

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CLEITON BIRCK

**ESTUDO DO CONTROLE DE VAZÃO DE BOMBAS DE ÁGUA PARA
REDUÇÃO DE CUSTO DE PROCESSO INDUSTRIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2015

CLEITON BIRCK

**ESTUDO DO CONTROLE DE VAZÃO DE BOMBAS DE ÁGUA PARA
REDUÇÃO DE CUSTOS DE PROCESSO INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Everton Luiz de Aguiar

Coorientador: Prof. Daniel Prado de Campos

PATO BRANCO

2015

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de Conclusão de Curso intitulado **ESTUDO DO CONTROLE DE VAZÃO DE BOMBAS DE ÁGUA PARA REDUÇÃO DE CUSTO DE PROCESSO INDUSTRIAL**, do aluno **CLEITON BIRCK** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora N° **87** de 2015.

Fizeram parte da banca os professores:

Prof. Everton Luiz de Aguiar

Prof. Daniel Prado de Campos

Prof. Me. César Augusto Portolann

A Ata de Defesa assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIA

A minha querida mãe, Soely, meu pai, Ademar, e meus irmãos
Cristiane e Renan.

AGRADECIMENTOS

A minha namorada, pela paciência e compreensão.

Ao professor orientador M.e Everton L. de Aguiar, por aceitar a orientação e contribuir com a minha formação.

Ao professor Dr. Cesar R. C. Torrico, por dispor do seu tempo para contribuir com este trabalho.

RESUMO

BIRCK, Cleiton. Estudo do Controle de Vazão de Bombas de Água para Redução de Custos de Processo Industrial. 2015. 95 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2015.

Este trabalho apresenta um estudo do controle de vazão de um sistema de bombeamento de água existente em um frigorífico de aves localizado na região sudoeste do Paraná. O projeto utiliza um inversor de frequência no acionamento da máquina de fluxo, explorando a estratégia de controle de vazão por variação de velocidade do motor de indução trifásico (MIT), assim almejar redução nos custos de processo industrial. Este sistema de bombeamento é composto por duas máquinas de fluxo operando em paralelo responsável por abastecer os processos de higienização e escaldagem do frigorífico. O trabalho utiliza da ferramenta para simulação *Simulink* com objetivo de conhecer as características operacionais do sistema de bombeamento e as necessidades de arranjo do projeto elétrico o qual é discutido e formalizado neste trabalho. Para intermédio de análise dos ganhos obtidos pela técnica de variação de velocidade são realizadas comparações experimentais entre as condições de operação inicial com velocidade fixa e posteriormente a instalação do inversor de frequência com velocidade variável. Diante disso, pretende-se empregar métodos matemáticos como VPL (Valor Presente Líquido) e o método TIR (Taxa Interna de Retorno) com propósito de verificar a viabilidade de implantação do sistema de controle por variação de velocidade.

Palavras-chave: Inversor de frequência. Máquina de Fluxo. Controle de vazão.

ABSTRACT

BIRCK, Cleiton. Study Water Pump Flow Control for Industrial Process Cost Reduction. 2015. 95 f. Project Course Conclusion - Course of Electrical Engineering, Technological Federal University of Paraná. Pato Branco, 2015.

This work presents a flow control study of a water pumping system in a poultry slaughtering unit located on Paraná southwestern. The project uses a frequency inverter for a centrifugal pump drive, using the flow control strategy for varying the speed of an induction motor, looking for industrial process costs reduction. The pumping system is formed by two centrifugal pumps operating in parallel, being one responsible for supplying the water consumption of the refrigerator cleaning process and another for scalding the birds. The study uses the Simulink simulation tool to know the operational characteristics of the pumping system and configuration requirements of the electrical design, which is discussed and formalized in this work. In order to analyze obtained gain by speed variation technique, experimental comparisons are performed between initial operation conditions with constant speed and then with the frequency inverter system with variable speed. From this, it is intended to apply mathematical methods such as NPV (Net Present Value) method and the IRR (Internal Rate of Return) in order to evaluate the variable speed control system implementation feasibility.

Keywords: Variable frequency drivers. Centrifugal pump. Control flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Máquinas de fluxo do sistema de higienização atual	16
Figura 2: Esquema simplificado de um inversor de frequência	17
Figura 3: Comportamento de um controle escalar de velocidade	18
Figura 4: Controle de vazão by-pass.....	22
Figura 5: Comparação das principais estratégias de controle de vazão	23
Figura 6: Curva típica de perda de carga H em relação à vazão Q.....	24
Figura 7: Curva típica de um sistema de recalque	24
Figura 8: Curvas de operação de bombas com mudança de rotação	26
Figura 9: Ilustração de um trocador de calor convencional	27
Figura 10: Diagrama de blocos de um controle de vazão em malha aberta	29
Figura11: Diagrama de blocos de um controle de vazão em malha fechada.....	30
Figura12: Curva de desempenho do conjunto motobomba.....	31
Figura13: Curva normalizada das bombas do sistema	35
Figura14: Curva característica do sistema	38
Figura15: Modificação da curva Altura (H)–Vazão (Q) pela variação da rotação .	38
Figura16: Dinâmica de vazão do sistema de higienização.....	40
Figura17: Dinâmica de potência elétrica demandada pelo sistema	42
Figura18: Diagrama unifilar de força das máquinas de fluxo	45
Figura19: Inversor de frequência Micromaster 430	46
Figura 20: Controlador Lógico Programável (CLP)	47
Figura 21: Transmissor de pressão NP620	48
Figura 22: Diagrama unifilar dos equipamentos de instalação de projeto	52
Figura 23: Painel IHM do sistema de bombeamento.....	53
Figura 24: Diagrama de blocos do sistema de controle de pressão.....	55
Figura 25: Resposta de um processo a uma excitação em degrau unitário.....	56
Figura 26: Curva de resposta ao degrau unitário	56
Figura 27: Diagrama de blocos do circuito em malha aberta do sistema de bombeamento	59
Figura 28: Diagrama de blocos do circuito em malha fechada do sistema de bombeamento	60
Figura 29: Dinâmica da vazão do sistema em malha aberta.....	65

Figura 30: Dinâmica de pressão do sistema em malha aberta.....	66
Figura 31: Dinâmica de vazão do sistema em malha fechada	67
Figura 32: Dinâmica de pressão do sistema em malha fechada	68
Figura 33: Dinâmica da variação de velocidade da máquina de fluxo 1.....	69
Figura 34: Dinâmica da variação de torque da máquina de fluxo 1.....	70
Figura 35: Dinâmica de potência da máquina de fluxo 1.....	71
Figura 36: Relação entre VPL e TMA.....	76
Figura 37: Relação de potência elétrica	79
Figura 38: Relação de consumo de energia elétrica	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de placa do MIT que será acionado através do inversor de frequência.....	21
Tabela 2: Dados extraídos da curva de desempenho fornecida pelo fabricante.	32
Tabela 3: Coeficientes polinomiais da equação (2.1).....	34
Tabela 4: Equações nos sistemas de bombeamento.....	36
Tabela 5: Coeficientes de perdas de carga de acessórios.....	37
Tabela 6: Relação entre as médias de consumo e vazão.....	44
Tabela 7: Parametrização do inversor de frequência Micromaster-430.	54
Tabela 8: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols.....	57
Tabela 9: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols.....	57
Tabela 10: Parâmetros de configuração do bloco <i>Three-phase Asynchronous Machine</i> (Motor de indução trifásico)	60
Tabela 11: Parâmetros de configuração do bloco <i>Centrifugal pump (bomba centrífuga)</i>	61
Tabela 12: Parâmetros de configuração do bloco Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive.....	63
Tabela 13: Análise de viabilidade econômica de projeto.....	77
Tabela 14: Valores calculados da análise econômica.....	78

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CMM	Custo Mensal de Manutenção
CSI	Current Source Inverter (Inversores de Fonte de Corrente)
H	Altura Manométrica
H*	Altura Manométrica Adimensionalizada
IBC	Índice de Custo Benefício
MIT	Motor de Indução Trifásico
NBR	Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
PID	Controlador Proporcional Integral e Derivativo
PLC	<i>Programmable logic controller</i> (Controlador Lógico Programável)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
Q	Vazão
Q*	Vazão Adimensionalizada
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
RBC	Relação Benefício Custo
RM	Retorno Mensal
ROIA	Retorno Sobre o investimento
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
VEE	Valor mensal em reais da Economia média de Energia
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido
VPLA	Valor Presente Líquido Anualizado
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i> (Inversores de Fonte de Tensão)

LISTA SÍMBOLOS

η	Velocidade angular
Q	Vazão
\varnothing	Diâmetro do rotor
U_2	Velocidade periférica na saída do rotor
g	Aceleração da gravidade
r_2	Raio do rotor na saída
β_2	Ângulo da pá da bomba
b_2	Largura da pá da bomba
h_e	Altura estática de elevação
h_{vel}	Perda de carga dinâmica pela velocidade na tubulação
h_a	Altura estática de aspiração
h_r	Altura estática de recalque
h_{LD}	Perda de carga na tubulação de aspiração
h_{Lk}	Perda de carga dos acessórios
v	Velocidade periférica na saída do rotor
c	Comprimento de canalização retilínea
D	Diâmetro da tubulação
A	Área de secção da tubulação
f	Fator de atrito da tubulação função da rugosidade e número de Reynolds
ρ	Massa específica do material
R	Resistência elétrica do condutor
L	Tempo de retardo da curva de resposta ao degrau unitário
T	Constante de tempo da curva de resposta ao degrau unitário
K_p	Ganho proporcional
T_d	Constante de tempo derivativo
T_i	Constante de tempo integral

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS GERAIS	15
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 EMPRESA PARCEIRA.....	165
1.4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	166
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1 INVERSOR DE FREQUÊNCIA	17
2.2 MÁQUINA DE FLUXO.....	19
2.3 TROCADORES DE CALOR.....	27
2.4 SISTEMAS DE CONTROLE.....	28
3. MODELO DA PLANTA	31
4. ABORDAGEM PROPOSTA	40
4.1 PROCEDIMENTOS INICIAIS	40
4.2 PROJETO ELÉTRICO.....	44
4.2.1 Equipamentos de Instalação	46
4.2.2 Alimentação do QGBT	48
4.2.3 Ramal Alimentador	49
4.3 PAINEL DE CONTROLE	51
4.3.1 Parametrização do controlador.....	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 SIMULAÇÕES	58
5.1.1 Simulação do Sistema Hidráulico em Malha Aberta.....	64
5.1.2 Simulação do Sistema Hidráulico em Malha Fechada.....	66
5.2 ANÁLISES DE VIABILIDADE ECONÔMICA.....	71
5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	79
6. CONCLUSÕES	81
REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

A crescente expansão e a necessidade de redução de custos nos processos industriais implicam na racionalização do uso da energia elétrica.

Até a década de 60, a regulação de velocidade era aplicada basicamente em motores de corrente contínua (CC). Os motores CC eram utilizados em larga escala nas aplicações que necessitassem de velocidade variável. Mesmo nos dias atuais, a regulação de velocidade com motores CC continua sendo a melhor estratégia de acionamento para algumas aplicações, embora com custo elevado, já que são mais onerosas e exigem maior manutenção em relação às máquinas CA (corrente alternada) (FITZGERALD, KINGSLEY, & UMANS, 2003). Nas duas últimas décadas, porém, percebe-se um aumento significativo na utilização de acionamentos industriais com regulação de velocidade através de máquinas CA. A regulação de velocidade das máquinas CA tornou-se popular graças aos avanços da tecnologia na área de eletrônica de potência (OLIVEIRA, MORAIS, & PIRES, 2012).

Dentre as máquinas elétricas girantes aplicadas na indústria, a máquina de indução trifásica (MIT) é a mais utilizada. A máquina de indução trifásica representa a grande maioria da força motriz utilizada na indústria, já que, a maioria dos sistemas atuais de distribuição de energia elétrica é de corrente alternada (FRANCHI, 2011). Na indústria, os MIT são utilizados para as mais variáveis aplicações, tais como:

- Ferramentas de corte;
- Talhas;
- Ventiladores;
- Compressores;
- Bombas.

Em Gomes (2010) cita-se que, o acionamento de compressores e bombas com velocidade variável pode melhorar a eficiência no processo de conversão de energia. Segundo Bose (2002), a economia de energia elétrica pode alcançar 20% com o auxílio da eletrônica de potência. Ainda, a aplicação dessa tecnologia possibilita uma redução de até 30% no consumo geral de energia, quando utilizada

para acionamento de compressores de condicionamento de ar. O ganho é tanto que no Japão aproximadamente 70% das residências que possuem esses equipamentos de climatização, utilizam do acionamento com velocidade variável a fim de reduzir o consumo de energia elétrica (KARAVASILIS, 2008).

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como foco principal implementar uma estratégia de regulação de velocidade através do acionamento de máquina de fluxo utilizando inversor de frequência, assim readequar o sistema de bombeamento da empresa parceira utilizando de mecanismos que racionalizem a utilização dos recursos energéticos, principalmente energia elétrica e água. A importância deste trabalho é potencializada diante da situação preocupante em que se encontra o cenário energético nacional. Já que, o Comitê de Política Monetária (Copom) do BC (Banco Central), no mês de setembro de 2014 elevou a previsão de reajuste da energia em 2014 para 16,8% (COPOM, 2014). Um dos principais causadores deste aumento é devido à escassez de chuva nas regiões que possuem geração através de usinas hidrelétricas

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dessa forma, este trabalho tem por objetivos aperfeiçoar o desempenho dos equipamentos das indústrias e reduzir o custo no processo industrial.

Para consolidar os conceitos que serão abordados no projeto, será realizado simulações e obtido resultados experimentais do sistema de bombeamento de água, antes e após a implementação do controle de pressão através da técnica de regulação de velocidade da MIT, com o objetivo de identificar as características funcionais do processo de abastecimento de água do frigorífico.

Faz parte deste trabalho, realizar um estudo de viabilidade técnica e econômica, que busca aperfeiçoar o acionamento de um conjunto de duas máquinas de fluxo instaladas em uma unidade frigorífica de aves.

Após a análise de viabilidade técnica, o trabalho aborda a análise de viabilidade econômica, através do método do Valor Presente Líquido (VPL), que é um indicador que avalia a viabilidade econômica do projeto ao longo de sua vida útil, também o método da Taxa Interna de Retorno (TIR) e o Índice de Benefício Custo IBC que representa a relação entre o valor atual do retorno esperado e o valor dos custos esperados respectivamente. Assim realizar uma análise do projeto de investimento.

1.3 EMPRESA PARCEIRA

Este trabalho foi realizado em parceria firmada entre a UTFPR e uma grande empresa do setor alimentício, situada no sudoeste do Paraná. Embora o corpo de trabalho da empresa tenha contribuído na íntegra durante o desenvolvimento desse trabalho, porém optaram por guardar sigilo de sua identidade, assim no corpo do trabalho será referenciada como “Empresa Parceira”. A empresa parceira está entre as 10 maiores empresas nacionais em valor de mercado no setor de abate de aves. Apresenta elevada contribuição na exportação de alimentos no Brasil, e suas marcas já estão presentes em 110 países.

A unidade da Empresa Parceira onde os estudos foram desenvolvidos encontra-se na região sudoeste do Paraná. Nessa unidade atua um frigorífico de grande porte, com capacidade de abater e processar 700 mil aves/dia.

O frigorífico possui máquinas e equipamentos dos mais variáveis portes e modelos. Dispõe de uma estrutura bem elaborada e em constante aperfeiçoamento. A boa política de crescimento da empresa é evidenciada através da flexibilidade de trabalho que foi demonstrada através dessa parceria, bem como o suporte adequado para a elaboração do trabalho aqui desenvolvido.

1.4 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Em quaisquer setores da economia que uma empresa atue tornou-se fundamental utilizar dos avanços tecnológicos a fim de reduzir os custos do processo industrial. Dessa maneira, é possível tornar a empresa mais competitiva e mais rentável.

Diante desse quadro, a empresa parceira autorizou a realização de um trabalho de eficiência energética dentro de uma de suas unidades. Basicamente o trabalho foi iniciado com um levantamento das condições atuais da estrutura da unidade, identificando possíveis pontos de aplicação da tecnologia de conversor de frequência no acionamento de MIT. Com o auxílio do corpo técnico da empresa parceira, juntamente com um dos especialistas em qualidade de processos na unidade, foi decidido elaborar um projeto de acionamento de máquinas de fluxo responsáveis por bombear água para a parte interna do frigorífico. Tal sistema de abastecimento de água tem grande contribuição no processo, já que o sistema em questão tem capacidade de atender a uma demanda de aproximadamente 340m³/h de água.

O sistema de abastecimento é constituído por duas bombas centrífugas do fabricante IMBIL, modelo INI80200, com potência nominal do conjunto motobomba de 150CV, instaladas em paralelo, Conforme ilustra a Figura 1.



Figura 1: Máquinas de fluxo do sistema de higienização atual.
Fonte: Autoria própria.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aqui são abordados alguns dos equipamentos e topologias de implementação utilizada no projeto juntamente com suas respectivas contribuições teóricas, de forma a tratar do estado da arte sobre os assuntos abordados no desenvolvimento do trabalho.

2.1 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A regulação de velocidade dos MIT para alcançar melhor eficiência no acionamento depende da estratégia de controle de um conversor CA-CC-CA (FRANCHI, 2011). O conversor CA-CC-CA, é o elemento que encontra-se entre a rede elétrica de entrada, que possui tensão e frequência fixa, e o motor que aciona o equipamento. Basicamente a conversão consiste de três estágios: um retificador de entrada para converter a corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), um barramento CC para armazenar e filtrar o nível de tensão de corrente contínua, e um inversor na saída para converter a forma de onda contínua em alternada novamente. O diagrama básico de um inversor é mostrado na Figura 2. Na saída, porém, os níveis de tensão e frequência são ajustáveis (GRIPP, 2005).

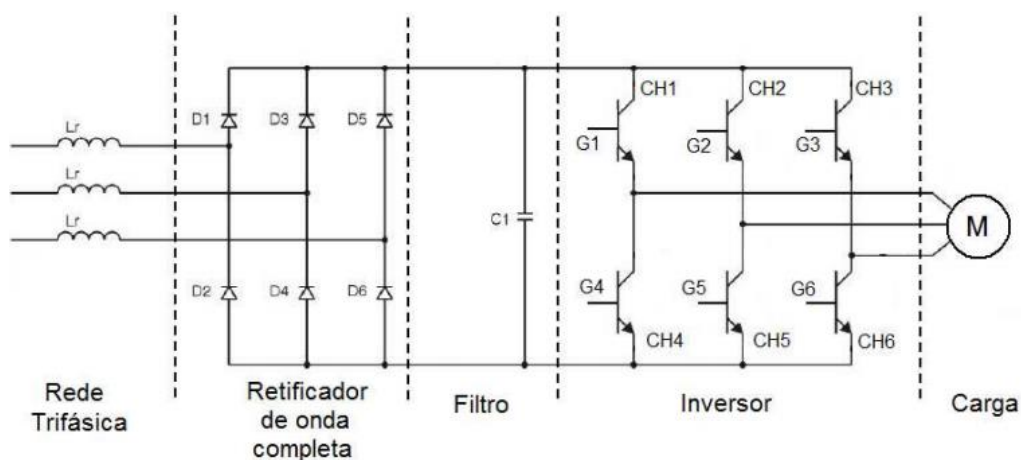


Figura 2: Esquema simplificado de um inversor de frequência.
Fonte: (SOCIESC, 2015)

Na grande maioria das aplicações com inversores de frequência, o controle de partida do motor e a variação de velocidade rotórica são suficientes. Os sistemas de controle de velocidade de menor complexidade que utilizam apenas o método de manter constante a relação tensão/frequência é o controle escalar. Porém, algumas limitações são observadas no controle escalar. Em situações que exija rápida resposta de aceleração, controle em malha fechada e variação de velocidade em função da variação da carga, o acionamento com controle escalar não é indicado (CAMARGO, 2011). Já que, o inversor com controle escalar tem uma relação de tensão/frequência pré-definidos para quaisquer variações de velocidade, dessa maneira caracteriza um desempenho praticamente linear, conforme a Figura 3.

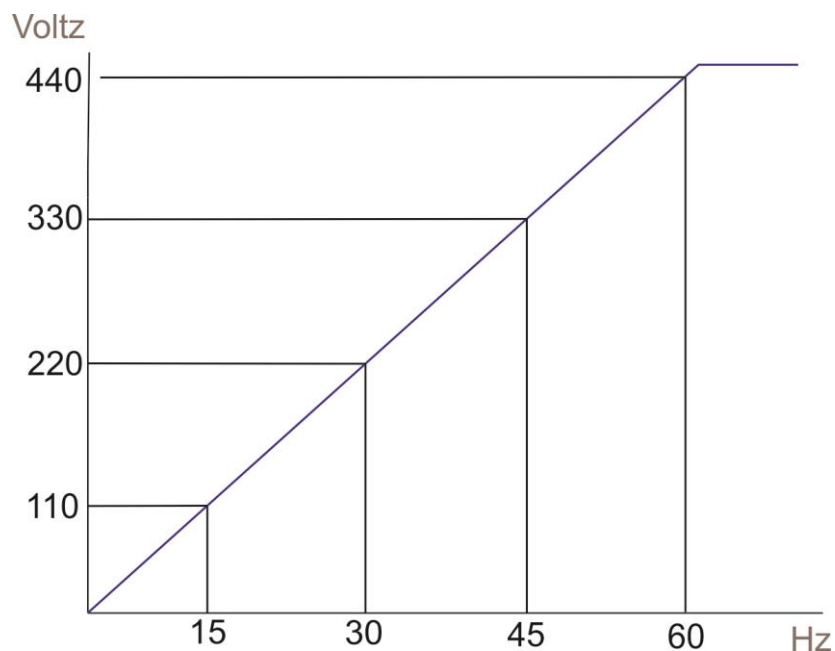


Figura 3: Comportamento de um controle escalar de velocidade
Fonte: Adaptado (AZEVEDO & MENDES, 2008)

A tecnologia do inversor com controle vetorial, por outro lado, é uma solução mais abrangente para o controle de velocidade e torque de MIT. Resposta dinâmica rápida, precisão de velocidade e possibilidade de torque elevado para mínimas rotações, são algumas das características desta estratégia (OLIVEIRA, MORAIS, & PIRES, 2012). Tais características do controle vetorial deixam essa tecnologia muito mais atraente em algumas aplicações. Dessa forma, o controle vetorial apresenta-se mais preciso para uma ampla variação de velocidade, e de cargas no eixo (QUEIROZ, 2008).

Os inversores disponíveis no mercado atendem as diversas necessidades de projeto. A conversão é feita basicamente de duas topologias, são elas, VSI (Voltage Source Inverter) e CSI (Current Source Inverter).

Na topologia VSI, a carga do motor é quem determina a corrente fornecida pelo inversor. Nessa estratégia, a amplitude e a frequência geralmente são controladas por modulação por largura de pulso (PWM) (GRIPP, 2005). A modulação PWM consiste de pulsos de amplitude fixa e largura proporcional à tensão do sinal no instante da amostragem. Os pulsos do PWM são filtrados através de um filtro passivo (geralmente indutivo). Porém, o filtro não é ideal, e dessa maneira surgem harmônicos (GRIPP, 2005). Desta forma, essa tecnologia não consegue filtrar todos os termos da série de Fourier da forma de onda pulsante (MUNIZ, 2002).

Já na topologia CSI, a carga do motor é quem determina a tensão fornecida pelo inversor. Para os acionamentos com CSI, de forma análoga ao acionamento VSI, também surgem na entrada do inversor de frequência distorções harmônicas. Porém, são comumente utilizados retificadores controlados a tiristores, cuja amplitude pode ser regulada de acordo com o ângulo de disparo dos “Gates” dos semicondutores (GRIPP, 2005). Estas estruturas ainda são amplamente utilizadas em aplicações industriais de média tensão e potências maiores que as alcançadas pelo VSI (30MW), já que, nessas aplicações são necessárias formas de onda de tensão de alta qualidade (SRINIVAS, PANDA, & MISHRA, 2009).

2.2 MÁQUINAS DE FLUXO

Em aplicações agroindustriais, tais como, complexos frigoríficos, abatedouros e fábricas de alimento, muitas máquinas elétricas de corrente alternada são utilizadas para acionar máquinas de fluxo (MÁQUINAS DE FLUXO, 2009). Ainda, as principais aplicações de máquinas de fluxo acionadas por motores elétricos CA são: bombas, ventiladores e turbocompressores. Uma bomba ou máquina de fluxo é um dispositivo que realiza trabalho sobre um fluido ou extrai trabalho de um fluido. Esse equipamento tem grande aceitação na indústria,

principalmente pela presença de características como: densidade de potência alta e poucas partes móveis (USP, 2014).

As máquinas de fluxo são encontradas em grandes diversidades e diferentes tecnologias. São classificadas em duas categorias principais: Bombas estáticas, também conhecidas como de deslocamento positivo, e bombas centrífugas ou turbobombas (denominadas dinâmicas) (USP, 2014).

A bomba estática ou de deslocamento positivo, na grande maioria, é direcionada a projetos onde há necessidade de grande pressão e baixo volume de fluxo. Essa bomba não admite recirculação interna, ou seja, o fluido é deslocado da entrada para a saída com um volume fixo para cada bomba distinta. O volume do fluido varia com o volume do órgão de impulsão da bomba (ex: êmbolo, diafragma, helicoidal) (RODRIGUES, 2013). Essa tecnologia é bem aplicada em fluidos mais espessos. As bombas de deslocamento positivo são divididas em dois grupos: bombas rotativas e bombas alternativas.

