

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

LEONARDO LUIZ SZYDLOSKI

**AUTOMAÇÃO E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA TORRE DE
RESFRIAMENTO EM UMA PLANTA METALÚRGICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2020**

LEONARDO LUIZ SZYDLOSKI

**AUTOMAÇÃO E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA TORRE DE
RESFRIAMENTO EM UMA PLANTA METALÚRGICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como requi-
sito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica, Departamento de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Fernando Luís Tartari Peres

ERECHIM - RS

2020

LEONARDO LUIZ SZYDLOSKI

**AUTOMAÇÃO E ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE UMA TORRE DE
RESFRIAMENTO EM UMA PLANTA METALÚRGICA**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como requi-
sito parcial à obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Elétrica, Departamento de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 9 de dezembro de 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Esp. Fernando Luís Tartari Peres (Orientador)
URI Erechim

Prof. Esp. Sergio Bordignon (Examinador)
URI Erechim

Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Examinador)
URI Erechim

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pelo dom da vida e a oportunidade de estar nesse momento, concluindo esta etapa tão importante para mim.

A minha família, em especial minha mãe Judite Paulina Polinski e meus irmãos Vinícius Matheus Szydloski e Taynã Paula Szydloski que sempre estiveram ao meu lado, o apoio e incentivo foram fundamentais durante toda a caminhada.

Aos meus colegas, que me acompanharam nessa trajetória de muito estudo, dedicação e determinação. Foram inúmeros finais de semana e madrugadas que passamos reunidos trocando conhecimentos e experiências. De modo especial, deixo aqui registrado o quanto sou grato aos colegas Afonso Carlos Hinkel Júnior, Cristiano Rafael França, Jean Michel Brondani, Lucas Serrano e Osmar Francisco Zaparoli Junior que muito me ajudaram e incentivaram na realização deste sonho. Amigos pra toda vida!

Aos meus amigos de infância, que sempre estavam disponíveis para me apoiar nos momentos de maior preocupação. Obrigado pelas festas, encontros e boas risadas que sempre me fizeram tão bem.

Ao meu orientador Prof. Fernando Luís Tartari Peres pelos ensinamentos compartilhados, auxílio e orientação na elaboração deste trabalho.

A Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - Câmpus de Erechim, por proporcionar toda a infraestrutura dos laboratórios nos quais trabalhamos durante todo o período, ao grupo de professores que sempre nos apoiaram e orientaram, bem como aos funcionários que sempre nos atenderam com muita atenção e presteza.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades, lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram conquistadas do que parecia impossível.

(Charles Chaplin)

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo sobre análise de eficiência energética e automação de uma torre de resfriamento em uma planta metalúrgica. Para contextualizar, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o crescimento da demanda energética brasileira, automação industrial e alguns dispositivos importantes para processo de automação. O projeto tem como objetivo, realizar uma melhoria geral do funcionamento do sistema, fazendo análise de eficiência energética e automação do processo de resfriamento, buscando formas e métodos de redução do consumo. Para a realização do estudo, foi utilizado o analisador de energia RE6000. Os dados foram coletados visando avaliar os pontos onde há má utilização e desperdício de energia do equipamento. Para simulação do projeto foi utilizado o *Software* CAdESIMU, implementando o controle em malha aberta e fechada nos diferentes processos, e ainda simulações de dispositivos de acionamentos adequado para cada situação. Foi realizado o processo de prototipagem em bancada experimental para validação do projeto da automação. A automação tem como principais dispositivos o inversor de frequência e o controlador lógico programável, onde é realizada a programação lógica e o controle de velocidade da bomba centrífuga. O processo mostrou uma redução de 35,15 % de consumo de energia ao mês.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Automação, Torre de Resfriamento.

