



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONARDO GOMES SARMENTO

**USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MELHORIA DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Recife
2019

LEONARDO GOMES SARMENTO

**USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MELHORIA DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso (EL403)

Orientador: Prof. M.Sc. Jeydson Lopes da Silva

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecário Josias Machado , CRB-4 / 1690

S246u Sarmento, Leonardo Gomes.
Uso da inteligência artificial na melhoria da eficiência energética em sistemas de bombeamento / Leonardo Gomes Sarmento. – Recife, 2019.
64 folhas, il., figs., tabs.

Orientador: Jeydson Lopes da Silva.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia elétrica. 2. Eficiência energética. 3. Inteligência artificial. 4. Lógica Fuzzy. 5. Sistemas de bombeamento. I. Silva, Jaydson Lopes da (orientador). II. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-326

LEONARDO GOMES SARMENTO

**USO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA MELHORIA DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE BOMBEAMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso do
Curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito da disciplina de Trabalho
de Conclusão de Curso (EL403) .

Aprovada em: ____ / ____ / ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. M.Sc Jeydson Lopes da Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Zanoni Dueire Lins
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Guilherme Melo
Universidade Federal de Pernambuco

RESUMO

Com o passar dos anos, a preocupação com a conservação de energia vem aumentando, sendo assim, é necessário investir em projetos mais eficientes buscando a melhoria na eficiência energética, e assim obter um retorno financeiro. Este trabalho propõe o uso de inversores de frequência, aliado ao uso de um controlador com inteligência artificial, no caso um controlador *fuzzy*, para controlar a rotação de motores de indução que acionam bombas hidráulicas de uma estação elevatória de água bruta (EEAB), modificando assim sua vazão de operação e utilizando melhor o reservatório, a fim de obter redução no consumo e na demanda, principalmente no horário de ponta, conseguindo assim um retorno financeiro. Com as simulações feitas utilizando um *script* no *software* MATLAB, foi possível obter uma redução no consumo de energia elétrica de aproximadamente 20%, trazendo um retorno financeiro de cerca de R\$ 200 mil reais.

Palavras-chave: Eficiência energética. Inteligência artificial. Lógica *fuzzy*. Sistemas de bombeamento.

ABSTRACT

Over the years, the concern with energy conservation has been increasing, so it is necessary to invest in more efficient projects seeking to improve energy efficiency, and thus obtain a financial return. This work proposes the use of frequency inverters, together with the use of a controller with artificial intelligence, in the case of a fuzzy controller, to control the rotation of induction motors that drive hydraulic pumps of a gross water lifting station (EEAB), modifying so its flow of operation and using the reservoir better, in order to obtain reduction in consumption and demand, especially at peak hours, thus achieving a financial return. With the simulations made using a script in the MATLAB software, it was possible to obtain a reduction in the electric energy consumption of approximately 20%, bringing a financial return of about R \$ 200 thousand reais

Keywords: Energy efficiency. Artificial intelligence. Fuzzy logic. Pumping systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Percentual de consumo de energia elétrica em cada setor	13
Figura 2 –	Como está o consumo no setor industrial.....	13
Figura 3 –	Aspectos construtivos de um motor de indução.....	19
Figura 4 –	Perdas mais significantes no motor de indução.....	20
Figura 5 –	Esquema de ligação de uma soft-starter.....	21
Figura 6 –	Esquema de ligação de um inversor de frequência.....	22
Figura 7 –	Curvas típicas de uma bomba centrífuga.....	21
Figura 8 –	Representação gráfica da união de dois conjuntos fuzzy..	32
Figura 9 –	Representação gráfica da intersecção de dois conjuntos fuzzy.....	33
Figura 10 –	Representação gráfica da complementação de um conjunto fuzzy.....	34
Figura 11 –	Esquema de um controlador fuzzy.....	35
Figura 12 –	Exemplo de fuzzyficação.....	36
Figura 13 –	Curva altura manométrica por vazão da associação paralela das quatro bombas.....	41
Figura 14 –	Curva da bomba e curva do sistema na rotação nominal.....	46
Figura 15 –	Entrada “VolumeRes” do controlador fuzzy.....	46
Figura 16 –	Entrada “hora” do controlador fuzzy.....	47
Figura 17 –	Entrada “errovol” do controlador fuzzy.....	48
Figura 18 –	Saída “rotação(%)” do controlador fuzzy.....	49
Figura 19 –	Esquema sistema de inferência fuzzy completo.....	49
Figura 20 –	Variação do volume do reservatório.....	56
Figura 21 –	Custo horário do sistema.....	56
Figura 22 –	Variação de demanda.....	57
Figura 23 –	Dados de entrada do script.....	61
Figura 24 –	Script feito no MATLAB.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Tensão de fornecimento dos consumidores do grupo A.....	16
Tabela 2 –	Consumos mínimos para baixa tensão.....	17
Tabela 3 –	Grandezas utilizadas em sistemas hidráulicos.....	24
Tabela 4 –	Dados de cada bomba utilizada nos CMB.....	40
Tabela 5 –	Dados dos motores de indução utilizados no CMB.....	40
Tabela 6 –	Dados da adutora.....	41
Tabela 7 –	Vazões de operação da bomba com o sistema e suas respectivas rotações.....	43
Tabela 8 –	Entradas do controlador <i>fuzzy</i>	44
Tabela 9 –	Valores de rotação em percentual da nominal utilizados como saída do controlador.....	45
Tabela 10 –	Valores reais da entrada “VolumeRes”.....	45
Tabela 11 –	Dados reais da entrada “hora”.....	46
Tabela 12 –	Dados reais da entrada “errovol”.....	47
Tabela 13 –	Dados reais da saída “rotação(%)”.....	48
Tabela 14 –	Regras utilizadas no controlador fuzzy.....	50
Tabela 15 –	Comparação entre cenário antigo e cenário com controlado fuzzy.....	57
Tabela 16 –	Resultados comparativos.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Ampère
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CMB	Conjunto Motor-Bomba
EEAB	Estação elevatória de água bruta
ETA	Estação de tratamento de água
h	Hora
Hz	Hertz
kg	Quilograma
kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
kgf	Quilograma-força
kgf/m ³	Quilograma-força por metro cúbico
kV	Quilovolt
kvarh	Quilovolt-ampere-reativo-hora
kW	Quilowatt
kWh	Quilowatt-hora
l	Litro
l/s	Litro por segundo
m	Metro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
m ³ /s	Metro cúbico por segundo
m ³ /h	Metro cúbico por hora
N	Newton
N/m ²	Newton por metro quadrado
N/m ³	Newton por metro cúbico
PROCEL	Programa de Conservação de Energia Elétrica
PU	Por Unidade
R\$	Real
R\$/kW	Real por quilowatt
R\$/kWh	Real por quilowatt-hora
rpm	Rotação por minuto
s	segundo
v	volt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	JUSTIFICATIVA	10
1.2	OBJETIVOS	10
1.3	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL.....	11
2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.....	12
2.1	TARIFAÇÃO ENERGÉTICA.....	13
2.1.1	Definições e Conceitos	14
2.1.2	Horários de Ponta e Fora Ponta.....	15
2.1.3	Grupo A.....	16
2.1.4	Grupo B.....	16
2.1.5	Modalidade Tarifária e Faturamento	16
3	MOTOR DE INDUÇÃO	19
3.1	PARTIDAS DE MOTORES	20
3.1.1	Partida Utilizando <i>Soft-Starter</i>	21
3.1.2	Partida com Inversor de Frequência	22
3.2	SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	23
3.2.1	Grandezas e Medidas.....	23
3.2.2	Perda de Carga	25
3.2.3	Metro Coluna de Água	25
3.2.4	Curvas do Sistema	25
3.2.5	Bombas Hidráulicas	26
3.2.6	Operação de Bombas.....	28
4	INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	29
4.1	RAMOS DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	29
4.2	LÓGICA <i>FUZZY</i>	30
4.2.1	União	31

4.2.2	Intersecção	32
4.2.3	Complementação	33
4.2.4	Produto.....	34
4.2.5	Controlador <i>Fuzzy</i>	35
4.2.6	Controladores Mandani	37
5	ESTUDO DE CASO	39
5.1	METODOLOGIA.....	39
5.2	PROCEDIMENTOS.....	41
5.2.1	Modelagem do Sistema <i>Fuzzy</i>	44
6	RESULTADOS.....	55
7	CONCLUSÃO	59
	REFERÊNCIAS.....	60
	APÊNDICE A	61

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a conservação de energia vem ganhando força no mundo, principalmente após a crise do petróleo dos anos de 1970, desde então a humanidade veio desenvolvendo tecnologias que visam tornar processos mais eficientes.

Aliado a isso, a inteligência artificial vem ganhando força e se tornando cada vez mais possível e utilizável, como mostra (Cruz, 2010), com isso, muitos engenheiros vêm utilizando inteligência artificial em seus projetos, tornando os serviços cada vez mais autônomos e eficientes.

1.1 JUSTIFICATIVA

Observando que os motores de indução são grandes consumidores de energia elétrica, logo projetos que busquem tornar a operação de motores de indução mais eficientes se fazem necessários.

Foi visto também, durante o estágio curricular obrigatório na Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA), que em sistemas de bombeamento de água, a maior parte do consumo de energia elétrica é devido aos motores de indução que acionam as bombas hidráulicas.

Esse trabalho também trás a opção de tornar o processo autônomo, pois a inteligência artificial, no caso a lógica *fuzzy*, tomará as decisões para um controle otimizado na velocidade de rotação dos motores de indução que acionam mecanicamente as bombas hidráulicas.

1.2 OBJETIVOS

Portanto, o objetivo deste trabalho, é utilizar os conceitos de eficiência energética, aliado com os benefícios e ferramentas da inteligência artificial, através de um controlador *fuzzy*, para tornar a operação de uma estação elevatória de água bruta (EEAB) mais eficiente, a fim de economizar energia reduzindo o consumo de energia elétrica e a demanda de potência e obter um retorno financeiro.

Para isso, utilizando uma simulação feita através de um *script* no *software* MATLAB, com o controlador proposto, e utilizando dados baseados em estações elevatórias comuns do Brasil.

1.3 ORGANIZAÇÃO TEXTUAL

Para isso, será necessário entender algumas definições sobre conservação de energia, como é mostrado no capítulo 2 do trabalho, trazendo algumas equações que serão utilizadas no *script* para fazer a simulação.

O capítulo 3, mostra conceitos e definições sobre o motor de indução e os sistemas hidráulicos, o capítulo 4 mostra o embasamento teórico sobre inteligência artificial e a lógica *fuzzy*, que será utilizada na simulação.

Os capítulos 5 e 6 mostram os dados do sistema, os procedimentos adotados, e os resultados obtidos, e o capítulo 7 contém a conclusão do trabalho feito.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Baseado em (Tipler, 2013), energia é a capacidade que um corpo tem de realizar trabalho, ou seja, de mudar a configuração inicial do sistema. A energia é algo muito importante para a humanidade, pois com ela é possível realizar atividades básicas para a vida em sociedade.

Desde os primórdios da humanidade, o ser humano utiliza energia para realizar trabalho, como por exemplo, a energia mecânica para levantar algum peso. Com a revolução industrial que ocorreu entre os séculos XVIII e XIX, a necessidade de energia aumentou bastante, sendo que o uso de petróleo e eletricidade ganharam bastante força a partir do século XIX, trazendo um grande desenvolvimento para a sociedade, tanto no contexto social quanto no contexto tecnológico, como diz (Faria, 2010).

Contudo, devido à crise do petróleo dos anos de 1970, veio a necessidade de economizar recursos, e com isso, tornou-se necessária a conservação de energia. Além disso, começou-se a investir em fontes renováveis de energia.

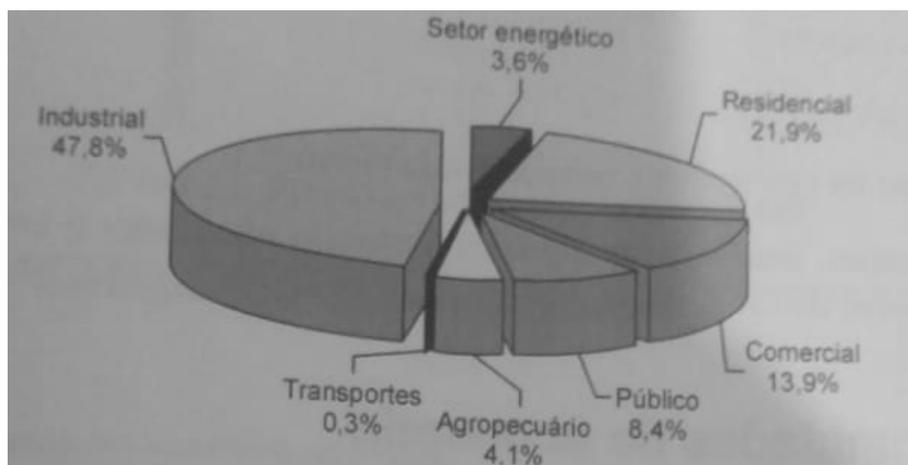
Segundo (ELETROBRÁS/PROCEL, Conservação de Energia, 2006), conservação de energia é o conceito sócio-econômico que traduz a necessidade de se retirar do planejamento da expansão do sistema elétrico, a componente referente ao desperdício. Isso permite a redução dos investimentos no setor elétrico, sem comprometer o fornecimento de energia e a qualidade devida.

Ou seja, trata-se de economizar energia, tornando os processos mais eficientes e econômicos. Essa eficiência, trás um retorno financeiro, pois as perdas serão diminuídas e consome-se menos energia para fazer o mesmo trabalho.

Segundo a (ANEEL 414, 2010), eficiência energética são procedimentos que visam reduzir o consumo de energia elétrica necessária para realizar um determinado trabalho.