Nas bombas centrífugas é acoplado um disco (rotor impulsor) no eixo da máquina. Dessa maneira o fluxo do fluido (para o presente projeto, a água) é decorrente da ação de forças que surgem através da própria massa da água, em consequência da rotação do eixo (RODRIGUES, 2013). Basicamente o fluido entra pelo centro da bomba (olho do impelidor), e através da força centrífuga é expulso radialmente para fora do impelidor (USP, 2014). Esses equipamentos são bem empregados em aplicações industriais que envolvam trocadores de calor quando há necessidade de arrefecer ou aquecer um determinado fluido, ou até mesmo em complexos ciclos termodinâmicos na geração de energia elétrica.

As máquinas de fluxo abordadas neste trabalho são constituídas por dois motores de fabricação WEG, sendo que o motor que será acionado através de um inversor de frequência, segundo o fabricante possui características construtivas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de placa do MIT que será acionado através do inversor de frequência.
Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S/A.

MOTOR DE INDUÇÃO WEG			
Potência	55KW (75CV)	Tensão nominal	380/660V
Frequência	60Hz	Corrente nominal	100/57,7A
Número de pólos	2	Corrente partida	851/490A
Rotação nominal	3565 rpm	Ip/In	8.5
Escorregamento	0,97%	Corrente a vazio	26,6/15,3A
Categoria	N	Fator de Potência	0,89
Fator de Serviço	1.15	Conjugado partida	260%
Proteção	IP55	Conjugado máximo	360%
Resistência de dispersão do rotor	0.0752ohm	Reatância de dispersão do rotor	0,5460ohm
Resistência de dispersão do estator	0.0503ohm	Reatância de dispersão do estator	0,6366ohm

O sistema de higienização da empresa parceira é constituído por aproximadamente 150 (cento e cinquenta) pontos de consumo distribuídos ao longo do frigorífico. Além dos pontos de consumo utilizados no processo de higienização, o sistema de abastecimento apresentado contribui no fornecimento de água quente para outra parte distinta muito importante do processo, denominada escaldagem, ilustrada no ANEXO A. Conforme apontam as informações do corpo técnico da empresa parceira, o processo de escaldagem da unidade consome aproximadamente 100 m³/h de água regularmente durante o processo de industrialização das aves.

O sistema atual de bombeamento conta com um controle de vazão através de uma linha de recirculação (by-pass), como ilustra a Figura 4.

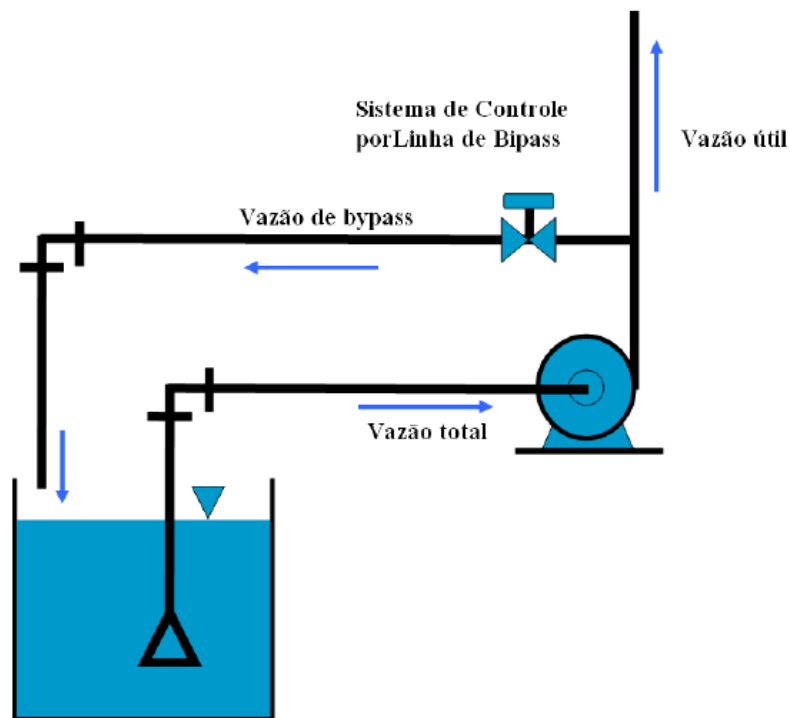


Figura 4: Controle de Vazão by-pass.
Fonte: (ALÉ, 2010)

Embora seja uma alternativa de baixo custo e relativamente simples, segundo Alé (2010), o sistema de controle por linha de by-pass é indicado para sistemas de bombeamento em que a altura manométrica (H) seja predominantemente composta pela altura estática entre o ponto de sucção e o ponto mais alto da rede hidráulica. Ou seja, essa configuração diverge do modelo da planta a ser controlada neste trabalho, aqui H recebe grande contribuição das longas redes de tubulações que distribuem a água por todo o frigorífico. Já que a maior perda de carga do sistema de bombeamento em estudo é decorrente dos acessórios como: curvas, válvulas, reduções e longas tubulações, e não da altura estática entre a bomba e o ponto mais alto de consumo.

A Figura 5 ilustra uma comparação do percentual de energia consumida pela bomba e seus respectivos percentuais de redução de vazão das três principais estratégias de controle de vazão. Assim para o sistema atual, o controle por recirculação de vazão é considerada pouco eficiente já que sua característica construtiva acaba por tornar o sistema desperdiçador de energia elétrica.

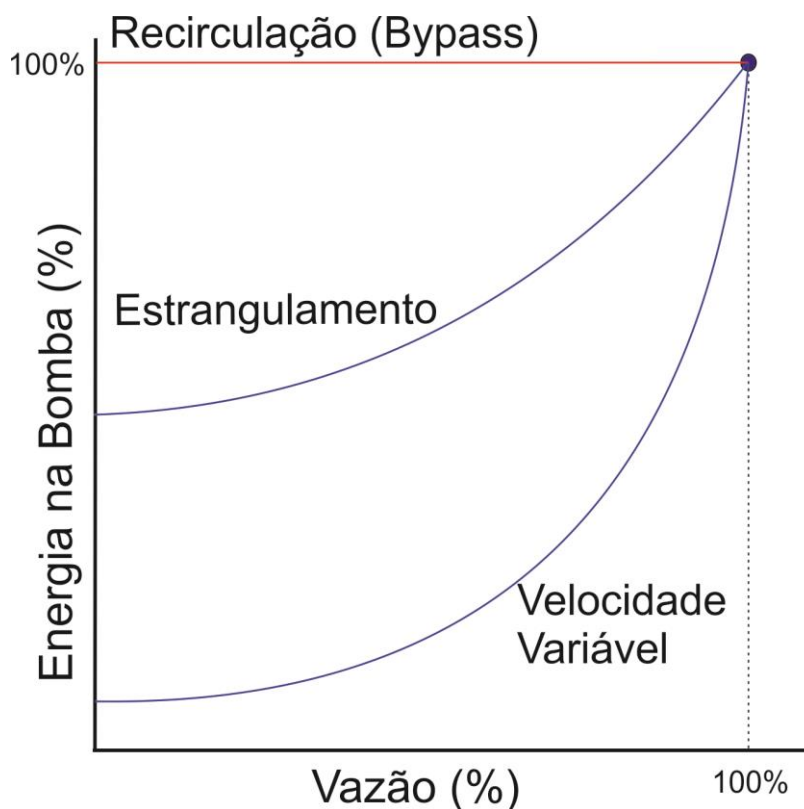


Figura 5: Comparação das principais estratégias de controle de vazão.
Fonte: Adaptado (ALÉ, 2010)

A Figura 5 enfatiza um fato de grande relevância para este estudo, a redução da vazão tem relação não linear com a redução de energia, nota-se que em termos de desperdício de energia, o pior método de controle de vazão é o controle por by-pass seguido do controle por estrangulamento de válvula. Dessa maneira a busca por estratégias de redução de consumo se fortalecem através das técnicas de velocidade variável.

A técnica de controle por recirculação de vazão (by-pass) atua diretamente sobre a curva de carga do sistema, pois o sistema de bombeamento é dependente da relação entre altura manométrica (H) e vazão (Q). A curva característica da bomba, com unidades de medidas em metros (m) e metros cúbicos por hora (m³/h) respectivamente, é mostrada na Figura 6 (DUTRA, 2005).

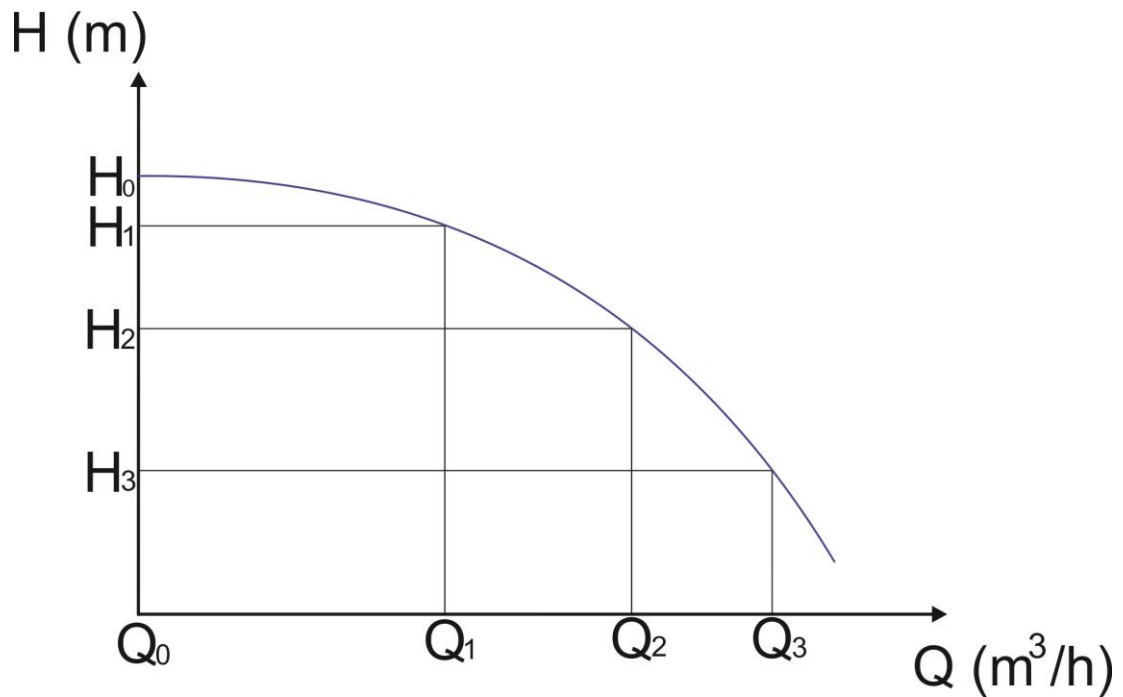


Figura 6: Curva típica da perda de carga H em relação à vazão Q .
 Fonte: Adaptado (DUTRA, 2005)

A Figura 6 relaciona as perdas de carga a ser vencida (H) e vazão (Q) resultante da energia fornecida ao fluido. Conforme ilustra a Figura 7, a altura manométrica total H é a carga total que a bomba precisa vencer para obter uma vazão Q (DUTRA, 2005).

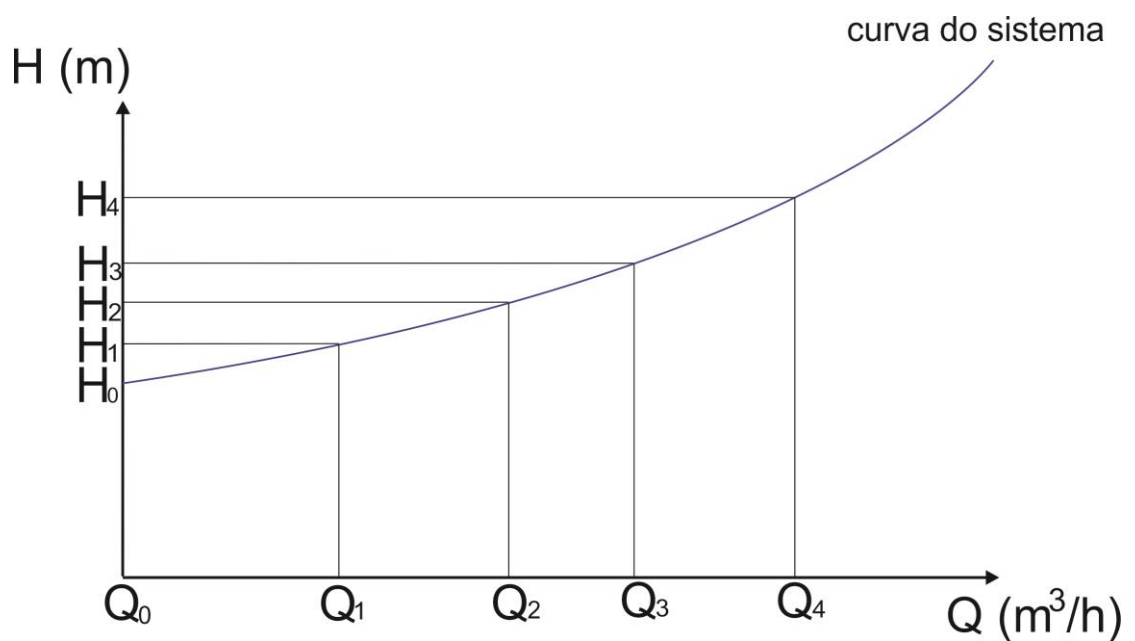


Figura 7: Curva típica de um sistema de recalque.
 Fonte: Adaptado (DUTRA, 2005)

O projeto desenvolvido neste trabalho atua no acionamento das bombas utilizando inversor de frequência para alterar a curva de carga do sistema. Desta maneira, segundo Yaskawa (2013) e Ksb (2005), a variação de rotação “n” é proporcional à variação de vazão “Q”, ou seja,

$$\Delta n = k_1 \Delta Q \quad (1.1)$$

sendo que, k_1 é uma constante real.

A altura manométrica tem variação proporcional ao quadrado da rotação, ou seja,

$$\Delta H = k_2 (\Delta n)^2 \quad (1.2)$$

Sendo k_2 também uma constante real.

Ainda, utilizando-se da técnica de controle de velocidade da máquina de fluxo, explora-se o fato que a potência consumida pela bomba varia com o cubo da variação de velocidade, ou seja,

$$\Delta P_{elétrica} = k_3 (\Delta n)^3 \quad (1.3)$$

A Figura 8 ilustra as variações de vazão, velocidade e potência.

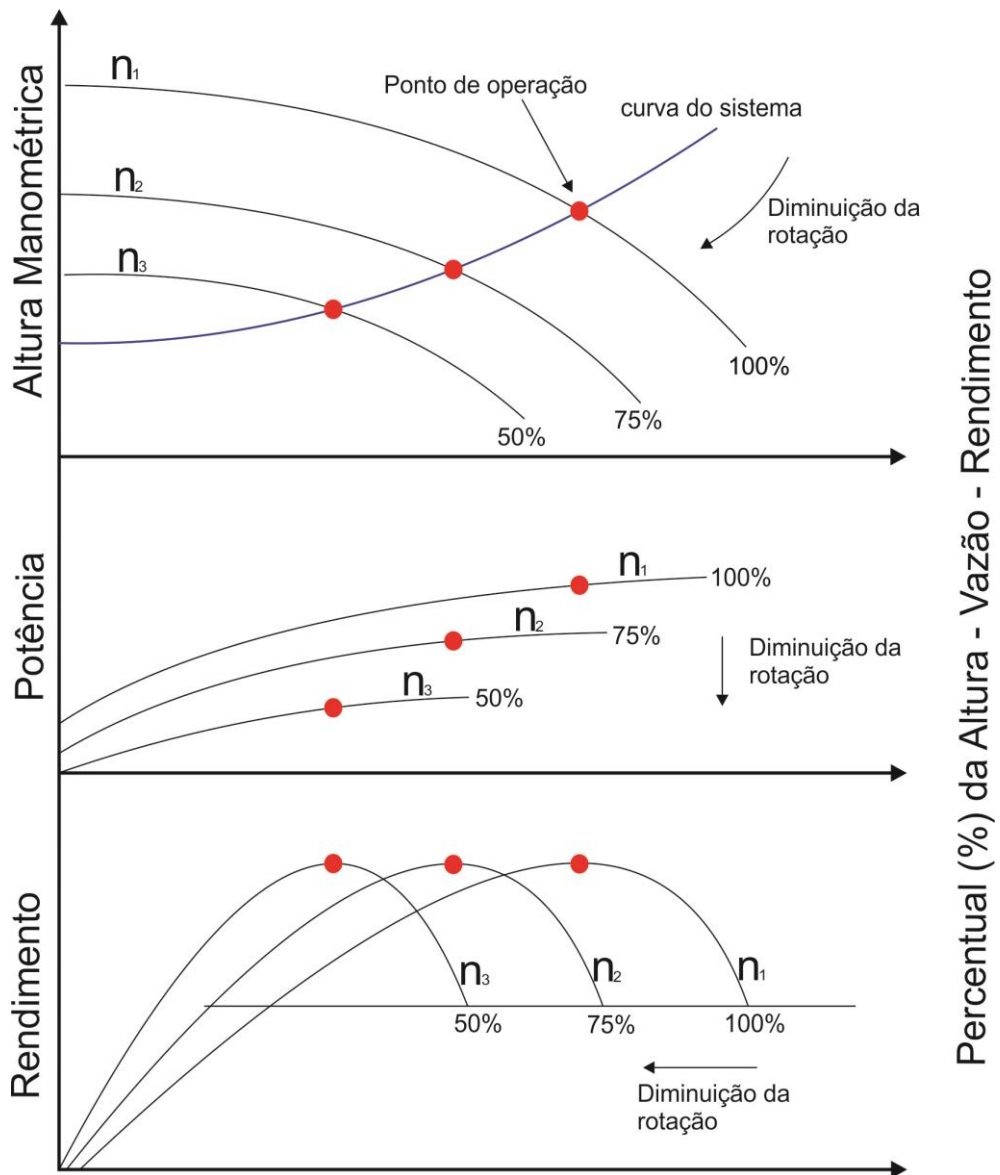


Figura 8: Curvas de operação de bombas com mudança de rotação.
 Fonte: (ALÉ, 2010)

Diferentemente do controle by-pass, no qual as máquinas de fluxo continuam consumindo elevadas porções de potência para atender baixas demandas de fluido, o controle com variação de velocidade apresenta grande facilidade em alterar o ponto de operação adequando a curva da bomba para a curva do sistema (ALÉ, 2010). Além disso, o controle com variação de velocidade permite diminuir o consumo de energia do sistema, eliminando as perdas decorrentes por controle de registros, bem como, melhorar o processo de partida da máquina de fluxo.

2.3 TROCADORES DE CALOR

O calor é definido como energia em trânsito de um corpo para outro, ou seja, a adição ou remoção de calor pode acarretar em uma mudança de estado físico do material, bem como mudança de temperatura (DOSSAT, 2004).

Os trocadores de calor geralmente são construídos de materiais metálicos, já que, é de interesse um alto coeficiente de condutividade térmica para que a transferência de calor seja eficiente de um meio para outro. A Figura 9 mostra o diagrama funcional de um trocador de calor convencional.

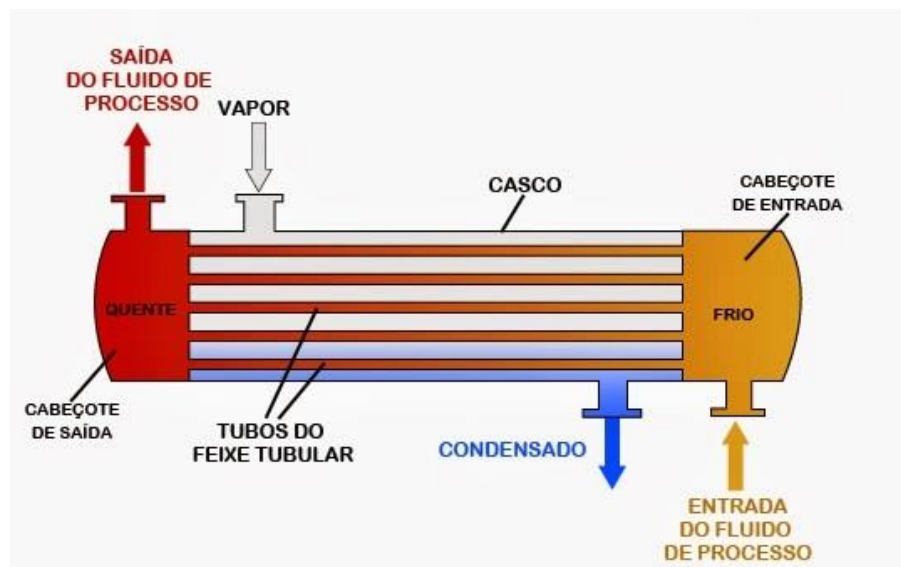


Figura 9: Ilustração de um trocador de calor convencional.
Fonte: (FERREIRA, 2014)

Os trocadores de calor industriais do tipo casco e tubos possuem grande aceitação, quando levado em consideração pontos importantes como: configuração relativamente simples, fácil manutenção e boa relação de transferência de energia. Basicamente sua estrutura é formada por um feixe de tubos envolvidos por um casco, sendo que, através do tubo existe um fluxo de fluido e na área determinada entre o tubo e o casco circula um segundo fluido. Nestes dispositivos não existe necessariamente contato direto entre as duas substâncias. Os componentes principais são: cabeçote de entrada, cabeçote de retorno, casco e feixe de tubos (BICCA, 2006).

De acordo com a norma de regulamentação TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association, 1998) são divididas em três classes de trocadores de calor casco e tubos, relacionando as necessidades de projeto com as configurações recomendadas para cada tipo de cabeçote e casco (RUBBO, 2014).

Embora seja de grande importância um sistema de aquecimento com desempenho elevado, o projeto desenvolvido não contempla alterações no sistema de aquecimento de água atual da unidade. No entanto, o sistema de aquecimento atual necessita de reparos para elevar a eficiência na conversão de transmissão de energia térmica, já que dispõe de uma configuração em que o vapor é adicionado diretamente na rede de abastecimento de água. Portanto a configuração atual, não dispõe de nenhum equipamento de troca de calor. Segundo Bicca (2006) através de trocadores de calor é possível tornar sistemas de aquecimento menos desperdiçador de energia térmica.

2.4 SISTEMA DE CONTROLE

Segundo Gomes (2010), um sistema de controle é um arranjo de componentes físicos, conectados ou associados de maneira a nortear, comandar ou regular a si mesmo ou demais sistemas interligados. O controlador é parametrizado baseando-se nas características do sistema em malha aberta.

Segundo Ogata (1997) sistemas de controle a malha aberta são aqueles nos quais o sinal de saída não afeta a ação de controle. Um sistema de controle em malha aberta não realiza a comparação entre o sinal de saída e um sinal de referência.

Nos sistemas de controle em malha aberta a cada sinal de referência na entrada corresponde uma condição de operação fixa. Em geral os sistemas de controle a malha aberta são utilizados em processos em que a dinâmica de entrada e saída são conhecidas. Assim, em malha aberta, as interferências através de distúrbios internos e externos não são controladas. Dessa maneira, tais sistemas não são sistemas de controle com retroação (Ogata, 1997).

Um sistema de controle de malha aberta geralmente utiliza de um atuador para controle de processo, já que, esta configuração não dispõe de circuitos de

realimentação. Segundo Albaneze (2012), considerando-se um sistema como exemplo que possua várias bombas em paralelo, seu controle de operação das bombas é realizado através de leituras de vazão no decorrer do dia e baseado em experiências dos técnicos e operadores. Dessa maneira, altera-se a quantidade de bombas em operação, conforme ilustra a Figura 10.

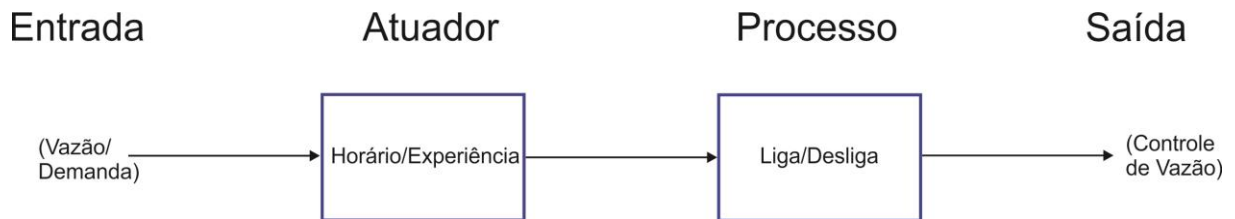


Figura 10: Diagrama de blocos de um controle de vazão em malha aberta.
Fonte: adaptado de (ALBANEZE, 2012)

A Figura 10 é um exemplo de um sistema de controle em malha aberta através de acionamento direto liga/desliga. Já os sistemas de controle em malha fechada são mais bem empregados em processos que buscam redução nos custos de processos industriais.

