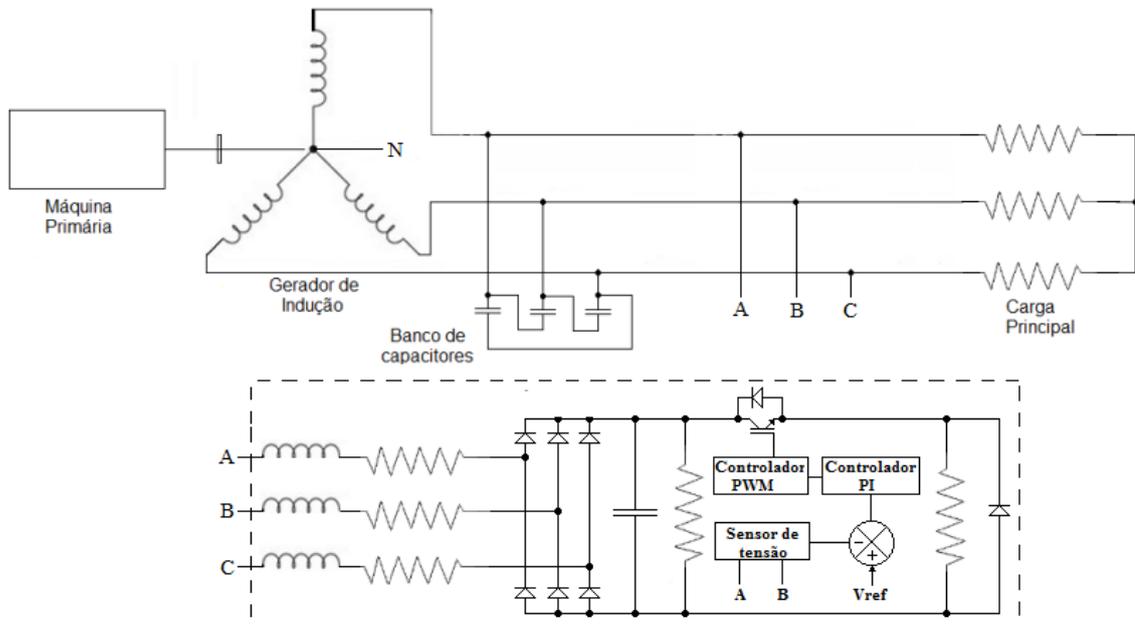


Figura 2.12 – Diagrama elétrico de controlador com carga de lastro
Fonte: SINGH, 2013

Na figura 2.13 observa-se um diagrama de blocos com a estrutura básica de um sistema de controle de carga.

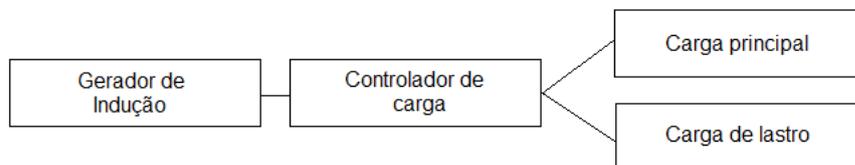


Figura 2.13 – Diagrama de blocos de um sistema de controle de carga

De acordo com Smith (2001), há diversas maneiras de controlar a carga de lastro, algumas delas são controle de ângulo de fase, cargas ponderadas binárias e relação de espaço.

No sistema de controle por ângulo de fase, é utilizado um sistema de disparo de triacs ou tiristores para chavear um arranjo de carga resistiva de lastro, produzindo uma variação, por meio do atraso provocado pelo ângulo de disparo a cada metade do ciclo num valor

compreendido entre 0° e 180° . Esse sistema não é recomendado para geradores de indução por causa do fator de potência em atraso produzido devido à corrente de lastro atrasada em relação à tensão e com efeito no aumento da frequência. Outro problema é a distorção da forma de onda que produz o aumento do aquecimento nos enrolamentos do gerador necessitando o sobre dimensionamento para compensar a distorção da forma de onda. Na figura 2.14, é mostrada a forma de onda da corrente da carga de lastro para um ângulo de disparo α (SMITH, 2001).

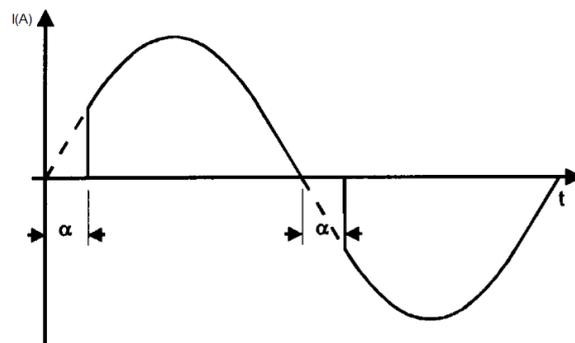


Figura 2.14 – Forma de onda da corrente de lastro para um de ângulo de fase
Fonte: SMITH, 2001

De acordo com Braga et al (2012), se o ângulo de disparo α for de 180° a tensão eficaz sobre a carga de lastro é zero e a tensão vai aumentando à medida que α for diminuindo até que seja igual a 0° , tendo a potência dissipada pela carga de lastro no valor máximo. Para o gerador, a carga sempre estará constante mantendo a tensão gerada com variação próxima ao valor nominal. Na figura 2.15, é mostrado o diagrama elétrico do sistema com controle por ângulo de disparo da carga de lastro.

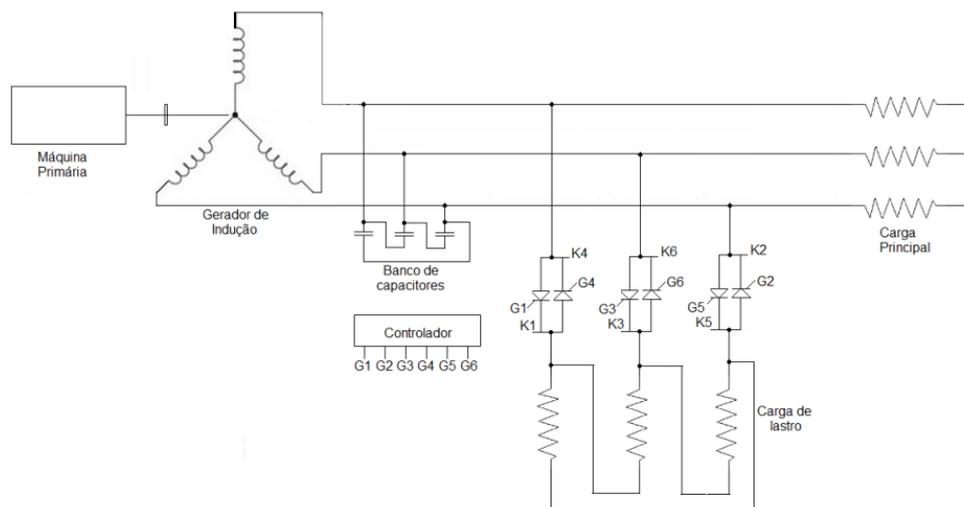


Figura 2.15 – Diagrama elétrica do controle da carga de lastro por ângulo de disparo
Fonte: BRAGA et al, 2012

No sistema de controle por cargas ponderadas binárias, a carga resistiva variável é produzida por uma combinação de resistências fixas conectadas ao circuito de modo que atinjam o número máximo de passos de carga com o número mínimo de resistores e interruptores. Em um sistema monofásico, há um arranjo de três resistores como mostrado na figura 2.16, juntamente com os sete valores de carga de lastro que podem ser alcançados (SMITH, 2001).

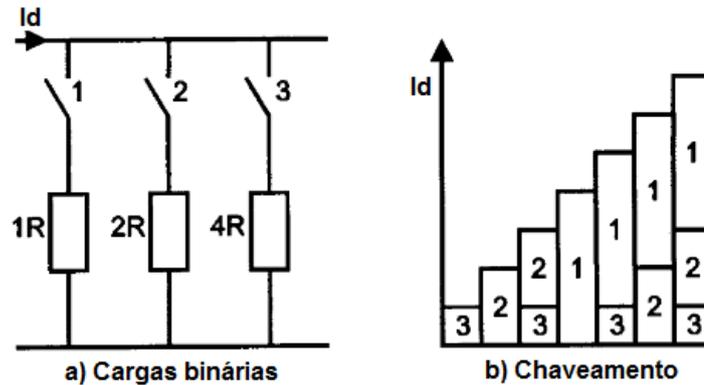


Figura 2.16 – Controlador de cargas ponderadas e as correntes possíveis
Fonte: SMITH, 2001

As principais vantagens são que não há distorção da forma de onda e a carga de lastro é resistiva. As principais desvantagens são a necessidade de cargas de lastro para cada uma das conexões.

No sistema de controle marca-espço é utilizada apenas uma única carga de lastro conectada por meio da saída retificada do gerador e chaveada por meio de transistor. O controlador varia o tempo de trabalho a fim de controlar a dissipação de potência da carga de lastro, sendo que o tempo que está ligada pode variar ao longo de 0% a 100%. Possibilita um ótimo controle da tensão sendo o sistema de controle de geradores de indução preferido e é simples em sistema de fase única usando a mesma carga do circuito. Nos sistemas trifásicos utiliza-se uma ponte retificadora como mostrada na figura 2.17 (SMITH, 2001).

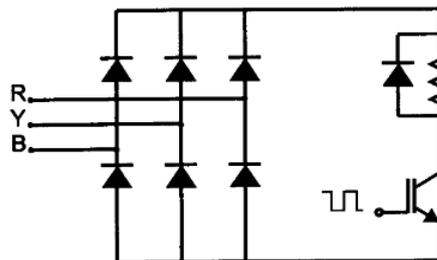


Figura 2.17 – Controlador marca-espço trifásico
Fonte: SMITH, 2001

As suas desvantagens são que na ocorrência de um desequilíbrio das fases haverá aumento da distorção da forma de onda.

2.5 Microcontrolador

Um microcontrolador é um circuito integrado que possui um alto nível de integração constituído de processador, memórias, periféricos, dispositivos de entradas e saídas que permitiu a redução da potência de consumo, tamanho e custo em relação aos microprocessadores que requerem componentes periféricos separados para seu funcionamento (BAYLE, 2013).

Todos os tipos de microcontroladores operam com um conjunto de instruções armazenado em sua memória, na qual o processador busca as instruções, decodifica e efetua as operações necessárias manipula os dados e os executa. As memórias armazenam os dados e o programa do usuário. Os periféricos são constituídos de uma placa global que dão suporte ao processador estendendo sua capacidade. As entradas e saídas são o acesso do microcontrolador aos dispositivos externos da placa para permitir a interface para o seu ambiente (BAYLE, 2013).

O microcontrolador contém todos os elementos em único chip e necessita de dispositivos de entrada e saída para comunicação com exterior. Na figura 2.18, é mostrado um diagrama de blocos com a estrutura que compõe um controlador.

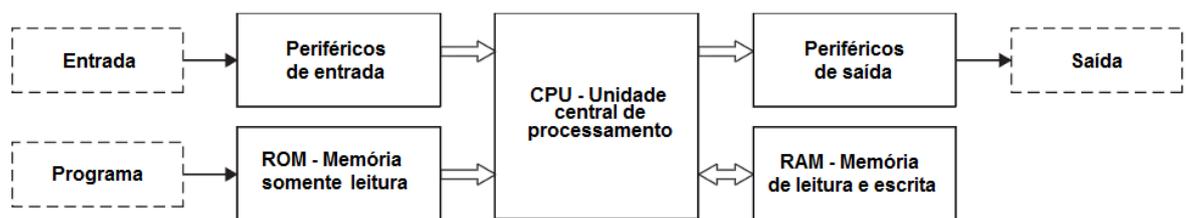


Figura 2.18 – Elementos de um controlador digital
Fonte: BATES, 2008

Os microcontroladores podem ser classificados pelo número de bits que manipulam. Os de 8 bits são utilizados na maioria das aplicações. Os de 16 e 32 bits são muito mais poderosos e geralmente de custo mais alto.

Segundo Ibrahim (2006), podemos classificar as memórias de programa, responsável pelo armazenamento do programa do usuário, e de dados, nos quais estão os dados

temporários. Os tipos de memória quanto a sua tecnologia de fabricação são apresentados no anexo A.

A programação de microcontroladores pode ser feita com diversas linguagens como Assembly, Basic, Pascal e C. O Assembly possui a desvantagem de utilizar mnemônicos de difícil aprendizado e de suporte visto que cada fabricante possui um conjunto de instruções diferente e obriga o usuário aprender uma nova linguagem toda vez que trocar de microcontrolador. Nas linguagens como Basic, Pascal e C, consideradas como de alto nível, facilita o aprendizado pelo uso de instruções que são palavras corriqueiras (IBRAHIM, 2006).

No anexo B é apresentado as características do microcontrolador ATmega 328 e a biblioteca eFLL.

2.6 Sistemas de controle

Um sistema de controle convencional consiste basicamente em três blocos. A figura 2.19 mostra um diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação.

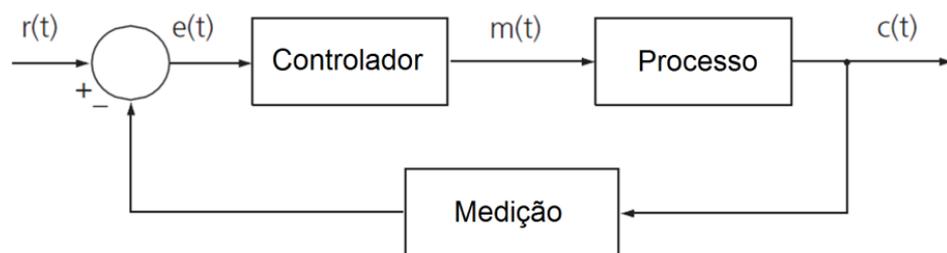


Figura 2.19- Diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação.

Fonte: IBRAHIM, 2004

O sistema de controle de malha fechada permite que haja uma atuação no processo de acordo com os parâmetros do operador e com variáveis internas. Uma vantagem do sistema de controle de malha fechada é o fato de que o uso de realimentação faz com que a resposta do sistema seja insensível a distúrbios (OGATA, 2011).

Este sistema compara o valor lido da variável na saída do processo, $c(t)$, com o valor de referência da entrada, $r(t)$, produzindo um sinal de controle que vai reduzir o desvio a zero, denominado sinal de erro, $e(t)$. Este sinal atua no controlador para gerar o sinal de controle, $m(t)$ (IBRAHIM, 2004).

Com o erro constante e igual a zero, dentro das especificações, o controlador está em estado estacionário, caso contrário, ele deve atuar para a estabilização do sinal de saída tornando-o zero novamente.

Segundo Nascimento e Yoneyama (2004) as especificações de um sistema de controle poderiam ter como base:

- Estabilidade: a saída $c(t)$, para $r(t)$ constante, deve retornar ao ponto de equilíbrio após um distúrbio.
- Rejeição a distúrbio: para um distúrbio diferente de zero a saída $c(t)$ será pouco influenciada.
- Robustez a incertezas no modelo: o controlador deve tolerar incertezas dos componentes e o desconhecimento exato dos parâmetros do modelo.
- Forma de resposta à entrada padrão: a resposta típica $m(t)$ de um sistema com a aplicação de um degrau é apresentada na figura 2.20 na qual são indicados parâmetros de resposta em estado estacionário e transitórios.

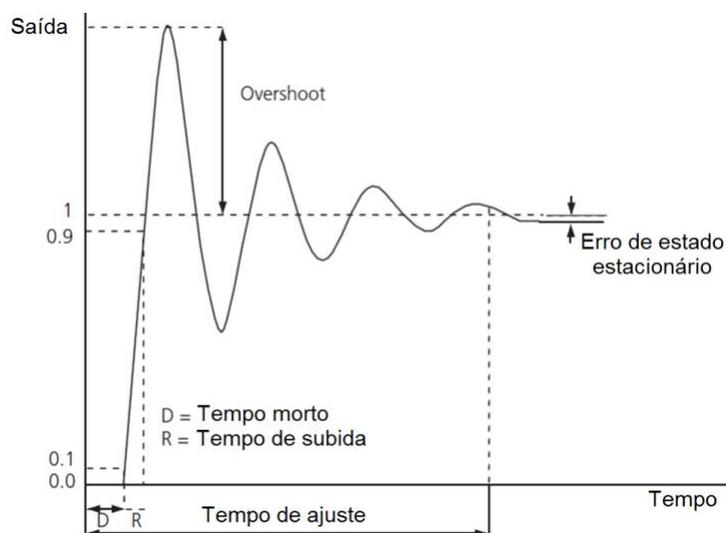


Figura 2.20 – Resposta a um grau no processo de transição e estabilização
Fonte: NASCIMENTO E YONEYAMA; IBRAHIM, 2004

Onde:

- O tempo morto, D , representa o tempo decorrido entre a aplicação de um sinal de entrada e o início de um sinal de saída.

- O tempo de subida, R , é o tempo necessário para que a saída aumente de 10% a 90% do valor final.
- O *overshoot*, ou porcentagem de sobre sinal, é a diferença máxima entre os valores transitórios e de estado estacionário.
- O tempo de ajuste é o tempo de resposta para que a saída fique dentro de 5% do valor final.
- Erro de estado estacionário: o valor de $e(t)$ quando $t \rightarrow \infty$, com valor percentual de 2 %.

Também se deve levar em consideração a simplicidade, o custo de operação e limitações nos sinais.

As descrições desses sinais são feitas no domínio de tempo expressos como funções. Poderiam também ser descritos de forma equivalente no domínio da frequência, ou o domínio s , operador de Laplace, que é a base utilizada na descrição domínio s do sistema. Sendo que a razão entre os sinais de saída e de entrada expressado no domínio s é a função de transferência do sistema, $G(s)$. O s é por $s = \sigma + j\omega$ (IBRAHIM, 2004).

Segundo Ibrahim (2004), a análise básica de um sistema de controle com realimentação deve ser feita da seguinte maneira:

- Determinar um modelo matemático para cada uma das unidades de construção do sistema. Funções de transferência são os mais convenientes na utilização para esse fim.
- Representar o sistema usando um diagrama de blocos e determinar a sua geral função de transferência.
- Determinar as características por meio de uma resposta ao degrau.

Um sistema estável não possui oscilação e nem aumento de sinal.

Também segundo Ibrahim (2004), o objetivo de um sistema de controle com realimentação é atender um conjunto de especificações de desempenho dados no domínio do tempo ou da frequência tendo no domínio do tempo dois componentes:

- desempenho transitório, que pode ser dada em termos de superação porcentagem, tempo de subida, tempo de estabilização e a constante de tempo predominante.
- desempenho estacionário, que é dado em termos de erro de estado estacionário.

Segundo Ogata (2011), os controladores podem ser classificados de acordo com suas ações de controle:

- Controlador de duas posições ou liga/desliga: sistema de controle possui duas posições fixas, normalmente liga/desliga.
- Controladores proporcionais;
- Controladores integrais;
- Controladores proporcional/integrais;
- Controladores proporcional/derivativos;
- Controladores proporcional/integral/derivativos: controlador composto pelas ações proporcional, integral e derivativa, definida como:

$$m(t) = Kp e(t) + \frac{Kp}{Ti} \int_0^t e(t) dt + Kp Td \frac{de(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Sua função de transferência:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = Kp \left(1 + \frac{1}{Tis} + Tds \right) \quad (2.6)$$

Onde:

Kp é o ganho proporcional;

Ti é o tempo integrativo;

Td é o tempo derivativo.

A ação de controle proporcional é determinada pela relação da saída do controlador $m(t)$ e o sinal de erro atuante $e(t)$, em que o sinal é proporcional ao sinal de erro no momento presente, onde Kp é o ganho, componente que representa a realimentação instantâneo.

$$m(t) = Kp e(t) \quad (2.7)$$

Sua função de transferência:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = Kp \quad (2.8)$$

O controlador integral tem a saída $m(t)$ modificada a uma taxa de variação proporcional ao sinal de erro atuante em $e(t)$, onde K_i é uma constante ajustável que representa a integral do erro dos valores passados da realimentação.

$$m(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.9)$$

Sua função de transferência:

$$\frac{u(s)}{e(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (2.10)$$

Um controlador PID, Proporcional Integral Derivativo, pode ser representado como diagrama de blocos da figura 2.21.

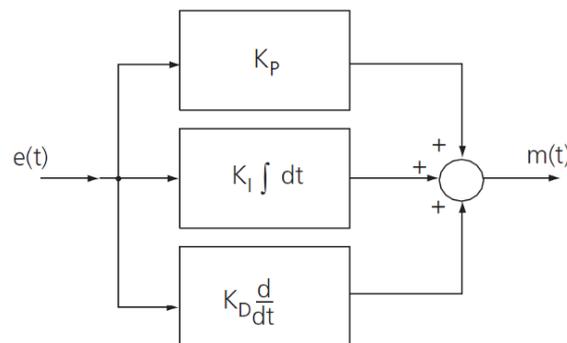


Figura 2.21 – Diagrama de blocos de um controlador PID
Fonte: IBRAHIM, 2004

Os controles derivativo, suscetível a ruídos, representa a derivada do erro ao qual tende a antecipar o comportamento futuro do erro de realimentação.