ABSTRACT

This work presents the development of a study on the energy efficiency and automation analysis of a cooling tower in a metallurgical plant. To put it in context, a bibliographic review was carried out on the growth of Brazilian demand, industrial automation and some important devices for the automation process. The project aims to make a general improvement in the system operation, making efficiency analysis and automation of the cooling process, looking for ways and methods of reducing consumption. To carry out the study, it was used for the analysis of energy RE6000. The data was collected to evaluate the points where there is misuse and waste of energy from the equipment. To simulate the project, CAdESIMU textit Software was used, implementing open and closed loop control in the different processes, as well as simulations of appropriate drive devices for each situation. The bench prototyping process was carried out at URI-Erechim University with the intent of validating the automation project. The main devices of automation are the frequency inverter and the programmable logic controller, where the logic programming and the speed control of the centrifugal pump are carried out. The process showed a reduction of 35,15 % in energy consumption per month.

Keywords: Automation, Energy efficiency, Cooling Tower

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processo do resfriamento.....	15
Figura 2 – Consumo de energia elétrica dividido por classes (GWh).....	16
Figura 3 – Partida direta e estrela-triângulo.....	19
Figura 4 – Ângulo de disparo da <i>Soft-starter</i>	20
Figura 5 – Diagrama de blocos inversor de frequência.....	20
Figura 6 – Tensão X Frequência.....	21
Figura 7 – Curva operacional dos motores.....	22
Figura 8 – Pirâmide de automação.....	23
Figura 9 – Diagrama de blocos CLP.....	25
Figura 10 – Linguagem <i>ladder</i>	25
Figura 11 – Torre Resfriamento	27
Figura 12 – Analisador de energia.....	28
Figura 13 – Programação do CLP.....	30
Figura 14 – Controle de malha aberta.....	31
Figura 15 – Controle de malha fechada.....	31
Figura 16 – Programação do CLP.....	32
Figura 17 – Acionamento dos motores e bomba.....	33
Figura 18 – Inversor de Frequência CFW11.....	34
Figura 19 – Controlador Lógico Programável.....	36
Figura 20 – Bomba centrífuga FAMAC.....	37
Figura 21 – Consumo de energia atual.....	40
Figura 22 – Consumo de energia projetada.....	41
Figura 23 – Consumo atual de um ventilador.....	43
Figura 24 – Consumo projetado de um ventilador.....	43
Figura 25 – Consumo bomba externa.....	45
Figura 26 – Protótipo.....	46
Figura 27 – Consumo do protótipo operando a 30 Hz.....	47
Figura 28 – Consumo do protótipo operando a 40 Hz.....	47
Figura 29 – Consumo do protótipo operando a 50 Hz.....	48
Figura 30 – Consumo do protótipo operando a 60Hz.....	49
Figura 31 – Consumo do protótipo com o sistema de automação.....	49
Figura 32 – Retorno Financeiro.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Entradas do TPW04	37
Tabela 2 – Saídas do TPW04.....	38
Tabela 3 – Parametrização Inversor de Frequência.....	39
Tabela 4 – Consumo atual e projeto da bomba interna em W.....	42
Tabela 5 – Consumo atual e projeto da bomba interna em reais.....	42
Tabela 6 – Consumo atual em W e projeto ventiladores.....	44
Tabela 7 – Consumo em reais atual e projeto ventiladores.....	44
Tabela 8 – Consumo atual e projeto do protótipo em W.....	50
Tabela 9 – Consumo atual e projeto do protótipo em reais.....	50
Tabela 10 – Consumo Atual e prototipado da bomba água interna	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
SCR's	<i>Silicon Controlled Rectifier</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivo	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Torre de Resfriamento de Água	14
2.2 Energia	15
2.3 Eficiência Energética	16
2.4 Motores Elétricos de Indução	17
2.5 Bombas	17
2.6 Tipos de Acionamentos	18
2.6.1 Partida Direta	18
2.6.2 Partida Estrela-Triângulo	18
2.6.3 Partida com <i>Soft-Starter</i>	19
2.6.4 Partida com Inversores de Frequência	20
2.7 Automação Industrial	22
2.7.1 Controladores Lógicos Programáveis	23
2.7.2 Arquitetura CLP	24
2.7.3 Linguagem de Programação	24
2.8 Sensor de Temperatura PT100	26
3 METODOLOGIA	27
3.1 Descrição do Processo de Refrigeração de Água	27
3.2 Análise do Consumo Energético	28
3.3 Descrição do Processo de Automação Proposto	29
3.4 Simulações	31
3.5 Prototipagem	33
3.5.1 Materiais Utilizados	34
3.5.1.1 Inversor de Frequência CFW11	34
3.5.2 Controlador Lógico Programável TPW04-360BR-D	35
3.6 Motobomba centrífuga FAMAC	36
3.7 Programação do CLP TPW04	37
3.8 Parâmetros do inversor de frequência	38