Segundo Ogata (1997), os sistemas de controle com retroação são comumente referidos como sistemas de controle a malha fechada. Num sistema de controle a malha fechada o sinal referente à diferença entre o sinal de entrada e o sinal de retroação é denominado sinal de erro. Este é o sinal causador da excitação do controlador, levando o controlador a reduzir este desvio a um valor igual ou próximo de zero. Desta forma, faz-se com que o sinal de saída alcance o sinal referência desejado.

Diante disso, a Figura 11 apresenta um exemplo de um sistema de controle em malha fechada, muito semelhante ao sistema aqui projetado. O controlador recebe um valor de referência de pressão. Dessa maneira, atua diretamente sobre a variação de velocidade de uma das duas máquinas, com objetivo de manter a pressão do sistema hidráulico próximo da referência. O Sinal de saída do sistema de controle geralmente é definido como variável controlada.

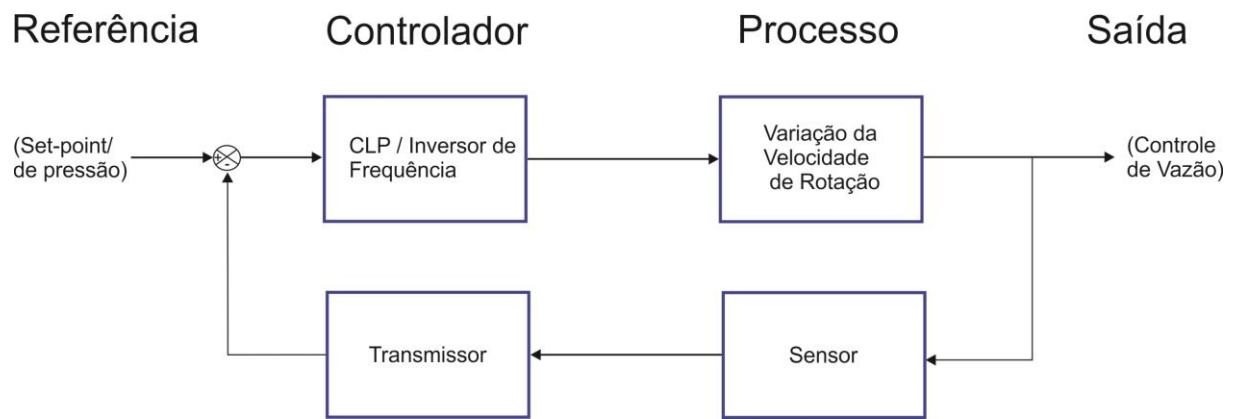


Figura 11: Diagrama de blocos de um controle de vazão em malha fechada.
 Fonte: adaptado de (ALBANEZE, 2012)

3. MODELO DA PLANTA

Diante do problema apresentado, nota-se que a configuração de controle de vazão do tipo by-pass é menos eficiente que o método de variação de rotação, conforme ilustra a Figura 5. Dessa maneira inicialmente é conveniente encontrar as características operacionais do sistema de higienização. As características operacionais são explícitas nas curvas características do conjunto de bombas e de consumo das máquinas de fluxo.

A Figura 12 mostra as curvas características das bombas utilizadas neste trabalho. As curvas relacionam a altura manométrica com a vazão, a pressão de sucção pela vazão e potência por vazão (IMBIL, 2015).

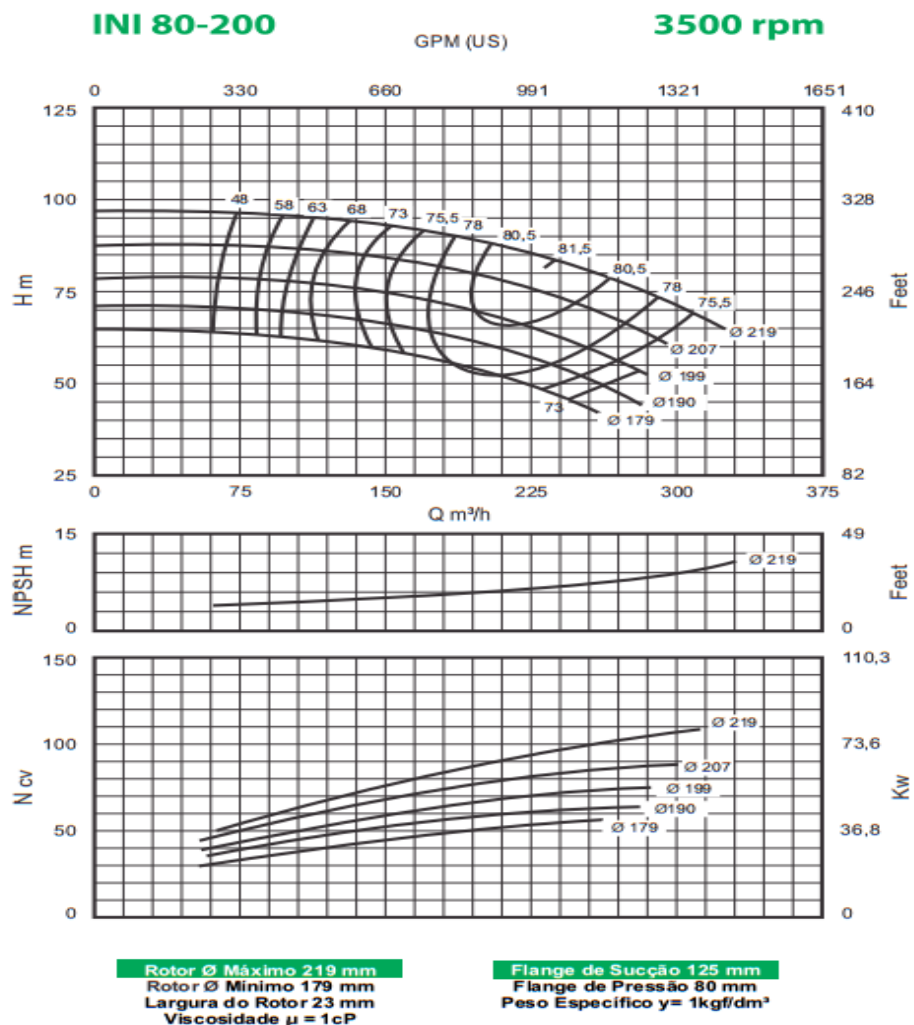


Figura 12: Curva de desempenho do conjunto motobomba.
Fonte (IMBIL, 2015)

Embora o trabalho desenvolvido explore as técnicas experimentais de sintonia dos controladores PID para alcançar o modelo da planta. Será apresentado um método de aproximação das curvas características do sistema de bombeamento estudado. Com objetivo de trabalhar as variáveis que interferem na dinâmica das curvas de operação da máquina de fluxo.

As motobombas instaladas na unidade frigorífica possuem ϕ (diâmetro do rotor) de 199mm, conforme Figura 12. Dessa maneira, serão equacionadas as curvas características da bomba e do sistema hidráulico. A Tabela 2 relaciona os dados referentes à curva de desempenho, apresentados na Figura 12, do conjunto motobomba.

Tabela 2: Dados extraídos da curva de desempenho fornecida pelo fabricante.
Fonte: Autoria própria.

H (m)	Q (m ³ /h)
78	0
78,5	15
78,5	30
78,8	45
78,5	60
78	75
77,5	90
77	105
76	120
75,5	135
75	150
74	165
72	180
70	195
67,7	210
65	225
62,5	240
59,7	255
56	270

52,7	285
48,7	300
44	315
39	330
32	345

As curvas características H x Q de bombas centrífugas, representam o comportamento real das bombas para a variação da altura manométrica em relação à vazão. Esta relação indica qual a carga total de elevação que a bomba atende para uma determinada vazão.

Os sistemas de bombeamento podem ser constituídos por apenas uma bomba centrífuga operando ou caso necessário mais de uma. Nos casos em que são necessárias mais de uma máquina de fluxo, geralmente os sistemas são formados por configurações de bombas em série ou em paralelo (HENN, 2001).

As máquinas de fluxo na configuração em série são indicadas para sistemas de bombeamento que possuam uma elevada altura estática, já que, na configuração em série as bombas trabalham com a mesma vazão e a altura manométrica é igual à soma da contribuição de cada uma das máquinas.

A configuração em paralelo das bombas centrífuga atendem aos projetos que buscam aumentar a vazão de um sistema de bombeamento. Porém, é interessante utilizar dessa técnica de sistema de bombeamento agrupando bombas de mesma potência, com isso, evita-se recirculação de correntes entre as bombas. Esta topologia proporciona somar as capacidades de fluxo de fluido de cada máquina. No entanto, devido à presença de perdas de carga a vazão resultante é menor que a soma algébrica da vazão de cada máquina de fluxo operando isoladamente (ALÉ, 2010).

Segundo Alé (2010), conhecendo a curva característica (H x Q) de uma das máquinas de fluxo do sistema é possível calcular a curva aproximada das duas máquinas operando em paralelo. Considerando máquinas de mesma potência, a equação:

$$H = a_0 + \frac{a_1}{2} Q + \frac{a_2}{4} Q^2. \quad (3.1)$$

caracteriza a configuração de duas bombas operando em paralelo, conforme o modelo da planta do sistema de higienização. As constantes a_0 , a_1 e a_2 , representam constantes de proporcionalidade.

Através dos dados obtidos na Tabela 2, utilizando o método matemático da regressão polinomial foi possível encontrar os coeficientes a_0 , a_1 e a_2 , constantes do polinômio da equação (3.1). Os resultados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Coeficientes polinomiais da equação (3.1).
Fonte: Autoria própria.

Coeficientes polinomiais		
$a_0 = 78,45$	$a_1 = 4,11$	$a_{02} = -10,79$

Substituindo os coeficientes obtidos da Tabela 3, na equação (3.1) obtém-se:

$$H = 78,45 + 2,06Q - 2,70Q^2. \quad (3.2)$$

Está é a equação característica aproximada do sistema de bombeamento. Dessa maneira, a aproximação da curva da bomba do sistema é apresentada na Figura 13.

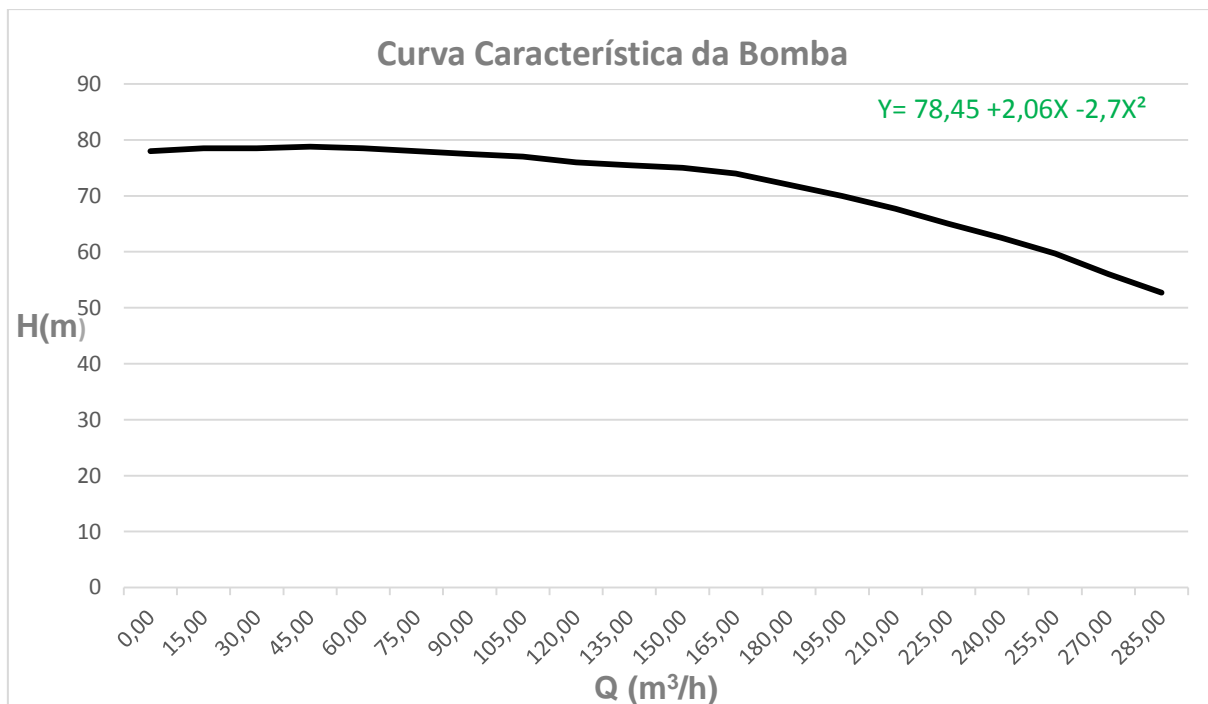


Figura 13: Curva normalizada das bombas do sistema.
Fonte: Autoria própria.

Diante disso, segundo Alé (2010) e Ksb (2005) a altura manométrica em sistemas de bombeamento pode ser alcançada trabalhando as variáveis como: (h_{LD} , h_{Lk} , h_{vel}), que corresponde à perda de carga na tubulação através do comprimento equivalente, perda de carga através dos acessórios da tubulação e a perda de carga dinâmica através da velocidade do fluido na tubulação respectivamente. Já, h_e é um valor constante, referente à altura estática entre a bomba e o ponto mais alto de consumo.

A equação:

$$H_{man} = h_e + h_{Lk} + h_{LD} + h_{vel}, \quad (3.3)$$

relaciona as grandezas que contribuem para o equacionamento da altura manométrica.

A altura estática de elevação, como apresentada, é constante. Calculada através da soma algébrica entre altura de aspiração e altura de recalque. Ou seja,

$h_e = h_a + h_r$. A Tabela 4 relaciona algumas das principais equações dos sistemas de bombeamento.

Tabela 4: Equações nos sistemas de bombeamento.
Fonte: (ALÉ, 2010).

Perda de Carga nos Acessórios – através do comprimento equivalente	Perda de carga dinâmica pela velocidade na tubulação	Perda de Carga nos Acessórios – através do coeficiente de perda de carga
$h_{LD} = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$	$h_{vel} = \frac{v^2}{2g}$	$h_{Lk} = \sum k \frac{v^2}{2g}$

Conforme a Tabela 4, a perda de carga total nos acessórios é determinada através da soma de dois fatores. São eles: perdas de carga nos acessórios (h_{Lk}) e devido ao comprimento equivalente da tubulação (h_{LD}).

A equação das perdas através do comprimento equivalente considera o fator de atrito (f), velocidade do fluido (v), força gravitacional (g) e o comprimento (L) juntamente com o diâmetro (D) das tubulações. Já a equação de perdas de carga nos acessórios é encontrada através do produto entre a perda de carga por velocidade (h_{vel}) e a soma ($\sum k$) das perdas de cargas de cada acessório. Entre os acessórios considerados estão: válvulas, joelhos, registros entre outros.

Dessa maneira, considerando que o sistema de higienização possui diâmetro da tubulação igual na aspiração e no recalque, substituindo às relações da Tabela 4 na equação (3.3), tem-se,

$$H_{man} = h_e + f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum k \frac{v^2}{2g} + \frac{v^2}{2g}. \quad (3.4)$$

Como já abordado no capítulo 2, a perda de carga do sistema é função do quadrado da velocidade. A vazão é diretamente proporcional à rotação. Dessa maneira, a perda de carga do sistema também depende do quadrado da vazão. Assim, segundo (ALÉ, 2010) através de modelações matemáticas, a altura manométrica pode ser relacionada pela expressão,

$$H_{man} = h_e + \left(f \frac{L}{D} + \sum k + 1\right) + \frac{1}{2gA^2} Q^2. \quad (3.5)$$

O constante de perdas de carga nos acessórios $\sum k$ é calculada através da relação obtida dos acessórios instalados no sistema de bombeamento do frigorífico. Tal relação que está apresentada na Tabela 5. Os acessórios da Tabela 5, correspondem a uma aproximação dos valores reais, já que, o frigorífico não dispõe de registos atualizados das alterações construtivas da tubulação.

Tabela 5: Coeficientes de perdas de carga de acessórios.
Fonte: Autoria própria.

Quantidade	Tipo de Acessório	k
80	Entrada normal em canalização	0,50
30	Curva 90	0,40
63	Tê saída bilateral	1,80
90	Registro de gaveta	0,20

Considerando as grandezas médias aproximadas de tubulação $L = 3200m$, altura estática $h_e = 8m$ diâmetro médio $D = 0,08m$, área de secção $A = 0,00503m^2$, fator de atrito $f = 0,12$, coeficientes de perdas de carga de acessórios $\sum k \cong 183$ e aceleração da gravidade $g = 9,8 m/s^2$, substituindo na equação (3.5), tem-se:

$$H_{man} = 8 + 16128Q^2. \quad (3.6)$$

Com o auxílio da planilha do *Excel*, plotando os pontos de Q da Tabela 2 na equação característica aproximada (3.6), é apresentado através da Figura 14 a curva característica do sistema.

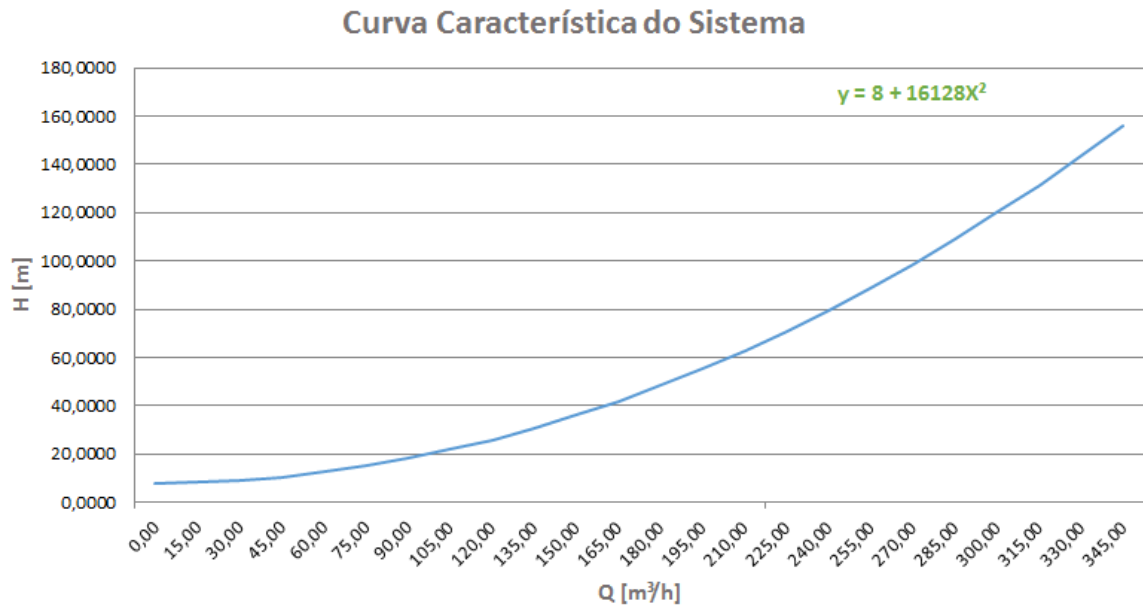


Figura 15: Curva característica do sistema.
Fonte: Autoria própria.

Diante disso, pode-se analisar através da Figura 16 o resultado gráfico da variação de rotação e os pontos apropriados de operação para um rendimento elevado. Segundo Henn (2001), existe uma relação de curvas parabólicas que quando um ponto de operação se modifica para uma nova altura manométrica e vazão, o rendimento permanece aproximadamente constante.

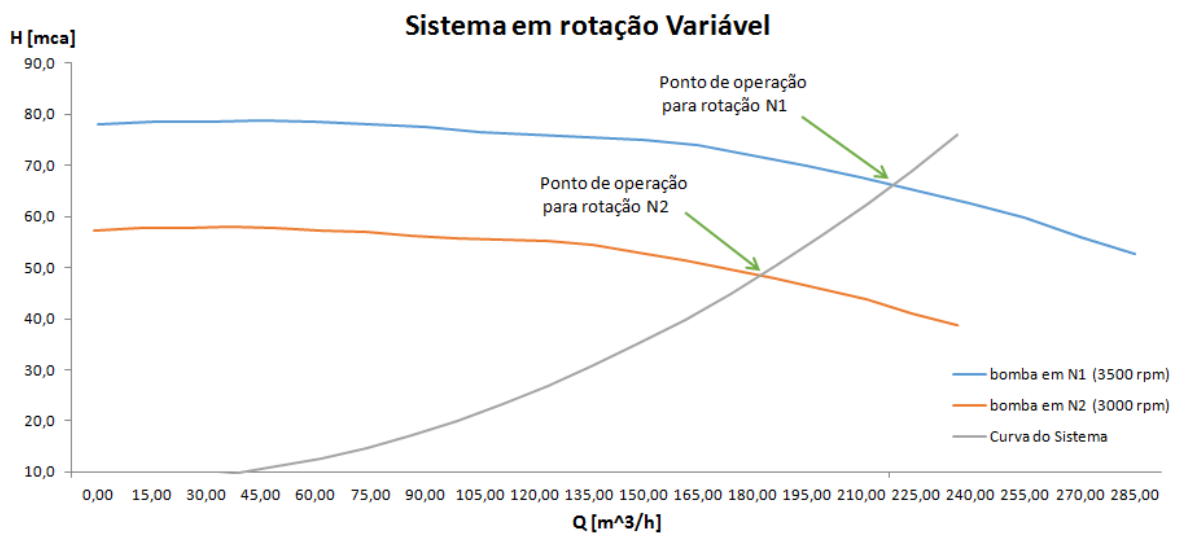


Figura 16: Modificação da curva Altura (H) - Vazão (Q) pela variação da rotação.
Fonte: Autoria própria.

Embora as curvas das bombas operando em paralelo se comportem de maneira distinta da curva de apenas uma das bombas em situações de variação de velocidade, por questões de viabilidade econômica optou-se por projetar um acionamento com velocidade variável para apenas uma das máquinas de fluxo.

O projeto de implementação do inversor de frequência utiliza um Controlador Lógico Programável (CLP), do inglês PLC (*Programmable logic controller*), com a função de controlar o sistema. A máquina de fluxo 1 será acionada por um inversor de frequência e a máquina de fluxo 2 através de uma chave de partida soft-starter. Na presença de uma elevada variação pressão-vazão é ligada ou desligada a segunda bomba, o controle implementado atua na variação de velocidade de apenas uma das duas máquinas.

4. ABORDAGEM PROPOSTA

Nesta secção serão aplicadas as metodologias apresentadas até agora, bem como o projeto elétrico do sistema incluindo o inversor de frequência implementado, ramal de alimentação e o diagrama unifilar da configuração do sistema de bombeamento instalado.

4.1 PROCEDIMENTOS INICIAIS

A fim de analisar o comportamento dinâmico de fluxo de fluido do sistema atual, foi utilizado um analisador de vazão portátil ultrassônico do fabricante Micronics modelo Portaflow 330 como ilustra o ANEXO B. Com esse equipamento foi possível identificar o comportamento do sistema de abastecimento de água durante um dia normal de produção, conforme ilustra a Figura 16.

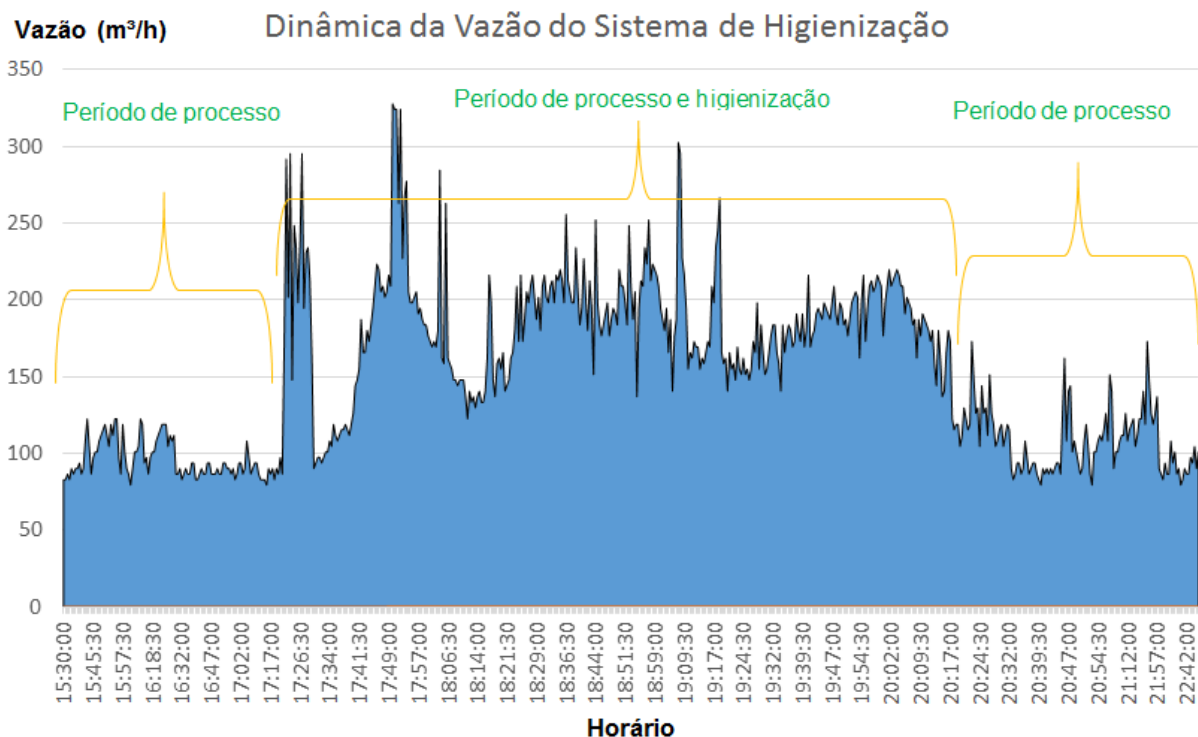


Figura 16: Dinâmica de vazão do sistema de higienização.
Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 16, pode-se observar que o fluxo de água do sistema atua abaixo da sua capacidade nominal, aproximadamente 340m³/h, na grande maioria de um dia normal de processo. No entanto, nos horários em que não conflitam as duas atividades, higienização e processo de industrialização das aves, o sistema opera com uma vazão abaixo da metade de sua capacidade nominal, este cenário indica que para os períodos do dia que não haja conflitos de atividades, apenas uma das bombas dispõe de condições suficientes de capacidade de fluxo de água para atender a demanda solicitada.