Segundo Ogata (2011), a maioria dos controladores PID tem seus ajustes efetuados por regras de sintonia que começa pela modelagem matemática do processo que deve ser controlador. Na impossibilidade, devido à complexidade da planta, haverá a necessidade de abordagens experimentais de sintonia. Existem duas regras de Ziegler-Nichols para sintonia, que são:

- Primeiro método: obtém-se experimentalmente a curva de resposta em s por meio da aplicação de um degrau unitário. Essa curva possui dois parâmetros constantes que representa o atraso, L , e o tempo, T . A figura 2.22 apresenta curva de resposta em forma de s .

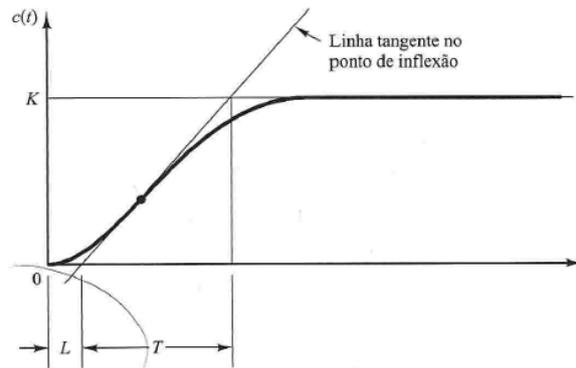


Figura 2.22 - Curva de resposta em forma de s

Fonte: OGATA, 2003

A regra de sintonia baseada na resposta ao degrau da planta é apresentada no quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Regra de Ziegler-Nichols no primeiro método

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9T/L$	$L/0,3$	0
PID	$1,2T/L$	$2L$	$0,5L$

Fonte: OGATA, 2003

- Segundo método: inicia-se com o controle proporcional somente, sendo T_i igual ao infinito e T_d igual a 0, depois aumenta-se o ganho K_p até que a saída tenha uma oscilação sustentada, sendo esse o valor crítico, K_{cr} e o período, P_{cr} , pode ser determinando também. Caso não haja oscilação sustentada esse método não se aplica. No quadro 2.3 apresentam-se as regras para sintonia baseada em K_{cr} e P_{cr} .

Quadro 2.3 - Regra de Ziegler-Nichols no segundo método

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45K_{cr}$	$1/1,2P_{cr}$	0
PID	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: OGATA, 2003

Apesar de serem muito usados, esses métodos necessitam que sejam conhecidos a dinâmica do processo.

Também segundo Nascimento e Yoneyama (2004) para a solução de um problema de controle recomenda-se adotar os seguintes passos para a solução:

- Análise da solvabilidade: verificam-se as possíveis soluções para o problema.
- Seleção da metodologia de projeto: seleção de métodos gráficos, analíticos, numéricos ou heurísticos que podem ser utilizados de maneira combinada.
- Projeto do controlador: determinar a estrutura e os parâmetros do controlador com a base na experiência do projetista.
- Simulação: Existem diversos tipos de simuladores analógicos, digitais, híbridos, computadorizados, usualmente utilizados para uma melhor aproximação em relação ao sistema real.
- Implementação do controlador: A implementação consiste no desenvolvimento do protótipo do controlador com especificação de materiais e componentes adequados ao projeto com detalhes tecnológicos, custo, suporte, entre outros.
- Testes em bancada e sintonização final: são realizados ensaios nas condições de operação similares à planta que o sistema será instalado, podendo ser realizado com controladores e sensores reais e planta simulada quando a malha de controle for muito dispendiosa ou inacessível.
- Operação assistida: no período inicial de funcionamento o controlador é monitorado com o intuito de corrigir eventuais defeitos e melhorias gerais.
- Treinamento do pessoal de operação e suporte técnico: tem por metas obter maior produtividade, segurança, qualidade, eficácia, e conforto na operação e manutenção do sistema.

2.7 Lógica *Fuzzy*

A lógica nebulosa, ou lógica *Fuzzy* é uma ferramenta que permite o tratamento de expressões que envolvem grandezas descritas de forma não exata para o desenvolvimento de sistemas de controle por meio do uso de conceitos e teoria dos conjuntos *Fuzzy*, atribuindo um grau de veracidade no intervalo entre 0 e 1, no qual a certeza é representada pelo valor 1. Assim, determina-se um grau de pertinência a variável, o que diferencia da lógica clássica que

estabelece apenas dois valores a variável, verdadeiro ou falso não havendo números intermediários (SIVANANDAM et al, 2007).

Ela pode ser aplicada em sistemas de controle melhorando desempenho com maior simplicidade, produtividade, redução de custos de desenvolvimento e uso da experiência de especialistas humanos e de dados sobre um determinado processo para criar um algoritmo que imita experiência e pensamento com base em regras do tipo Se (condição) Então (ação), mesmo sem o uso de modelagem matemática (IBRAHIM, 2004).

A sua arquitetura simples é composta por um banco de conhecimento, um banco de dados e uma máquina de inferência que executa a ação de controle de um sistema de acordo com o fluxograma mostrado na figura 2.23, segundo Nascimento e Yoneyama (2004).

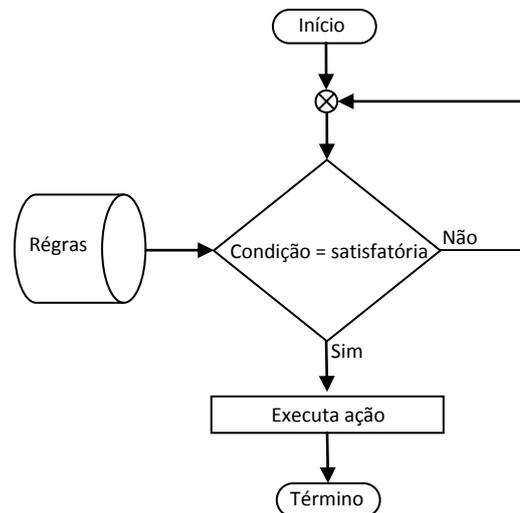


Figura 2. 23 – Arquitetura de controle *Fuzzy*

O sistema busca na base de regras uma ou mais condições que sejam satisfatórias, caso afirmativo, ele executa a ação e retorna ao primeiro passo, caso contrário volta ao passo anterior.

2.6.1. Conjuntos *Fuzzy*

Um conjunto é definido como uma coleção de objetos que podem compartilhar certas características. Podem-se especificar as propriedades de seus elementos, como por exemplo:

$$A = \{x \mid x \text{ é um número ímpar} < 20\}$$

Podem-se listar elementos de um conjunto:

$$A = \{1, 2, 3, 4, 5\}$$

A função de pertinência, μ , pode ser usada para definir um conjunto

$$\mu_A(x) = 1 \quad \text{Se } x \in A, \text{ e}$$

$$\mu_A(x) = 0 \quad \text{Se } x \notin A \text{ para todos os valores de } x$$

Expressões humanas vagas como médio, quente, frio, dentre outros podem ser expressas por conjuntos *Fuzzy*, como:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid x \in X \}$$

Onde X representa o universo e μ_A assume valores entre 0 e 1.

Como exemplo pode-se citar alguns valores de temperatura em °C mostrado na figura 2.24:

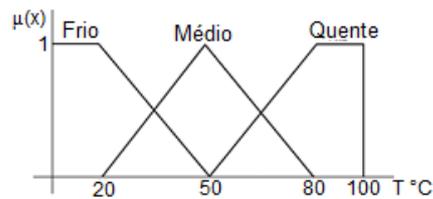


Figura 2. 24 – Variável temperatura com seus subconjuntos

As variáveis linguísticas são valores assumidos formando subconjuntos representados por classes de palavras com valores que podem ser descritos de forma qualitativa e quantitativa pelos conjuntos *Fuzzy*, como Frio, Médio e Quente (IBRAHIM, 2004).

A função de pertinência triangular é classificada com três parâmetros que determinam as coordenadas do eixo x dos vértices do triângulo e pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} \mu(x) &= a(x-b) / (b-c); \quad b \leq x \leq c \\ &= a(x-d) / (d-c); \quad c \leq x \leq d \\ &= 0; \quad \text{caso contrário} \end{aligned} \tag{2.11}$$

A figura 2.25 representa esta função triangular:

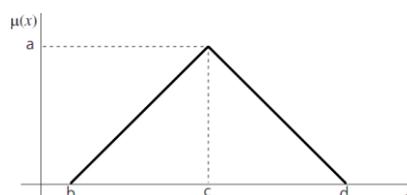


Figura 2.25 – Função de pertinência triangular

A função de pertinência trapezoidal é classificada com quatro parâmetros que determinam as coordenadas do eixo x dos vértices do trapézio e pode ser expressa como:

$$\begin{aligned} \mu(x) &= a(x-b) / (c-b); & b \leq x \leq c &= a; & c \leq x \leq d \\ &= a(e-x) / (e-d); & d \leq x \leq e &= 0; & \text{caso contrário} \end{aligned} \quad (2.12)$$

A figura 2.26 representa esta função graficamente:

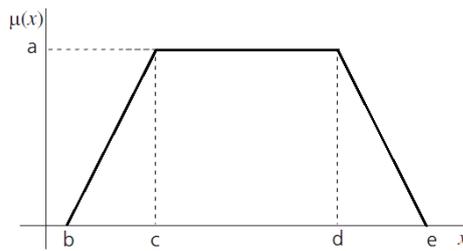


Figura 2.26 – Função de pertinência trapezoidal

A função de pertinência gaussiana é classificada, principalmente, por dois parâmetros denominados $\{c, \sigma\}$ onde c e σ são o centro e a largura, respectivamente. Pode ser expressa como:

$$\mu(x) = a \exp(-x - b)^2 / 2\sigma^2) \quad (2.12)$$

A figura 2.27 representa esta função graficamente:

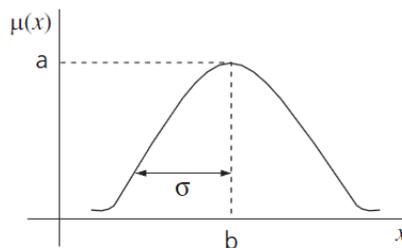


Figura 2.27 – Função de pertinência gaussiana

O raciocínio *Fuzzy* baseia-se nas regras de inferência na forma:

SE <premissa> ENTÃO <consequência>

Os conjuntos *Fuzzy* têm variáveis linguísticas e, portanto, regras de inferência *Fuzzy* podem modelar um sistema linguisticamente. Há inúmeras maneiras que foram apresentadas para expressar uma regra de inferência. Uma regra de inferência direta tem a forma:

Se x é A , então y é B

onde A e B são conjuntos *Fuzzy*.

Uma regra de inferência pode ter mais de uma proposição. Por exemplo, uma regra de inferência com duas proposições assumiria a forma:

se x é A, e y é B, então z é C

onde A, B, e C são subconjuntos difusos de x, y, e z, respectivamente.

Um sistema *Fuzzy* baseado em regras, também conhecido como sistema de inferência, é uma das principais unidades e baseia-se na teoria dos conjuntos *Fuzzy* para variáveis de entrada e saída, declarações “se-então” e conectores E e OU para fazer as regras para tomada de decisão (SIMÕES, 1999).

A lógica *Fuzzy* possui sua técnica baseada em quatro pilares fundamentais:

- Conjunto *Fuzzy*: conjuntos com limites suaves;
- Variáveis linguísticas: variáveis com valores que podem ser descritos de forma qualitativa e quantitativa pelos conjuntos *Fuzzy*;
- Distribuição de possibilidades: restrições sobre os valores de uma variável linguística imposta, atribuindo a ela um conjunto difuso;
- Regras *Fuzzy*: representação do conhecimento para escrever um mapeamento funcional ou uma fórmula lógica que generaliza uma implicação na lógica de dois valores.

2.6.2. Controlador Lógico *Fuzzy*

Um controlador por lógica *Fuzzy* baseia-se em um modelo linguístico composto por regras e as funções de pertinência definidos, em oposição a um modelo matemático, como é o caso de um controlador PID, permitindo a redução do tempo de desenvolvimento e melhorando o desempenho de um controlador convencional, especialmente, em soluções altamente complexas (IBRAHIM, 2004).

Um sistema de controle por controlador PID tem um bom desempenho em sistemas não lineares os quais apresenta apenas uma entrada e uma saída. No entanto, necessita de um modelo matemático da planta muito rígida, principalmente quando são sistemas com alto índice de não linearidade e com muitas variáveis.

Segundo Ibrahim (2004), na concepção de um sistema de FLC, assume-se que:

- Existe uma solução.

- A entrada e as variáveis de saída podem ser observadas e medidas.
- Uma solução adequada é aceitável.
- Um modelo linguístico pode ser criado com base no conhecimento de um ser humano especialista.

Conforme Nascimento e Yoneyama (2004) as características favoráveis dos controladores nebulosos são:

- Não necessidade de modelamento do sistema a ser controlado;
- Possibilidade de incorporar conhecimentos heurísticos do operador humano;
- Aplicabilidade a sistemas de dinâmica complicada o que inclui não linearidade;
- Possibilidade de explorar a característica não linear dos controladores nebulosos para obter maior desempenho;
- Disponibilidade de componentes dedicados.

São características desfavoráveis:

- Ausência de diretrizes precisas para o projeto do controlador, resultando em enfoque artesanal e pouco sistemático;
- Impossibilidade de demonstração de propriedades como estabilidade;
- Precisão de regulação eventualmente insuficiente;
- Consistência das regras não garantidas.

Um controlador Lógico *Fuzzy* é composto basicamente de:

- Interface de fuzzificação;
- Base de conhecimento;
- Máquina de inferência;
- Interface de defuzzificação.

A figura 2.28 mostra a estrutura básica de um controlador de lógica *Fuzzy*.

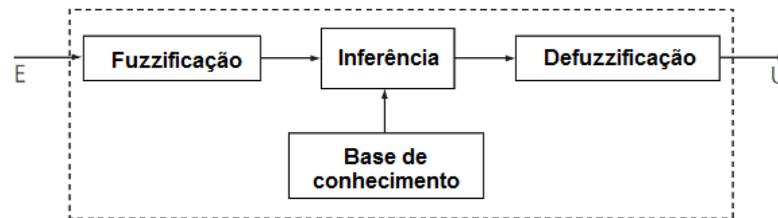


Figura 2.28 - Configuração e relações do controlador *Fuzzy*

Fonte: IBRAHIM, 2004

A fuzzificação é o processo que transforma as entradas com valores numéricos escalares das variáveis, E , em graus de compatibilidade linguísticos. A modelagem de necessita da identificação e de seus subconjuntos que cobrem o universo das variáveis de entrada e saída, como, por exemplo, uma variável Frequência, pode ser composta por três subconjuntos denominados como baixa, média e alta. A figura 2.29 mostra a representação de gráfica de conjuntos *Fuzzy*.

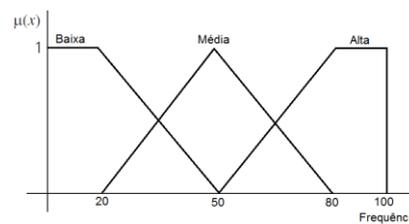


Figura 2.29 - Representação gráfica de conjuntos *Fuzzy*

Com o conhecimento de especialistas sobre o processo a ser controlado, cria-se uma base de conhecimento que possui um conjunto de regras que mapeia a variável de entrada E , faz o processamento de acordo com as estratégias descritas na base de regras. Isso pode ser expresso por instruções linguísticas como *if-then*, “se condição, então ação” definindo as funções de pertinência dos conjuntos *Fuzzy* usado para a tomada de decisões e realização das operações de inferência e sai com um valor U de controle. A figura 2.30 apresenta um sistema especialista com a base de conhecimento para a tomada de decisão pela máquina de inferência.

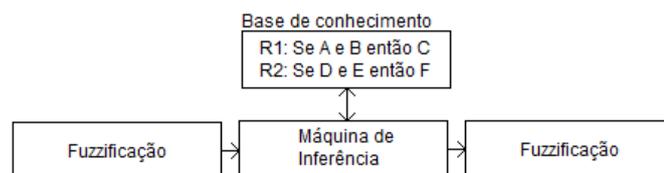


Figura 2.30 – Sistema especialista

A máquina de inferência verifica os fatos antecedentes, o grau de compatibilidade com as regras, determina quais devem ser disparadas e por fim faz agregação utilizando métodos como Mamdani e Takagi-Sugeno.

No método Mamdani possui relações *Fuzzy* dos antecedentes e consequentes usando o modelo Se <antecedente> Então <consequente>. As variáveis de entrada, grandezas numéricas, são transformadas em conjuntos *Fuzzy* pela interface de Fuzzificação, que envia a máquina de inferência para o processamento de acordo com as regras e graus de pertinência não nulo, gerando variáveis para atuação no processo, que são transformadas de conjuntos *Fuzzy* para variáveis numéricas.

No método Takagi-Sugeno também há como base regras de inferência, porém os consequentes das regras são formadas por equações paramétricas relacionando entradas e saídas invés de relações *Fuzzy* como no método Mamdani.

A defuzzificação é o processo de converter as ações de controle *Fuzzy*, transformando os resultados nebulosos da inferência do conceito linguístico em uma saída numérica (SIVANANDAM et al, 2007).

Segundo Ibrahim (2004), os métodos de defuzzificação podem ser:

- a) Centroide: também conhecido como o centro de massa ou o centro de gravidade. É provavelmente o método mais usado para defuzzificação.
- b) Centro de maior área: aplicado quando a saída é constituída por, pelo menos, dois subconjuntos *Fuzzy* convexos que não se sobrepõem.
- c) Primeiro dos máximos: aplicado quando a saída é pontiaguda, sendo o menor valor do domínio com a adesão máxima selecionada.
- d) Inferência máxima: também conhecido como o método de altura. Método da média ponderada: Este método é válido para funções de pertinência simétricas na saída. Cada associação função é ponderada pelo seu valor máximo de inscrição.
- e) Média dos máximos: O método é também conhecido como o meio do máximo, valorizando os picos sendo que no caso de ser único o valor de defuzzificação é a própria abscissa deste pico.

A seleção do método depende da experiência do projetista, visto que nenhum método é mais vantajoso do que os outros e os parâmetros a ser considerados são a complexidade

computacional, aplicabilidade a todas as situações consideradas e a plausibilidade dos resultados de um ponto de vista da engenharia (IBRAHIM, 2004).

2.6.3. Considerações finais

A tecnologia de lógica *Fuzzy* permite o uso de experiência em engenharia e resultados experimentais ao desenvolver um sistema embarcado. Em muitas aplicações, a lógica *Fuzzy* contorna o uso da modelagem matemática rigorosa para obter uma solução de controle. Um controlador *Fuzzy* pode ser desenvolvido pela codificação do conhecimento do sistema estruturado. Isso permite que os algoritmos de controle mais rápido possam ser desenvolvidos em menos tempo e com menos custo (SIMÕES, 1999).

3 SISTEMA DE CONTROLE DE VELOCIDADE – SISCOV[®]

Esse capítulo aborda a estrutura, o funcionamento e os resultados dos estudos anteriores realizados com o sistema de controle de vazão SISCOV[®] na saída do tubo de sucção da BFT para manter a rotação constante.

3.1. Considerações iniciais

O uso de BFT e geradores de indução na geração de energia elétrica por meio de micro centrais hidrelétricas residem no baixo custo de instalação e manutenção se comparados as turbinas convencionais e geradores síncronos. Porém, uma dificuldade existente é o controle da velocidade do rotor quando há variação das cargas. Uma forma de se obter isso é o controle de vazão aduzida ao rotor com o uso de um obturador na saída do tubo de sucção controlando a vazão (VIANA, 2004).

3.2. Princípio de funcionamento de SISCOV[®]

O SISCOV[®] é um equipamento composto por um obturador cônico ligado a um servomecanismo por meio de uma haste que se desloca verticalmente alterando a vazão da água na saída BFT, controlando sua velocidade de rotação. (SANTOS, 2009).

Entre os pontos A e B não ocorre o controle da vazão, ou seja, o obturador do SISCOV[®] não influencia na vazão da água. Quando o obturador se movimenta entre os pontos de B e C ocorre uma variação na vazão. Essa movimentação se dá a partir de um atuador linear. A figura 3.1 representa a estrutura básica do SISCOV[®].

Uma das grandes vantagens do SISCOV[®] é que sua operação não influencia no bom funcionamento da BFT, pois exerce uma influência no rotor bem menor por localizar-se na saída do tubo de sucção, ou seja, a perda de carga ocorre a jusante. Se optar pelo controle na entrada, testes realizados nessa configuração comprovaram a ineficiência devido à grande perda de carga aduzida ao sistema (SANTOS, 2009).