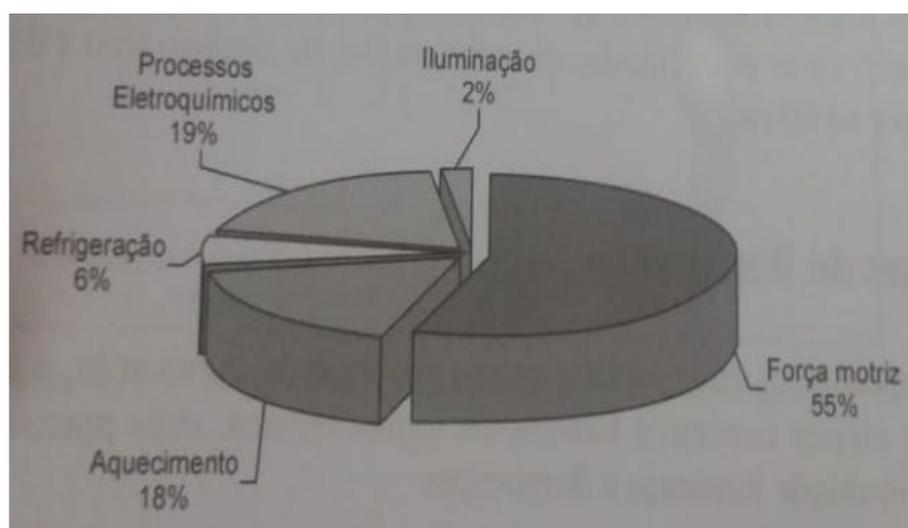
No Brasil, o setor onde se encontra o maior consumo de energia elétrica é o setor industrial, seguido do residencial como mostra a figura 1. Além disso, no setor industrial a maior parte do consumo é devido aos motores elétricos dos sistemas de força motriz, como mostra a figura 2, retirado de (Capelli, 2013), então trabalhar para tornar os motores elétricos mais eficientes seria um bom caminho para se conseguir uma boa eficiência energética.

Figura 1: Percentual de consumo de energia elétrica em cada setor



Fonte: (Capelli, 2013)

Figura 2: Como está o consumo no setor industrial



Fonte: (Capelli, 2013)

2.1 TARIFAÇÃO ENERGÉTICA

Uma das maneiras adotadas de promover a eficiência energética, é através da tarifação, onde é cobrado financeiramente o consumo de energia, conseqüentemente, quanto mais eficiente, menor o custo com energia elétrica, gerando mais lucros.

O sistema elétrica brasileiro pode ser dividido em geração, transmissão, subtransmissão, distribuição, como mostrado em (ELETROBRÁS/PROCEL, Conservação de Energia, 2006). A transmissão é feita em alta tensão (AT), os

grandes consumidores recebem tensão na ordem de 69 kV a 500 kV, a subtransmissão é feita na média e alta tensão (MT e AT), as médias unidades consumidoras recebem tensão na ordem de 13,8 kV a 138 kV, e a distribuição é feita em média e baixa tensão.

As pequenas unidades consumidoras podem ser: residencial, industrial, comercial, poder público e rural.

2.1.1 Definições e Conceitos

Segundo (ANEEL 414, 2010), pode-se trazer algumas definições importantes para o trabalho, serão mostradas a seguir.

2.1.1.1 Energia Elétrica Ativa

É a energia elétrica que pode ser convertida em trabalho mecânico, sua unidade é o quilowatt-hora (kWh).

2.1.1.2 Energia Elétrica Reativa

É a energia que circula nos campos elétricos e magnéticos, na prática, não realiza trabalho, servindo para energizar equipamentos indutivos, como por exemplo, máquinas elétricas e transformadores.

Sua unidade é expressa em quilovolt-ampere-reativo-hora (kvarh).

2.1.1.3 Demanda

É a média das potências ativas solicitadas pelas cargas ao longo de determinado intervalo de tempo, os medidores do Brasil operam com um intervalo de 15 minutos.

2.1.1.4 Demanda Máxima

É a maior demanda registrada em determinado período de verificação, podendo ser diário, mensal, anual e etc.

2.1.1.5 Demanda Média

É a relação entre a energia elétrica consumida (kWh) e o número de horas do período.

2.1.1.6 Demanda Medida

É a maior demanda registrada no período do ciclo de faturamento, integralizada a cada 15 minutos.

2.1.1.7 Demanda Contratada

É a demanda de potência ativa que deve ser obrigatoriamente fornecida pela concessionária, e deverá ser paga sendo ou não utilizada, caso a demanda medida for maior que a demanda registrada em 5%, deve ser cobrada uma multa por ultrapassagem de demanda.

2.1.1.8 Demanda Faturável

É o valor de demanda utilizada nos critérios de faturamento, ou seja, se a demanda medida for menor ou igual à demanda contratada, então a demanda faturável é a demanda contratada, por outro lado, se a demanda medida for superior à demanda contratada, a demanda faturável é a demanda medida, onde essa deve ser cobrada multa.

2.1.2 Horários de Ponta e Fora Ponta

A norma (ANEEL 414, 2010), define os horários de ponta e de fora ponta, onde no horário de ponta o sistema elétrico brasileiro é mais solicitado, então para aliviar o sistema, é cobrado uma tarifa maior, dependendo da modalidade tarifária, nos horários de ponta. São 3 horas consecutivas, definidas pelas companhias energéticas de cada estado brasileiro.

O horário fora de ponta, são as outras 21 horas complementares, onde é cobrado uma tarifa normal para os consumidores.

2.1.3 Grupo A

A norma (ANEEL 414, 2010), define os consumidores do grupo A, alta tensão, como sendo aqueles que são supridos com tensões iguais ou superiores a 2,3kV, divididos em subgrupos, conforme a tabela 1:

Tabela 1: Tensão de fornecimento dos consumidores do grupo A

Subgrupo	Tensão de fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
As	Subterrâneo

Fonte: Elaboração própria baseado em (ANEEL 414, 2010)

2.1.4 Grupo B

A norma (ANEEL 414, 2010), define o grupo B, baixa tensão, como sendo aqueles que são supridos com tensão inferior a 2,3 kV.

2.1.5 Modalidade Tarifária e Faturamento

Trata-se da forma, com a qual são aplicadas as tarifas energéticas, de acordo com os requisitos do consumidores, conforme a norma (ANEEL 414, 2010).

O faturamento de uma unidade consumidora do grupo B, baseia-se unicamente no consumo de energia elétrica ao longo do mês. Existem valores mínimos de consumo, que devem ser pagos independentemente se o consumo for inferior, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2: Consumos mínimos para baixa tensão

Tipo de Consumidor	Consumo Mínimo
Monofásico e bifásico a 2 condutores	30 kWh
Bifásico a 3 condutores	50kWh
Trifásico	100kWh

Fonte: Elaboração própria baseado em (ANEEL 414, 2010)

A equação 2.1 mostra como é calculado o valor da conta de energia a ser pago por um consumidor do grupo de baixa tensão:

$$VF = \frac{(CT.TC)}{1 - ICMS} \quad (2.1)$$

Onde:

VF – Valor faturável mensal de energia elétrica (R\$)

CT – Valor do consumo mensal total (kWh)

TC – Tarifa de consumo aplicada (R\$/kWh)

ICMS – Índice do imposto sobre circulação de mercadorias e serviços.

No faturamento de uma unidade consumidora do grupo A, deve ser observada a modalidade tarifária, podendo ser horária azul ou horária verde. As modalidades tarifárias dos grupos de alta tensão, caracterizam-se por cobrança de demanda, além de diferenciar o consumo em período de ponta e fora de ponta, na modalidade azul, existe também diferenciação de tarifa de demanda para horário de ponta e fora de ponta.

A tarifa azul cobra a demanda de potência em quilowatts (kW), em tarifas diferenciadas para ponta e fora de ponta, também é cobrado pelo consumo, podendo ser na ponta ou fora de ponta. A equação 2.2 mostra o valor faturado de um consumidor que se encontra na tarifa azul:

$$VF = \frac{(CP.TCP + CF.TCF + DP.TDP + DF.TDF)}{1 - ICMS} \quad (2.2)$$

Onde:

VF – Valor faturável mensal de energia elétrica (R\$)

CP – Valor do consumo mensal no horário de ponta total (kWh)

CF – Valor do consumo mensal no horário de fora ponta total (kWh)

DP – Valor da demanda faturável mensal na ponta (kW)

DF – Valor da demanda faturável mensal na fora ponta (kW)

TCP – Tarifa de consumo aplicada na ponta (R\$/kWh)

TCF – Tarifa de consumo aplicada na fora ponta (R\$/kWh)

TDP – Tarifa de demanda aplicada na ponta (R\$/kW)

TDF – Tarifa de demanda aplicada na fora ponta (R\$/kW)

ICMS – Índice do imposto sobre circulação de mercadorias e serviços.

A tarifa verde cobra a demanda de potência em quilowatts (kW), em tarifa única para ponta e fora de ponta, também é cobrado pelo consumo, podendo ser na ponta ou fora de ponta. A equação 2.3 mostra o valor faturado de um consumidor que se encontra na tarifa verde:

$$VF = \frac{(CP.TCP + CF.TCF + DF.TD)}{1 - ICMS} \quad (2.3)$$

Onde:

VF – Valor faturável mensal de energia elétrica (R\$)

CP – Valor do consumo mensal no horário de ponta total (kWh)

CF – Valor do consumo mensal no horário de fora ponta total (kWh)

DF – Valor da demanda faturável mensal (kW)

TCP – Tarifa de consumo aplicada na ponta (R\$/kWh)

TCF – Tarifa de consumo aplicada na fora ponta (R\$/kWh)

TD – Tarifa de demanda aplicada (R\$/kW)

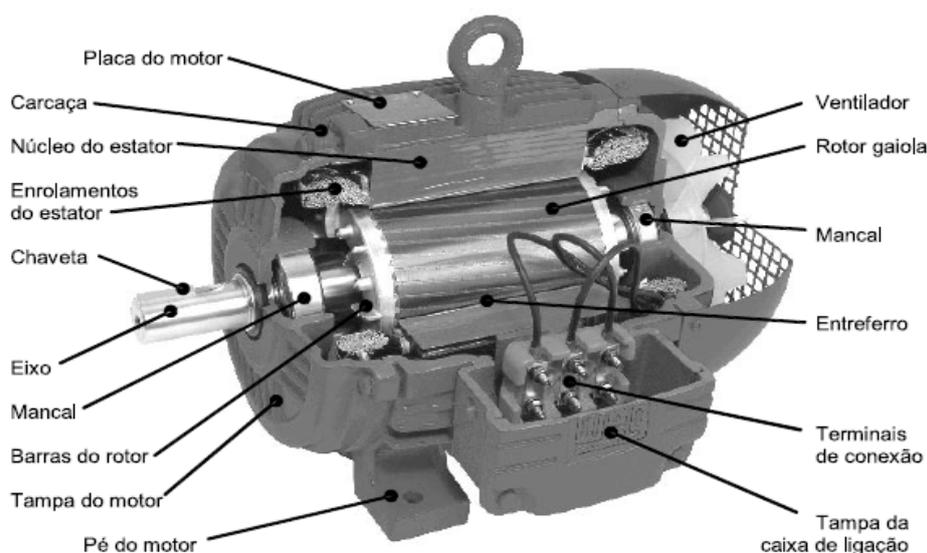
ICMS – Índice do imposto sobre circulação de mercadorias e serviços.

3 MOTOR DE INDUÇÃO

Baseando-se em (Chapman, 2013), as máquinas de indução recebem esse nome, pois a tensão no rotor é induzida nos enrolamentos de rotor, sem necessitar de contatos físicos por fios. Além disso, não há necessidade de uma corrente contínua no enrolamento de campo para fazer a máquina girar.

A máquina de indução é bastante utilizada como motor, apesar dela poder funcionar como gerador, porém nesse caso, ela possui algumas desvantagens frente à máquina síncrona, neste trabalho, a máquina de indução será utilizada como motor de indução, a figura 3, mostra o aspecto construtivo do motor de indução.

Figura 3: Aspectos construtivos de um motor de indução



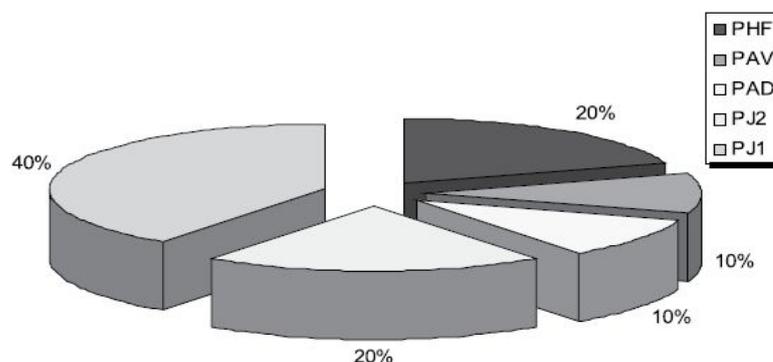
Fonte: (ELETROBRÁS/PROCEL, Conservação de Energia, 2006)

Como mostrado anteriormente, no Brasil maior parte do consumo estão nos sistemas motrizes, e o principal motor é o de indução, com isso, tornar a operação deles mais eficiente acarretará numa boa conservação de energia.

Basicamente o motor converte energia elétrica em energia mecânica a fim de acionar cargas. Contudo esse processo de conversão de energia não é perfeito, pois os motores possuem perdas, estas perdas podem ser por efeito joule no rotor (PJ2) e no estator (PJ1), perdas no ferro ocasionadas pelas perdas por histerese e

Foucoult (PHF), perdas por dispersão (PAD), e perdas por atrito e ventilação (PAV), a figura 4 mostra as perdas mais significativas do motor de indução.