A atividade relacionada ao processo de industrialização das aves é realizada em três turnos de trabalho, 24 horas por dia, seis dias por semana. Já a higienização é exercida três vezes ao dia, especificamente entre os horários 01:20hrs – 03:20hrs, 09:15hrs – 12:15hrs e entre as 17:20hrs - 20:20hrs.

Como enfatiza a Figura 16, durante a faixa de horário das 17:20hrs as 20:20hrs, aproximadamente, as duas atividades do processo são atendidas simultaneamente. No entanto, fora deste intervalo de atuação existe uma média de consumo de 100 m³/h. Tal montante é facilmente atendido por apenas uma das duas máquinas de fluxo existentes neste sistema.

Desta forma, o sistema de controle é realizado através do acionamento de uma das duas motobombas por variação de velocidade. Utiliza-se a pressão do sistema como variável determinante para a variação de velocidade da máquina de fluxo. Em situações de queda de pressão abaixo da referência de pressão da rede hidráulica, o sistema de controle deve acelerar a máquina para compensar a queda de pressão. Por outro lado, para situações de elevação da pressão, acima da pressão referencia do controlador, a máquina deve desacelerar para buscar a referência. Tal sistema de controle será abordado com maiores detalhes na seção 4.3.

A partir dos dados apresentados na Figura 16 é possível identificar as necessidades do processo, quanto à dinâmica de consumo de água. Em paralelo a isso, utilizou-se um analisador de qualidade de energia, mostrado no ANEXO C, para relacionar a dinâmica de fluxo de água com a dinâmica de potência do sistema. Dessa maneira é possível calcular o consumo de energia atual para futura comparação com o sistema controlado.

A Figura 17 apresenta a dinâmica de potência do sistema de higienização coletado através do analisador de qualidade de energia. Diante disso, é possível relacionar as demandas de potência com as demandas de consumo de água, apresentados na Figura 16.

Serão discutidas nesta seção as grandezas de potência e vazão, buscando identificar as principais necessidades de projeto do sistema de controle.

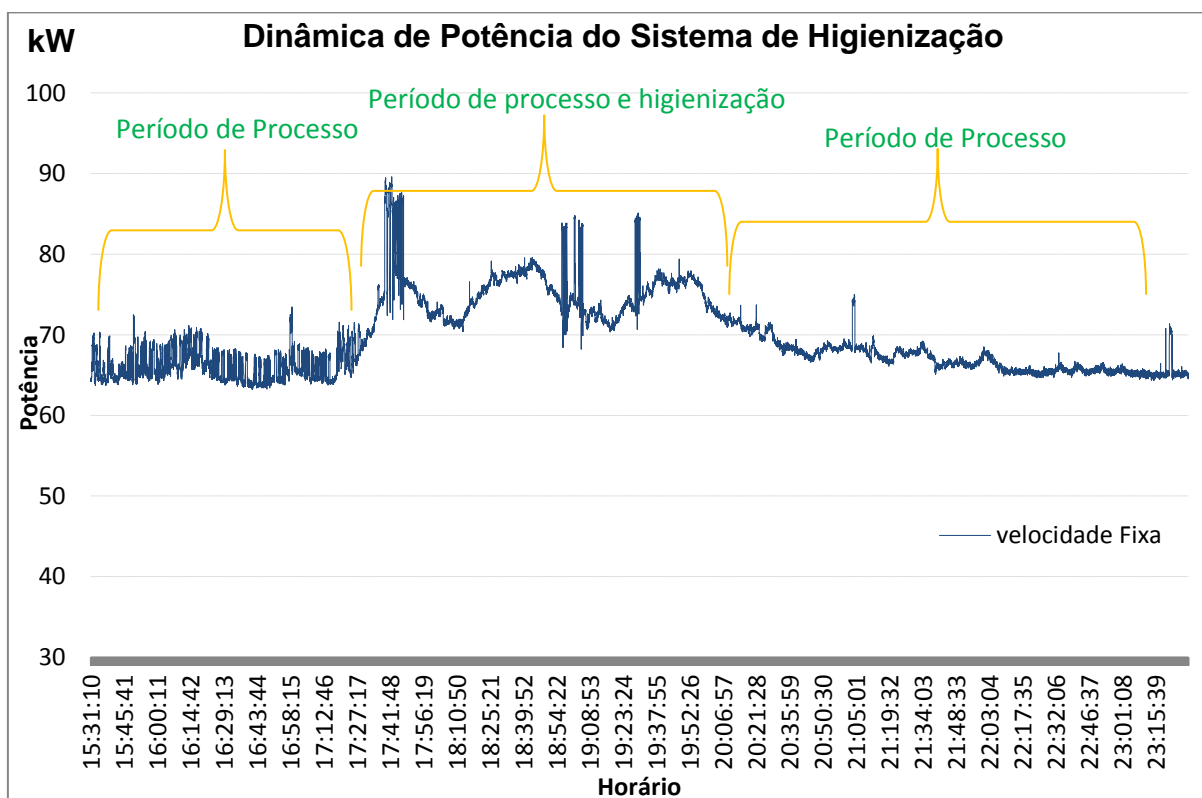


Figura 17: Dinâmica de potência elétrica demandada pelo sistema.
Fonte: Autoria Própria.

Em condições normais de operação o sistema está demandando uma potência entre 60 kW e 70 kW. Consideram-se a potência nominal e vazão nominal do conjunto das duas máquinas de fluxo como, 110KW e 330 m³/h, respectivamente. A demanda de potência corresponde a aproximadamente 64% da potência nominal dos equipamentos.

Por outro lado, essa quantidade de energia drenada do alimentador do frigorífico, conforme ilustra a Figura 17, na maior parte do tempo é utilizada para bombear pouco mais de 110m³/h. Este quantitativo de vazão corresponde aproximadamente 35% da capacidade total de fluxo de água do sistema, conforme a Figura 16.

Nessas condições o escorregamento do rotor do MIT é muito reduzido, com isso, tem-se um movimento relativo entre o rotor e os campos magnéticos do estator também muito pequenos. Quando o escorregamento é reduzido às tensões induzidas nas barras e a corrente resultante é reduzida. Quando a máquina trabalha com baixo escorregamento, diz-se que está com carga leve. Quando isso acontece, conforme o circuito equivalente do MIT, apresentado no ANEXO L, grande parte da potência ativa drenada da rede serve para suprir as perdas por atrito e ventilação, as perdas no núcleo e as perdas no cobre. Somente uma componente de carga muito baixa pode ser utilizada para mover a máquina (FITZGERALD, KINGSLEY, & UMANS, 2003).

Além disso, nessas condições, a máquina opera com fator de potência reduzido devido à alta impedância do ramo de carga do rotor, em comparação com as características de magnetização (CHAPMAN, 2013).

Conforme ilustra a Figura 17, o sistema drena uma potência de 70kW à 80kW para atender ao período de pico de demanda de potência, indicado das 17:20hrs as 20:20hrs aproximadamente. A potência medida neste período corresponde a aproximadamente 73% da potência nominal do sistema instalado. Como já é de se esperar, conforme a Figura 16, o mesmo intervalo de tempo de conflito corresponde ao período que se exige maior vazão de água do sistema. Para atender o período de maior consumo, o fluxo de água aproximado é de 63% do consumo nominal do sistema instalado.

A Tabela 6 apresenta uma aproximação dos percentuais de consumo de energia elétrica do sistema a ser controlado, baseado nos dados coletados em campo. Os dados foram obtidos experimentalmente através do analisador de vazão Portaflow 330 (mostrado no ANEXO B) e o analisador de qualidade de energia (mostrado no ANEXO C). Os indicadores levam em consideração potência e vazão nominais do sistema de abastecimento de água como sendo 110kW e 330m³/h respectivamente.

Tabela 6: Relação entre as médias de consumo e vazão.
Fonte: Autoria Própria

Consumo Médio de Energia Elétrica para Atender uma Vazão Média				
Período do dia considerado	Potência	Porcentagem do nominal	Vazão	Porcentagem do nominal
Durante o Processo	65 kW	59,09%	100 m³/h	30,30%
Durante o Processo/higienização	75 kW	68,18%	190 m³/h	57,57%
Variação das grandezas	10kW	9,09%	90m³/h	27,27%

Conforme a Tabela 6, para uma variação média de aproximadamente 27,27% de fluxo de água existe uma variação de apenas 9,09% de consumo de energia elétrica, considerando a capacidade nominal das motobombas.

Diante do cenário apresentado, o projeto desenvolvido busca melhorar esta relação de potência por vazão. Utilizando das técnicas de acionamento da máquina de fluxo por variação de velocidade. Segundo Alé (2010) e Chapman (2013) essa relação de potência por vazão pode ser melhorada, já que, os conversores de frequência garantem um conjugado elevado sem consumir correntes excessivas de linha.

O sistema de controle utilizado neste trabalho é composto por um inversor de frequência. O inversor é utilizado para controlar a velocidade de uma das motobombas. Com isso, busca-se diminuir a potência elétrica consumida, bem como reduzir as perdas de potência dissipadas devido a atritos nos mancais, reduções de tubulação, curvas, válvulas, entre outros.

4.2 PROJETO ELÉTRICO

O projeto elétrico foi desenvolvido considerando as normas brasileiras de regulamentação vigentes, em especial a NBR: 5410 (2004). A norma NBR: 5410 (2004) trata exclusivamente de instalações elétricas de baixa tensão.

A Figura 18 apresenta o diagrama unifilar do circuito de força das máquinas de fluxo, bem como, a configuração de instalação dos equipamentos de acionamento.

Utilizando-se como referências Franchi (2011) e Filho (2002), o dimensionamento da proteção dos equipamentos e cabos elétricos implementados foi calculado. Utilizou-se um disjuntor trifásico termomagnético de 125A para a máquina de fluxo 1 que dispõe do inversor de frequência, como dispositivo de partida, e uma chave fusível trifásica de 400A para a máquina de fluxo 2 que dispõe de uma Soft- Starter como chave de partida.

A soft-starter apresentada no diagrama unifilar foi reaproveitada do sistema antigo. Embora as soft-starters não possuam disponibilidade de variação de velocidade da máquina, as soft-starters são relativamente mais baratas que os inversores de frequência e oferecem obtenção de partidas e paradas suaves, possibilitando redução nas correntes de partida (DRANKA, 2012).

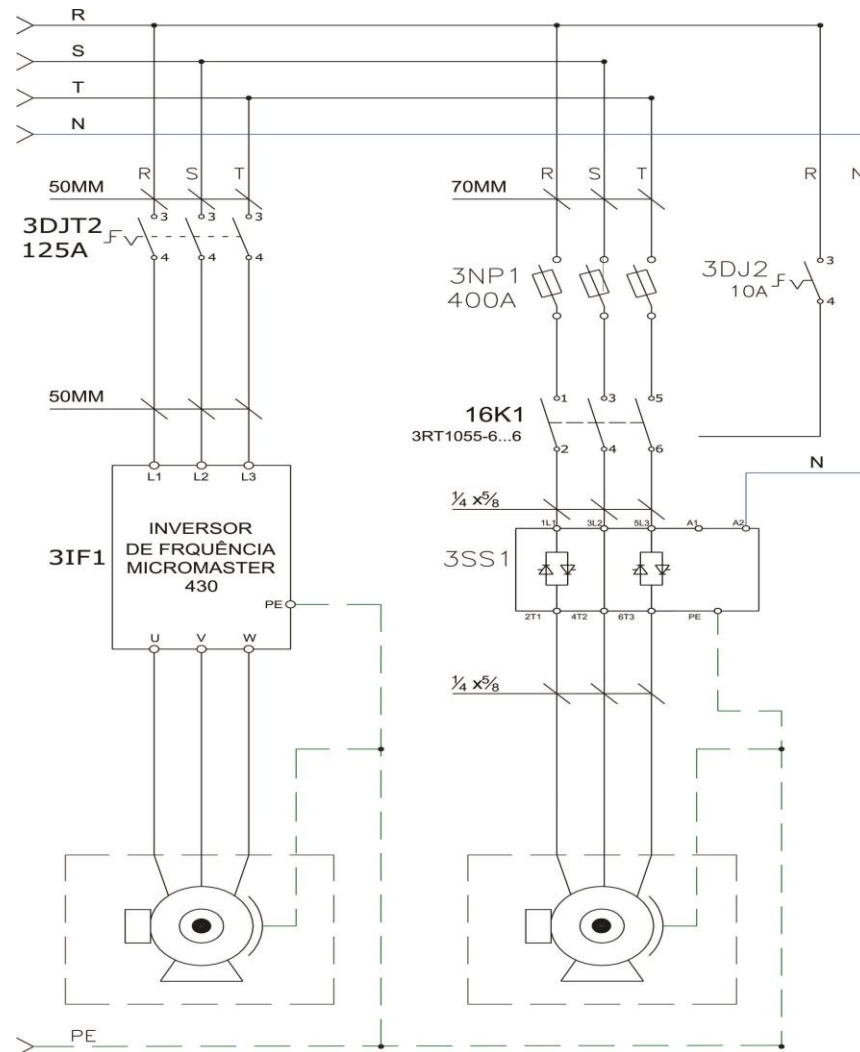


Figura 18: Diagrama unifilar de força das máquinas de fluxo.
Fonte: Autoria própria.

4.2.1 Equipamentos de Instalação

O controle de vazão em sistemas de bombeamento, como já apresentado, proporciona um elevado ganho na economia de energia. Desta maneira, o projeto utiliza um inversor de frequência que dispõe de controle vetorial para atuar no acionamento de uma das duas máquinas de fluxo da planta atual. O inversor de frequência foi dimensionado para atender uma demanda de potência de 55kW, de fabricação Siemens. O modelo Micromaster 430, conforme ilustra a Figura 19, dispõe de uma boa interface de comunicação e um grande acervo de materiais para auxílio técnico, disponíveis na unidade da empresa parceira.



Figura 19: Inversor de frequência Micromaster 430.
Fonte: (SIEMENS, 2015)

Ainda, o modelo Micromaster 430 é versátil, já que o equipamento não necessita de racks com números predefinidos de slots para ser montado.

O projeto inclui uma estação de I/O distribuído também de fabricação Siemens, modelo SIMATIC ET200S, conforme ilustra a Figura 20. Através da versão CPU314, esse equipamento traz embutida um processador modelo S7-300 1GHz

que possibilitam curtos tempos de ciclo de clock, até 1 μ s. Possui interface de comunicação MPI/Profibus.

O conjunto de módulos é encaixado e aparafusado sobre um trilho DIN padrão. Os módulos são interligados uns aos outros através de um bus modular que fica embutido no trilho (SIEMENS, 2015). Conforme o fabricante, a programação e parametrização são realizados através do software STEP7 disponível em três versões: STEP7 Lite, STEP7 Basis e STEP7. Aqui foi utilizada a versão STEP7 Lite.



Figura 20: Controlador Lógico Programável (CLP)
Fonte: (SIEMENS, 2015)

Já o transdutor de pressão utilizado no projeto para realimentar o controlador é do fabricante NOVUS, modelo NP620, cuja fotografia é mostrada na Figura 21. Este transdutor de pressão conta com saída de sinal analógico de 4-20 mA.

Os equipamentos referentes ao sistema de aquecimento de água que as máquinas de fluxo bombeiam para o processo não serão abordados neste trabalho, já que serão utilizados os mesmos equipamentos que a unidade já dispõe.



Figura 21: Transmissor de pressão NP620.
Fonte: (NOVUS, 2015).

O projeto elétrico foi desenvolvido através do software *Autocad* versão 2010. O estudo do projeto da parte existente e das novas estruturas a serem implementadas, estão apresentados neste capítulo.

4.2.2 Alimentação do QGBT

O quadro de força é composto por uma caixa modular confeccionada com chapas de aço carbono, tampas laterais e traseiras desmontáveis. Os acionamentos devem ser acomodados no painel elétrico de maneira a buscar maior facilidade na manutenção dos equipamentos. O QGBT projetado dispõe de um ramal alimentador com um comprimento de aproximadamente 100 metros até o disjuntor de entrada. A entrada de energia no quadro é feita através de um disjuntor já existente no frigorífico, sendo um disjuntor tripolar termomagnético de corrente nominal 400A, modelo 3VT3763-2AA36-0AA0, equipado com disparador de corrente eletrônico. A corrente de sobrecarga do painel é ajustável de 250-400A, através de um disparador de sobrecarga eletrônico modelo 3VT9340-6AB00, com corrente máxima de interrupção de curto-circuito de 36kA/380V, do fabricante Siemens.

4.2.3 Ramal Alimentador

O ramal projetado é composto por cinco condutores, sendo (3F + N + T). Os MIT possuem FP=0,89, porém segundo Henn (2001) o fator de potência do conjunto motobomba geralmente é menor que o fator de potência do MIT isolado. Considerando $\cos(\theta)=0,85$ e que a operação atue com as fases equilibradas, através da equação 4.1 se determina a corrente de carga aproximada (FILHO, 2002),

$$I_c = \frac{P_{carga}}{\sqrt{3} * V_{linha} * \cos(\theta)}, \quad (4.1)$$

$$I_c = \frac{110KW}{\sqrt{3} * 380V * 0.85} = 196,62A. \quad (4.2)$$

V_{linha} = tensão de linha

P_{carga} = Potência ativa da carga

Segundo Filho (2002) o máximo valor de queda de tensão de um circuito elétrico alimentado por um ramal de baixa tensão é de 4%. Considerando-se um ramal alimentador com um comprimento $c=100$ m, a instalação está considerando a infraestrutura de linha elétrica através de eletrocalha, com condutores isolados “B1”.

Os condutores devem ser dimensionados com uma seção de no mínimo 50mm^2 para atender a corrente nominal do circuito, conforme indicado no ANEXO G . A equação

$$R = \frac{\rho * c}{S}, \quad (4.3)$$

representa a resistência do cabo condutor, considerando a resistência específica do cobre $\rho=0,0172$, comprimento $c=100\text{m}$, e a bitola do cabo como $S=50\text{mm}^2$,

$$R = \frac{0,0172 * 100\text{m}}{50\text{mm}^2} = 0,0344\Omega. \quad (4.4)$$

A queda de tensão é calculada através:

$$\Delta E = 2 * R * I * \cos(\theta) \approx 11,5 \text{ V}, \quad (4.5)$$

considerando $\cos(\theta)=0,85$ e a tensão de linha $E=380\text{V}$,

$$\Delta E = 100 * \frac{\Delta E}{E} \approx 3,03\%. \quad (4.6)$$

Diante disso, os condutores de secção 50mm^2 já atenderiam as necessidades de projeto. No entanto, como já considerado no projeto elétrico, a empresa parceira pretende expandir o sistema de bombeamento em um curto período de tempo. Sendo assim, foi considerado um disjuntor de proteção de 400A, disponível no frigorífico, já atendendo a uma futura ampliação para o dobro da capacidade de carga atual. Dessa maneira, considerando essa demanda de potência, conforme o ANEXO G, os condutores de fase são dimensionados em 185mm^2 , assim calculando a resistência do cabo condutor:

$$R = \frac{0,0172 * 100\text{m}}{185\text{mm}^2} = 0,0093\Omega, \quad (4.7)$$

calcula-se a queda de tensão para essas condições:

$$\Delta E = 2 * R * I * \cos(\theta) \approx 6.32 \text{ V}, \quad (4.8)$$

$$\Delta E = 100 * \frac{\Delta E}{E} \approx 1.66\%. \quad (4.9)$$

Como a queda de tensão é inferior a 4%, o ramal alimentador atende a NBR5410/1997. Através dessa mesma norma, os condutores de neutro e de aterramento, foram dimensionados com secção de 95mm^2 .

4.3 PAINEL DE CONTROLE

A Figura 22 apresenta o “*as buil*” (diagrama unifilar) de aspecto construtivo do projeto, destacando o novo acionamento através de um painel elétrico de comando e força dimensionados para atender as cargas existentes”. Atendendo à solicitação da empresa parceira, o painel elétrico contempla três controladores de temperatura do fabricante NOVUS modelo N2000, sendo que, dois são usados para auxiliar no controle de temperatura do sistema de bombeamento e o terceiro controlador é reservado para futura ampliação do sistema.

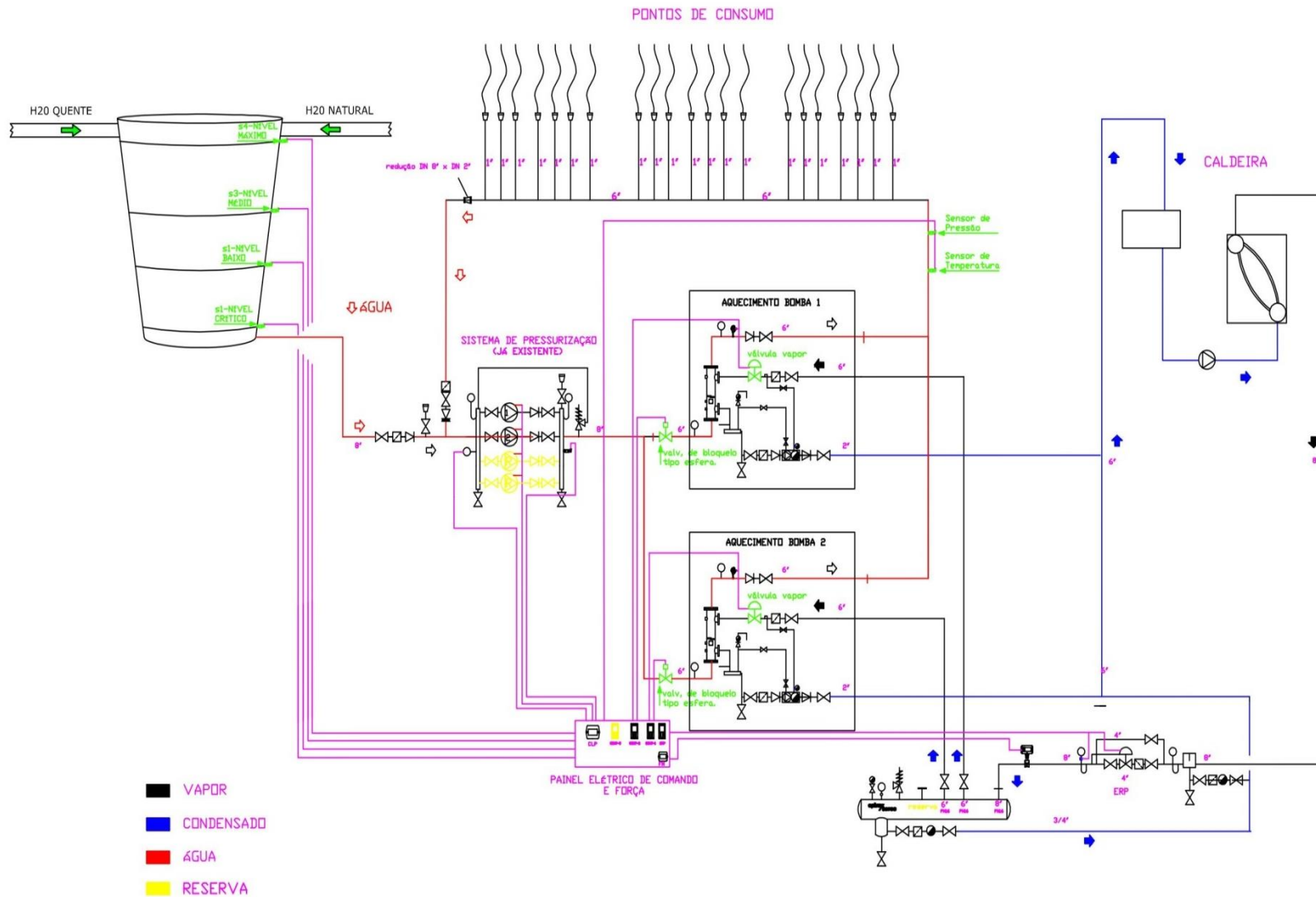


Figura 22: Diagrama unifilar dos equipamentos de instalação de projeto.
 Fonte: Adaptado sistema de aquecimento de água do frigorífico.

O controle é constituído por um PLC que dispõe de uma memória programável na qual são armazenadas as instruções e funções específicas, por meio de módulos de entradas e saídas. O PLC encontra-se no interior do QGBT conectado juntamente com o sistema de I/O multifuncional ET 200S de fabricação Siemens.