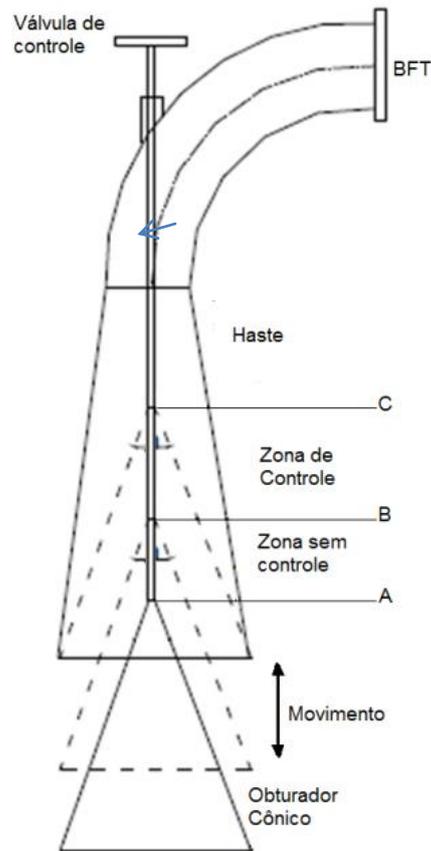


Figura 3. 1 - Estrutura Básica do Sistema de Controle de Vazão (Adaptado)

Segundo Santos (2009), além da menor perda de carga, o baixo custo do equipamento é um fator preponderante, considerando que, para micro centrais hidrelétricas quase 50 [%] do seu custo se dá em equipamentos geradores. Sendo assim, a instalação de um equipamento de baixo custo e de fácil manuseio torna-se uma solução atrativa para o problema de controle de velocidade.

3.3. Ensaios com o SISCOV[®]

Os ensaios com o SISCOV[®] foram realizados no Laboratório Hidromecânico Didático instalado na UNIFEI para testes em bombas e turbinas hidráulicas. Ele é composto por três circuitos independentes, sendo que o principal é constituído por um grupo eletrobomba de 30 [kW] e pode alimentar um grupo gerador de 5 [kW] de potência composto de turbina tipo Francis. O segundo circuito é um modelo de PCH que permite ensaios de fenômenos transitórios que ocorrem em sistemas de baixa e alta pressão e nas chaminés de equilíbrio. O último circuito é constituído de uma turbina Michell-Banki de 1 [kW] que pode acionar um gerador assíncrono (SANTOS, 2009).

Segundo Santos (2009), para ensaios com BFT foi montado um circuito no LHDC que contém os seguintes componentes:

- 01- Resistência Líquida;
- 02- Freio;
- 03- Tanque de sucção;
- 04- Piezômetro, utilizado para medir o nível da água no tanque de sucção;
- 05- Bomba Funcionando como Turbina – BFT;
- 06- SISCOV[®], utilizado para controlar a vazão na saída;
- 07- Válvula de Controle, utilizado para movimentação do SISCOV[®];
- 08- Válvula Borboleta, utilizado para controlar a vazão na entrada;
- 09- Manômetro de coluna de mercúrio, utilizado para medir a pressão na entrada da BFT;
- 10- Bomba Hidráulica, utilizada para simular a altura de queda;
- 11- Câmara de Equalização de pressão;
- 12- Medidor Venturi, utilizado para medir a vazão;

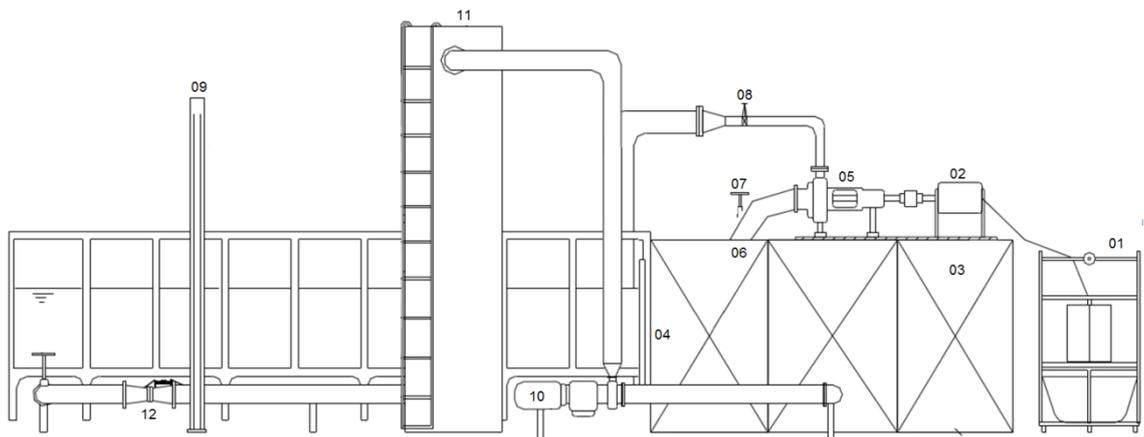


Figura 3.2 – Circuitos de Ensaio
Fonte: SANTOS, 2009

Também foram relacionados equipamentos elétricos utilizados para variar a solicitação da BFT, tacômetro a fim de medir a velocidade de rotação do eixo e painel de controle para controlar a bomba.

A bomba hidráulica (10) é acionada sugando a água do reservatório (03) para simular a queda e a vazão e recalca para a câmara de equalização de pressão. O medidor de Venturi (12) faz a medição da vazão em função da diferença de altura observada no manômetro de mercúrio (09). A água passa pela válvula de controle (08) e entra na BFT (05), passando pelo seu rotor e saindo no tubo de sucção, que possui o sistema de controle de vazão, SISCOV[®] (06), e retornando para o tanque no qual o nível é medido no piezômetro. A energia elétrica é gerada por um dinamômetro com uma resistência líquida (01) acoplada simulando a variação de carga (SANTOS, 2009).

Os dados que caracterizam as condições ótimas da bomba funcionando como turbina são mostrados na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Condições ótimas da bomba funcionando como turbina

Altura Hb [m]	Rotação nb [RPM]	Vazão Qb [m ³ /s]	Rendimento nb [%]	Potência elétrica Pel [kW]
11,8	1800	0,027	76	1,70

Fonte: Medeiros, 2004

Outro ensaio utilizando o LHDC foi realizado utilizando um gerador de indução acoplado ao eixo da BFT, com a finalidade de verificar as condições de funcionamento do grupo gerador e da BFT (MEDEIROS, 2004).

Segundo Medeiros (2004), foram realizados testes com as rotações de 1740, 1800, 1840 e 1860 [rpm] pelas seguintes razões:

1740 [rpm]: para comparar a relação entre a altura e a vazão na BFT com aquelas quando a máquina operar como bomba;

1800 [rpm]: para verificar a variação de frequência desde a condição a vazio até àquela na qual o gerador opera a carga nominal;

1840 [rpm]: nessa rotação o gerador operou próximo de 60 [Hz] com rendimento máximo, mas o gerador não operava em plena capacidade;

1860 [rpm]: o gerador operou em plena capacidade (10 [A]) com a frequência de 60 [Hz], mas o rendimento do grupo-gerador não foi máximo.

3.4. Resultados dos ensaios com o SISCOV[®]

A figura 3.3 esboça as curvas de variação da vazão em relação à abertura do obturador nos ensaios com obturadores com ângulos de 60° e 30°. Para conicidade de 30° o intervalo indicado pelos pontos de X02 a X12 é a zona sem atuação de controle da vazão, enquanto o intervalo indicado pelos pontos entre X12 e X22 mostra a zona com atuação de controle (SANTOS, 2009).

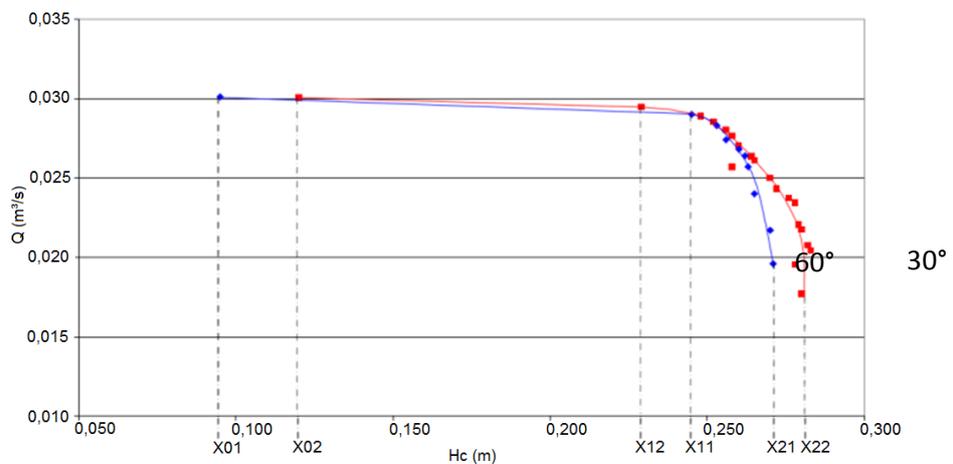


Figura 3.3 – Posição do cone x vazão para o ângulo de conicidade $\alpha = 60^\circ$ e 30°

Fonte: SANTOS, 2009

O controle da vazão realizado pelo obturador do SISCOV[®] com ângulo de 60° pode ser definido nas duas regiões citadas. Para o de 30° compreendido no intervalo de sem controle de X01 a X11 e o com controle está entre os pontos X11 e X21. As tabelas 3.2 e 3.3 apresentam os resultados para atuação na zona sem e com controle dos obturadores de 30° e 60°, respectivamente (SANTOS, 2009).

Tabela 3.2 – Comparação entre zonas sem ação de Controle para 60° e 30°

Ângulo	Zonas sem ação de controle			
	Pontos	Deslocamento [m]	Pontos	Vazão [m³/s]
60°	X01 a X11	0,150	Q01 – Q11	0,0011
30°	X02 a X12	0,109	Q02 – Q12	0,0021

Fonte: SANTOS, 2009

Tabela 3.3 – Comparação entre zonas com ação de Controle para 60° e 30°

Ângulo	Zonas com ação de controle			
	Pontos	Deslocamento [m]	Pontos	Vazão [m ³ /s]
60°	X11 a X21	0,026	Q11 – Q21	0,0094
30°	X12 a X22	0,051	Q12 – Q22	0,0076

Fonte: SANTOS, 2009

A diminuição da velocidade da água ao longo do tubo ocorre quando há obstrução da passagem da água na saída do tubo de sucção diminuindo também a velocidade de rotação do eixo da BFT. A velocidade de escoamento ao longo do tubo de sucção pode ser simulada em computador e os resultados obtidos podem ser observados na figura 3.4.

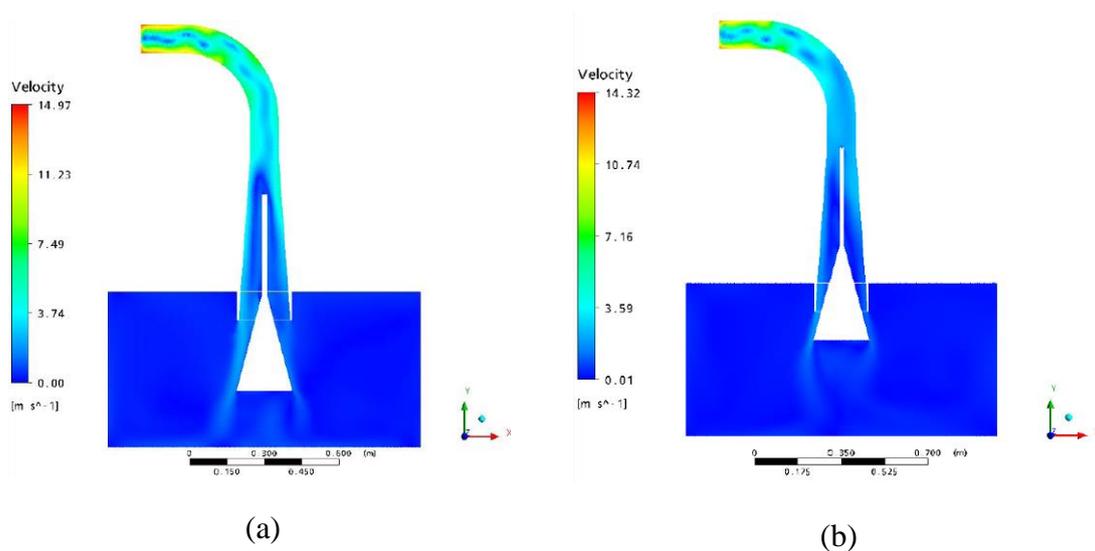


Figura 3.4 – Velocidade de Escoamento para ângulo de conicidade de 30°

Fonte: SANTOS, 2009

Na figura 3.4a o obturador está na abertura máxima um escoamento axial da velocidade ao longo do tubo caracterizando o aumento da vazão, sendo essa velocidade maior no local de menor área, ou seja, na entrada do tubo. As figuras demonstram que a velocidade do escoamento no tanque de jusante é pequena, face da proporção existente entre o tanque e o tubo de sucção (SANTOS, 2009).

Este sistema pode controlar a velocidade da BFT sendo que o obturador de 60° possui um menor curso de controle, aproximadamente 26 [mm]. Para o obturador de 30° aumentou para 51 [mm] no curso de controle e a diminuição da região na qual não há controle indicando melhor funcionamento.

Com experimentos realizados com o SISCOV[®] acoplado a um gerador foi possível determinar a variação da frequência em função da carga elétrica que o gerador alimentava. É importante salientar que o gerador de indução só operou com a frequência nominal do sistema, ou seja, 60 [Hz], nas rotações de 1840 e 1860 [rpm], nas condições de máximo rendimento do grupo-gerador e quando o gerador opera em plena carga. A figura 3.5 apresenta a frequência do gerador em função da potência elétrica gerada (MEDEIROS, 2004).

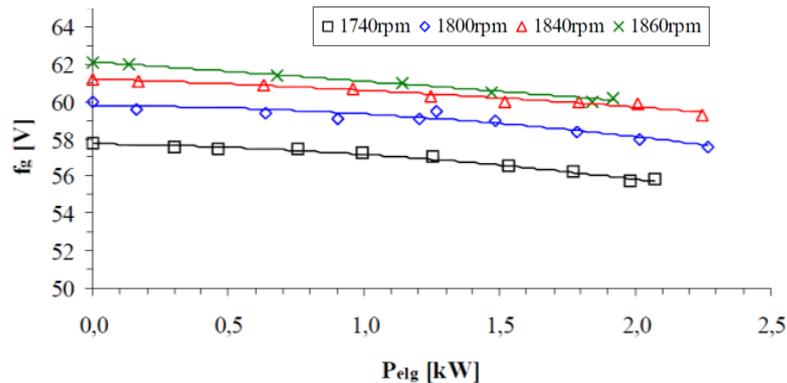


Figura 3.5 - Frequência do gerador em função da potência elétrica gerada

Fonte: MEDEIROS, 2004

A tabela 3.4 apresenta a rotação, a vazão, a altura, frequência e tensão elétrica do gerador acoplado a BFT, no ponto para o qual o grupo-gerador apresentou o melhor rendimento, para as rotações de 1740, 1800, 1840 e 1860 [rpm].

Tabela 3.4 – Pontos onde o grupo gerador operou com máximo rendimento

N [RPM]	Q [m ³ /s]	H [m]	F [Hz]	V [V]
1740	0,0273	11,8	56,5	227
1800	0,0273	12,0	58,5	242
1840	0,0278	12,0	60	255
1860	0,0282	11,7	60,5	224

Fonte: MEDEIROS, 2004

3.5. Considerações finais

Segundo Santos (2009), os resultados obtidos nos ensaios experimentais mostram a viabilidade no controle da velocidade da Bomba Funcionando como Turbina, por meio do sistema de controle de velocidade inserido na seção de saída do tubo de sucção sendo que o obturador de conicidade de 30° obteve um maior curso facilitando a regulagem do sistema de controle.

Os ensaios realizados por Medeiros (2004) indicam que o grupo-gerador operou com a frequência nominal, 60 [Hz] a potência elétrica gerada foi maior a uma rotação de 1840 [rpm], apesar do rendimento ter sido um ponto percentual menor em relação às outras rotações. Sua aplicação para aproveitamento de pequeno porte e em sistemas isolados mostra-se interessante principalmente pelo baixo custo, cerca de 50 [%] do valor para de aquisição de um sistema equivalente com turbina *Michell-Banki*.

4 METODOLOGIA DE PESQUISA

São abordadas, neste capítulo, as metodologias consideradas no procedimento de pesquisa com base na classificação, técnica e etapas adotadas para essa dissertação.

4.1. Considerações iniciais

Pesquisa é um conjunto de ações, propostas para encontrar a solução para um problema, que tem por base procedimentos racionais e sistemáticos. A pesquisa é realizada quando existe um problema e não há informações para solucioná-lo (Menezes e da Silva, 2005).

Segundo Cervo, Bervian e da Silva (2007), a pesquisa é uma atividade voltada à investigação dos problemas teóricos ou práticos por meio do emprego de processos científicos.

Uma pesquisa deve ter seu início com a delimitação dos objetivos, centrados na definição do problema teórico ou prático, observado ou sentido, que não pode haver continuidade. Essa tarefa requer a geração de hipóteses ou pressupostos que orientem o trabalho no sentido de solucionar os problemas observados. Isso justifica o conjunto de processos ou etapas que servem aos métodos científicos (CERVO, BERVIAN E DA SILVA, 2007).

Segundo Lakatos e Marconi (2010), o método científico é a teoria da investigação que alcança seus objetivos cumprindo ou se propõe a cumprir as seguintes etapas:

- Descobrimto do problema num conjunto de conhecimentos. Caso não esteja definido de maneira clara deve-se colocar de forma precisa à luz de novos conhecimentos. Caso contrário, procura-se conhecimento ou instrumentos relevantes ao problema para sua solução;
- Tentativa de solução do problema com auxílio dos meios identificados. Sendo formulada uma solução inadequada, estimam-se novas hipóteses, teorias, técnicas ou ainda novos dados empíricos para a solução. Caso contrário, a solução exata ou aproximada deve ser obtida com o auxílio do instrumental conceitual ou empírico disponível;

- Investigação das consequências da solução obtida: para uma teoria, a busca de prognósticos que possam ser feitos com seu auxílio. Para novos dados, examina-se as consequências que possam ocorrer para as teorias relevantes;
- Prova da solução: se o resultado for satisfatório, a pesquisa é dada como concluída. Do contrário, deve-se fazer a correção das hipóteses, teorias, procedimentos ou dados empregados na obtenção da solução incorreta.

De acordo com Cervo, Bervian e da Silva (2007), para qualquer tipo de ciência existe um método básico com um determinado número de procedimentos que são a observação, a descrição, a comparação, a análise e a síntese.

- Observação: é a aplicação dos sentidos físicos com o objetivo de obter-se visão clara do objeto a ser estudado. As outras etapas dependem da observação que deve ser atenta, exata, completa e metódica.
- Descrição: é a habilidade de descrever, metodologicamente, os passos para a realização da pesquisa e na aplicação de técnicas que fazem com que outros vejam aquilo que o pesquisador observou uma vez que apenas a observação não é possível construir os conhecimentos de que a ciência se serve. Isso permite que outros pesquisadores cheguem aos mesmos resultados seguindo o mesmo método, ou seja, haja a replicabilidade, dando validade científica de todo e qualquer experimento.
- Comparação: é uma técnica aplicável na ocorrência de dois ou mais termos com as mesmas propriedades gerais ou características particulares com base na abstração das semelhanças e destaque as diferenças. Na comparação está implícita a realização da análise e da síntese, passos essenciais para identificação das propriedades gerais e das características particulares de cada um dos termos comparados.
- Análise e síntese: Caso a análise possa ser descrita dependendo do método. No racional a operação mental consiste na de composição de um todo de tantas partes quantas possíveis. No experimental, a análise é também a decomposição do todo em tantas partes quantas possíveis e pode ser feita em laboratório. A síntese é a reunião das partes decompostas para análise. Logo, a análise é o processo que parte do mais complexo para o menos complexo e a síntese parte do mais simples para o menos simples.

Também segundo Cerro, Bervian e da Silva (2007), para aplicação desses métodos em pesquisa seus propósitos são:

- Formular questões ou propor problemas e levantar hipóteses;
- Efetuar observações e medidas;
- Registrar tão cuidadosamente quanto possível os dados observados com o intuito de responder às perguntas formuladas ou comprovar a hipótese levantada;
- Elaborar explicações ou rever conclusões, ideias ou opiniões que estejam em desacordo com as observações ou com as respostas resultantes;
- Generalizar, isto é, estender as conclusões obtidas a todos os casos que envolvem condições similares; a generalização é tarefa do processo chamado indução;
- Prever ou predizer, isto é, antecipar que, dadas certas condições, é de esperar que surjam certas relações.