Figura 4: Perdas mais significantes no motor de indução



Fonte: (ELETROBRÁS/PROCEL, Conservação de Energia, 2006)

A potência elétrica que o motor absorve da rede menos as perdas, resulta na potência mecânica disponível no eixo, o rendimento é a razão entre a potência mecânica e a potência elétrica.

3.1 PARTIDAS DE MOTORES

Durante a partida, os motores de indução solicitam da rede elevadas correntes, da ordem de 7 a 11 vezes a corrente nominal, acarretando num afundamento da tensão da rede, trazendo problemas para o próprio motor e até mesmo para outros equipamentos conectados à mesma rede. Por exemplo, contactores só funcionam para certo limite de subtensão, essa subtensão provocada pela elevada corrente de partida dos motores, pode também fazer certas proteções atuarem interrompendo o sistema e afeta também a iluminação do local.

Sendo assim, é necessário adotar estratégias para partida de motores, deve ser observado como funciona o sistema, a aplicação e a questão financeira.

O (Filho, 2017), cita em seu livro algumas formas de partida de motores de indução, será mostrado duas formas de partida que serão utilizadas no trabalho.

3.1.1 Partida Utilizando *Soft-Starters*

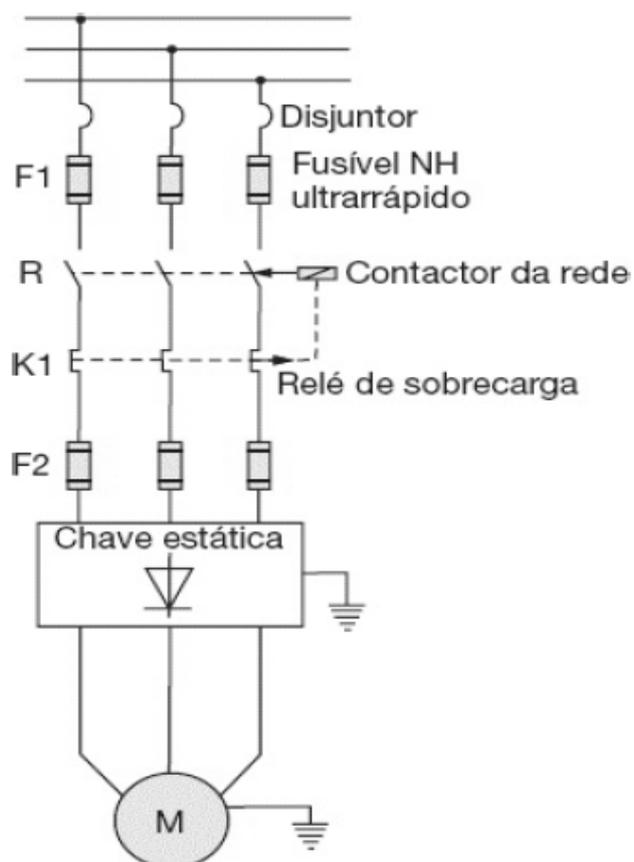
Conforme mostra (Filho, 2017), as chaves *soft-starters*, são constituídos de circuitos eletrônicos acoplados ao um microprocessador, controlando um conjunto de tiristores responsáveis pelo ajuste da tensão aplicada aos terminais do motor.

As chaves *soft-starters*, auxiliam na redução da corrente de partida dos motores, reduzindo assim a queda de tensão no sistema de alimentação, melhorando a qualidade da energia do sistema.

As *soft-starters* também são empregadas em casos que o motor é acelerado em rampa, com o objetivo de proteger pessoas e produtos. Pode ser utilizada também em casos que precise de desaceleração suave, como por exemplo, evitar o golpe de aríete em sistemas de bombeamento.

É possível acionar vários motores com uma única chave *soft-starter*, A figura 5. mostra um possível esquema para a ligação de uma chave *soft-starter*.

Figura 5: Esquema de ligação de uma *soft-starter*



Fonte: (Filho, 2017)

3.1.2 Partida com Inversor de Frequência

Conforme mostra o (Filho, 2017), inversores de frequência são dispositivos eletrônicos utilizados na operação de motores elétricos. São utilizados no controle da velocidade angular de motores, assim como o controle do conjugado.

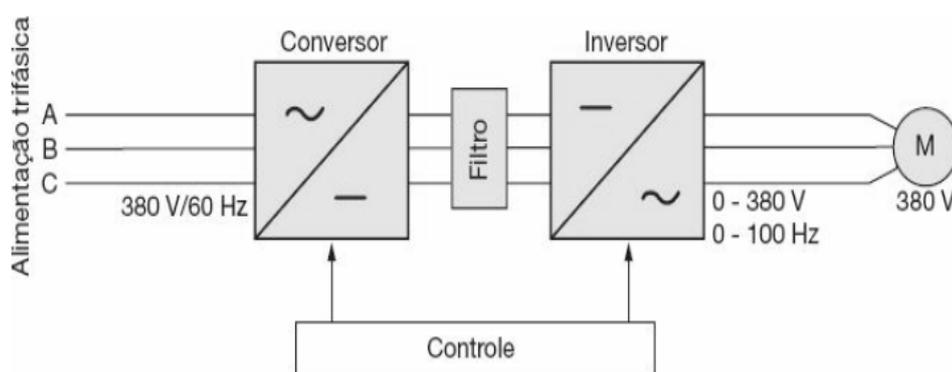
Também é possível utilizar inversores de frequência na partida de motores, porém é a forma mais cara de acionamento, portanto só é recomendável utilizá-lo na partida quando não for possível utilizar outras formas.

O inversor de frequência também pode ser utilizado em sistemas de bombeamento, para o controle do golpe de aríete.

Baseado em (Filho, 2017), pode-se dizer que os inversores de frequência funcionam através da retificação da tensão alternada que alimenta o motor por meio de seis tiristores, modulando a largura do pulso resultante e gerando uma corrente trifásica de frequência e tensão variáveis.

Todo esse processo é realizado por microprocessador, permitindo que o motor forneça sua potência no eixo com a maior eficiência possível, dentro de uma grande faixa de velocidade. A figura 6 mostra um esquema um inversor de frequência.

Figura 6: Esquema de ligação de um inversor de frequência



Fonte: (Filho, 2017)

3.2 SISTEMAS DE BOMBEAMENTO

A água é uma necessidade básica da sociedade, é um recurso natural indispensável para o desenvolvimento de qualquer atividade, seja ela agrícola, seja ela comercial ou industrial.

Todo cidadão precisa de água encanada, sendo ela tratada, para fazer seus afazeres domésticos e sua higienização, porém a água encontra-se num estado chamado de água bruta, ou seja água não tratada. Baseando-se em (Netto, 2015), observa-se que a água bruta encontrada em barragens, rios, poços entre outros, deve ser captada numa estação elevatória de água bruta (EEAB), e daí bombeada para uma adutora, até chegar na estação de tratamento de água (ETA), sendo a água tratada ela é bombeada para o reservatório, e finalmente para o sistema de distribuição, sendo este responsável para a distribuição da água para os consumidores.

Nesse processo, são utilizados conjuntos motor-bomba (CMB's), que são motores de indução, acionando mecanicamente bombas hidráulicas, fazendo assim com que a água seja bombeada com determinada vazão.

Sendo assim, se faz necessário a conservação de energia principalmente nos motores de indução, seja no processo de partida, ou em processos de operação, pois tornando esse processo de bombeamento mais eficiente, traria conservação da energia elétrica e também da água.

3.2.1 Grandezas e Medidas

A tabela 3 mostra as grandezas trabalhadas nos sistemas de bombeamento, e suas respectivas unidades, de acordo com o livro (ELETROBRÁS/PROCEL, Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento, 2005).

Tabela 3: Grandezas utilizadas em sistemas hidráulicos

Nome:	Descrição:	Símbolo:	Unidade(s):
Massa Específica	Relação entre a massa de um corpo e seu volume.	ρ	kg/m^3
Peso Específico	É a relação entre o peso de um corpo e seu próprio volume.	γ	N/m^3 ou kgf/m^3
Pressão	É uma força aplicada por um fluido perpendicularmente a uma superfície, dividida pela área dessa superfície.	p	N/m^2 ou kgf/cm^2
Vazão	É o volume de líquido escoado, dividido pelo intervalo de tempo.	Q	m^3/s , l/s ou m^3/h
Frequência	Indica o número de ocorrências de um evento por unidade de tempo.	f	Hz ou rpm
Carga Hidráulica	É a pressão do líquido dividido pelo seu peso específico, utilizado para se referir a pressões baseando-se na sua altura manométrica.	H	m.c.a ou m
Quilograma-Força	É a força exercida por uma massa de 1 kg (quilograma).	kgf	kgf

Fonte: (ELETROBRÁS/PROCEL, Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento, 2005)

3.2.2 Perda de Carga

É a perda de pressão que se dá ao longo de uma tubulação, neste trabalho, será utilizada a “fórmula de Hazen-Williams” para o calculo dessas perdas, essa equação 3.1 será mostrada abaixo:

$$H = \frac{10,65 \cdot Q^{1,852} \cdot L}{C^{1,852} D^{4,87}} \quad (3.1)$$

Onde:

H – Perda de carga (m.c.a)

Q - Vazão (m³/s)

C – Coeficiente que depende da rugosidade da tubulação

D – Diâmetro da tubulação (m).

3.2.3 Metro Coluna de Água

É uma unidade de pressão relacionada com altura de líquidos, 1 m.c.a equivale a 0,1 kgf/cm².

3.2.4 Curvas do Sistema

O livro (ELETROBRÁS/PROCEL, Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento, 2005) define a curva do sistema como sendo um gráfico que representa a variação da perda de carga em função da vazão, neste trabalho, a equação 3.2 será utilizada para plotar a curva do sistema.

$$H_s(Q) = H_f - H_i + \frac{10,65 \cdot Q^{1,852} \cdot L}{C^{1,852} D^{4,87}} \quad (3.2)$$

Onde:

H_s(Q) – Perda de carga do sistema em função da vazão (m.c.a)

H_i – Altura manométrica no início da tubulação (m.c.a)

H_f – Altura manométrica no final da tubulação (m.c.a)

Q - Vazão (m³/s)

C – Coeficiente que depende da rugosidade da tubulação

D – Diâmetro da tubulação (m).

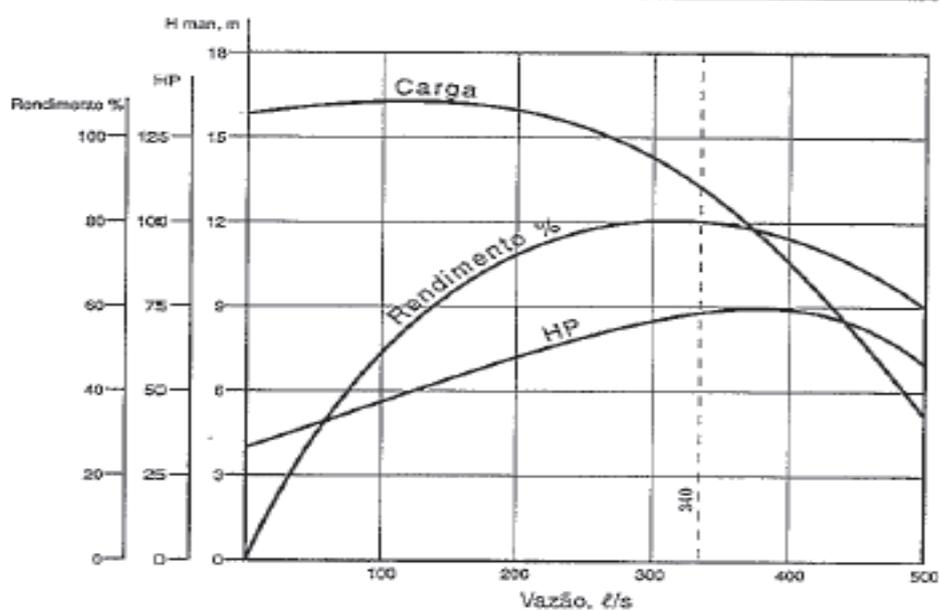
3.2.5 Bombas Hidráulicas

As bombas hidráulicas são equipamentos responsáveis por transferir energia para a água, podendo aumentar sua pressão, sua velocidade ou sua altura. O livro (ELETROBRÁS/PROCEL, Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento, 2005) lista alguns tipos de bombas, e divide-as em dois grupos principais, sendo as bombas de deslocamento positivo e as turbobombas.

No abastecimento de água, são utilizadas as turbobombas, podendo ser bombas centrífugas, mistas e axiais, nesse trabalho, será utilizada a bomba centrífuga.

Pode-se caracterizar uma bomba centrífuga através de curvas, com ela operando em uma velocidade fixa, variando a vazão, é possível então plotar o gráfico da altura manométrica pela vazão, da potência hidráulica pela vazão e também do rendimento pela vazão, como mostrado no (Netto, 2015).

Figura 7: Curvas típicas de uma bomba centrífuga



Legenda: Carga: altura manométrica (m.c.a); HP: Potência hidráulica (HP);

Fonte: (Netto, 2015)

A figura 7 mostra as possíveis curvas de uma bomba centrífuga, onde a carga representa a altura manométrica, e o HP representa a potência da bomba.

Vale ressaltar, que variando a rotação da bomba, essas características mudam, conforme será mostrado nas equações 3.3, 3.4 e 3.5 abaixo.

$$Q_1 = \frac{n_1}{n} \cdot Q \quad (3.3)$$

Onde:

Q_1 – Vazão na rotação n_1 (m^3/s)

Q – Vazão na rotação n (m^3/s)

n_1 – Nova rotação da bomba (rpm)

n – Antiga rotação da bomba (rpm).

$$H_1 = \frac{n_1^2}{n^2} \cdot H \quad (3.4)$$

Onde:

H_1 – Altura manométrica na rotação n_1 (m^3/s)

H – Altura manométrica na rotação n (m^3/s)

n_1 – Nova rotação da bomba (rpm)

n – Antiga rotação da bomba (rpm).

$$P_1 = \frac{n_1^3}{n^3} \cdot P \quad (3.5)$$

Onde:

P_1 – Potência hidráulica na rotação n_1 (m^3/s)

P – Potência hidráulica na rotação n (m^3/s)

n_1 – Nova rotação da bomba (rpm)

n – Antiga rotação da bomba (rpm).