O sistema de controle conta com um inversor de frequência dedicado ao funcionamento da máquina de fluxo 1, e uma Soft-starter para a máquina de fluxo 2, ambas com o respectivo diagrama de força apresentado na Figura 18. O PLC é responsável por comandar a ação de controle que mantém a pressão da rede hidráulica próxima da referência.

A realimentação é realizada através de um sinal de 4-20mA proveniente do sensor de pressão apresentado na Figura 21, e dentro desta faixa de corrente, o PLC entende que a pressão de linha está na faixa de 0-10 bar. Assim, de acordo com a referência de pressão ajustada no painel de comando IHM do sistema de bombeamento apresentado na Figura 23, o inversor de frequência atua na variação de velocidade da máquina de fluxo 1, mais precisamente na faixa de frequência 30-62Hz.

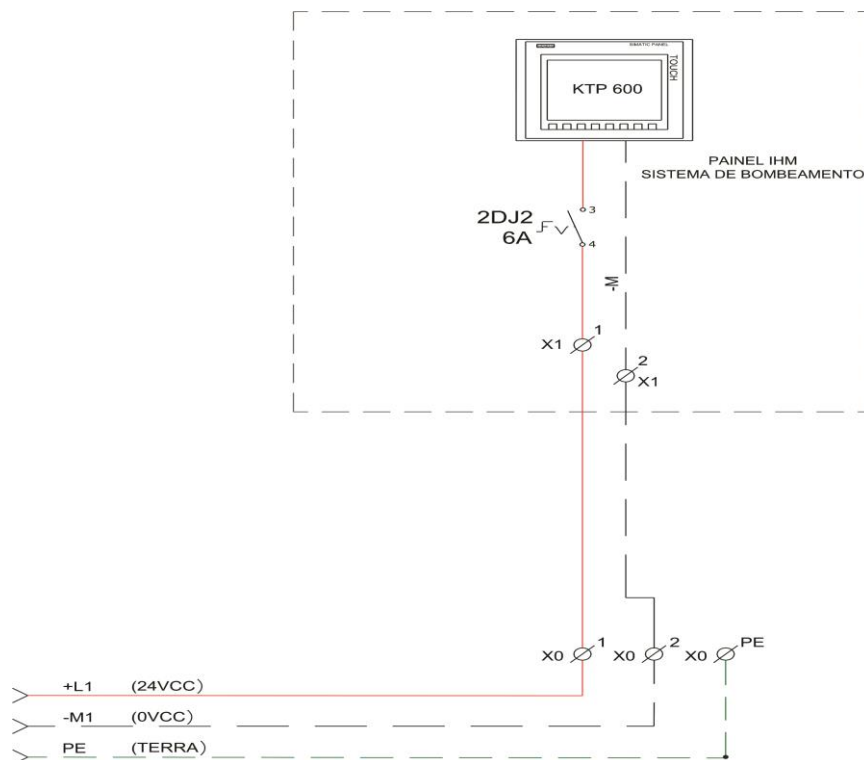


Figura 23: Painel IHM do sistema de bombeamento.
Fonte: Autoria própria.

Diante disso, foi contemplado no projeto um inversor de frequência modelo Micromaster-430 de fabricação Siemens, parametrizado atendendo as configurações construtivas do MIT que será acionado, bem como as configurações de comando necessárias. A Tabela 7 apresenta os valores de parâmetros ajustados.

Tabela 7: Parametrização do inversor de frequência Micromaster-430.
Fonte: Autoria Própria.

Parametrização do Inversor de Frequência Micromaster-430	
Parâmetros do Motor	
P100 N° de Polos	2
P304 Tensão Nominal	380 VCA
P305 Corrente Nominal	101 A
P307 Potência Nominal	55 KW
P310 Frequência Nominal	60Hz
P311 Velocidade Nominal	3600 RPM
Parâmetros de Comando	
P701 Função da Entrada 1	1 ON/OFF 1
P702 Função da Entrada 2	9 Reconhecimento de Falha
P731 Função da Saída Digital 1	52.2 Acionamento Funcional
P732 Função da Saída Digital 2	52.3 Falha Ativa no Funcionamento
P757 Valor X da Escala Analógica	4 mA
P759 Valor Y da Escala Analógica	20 mA
P1080 Frequência Mínima	30 Hz
P1080 Frequência Máxima	62 Hz
P1120 Tempo de Aceleração	10 s
P1120 Tempo de Desaceleração	20 s

Na próxima seção serão apresentados resultados de simulação do sistema de controle proposto. As simulações são realizadas considerando os parâmetros apresentado nas figuras, Figura 22 e Figura 27. E nas tabelas Tabela 1 e Tabela 7.

4.3.1 Parametrização do controlador

Foi agregado na alimentação de referência do inversor de frequência um controlador PID, para ajustar o valor de referência de velocidade do inversor de frequência, baseando-se na pressão ajustada pelo operador através da IHM.

A Figura 24 apresenta o diagrama de blocos referente ao sistema de controle de pressão implementado no frigorífico.

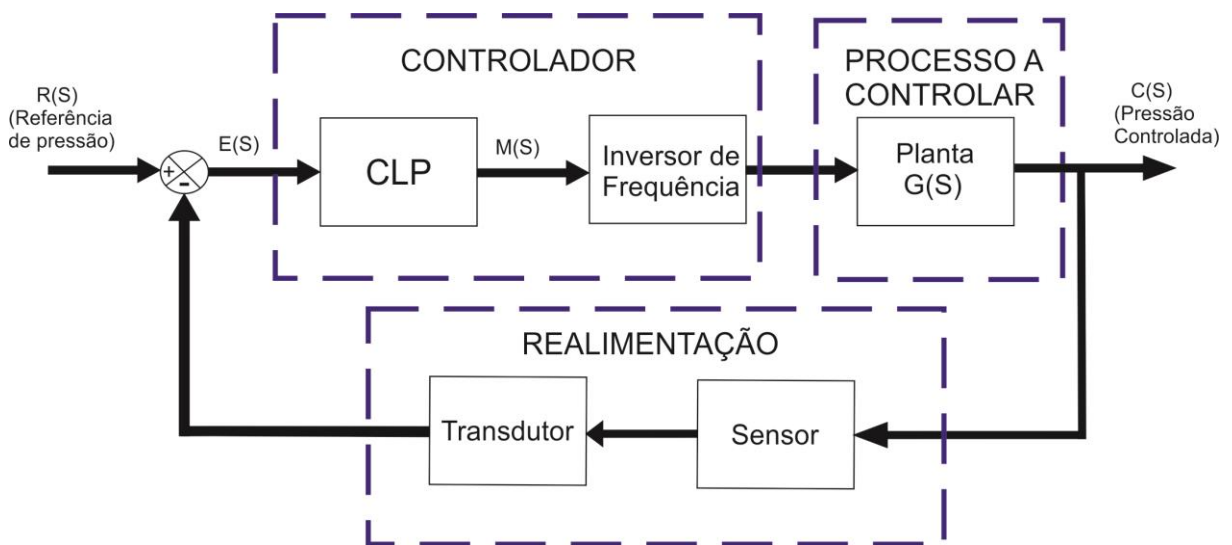


Figura 24: Diagrama de blocos do sistema de controle de pressão.
Fonte: Autoria própria.

Conforme o diagrama da Figura 24, tem-se um sinal $R(S)$, ajustável através da IHM, correspondente à referência de pressão. O controlador compara este sinal com o sinal da variável de processo e calcula um erro $E(S)$. Através do sinal de erro gerado, o controlador atua produzindo um sinal de controle $M(S)$. Este sinal de controle corresponde à referência de velocidade do Inversor de frequência. Dessa maneira o inversor atua na regulação de velocidade da máquina de fluxo de forma a levar o desvio de pressão à zero, ou a um valor muito próximo de zero (OGATA, 1997).

A parametrização dos controladores deste trabalho foi realizada com o uso das técnicas experimentais de sintonia dos controladores PID.

Dentre os métodos mais utilizados para sintonia de controladores tipo PID, destacam-se o método de Ziegler e Nichols e o método de Cohen e Coon. Optou-se pela utilização do primeiro método de Ziegler e Nichols. Os parâmetros da sintonia

são obtidos experimentalmente através da resposta a um degrau unitário, conforme ilustra a Figura 25.

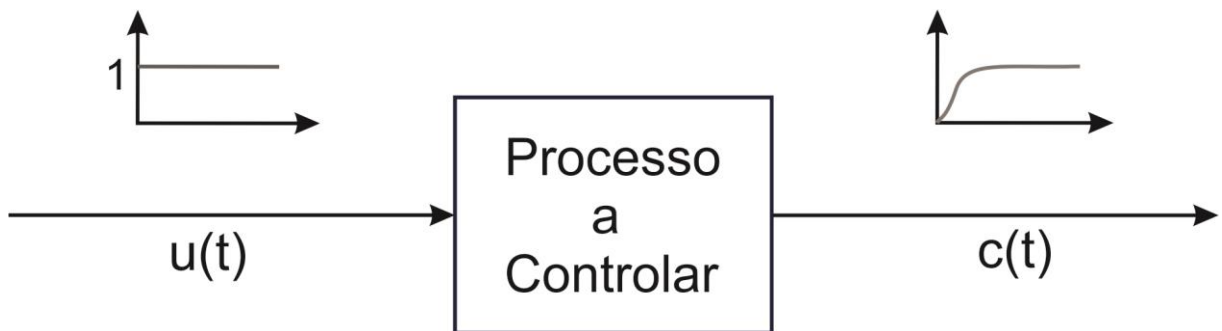


Figura 25: Resposta de um processo a uma excitação em degrau unitário.
Fonte: (OGATA, 1997).

A curva de resposta do degrau é conhecida através da simulação da dinâmica em malha aberta do processo a controlar. Basicamente essa técnica de sintonia busca a curva em forma de S, que é constituída por duas constantes determinantes, o tempo de retardo L e a constante de tempo T , conforme ilustrado na Figura 26.

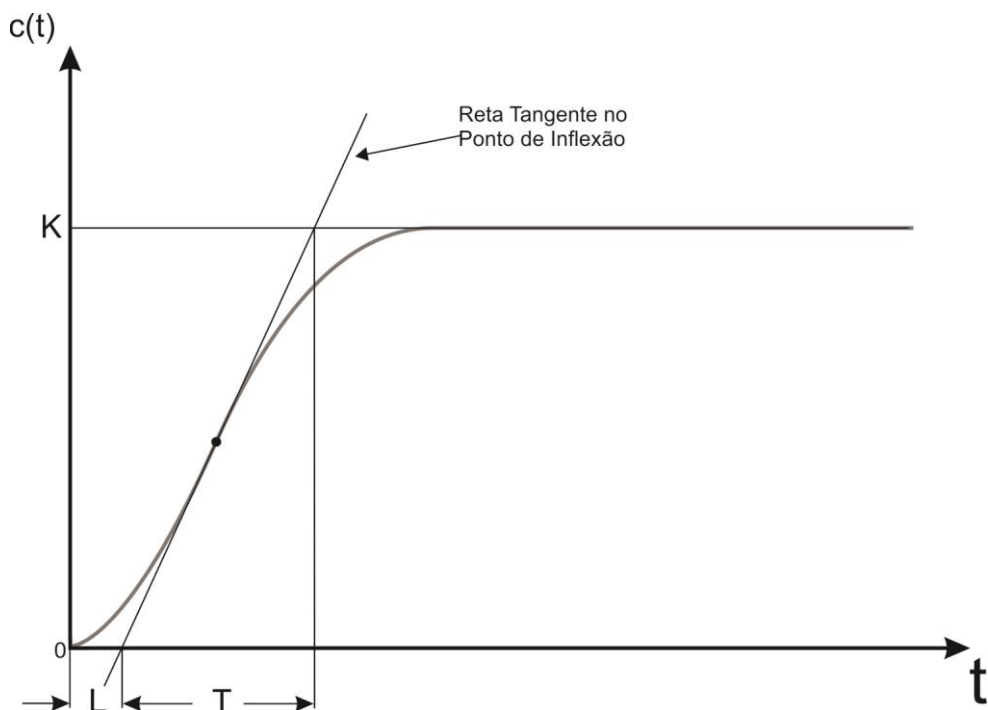


Figura 26: Curva de resposta ao degrau unitário.
Fonte: (OGATA, 1997)

Através dessa dinâmica, o método de Ziegler e Nichols, sugere o ajuste dos valores do ganho proporcional k_p , do tempo derivativo T_d e do tempo integral T_i , conforme apresentados na Tabela 8.

Tabela 8: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols.
Fonte: (OGATA, 1997)

Tipo de Controlador	k_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{T}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Diante disso, através da resposta ao degrau unitário da planta a ser controlada, o tempo de retardo obtido foi $L = 5,2s$ e a constante de tempo $T = 9,8s$. Desta forma os parâmetros de aproximação do controlador, que possui estrutura do controlador PID de modulo acadêmico, estão apresentados na Tabela 9. As técnicas de sintonia auxiliam de maneira a nortear um ponto de partida para os valores de parâmetros, porém o ajuste fino é feito experimentalmente.

Tabela 9: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols.
Fonte: Autoria própria.

Tipo de Controlador	k_p	T_i	T_d
PID	2,26	10,4	2,6

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentadas as simulações do sistema em malha aberta, e posteriormente com a implementação do controle de velocidade considerando situações típicas de processo.

O projeto desenvolvido realiza comparações experimentais dos consumos de energia elétrica. Considerando o sistema de bombeamento na configuração de velocidade fixa e após a instalação do controle de velocidade. O trabalho também contempla a análise de viabilidade econômica do projeto.

5.1 SIMULAÇÕES

A simulação do sistema de controle foi realizada através da ferramenta *Simulink* do software *Matlab*. Foi implementado o sistema de bombeamento com características equivalentes as apresentadas na Figura 24. Respeitando as configurações hidráulicas atuais do modelo da planta abordadas no capítulo 3.

As simulações do sistema de abastecimento de água do frigorífico foram realizadas considerando a configuração atual da planta. Tendo objetivo de analisar as condições de desempenho das máquinas operando sem o controle de velocidade. Para isso, foi aplicada uma perturbação através de um degrau de consumo de água análogo as perturbações naturais observadas durante as atividades de higienização do frigorífico. A Figura 27 apresenta a configuração do sistema atual em malha aberta desenvolvido através da ferramenta de simulação *Simulink* do software *Matlab*. Tal modelo que foi utilizado nas simulações aqui apresentadas, sua implementação ilustra a topologia de acionamento atual, bem como o ponto de partida para implementar os equipamentos de controle de velocidade.

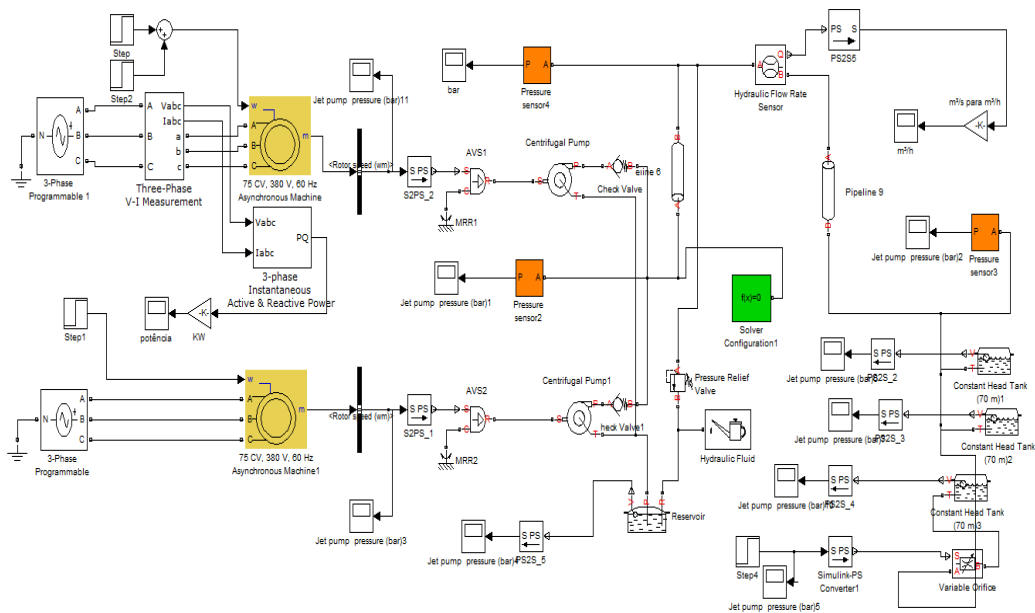


Figura 27: Diagrama de blocos do circuito em malha aberta do sistema de bombeamento. Fonte: Autoria própria.

Através do *simulink*, foi utilizado a bibliotecas de componentes *SimHydraulics*, que fornece componentes para a modelagem e simulação de sistemas hidráulicos. Nesta biblioteca inclui modelos de componentes hidráulicos como: bombas, válvulas e atuadores. Outra biblioteca do *Simulink* bastante explorada é *SimPowerSystems*, já que fornece componentes e ferramentas de análise para modelagem e simulação de sistemas elétricos de potência. Disponibilizando modelos de componentes de energia elétrica, incluindo máquinas trifásicas e acionamentos elétricos (MATHWORKS, 2015). Foi utilizada a biblioteca *Sources* para os blocos de geração de sinais. A Figura 28 apresenta o diagrama de blocos utilizado para implementação do sistema de controle em malha fechada, os resultados obtidos nas simulações para este caso estão apresentados na seção 5.1.2.

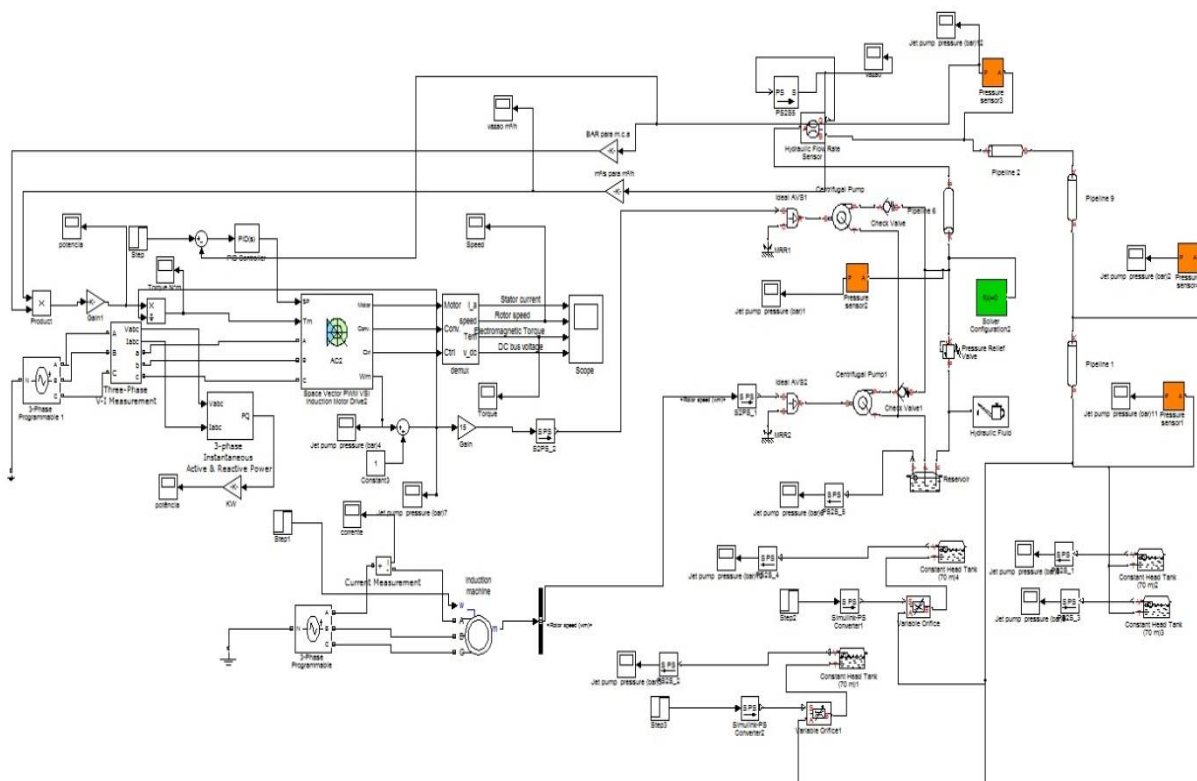


Figura 28: Diagrama de blocos do circuito em malha fechada do sistema de bombeamento. Fonte: Autoria própria.

Com o intuito de apresentar os parâmetros de simulação utilizados nos principais blocos do diagrama da Figura 27 e Figura 28, serão apresentado através de tabelas às grandezas de parametrização. A Tabela 10 apresenta as configurações de parâmetros do bloco *Three-phase Asynchronous Machine* (Motor assíncrono trifásico).

Tabela 10: Parâmetros de configuração do bloco *Three-phase Asynchronous Machine* (Motor de indução trifásico) Fonte: Autoria própria.

DADOS DE PARAMETRIZAÇÃO DA MÁQUINA ASSÍNCRONA	
Potência Mecânica (HP)	75
Potência Nominal (kVA)	67,2
Pares de Pólo	2
Rotação nominal (rpm)	3565
Tensão nominal (Vrms)	380
Resistência de dispersão do rotor	0,035
Resistência de dispersão do estátor	0,049
Reatância de dispersão do rotor (ohm)	0,5460

Reatância de dispersão do estator(ohm)	0,6366
Indutância de dispersão do estator (H)	2e-3
Indutância de dispersão do rotor (H)	2e-3
-Indutância mútua do estator (H)	1e-3
Inércia do rotor (Kg*m ²)	0,89
Ângulo (°)	0

Para o bloco motor assíncrono trifásico, é possível configurar a referência de entrada mecânica através de duas grandezas, torque ou velocidade rotacional. Na simulação o parâmetro de referência escolhido foi velocidade rotacional, com unidade de medida em rotação por minuto (rpm).

Alguns dos blocos presentes na biblioteca *SimPowerSystems* necessitam do bloco *Powergui* para funcionar corretamente. O bloco *Powergui* armazena o circuito do *Simulink* que representa as equações de espaço de estado do modelo. Nesse bloco é configurado o método de solução (*Solver*). O *Software* disponibiliza três métodos de simulação, discreto, contínuo ou fasorial, selecionados a partir da guia *Simulation type* (Tipo de Simulação) (MATHWORKS, 2015). Nas simulações realizadas foi utilizado o tipo de simulação em tempo contínuo para o sistema em malha aberta. Já no sistema em malha fechada foi utilizado em tempo discreto.

Outro bloco de grande relevância utilizado no sistema é o *Centrifugal pump* (*bomba centrífuga*). O bloco Bomba Centrífuga representa uma bomba centrífuga de qualquer modelo, sendo de fácil configuração baseado em folhas de dados. O modelo de parametrização é através das curvas características de operação da bomba. A parametrização pode ser realizada através dos dados de fabricação da bomba.

Tabela 11: Parâmetros de configuração do bloco *Centrifugal pump* (*bomba centrífuga*).
Fonte: Autoria própria.

DADOS DE PARAMETRIZAÇÃO DAS BOMBAS CENTRÍFUGA	
Modelo de parametrização	Características das curvas H-Q(Pressão-Vazão) e NPSH-Q (potência-Vazão)
Referência de velocidade (rpm)	3500
Referência de densidade (Kg/m ³)	920

Componente vetorial da vazão da curva H-Q (m ³ /s)	[0 0.00833 0.0166 0.025 0.033 0.042 0.05 0.058 0.067 0.075]
Componente vetorial da pressão da curva H-Q (bar)	[7.65 7.70 7.69 7.60 7.45 7.35 7.06 6.64 6.12 5.50]
Componente vetorial da vazão da curva N-Q (m ³ /s)	[0 50 100 150 200 250 300]
Componente vetorial da potência da curva N-Q (HP)	[28 35 48 58 69 75 79]

Para o circuito em malha fechada, um bloco de grande relevância é o *Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive*, corresponde à (Inversor de frequência com Motor de indução agregado). O bloco é constituído por seis blocos principais. São eles, o retificador de onda trifásico, o inversor de frequência trifásico, o motor de indução, controlador de velocidade, controlador de frenagem, e os modelos de espaço vetorial (MATHWORKS, 2015).

O controlador de velocidade é baseado em um regulador PI que controla o escorregamento do motor. O Bloco utiliza método de simulação em tempo discreto. Existem duas possibilidades de realimentação da entrada de referência mecânica, através de torque de carga ($T_{m(N/m)}$) ou velocidade rotacional (ω_{rad}). Caso escolha torque de carga para sinal de entrada, automaticamente o sinal de saída é velocidade rotacional. De forma análoga para escolha oposta. No presente projeto, utilizou-se como referência de realimentação de entrada o torque da máquina $T_{m(N/m)}$. O torque de realimentação pode ser relacionado através da potência e velocidade da máquina, ou seja,

$$T_{m(N/m)} = \frac{P_{(cv)}}{\omega_{rad}} \quad (5.1)$$

A potência é função da vazão e pressão,

$$T_{m(N/m)} = \frac{Q_{(m^3/h)} * Q_{(m.c.a.)}}{\omega_{rad}} K_{prop.} \quad (5.2)$$

A constante $K_{prop.}$ representam a relação de proporcionalidade entre as variáveis da equação (5.2), para as variáveis em questão a constante,

$$K_{prop.} = \frac{1}{230}, \quad (5.3)$$

considerando um fator de potência $FP = 0,85$ (JACUZZI, 2006).