A metodologia é o tópico do projeto de pesquisa que abrange maior número de itens, pois responde às seguintes questões: Como? Com quê? Onde? Quanto? (LAKATOS; MARCONI, 2010).

4.2. Classificação da pesquisa

As metodologias de pesquisa podem ser classificadas quanto ao objetivo, natureza, escolha do objeto de estudo, técnica de coleta de dados e técnica de análise de dados. A pesquisa básica possui por objetivo a geração de conhecimentos novos úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista.

A pesquisa aplicada é para aplicação prática e dirigida à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais. (GIL, 2002). No quadro 4.1 apresenta-se, de forma estrutural, como pode ser classificada a metodologia científica.

A pesquisa quantitativa refere-se a números, o que pode ser quantificável. Utiliza recursos e técnicas estatísticas. A pesquisa qualitativa não traduz para números a interpretação dos fenômenos e a atribuição do significado baseia-se no processo qualitativo.

Quadro 4.1 - Formas clássicas de classificação da pesquisa do ponto de vista

Formas clássicas de classificação da pesquisa do ponto de vista:			
Sua natureza	Abordagem do problema	Seus objetivos	Procedimentos técnicos
Básica	Quantitativa	Exploratória	Bibliográfica
Aplicada	Qualitativa	Descritiva	Documental
		Explicativa	Experimental
			Levantamento
			Estudo de caso
			<i>Expost-Facto</i>
			Ação
			Participante

Fonte: GIL, 2002

A pesquisa exploratória tem por objetivo a busca por informações sobre um determinado assunto de estudo proporcionando maior familiaridade com o problema, tornando-o mais explícito ou a constituir hipóteses, aprimoramento de ideias. Esta possui como base o levantamento bibliográfico e entrevistas com pessoas que apresentam envolvimento prático com o problema pesquisado para maior familiaridade, análise de exemplos. Em geral, são pesquisas bibliográficas e estudos de caso (GIL, 2002).

A pesquisa descritiva ocorre quando não há manipulação, baseia-se na observação, registro e análise dos fenômenos buscando sua relação, natureza e características para a descrição de uma população, um fenômeno ou um estabelecimento de relações entre variáveis usando técnicas padronizadas de coleta de dados como questionário e observação sistemática. Em geral são pesquisas na forma de levantamento.

A pesquisa Explicativa identifica fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Aprofunda o conhecimento da realidade porque explica a razão, o “porquê” das coisas, requerendo o uso do método experimental, e ou o uso do método observacional dependendo da ciência em questão. Em geral são pesquisas na forma pesquisa experimental e “*Export-facto*”.

Pesquisa Bibliográfica: desenvolvida com base nas referências já publicadas em livros, artigos de periódicos, dissertações e teses podendo ser de maneira independente ou como parte da descritiva ou experimental. É o procedimento básico para fundamentar a pesquisa para o domínio do estado da arte sobre um tema.

Pesquisa Documental: desenvolvida a partir de uma investigação por meio de documentos que não receberam tratamento analítico para descrever costumes, comportamento, diferenças.

Pesquisa Experimental: ocorre quando há manipulação direta do objeto em estudo quando selecionando variáveis que serão capazes de influenciá-lo, estabelecendo relação entre causa e os efeitos de um fenômeno, definindo formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Levantamento: quando a pesquisa envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer.

Estudo de caso: quando envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.

Pesquisa *Expost-Facto*: quando o “experimento” realiza-se depois dos fatos.

Pesquisa-Ação: quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.

Pesquisa Participante: quando se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigadas.

As abordagens consideradas nessa dissertação podem ser classificadas quanto ao objetivo, natureza, escolha do objeto de estudo, técnica de coleta de dados e técnica de análise de dados. No quadro 4.2, é apresentada a classificação da metodologia científica.

Os tipos de pesquisa não são excludentes podendo ser classificados em mais de uma categoria como é o caso dos procedimentos técnicos que foram selecionados na pesquisa bibliográfica e experimental.

Quadro 4.2 - Classificação da pesquisa

Sua natureza	Abordagem do problema	Seus objetivos	Procedimentos técnicos
Básica	Quantitativa	Exploratória	Bibliográfica
Aplicada	Qualitativa	Descritiva	Documental
		Explicativa	Experimental
			Levantamento
			Estudo de caso
			<i>Expost-Facto</i>
			Ação
			Participante

4.3. Justificativas do método selecionado

O objetivo dessa dissertação é a modelagem e especificação de um sistema de controle para BFTs que mantenha a frequência e a tensão constante na saída de um gerador de indução. Com base nisso, a opção pelos métodos de pesquisa a seguir justificam-se pelos seguintes aspectos:

Aplicada: A pesquisa aplicada possui caráter prático para a solução de problemas específicos. O sistema a ser desenvolvido tem aplicação em máquinas primárias para geração de energia elétrica com tecnologias conhecidas há muitos anos.

Quantitativa: baseada em medidas de variáveis objetivas e na ênfase em comparação de resultados. Esse método permite o uso de medições das grandezas elétricas como, por exemplo, tensão e frequência adequadas às especificações do sistema.

Explicativa: essa modalidade possui como base os métodos experimentais dadas à sua aplicação prática.

Bibliográfica: permite a exploração de um problema com base nos estudos de trabalhos elaborados anteriormente relacionados ao assunto de interesse maneira independente ou como

parte da experimental. Isso se faz necessário para fundamentar os estudos que devem ser realizados.

Experimental: nesse trabalho é necessário o uso de simulações em computador e o desenvolvimento de um protótipo do sistema para a averiguação e validação da solução que será elaborado manipulando diretamente as variáveis relativas ao objeto de estudo e proporcionar a relação entre as causas e os efeitos de um fenômeno.

4.4. Procedimento metodológico adotado

A metodologia da dissertação centra-se no uso de um sistema de controle em malha fechada para o posicionamento do obturador do SISCOV[®]. O projeto deve ser iniciado com base em dados de pesquisas e aplicações desenvolvidas anteriormente para modelagem de escoamento no tubo de sucção de uma máquina hidráulica motora que controla a velocidade do rotor.

O procedimento metodológico contém os seguintes tópicos:

Delimitação do problema: o estudo inicia-se com as especificações e características do SISCOV[®], cuja principal função é o controle da vazão de água na saída de uma bomba funcionando como turbina que estará conectada a um gerador de indução. A variável de controle será a frequência na saída do gerador que terá como valor de referência 60 [Hz].

O plano é manter a frequência em 60 [Hz] com o uso do obturador com consequência na rotação do eixo do gerador. Como se trata de uma modelagem, os experimentos serão realizados com o auxílio de softwares e a confecção de um circuito elétrico de controle em bancada para os testes.

Pesquisa bibliográfica: uso de livros, artigos e dissertações como fonte primária de dados por meio de simulações, experimentos e aplicações em campo realizadas anteriormente permitindo o entendimento do comportamento e a elaboração de possíveis soluções. Realizar-se-á busca e análise dos fundamentos teóricos da bibliografia diretamente relacionada, compondo o quadro sobre o tema, definindo de forma detalhada as características, funcionamento e vantagens do sistema de controle de velocidade. Isso deve permitir a caracterização e determinação das grandezas físicas do sistema.

Este estudo estende-se durante todo período de desenvolvimento da dissertação, pois além do sistema objeto desse estudo, há o microcontrolador, motor de indução trifásico com

gerador, método de controle, sensores, servomotores, linguagens de programação e bombas centrífugas.

Os estudos realizados nortearão a elaboração de um modelo do sistema de controle que permitirão a declaração de variáveis, algoritmos necessários antes de se construir o protótipo, podendo determinar o melhor método de controle e definição do sistema eletrônico a ser utilizado.

Experimentos: Na simulação em computador será adotada a lógica *Fuzzy*, com definição dos conjuntos *Fuzzy* e regras para desenvolver o sistema de controle e estabelecer um modelo que permita estudar o comportamento com a geração de gráficos para facilitar a interpretação. Com isso pretende-se verificar se a modelagem proposta está solucionando satisfatoriamente o problema em questão.

O sistema eletrônico proposto será composto por um microcontrolador com entradas analógicas para os dados de posicionamento do obturador e velocidade do eixo da bomba; entradas digitais para sensores fim-de-curso e botoeiras de comando; saídas digitais para o acionamento do servomecanismo; e uma porta para comunicação com computador. Para isso, será adotado o microcontrolador Arduino como plataforma de desenvolvimento.

Na placa do microcontrolador será acoplada uma placa de circuito impresso confeccionada para interfacear o controlador com o processo. Esta receberá os sinais de posicionamento do obturador por meio de um sensor de posicionamento, sinais de chaves fim-de-curso que determinarão os limites máximo e mínimo do curso e um transdutor de frequência para a verificação da rotação do eixo.

O microcontrolador receberá um programa desenvolvido na linguagem C que receberá os sinais dos sensores, padronizará, estimará o melhor posicionamento e depois enviará o comando adequado para o obturador.

A confecção de um protótipo do sistema de controle será realizada para que seja possível verificar o comportamento do modelo em uma situação próxima de sua aplicação final.

Testes e análise de resultado: Os testes serão realizados para a validação dos resultados obtidos experimentalmente em trabalhos anteriores para diferentes aberturas, fazendo uma análise comparativa entre valores apresentados e os obtidos com o sistema automatizado. Os trabalhos realizados anteriormente obtiveram resultados com a operação do sistema feita manualmente.

4.5. Considerações finais

Espera-se que a abordagem metodológica descrita nesse capítulo permita o desenvolvimento do modelo proposto, garantindo que a frequência na saída do gerador de indução fique constante em sistemas isolados com o uso do SISCOV.

O aperfeiçoamento destes métodos poderá ser utilizado para ensaios experimentais no laboratório da UNIFEI para melhorias e aplicações no campo.

5 MODELAGEM E ESPECIFICAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Neste capítulo será apresentada a modelagem e simulação do controlador *Fuzzy* com auxílio do *software* MatLab, a especificação dos componentes elétricos, a montagem do protótipo, a implementação do software de controle em linguagem C e testes em bancada do sistema.

5.1. Considerações iniciais

O desenvolvimento do sistema de controle para o SISCOV pode ser dividido em quatro etapas:

- Estudo do comportamento quanto ao controle da vazão e da rotação da BFT;
- Modelagem do controlador *Fuzzy* com auxílio do MatLab;
- Especificações elétricas e eletrônicas do sistema de controle;
- Implementação do software de controle em linguagem C.

Nos tópicos a seguir são descritos os procedimentos realizados para o desenvolvimento do modelo, de circuito elétrico e do software de controle.

5.1.1. Estudo do comportamento do SISCOV[®] no controle da vazão

O controle da vazão realizado pelo obturador com conicidade de 30° mostrou-se mais eficaz do que o de 60° apresentando controle entre os pontos 0,229 [m] e 0,280 [m]. Esse sistema pôde controlar a velocidade da BFT com um curso 51 [mm] e diminuiu a região onde não há controle.

Com experimentos realizados com o conjunto formado pelo SISCOV[®], BFT e gerador de indução foi possível determinar a variação da frequência em função da carga elétrica que o gerador estava alimentando em condições de máximo rendimento do grupo-gerador e operando em plena carga. A frequência nominal do sistema, 60 [Hz], foi obtida com rotação de 1840 e vazão de 0,0278 [m³/s] (MEDEIROS, 2004).

Na figura 5.1 é demonstra-se que para uma vazão de 0,0278 [m³/s] a posição deve ser 0,2563 [m], considerando a conicidade de 30°.

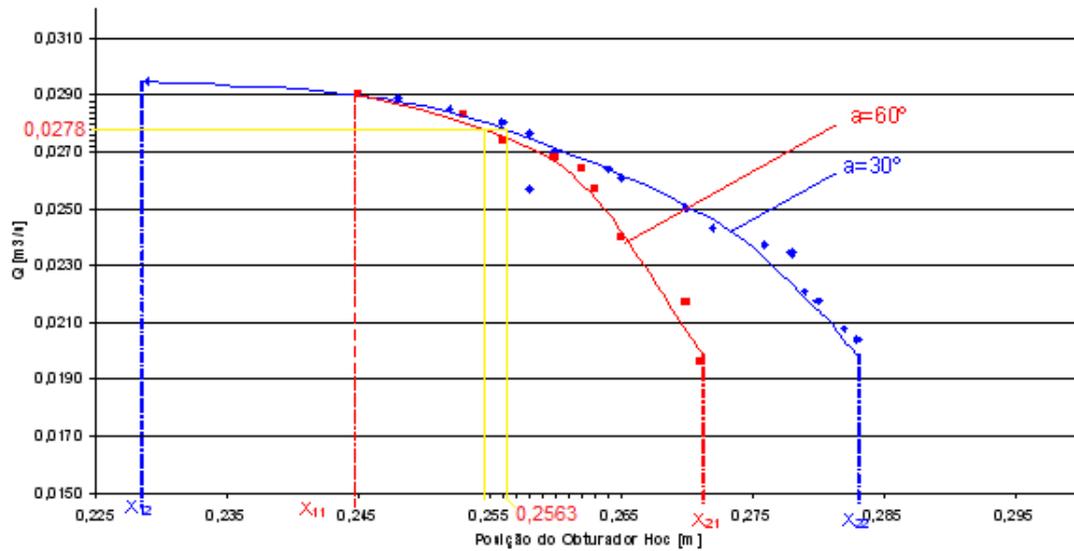


Figura 5.1 – Posição estimada do obturador para que gerador tenha frequência de 60 Hz (Adaptado)

Fonte: SANTOS, 2009

Baseado nos dados da tabela 3.4, do capítulo 3, e da figura 5.1 obtidos por meio de estudos bibliográficos realizados em trabalhos anteriores pode-se estimar a posição do obturador quando o gerador estiver com a frequência de 60 [Hz] no qual é apresentada na tabela 5.1 a relação entre deslocamento do obturador, vazão, frequência de 60 [Hz] e zonas de controle.

Tabela 5.1 - Relação entre deslocamento, vazão e frequência

Deslocamento [mm]	Vazão [m ³ /s]	Intervalos	
De 285,0 a 300,0	Não consta		
283,0	0,0200	X2	Com Controle
275,0	0,0236		
265,0	0,0262		
256,3	0,0278	60 Hz	
255,0	0,028		
245,0	0,029		
235,0	0,029		

228,0	0,029	X1	Sem controle
215,0	0,0292		
205,0	0,029		
195,0	0,029		
185,0	0,029		
175,0	0,029		
165,0	0,029		
155,0	0,029		
145,0	0,029		
135,0	0,029		
De 50,0 a 125,0	Não consta	X0	

O controle da vazão proporcionado pelo obturador pode ser esquematizado como é mostrado na figura 5.2, na qual identificamos as duas regiões com e sem controle, o curso máximo e seus limites.

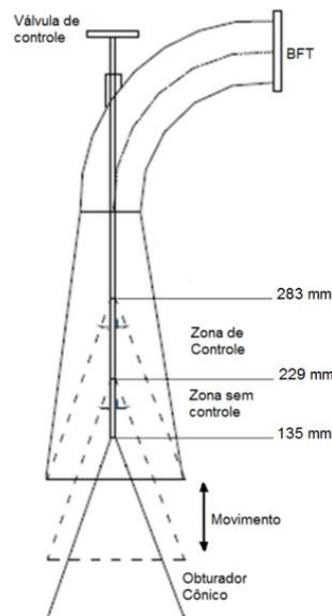


Figura 5.2 – Zonas de sem e com controle da vazão do SISCOV (Adaptado)

Fonte: SANTOS, 2009

A região de interesse para o desenvolvimento do sistema de controle é a compreendida entre os pontos 229 [mm] e 283 [mm]. As figuras 5.3a, 5.3b e 5.3c apresentam o movimento do obturador, dentro da região de controle, sendo o ponto de 256,3 [mm] onde se estima que a frequência esteja em 60 [Hz].

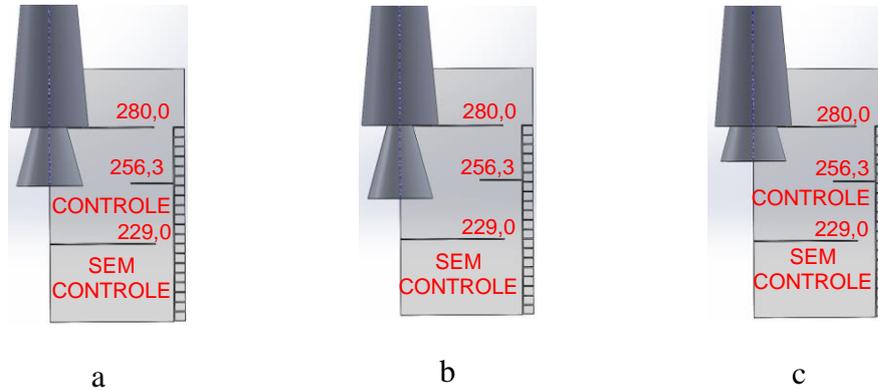


Figura 5.3 – Posição do obturador

Na figura 5.3a é mostrada a posição na qual o obturador está no ponto 256,3 [mm] do curso de controle e espera-se que a frequência na saída do gerador esteja em 60 [Hz]. Caso a frequência seja inferior a 60 [Hz], deve-se aumentar a rotação do eixo da BFT. Para isso, aumenta-se a vazão posicionando obturador mais abaixo, como apresentado na figura 5.3b. Caso a frequência seja superior a 60 [Hz], deve-se aumentar a rotação do eixo da BFT diminuindo a vazão. Isso é possível subindo o obturador como é representado na figura 5.3c.

5.2. Especificações elétricas do sistema de controle

O grupo gerador do SISCOV[®] é composto pela BFT acoplada a um gerador de indução como apresentado na figura 5.4.



Figura 5.4 – Conjunto BFT acoplado ao gerador indução

O circuito elétrico para o controle da posição do obturador é composto pelos seguintes componentes e suas respectivas funções:

Atuador linear: O atuador linear, responsável pelo movimento vertical do obturador, é alimentado por tensão contínua sendo que o movimento de subida ou descida depende da polaridade nos seus terminais. Ele possui, além do motor DC, um potenciômetro para determinar a posição atual, duas chaves fins-de-curso internas para limitação mecânica do movimento. A figura 5.5 esboça os elementos elétricos do atuador linear.

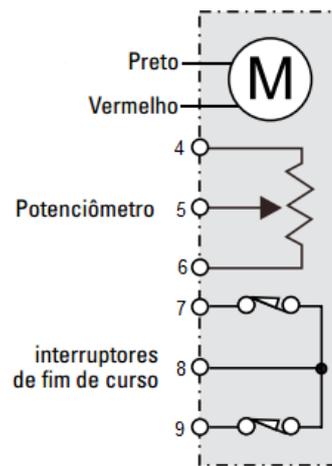


Figura 5.5 – Componentes elétricos do atuador linear

Fonte: THOMSON

Com o terminal preto no positivo e o vermelho no negativo o atuador avançará. Quando a polaridade for invertida, ele recuará. O potenciômetro possui 0 $[\Omega]$ entre os terminais 4 e 5 quando o atuador é totalmente retraído.

O curso deve ser de no mínimo 55 [mm] para que desloque o obturador dentro da região de controle.

Chaves fim de curso: As chaves fim-de-curso externas determinam os limites máximo e mínimo que o obturador poderá se mover. A posição máxima é quando o obturador estiver no ponto 283 [mm], quando a chave CFC_S deve ser acionada e parar o atuador, e o mínimo será o ponto 229 [mm], quando a chave CFC_I deve ser acionada e parar o atuador. A figura 5.6 mostra a posição física das chaves fim-de-curso e o atuador linear.

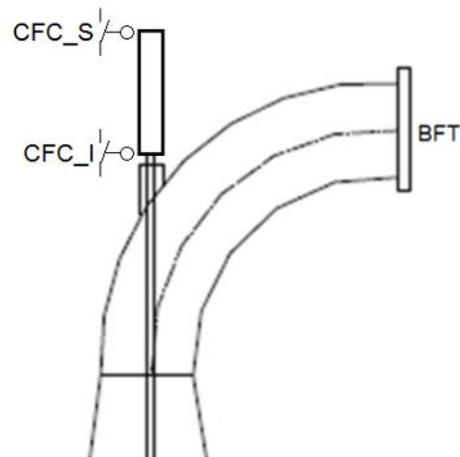


Figura 5.6 - Posição física das chaves fim-de-curso e do atuador

Chaves de comando manual: Quando for necessária a operação do SISCOV[®] pelo usuário pode-se fazer uso de três chaves que têm as funções de seleccionar entre modo manual ou automático e fazer o obturador subir ou descer.

Transdutor de frequência: O transdutor converte a frequência da saída do gerador de indução em uma tensão com relação linear de 0 a 10 [V], ou seja, se a frequência for de 100 [Hz] a tensão em sua saída será de 10 [V]. A figura 5.7 ilustra o transdutor com seus terminais de conexão.