3.2.6 Operação de Bombas

De acordo com (Netto, 2015) são possíveis duas formas de operação de bombas centrífugas, a operação em paralelo e a operação em série. A operação de duas ou mais bombas em paralelo, acontece que para uma mesma altura manométrica as vazões são somadas, porém, as bombas devem possuir características parecidas para poderem ser colocadas em paralelo.

Quando se coloca duas ou mais bombas em série, por outro lado, as alturas manométricas são somadas e a vazão é a mesma por todas as bombas. Neste trabalho, será utilizada a operação paralela de bombas.

4 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Primeiramente, é necessário definir o que vem a ser inteligência artificial, de acordo com (Cruz, 2010) pode-se definir inteligência artificial como sendo um ramo da ciência computacional que estuda símbolos e métodos nos algoritmos para resolver problemas.

Baseando no livro (Júnior, 2000) inteligência artificial é uma forma de fazer com que as máquinas tenham a capacidade de realizar atividades mentais comum ao ser humano, através da programação de algoritmos computacionais. Essas atividades podem ser percepção (tato, visão e audição), capacidade de aprender, capacidade de julgar, raciocínio, memória e também a linguagem.

Portanto, o uso da inteligência artificial torna possível que máquinas realizem tarefas complexas no lugar do ser humano, diminuindo assim os trabalhos repetitivos, cansativos e perigosos. Neste trabalho, por exemplo, será proposto um controlador inteligente que julgue a melhor rotação para o funcionamento de um conjunto motor-bomba dependendo de cada estado do sistema, a fim de operar de forma eficiente e econômica.

4.1 RAMOS DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Como o livro (Cruz, 2010) mostra, existem três grandes ramificações na inteligência artificial, são elas: lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos.

A rede neural artificial, tenta reproduzir o processo de solução de problemas do cérebro humano, pois assim como o ser humano aplica o conhecimento com base nas experiências, assim também uma rede neural artificial se utiliza de exemplos resolvidos para construir um sistema que toma decisões e realiza funções.

Pode-se listar algumas vantagens da rede neural artificial se comparada a outros ramos da inteligência artificial, como por exemplo, a rede neural artificial sintetiza algoritmos através de aprendizagem, além disso, não é necessário conhecer detalhes matemáticos, só precisa estar familiarizado com os dados de trabalho, a rede neural artificial é indicada para resolução de problemas não lineares, e funciona mesmo com a falha de alguns elementos.

Por outro lado, ela possui desvantagens, pois precisa ser treinada gastando tempo, necessita de muitos dados e além disso, a rede neural artificial é complexa para um observador externo realizar mudanças.

Os algoritmos genéticos tratam-se técnicas de busca iterativa, buscando encontrar estratégias de otimização de determinada função, inspirada nos princípios da seleção natural.

Como mostrado no livro de (Cruz, 2010) a lógica *fuzzy* é o ramo da inteligência artificial, que permite a um computador analisar informações do mundo real em uma escala entre o falso e verdadeiro, permitindo assim a manipulação de expressões que envolvem grandezas linguísticas. Este trabalho, utilizará a lógica *fuzzy*, pois o controlador irá tomar a decisão acerca da melhor rotação de funcionamento do conjunto motor-bomba, baseando-se em entradas não precisas, como por exemplo, reservatório cheio ou vazio.

4.2 LÓGICA FUZZY

Baseando-se no livro (Júnior, 2000), a lógica *fuzzy* é capaz de tratar dados que envolvem grandezas descritas de forma não exata como dito anteriormente, o tratamento dessas expressões que envolvem variáveis linguísticas é baseado em conceitos de conjuntos nebulosos.

A teoria dos conjuntos nebulosos visa traduzir em termos formais a informação imprecisa que ocorre de maneira natural na representação dos fenômenos da natureza.

Na teoria clássica dos conjuntos, um elemento pertence ou não pertence a determinado conjunto, porém nos conjuntos nebulosos, é necessário uma função pertinência que expressa o quanto um dado elemento pertence a um dado conjunto.

A função pertinência indica o quanto um elemento se relaciona com um determinado conjunto, a equação 4.1 mostra a representação de um conjunto nebuloso.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \tag{4.1}$$

A – Conjunto Nebuloso

x – Elemento

$\mu_A(x)$ – Função pertinência para elementos do conjunto A

X – Universo de elementos x .

As funções pertinência caracterizam um conjunto nebuloso, a seguir serão mostradas as operações básicas de conjuntos nebulosos, baseado em (Júnior, 2000).

4.2.1 União

Um conjunto nebuloso $C = A \cup B$ será caracterizado pela seguinte função pertinência:

$$\mu_C(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x) | x \in X\} \quad (4.2)$$

Onde:

μ_C – Função pertinência para elementos do conjunto C

μ_A – Função pertinência para elementos do conjunto A

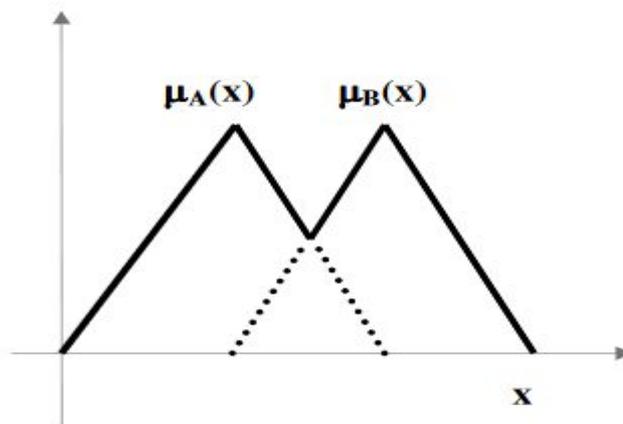
μ_B – Função pertinência para elementos do conjunto B

x – Elemento

X – Universo de elementos x .

A figura 8, mostra graficamente a união de dois conjuntos *fuzzy*, a curva em negrito representa a função pertinência resultante para $C = A \cup B$.

Figura 8: Representação gráfica da união de dois conjuntos *fuzzy*



Fonte: (Cavalcanti, 2012)

4.2.2 Intersecção

Um conjunto nebuloso $D = A \cap B$ será caracterizado pela seguinte função pertinência:

$$\mu_D(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x) | x \in X\} \quad (4.3)$$

Onde:

μ_D – Função pertinência para elementos do conjunto D

μ_A – Função pertinência para elementos do conjunto A

μ_B – Função pertinência para elementos do conjunto B

x – Elemento

X – Universo de elementos x.

A figura 9 mostra graficamente $D = A \cap B$, onde a curva em negrito representa a função pertinência resultante.

Figura 9: Representação gráfica da intersecção de dois conjuntos *fuzzy*

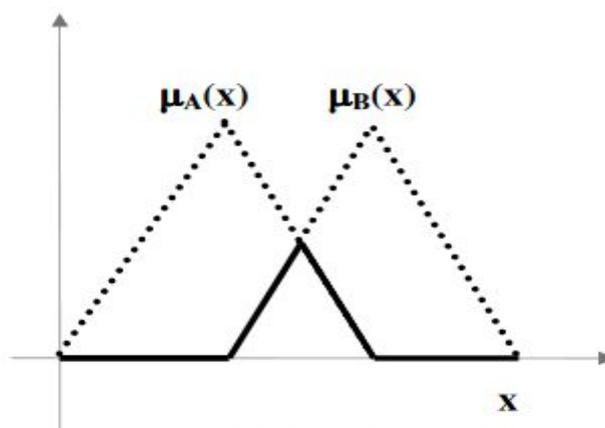


Fig.3.8 Intersecção

Fonte: (Cavalcanti, 2012)

4.2.3 Complementação

Um conjunto nebuloso $E = A^C$ será caracterizado pela seguinte função pertinência:

$$\mu_E(x) = \{1 - \mu_A(x) | x \in X\} \quad (4.4)$$

Onde:

μ_E – Função pertinência para elementos do conjunto E

μ_A – Função pertinência para elementos do conjunto A

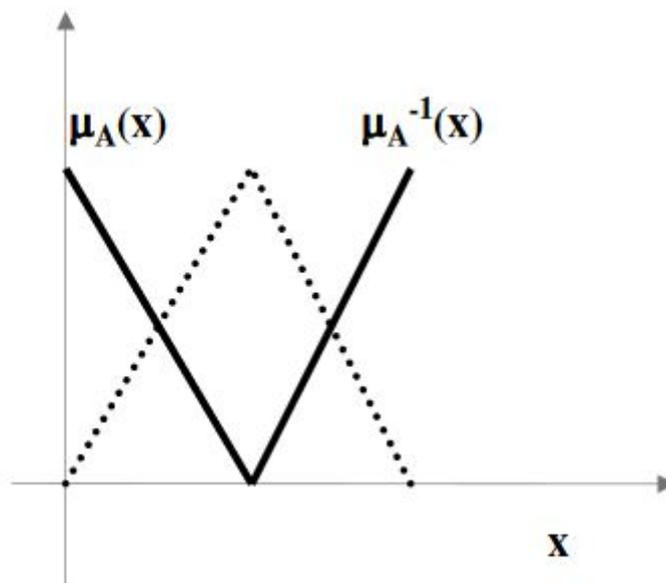
μ_B – Função pertinência para elementos do conjunto B

x – Elemento

X – Universo de elementos x.

A figura 10 mostra graficamente a operação de complementação, onde a curva em negrito representa $E = A^C$.

Figura 10: Representação gráfica da complementação de um conjunto fuzzy



Fonte: (Cavalcanti, 2012)

4.2.4 Produto

Um conjunto nebuloso $F = A \times B$ será caracterizado pela seguinte função pertinência:

$$\mu_F(x) = \{\mu_A(x) \cdot \mu_B(x) | x \in X\} \quad (4.5)$$

Onde:

μ_F – Função pertinência para elementos do conjunto F

μ_A – Função pertinência para elementos do conjunto A

μ_B – Função pertinência para elementos do conjunto B

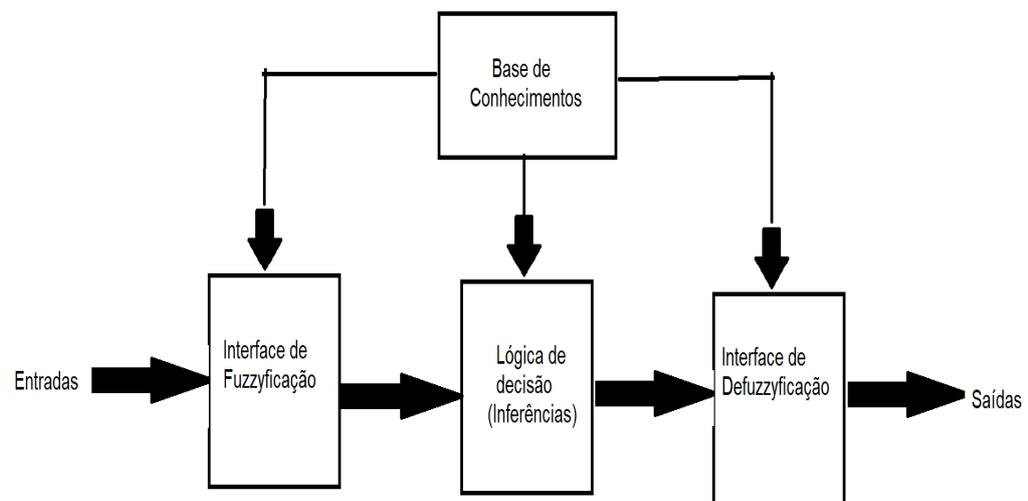
x – Elemento

X – Universo de elementos x.

4.2.5 Controlador *Fuzzy*

Segundo (Cruz, 2010), o controlador *fuzzy* é composto por quatro partes principais: interface de fuzzyficação, base de conhecimentos, lógica de decisões e interface de defuzzyficação. A figura 11 mostra um esquema desse controlador contendo suas partes principais.

Figura 11: Esquema de um controlador *fuzzy*

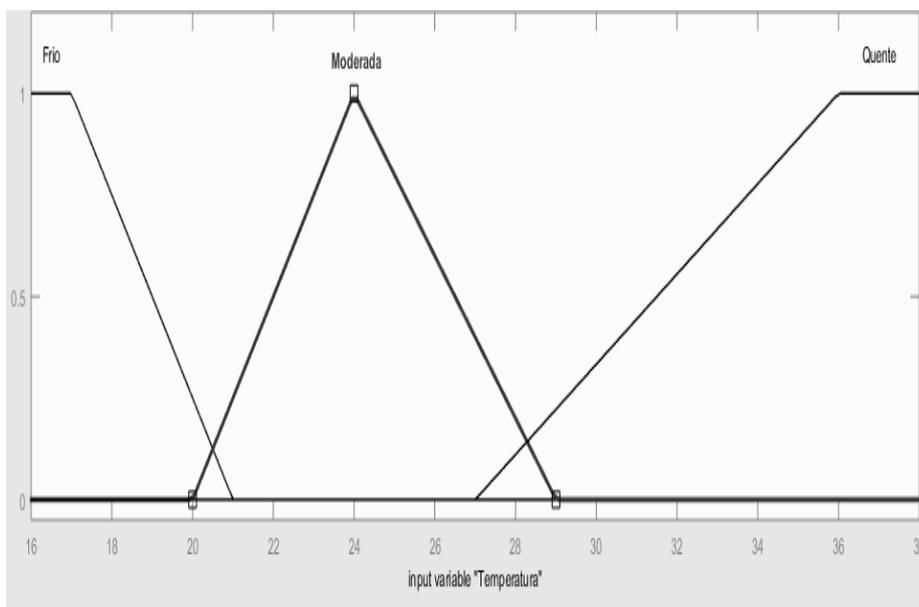


Fonte: Elaboração própria, baseado em (Cruz, 2010)

4.2.5.1 Fuzzyficação

Baseado em (Cruz, 2010), a interface de fuzzyficação converte os dados de entrada em valores linguísticos que são os rótulos das funções de pertinência dos conjuntos difusos. A figura 12, feita utilizando o *toolbox* da lógica *fuzzy* no *software* MATLAB, mostra um exemplo de fuzzyficação, onde os valores reais em graus Celsius do ambiente são convertidos em dados *fuzzy*: quente, frio ou moderado. As funções pertinências mais utilizadas são: triangular, trapezoidal e gaussiana.