Os principais parâmetros de simulação utilizado no bloco *Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive* estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Parâmetros de configuração do bloco Space Vector PWM VSI Induction Motor Drive. Fonte: Autoria própria.

DADOS DE PARAMETRIZAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA VSI	
Parametrização da Máquina Assíncrona	
Potência (kW)	55.2
Tensão (V_{rms})	380
Frequência (Hz)	60
Resistencia de Estator (ohm)	0.049
Resistencia de Rotor (ohm)	0.035
Indutância de Estator (H)	0.0028
Indutância de Rotor (H)	0.0028
Indutância Mútua (H)	0.00105
Inercia do Rotor(Kg*m ²)	0.89
Número de Polos	2
Parametrização de Controle	
Rampa de aceleração de velocidade (rpm/s)	900
Rampa de desaceleração de velocidade (rpm/s)	-900

K_i	2,25
K_p	1,25
Tensão Mínima de Saída (V_{rms})	10
Tensão Máxima de Saída (V_{rms})	410
Frequência Mínima de Saída (Hz)	30 Hz
Frequência Máxima de Saída (Hz)	62 Hz

Diante disso, os métodos do sistema de controle de velocidade aqui abordados foram implementados na planta e posteriormente foi aplicada uma perturbação semelhante a que o sistema em malha aberta foi submetido. Com isso tem-se o objetivo de analisar o comportamento do sistema e sua respectiva resposta frente às variações de carga.

5.1.1 Simulação do Sistema Hidráulico em Malha Aberta

Através do *Simulink*, foi realizada a simulação da planta em malha aberta. A princípio foi acionada a máquina de fluxo 1 com velocidade nominal atendendo a uma demanda de carga de aproximadamente setenta (70) pontos de consumo de água.

Nestas condições, o sistema hidráulico assume uma vazão pouco abaixo de 150 m³/h, conforme ilustra a Figura 29, e uma pressão equivalente de 7 bar, conforme a Figura 30.

Passados 30 segundos do início da simulação, aplicou-se uma perturbação equivalente à abertura de mais setenta (70) pontos de consumo de água referentes ao processo de higienização. Diante desse degrau de carga a vazão é elevada acima de 170m³/h, sendo que nesse momento a máquina de fluxo 1 atinge o seu limite operacional e sozinha não atende a carga solicitada. Conseqüentemente, o sistema sofre um declínio de pressão alcançando aproximadamente 4,5 bar, conforme ilustra a Figura 30.

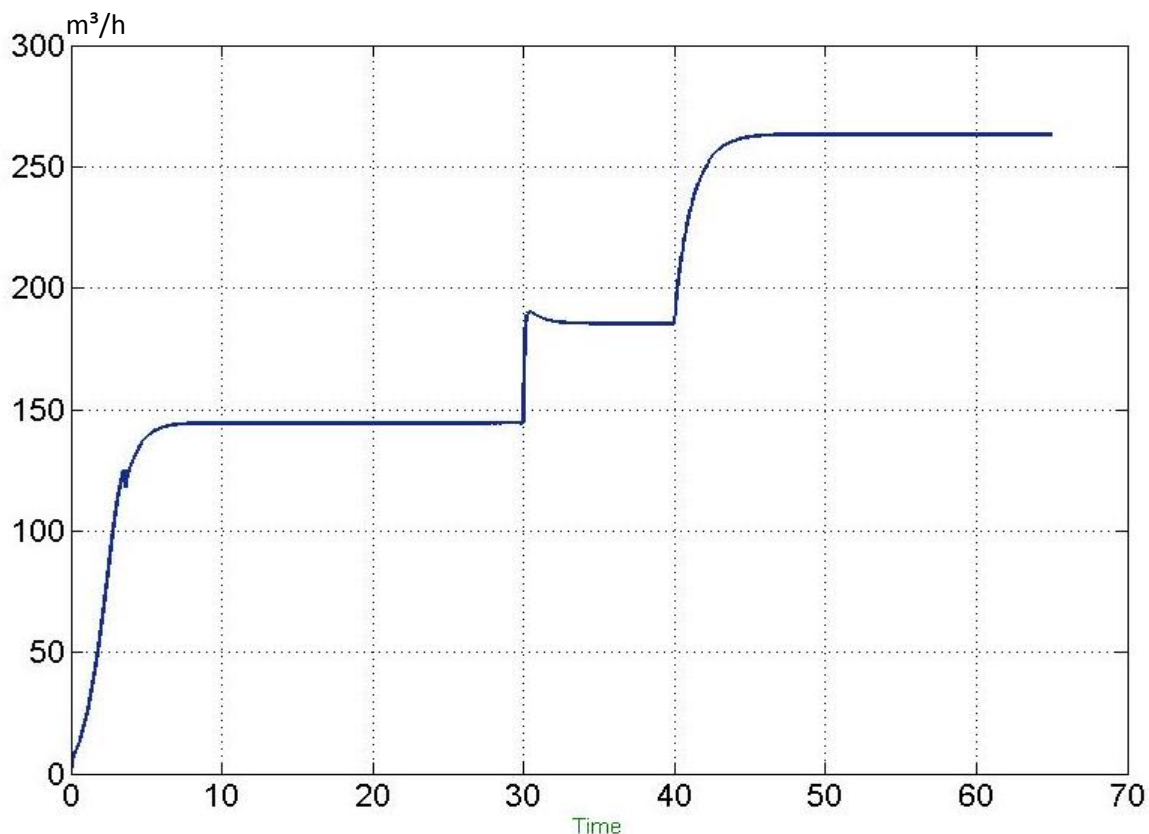


Figura 29: Dinâmica da vazão do sistema em malha aberta.
Fonte: Autoria própria.

Diante desse cenário, normalmente o operador do sistema aciona manualmente a máquina de fluxo 2. Essa intervenção é apresentada na simulação aos quarenta (40) segundos, quando é acionada a segunda bomba e o sistema é elevado para a referência de pressão 7 bar novamente. No entanto, o sistema hidráulico atual dispõe de uma configuração by-pass que utiliza de uma válvula de alívio de pressão na rede sensível a ultrapassagem da pressão de referência, essa intervenção é observada na Figura 30, já que, quando a pressão alcança a referência, a válvula permite a recirculação fazendo com que a pressão seja mantida próximo da referência.

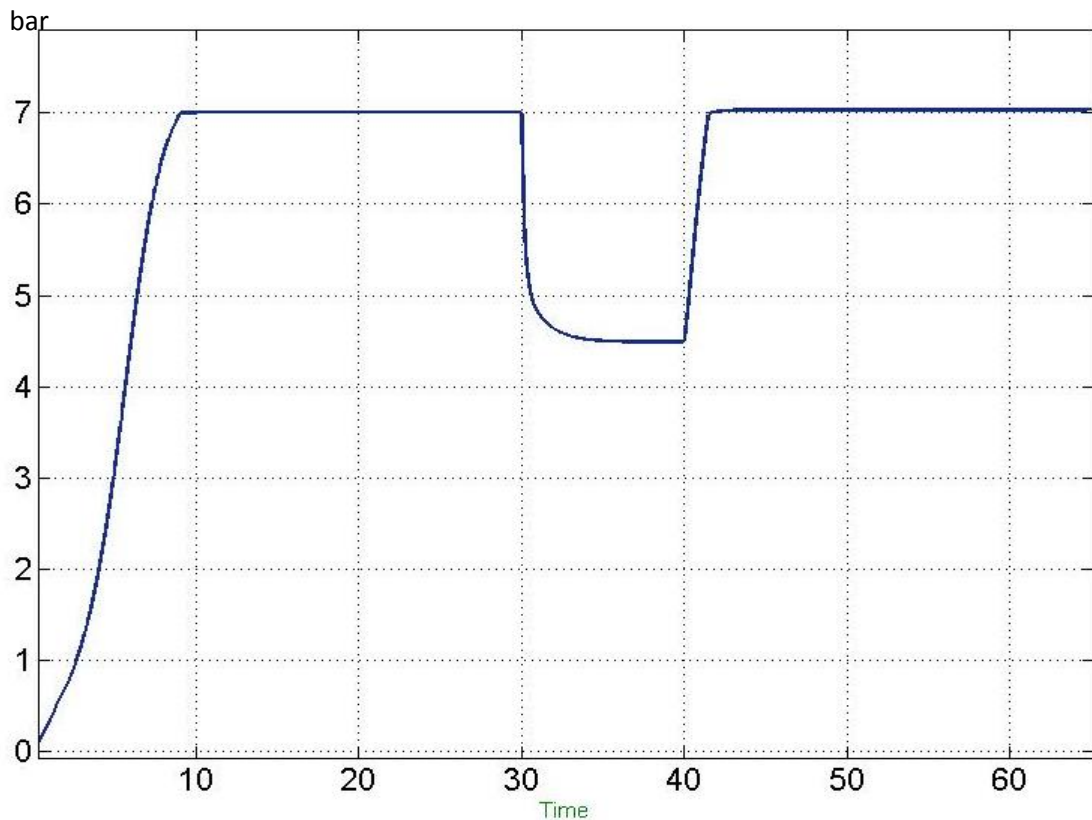


Figura 30: Dinâmica de pressão do sistema em malha aberta.
Fonte: Autoria própria.

As máquinas de fluxo disponíveis no sistema conforme abordadas no capítulo 1, dispõem de configurações construtivas semelhantes. Segundo Alé (2010), nas ligações em paralelo de máquinas de fluxo é mais conveniente utilizar equipamentos de mesma potência e vazão, dessa maneira, consegue-se evitar recirculações de correntes entre a bomba de menor potência para a de maior potência. O consumo de energia de cada máquina está apresentado na . Através da , é possível visualizar a relação de consumo de uma das máquinas de fluxo do sistema de bombeamento, sendo que as duas máquinas possuem consumos muito semelhantes e com mínimas variações ao longo do tempo, características que acabam por tornar o sistema mais dispendioso quando comparado com a topologia de variação de velocidade.

5.1.2 Simulação do Sistema Hidráulico em Malha Fechada

De forma análoga ao cenário em malha aberta, nesta seção são apresentadas as simulações do sistema em malha fechada através do *Simulink*. A

princípio foi acionada a máquina de fluxo 1 com uma carga de aproximadamente cinquenta (50) pontos de consumo de água. A Figura 33 apresenta dinâmica da variação de velocidade da máquina de fluxo 1, acionada pelo inversor de frequência. A Figura 31 relaciona a dinâmica de vazão do sistema em malha fechada.

Através da Figura 33 nota-se que o sistema de controle atuou elevando a velocidade da máquina 1, até que a pressão do sistema hidráulico alcance a referência de pressão ajustada no controlador, (7 bar), nestas condições o sistema controlado assume uma vazão de aproximadamente 100 m³/h conforme ilustra a Figura 31.

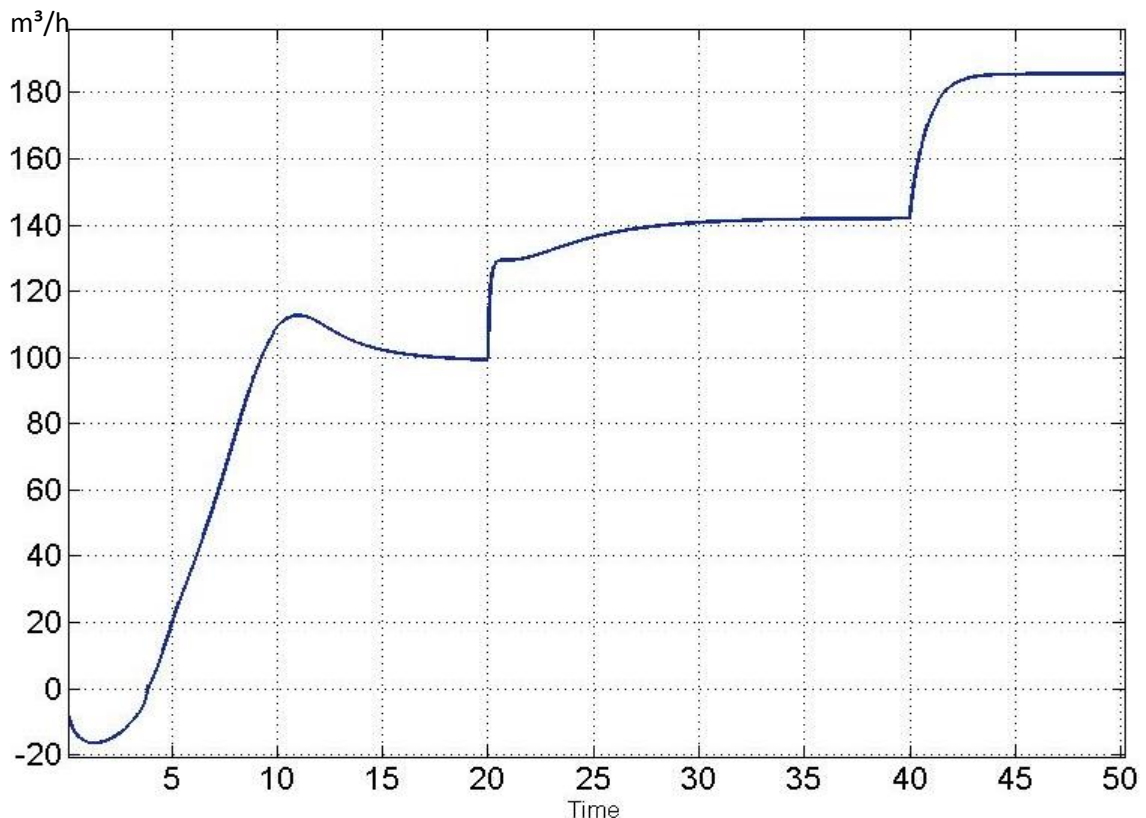


Figura 31: Dinâmica de vazão do sistema em malha fechada.
Fonte: Autoria própria.

Passados 20 segundos aplicou-se uma perturbação no sistema de bombeamento equivalente à abertura de aproximadamente (20) pontos de consumo de água a mais, referente ao processo de higienização, diante deste degrau de carga a pressão da rede hidráulica tem um declínio e o sistema de controle atua elevando a velocidade da máquina 1 para compensar esta variação e trazer a pressão que alcança a casa dos seis (6) bar, novamente para a referência, conforme

apresentado na Figura 32, já a vazão do sistema é elevada pouco acima de 140 m³/h.

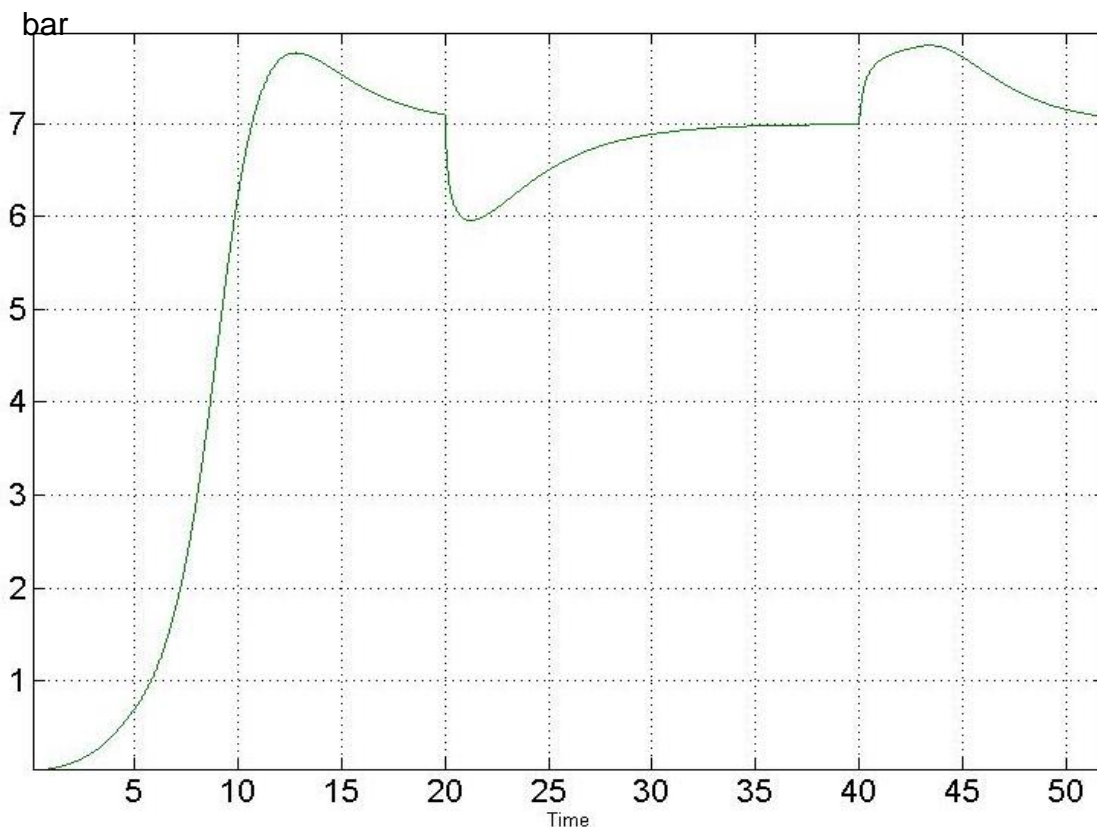


Figura 32: Dinâmica de pressão do sistema em malha fechada.
Fonte: Autoria própria.

A simulação ainda aborda uma situação em que é acionada a máquina de fluxo 2, juntamente com mais um degrau de carga de aproximadamente 20 pontos de consumo. Nesse momento o sistema passa a consumir o equivalente a abertura de 90 pontos de consumo, este estado de operação tem objetivo de observar a dinâmica do sistema de controle diante de uma transferência de carga entre as duas máquinas de fluxo. Já que, o sistema de controle foi projetado para que a máquina de fluxo 1 além de atender aos períodos de baixo consumo de água, tenha condições de fazer o ajuste fino de pressão nas circunstâncias de maior consumo de água, ou seja, nos casos em que sozinha a máquina 1 não atenda a referência de pressão.

Diante disso, na simulação é acionada a máquina de fluxo 2 e a máquina 1 fornece apenas a contribuição necessária excedente para garantir a demanda de consumo de água.

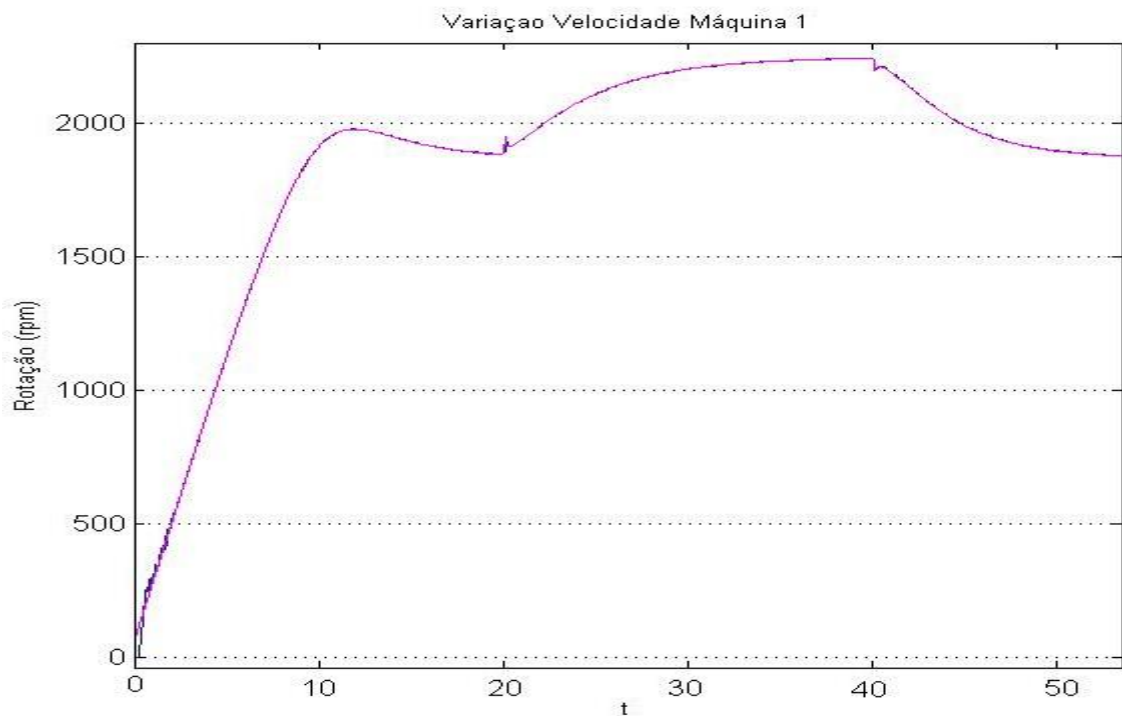


Figura 33: Dinâmica da variação de velocidade da máquina 1.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 ilustra a variação de velocidade da máquina de fluxo 1 para reduzir a pressão do sistema conforme a Figura 32, ao mesmo tempo que a máquina de fluxo 2 assume a maior parte da carga solicitada.

Através da Figura 34 é possível visualizar a dinâmica de variação de torque para a máquina de fluxo 1, nota-se que os resultados simulados apresentaram grande variação entre os pontos coletados, possivelmente o fator determinante para essa variação é o passo, ainda que a variação de velocidade é reduzida mesmo com variação de carga, esse comportamento apresenta vantagens quando se busca rotações baixas e torque variável.

O conjugado sofre pequenas variações quando comparada com as variações de carga e velocidade aplicada no sistema controlado, mas que se recuperam e voltam à estabilidade rapidamente.

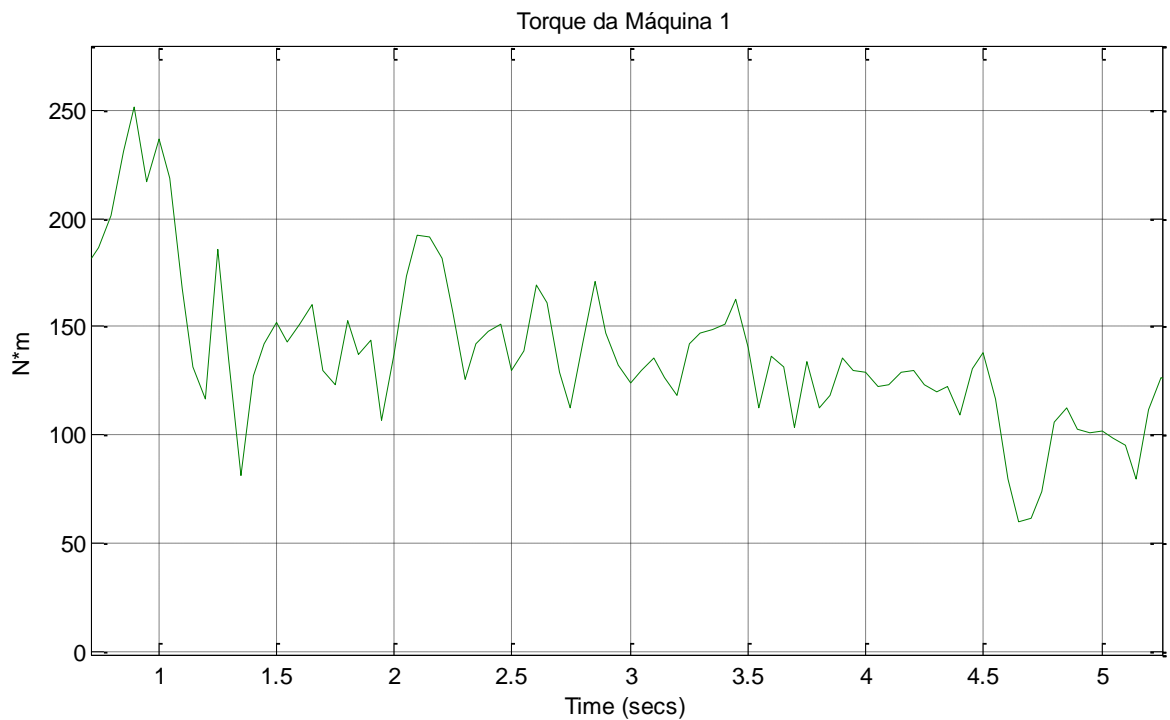


Figura 34: Dinâmica da variação de torque da máquina de fluxo 1
Fonte: Autoria própria.

Através da Figura 35 é possível visualizar a relação de consumo da máquina de fluxo 1 do sistema de bombeamento, nota-se grande diferença quando comparado com os instantes iniciais de fluxo de potência do sistema sem controle de velocidade apresentado na Figura 17.

No sistema com velocidade fixa, a máquina 1 consome em média 65kW/h, já o sistema com o inversor de frequência instalado consome uma potência entre 10 e 20kW/h, uma discrepância considerável e bem aceito para os objetivos de projeto. No entanto, os ganhos referente à implementação do sistema de controle podem ser elevados através de acompanhamento do sistema de bombeamento e ajustes finos do sistema de controle.