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1 Análise do Consumo Energético	40
4.1.1 Bomba Interna	40
4.1.2 Análise dos Ventiladores	42
4.1.3 Bomba Externa	44
4.2 Resultados Experimental	45
4.3 Retorno do Investimento	50
5 CONCLUSÕES	52
5.1 Perspectivas Futuras	53
REFERÊNCIAS	54
APÊNDICES	56

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico dos últimos tempos como a indústria 4.0, robótica, geração de energia renovável, carros elétricos entre outros, fizeram com que os processos de industrialização passassem por inúmeras modernizações. Esses processos e modelos de plantas industriais estão sendo redefinidos, o que vêm ocasionando um aumento expressivo do uso de energia elétrica. Em um panorama industrial atual a energia elétrica é a base do funcionamento produtivo. O gasto de energia é significativamente alto levando em consideração o acúmulo de motores e equipamentos elétricos.

Este é um dos assuntos predominantes nas pautas de reuniões empresariais onde as indústrias buscam tornar-se mais atrativas, eficientes e competitivas. A redução de custos com energia elétrica e matéria prima para alcançar uma maior produtividade é o fator essencial de estudos, pesquisas e projetos. A análise da eficiência energética é uma das alternativas para solucionar problemas de gastos desnecessários e utilização inadequada dos equipamentos. Ela tem como objetivo otimizar o processo, melhorando o rendimento mecânico e elétrica dos equipamentos, sendo primordial a sua viabilidade pois atua em todos os setores, desde usinas grandes geradoras de energia elétrica até pequenas indústrias (MEDEIROS; QUELHAS; LAMEIRA, 2011).

Após identificação de problemas ou necessidade de melhorias no processo produtivo, é necessário fazer um levantamento detalhado dos dados específicos do processo e procurar formas de otimizar o funcionamento do equipamento, maneiras de reduzir o consumo de energia bem como matéria prima, focando nesses aspectos e redimensionando as ações a indústria obtém uma maior eficiência de produção e lucro (SERRENHO; BERTOLDI; CAHILL, 2015).

A história nos mostra que o processo de automação vem se aperfeiçoamento desde muito tempo atrás, um dos marcos históricos foi a revolução industrial onde surgiram as máquinas a vapor que substituíram grande parte dos processos que eram feitos manualmente por pessoas ou animais. Outro marco importante foi no século XIX, onde surgiram os primeiros motores elétricos. Com a Revolução Industrial, a indústria teve um aumento significativo na produção, consolidando, dessa forma, plenamente, a mecanização (FILHO, 2014).

As grandes evoluções pela qual passa a humanidade leva o setor industrial, como um todo, a sofrer pressões do mercado e conviver com novas exigências, padrões e necessidades. Este trabalho propõem a análise da eficiência energética e automação em um processo de resfriamento de água. A integração dos dispositivos de acionamentos, inversores de frequência e *Soft-starter*, serão realizadas por meio de um CLP, no qual a finalidade é monitorar a variável

temperatura, ao mesmo tempo controlar os acionamentos e a velocidade dos motores e das bombas, objetivando uma maior qualidade no processo com menor custo. A indústria precisa agir com inteligência produzindo mais e melhor.