Figura 12: Exemplo de fuzzyficação



Fonte: Elaboração própria

4.2.5.2 Base de Conhecimentos

A base de conhecimentos contém toda a informação da aplicação do controlador, consiste em um banco de dados e uma base de regras linguísticas para controlar determinada variável.

Um algoritmo de controle *fuzzy*, deve ser capaz de inferir uma ação de controle correspondente para cada estado do processo que se vai controlar.

4.2.5.3 Lógica de Decisão

É a lógica utilizada para tomar decisão dentro de um controlador *fuzzy*, a partir dela, é simulada a lógica que as pessoas utilizam para tomar decisões, com base nos conceitos difusos e na inferência de ações de controle, usando implicações e regras estabelecidas na base de conhecimentos.

4.2.5.4 Defuzzyficação

Conforme (Cruz, 2010), a defuzzyficação é responsável por converter o alcance de valores das variáveis de saída aos seus universos correspondentes, a defuzzyficação é a ferramenta para obter a ação do controle *fuzzy*.

A detecção desse valor nítido, pode ser feita com as seguintes técnicas: método do centróide, método do primeiro máximo, método do último máximo e método da média dos máximos. Na simulação feita neste trabalho, será utilizado o método do centróide.

4.2.5.4.1 Método do Centróide

Nesse método, é utilizada a seguinte equação:

$$Saída = \frac{\int_a^b \mu(x) \cdot x dx}{\int_a^b \mu(x) dx} \quad (4.6)$$

Onde:

Saída – É a saída real do controlador *fuzzy*

$\mu(x)$ – É a função pertinência de x

x – é o elemento.

Esse método é utilizado para obter o valor real da saída, sua metodologia consiste em cortar a função pertinência pelo grau da respectiva função pertinência, segmentando as funções de pertinência, gerando em cada função duas áreas.

A área inferior é utilizada para fazer o calculo. Deve fazer a superposição de todas as áreas e se calcula o centróide da superposição, e com isso, encontra-se a saída real do sistema.

4.2.6 Controladores Mandani

O livro do (Cruz, 2010), mostra o controlador Mandani, trata-se de um padrão de controlador *fuzzy*, que possui os seguintes procedimentos:

- a) O erro entre o valor desejado da variável de controle e seu valor real, indicará as funções pertinência que devem ser fuzzyficadas.
- b) Estabelecer regras a partir de proposições condicionais, com isso o dispositivo de inferência será uma composição de máximos e mínimos.
- c) Seleciona-se as funções de pertinência para defuzzyficação, utilizando o método do centróide.

5 ESTUDO DE CASO

As companhias de saneamento em cada estado do Brasil, são as responsáveis por captar a água bruta de uma barragem, rio ou poço, e tratar essa água a fim de distribuí-la para os consumidores.

Como mostrado anteriormente, todos esses processos de bombeamento utilizam conjuntos motor-bomba para bombear a água através de adutoras ou tubulações, sendo o motor de indução responsável por acionar mecanicamente as bombas e estes são grandes focos em projetos de eficiência energética, por serem grandes consumidores de energia elétrica, com isso é possível economizar energia, seja melhorando sua operação ou até mesmo melhorando a qualidade da energia no sistema escolhendo a melhor forma de partida para esse motor.

5.1 METODOLOGIA

A seguir, é proposta uma simulação utilizando um *script* elaborado utilizando o *software* MATLAB, com o auxílio da *toolbox* de lógica *fuzzy* do mesmo MATLAB, com o intuito de simular o ganho em eficiência energética observando o retorno financeiro em uma estação elevatória de água bruta (EEAB), obtido através do uso de inversores de frequência junto com um controlador *fuzzy*, escolhendo a melhor rotação para o motor de indução, a fim de variar a vazão e com isso utilizar o reservatório da melhor forma, reduzindo o consumo de energia elétrica e a demanda de potência no horário de ponta.

A estação elevatória de água bruta (EEAB), é alimentada em 69kV e encontra-se na modalidade tarifária Azul A3, possui seis conjuntos motor-bomba, sendo que quatro operam e dois ficam de reserva, todos motores são acionados por *soft-starters*, a vazão é controlada através da mudança de diâmetro das bombas. Isso provoca uma perda de eficiência, pois o motor de indução não muda sua operação, gastando a mesma energia tanto para grandes vazões como para pequenas vazões. Logo, com o uso de inversores de frequência é possível variar a vazão com a mudança da rotação do eixo do motor, isso faz com que ao diminuir a vazão, diminuirá também o consumo de energia pelo motor, tornando assim o sistema mais eficiente.

Partindo da estação elevatória de água bruta, a água é bombeada para uma adutora, chegando num reservatório, que atualmente é utilizado para os transitórios dos motores, ou seja, quando um motor que estava de reserva é acionado no lugar de outro motor que está em operação, e devido a essa troca por um certo intervalo de tempo, a vazão vai diminuir e assim o reservatório deve ser utilizado para que o sistema não pare de funcionar. Os quatro conjuntos motor-bomba operam em paralelo, ou seja, como mencionado no capítulo 3, a vazão é somada e a altura manométrica é a mesma. A saída dessa adutora é uma estação de tratamento de água (ETA), responsável por tratar a água bruta que vem da estação elevatória de água bruta.

As tabelas a seguir, mostram os dados do sistema, incluindo as informações da bomba, do motor, da adutora e do reservatório. Os dados utilizados foram inspirados em estações elevatórias de água bruta reais, observadas no estágio curricular obrigatório na Companhia Pernambucana de Saneamento.

Tabela 4: Dados de cada bomba utilizada nos CMB

Tipo:	Centrífuga
Forma de Operação:	Paralela
Marca:	KSB
Modelo:	RLD 500-700A
Altura Manométrica (m.c.a):	78,9
Rotação (rpm):	1160
Rendimento (%):	87

Fonte: Elaboração própria

Tabela 5: Dados dos motores de indução utilizados no CMB

Tipo:	Motor de Indução Trifásico com Rotor Gaiola
Tensão Nominal (V):	4160
Corrente Nominal (A):	196
Frequência Nominal (Hz):	60
Potência de Eixo (CV):	1600
Rotação (rpm):	1186
Número de Polos:	6
Rendimento (%):	94

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6: Dados da adutora

Altura manométrica no início (m):	27,25
Altura manométrica no final (m):	90,25
Diâmetro da adutora (m):	1,7
Comprimento da Adutora (m):	4200
Coefficiente de Rugosidade:	125

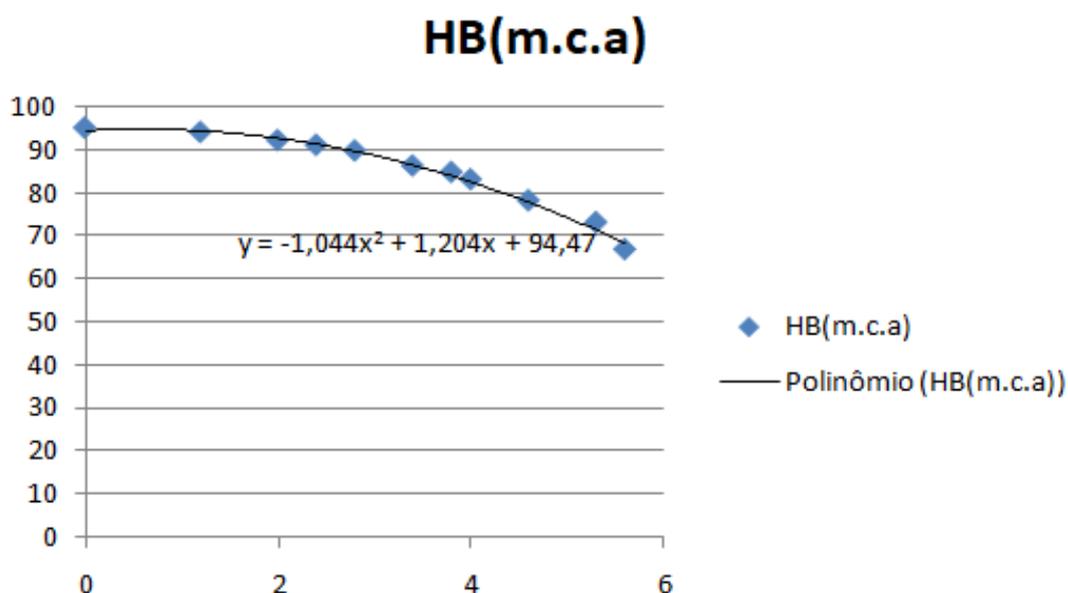
Fonte: Elaboração própria

5.2 PROCEDIMENTOS

Primeiramente, através do catálogo das bombas KSB RLD (KSB), as curvas de altura manométrica em função da vazão para as bombas do sistema foram obtidas. Esses dados foram inseridos em uma planilha no *software* Microsoft Office Excel, e assim foi feita uma aproximação por polinômio do segundo grau para auxiliar o modelo matemático do *script*.

A figura 13, mostra a curva da altura manométrica das bombas em função da vazão, obtida da associação de quatro bombas em paralelo, e mostra também sua equação aproximada por polinômio do segundo grau.

Figura 13: Curva altura manométrica por vazão da associação paralela das quatro bombas



Legenda: y: Equação da altura manométrica da bomba (m.c.a); x: Vazão (m³/s);

Fonte: Elaboração própria

Para obter a equação da curva do sistema, será utilizada a equação 3.2, junto com os dados da tabela 5.3, com isso, obtém-se a curva do sistema em função da vazão como está mostrando as equações 5.1 e 5.2.

$$H_s(Q) = 90,25 - 27,25 + \frac{10,65 \cdot Q^{1,852} \cdot (4200)}{125^{1,852} 1,74,87} \quad (5.1)$$

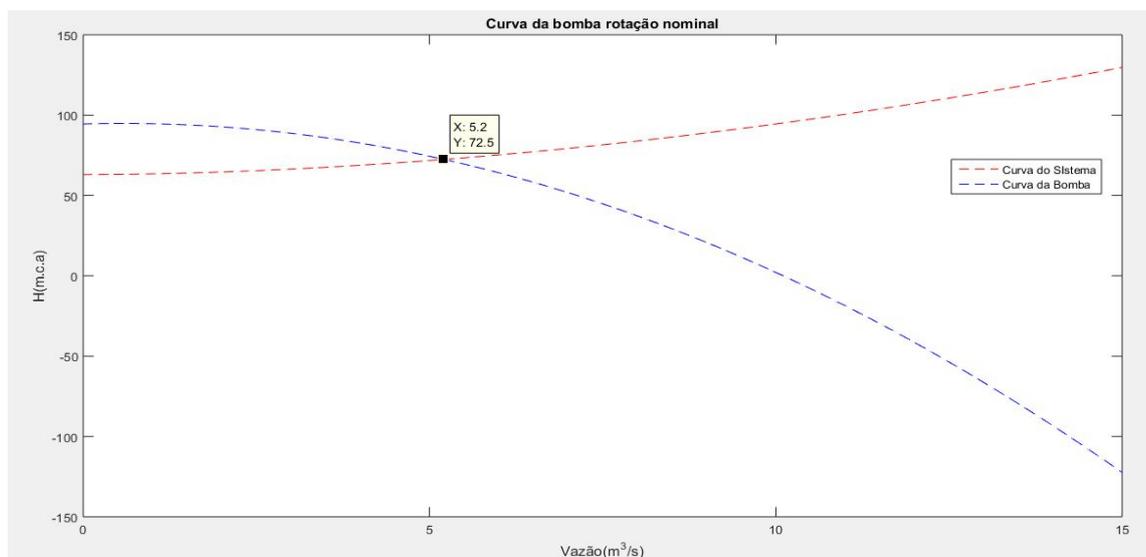
$$H_s(Q) = 63 + 0,445 \cdot Q^{1,852} \quad (5.2)$$

As curvas da altura do sistema e da altura da bomba foram plotadas e serão mostradas na figura 14, onde foi utilizado o *software* MATLAB, e assim foi calculado o ponto de operação nominal para esse sistema, visto que a variação na rotação da bomba altera sua vazão, foram escolhidos alguns pontos de operação para a bomba.

As vazões que esvaziariam o reservatório rapidamente foram descartadas, com isso os valores de vazão e rotação escolhidos foram inseridos numa planilha no *software* Microsoft Office Excel, onde foi avaliado o tempo de enchimento ou esvaziamento total do reservatório para cada vazão de saída dos conjuntos motor-bomba, onde a vazão de saída do reservatório possui um valor fixo de 4,75 m³/s.

A tabela 7 mostra a planilha feita, e a partir dela foram escolhidos os valores de rotação que serão utilizados como valores de saída do controlador *fuzzy*, dependendo de cada estado do sistema.