Figura 5.7 – Terminais de conexão elétrica do transdutor

Sua ligação elétrica deve ser feita com a entrada conectada nos terminais do gerador e a sua saída no microcontrolador.

Microcontrolador Arduino UNO: sua finalidade é de exercer o controle sobre SISCOV[®] permitindo que a rotação da BFT mantenha-se constante. A figura 5.8 mostra a placa UNO com o microcontrolador da ATMEL.

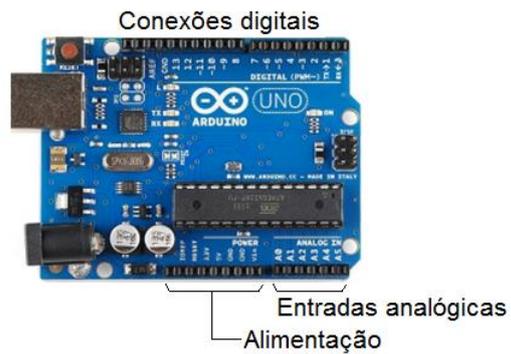


Figura 5.8 - Placa do Arduino UNO

Fonte: ARDUINO, 2013

Ele possui seis entradas analógicas e quatorze pinos que podem ser configurados como entradas e saídas digitais, PWM ou comunicação serial.

Placa de interface: A placa de interface faz a ligação do microcontrolador com os dispositivos externos como as chaves de comando manual, chaves fim-de-curso, transdutor e o atuador. A figura 5.9 mostra a placa de circuito impresso.

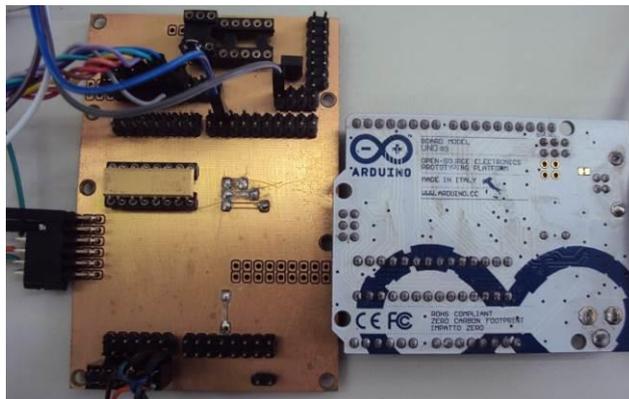


Figura 5.9 – Placa de circuito impresso de interface

O diagrama elétrico completo do sistema de controle pela frequência é mostrado na figura 5.10.

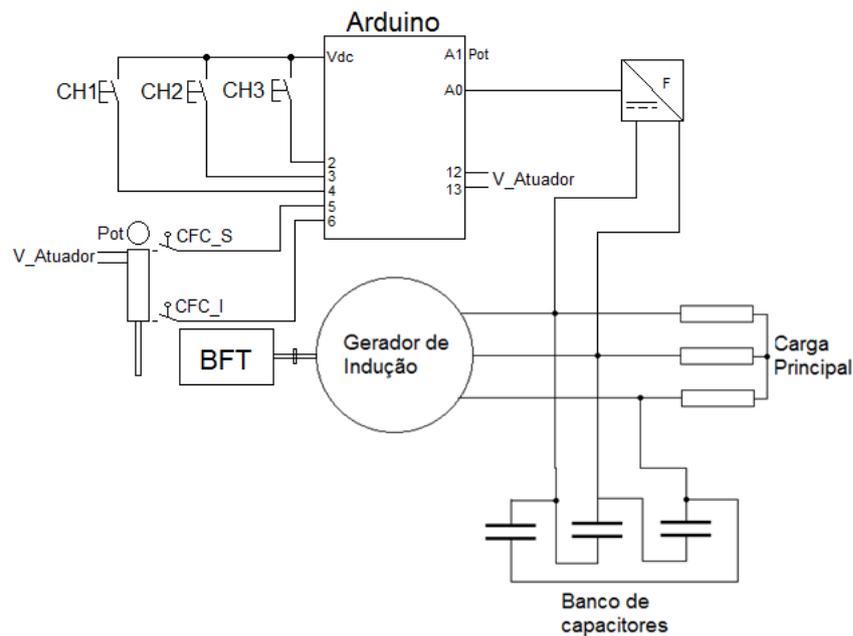


Figura 5.10 - Diagrama elétrico completo do sistema de controle pela frequência

Quando o gerador de indução fornecer uma tensão alternada trifásica com uma frequência de 60 [Hz] para a carga principal o transdutor terá em sua saída uma tensão de 6 [V] injetado na entrada analógica do microcontrolador que, de acordo com a lógica de sua programação, aciona o atuador para subir ou descer controlando a vazão e, conseqüentemente, a frequência na saída do gerador.

5.2.1. Regulador de tensão do gerador de indução

O gerador de indução não é provido de regulador de tensão em sua saída necessitando de um sistema eletrônico de controle para carga de lastro e um grupo de capacitores.

Nessa dissertação, adotou-se o sistema de controle de tensão desenvolvido por Braga et al (2012), sem controle de vazão e com duas cargas, uma principal e a de lastro, sendo a última acionada por tiristores e um modelo SEMIKRON MP410T. Se o ângulo de disparo for 0° a carga será máxima. Se estiver em 180° a carga será mínima. Dessa forma quando ocorrer o aumento de carga principal haverá uma redução de tensão gerada, o regulador de tensão vai diminuir a carga lastro. Para o gerador, a carga permanece constante. As características do gerador de indução utilizado na pesquisa são apresentadas na tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Características elétricas do gerador de indução

Fabricante	WEG
Potência	45 [kW]
Frequência	60 [Hz]
Tensão	220/380/440
Corrente	146/84.5/73.0
Velocidade	1780 [rpm]
Fator de potência	87 [%]
Rendimento	93,1 [%]

Fonte: BRAGA et al, 2012

O sistema de regulação de tensão é composto por um transdutor de tensão, módulo SEMIKRON MP410T e tiristores. A figura 5.11 apresenta o diagrama elétrico do regulador de tensão com carga de lastro.

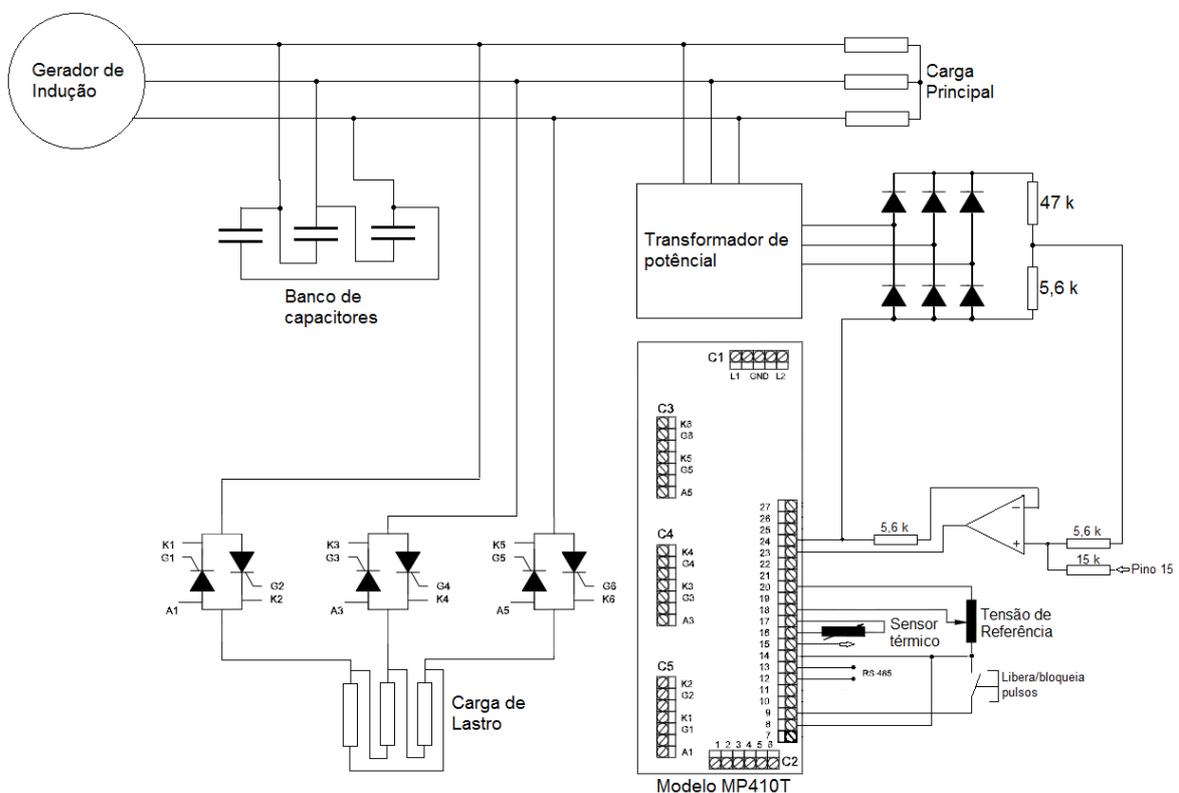


Figura 5.11 – Diagrama elétrico regulador de tensão para gerador de indução

Fonte: BRAGA, 2012

5.3. Modelagem do controlador Fuzzy com auxílio do MatLab

Na simulação com auxílio do MatLab foram criadas três variáveis, sendo duas de entrada, Transdutor e *Setpoint*, e uma de saída denominada Posição. Cada uma contendo sete conjuntos de pertinência que são apresentadas na tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Conjuntos *Fuzzy* das variáveis

Transdutor:	Setpoint:	Posição
Baixa: [-0.9091 0 10 35]	Baixa: [-0.9091 0 10 35]	Baixa: [-0.9091 0 5 20]
EInf: [10 35 50]	EInf: [10 35 50]	EInf: [5 20 35]
Inf: [35 50 60]	Inf: [35 50 60]	Inf: [20 35 50]
Normal: [50 59.5 60.5 70]	Normal: [50 59.5 60.5 70]	Normal: [35 50 65]
Sup: [60 70 80]	Sup: [60 70 80]	Sup: [50 65 80]
ESup: [70 80 95]	ESup: [70 80 95]	ESup: [65 80 95]
Alta: [80 95.45 100 100.9]	Alta: [80 95.45 100 100.9]	Alta: [80 95 100 100.9]

As variáveis de entrada Transdutor e *Setpoint* com seus conjuntos *Fuzzy* são apresentadas na figura 5.12 e 5.13, respectivamente.

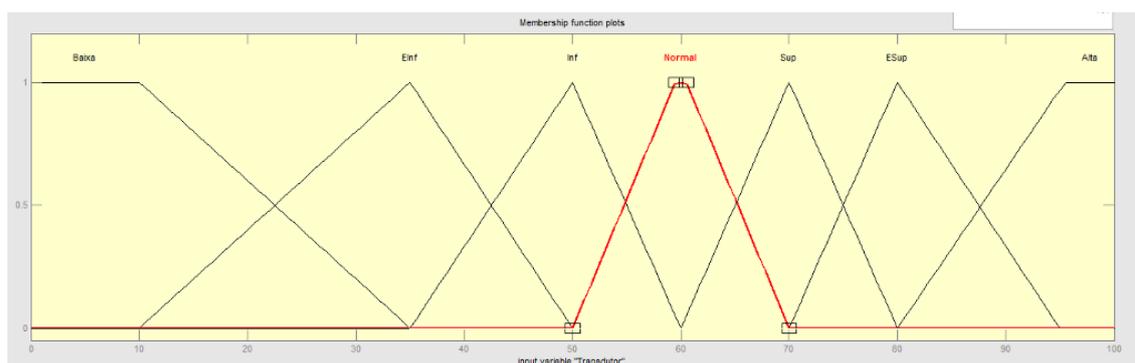


Figura 5.12 – Funções da variável Transdutor

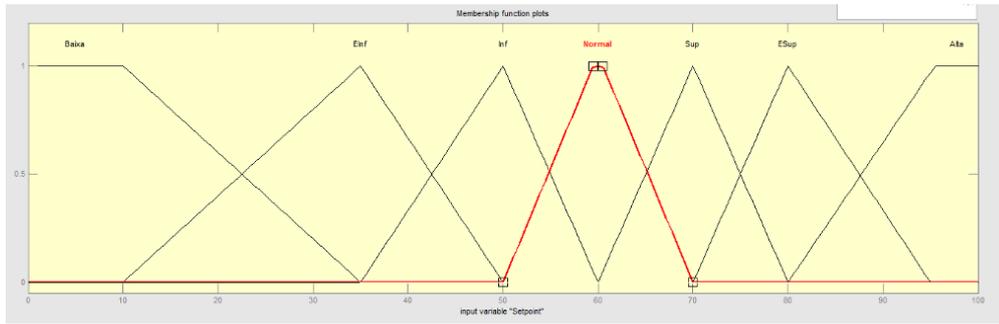


Figura 5.13 – Funções da variável Setpoint

A variável de saída Posição com seus conjuntos *Fuzzy* é apresentada na figura 5.14.

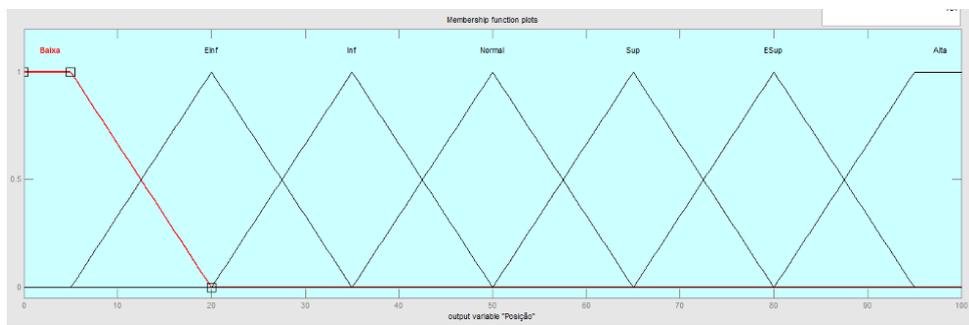


Figura 5.14 – Funções da variável Posicao

Tais valores foram definidos depois de testes para que houvesse uma melhor resposta para uma dada variação de frequência.

As regras tem como base o método Mandani e são apresentados no quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Base de regras adotadas

		Transdutor						
		Ba	EI	In	No	Su	ES	Al
Setpoint	Ba	Ba	Ba	Ba	Ba	No	ES	ES
	EI	Ba	EI	EI	EI	EI	ES	ES
	In	Ba	EI	In	In	No	ES	ES
	No	Ba	EI	In	No	Su	ES	Al
	Su	EI	EI	No	Su	Su	ES	Al
	ES	EI	EI	ES	ES	ES	ES	Al
	Al	EI	EI	EI	Al	Al	Al	Al

O controlador lógico *Fuzzy* está completo uma vez que foram definidas as variáveis e a base de regras. A superfície de controle é apresentada na figura 5.15.

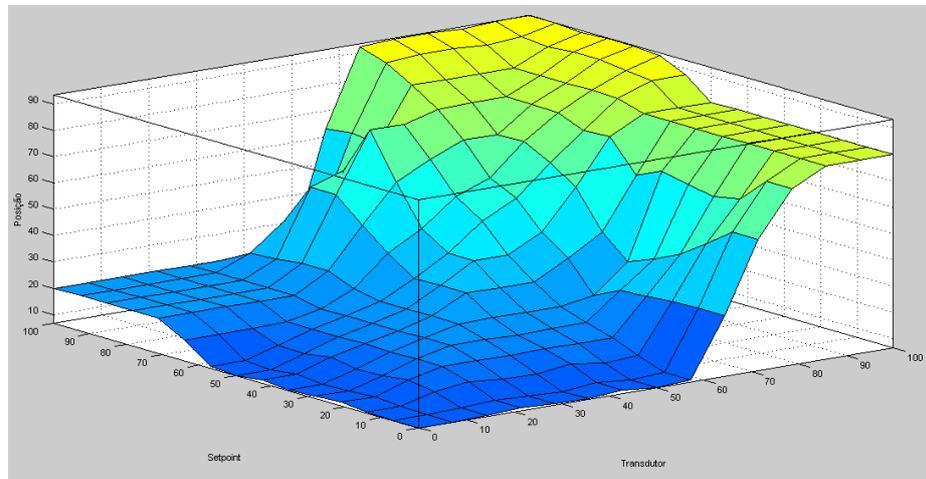


Figura 5.15 – Superfície de controle Fuzzy

O arquivo fis (*fuzzy inference system*) foi exportado para a simulação com o *Simulink* do MatLab. O modelo utilizado para os testes é apresentado nas figuras 5.16a e 5.16b.

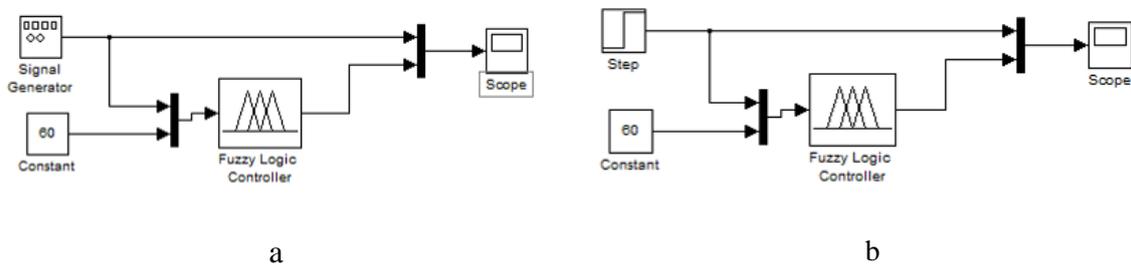


Figura 5.16 – a) Modelo com gerador de sinal. b) Modelo com gerador de degrau

A figura 5.16a representa a simulação do controlador *Fuzzy* com de um sinal senoidal com valor de pico a pico igual a 100, que é o limite das funções de pertinência das variáveis especificadas.

A figura 5.16b apresenta a aplicação de um degrau na entrada do controlador *Fuzzy*. Nesses testes foram simulados valores analógicos de 0 a 100 e degraus de 60 50 e 70 correspondentes aos que, possivelmente, o transdutor irá fornecer ao circuito quando estiver em operação.

5.4. Modelagem e implementação do sistema de controle em linguagem C

O controle deve ser feito pelo microcontrolador por meio do erro entre o *setpoint* e o valor da tensão na saída do transdutor. A figura 5.17 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle proposto.

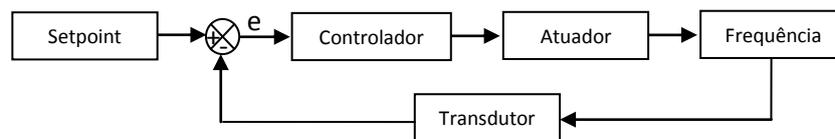


Figura 5.17 – Diagrama de blocos do sistema de controle

O programa de controle do SISCOV[®] foi implementado em linguagem C e está estruturado de maneira que seja possível o acionamento do obturador automaticamente ou pela intervenção do operador. Ele possui as seguintes rotinas:

- Rotina principal;
- Rotina de comando manual;
- Rotina de controle automático.

Na rotina principal pode-se fazer a seleção entre os dois modos de controle por meio de uma chave seletora de duas posições CH3. A figura 5.18 mostra a rotina para seleção entre os dois métodos de controle.

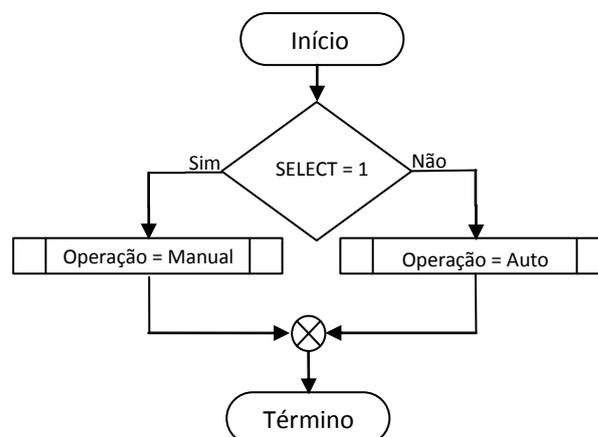


Figura 5.18 – Rotina para seleção do controle automático ou manual do SISCOV[®]

Quando o operador selecionar o modo manual, o sistema executa a rotina que permite o uso de duas chaves para subir ou descer o obturador, CH2 e CH3, posicionando-o de acordo com o interesse do usuário.

O limite superior do curso do obturador é feito pela chave fim-de-curso CFC_S instalada no atuador linear para que não ocorra colisão do entre obturador, que é móvel, e a tubulação na saída da BFT. A outra chave fim-de-curso, CFC_I tem por objetivo manter o obturador na região de atuação para controle da vazão. A figura 5.19 mostra a rotina para o comando manual do sistema.