1.1 Objetivo

Os objetivos deste presente trabalho são classificados em objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um estudo de análise de eficiência energética e automação de uma torre de resfriamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o funcionamento do sistema de refrigeração já existente na planta industrial metalúrgica;
- Identificar possíveis pontos de melhorias do sistema de refrigeração;
- Estudar diferentes metodologias para aumentar a eficiência energética;
- Determinar os componentes elétricos e eletrônicos que serão necessários para o desenvolvimento do projeto de automação em uma bancada experimental;
- Calcular o consumo de energia do sistema de refrigeração existente e do protótipo montando em bancada experimental;
- Coletar dados de tensão, corrente e potência utilizando o analisador de energia do sistema de refrigeração da planta metalúrgica;
- Projetar um sistema de automação visando aumentar a eficiência energética da torre de resfriamento;
- Montar o protótipo em bancada simulando o sistema de refrigeração da planta;
- Coletar e analisar os dados do protótipo verificando a redução do consumo de energia elétrica;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será evidenciado um breve estudo sobre a eficiência energética e automação, em específico, estudos aplicados em torres de resfriamentos de água. Também serão exemplificados alguns métodos de automação para a redução do consumo de energia utilizando diferentes processos de acionamento de motores e dispositivos de controle.

2.1 Torre de Resfriamento de Água

Segundo Incropera et al. (2008), são três os métodos de troca de calor existente: condução, convecção e radiação. O primeiro método, processo de condução, implica em transferência de energia térmica de meios estacionários, podendo ser ele sólido ou líquido, por meio de contato entre os dois elementos, fazendo com que a molécula de maior energia térmica transfere sua energia para uma de menor. No processo de convecção a troca de energia térmica ocorre pelo contato de uma superfície com um fluido em movimento. Na troca de calor por irradiação, todos os corpos que possuem temperatura maior que o zero absoluto, emitem ondas eletromagnéticas, trocando energia com outros corpos de diferentes temperaturas.

Normalmente os trocadores de calor são classificações de várias formas, algumas delas de acordo com o modelo de construção, finalidade, método de transferência de energia calorífica, tipo de contato direto ou indireto e outros (SABINO, 2008).

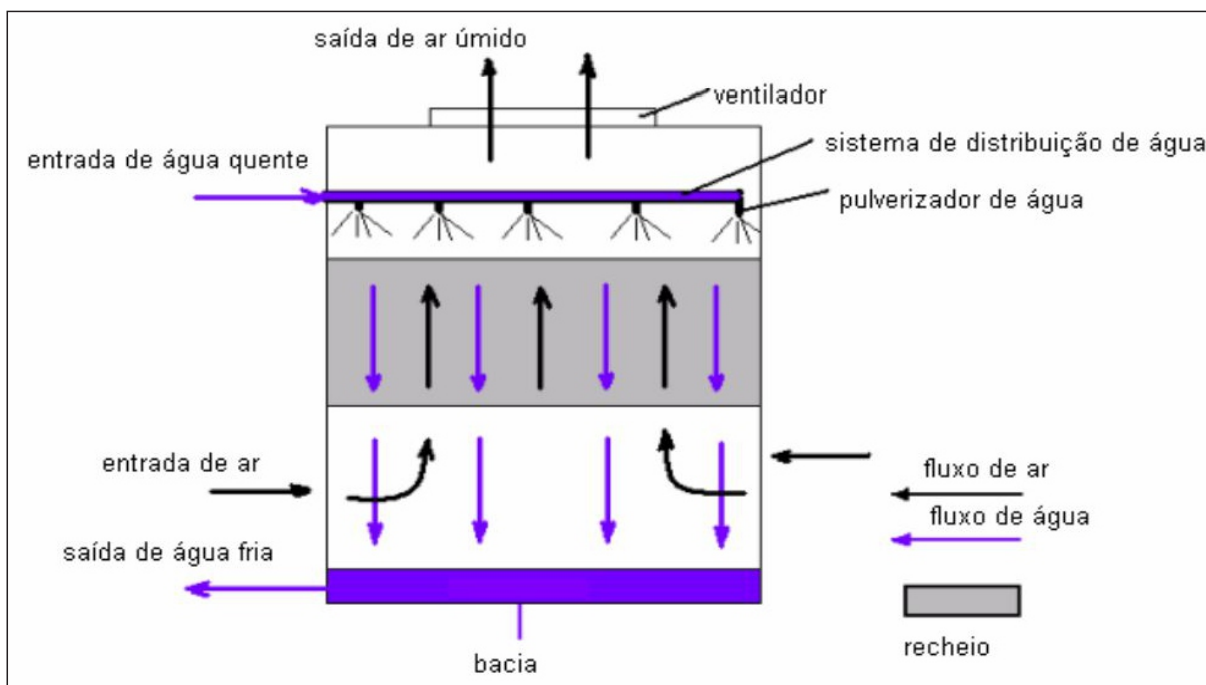
As torres de resfriamento industriais são trocadores de calor. Os principais modelos de construção utilizados em torres de resfriamento são: por placas, casco e tubos. Estes equipamentos promovem a retirada da carga térmica de um sistema ou de máquinas industriais, mantendo temperatura para a operação dos mesmos (CRUZ, 2019).