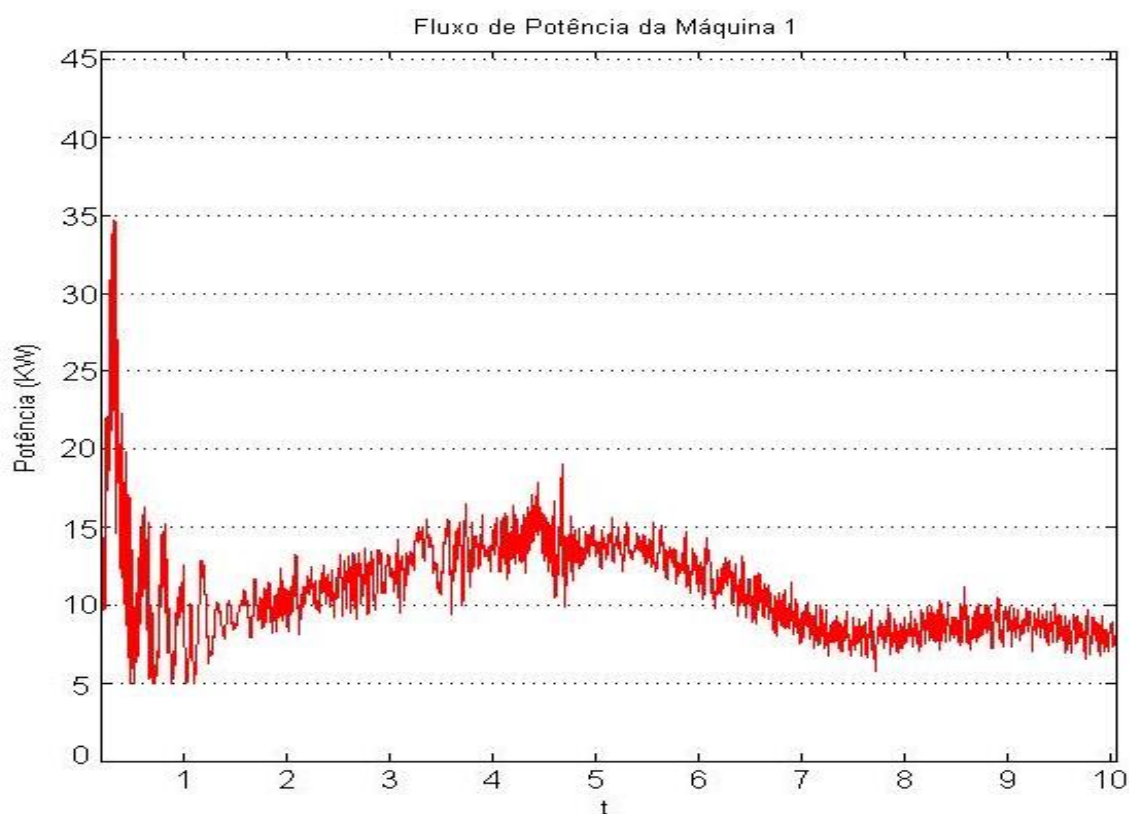


Figura 35: Dinâmica de potência da máquina de fluxo 1
Fonte: Autoria própria.

5.2 ANÁLISES DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A viabilidade técnica deste projeto é comprovada nos capítulos 2, 3 e 4. A implementação prática do sistema de regulação de velocidade depende também da análise de viabilidade econômica da instalação elétrica.

Inicialmente, um investimento pode ser apontado como toda ação da qual se espera obter algum benefício futuro. A realizar uma análise de viabilidade econômica de um projeto, significa analisar as perspectivas de desempenho financeiro do investimento em questão (ROZENFELD, 2008). Dessa maneira, é calculada a viabilidade econômica do projeto através de indicadores como:

- **Valor Presente Líquido (VPL):** Corresponde a concentração de todos os valores de fluxo de caixa de um projeto. É uma ferramenta matemática-financeira capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros estipulada,

descontando o custo de investimento inicial do projeto. Se o VPL for positivo pode-se dizer que existe uma expectativa de que sejam pagos todos os investimentos;

- **Taxa Interna de Retorno (TIR):** Determina a taxa de retorno necessária para alcançar um determinado valor de investimento, ou seja, pode ser definida como a taxa que anula o VPL;
- **Taxa Mínima de Atratividade (TMA):** É uma taxa de juros que corresponde a um mínimo valor que um investidor se dispõe a ganhar quando realiza um investimento ou o máximo valor que uma pessoa ou empresa se submete a pagar quando faz um financiamento;
- **Período de Recuperação de Capital (Payback):** É o tempo aproximado de recuperação do capital investido. Pode ser encarado como um nível de risco do projeto, ou seja, projetos cujo *payback* sejam relativamente curto indica que propiciam um menor nível de risco, quando comparado a um projeto com período de *payback* maior ;
- **O Valor Presente Líquido Anualizado (VPLA):** tem a mesma interpretação do VPL, e representa a expectativa de retorno distribuída em valores equivalentes anuais;
- **Valor Presente (VP):** sinaliza um quantitativo de capital acumulado referente à soma total do investimento inicial de projeto com o acumulado de retorno do dinheiro aplicado no decorrer do período de durabilidade do projeto.

Considerando-se que a empresa tenha os recursos financeiros necessários para execução do projeto, não foram considerados para essa análise de viabilidade nenhum recurso através de financiamentos. Este recurso sem financiamento é chamado de Fluxo de Caixa Inicial (FC_0), e representa o custo inicial para implantação do projeto do controle do sistema de higienização da unidade da empresa parceira (FACCO & VIEIRA, 2012).

Para calcular os valores de retorno mensal do projeto é necessário conhecer algumas variáveis. O Custo Mensal de Manutenção dos equipamentos (CMM) é considerado um valor de 5% do valor total do projeto ao ano. Considerando um custo total de R\$140.000,00, tem-se um $CMM \approx R\$ 583,33$.

O VEE (valor mensal em reais da Economia média de Energia) pode ser aproximado considerando a dinâmica de potência, conforme a Figura 17, realizando uma média de consumo do sistema antes da instalação do controle de velocidade. Chega-se a um consumo aproximado de 60289,55KWh /mês. O custo do KWh \approx R\$ 0,48. Através da dinâmica de potência do sistema abordado nas simulações da seção 5.1. Considerando que a máquina de fluxo 2 opere continuamente nos horários de pico de consumo, conforme a dinâmica de vazão da Figura 16 abordada no capítulo 4. Calcula-se um consumo aproximado de 44589,84 kWh / mês, indicando um ganho aproximado de 15699,71 kWh, (26%), dessa maneira o VEE \approx R\$ 7535,86. Portanto, os valores aproximados de retorno mensal do projeto (RM) são calculados pela expressão,

$$RM = VEE - CMM, \quad (5.4)$$

substituindo as grandezas,

$$RM = R\$ 6.951,73. \quad (5.5)$$

A taxa TMA pode ser considerada pessoal, ou seja, cada indivíduo ou empresa aceita se expor ao risco através de níveis diferentes. O Período de capitalização pode ser encarado como, quanto tempo a empresa ou indivíduo está sujeito a aguardar, para que o dinheiro aplicado retorne como capital. Para este projeto considera-se uma TMA de 1% ao mês, e um período de capitalização de 180 meses. Em outras palavras, significa que o tempo estimado de depreciação dos equipamentos e infraestruturas instalados é de 180 meses.

O valor acumulado de RM aplicado durante os 180 meses corresponde aos valores de fluxo de entrada de caixa, durante o período de capitalização. Assim é necessário realizar o cálculo de VP do projeto com objetivo de levantar o valor do capital acumulado no término dos 180 meses. A equação do valor presente representa uma somatória dos meses de retorno de capital, considerando os fluxos de caixa e a TMA ao longo dos meses,

$$VP = \sum_{j=1}^N \frac{FC_{jt}}{(1+TMA)^j}, \quad (5.6)$$

substituindo as grandezas,

$$VP = R\$579.229,71. \quad (5.6)$$

Através do VP é possível calcular o VPL. Essa equação fornece o indicativo de valores presentes dos fluxos de caixa estimados de uma aplicação. A equação de valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros estipulada, TMA, descontando o custo de investimento inicial do projeto,

$$VPL = -FC_0 + \sum_{j=1}^N \frac{FC_j}{(1+TMA)^j}, \quad (5.7)$$

substituindo as grandezas,

$$VLP = R\$439.229,71. \quad (5.8)$$

Dessa maneira, como o VPL de projeto se encontra positivo, indica que é viável economicamente. Assim, para análise do lucro remanescente com o projeto calcula-se:

$$VPLA = \frac{VPL \cdot [TMA \cdot (1+TMA)^N]}{[(1+TMA)^N - 1]} \quad (5.9)$$

$$VPLA = R\$ 5.271,50 \quad (5.10)$$

Uma segunda análise estabelece o IBC (Índice Custo Benefício). O IBC é uma medida de quanto se espera ganhar por unidade de capital investido, um indicador financeiro que relaciona os benefícios de um investimento expressos em termos monetários (FACCO & VIEIRA, 2012). Dessa maneira, pode ser representado,

$$IBC = \frac{\text{Valor presente do fluxo de benefício}}{\text{Valor presente do fluxo de investimento}} \quad (5.11)$$

substituindo na expressão (5.11),

$$IBC = \frac{\sum_{k=1}^N \frac{B_k}{(1+TMA)^k}}{FC_0 + \frac{C_k}{(1+TMA)^k}} = 4,14 \quad (5.12)$$

Para o projeto em estudo o $IBC = 4,14$. Esse indicador representa o índice de valores correspondente ao investimento de uma unidade monetária.

A classificação dos indicadores de viabilidade dispõe de outro indicador importante para esse estudo que é o ROIA (Retorno Sobre o Investimento). Tal indicador, que é um ajuste do IBC para uma região de menor horizonte, pode ser abordado como a rentabilidade anual equivalente ao IBC (DONIZETTI, 2010),

$$ROIA = \sqrt[N]{IBC} - 1, \quad (5.13)$$

dessa maneira,

$$ROIA = 0,79\% \quad (5.14)$$

Segundo Facco & Vieira (2012) através da relação do ROIA pela taxa TMA é possível estimar uma rentabilidade extra, além do retorno propiciado pela TMA. Conforme,

$$\frac{ROIA}{TMA} = 79,00\% \quad (5.15)$$

Diante disso, é necessário calcular a TIR, que é a ferramenta financeira que analisa o risco de uma tomada de decisão. Embora muitos a utilizem como medida

de retorno, a TIR pode ser comparada como uma ferramenta de medida de risco (Lima, 2010). Calcula-se a taxa interna de retorno com o objetivo de identificar o risco de um projeto apresentar um retorno de investimento menor que a aplicação financeira de investimento à TMA (DONIZETTI, 2010).

$$TIR = \sum_{j=1}^N \frac{Entradas_j}{(1+i)^j} - \sum_{j=1}^N \frac{Saídas_j}{(1+i)^j} = 0 \quad (5.16)$$

Substituindo as grandezas,

$$TIR = 4.965\% \quad (5.17)$$

A TIR pode ser abordada como a taxa de retorno com que anula o VPL de um investimento. Ainda, segundo Facco & Vieira (2012), se um investidor buscasse recursos para execução de projeto através de financiamento, a TIR é o máximo valor de taxa mensal de juros que um indivíduo poderia se dispor a pagar para que o projeto seja rentável.

Através da Figura 36, pode-se visualizar o comportamento do VPL em função da taxa de desconto.

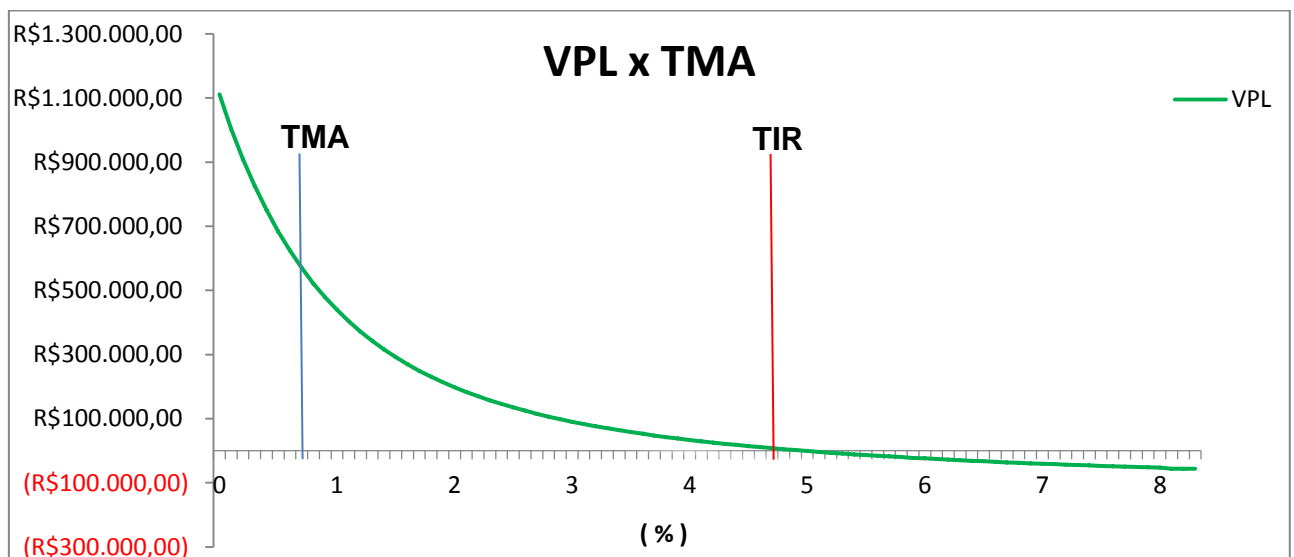


Figura 36: Relação entre VPL e TMA.
Fonte: Autoria própria.

A Figura 36 representa um indicativo de risco do projeto. O risco é medido através da distância entre a Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Taxa Mínima de

Atratividade (TMA), ou seja, a probabilidade da TIR ser menor que a TMA. Em outras palavras, o teto com que a taxa de investimento TMA pode subir até que um determinado projeto seja inviabilizado economicamente. Conforme mostra a Figura 36, o projeto aqui desenvolvido pode ser considerado atrativo, já que, tem uma probabilidade reduzida da TIR ser menor que a TMA (SOUSA E CLEMENTE, 2008). A Tabela 13 apresenta os indicadores da análise de viabilidade econômica.

Tabela 13: Análise de viabilidade econômica de projeto.
Fonte: Autoria própria.

Mês	Fluxo de Caixa	VP	VPL	Pay-back
00	-140000	-140000	-140000	Não pago ainda
01	6951,73	R\$ 6.882,90	-R\$ 133.117,10	Não pago ainda
02	6951,73	R\$ 6.814,75	-R\$ 126.302,35	Não pago ainda
03	6951,73	R\$ 6.747,28	-R\$ 119.555,06	Não pago ainda
04	6951,73	R\$ 6.680,48	-R\$ 112.874,59	Não pago ainda
05	6951,73	R\$ 6.614,33	-R\$ 106.260,26	Não pago ainda
06	6951,73	R\$ 6.548,84	-R\$ 99.711,41	Não pago ainda
07	6951,73	R\$ 6.484,00	-R\$ 93.227,41	Não pago ainda
08	6951,73	R\$ 6.419,81	-R\$ 86.807,60	Não pago ainda
09	6951,73	R\$ 6.356,24	-R\$ 80.451,36	Não pago ainda
...		
20	6951,73	R\$ 5.697,25	-R\$ 14.552,19	Não pago ainda
21	6951,73	R\$ 5.640,84	-R\$ 8.911,34	Não pago ainda
22	6951,73	R\$ 5.584,99	-R\$ 3.326,35	Não pago ainda
23	6951,73	R\$ 5.529,70	R\$ 2.203,35	Pago
24	6951,73	R\$ 5.474,95	R\$ 7.678,29	Pago
25	6951,73	R\$ 5.420,74	R\$ 13.099,03	Pago
...				
176	6951,73	R\$ 1.206,51	R\$ 434.521,95	Pago
177	6951,73	R\$ 1.194,56	R\$ 435.716,51	Pago
178	6951,73	R\$ 1.182,74	R\$ 436.899,25	Pago
179	6951,73	R\$ 1.171,03	R\$ 438.070,28	Pago
180	6951,73	R\$ 1.159,43	R\$ 439.229,71	Pago

Dessa maneira, para facilitar à visualização dos resultados da análise de viabilidade econômica do projeto, a Tabela 14 reúne os indicadores calculados.

Tabela 14: Valores calculados da análise econômica.

Fonte: Autoria própria

TMA	1%
VP	R\$ 579.229,71
VPL	R\$ 439.229,71
VPLA	R\$ 5271,50
IBC	4,14
N	180
Pay-back	23
ROIA (mensal)	0,79%
ROIA/TMA	79%
Pay-back/N	12,78%
TIR	4,96%
TMA/TIR	20,16%

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Através do analisador de energia elétrica RE6000, apresentado no ANEXO C , foi efetuada uma nova análise de qualidade de energia durante um dia normal de processo, agora com os equipamentos do controle de velocidade da máquina de fluxo já instalados, com o objetivo de visualizar as diferenças de potência drenada da rede. A Figura 37 compara os resultados coletado referente às curvas de dinâmica de potência do sistema com velocidade fixa e com velocidade variável.

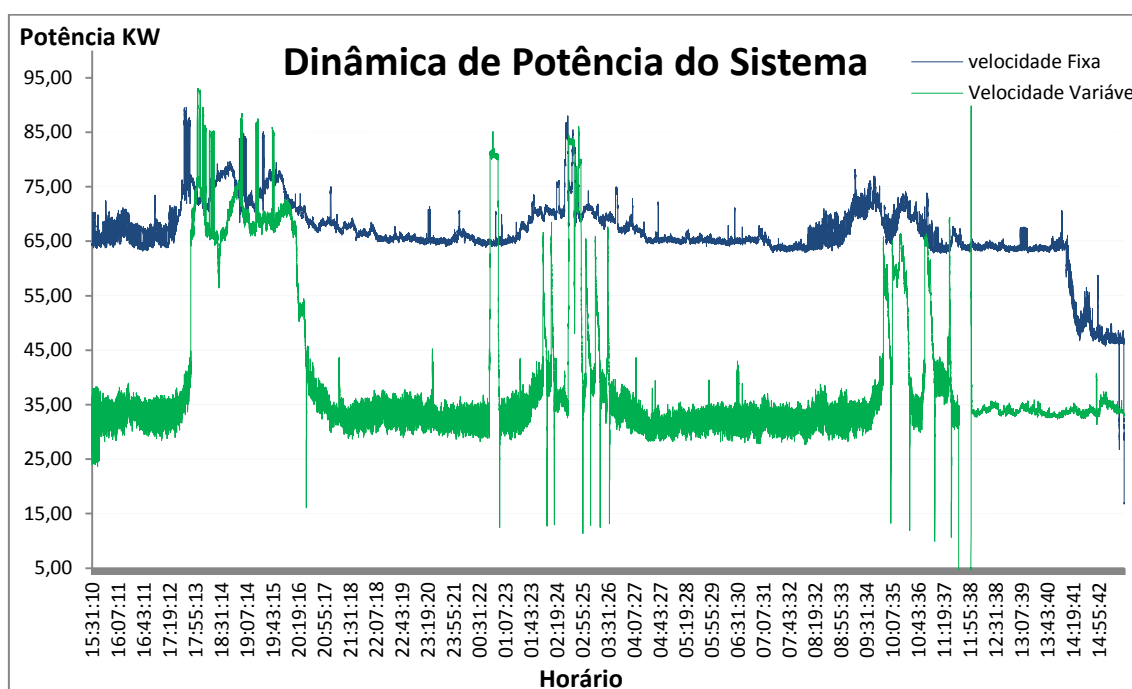


Figura 37: Relação de potência elétrica.
Fonte: Autoria própria.

Estes resultados mostram que as características de variação de velocidade realmente atendem as expectativas de redução de demanda de potência. Fica claro que na grande maioria do período de processo tem-se elevados ganhos quanto aos níveis de potência drenada.

A Figura 38 apresenta a relação de consumo de energia elétrica do sistema de bombeamento.

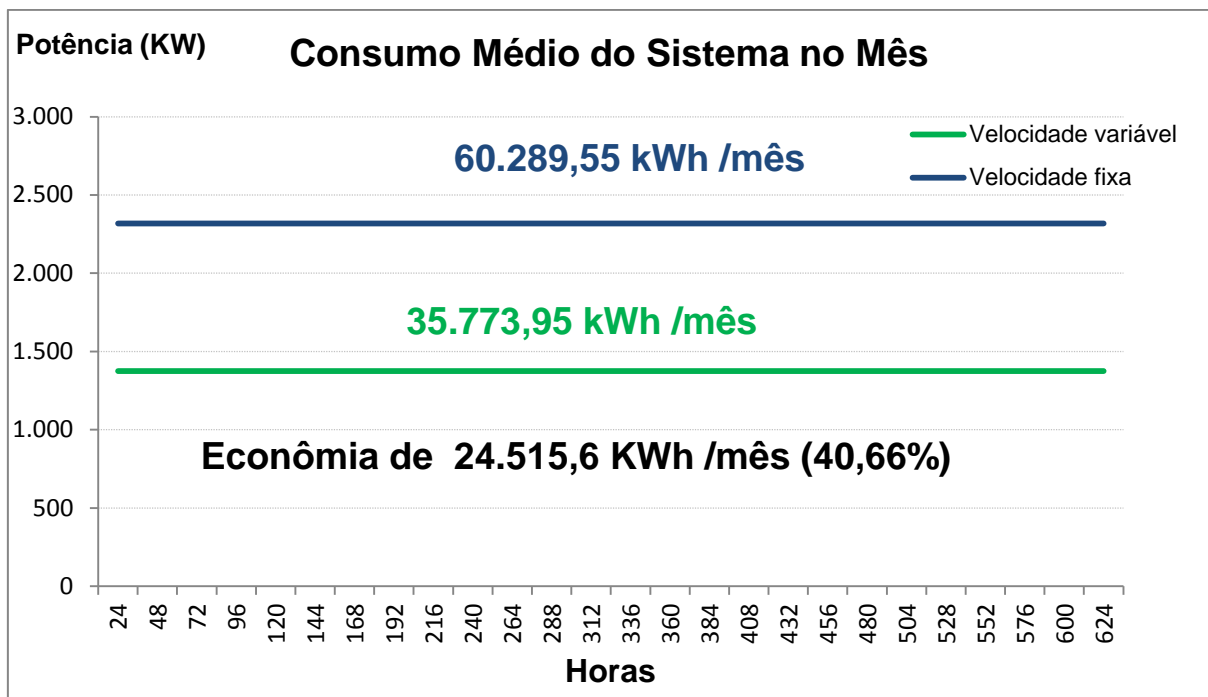


Figura 38: Relação de consumo de energia elétrica.
Fonte: Autoria própria.

Para elaboração dessa relação, foi realizada uma média de consumo através dos dados coletados pelo analisador de energia. A média é fundada considerando 288 pontos de coleta do analisador ao longo de um dia de processo, considerando às 24 horas trabalhadas. Com uma variação de tempo $\Delta T = 0,12hrs$ (5 minutos) entre cada instante coletado.

Dessa maneira, a Figura 38 ilustra os quantitativos de potência consumida do sistema de bombeamento, Estes resultados reforçam que as características de variação de velocidade atendem as expectativas de redução de consumo de energia elétrica. Já que, quando considerado os valores médios de consumo de energia elétrica, o ganho da implementação do projeto alcançou 40,66% aproximadamente.

6. CONCLUSÕES

É fato que na grande maioria dos sistemas de bombeamento utilizados na indústria são necessários dispositivos de acionamento que diminuam os afundamentos de tensão e picos de corrente da rede industrial, durante a partida das máquinas de fluxo. O inversor de frequência é um dispositivo que além de reduzir os níveis de queda de tensão e picos de corrente na partida, auxiliam na variação de velocidade das máquinas contribuindo com a redução de consumo de energia elétrica.

Este trabalho contribuiu, especialmente, na demonstração da estratégia de controle de vazão através da variação de velocidade da máquina de fluxo. Abordando os principais aspectos teóricos, tecnológicos e econômicos que envolvem essa estratégia de controle. Analisando tais aspectos, o projeto foi considerado pela empresa como de boa rentabilidade, sobretudo em razão dos cálculos de análise de viabilidade econômica apresentados na seção 5.2. Dessa maneira custeado na íntegra pela empresa parceira.

O método de controle proposto contempla simulações do sistema de bombeamento antes e após o controle de velocidade. Considerando um cenário análogo as demandas de água observadas durante acompanhamentos das atividades de processo do frigorífico.

Verifica-se que, o uso do inversor de frequência constantemente resulta em reduções de consumo de energia. Porém, por ser um dispositivo com custo relativamente elevado, quando comparado com demais dispositivos de acionamento, deve-se realizar um estudo de viabilidade econômica. Tendo em vista, buscar a solução que melhor atenda as necessidades de projeto, quanto ao aspecto econômico.

Este trabalho contempla o projeto elétrico de instalação, abordando dimensionamento do circuito de força, elaboração e discussão do diagrama unifilar referente aos equipamentos de instalação.

Os resultados experimentais mostraram ser relativamente aproximados com os resultados de simulação. No entanto, devido a limitações de *hardware* da máquina utilizada para realizar as simulações, foi necessário reduzir a constante de

passo da simulação, dessa maneira, surgiram grandes quantidades de ruídos nos resultados, principalmente no torque e potência da máquina.

Os dados da Figura 17, referem-se à dinâmica de potência ativa do sistema não controlado, e como o controle de vazão neste caso é através de recirculação por by-pass, em situações que o processo demande pouca vazão as máquinas de fluxo trabalham com baixo escorregamento, reduzindo o fator de potência, conseqüentemente consumindo elevadas porções de potência para atender as mesmas demandas de carga. Fato este, que evidencia a elevada contribuição do trabalho.