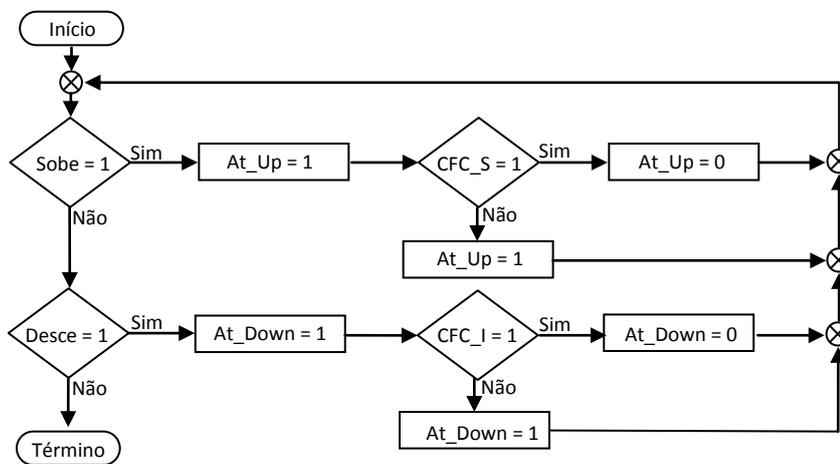


Figura 5.19 – Rotina para comando manual do SISCOV®

Quando o sistema passa a operar no modo automático o controle é feito com o controlador lógico *Fuzzy* e a biblioteca eFLL, que apresenta suas especificações divididas em fuzzificação, base de regras e defuzzificação.

O software de controle *Fuzzy* começa sua estrutura com a inclusão das bibliotecas, declaração das variáveis do sistema e o instanciamento do objeto da biblioteca feita pela linha de comando:

```
Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();
```

Na fuzzificação são especificadas as variáveis linguísticas do sistema com a definição das funções de pertinência. Foi estabelecido um *FuzzyInput*, *FuzzySet* e, posteriormente, adiciona-o no objeto *Fuzzy* para a variável Transdutor:

```
FuzzyInput* frequencia = new FuzzyInput(1);
```

```
// Criando os FuzzySet que compoem o FuzzyInput Transdutor
```

```

FuzzySet* Baixa = new FuzzySet(-0.9 0 10 35);
frequencia->addFuzzySet(Baixa);

FuzzySet* EInf = new FuzzySet(10 35 35 50);
frequencia->addFuzzySet(EInf);

FuzzySet* Inf = new FuzzySet(35 50 50 60);
frequencia->addFuzzySet(Inf);

FuzzySet* Normal = new FuzzySet(50 60 60 70);
frequencia->addFuzzySet(Normal);

FuzzySet* Sup = new FuzzySet(60 70 70 80);
frequencia->addFuzzySet(Sup);

FuzzySet* Alta = new FuzzySet(80 95 100 100.9);
frequencia->addFuzzySet(Alta);
fuzzy->addFuzzyInput(Transdutor);

```

A variável de *setpoint* foi criada utilizando as mesmas funções de pertinência que a variável Transdutor.

Para a posição do obturador foram estabelecidos o FuzzyOutput, seus FuzzySets e adicionando-o ao objeto *Fuzzy* :

```

FuzzyOutput* posicao = new FuzzyOutput(1);
// Criando o FuzzyOutput posicao

FuzzyOutput* posicao = new FuzzyOutput(1);
// Criando os FuzzySet que compoem o FuzzyOutput posicao

FuzzySet* Baixa = new FuzzySet(-0.90 0 5 20);
posicao->addFuzzySet(Baixa);

FuzzySet* EInf = new FuzzySet(5 20 20 35);
posicao->addFuzzySet(EInf);

FuzzySet* Inf = new FuzzySet(20 35 35 50);

```

```

posicao->addFuzzySet(Inf);

FuzzySet* Normal = new FuzzySet(35 50 50 65);

posicao->addFuzzySet(Normal);

FuzzySet* Sup = new FuzzySet(50 65 65 80);

posicao->addFuzzySet(Sup);

FuzzySet* ESup = new FuzzySet(65 80 80 95);

posicao->addFuzzySet(ESup);

FuzzySet* Alta = new FuzzySet(80 95 100 100.9);

posicao->addFuzzySet(Alta);

fuzzy->addFuzzyOutput(posicao);

```

Com base nos estudos anteriores relativos ao SISCOV[®], pode-se presumir a posição do obturador para que a frequência do gerador esteja em 60 [Hz] na posição 50 na escala da variável posicao e 256,3 [mm] no curso do obturador.

A base de regras utiliza a estrutura “if-então”. Na posição de 256,3 [mm] do obturador espera-se uma frequência de 60 [Hz] na saída do gerador. A base de regras é declarada como:

```
Iffrequencia Normal AndSetpointSNormalthenposicao Normal
```

Caso a frequência seja superior a 60 [Hz], deve-se diminuir a rotação do eixo da BFT reduzindo a vazão. Isso é possível subindo o obturador. Pela base de regras temos:

```
If frequencia Alta AndSetpoint Alta then posicao Alta
```

Caso a frequência seja inferior a 60 [Hz], deve-se aumentar a rotação do eixo da BFT aumentando a vazão. Isso é possível descendo o obturador. Pela base de regras temos:

```
Iffrequencia BaixaAndSetpoint Baixathenposicao Baixa
```

Para compor a base de regras, utilizou o objeto *FuzzyRuleAntecedent* para instanciar um antecedente para a expressão e o *FuzzySet* correspondente ao objeto *Antecedente*. Sua linha de comando é mostrada a seguir:

```

FuzzyRuleAntecedent*   frequenciaNormalAndSetpointSNormal   =   new
FuzzyRuleAntecedent();

frequenciaBaixaAndSetpointBaixajoinWithAND(Baixa,Baixa);

```

Instancia-se um consequente para a expressão, e um *FuzzySet* correspondente ao objeto.

```
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoBaixa = new FuzzyRuleConsequent();
```

```
thenposicaoBaixa ->addOutput(Baixa);
```

Por passa-se o Antecedente e o Consequente da expressão

```
FuzzyRule*fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1,iffrequenciaBaixaAndSetpointBaixa, then
thenposicaoBaixa);
```

Adicionando o *FuzzyRule* ao objeto *Fuzzy*:

```
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);
```

Com as regras estabelecidas obteve-se um sistema de controle *Fuzzy* linear na região dos 60 [Hz]. O método de defuzzificação adotado foi o centroide. No programa esse processo utiliza o objeto a seguir:

```
Float posicao = fuzzy->defuzzify(1);
```

```
analogWrite(9, posicao);
```

Com a variação da frequência vai haver um sinal de controle que desloca o atuador até a posição correspondente para que seja estabelecida a sua estabilidade. A posição em que se espera uma frequência de 60 [Hz] corresponde ao valor interno do programa do microcontrolador de 153, ou seja, este é o valor do *setpoint*.

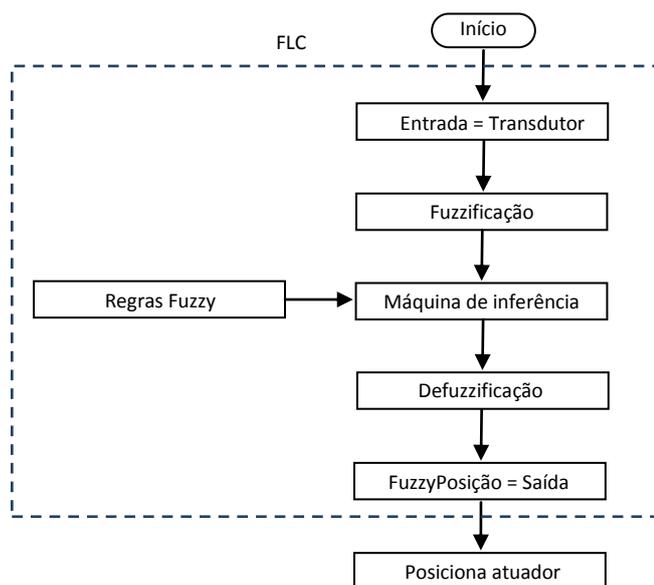


Figura 5.20 – Controle automático do SISCOV®

O intervalo de controle da frequência é de 59,5 a 60,5 [Hz] que corresponde uma variação de 1,275 e -1,275 na unidade do sinal no programa. Nesta condição e com as chaves fim-de-curso desacionadas, o atuador vai ficar desligado porque estará na região onde frequência é considerada sob controle. A figura 5.20 mostra o fluxograma geral do programa quando for selecionado para operação automática.

Quando a frequência estiver fora do intervalo na qual é considerada aceitável a rotina do atuador deve levá-lo a posição que o sistema de controle indicar.

Na figura 5.21 temos o fluxograma da rotina para posicionamento do atuador de acordo com o sinal de controle.

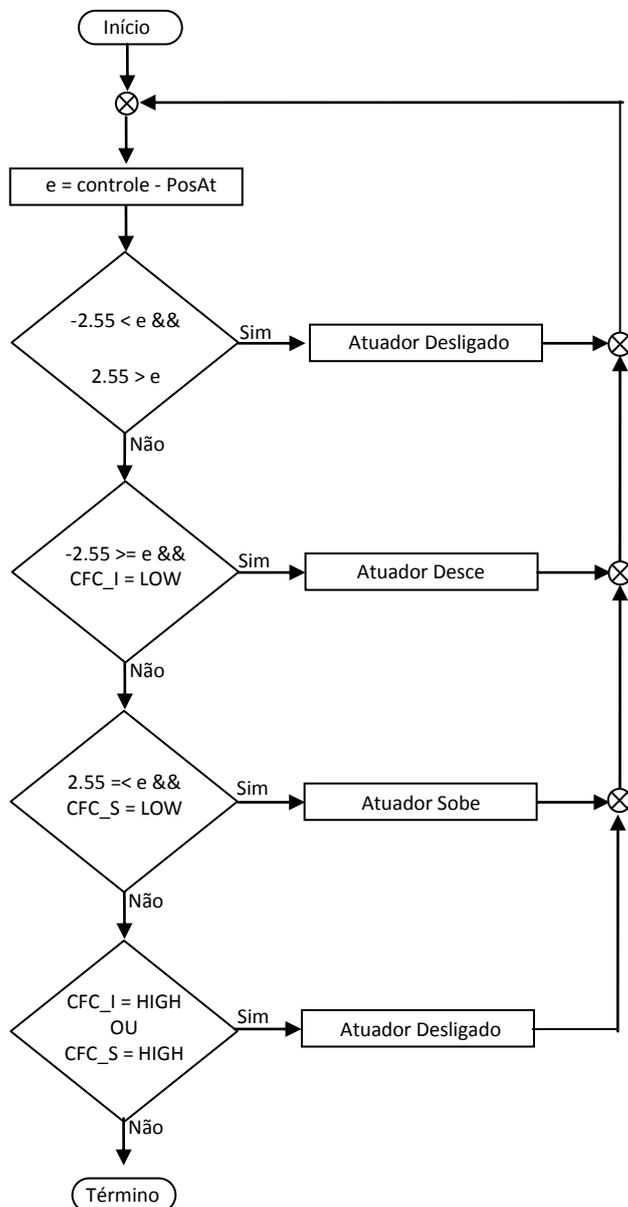


Figura 5.21 – Rotina de posicionamento do atuador

5.5. Coleta de dados

Na simulação com o Matlab foram realizados quatorze testes com o modelo, alterando-se os conjuntos *Fuzzy* das variáveis até se obter os de melhores condições para realizar o controle do atuador.

Para uma frequência de 60 [Hz], sua posição deve ser de 50 [%] do curso de controle, o que corresponde a posição 256 [mm]. Nos testes foram coletados os resultados apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Testes com o modelo do controlador *Fuzzy*

Transdutor	Setpoint	Posição
0	0	6,72
10	60	7,22
20	60	14,20
30	60	18,50
40	60	25,80
50	60	35,80
60	60	50,20
70	60	65,20
80	60	80,10
90	60	86,70
100	60	93,30

Quando a frequência da rede for de 60 [Hz], o atuador estará na posição 50,20, posição na qual se espera uma vazão de 0,0278 [m³/s] na saída da BFT, considerado como o ponto onde está em funcionamento normal.

No momento em que a frequência baixar, por exemplo, para 50 [Hz] o atuador é acionado e posicionado em 35,80 fazendo a vazão aumentar, tendo como consequência o aumento da rotação da BFT.

Se a frequência for para 70 [Hz], o atuador será posicionado em 65,20, o que vai restringir a vazão e a redução da velocidade da BFT. A figura 5.22 apresenta a relação entre as variáveis do controle pela frequência.

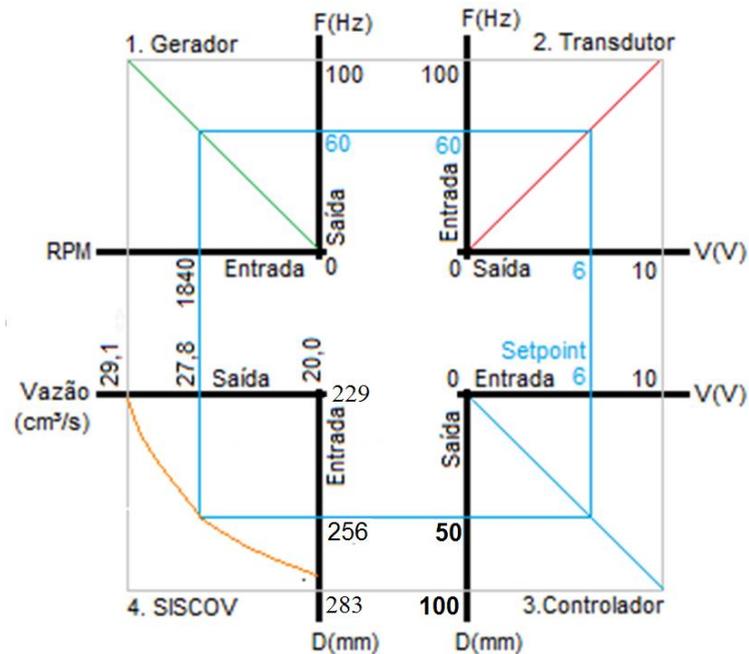


Figura 5.22 – Gráfico de relações entre as grandezas do SISCOV

O sistema deve estabilizar-se dentro de um tempo de trinta, dez, ou cinco segundos após um distúrbio na frequência, dependendo do intervalo em que se encontra. Isso é uma variável importante na especificação do atuador uma vez que sua velocidade será adequada para o posicionamento indicada pelo controlador e garantir a qualidade da energia. Para os testes em bancada foi realizada a montagem do circuito mostrado na figura 5.23.

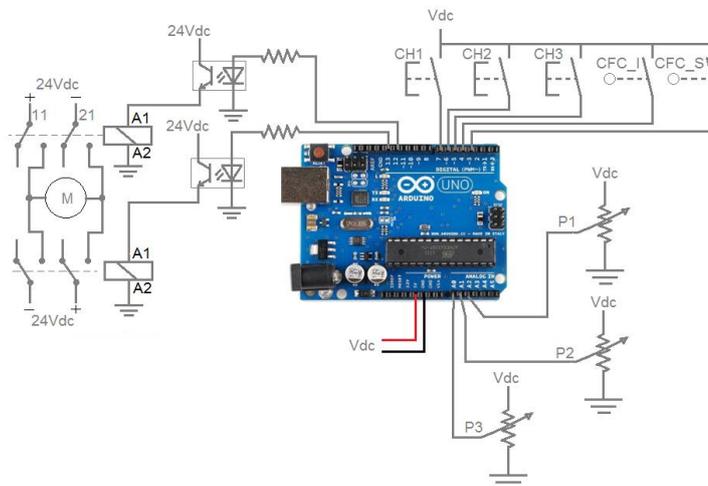


Figura 5.23 – Circuito para teste do sistema de controle

O atuador utilizado possui um curso de 100 [mm] e velocidade de 12 [mm/s]. O tempo que ele leva para mover todo o curso foi de aproximadamente 8,17 [s] medidos com um cronômetro digital.

Para a verificação do posicionamento do atuador foi utilizado uma régua graduada em seu curso de 100 [mm] e variou a tensão na entrada do microcontrolador representando a tensão de saída do transdutor de frequência. A tabela 5.5 apresenta as medidas obtidas no teste de bancada com o sistema.

Tabela 5.5 – Teste com o circuito controlador na bancada

Transdutor [V]	Posição [mm]
0,00	25,0
0,40	35,0
0,80	40,0
1,20	45,0
1,60	55,0
2,00	62,5
2,40	70,0
2,80	75,0
3,20	80,0
3,60	85,0
4,00	90,0
4,40	95,0
4,80	100,0

A tensão na entrada do microcontrolador tem o valor de 0 a 4,8 [V] que corresponde a variação de 0 a 10 [V] da saída do transdutor de frequência. A compatibilidade de tensão entre dois dispositivos foi a instalação de um potenciômetro para dividir a tensão.

5.6. Considerações finais

A simulação no MatLab e a montagem do sistema em bancada ofereceram uma visão clara do sistema de controle e permitiram identificar ajustes para que chegassem aos valores desejados.

Com o circuito elétrico montado em bancada, foi possível verificar o controle de posicionamento do atuador para que o obturador pudesse controlar a vazão e, conseqüentemente, manter a frequência do gerador constante.

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos testes efetuados, sendo analisados os resultados da simulação do controlador lógico *Fuzzy* e resultados obtidos com os testes em bancada.

6.1. Considerações iniciais

Na simulação por computador do sistema de controle *Fuzzy* realizou-se teste com aplicação de um degrau de valores variados e observaram-se as respostas na sua saída. Depois, foi aplicada uma forma de onda senoidal com amplitude no valor de escala máximo para a entrada.

Para a aplicação de um degrau no valor de 50, que corresponde a frequência de 50 [Hz], obteve-se como resposta um degrau de 35, correspondente a posição do atuador. A figura 6.1 apresenta a forma de onda deste teste com o degrau aplicado na entrada e o sinal na saída do controlador.

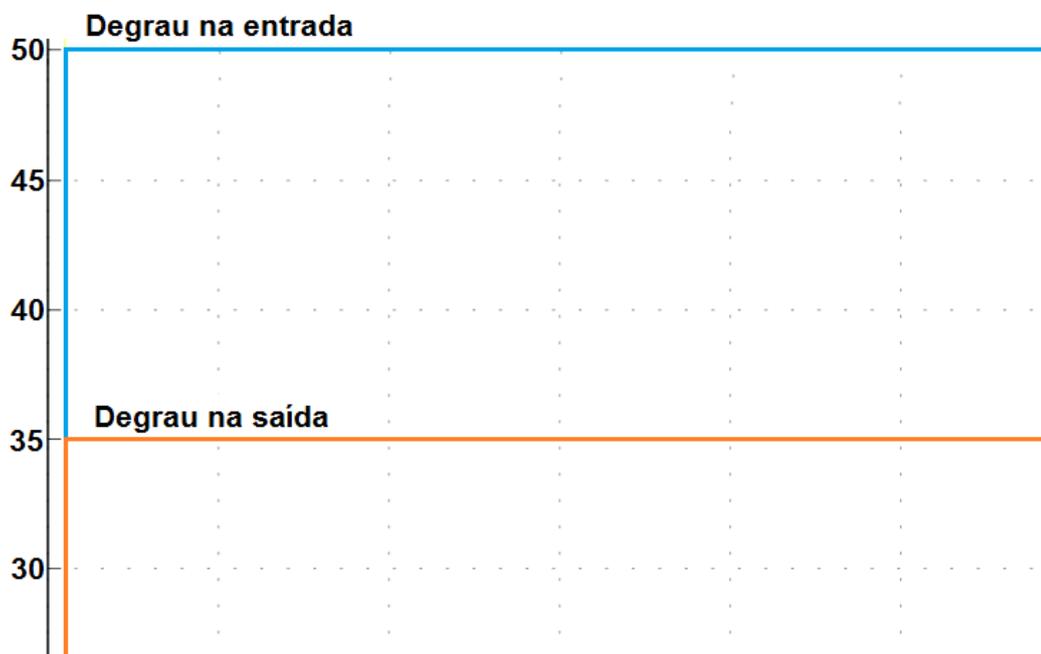


Figura 6.1 – Degrau de 50 aplicada na entrada

Para a aplicação de um degrau no valor de 60, que corresponde a uma frequência de 60 [Hz], obteve-se como resposta um degrau de 50, que correspondente a posição central do

atuador no curso de controle da vazão. A figura 6.2 apresenta a forma de onda do degrau aplicado.