O desempenho de uma torre de resfriamento é muito variável, um dos principais fatores que implicam em uma boa eficiência é o clima. Por exemplo, no inverno a temperatura do ar diminui, conseqüentemente a temperatura da água de saída será mais baixa, caso seja mantida a carga térmica constante, diminuindo a vazão de água que circula na planta, reduz o consumo de energia. No verão ocorre o inverso, a temperatura do ar aumenta, aumentando a temperatura da água de saída fazendo necessário o aumento da vazão, tendo em vista o aumento da quantidade de fluido passando durante a troca de calor (CRUZ, 2019).

Segundo Mello (2008), há necessidade de resfriar um fluido de um processo industrial para redução de custos de operação, conservação das máquinas e de impactos negativos no meio ambiente, fazendo a reutilização deste fluido quente, resfriando-o através de uma torre de

resfriamento. Atualmente as indústrias optam por torres de resfriamento com circuito fechado, onde tem um melhor aproveitamento da água, pois a mesma não é descartada figura 1.

Figura 1 – Processo do resfriamento



Fonte: (MELLO, 2008)

2.2 Energia

A demanda de energia vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, tanto nos perímetros urbanos como rurais. A energia tornou-se um dos principais elementos na qualidade de vida das pessoas, oferecendo um maior conforto residencial, empresarial, socioeconômico e industrial.

As empresas representam 39 % do consumo da demanda de energia produzida no Brasil. O que justifica a grande preocupação em tornar seus processos industriais mais eficientes e competitivos no mercado. Reduzir custos, por meio de investimentos em tecnologia e automatizando de seus processos é um dos meios para alcançar esses objetivos. Segundo dados da Agência Internacional de Energia - IEA (2019), o aumento da demanda global de energia elétrica irá aumentar cerca de 2,1 % ao ano até 2040.

A figura 2 mostra o consumo de energia elétrica no Brasil em diversos segmentos. Nota-se um aumento do consumo de energia no setor industrial, em relação há 2018 e 2017 houve um aumento do consumo de energia de 1,33 % em comparação entre 2017 a 2018.

Figura 2 – Consumo de energia elétrica dividido por classes (GWh)

	2014	2015	2016	2017	2018	$\Delta\%$ (2018/2017)	Part. % (2018)	
Brasil	474.823	465.708	461.780	467.161	474.820	1,6	100	Brazil
Residencial	132.302	131.190	132.872	134.368	137.615	2,4	29,0	Residential
Industrial	179.106	169.289	165.314	167.398	169.625	1,3	35,7	Industrial
Comercial	89.840	90.768	87.873	88.292	88.631	0,4	18,7	Commercial
Rural	25.671	25.899	27.266	28.136	29.168	3,7	6,1	Rural
Poder público	15.355	15.196	15.096	15.052	15.076	0,2	3,2	Public sector
Iluminação pública	14.043	15.333	15.035	15.443	15.690	1,6	3,3	Public lighting
Serviço público	15.242	14.730	14.969	15.196	15.778	3,8	3,3	Public service
Consumo próprio	3.265	3.304	3.355	3.277	3.238	-1,2	0,7	Own use

Fonte: Adaptado de (EPE, 2019)

2.3 Eficiência Energética

Segundo Sola e Mota (2015), a energia elétrica se divide em três grandes áreas: acesso a energia, energia renovável e eficiência energética. No contexto industrial, o uso de energia elétrica é significativamente relevante, a gestão da energia elétrica está sendo pauta insistente em discussões empresariais, devido às preocupações de sustentabilidade da empresa e redução de custos e impactos ambientais.