Os resultados obtidos através da Figura 38 reforçam que as características de variação de velocidade atenderam as expectativas de redução de consumo de energia elétrica. Já que, quando considerado os valores médios de consumo de energia elétrica, o ganho da implementação do projeto alcançou 40,66% aproximadamente.

No entanto, em alguns pequenos períodos do processo conforme a Figura 37 o sistema apresentou uma demanda de potência superior ao período de velocidade fixa, justamente os períodos de maior consumo de água. Embora o ganho econômico seja agradável, fica de sugestão para trabalhos futuros que os picos de potência podem ser reduzidos através de ajustes finos de programação.

A programação do sistema de controle contempla que, em situações de queda de pressão e/ou a máquina de fluxo 1 não consiga atender a demanda de vazão. O sistema de controle decrementa um intervalo de tempo de 30 segundos, caso não haja normalização, aciona a máquina de fluxo 2. Dessa maneira, os picos de consumo de potência são causados por uma quantidade considerável de partidas da máquina de fluxo 2, em curtos intervalos de tempo.

Para buscar melhoras nesse aspecto, pode-se elevar a faixa de frequência de trabalho da máquina de fluxo 1, para um valor não muito superior a 65 Hz e aumentar o intervalo de espera para a partida da segunda máquina. Considerando estes ajustes é possível reduzir picos de potência. No entanto, pode surgir um *delay* (*atraso*) na resposta do controle de pressão. Assim sendo, deve-se garantir que os ajustes não interfiram nas atividades de processo do frigorífico.

REFERÊNCIAS

ABNT, A. (2004). NBR 5410: **Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT.

ALBANEZE, D. B. (Novembro de 2012). **Análise do Consumo de Energia Elétrica com a Instalação de um Inversor de Frequência no Sistema de Abastecimento de Água do Bairro Aero Rancho em Campo Grande - MS**. Campo Grande, MS, Brasil: UFMS.

ALÉ, J. A. (2010). **Sistemas Fluidomecânicos - Sistema de bombeamento**. Porto Alegre: PUCRS - FENG.

AZEVEDO, V. L., & MENDES, L. E. (2008). **Análise Transitória do Motor de Indução Trifásico**. Brasília, Brasília, Brasil: Universidade de Brasília.

BICCA, G. B. (2006). **Modelagem Hierárquica de Trocadores de Calor Casco e Tubos**. Porto Alegre, RS, BR: UFRGS.

BOSE, B. K. (2002). **Modern Power Electronics and AC Drives** Prentice Hall.

CAMARGO, C. B. (2011). **Acionamentos de Motores de Indução Através das Técnicas de Controle Escalar e Vetorial**. Dissertação, 116. Sorocaba, SP: Programa de Graduação da Faculdade de Engenharia de Sorocaba.

CHAPMAN, S. J. (2013). **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

COPOM. (2014). **Comitê de Política Monetária**. Acesso em 22 de 09 de 2014, disponível em Banco Central: <https://www.bcb.gov.br/?COPOM185>

DONIZETTI, J. d. (2010). **Proposição de Um Sistema de Planejamento da produção Olerícola nas Unidade de Produção Familiar**. Porto Alegre, RS, Brasil: UFRG.

DOSSAT, J. R. (2004). **Princípios de Refrigeração**. Hermus.

DRANKA, G. G. (2012). **Análise de Oscilações de Tensão Devido À Partida de Motores Elétricos de Grande Porte em Redes Elétricas industriais com Multialimentadores**. Pato Branco, PR, BR: UTFPR.

DUTRA, J. B. (2005). **Eficiência Energética no Controle da Vazão em Sistemas de Bombeamento de Água**. 18. Paraíba do Sul.

EMBRASUL. (2015). **Analizador De Energia**. Acesso em 11 de 08 de 2015, disponível em Embrasul: <http://www.embrasul.com.br/produtos/re6000/>

FACCO, A., & VIEIRA, F. D. (2012). **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da implantação de um Grupo Motor-Gerador em uma Granja Suinícola**. Pato Branco, Paraná, Brasil: UTFPR.

FERREIRA, C. C. (16 de Março de 2014). **Trocadores de Calor (Definição Quanto a sua Função Operacional)**. Acesso em 15 de 08 de 2015, disponível em Inspeção de Equipamentos: estudos de casos: <http://inspecaoequipto.blogspot.com.br/2014/03/trocadores-de-calor-definicao-quanto.html>

FILHO, J. M. (2002). **Instalações Elétricas Industriais**. Rio de Janeiro: LTC.

FITZGERALD, A. E., KINGSLEY, C. J., & UMANS, S. D. (2003). **Máquinas Elétricas com introdução à eletrônica de potência** (6ª ed.). Nova Iorque: Bookman.

FRANCHI, C. M. (2011). **Acionamentos Elétricos**. São Paulo: Érica.

GOMES, H. P. (2010). **Sistema de Saneamento - Eficiência Energética**. João Pessoa: UFPB.

GRIPP, P. E. (2005). **Estudo das Tecnologias e Aplicações dos Inversores de Frequência de Média Tensão**. Dissertação, 65. Vitória, ES: Programa de Pós Graduação da Universidade Federal do Espírito Santo.

HENN, É. L. (2001). **Máquina de Fluido**. Máquina de Fluido. Santa Maria, RS, Brasil: UFSM.

IMBIL. (2015). **IMBIL Soluções em Bombeamento**. Acesso em 16 de 08 de 2015, disponível em http://www.imbil.com.br/Imbil/upload/produto/Portugues/INI_web.pdf IMBIL:

JACUZZI. (2006). **Noções de Hidráulica**. Acesso em 21 de 08 de 2015, disponível em <http://www.instartpiscinas.com.br/pdf/hidraulica/nocoos.pdf>

KARAVASILIS, R. (2008). **Estudo dos Motores Acionados por Conversores de Frequência e Influências no sistema isolante**. Dissertação, 148. Florianópolis, SC, BR: Programa de pós Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina.

KSB. (2005). **Selecting Centrifugal Pumps**. Frankenthal, Renânia-Palatinado, Germany: KSB Aktiengesellschaft,.

Lima, J. D. (2010). **Proposição de um Sistema de Planejamento da Produção Olerícola nas Unidades de Produção Familiar**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Escola de Engenharia, Porto Alegre.

Luchtemberg, I. C., Luchtemberg, I. C., Adamczuk, G., & Trentin, M. G. (12 a 15 de Outubro de 2010). **Viabilidade Técnica e Econômica da Verticalização na Produção de Válvulas Reguladoras de Pressão para Painéis de Pressão em Indústrias de Artefatos de Alumínio**. XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, p. 12.

MÁQUINAS DE FLUXO, N. d. (2009). **MÁQUINAS DE FLUXO**, Acesso em 02 de 10 de 2014, disponível em <ftp://ftp.mecanica.ufu.br/LIVRE/Ribeiro/maquinas%20de%20fluxo/textos%20basicos/notas.pdf>

MATHWORKS. (2015). **MathWorks**. Acesso em 15 de 09 de 2015, disponível em <http://www.mathworks.com/help/index.html>

MICRONICS, L. (2012). **micronicsflowmeters**. Acesso em 10 de 08 de 2015, disponível em <http://micronicsflowmeters.com/docs/PF330%20Spanish%20User%20Manual%20Issue%203%209.pdf> Micronics:

MUKHERJEE, R. (1998). **Effectively Design Shell-and-Tube Heat Exchangers**. Engineers India Ltd, 17.

MUNIZ, R. C. (2002). **Princípio da Comunicação**. Vitória: Volume 3.

NOVUS. (2015). **www.novus.com.br**. Acesso em 15 de 08 de 2015, disponível em http://www.novus.com.br/site/default.asp?TroncoID=621808&SecaolD=703635&SubsecaolD=0&Template=../catalogos/layout_produto.asp&ProdutoID=170838

OGATA, K. (1997). **Engenharia de Controle Moderno**, 3ªEd. Rio de Janeiro: LTC.

OLIVEIRA, A. L., MORAIS, M. S., & PIRES, I. A. (2012). **Estudo de Interferências na Alimentação Elétrica de Motores de Indução por Inversores de Frequência**. E-xata, UniBH, 159-173.

PAZ, D. L. (16 de 10 de 2014). **Criatório Nadas Branco**. Acesso em 08 de 08 de 2015, disponível em <http://criatorionadasbranco.blogspot.com.br/2014/06/como-funciona-o-processo-de-abate-de.html>

PUCRS. (2015). **www.feng.pucrs.br**. Acesso em 12 de 08 de 2015, disponível em www.feng.pucrs.br/~fdosreis/ftp/Tese/QEE/QEE_ANEXO1.pdf

QUEIROZ, F. C. (2008). **Controle vetorial de velocidade de um motor de indução trifásico com estimação neural de fluxo**. Dissertação, 87. Natal: Programa de Pós Graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

REUTERS. (2014). **Agencia de Notícia Reuters Brasil**. Acesso em 23 de 09 de 2014, disponível em <http://br.reuters.com/article/topNews>

RODRIGUES, L. M. (2013). **Mecânica dos fluidos**. Acesso em 25 de 09 de 2014, disponível em <http://www.engbrasil.eng.br/pp/mf/aula17.pdf>

ROZENFELD, K. F. (19 de Dezembro de 2008). **Análise de Viabilidade Econômica**. São Carlos, PR, Brasil: USP.

RUBBO, P. N. (2014 de Dezembro de 2014). **Determinação do Coeficiente Global de Transferência de Calor de um Condensador do Tipo Casco e Tubo de um Chiller por Absorção de Amônia**. Araranguá, PR, BR: UFSC.

SIEMENS. (2015). **www.siemens.com.br**. Acesso em 01 de 08 de 2015, disponível em Siemens Brasil: <http://w3.siemens.com.br/automation/br/pt/seguranca-de->

maquinas/interfaces-de-seguranca/plc-de-seguranca/simatic-s7-300/Pages/simatic-s7-300.aspx

SOCIESC. (2015). **Acionamento de Motores com o Inversor de Frequência**. Curitiba, PR, Brasil: SOCIESC.

SRINIVAS, B., PANDA, S., & MISHRA, A. (2009). **Control of Voltage Source Inverters using PWM/SVPWM for Adjustable Speed Drive Applications**. Dissertação, 48. Rourkela: National Institute Of Technology in Electrical Engineering Rourkela.

USP. (2014). **Estudo das Bombas: Aplicações da Análise Dimensional e da Teoria da Semelhança**. Acesso em 25 de 09 de 2014, disponível em <http://sites.poli.usp.br/d/pme2237/Lab/PME2237-RL-Bombas-site.pdf>

YASKAWA. (07 de 2013). **Economia de Energia**. Acesso em 05 de 08 de 2015, disponível em [yaskawa: http://www.yaskawa.com.br/wp-content/uploads/2013/07/Economia-de-Energia.pdf](http://www.yaskawa.com.br/wp-content/uploads/2013/07/Economia-de-Energia.pdf)

ANEXO A — Processo de Escaldagem



ANEXO A: Frango saindo do processo de escaldagem e entrando na depenadeira.
Fonte: (PAZ, 2014)

ANEXO B — Medidor de vazão ultrassônico Micronics modelo Portaflow 330



ANEXO B: medidor de vazão ultrassônico Micronics modelo Portaflow 330.
Fonte: (MICRONICS, 2012)

ANEXO C — Analisador de Energia RE6000 Embrasul

Fone: 51 3358.4000
E-mail: vendas@embrasul.com.br

 **EMBRASUL**

Analizador de Energia
RE6000/PT(Portátil)



The image shows a blue and black portable energy analyzer. The screen displays the following data: U 118,78 V, I 290,00 A, PA 20,81 W, and FP 0,603. The device has several buttons labeled F1, F2, F3, F4, F5, and Em.

Avaliação de energia:

- Sobretensão;
- Subtensão;
- Harmônicas;
- Transientes;
- Ajuste do fator de potência;
- Estudo do fluxo de carga;
- Laudos para certificações;
- 505 da ANEEL;
- Grandezas em RMS e TRUE RMS.

Planejamento e racionalização do consumo de energia (Gestão):

- Análise da confiabilidade do sistema elétrico;
- Aumento de carga;
- Mercado Livre de energia / Assessoria técnica para migração;
- Otimização dos contratos com a concessionária;
- Eliminação de multas;
- Reenquadramento Tarifário.

Evite perdas e dimensione soluções rapidamente:

- Identificar causas de problemas remotamente;
- Detectar e prevenir problemas de QEE através de manutenções preditivas;
- Dimensionamento de Filtros de harmônicas e bancos de FP;
- Análise da criticidade do sistema.

www.embrasul.com.br

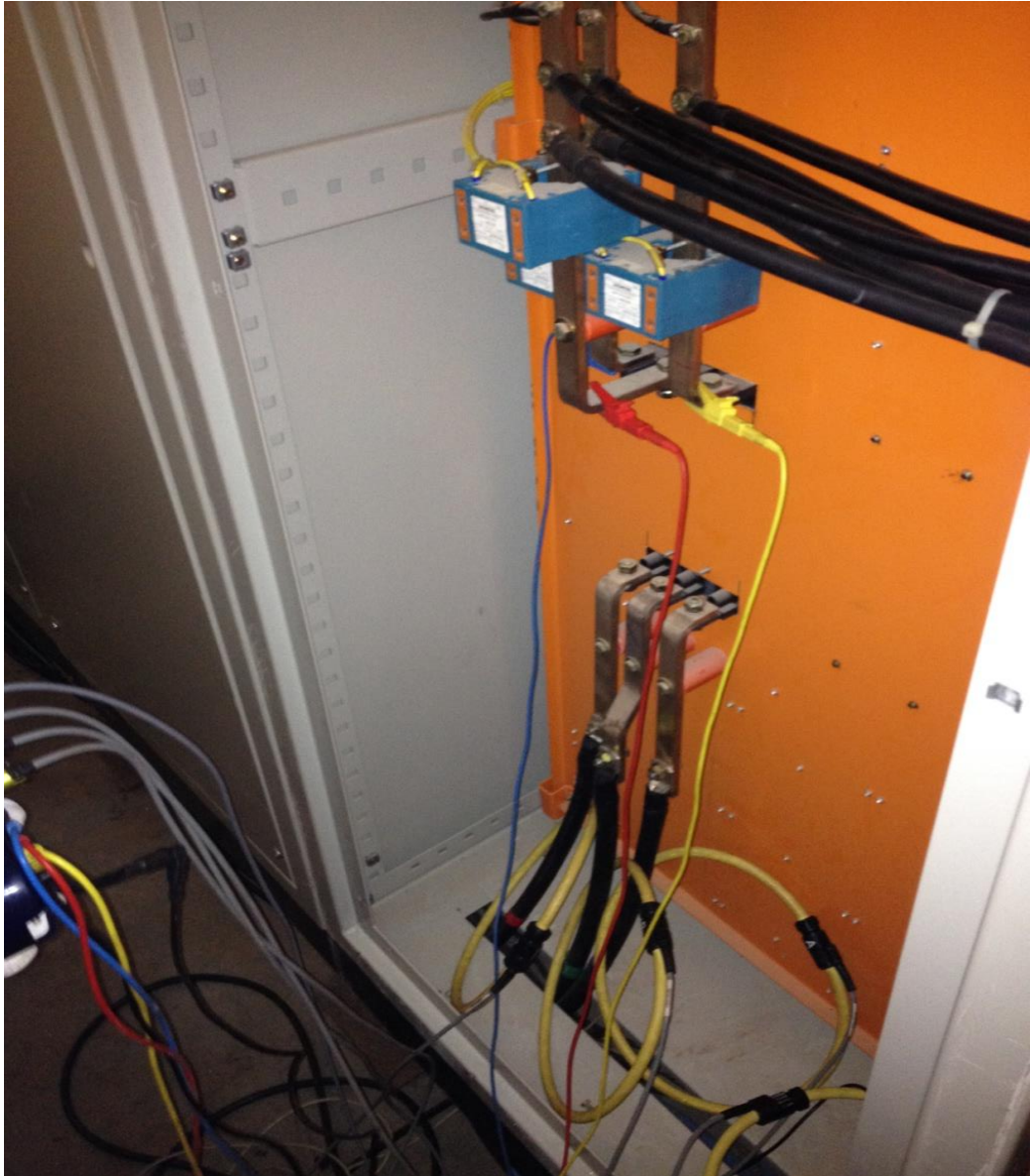
ANEXO C: Analisador de energia RE6000 Embrasul.
Fonte: (EMBRASUL, 2015)

ANEXO D — Instalação do Analisador de Energia RE6000 Embrasul



**ANEXO D: Instalação no campo analisador de energia RE6000 Embrasul.
Fonte: Autoria própria.**

ANEXO E — Instalação do Analisador de Energia RE6000 Embrasul



**ANEXO E: Instalação no campo analisador de energia RE6000 Embrasul.
Fonte: Autoria própria.**

ANEXO F: Método de instalação e determinação das colunas das tabelas de capacidade de condução.

Tipo de linha elétrica	Método de instalação (1)	Condutor isolado	Cabo unipolar	Cabo multipolar
		Fio Pirastic Cabo Pirastic Cabo Pirastic Flex	Cabo Sintenax Flex Cabo Sintenax Cabo Eprotenax Gsette Cabo Eprotenax Cabo Voltalene Cabo Afumex	Cabo Sintenax Flex Cabo Sintenax Cabo Eprotenax Gsette Cabo Eprotenax Cabo Voltalene Cabo Afumex
Afastado da parede ou suspenso por cabo de suporte (2)	15/17	—	F	E
Bandejas não perfuradas ou prateleiras	12	—	C	C
Bandejas perfuradas (horizontal ou vertical)	13	—	F	E
Canaleta fechada no piso, solo ou parede	33/34/72/72A/75/75A	B1	B1	B2
Canaleta ventilada no piso ou solo	43	—	B1	B1
Diretamente em espaço de construção - $1,5D_e \leq V < 5D_e$ (4)	21	—	B2	B2
Diretamente em espaço de construção - $5D_e \leq V < 50D_e$ (4)	21	—	B1	B1
Diretamente enterrado	62/63	—	D	D
Eletrocalha	31/31A/32/32A/35/36	B1	B1	B2
Eletroduto aparente	3/4/5/6	B1	B1	B2
Eletroduto de seção não circular embutido em alvenaria	27	—	B2	B2
Eletroduto de seção não circular embutido em alvenaria - $1,5D_e \leq V < 5D_e$ (4)	26	B2	—	—
Eletroduto de seção não circular embutido em alvenaria - $5D_e \leq V < 50D_e$ (4)	26	B1	—	—
Eletroduto em canaleta fechada - $1,5D_e \leq V < 20D_e$ (4)	41	B2	B2	—
Eletroduto em canaleta fechada - $V \geq 20D_e$ (4)	41	B1	B1	—
Eletroduto em canaleta ventilada no piso ou solo	42	B1	—	—
Eletroduto em espaço de construção	23 / 25	—	B2	B2
Eletroduto em espaço de construção - $1,5D_e \leq V < 20D_e$ (4)	22 / 24	B2	—	—
Eletroduto em espaço de construção - $V \geq 20D_e$ (4)	22 / 24	B1	—	—
Eletroduto embutido em alvenaria	7 / 8	B1	B1	B2
Eletroduto embutido em caixilho de porta ou janela	73 / 74	A1	—	—
Eletroduto embutido em parede isolante	1 / 2	A1	A1	A1
Eletroduto enterrado no solo ou canaleta não ventilada no solo	61 / 61A	—	D	D
Embutimento direto em alvenaria	52 / 53	—	C	C
Embutimento direto em caixilho de porta ou janela	73 / 74	—	A1	A1
Embutimento direto em parede isolante	51	—	—	A1
Fixação direta à parede ou teto (3)	11 / 11A / 11B	—	C	C
Forro falso ou piso elevado - $1,5D_e \leq V < 5D_e$ (4)	28	—	B2	B2
Forro falso ou piso elevado - $5D_e \leq V < 50D_e$ (4)	28	—	B1	B1
Leitos, suportes horizontais ou telas	14 / 16	—	F	E
Moldura	71	A1	A1	—
Sobre isoladores	18	G	—	—

ANEXO F: Método de instalação e determinação das colunas das tabelas.

Fonte: (PUCRS, 2015)

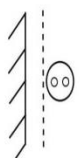
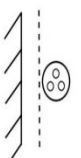
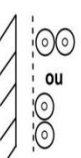
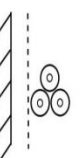
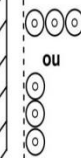
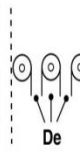
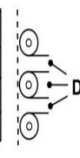
ANEXO G: Capacidade de condução de corrente dos condutores elétricos.

Seções nominais (mm ²)	MÉTODOS DE INSTALAÇÃO DEFINIDOS NA TABELA 1											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados	2 condutores carregados	3 condutores carregados
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	14	18	15
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	37	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	90	71	73	61
16	81	73	76	68	100	88	91	80	107	96	95	79
25	106	95	99	89	133	117	119	105	138	119	121	101
35	131	117	121	109	164	144	146	128	171	147	146	122
50	158	141	145	130	198	175	175	154	209	179	173	144
70	200	179	183	164	253	222	221	194	269	229	213	178
95	241	216	220	197	306	269	265	233	328	278	252	211
120	278	249	253	227	354	312	305	268	382	322	287	240
150	318	285	290	259	407	358	349	307	441	371	324	271
185	362	324	329	295	464	408	395	348	506	424	363	304
240	424	380	386	346	546	481	462	407	599	500	419	351
300	486	435	442	396	628	553	529	465	693	576	474	396
400	579	519	527	472	751	661	628	552	835	692	555	464
500	664	595	604	541	864	760	718	631	966	797	627	525
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1122	923	711	596
800	885	792	805	721	1158	1020	952	837	1311	1074	811	679
1000	1014	908	923	826	1332	1173	1088	957	1515	1237	916	767

(*) De acordo com a tabela 32 da NBR 5410/1997.

ANEXO G: Capacidade de condução de corrente, em amperes, para os métodos de referência de condutores carregados.
Fonte (PUCRS, 2015)

ANEXO H: Capacidade de condução de corrente para os vários métodos de instalação.

Seções nominais (mm ²)	MÉTODOS DE INSTALAÇÃO DEFINIDOS NA TABELA 1						
	Cabos multipolares		Cabos unipolares ou condutores isolados				
	E	E	F	F	F	G	G
	Cabos bipolares	Cabos tripolares e tetrapolares	2 condutores isolados ou 2 cabos unipolares	Condutores isolados ou cabos unipolares em trifólio	3 cabos unipolares ou 3 condutores isolados		
							
1	2	3	4	5	6	7	8
0,5	13	12	13	10	10	15	12
0,75	17	15	17	13	14	19	16
1	21	18	21	16	17	23	19
1,5	26	23	27	21	22	30	25
2,5	36	32	37	29	30	41	35
4	49	42	50	40	42	56	48
6	63	54	65	53	55	73	63
10	86	75	90	74	77	101	88
16	115	100	121	101	105	137	120
25	149	127	161	135	141	182	161
35	185	158	200	169	176	226	201
50	225	192	242	207	216	275	246
70	289	246	310	268	279	353	318
95	352	298	377	328	342	430	389
120	410	346	437	383	400	500	454
150	473	399	504	444	464	577	527
185	542	456	575	510	533	661	605
240	641	538	679	607	634	781	719
300	741	621	783	703	736	902	833
400	892	745	940	823	868	1085	1008
500	1030	859	1083	946	998	1253	1169
630	1196	995	1254	1088	1151	1454	1362
800	1396	1159	1460	1252	1328	1696	1595
1000	1613	1336	1683	1420	1511	1958	1849

(*) De acordo com a tabela 34 da NBR 5410/1997.

ANEXO H: Capacidade de condução de corrente, em ampéres, para os métodos de referência.

Fonte: (PUCRS, 2015)

ANEXO I: Circuito equivalente da máquina de indução trifásica acionada através do inversor de frequência.



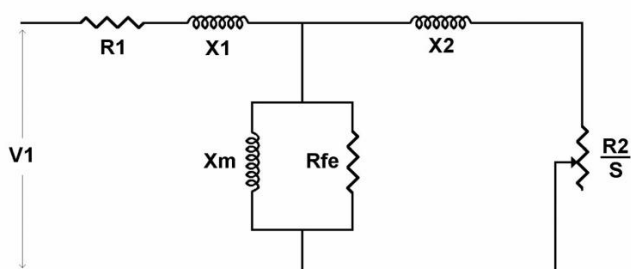
WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S/A.

Data: **09.09.2015**
De:
e-mail:

Ref. N.º:
Folha: **1/1**

Para:
At:

N.º Fax:



R1	0.0752	X1	0.5460
R2	0.0503	X2	0.6366
Rfe	651.6696	Xm	23.7753
Para ligação	T		

valores referenciados em W, à 20°C.

Dados do Motor

N.º de Série	Item	
Potência	55 kW (75 HP-cv)	2 Pólos 380 V 60 Hz
Carcaça	225S/M	F c/ Dt 80 K - FS 1.15 RPM 3565
Linha do Produto	IP55 Alto Rendimento Bomba Monobloco JM	

Atenciosamente,

Reginaldo Osnir Ronchi

**ANEXO I: Circuito equivalente da máquina de Indução trifásica fornecido pelo fabricante.
Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S/A.**