Figura 14: Curva da bomba e curva do sistema na rotação nominal



Fonte: Elaboração própria

Tabela 7: Vazões de operação da bomba com o sistema e suas respectivas rotações.

n/n _n (PU)	Qentrada (m ³ /s)	Qsaída (m ³ /s)	diferença (m ³ /s)	Tempo echer/esvaziar (minutos)
1	5,21	4,75	0,46	19,20289855
0,992322	5,17	4,75	0,42	21,03174603
0,984645	5,13	4,75	0,38	23,24561404
0,978887	5,1	4,75	0,35	25,23809524
0,971209	5,06	4,75	0,31	28,49462366
0,963532	5,02	4,75	0,27	32,71604938
0,955854	4,98	4,75	0,23	38,4057971
0,948177	4,94	4,75	0,19	46,49122807
0,940499	4,9	4,75	0,15	58,88888889
0,932821	4,86	4,75	0,11	80,3030303
0,925144	4,82	4,75	0,07	126,1904762
0,917466	4,78	4,75	0,03	294,4444444
0,911708	4,75	4,75	0	-
0,904031	4,71	4,75	-0,04	-220,8333333
0,894434	4,66	4,75	-0,09	-98,14814815
0,886756	4,62	4,75	-0,13	-67,94871795
0,879079	4,58	4,75	-0,17	-51,96078431

Legenda: n/n_n: Rotação de operação dividido pela rotação nominal; Qentrada: Vazão de entrada do Reservatório; Qsaída: Vazão de saída do reservatório;

Fonte: Elaboração própria

Os valores negativos na última coluna da tabela 7, representam tempos de esvaziamento do reservatório, a partir dessa tabela foram escolhidas as rotações que serão utilizadas como saída do controlador *fuzzy* de acordo com cada estado das entradas.

5.2.1 Modelagem do Sistema *Fuzzy*

A tabela 8 mostra quais serão as entradas do controlador além de seus respectivos estados.

Tabela 8: Entradas do controlador *fuzzy*

Volume do Reservatório (m ³): Qentrada-Qsaida (Velocidade) (m ³ /s):	Cheio Alta e positiva	Quase cheio Média e positiva	Médio Nula	Quase vazio Média e negativa	vazio Alta e negativa
Tempo(horas) :		Fora de ponta antes da ponta	Última hora fora de ponta	Ponta	Fora de ponta depois da ponta

Fonte: Elaboração própria

Foram escolhidas oito rotações em percentual da rotação nominal da tabela 8, para serem as saídas do controlador, elas serão mostradas na tabela 9.

Tabela 9: Valores de rotação em percentual da nominal utilizados como saída do controlador

Rotação:	Valor(%):
N1	94,8
N2	93,3
N3	92,5
N5	87,9
N5	87,14
N6	90,4
N7	91,7
N8	91,17

Fonte:Elaboração própria

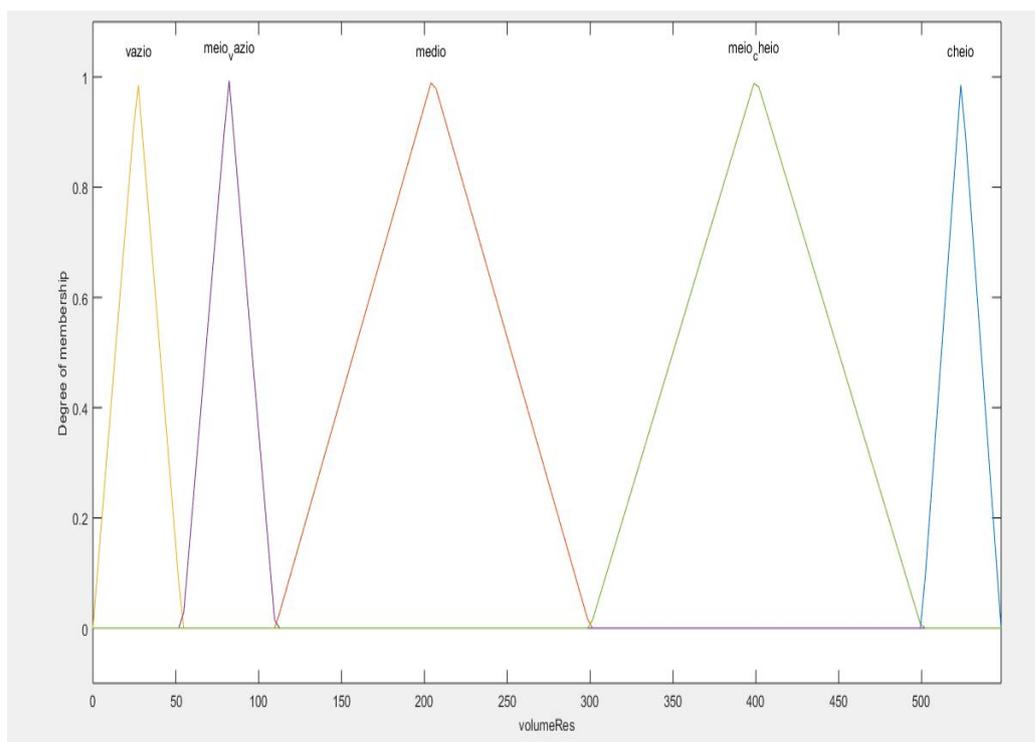
As figuras abaixo mostram como ficaram os dados no *toolbox* de lógica *fuzzy* do MATLAB, a figura 15 mostra a entrada referente ao volume do reservatório, a tabela 10 mostra os dados reais que caracterizam essa entrada.

Tabela 10: Valores reais da entrada “VolumeRes”

Cheio:	Acima de 500 metros cúbicos
Meio Cheio:	De 300 a 500 metros cúbicos
Médio:	De 100 a 300 metros cúbicos
Meio Vazio:	De 50 a 100 metros cúbicos
Vazio:	De 0 a 50 metros cúbicos

Fonte: Elaboração própria

Figura 15: Entrada “VolumeRes” do controlador fuzzy



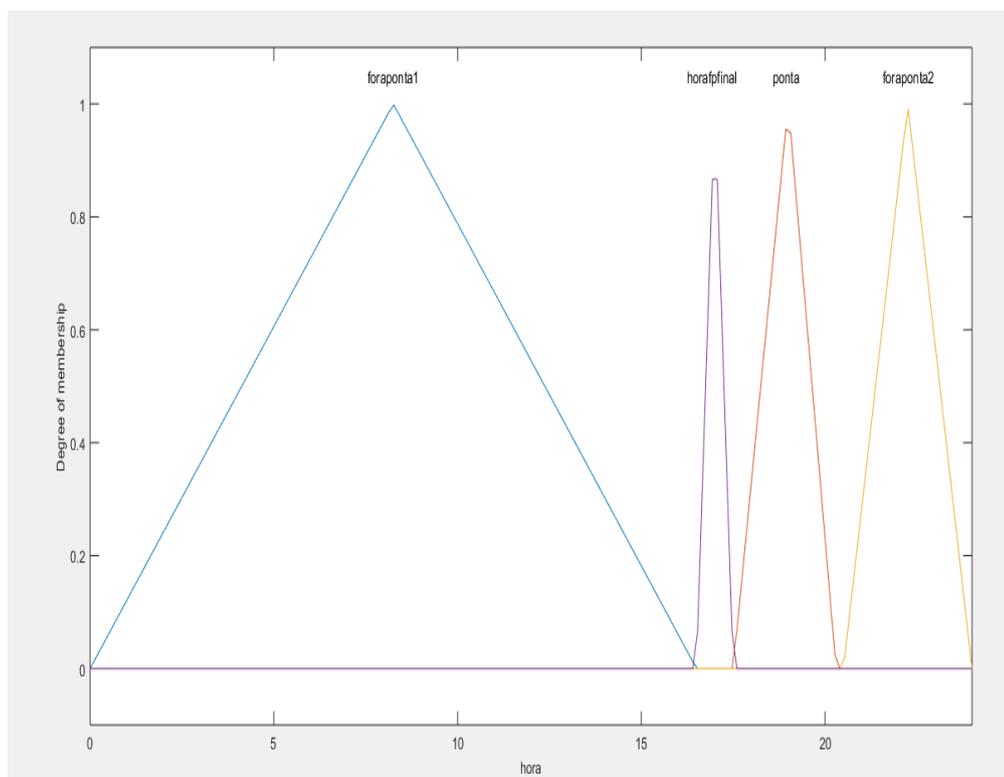
Fonte: Elaboração própria

A figura 16, mostra a entrada referente ao horário, a tabela 11 mostra os dados reais que caracterizam essa entrada.

Tabela 11: Dados reais da entrada “hora”

Ponta (h):	Das 17:30 às 20:30
Fora ponta 1 (h):	Das 00:00 às 16:30
Fora Ponta 2 (h):	Das 20:30 às 23:59
Última Hora antes da Ponta (h):	Das 16:30 às 17:30

Fonte: Elaboração própria

Figura 16: Entrada “hora” do controlador fuzzy

Fonte: Elaboração própria

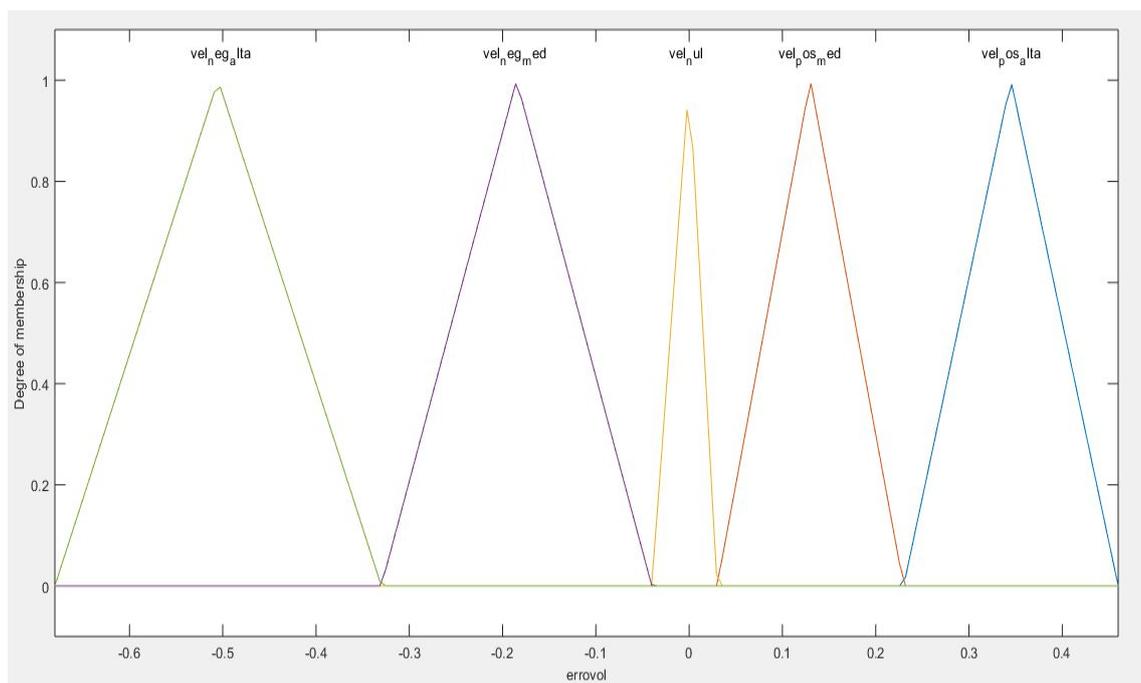
A figura 17, mostra a entrada chamada de “Erro de Volume”, que é a diferença entra a vazão de entrada do reservatório e a vazão de saída do reservatório, ou seja, é a velocidade com que o reservatório está enchendo ou esvaziando, a tabela 12 mostra os dados reais que caracterizam essa entrada.

Tabela 12: Dados reais da entrada “errovol”

Velocidade Alta e Negativa (m^3/s):	De -0,68 a -0,33
Velocidade Média e Negativa (m^3/s):	De -0,33 a -0,04
Velocidade Nula (m^3/s):	De -0,04 a 0,03
Velocidade Média e Positiva (m^3/s):	De 0,03 a 0,23
Velocidade Alta e Positiva (m^3/s):	De 0,23 a 0,46

Fonte: Elaboração própria

Figura 17: Entrada “errovol” do controlador fuzzy



Fonte: Elaboração própria

A figura 18 mostrará as saídas do controlador *fuzzy*, ou seja as rotações em percentual da rotação nominal do conjunto motor-bomba, a tabela 13 mostrará os dados reais que caracterizam essa saída. Todas funções pertinência tanto das entradas quanto das saídas foram triangulares, as entradas também poderiam ser funções trapezoidais, porem no caso das saídas, o melhor caso é a triangular afim de dar um peso maior no valor médio do intervalo escolhido como rotação percentual de saída.