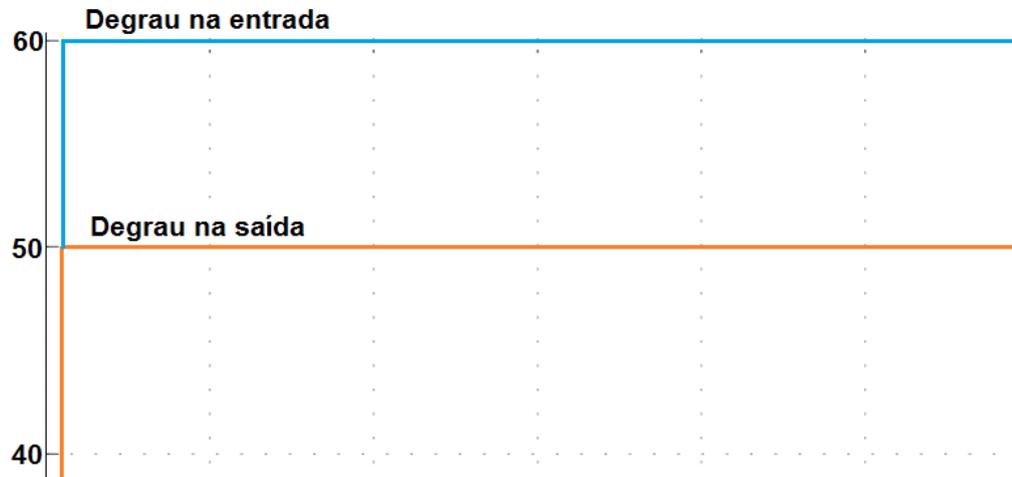


Figura 6.2 – Degrau de 60 aplicada na entrada

Com a aplicação de um degrau no valor de 70, que corresponde a frequência de 70 [Hz], na entrada do controlador obteve-se uma resposta de 65. A figura 6.3 apresenta a forma de onda do degrau aplicado.

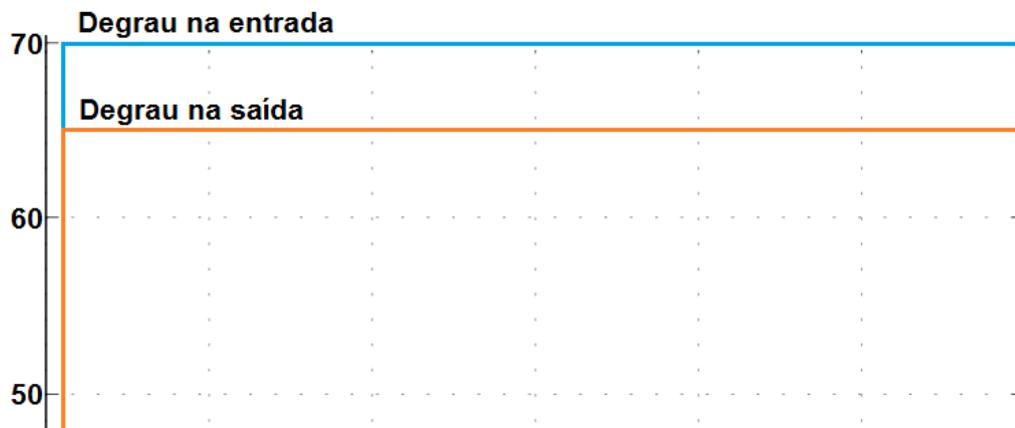


Figura 6.3 – Degrau de 70 aplicada na entrada

A aplicação de uma forma de onda senoidal na entrada do controlador possibilitou verificar a resposta do controlador para toda a gama de variação dentro dos valores que são permitidos, ou seja, de 0 a 100, que corresponde à frequência de 0 a 100 [Hz] na saída do gerador de indução. A figura 6.4 apresenta a forma senoidal de entrada e o resultado na saída do controlador.

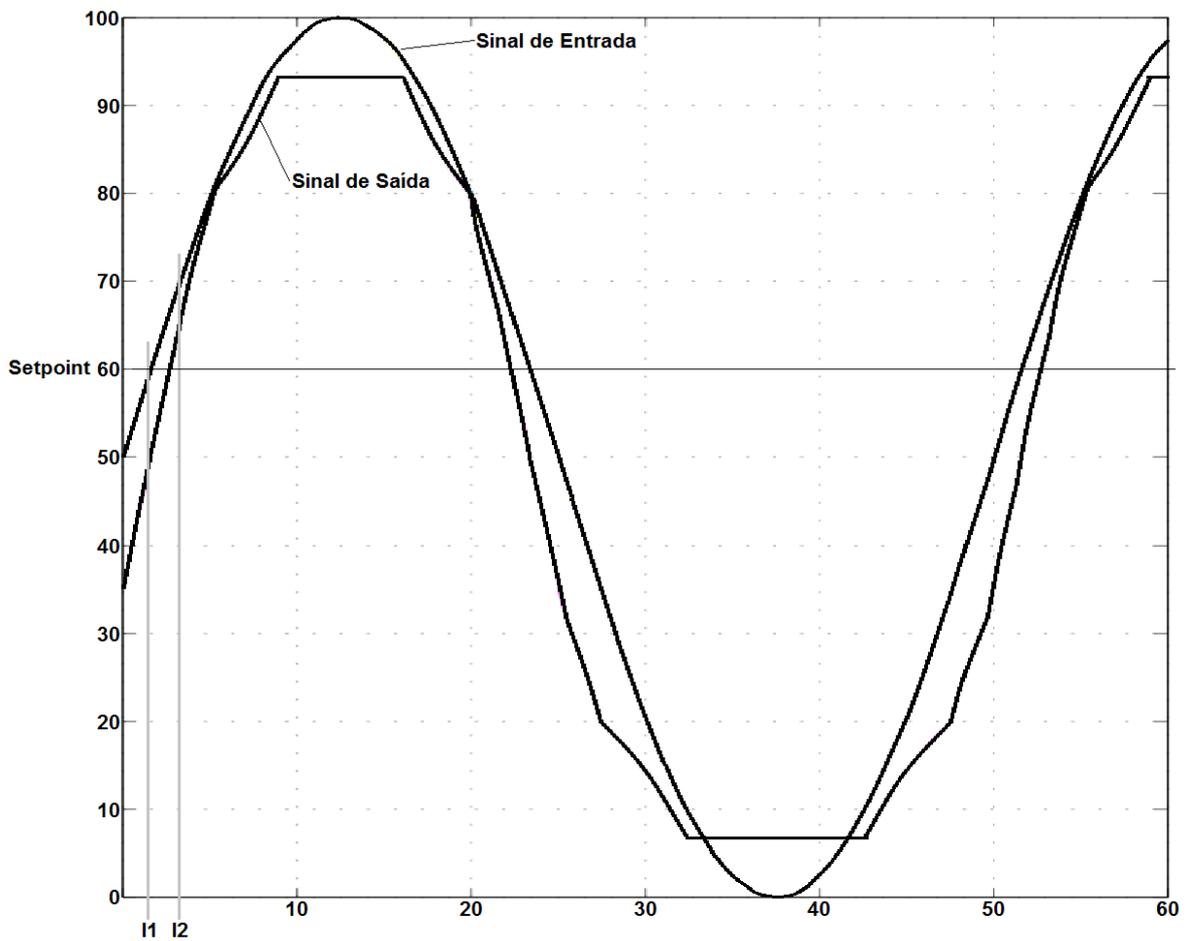


Figura 6.4 – Forma de onda senoidal na entrada e sua resposta

A figura 6.5 apresenta o gráfico do deslocamento do atuador de acordo com a variação de tensão proveniente do transdutor de frequência. Para os valores abaixo de 0,4 [V] não houve movimentação. Após este valor, o atuador movimentou-se de maneira quase linear.

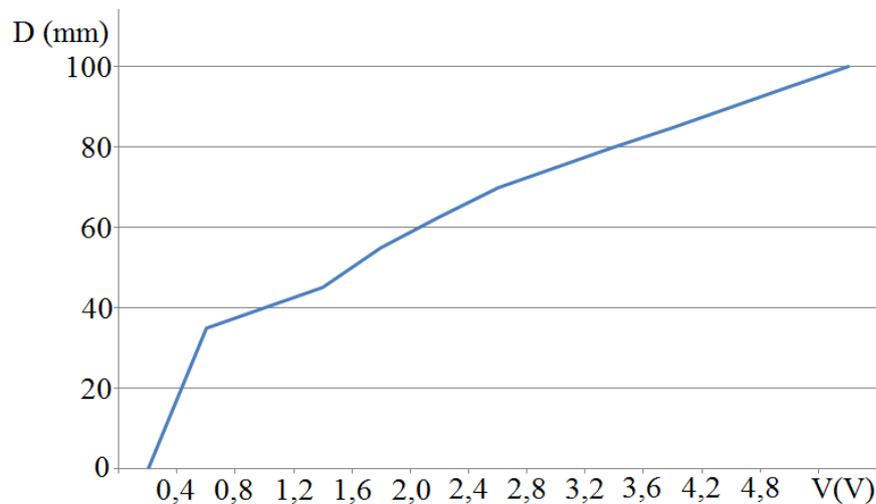


Figura 6.5 – Curva do deslocamento do atuador pela variação de tensão na entrada do controlador

6.2. Discussão dos resultados

No instante I1 da figura 6.4 o valor de entrada do controlador é igual a 60, o que corresponde à frequência na saída do gerador em [Hz], posicionando o obturador em 50 [%] do curso.

No instante I2 observa-se que o aumento do valor do sinal de entrada faz o atuador mover-se para cima reduzindo a vazão na saída da BFT, tendo sua rotação diminuída e, conseqüentemente, a redução da frequência do gerador de indução.

Observa-se que os valores abaixo de 7 e acima de 94 da forma de onda da saída do controlador foram ceifados, pois estão na região fora da zona de controle do SISCOV, não sendo importantes para o controle da frequência.

O circuito elétrico montado na bancada apresentou um controle semelhante ao modelo simulado no computador na região central dos gráficos, porém nas extremidades verificou-se diferenças decorrentes da não utilização das chaves fins-de-curso para verificação total do controle do atuador quanto ao seu curso.

6.3. Considerações finais

A utilização do controlador *Fuzzy* permitiu ajustes nas variáveis e regras sem a necessidade de uma modelagem matemática do controle do SISCOV que poderia se tornar um processo complexo considerando que os dados de funcionamento desse sistema que teve como procedência ensaios realizado por outros pesquisadores.

Na simulação com o MatLab foram aplicados degraus que permitiram a visualização do comportamento do modelo com valores de entrada pontuais que ajudaram no ajuste dos valores que propiciaram um melhor controle da variável de saída. Com a aplicação de uma forma de senoidal na entrada, com um valor de referência de 60 que corresponde a 60 [Hz] da rede elétrica, resultaram em valores iguais e coerentes ao que se esperava em termos de posicionamento do atuador onde se espera que a rotação da BFT esteja em 1840 [rpm].

Os testes realizados em bancada com o controlador Arduino acionando o atuador linear foi utilizado potenciômetros para simular o *setpoint*, que refere-se a uma frequência de 60 [Hz], e outro que correspondeu a saída do transdutor de frequência. Com isso foi possível posicionar o atuador e realizar as medições de tensão nas entradas e saídas analógicas. Isso permitiu a comparação com o modelo do MatLab e o programa no microcontrolador.

7 CONCLUSÃO

7.1. Considerações finais

Este trabalho teve como objetivo a modelagem e especificação do controle de velocidade de uma BFT com o uso do controle de vazão na sua saída.

Na primeira fase do trabalho ocorreu uma dificuldade quanto ao método para o controle da velocidade da BFT. As hipóteses estavam para uso de uma roda dentada, com um sensor e um conversor de pulsos para tensão elétrica composta pelo circuito integrado LM2917N ou mesmo o uso regulador de tensão na saída do gerador de indução, como adotado por BRAGA (2012) o que foi descartado uma vez que não realiza o controle da vazão, contrariando o objetivo desse trabalho. Adotou-se o transdutor de frequência por dispensar a necessidade de linearização do modelo.

O sistema de controle proposto teve como base parâmetros de trabalhos anteriores o que facilitou o entendimento do sistema, permitindo a estimativa do ponto onde posicionar o atuador para o adequado controle da frequência. A modelagem do controlador *Fuzzy* ocorreu com simulação em computador utilizando-se a *toolbox* SIMULINK do programa MATLAB. Nesta etapa, foram necessárias diversas mudanças nas funções de pertinência e na base de regras para que se chegasse a resultados satisfatórios.

As especificações e montagem do circuito elétrico de controle foram executadas com base nas variáveis obtidas na modelagem em computador, o que permitiu redução de tempo e custo de desenvolvimento. A dificuldade nesta fase deu-se pelo uso de um atuador linear comum usado como proporcional, pois necessitou de uma adaptação para montagem do sistema para sua conversão. No entanto, isso não interferiu nos resultados nos pontos de interesse desse trabalho.

A programação do microcontrolador por meio da linguagem C, considerada de alto nível, facilitou a implementação do controle e os testes em bancada. Para comodidade do usuário, foi dividido em controle manual, permitindo verificar passo-a-passo o comportamento do SISCOV e a eventual manutenção dos componentes mecânicos do grupo-gerador e a operação em modo automático no qual o sistema deve comportar-se de maneira que a frequência fique constante sem a intervenção do usuário.

7.2. Recomendações para trabalhos futuros

O sistema de controle modelado e especificado nesse trabalho foi testado na simulação de computador e em bancada sendo necessária a montagem com o conjunto do SISCOV composto pelo obturador BFT e gerador de indução para estudos em situação real de uso e a validação dos estudos realizados até aqui.

Recomenda-se o desenvolvimento de um sistema regulador de tensão para o gerador de indução integrado ao sistema de controle proposto, possibilitando a estabilidade da frequência e tensão em redes elétricas isoladas.

Uma interface gráfica para supervisão do sistema também é sugerida para que os usuários possam obter melhor visualização e controle do sistema de maneira mais amigável e intuitiva visto que facilitaria sua operação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, A.J; LEMOS, M; KRIDI, D. S; LEAL, K. *eFLL - Embedded Fuzzy Logic Library*. 2012. Disponível em: <<https://github.com/zerokol/eFLL>>. Acesso em: 17 janeiro 2015

ALVES, D. D. S; SILVA, S. R; MARTINEZ, C. B. Micro Central Hidroelétrica com BFT: Energia Renovável para o Abastecimento Rural. THE 8th LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION - CLAGTEE 2009.
<http://www.ppgee.ufmg.br/documentos/PublicacoesDefesas/948/B%20-%20689.pdf>. Acesso em: 04 abril 2015

ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. 2010. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/modulo8_revisao_1_retificacao_1.pdf. Acesso em: 10 outubro 2014

ANEEL. Resolução 652. 2003. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2003652.pdf>>. Acesso em: 01 julho 2013

ANEEL. Relatório 2011. Disponível em:<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/Relatorio_Aneel_2011.pdf>. Acesso em: 28 junho 2013

ARDUINO. Microcontrolador – começando com Arduino. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Guide/HomePage>>. Acesso em: 31 maio 2013.

ATMEL. Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash. 2013. Disponível em: <http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet.pdf>. Acesso em: 31 maio 2013.

BAYLE, J. C. *Programming for Arduino*. Packt Publishing. Birmingham-UK. 2013.

BATES, M. P. *Programing 8-bits PIC microcontroller in C*. Editora Elsevier. Burlington, MA, USA. 2008

BRAGA, V. A; Rezek, A. J. J; VIANA, A. N. C; BORTONI, E. C; SANCHEZ, W. D. C. Controle digital aplicado a gerador de indução, operação isolada para utilização no meio rural. 2012. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/anais/induscon/2012/Data/iREP1588.pdf>>. Acesso em: 28 junho 2013

BRAGA, V. A. Modelagem, ajuste e implementação de um sistema de controle de tensão para o gerador de indução prática (Dissertação de mestrado). Itajubá-MG. Universidade Federal de Itajubá. 2002. Disponível em: <<http://saturno.unifei.edu.br/bim/0031621.pdf>>. Acesso em: 04 abril 2015

BROWM, A; MÜLLER, S; DOBROTKOVA, Z. Renewable energy markets and prospects by technology, International Energy Agency (IEA)/OECD. 2011. Disponível em:<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renew_Tech.pdf> Acesso em: 28 junho 2013

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. da. Metodologia científica. 6. ed. Pearson Prentice Hall, São Paulo, SP. 2010. 159 p. ISBN 978-85-7605-047-6.

EPE. Balanço energético nacional. 2014. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf>. Acesso em:21 maio 2015

ELETROBRAS. Componentes das PCHs – Diretrizes para elaboração de projeto básico de PCH Eletrobras 2000. Disponível em: <<http://www.eletrabras.com/elb/data/Pages/LUMIS4AB3DA57PTBRIE.htm>>. Acesso em: 10 outubro 2014.

GIL, A C. Como elaborar projetos de pesquisa. Editora Atlas. 4ª edição. São Paulo. 2002

IBRAHIM, D. *PICBasic projects - 30 projects using PIC BASIC and PIC BASIC PRO*. Elsevier. Oxford. UK. 2006.

IBRAHIM, M. A. *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*. Editora Elsevier. Burlington, MA, USA. 2004.

IEA. Key World Energy Statistics. 2014. Disponível em:
<<https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld2014.pdf>http://www.iea.org/media/speeches/mvdh/WEO_2014_London_fortheweb.pdf>. Acesso em: 21 maio 2015.

MACINTYRE, A.J. Máquinas motrizes hidráulicas. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 654 p.

MARCONI, M. A; LAKATOS, E. M. Fundamentos da Metodologia Científica. Editora Atlas. 5 edição. São Paulo, SP. 2010.

MCTI. Estratégia Nacional de Ciência, Tecnologia e Inovação 2012 – 2015. Disponível em:
<http://www.mct.gov.br/upd_blob/0218/218981.pdf>. Acesso em: 21 maio 2015

MEDEIROS, D. M. A utilização de bombas operando como turbinas e geradores de indução na geração de energia elétrica / por Daniel de Macedo Medeiros-Itajubá (MG): [s.n.], 2004.

NASCIMENTO JR. C. L; YONEYAMA, T. Inteligência artificial em controle e automação. Editora Edgrd Blücher Ltda; FAPESP. São Paulo. 2004.

ONU. *World Population Prospects: The 2012 Revision*. Disponível em:
<<http://esa.un.org/wpp/unpp/p2k0data.asp>>. Acesso em: 21/05/2015.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 5ª edição. Editora Pearson Education do Brasil. 2011.

SANTOS, P. C. Estudo de um Sistema de Controle de Vazão utilizando a Dinâmica de Fluidos Computacional: Metodologia e prática (Dissertação de mestrado). Itajubá-MG. Universidade Federal de Itajubá. 2009.

SIMÕES, M. G; SHAW, L. S. Simões. Controle e modelagem Fuzzy. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 165 p. ISBN 85-212-0248-2.

SINGH, S; TIWARI, A. N. Voltage and frequency controller for self excited induction generator in micro hydro power plant: review. International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE) Volume 2, Issue 2, February 2013. ISSN: 2278 – 909X. Disponível em: <<http://ijarece.org/wp-content/uploads/2013/08/IJARECE-VOL-2-ISSUE-2-214-219.pdf>>. Acesso em: 13 maio 2015

SIVANANDAM, S. N; SUMATHI, S; DEEPA, S. N. *Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB*. Índia. ISBN-13: 978-3540357803 ISBN-10: 3540357807 Edition: 2007.

SMITH, N. *Motors as generators for micro-hydro power*. ITDG Publishing. London. UK. 2001.

THOMSON. Atuadores Lineares - Electrak 1SP. Disponível em: http://www.thomsonlinear.com/downloads/actuators/Linear_Actuators_ctpt.pdf. Acesso em: 31 maio 2013.

VIANA, A. N. C. Pequenas centrais hidrelétricas no meio rural. In: SERAPHIM, O.J. (Ed.) Tecnologia e aplicação racional de energia elétrica e de fontes renováveis. Campina Grande: SBEA/UFPB, 1997. p.135-64.

VIANA, A. N. C. Comportamento de Bombas Centrífugas Funcionando como Turbinas Hidráulicas(Dissertação de Mestrado). Itajubá-MG. Universidade Federal de Itajubá. 2004.

WILLIAMS, A. *Pump as Turbines - A user guide*. ITDG Publishing, London, United Kingdom. 1997.

ANEXO A – Tipos de memória

As memórias podem ser classificadas como:

RAM (Memória de acesso aleatório) – é uma memória volátil que armazena dados do usuário utilizados no programa. Ela é interna aos microcontroladores e possui capacidade 256 bytes como valor mais comum.

ROM (Memória somente de leitura) – São programadas de fábrica não podendo ser alterada pelo usuário e detêm programa ou dados de usuários fixos.

EPROM (Memória somente de leitura programável) - Semelhante a ROM, mas há possibilidade de programação adequada. Ela possui uma pequena janela de vidro a qual se pode apagar os dados com luz UV e reprogramadas pelo usuário.