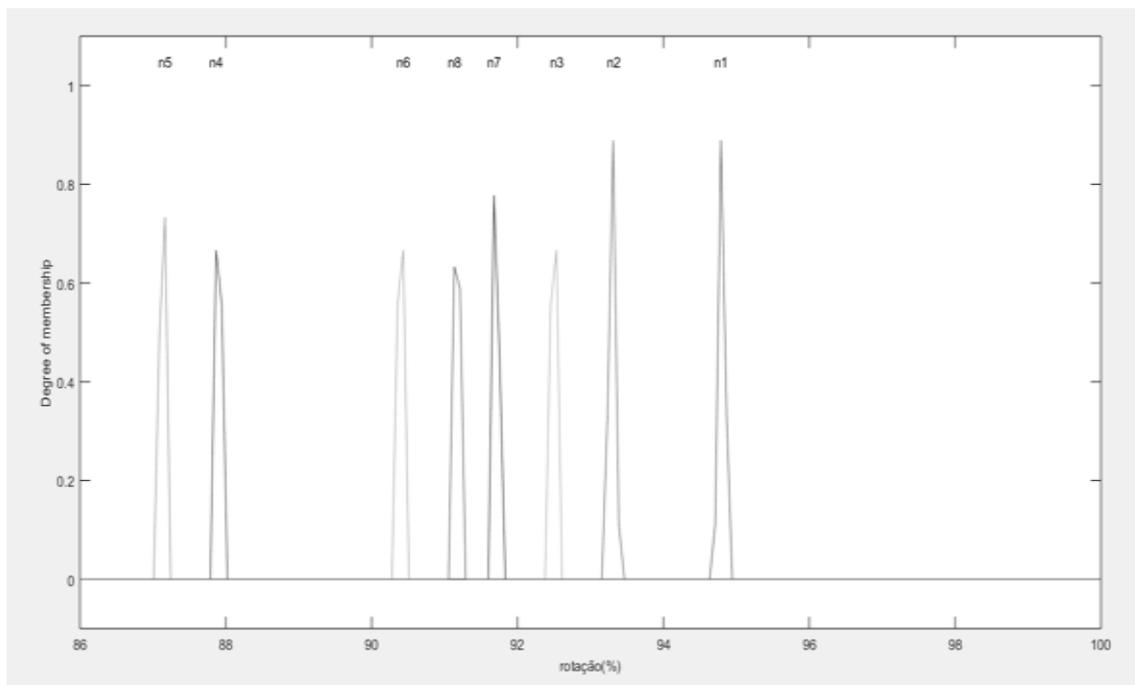
A figura 19 mostra como ficou o esquema do sistema *fuzzy* construído na *toolbox* do MATLAB, com as três entradas e a saída, o bloco no meio mostrando que o sistema possui trinta e oito regras, além disso, é mostrado que o controlador *fuzzy* é do tipo Mandani.

Tabela 13: Dados reais da saída “rotação(%)”

N1 (%):	94,8 ± 0,1
N2 (%):	93,3 ± 0,1
N3 (%):	92,5 ± 0,1
N5 (%):	87,9 ± 0,1
N5 (%):	87,14 ± 0,1
N6 (%):	90,4 ± 0,1
N7 (%):	91,7 ± 0,1
N8 (%):	91,17 ± 0,1

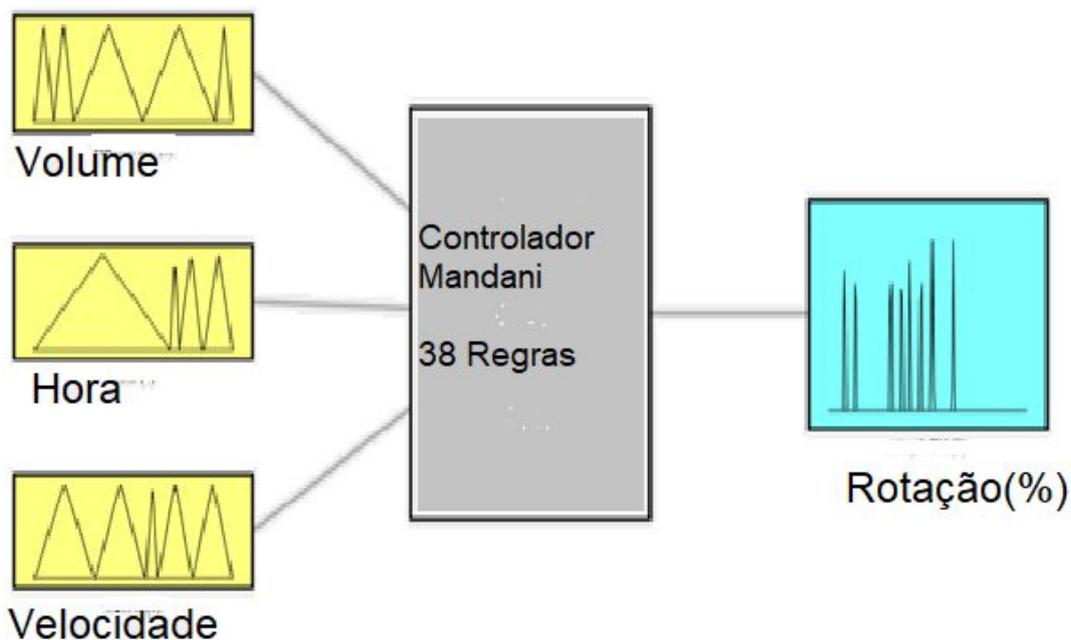
Fonte: Elaboração própria

Figura 18: Saída “rotação(%)” do controlador fuzzy



Fonte: Elaboração própria

Figura 19: Esquema sistema de inferência fuzzy completo



Fonte: Elaboração própria

Abaixo estão as regras de inferência utilizadas no controlador *fuzzy*, no projeto feito no *toolbox* de lógica *fuzzy* do MATLAB tiveram trinta e oito regras, pois

a entrada “Tempo” foi definida com dois horários de fora ponta um antes do horário de ponta e outro após o horário de ponta, nas regras que serão mostradas abaixo será considerado apenas um horário fora ponta.

As regras serão escolhidas com o intuito de trabalhar com a menor vazão possível no horário de ponta, para isso foi escolhida uma rotação onde a bomba deverá operar com uma vazão capaz de esvaziar o reservatório em três horas.

É importante também que o reservatório não transborde, pois isso significa um desperdício de água, logo as regras do controlador não devem deixar que o reservatório ultrapasse seu volume máximo, além disso, as regras também não podem deixar que o reservatório se esvazie completamente, por medida de segurança.

Sendo assim, é necessário que o reservatório inicie o horário de ponta com seu volume cheio, com isso, ao diminuir a rotação e conseqüentemente a vazão na ponta, ele não ficará completamente vazio ao passar das três horas, então é necessário que na hora final que antecede o horário de ponta, o controlador faça com que o reservatório fique cheio.

Nos horários de fora ponta, as regras serão elaboradas de modo que com o reservatório cheio, diminua a rotação, e com o reservatório quase vazio, o controlador aumenta a rotação, conseqüentemente a vazão e assim o reservatório volta a encher, as regras utilizadas estão na tabela 14.

Tabela 14: Regras utilizadas no controlador *fuzzy*

(Continua)

Regra:	Condição:	Ação:
1	SE Volume do Reservatório é Vazio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Alta e negativa	ENTÃO Rotação é N1
2	SE Volume do Reservatório é Vazio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Nula	ENTÃO Rotação é N1

Tabela 14: Regras utilizadas no controlador fuzzy

(Continua)

Regra:	Condição:	Ação:
3	SE Volume do Reservatório é Vazio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Média e negativa	ENTÃO Rotação é N1
4	SE Volume do Reservatório é Quase Vazio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Alta e negativa	ENTÃO Rotação é N2
5	SE Volume do Reservatório é Quase Vazio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Nula	ENTÃO Rotação é N2
6	SE Volume do Reservatório é Quase Vazio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Média e negativa	ENTÃO Rotação é N2
7	SE Volume do Reservatório é Médio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Alta e Positiva	ENTÃO Rotação é N3
8	SE Volume do Reservatório é Médio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Alta e Negativa	ENTÃO Rotação é N3
9	SE Volume do Reservatório é Médio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Média e positiva	ENTÃO Rotação é N3

Tabela 14: Regras utilizadas no controlador *fuzzy*

(Continua)

Regra:	Condição:	Ação:
10	SE Volume do Reservatório é Médio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Média e negativa	ENTÃO Rotação é N3
11	SE Volume do Reservatório é Quase Cheio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Alta e positiva	ENTÃO Rotação é N4
12	SE Volume do Reservatório é Quase Cheio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Nula	ENTÃO Rotação é N4
13	SE Volume do Reservatório é Quase Cheio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Média e positiva	ENTÃO Rotação é N4
14	SE Volume do Reservatório é Cheio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Alta e positiva	ENTÃO Rotação é N5
15	SE Volume do Reservatório é Cheio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Nula	ENTÃO Rotação é N5

Tabela 14: Regras utilizadas no controlador *fuzzy*

(Conclusão)

Regra:	Condição:	Ação:
16	SE Volume do Reservatório é Cheio E Tempo é Fora ponta E Velocidade é Média e positiva	ENTÃO Rotação é N5
17	SE Tempo é Ponta SE Volume do Reservatório é Quase Vazio	ENTÃO Rotação é N6
18	E Tempo é Última hora fora ponta SE Volume do Reservatório é Vazio	ENTÃO Rotação é N2
19	E Tempo é Última hora fora ponta SE Volume do Reservatório é Médio	ENTÃO Rotação é N1
20	E Tempo é Última hora fora ponta SE Volume do Reservatório é Quase Cheio	ENTÃO Rotação é N3
21	E Tempo é Última hora fora ponta SE Volume do Reservatório é Cheio	ENTÃO Rotação é N7
22	E Tempo é Última hora fora ponta	ENTÃO Rotação é N8

Fonte: Elaboração própria

Com o sistema de inferência *fuzzy* feito no *toolbox* de lógica *fuzzy* do MATLAB, foi feito um *script* que irá ler esse sistema e utilizá-lo para avaliar saídas dependendo das entradas propostas.

O *script* possui como dados de entrada o volume inicial do reservatório, a vazão de saída do reservatório, a vazão inicial de entrada do reservatório, além das

tarifas de consumo e demanda tanto de ponta quanto fora ponta, sendo esses dados retirados da tabela tarifária da CELPE (Companhia Energética de Pernambuco).

A hora será representada por um vetor, e em cada iteração essa hora será incrementada em 7 minutos e 30 segundos, ou seja, um oitavo de hora. As entradas irão para o sistema de inferência *fuzzy*, que atualizará o valor da rotação percentual e conseqüentemente mudará o valor da vazão de entrada do reservatório, variando assim o volume.

A cada iteração será calculada a potência elétrica demandada, o custo de energia elétrica e o custo acumulado nesse intervalo de tempo. A equação 5.4 será utilizada para calcular a potência elétrica demandada em cada instante, sendo retirada de (ELETROBRÁS/PROCEL, Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento, 2005), a equação 5.5 mostra o custo instantâneo para o consumo de energia elétrica do sistema conforme (ELETROBRÁS/PROCEL, Conservação de Energia, 2006) e a equação 5.6 mostra como o volume do reservatório muda através da variação da vazão na entrada, sendo esta equação elaborada pelo próprio autor.

$$P_{elé}(kW) = \frac{x^3 \cdot Q_n \cdot H_n \cdot \gamma}{1000 \cdot \eta_m \cdot \eta_b} \quad (5.3)$$

Onde:

$P_{elé}$ – Potência elétrica demandada pelo CMB (kW)

x – Rotação de operação bomba dividida pela rotação nominal

Q_n – Vazão nominal (m^3/s)

H_n – Altura manométrica nominal (m)

η_m – Rendimento do motor

η_b – Rendimento da bomba

γ - Peso específico do fluido (N/m^3).

$$Custo(R\$) = \frac{x^3 \cdot Q_n \cdot H_n \cdot \gamma \cdot t \cdot TC}{1000 \cdot \eta_m \cdot \eta_b} \quad (5.4)$$

Onde:

Custo – Custo provocado pelo consumo de energia elétrica(R\$)

x – Rotação de operação bomba dividida pela rotação nominal

Q_n – Vazão nominal (m^3/s)

H_n – Altura manométrica nominal (m)

η_m – Rendimento do motor

η_b – Rendimento da bomba

γ - Peso específico do fluido (N/m^3)

TC – Tarifa aplicada ao consumo de energia elétrica (R\$/kWh).

$$V (m^3) = V_o + (Q_{ent} - Q_{sai}). \Delta t. 3600 \quad (5.5)$$

Onde:

V – Volume do reservatório atualizado (m^3)

V_o – Volume inicial do reservatório (m^3)

Q_{ent} – Vazão de entrada do reservatório (m^3/s)

Q_{sai} – Vazão de saída do reservatório (m^3/s)

Δt – Intervalo de tempo (s).

6 RESULTADOS

Os resultados obtidos através do uso do *script*, serão mostrados abaixo, onde as figuras 20, 21 e 22 , mostram respectivamente como variam o volume, o custo e a demanda do sistema ao longo do dia, utilizando o controlador *fuzzy*.

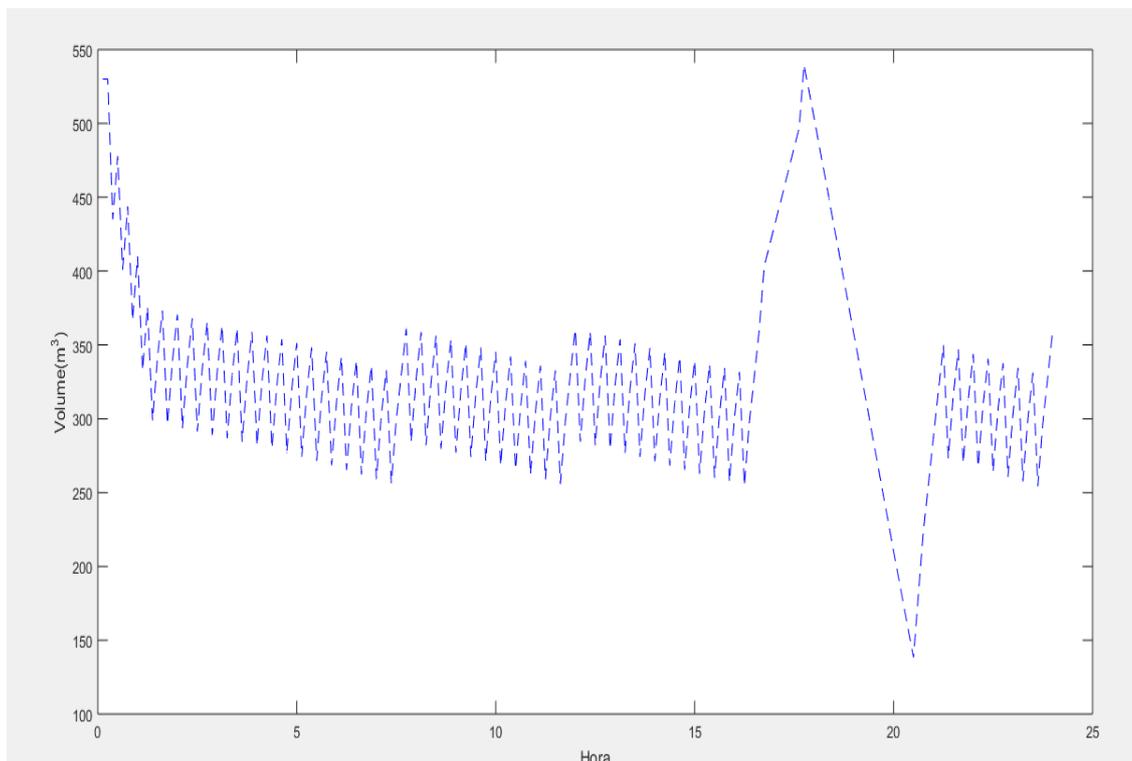
A figura 20 mostra a variação do volume do reservatório ao longo do dia utilizando o controlador *fuzzy*, a simulação inicia-se com o reservatório cheio, logo o controlador *fuzzy*, diminui a rotação diminuindo também a vazão da bomba acarretando na diminuição do volume do reservatório, observa-se também que na última hora fora da ponta, o volume do reservatório começa a encher e na hora da ponta, esse volume decai, mostrando assim que as regras de inferência foram obedecidas.

Na figura 20, é possível notar que o reservatório não fica vazio e nem transborda, isso mostra que nenhum problema operacional ocorreu na simulação.

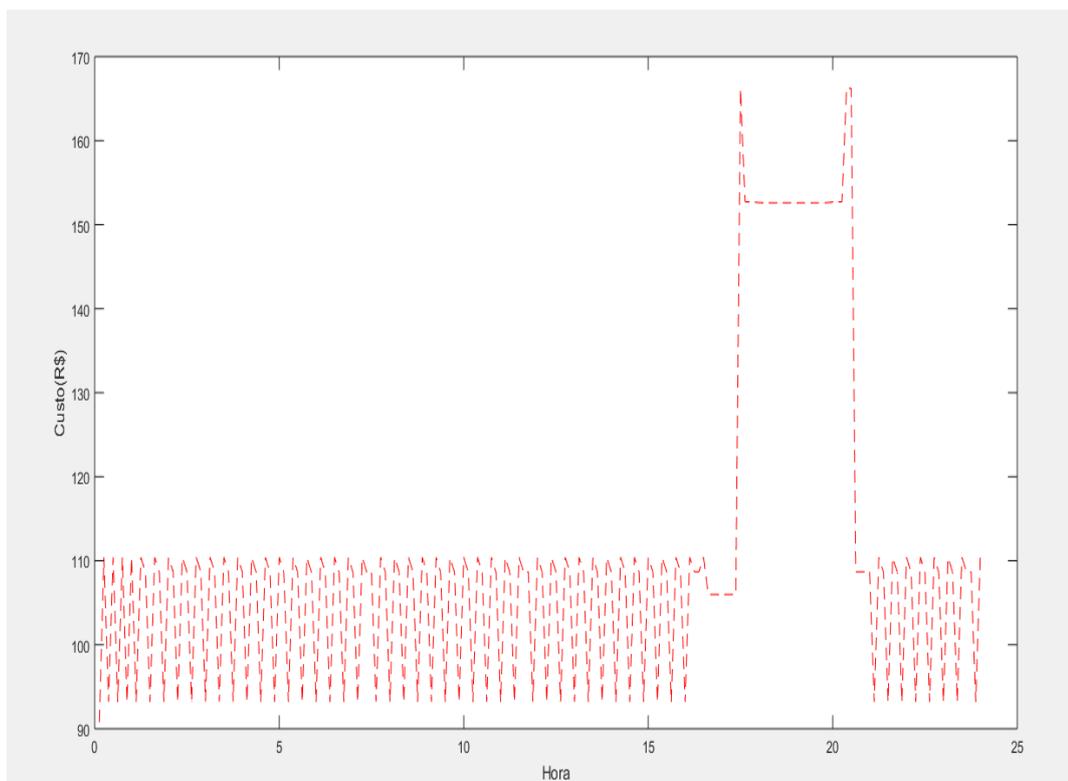
A figura 21 mostra a variação do custo operacional da estação elevatória, onde observa-se que no horário de ponta o custo aumenta, devido à tarifa ser maior.

A figura 22 mostra a variação da demanda de potência da unidade, para o cálculo da conta de energia do sistema utilizando controlador *fuzzy*, foi utilizada a maior demanda no horário de ponta, e a maior demanda no horário fora de ponta, conforme mostra a tabela 15.

A tabela 15 mostra uma comparação entre o cenário atual e o cenário com controlador *fuzzy*, e assim serão comparados e avaliados os ganhos com eficiência energética e o retorno financeiro obtido.

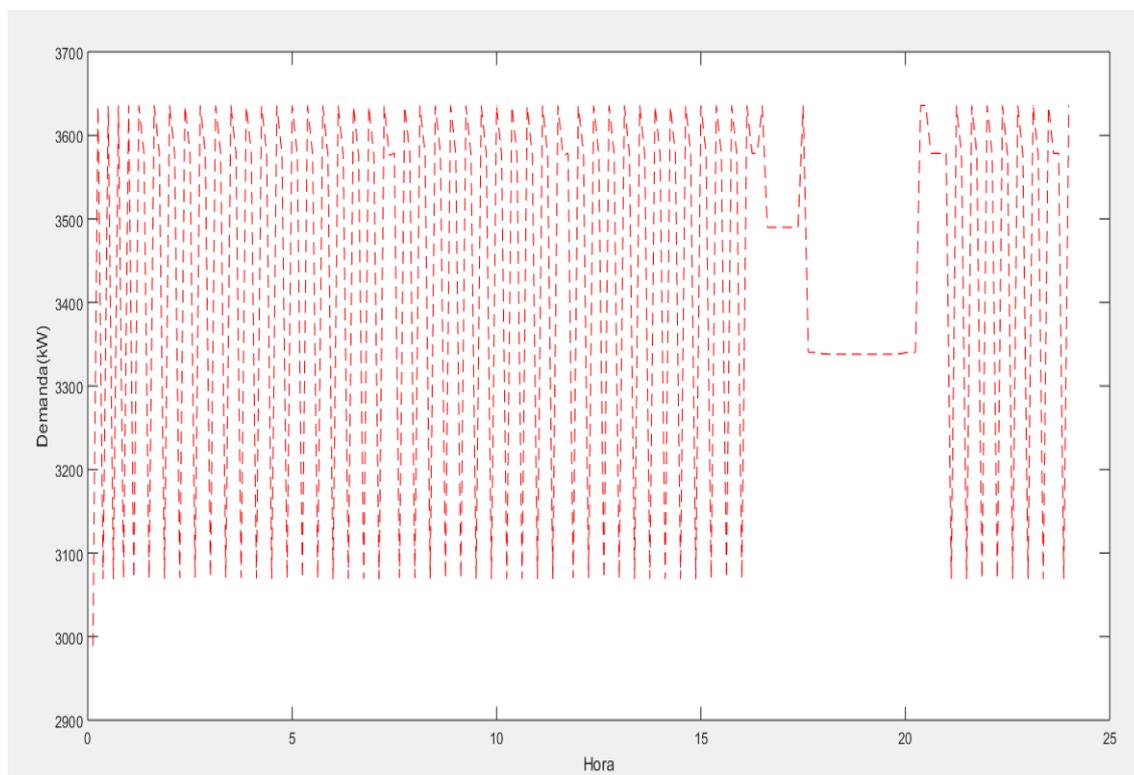
Figura 20: Variação do volume do reservatório

Fonte: Elaboração própria

Figura 21: Custo horário do sistema

Fonte:Elaboração própria

Figura 22: Variação de demanda



Fonte: Elaboração própria

Tabela 15: Comparação entre cenário antigo e cenário com controlado fuzzy

Valores Mensais	Cenário Atual	Cenário com Uso de Controlador Fuzzy
Demanda Ponta (kW):	4.520	3340
Demanda Fora Ponta (kW):	4.520	3640
Consumo Ponta (kWh):	406.800	300.600
Consumo Fora Ponta (kWh):	2.847.600	2.293.200
Consumo Total (kWh):	3.254.400	2.593.800
Valor da Conta de Energia Elétrica (R\$):	913.108,25	722.208,00

Fonte: Elaboração própria

Tabela 16: Resultados comparativos

Redução de Consumo (%):	20,3
Lucro Mensal (R\$):	190.900,25

Fonte: Elaboração própria

Como mostrado na tabela 15, graças à lógica utilizada no controlador *fuzzy*, visando utilizar melhor o reservatório e reduzir o consumo e a demanda na ponta, além do uso dos inversores de frequência para alterar a rotação do motor, foi possível reduzir consideravelmente as demandas e também o consumo.

Como mostrado na tabela 16, houve uma redução de aproximadamente 20% no consumo de energia elétrica, e uma diminuição de quase 200 mil reais na conta de energia elétrica mensal.

7 CONCLUSÃO

O objetivo do trabalho era obter uma redução no consumo de energia elétrica, tornando o sistema que utiliza CMB's mais eficiente, utilizando inversor de frequência aliado com um controlador *fuzzy*, a fim de utilizar a melhor rotação para o motor em cada estado do sistema.

A tabela 16, mostra que houve uma redução no consumo de aproximadamente 20%, isso equivale a cerca de 660 mil kWh em 1 mês, trazendo um retorno financeiro mensal de aproximadamente R\$ 200 mil reais, sem considerar juros ou correção monetária em um período de 12 meses, isso acarretaria de uma diminuição no custo anual com energia elétrica da companhia de saneamento de aproximadamente R\$ 2,4 milhões de reais.

Vale ressaltar que o rendimento da bomba foi considerado constante mesmo variando a vazão, e também não foi avaliado o investimento na aquisição dos inversores de frequência e dos controladores *fuzzy*, este trabalho visou somente a realização de uma simulação observando o possível retorno financeiro obtido na melhoria da eficiência energética

Portanto, os resultados obtidos foram positivos, mostrando assim que investir na eficiência energética acarreta em ótimos retornos. tanto operacionais, pois com o uso do controlador *fuzzy* o sistema fica autônomo, quanto financeiros, provado pela boa redução no consumo de energia elétrica e na demanda de potência.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **ANEEL 414**: Condições Gerais no Fornecimento de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: 2010.

CAPELLI, A. **Energia Elétrica**: Qualidade e Eficiência Energética Para Aplicações Industriais. São Paulo: Érica, 2013.

CAVALCANTI, J. H. **Lógica Fuzzy Aplicada às Engenharias**. João Pessoa: 2012.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: AMGH, 2013.

CRUZ, P. P. **Inteligencia Artificial Con Aplicaciones a la Ingeniería**. México DF: Alfaomega, 2010.

ELETROBRÁS/PROCEL. **Conservação de Energia**. Itajubá: 2006.

ELETROBRÁS/PROCEL. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Rio de Janeiro: 2005.

FARIA, R. D. **Estudos de História**. São Paulo: FTD, 2010.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

JÚNIOR, C. L. **Inteligência Artificial em Controle e Automação**. São Paulo: Blucher, 2000.

KSB. **Manual Técnico KSB RDL**. São Paulo: 2012.

NETTO, A. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Blucher, 2015.

TIPLER, P. A. **Física para Cientistas e Engenheiros**. Porto Alegre: LTC, 2013.

APÊNDICE A

Será apresentado a seguir, o *script* feito no MATLAB utilizado para realizar as simulações desse trabalho.

Figura 23: Dados de entrada do *script*

```
%Entrada de dados:

%função abaixo vai ler o arquivo de inferência fuzzy criado pelo toolbox
%assim será possível trabalhar com esse sistema de inferência fuzzy no
%script
regrasfuzzy=readfis('control_fuzzy_oficial.fis');

hora=[0.125:0.125:24];%vetor que informa a hora;
qsai=-4.75;% A vazão de saída do reservatório;
v=530;% O volume inicial do reservatório;
qent=4.75;% A vazão de entrada inicial do reservatório;
hora0=0; % A hora inicial da simulação;

%Tarifas de Consumo e Demanda, ponta e fora ponta, para a modalidade Azul
%A3 de acordo com a tabela fornecida pela Celpe.
CEP=0.36574;
CEFP=0.24295;
DFP=5.2;
DP=10.84;
acumulado=0;%Variável auxiliar
```

Fonte: Elaboração própria

Figura 24: *Script* feito no MATLAB

```
for i=1:192

    vel=qent+qsai;
    velocidade(i)=vel;
    volume(i)=v;

    %A função abaixo calcula as saídas do controlador Fuzzy baseado nos
    %dados de entrada fornecidos.
    saida=evalfis([v hora(i) vel],regrasfuzzy);

    x(i)=saida;
    q(i)=x(i)*5.21*0.01;

    if hora(i)>=17.5&&hora(i)<=20.5
        Ce(i)=0.001*(9800*5.21*72.4/(0.87*0.94))*CEP*(hora(i)-hora0)*0.000001*x(i)^3;
        Pe(i)=0.001*(9800*5.21*72.4/(0.87*0.94))*0.000001*x(i)^3;

    else
        Ce(i)=0.001*(9800*5.21*72.4/(0.87*0.94))*CEFP*(hora(i)-hora0)*0.000001*x(i)^3;
        Pe(i)=0.001*(9800*5.21*72.4/(0.87*0.94))*0.000001*x(i)^3;

    end

    acumulado=acumulado+Ce(i);
    v=v+(qent+qsai)*(hora(i)-hora0)*3600;%Atualizará o volume do reservatório.
    qent=q(i);
    hora0=hora(i);

end
```

Fonte: Elaboração própria