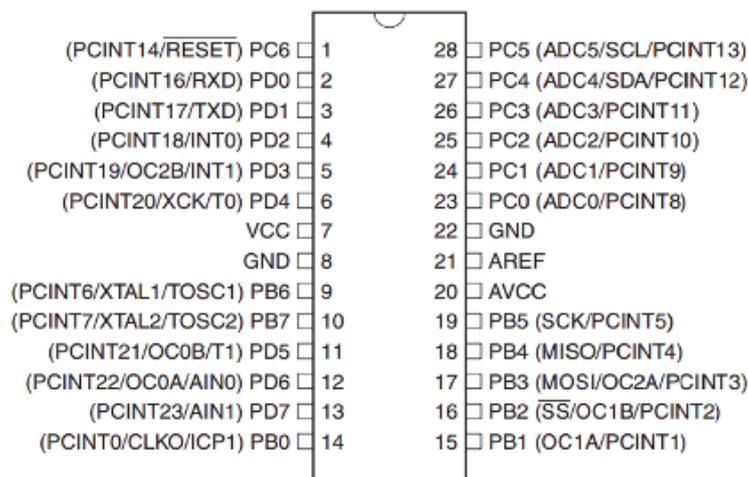
EEPROM (Memória somente de leitura programável eletricamente) - é uma memória não-volátil que pode ser apagada e reprogramada sob o controle do programa.

Flash EEPROM – é uma memória não volátil e muito rápida, utilizada em aplicações de microcontroladores, para armazenar o programa do usuário. Os dados são apagados e reprogramados usando um dispositivo de programação.

Com a evolução das memórias *flash* EEPROM o usuário pode optar pela programação depois da confecção do sistema, pois se tornou mais rápido e fácil. Como consequência, os chips ficaram mais baratos e reprogramáveis (BATES, 2008).

ANEXO B – Microcontrolador ATmega 328 e a biblioteca eFLL

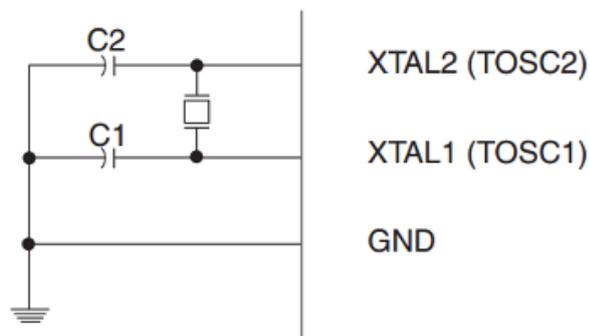
O microcontrolador ATmega328 possui 23 linhas de entrada e saída discretas, 6 canais sinais analógicos com conversor de analógico para digital de 10 bits, comunicação serial, memórias *flash* com 32 kBytes com capacidade para leitura e escrita, EEPROM 1 kByte e RAM 2 kByte. A tensão de alimentação, aplicada entre os pinos 7 e 8, pode ser de 1,8 a 5,5 V com uma corrente em modo ativo de 0,2 mA. Na figura 2.19 é mostrada a configuração dos terminais (ATMEL, 2013).



Configuração dos terminais do ATmel328

Fonte: ATMEL, 2013

Os pinos PB6 e PB7 são XTAL1 e XTAL2 podem ser configurados para ser usados como um oscilador com o uso de um cristal de quartzo ou um ressonador de cerâmica.



Conexão de um cristal oscilador

Fonte: ATMEL, 2013

As portas B possuem 8 bits bidirecional de entrada e saída com a possibilidade de utilizar PB6 como entrada para o amplificador de inversão do oscilador e entrada para o circuito, que opera o relógio interno; e PB7, usado como saída do amplificador de inversão do oscilador.

A porta C possui 7 bits bidirecional de entrada e saída com o uso de PC6 para entrada de *RESET*, funcionando mesmo que o *clock* esteja parado. Os pinos de PC0 a PC5 conversores de analógico para digital. Para a comunicação I2C o pino PC5 é o SCL *clock* e o PC4 dados.

A porta D possui 8 bits de entrada e saída bidirecional sendo que se pode configurar PD0 e PD1 como comunicação serial de entrada e saída respectivamente. Os pinos PD6 e PD5 podem operar como saída PWM.

A biblioteca eFLL (Biblioteca Lógica *Fuzzy* Embarcado) foi desenvolvida em linguagem C para uso em qualquer sistema embarcado, inclusive o Arduino. Ela utiliza método mínimo de Mamdani para a inferência e composição e para a desfuzzyficação centroide no universo contínuo.

Sua estrutura é composta por *Fuzzyobject* responsável pela manipulação dos conjuntos *Fuzzy*, regras, entradas e saídas; *FuzzyInputObject* que agrupa os conjuntos *Fuzzy* para variáveis de entrada; *FuzzyOutputobject* que agrupa todas as saídas pertencentes ao mesmo domínio; *FuzzySetobject* que permite a declaração das funções de pertinência do tipo triangular e trapezoidal, utilizadas neste trabalho, com quatro pontos passados ao construtor; *FuzzyRuleobject* utilizado para instanciar as regras sendo sua sintaxe:

```
fr = new FuzzyRule (ID, antecedent, consequent)
```

O *FuzzyRuleAntecedentobject* monta a condição das regras e o *FuzzyRuleConsequenteobject* processa o *FuzzyRule* e monta a expressão de saída (ALVES, 2012).

ANEXO C – Software de controle do SISCOV

```

//Bibliotecas
#include <FuzzyRule.h>
    #include <FuzzyComposition.h>

#include <Fuzzy.h>
#include <FuzzyRuleConsequent.h>
#include <FuzzyOutput.h>
#include <FuzzyInput.h>
#include <FuzzyIO.h>
#include <FuzzySet.h>
#include <FuzzyRuleAntecedent.h>

//Variáveis
//Declaração de variáveis do atuador proporcional
double Controle, PotAt, ZeroAt, Ganho = 9.60;
const int PosAt = A0;

//Declaração de variáveis do controlador
const int T_Freq = A1;
double Input, SetpointInterno = 153, Interno, Inte, Output;
double In, Pot, Out;

//Variáveis da função proporcional;
double Ba, Bb1, Bb2, Bc;
int BLimit_Min_Fun, BLimit_Max_Fun, e, e_At;

// Pinos de saída discretas:
int S_Desce = 12; // Saída discreta para atuador descer
int S_Sobe = 13; // Saída discreta para atuador subir

//Variáveis controle manual
const int buttonDesce = 5;
const int buttonSobe = 6;
const int SEL = 2; //Chave responsável pela seleção Manual/Automático
const int CFC_Sup = 3; //Chave fim de curso superior
const int CFC_Inf = 4; //Chave fim de curso inferior

// variáveis de entrada manual:
int SELECT = 0; // Variável da chave manual/automático
int CFC_S = 0; // Variável da chave fim de curso Superior
int CFC_I = 0; // Variável da chave fim de curso Inferior
int B_Desce = 0;
int B_Sobe = 0;

// Instanciando um objeto da biblioteca
Fuzzy* fuzzy = new Fuzzy();

```

```

// Declaração

float transdutor = 5;

void setup()
{
Serial.begin(9600);

Pot = analogRead(PosAt); //Determina a posição atual do atuador
PotAt = map(Pot, 0, 1023, 0, 255);
In = analogRead(T_Freq); //Variavel do transdutor de frequencia
Input = map(In, 0, 1023, 0, 255);
Inte = analogRead(SetpointInterno); //Valor de referencia
Interno = map(Inte, 0, 1023, 0, 255);

// Definição das variveis como entrada
pinMode(SEL, INPUT);
pinMode(CFC_Sup, INPUT);
pinMode(CFC_Inf, INPUT);
pinMode(Entrada, INPUT);
pinMode(buttonDesce, INPUT);
pinMode(buttonSobe, INPUT);

// Definição das variveis como saída
pinMode(S_Desce, OUTPUT);
pinMode(S_Sobe, OUTPUT);
pinMode(initPin, OUTPUT);

// FuzzyInput – variável transdutor de frequencia
FuzzyInput* frequencia = new FuzzyInput(1);

// Criando os FuzzySet que compoem o FuzzyInput frequencia
FuzzySet* Ba = new FuzzySet(0, 0, 25, 89); // Baixa
frequencia ->addFuzzySet(Ba); // Adicionando o FuzzySet Ba em transdutor
FuzzySet* EINF = new FuzzySet(25, 89, 89, 127); // Posição inferior extremo
frequencia ->addFuzzySet(EINF); // Adicionando o FuzzySet EINF em transdutor
FuzzySet* INF = new FuzzySet(89, 127, 127, 151); //Posição Inferior
frequencia ->addFuzzySet(INF); // Adicionando o FuzzySet INF em transdutor
FuzzySet* NORMAL = new FuzzySet(127, 151, 154, 178); // Posição Normal
frequencia ->addFuzzySet(NORMAL); // Adicionando o FuzzySet NORMAL em
transdutor
FuzzySet* SUP = new FuzzySet(154, 178, 178, 204); // Posição Superior
frequencia ->addFuzzySet(SUP); // Adicionando o FuzzySet SUP em transdutor
FuzzySet* ESUP = new FuzzySet(178, 204, 204, 242); // Posição superior extremo
frequencia ->addFuzzySet(ESUP); // Adicionando o FuzzySet ESUP em transdutor
FuzzySet* ALTA = new FuzzySet(204, 242, 255 , 256); // Posição Alta
frequencia ->addFuzzySet(ALTA); // Adicionando o FuzzySet Alta em transdutor

```

```

fuzzy->addFuzzyInput(frequencia);

// FuzzyInput – variável de referencia
FuzzyInput* setpoint = new FuzzyInput(2);

// Criando os FuzzySet que compoem o FuzzyInput referencia
FuzzySet* Ba = new FuzzySet(0, 0, 25, 89); // Baixa
setpoint ->addFuzzySet(Ba); // Adicionando o FuzzySet Ba em setpoint
FuzzySet* EINF = new FuzzySet(25, 89, 89, 127); // Posição inferior extremo
setpoint ->addFuzzySet(EINF); // Adicionando o FuzzySet EINF em setpoint
FuzzySet* INF = new FuzzySet(89, 127, 127, 151); //Posição Inferior
setpoint ->addFuzzySet(INF); // Adicionando o FuzzySet INF em setpoint
FuzzySet* NORMAL = new FuzzySet(127, 151, 154, 178); // Posição Normal
setpoint ->addFuzzySet(NORMAL); // Adicionando o FuzzySet NORMAL em
setpoint
FuzzySet* SUP = new FuzzySet(154, 178, 178, 204); // Posição Superior
setpoint ->addFuzzySet(SUP); // Adicionando o FuzzySet SUP em setpoint
FuzzySet* ESUP = new FuzzySet(178, 204, 204, 242); // Posição superior extremo
setpoint ->addFuzzySet(ESUP); // Adicionando o FuzzySet ESUP em setpoint
FuzzySet* ALTA = new FuzzySet(204, 242, 255 , 256); // Posição Alta
setpoint ->addFuzzySet(ALTA); // Adicionando o FuzzySet Alta em setpoint

fuzzy->addFuzzyInput(setpoint);

// FuzzyOutput posicao
FuzzyOutput* posicao = new FuzzyOutput(1);

// Criando os FuzzySet que compoem o FuzzyOutput da posição
FuzzySet* Ba = new FuzzySet(0, 0, 12, 51); // Baixa
posicao ->addFuzzySet(Ba); // Adicionando o FuzzySet Ba em posicao
FuzzySet* EINF = new FuzzySet(12, 51, 51, 89); // Posição inferior extremo
posicao ->addFuzzySet(EINF); // Adicionando o FuzzySet EINF em posicao
FuzzySet* INF = new FuzzySet(51, 89, 89, 127); //Posição Inferior
posicao ->addFuzzySet(INF); // Adicionando o FuzzySet INF em posicao
FuzzySet* NORMAL = new FuzzySet(89, 127, 127, 165); // Posição Normal
posicao ->addFuzzySet(NORMAL); // Adicionando o FuzzySet NORMAL em posicao
FuzzySet* SUP = new FuzzySet(127, 165, 165, 204); // Posição Superior
posicao ->addFuzzySet(SUP); // Adicionando o FuzzySet SUP em posicao
FuzzySet* ESUP = new FuzzySet(165, 204, 204, 242); // Posição superior extremo
posicao ->addFuzzySet(ESUP); // Adicionando o FuzzySet ESUP em posicao
FuzzySet* ALTA = new FuzzySet(204, 242, 255 , 256); // Posição Alta
posicao ->addFuzzySet(ALTA); // Adicionando o FuzzySet Alta em posicao

// Adicionando o FuzzyOutput no objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyOutput(posicao);

// FuzzyInput – frequencia
FuzzyInput* transdutor = new FuzzyInput(1);
FuzzyInput* setpoint = new FuzzyInput(2);

```

```

// Base de regras
//-----
// FuzzyRule "SE frequencia = Baixa E Setpoint Baixa ENTÃO posicao = Baixa"

// Instanciando um Antecedente para a expresso
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaBaixaAndSetpointBaixa = new
FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaBaAndSetpointBa->joinWithAND(Ba,Ba);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente
// Instancinado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoBa = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoBa ->addOutput(Ba);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule1 = new FuzzyRule(1, if frequenciaBaAndSetpointBa, then
thenposicaoBa);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule1);
//-----

// FuzzyRule "SE frequencia = Normal E setpoint Baixa ENTÃO posicao = Normal"

// Instanciando um Antecedente para a expresso
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaNormalAndSetpointBaixa = new
FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaNormalAndSetpointBaixa->joinWithAND(Normal,Baixa);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente
// Instancinado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoNormal = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoNormal ->addOutput(Normal);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule2 = new FuzzyRule(2, if frequenciaNormalAndSetpointBaixa,
then thenposicaoNormal);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule2);
//-----
// FuzzyRule "SE frequencia = Alta E Setpoint Baixa ENTÃO posicao = Alta"

```

```

// Instanciando um Antecedente para a expresso
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaAltaAndSetpointBaixa = new
FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaAltaAndSetpointBaixa->joinWithAND(Alta,Baixa);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente
// Instancinado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoAlta = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoAlta ->addOutput(Alta);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule3 = new FuzzyRule(3, if frequenciaAltaAndSetpointBaixa, then
thenposicaoAlta);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule3);
//-----
// FuzzyRule "SE frequencia = Baixa E Setpoint Normal ENTao posicao = Baixa"

// Instanciando um Antecedente para a expresso
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaBaixaAndSetpointNormal = new
FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaBaixaAndSetpointNormal->joinWithAND(Baixa,Normal);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente
// Instancinado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoBaixa = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoNormal ->addOutput(Baixa);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule4 = new FuzzyRule(4, if frequenciaBaixaAndSetpointNormal,
then thenposicaoBaixa);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule4);
//-----
// FuzzyRule "SE frequencia = Normal E Setpoint Normal ENTao posicao = Normal"

// Instanciando um Antecedente para a expresso
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaNormalAndSetpointNormal = new
FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaNormalAndSetpointNormal->joinWithAND(Normal,Normal);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente

```

```

// Instanciado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoNormal = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoNormal ->addOutput(Normal);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule5 = new FuzzyRule(5, if frequenciaNormalAndSetpointNormal,
then thenposicaoNormal);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule5);
//-----
// FuzzyRule "SE frequencia = Alta E Setpoint Normal ENTAO posicao = Alta"

// Instanciando um Antecedente para a expressao
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaAltaAndSetpointNormal = new
FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaAltaAndSetpointNormal->joinWithAND(Alta,Normal);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente
// Instanciado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoalta = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoAlta ->addOutput(Alta);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule6 = new FuzzyRule(6, if frequenciaAltaAndSetpointNormal, then
thenposicaoAlta);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule6);
//-----
// FuzzyRule "SE frequencia = Baixa E Setpoint Alta ENTAO posicao = Baixa"

// Instanciando um Antecedente para a expressao
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaBaixaAndSetpointAlta = new
FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaBaixaAndSetpointAlta->joinWithAND(Baixa,Alta);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente
// Instanciado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoBaixa = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoBaixa ->addOutput(Baixa);

```

```

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule7 = new FuzzyRule(7, if frequenciaBaixaAndSetpointAlta, then
thenposicaoBaixa);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule7);
//-----
// FuzzyRule "SE frequencia = Normal E Setpoint Alta ENTAO posicao = Normal"

// Instanciando um Antecedente para a expresso
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaNormalAndSetpointAlta = new
FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaNormalAndSetpointAlta->joinWithAND(Normal,Alta);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente
// Instancinado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoNormal = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoNormal ->addOutput(Normal);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule8 = new FuzzyRule(8, if frequenciaNormalAndSetpointAlta, then
thenposicaoNormal);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy
fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule8);
//-----
// FuzzyRule "SE frequencia = Alta E Setpoint Alta ENTAO posicao = Alta"

// Instanciando um Antecedente para a expresso
FuzzyRuleAntecedent* frequenciaAltaAndSetpointAlta = new FuzzyRuleAntecedent();
iffrequenciaAltaAndSetpointAlta->joinWithAND(Alta,Alta);

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Antecedente
// Instancinado um Consequente para a expressao
FuzzyRuleConsequent* thenposicaoAlta = new FuzzyRuleConsequent();

// Adicionando o FuzzySet correspondente ao objeto Consequente
thenposicaoAlta ->addOutput(Alta);

// Instanciando um objeto FuzzyRule
// Passando o Antecedente e o Consequente da expressao
FuzzyRule* fuzzyRule9 = new FuzzyRule(9, if frequenciaAltaAndSetpointAlta, then
thenposicaoAlta);

// Adicionando o FuzzyRule ao objeto Fuzzy

```

```

fuzzy->addFuzzyRule(fuzzyRule9);
}
void loop()
{
  Pot = analogRead(PosAt); //Determina a posição atual do atuador
  PotAt = map(Pot, 0, 1023, 0, 255);
  In = analogRead(T_Freq); //Variavel do transdutor de frequencia
  Input = map(In, 0, 1023, 0, 255);
  Inte = analogRead(SetpointInterno); //Valor de referencia
  Interno = map(Inte, 0, 1023, 0, 255);

  float freq = (analogRead(Input)); //Atribuir
  float SP = (analogRead(Interno)); //Atribuir

  // Variáveis de entrada referente ao transdutor e setpoint
  fuzzy->setInput(1,freq);
  fuzzy->setInput(2,SP);

  fuzzy->fuzzify();

  Serial.print("frequencia: ");
  Serial.print(Ba->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(EINF->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(INF->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(NORMAL->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(SUP->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(ESUP->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.println(ALTA->getPertinence());

  Serial.print("setpoint: ");
  Serial.print(Ba->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(EINF->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(INF->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(NORMAL->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(SUP->getPertinence());
  Serial.print(", ");
  Serial.print(ESUP->getPertinence());

```

```

Serial.print(", ");
Serial.println(ALTA->getPertinence());

    Serial.print("posicao: ");
Serial.print(Ba->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.print(EINF->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.print(INF->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.print(NORMAL->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.print(SUP->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.print(ESUP->getPertinence());
Serial.print(", ");
Serial.println(ALTA->getPertinence());

float posi = fuzzy->defuzzify(1);
analogWrite(9, posi);
Serial.print(posi);

Serial.print(" frequencia: ");
Serial.print(freq);
Serial.print(" setpoint: ");
Serial.print(SP);
Serial.print(" posicao: ");
Serial.println(posi);
Serial.print(" % ");

if (SELECT == HIGH) //Manual
{
    // Selciona o comando manual
    if (B_Sobe == HIGH)
    {
        // turn Sobe on:
        digitalWrite(S_Desce, LOW);
        delay(500);
        digitalWrite(S_Sobe, HIGH);
    }
    if (B_Sobe == LOW)
    {
        digitalWrite(S_Sobe, LOW);
        //digitalWrite(S_Desce, LOW);
    }
    if (B_Desce == HIGH)
    {
        // turn Desce on:
        digitalWrite(S_Sobe, LOW);
    }
}

```

```
    delay(500);
    digitalWrite(S_Desce, HIGH);
  }

  if (B_Desce == LOW)
  {
    //digitalWrite(S_Sobe, LOW);
    digitalWrite(S_Desce, LOW);
  }
} // Manual

else // Automatico
{
// Posicionamento do atuador
e = posi - ZeroAt;

if(-5 < e && 5 > e)
{
    digitalWrite(S_Sobe, LOW);
    digitalWrite(S_Desce, LOW);

}

if(-5 >= e)
{
    digitalWrite(S_Sobe, LOW);
    delay(50);
    digitalWrite(S_Desce, HIGH);
    //delay(500);
}

if(5 <= e)
{
    digitalWrite(S_Desce, LOW);
    delay(50);
    digitalWrite(S_Sobe, HIGH);
    //delay(500);
}

}
```