A eficiência energética está diretamente atrelada à melhoria de máquinas ou sistemas através de automação e tecnologias específicas para redução de consumo. Busca produzir a mesma quantidade ou mais do produto com um menor gasto energético e de matéria prima, gerando uma maior lucratividade para as empresas (OLIVEIRA, 2018).

A auditoria energética é definida como uma análise minuciosa e sistemática de dados do consumo de energia de um sistema, sendo ele comercial, industrial ou residencial. Esta inspeção tem como objetivo evidenciar ao proprietário do estabelecimento, quais pontos podem gerar uma redução do consumo, aumentando a eficiência do processo (MEDEIROS; QUELHAS; LAMEIRA, 2011).

Segundo SERRENHO, BERTOLDI e CAHILL (2015), devem ser observados alguns passos para realização da inspeção energética:

- Verificação dos dados de consumo energético;
- Verificação dos pontos de maiores oportunidades de redução de consumo de energia;
- Verificação do ciclo de vida do sistema e por equipamentos individuais;

- Realização do *playback* do projeto;
- Realização da apresentação do projeto de uma forma representativa e clara das propostas evidenciando oportunidades significativas para melhoria;

2.4 Motores Elétricos de Indução

Segundo Chapman e Stephen (2013), máquinas elétricas são dispositivos conversores de energia, são divididas entre dois grandes grupos: motores e geradores. Geradores convertem energia mecânica em energia elétrica e motores convertem energia elétrica em trabalho mecânico.

Os motores elétricos de indução são divididos conforme suas diferentes características construtivas, sendo elas: rotor gaiola de esquilo e rotor bobinado. O estator desses dois modelos são iguais. O que diferencia estes dois motores são o modelo do rotor. O rotor gaiola de esquilo não apresenta escovas e comutadores ao contrário do rotor bobinado (CHAPMAN; STEPHEN, 2013).

Segundo Ferreira, Schiller e Costa (2014), os motores elétricos de corrente alternada (CA), são os modelo mais utilizado na indústria, em específico o de gaiola de esquilo, devido a sua construção ser mais simples. Os motores bobinados são raramente utilizados pelo fato do seu custo elevado e a necessidade de maior manutenção por utilizarem escovas e comutadores.

2.5 Bombas

As bombas têm um papel importante para as indústrias, pois a maioria das plantas industriais necessitam de sistemas de bombeamento, para fazer o deslocamento de matéria prima ou de sistemas de refrigeração. São utilizadas em diversas áreas como abastecimento de água, torres de resfriamento, indústrias alimentícias, entres outras. As bombas têm um aspecto construtivo com uma baixa complexidade e é de fácil manutenção.

Existem inúmeros modelos de bombas no mercado, esse trabalho de conclusão de curso foi utilizado as bombas centrífugas. Os principais componentes desses equipamentos são o rotor e a carcaça. Seu princípio operacional é baseado na criação de uma região de baixa pressão e de uma região de alta pressão. O líquido a ser bombeado é inserido no centro do rotor, onde está acoplado as pás do rotor, estas pás fazem a movimentação do fluido para a extremidade das pás, pela ação da força centrífuga, fazendo com que o fluido seja bombeado (BEZERRA, 2018).

2.6 Tipos de Acionamentos

Segundo Costa (2014), acionamentos elétricos são sistemas hábeis para converterem energia elétrica em energia mecânica. São utilizados em diversas plantas industriais para o acionamento de máquinas ou equipamentos que necessitam de algum tipo de movimento controlado.

Existem vários tipos de acionamentos de motores e bombas, as partidas eletromecânicas como por exemplo: partida direta, estrela-triângulo, partida compensadora e partida série-paralelo. As partidas mais eficientes são as eletrônicas, os inversores de frequência e *soft-starter*. Foram exemplificado alguns dos métodos mais utilizados no setor industrial (COSTA, 2014).

2.6.1 Partida Direta

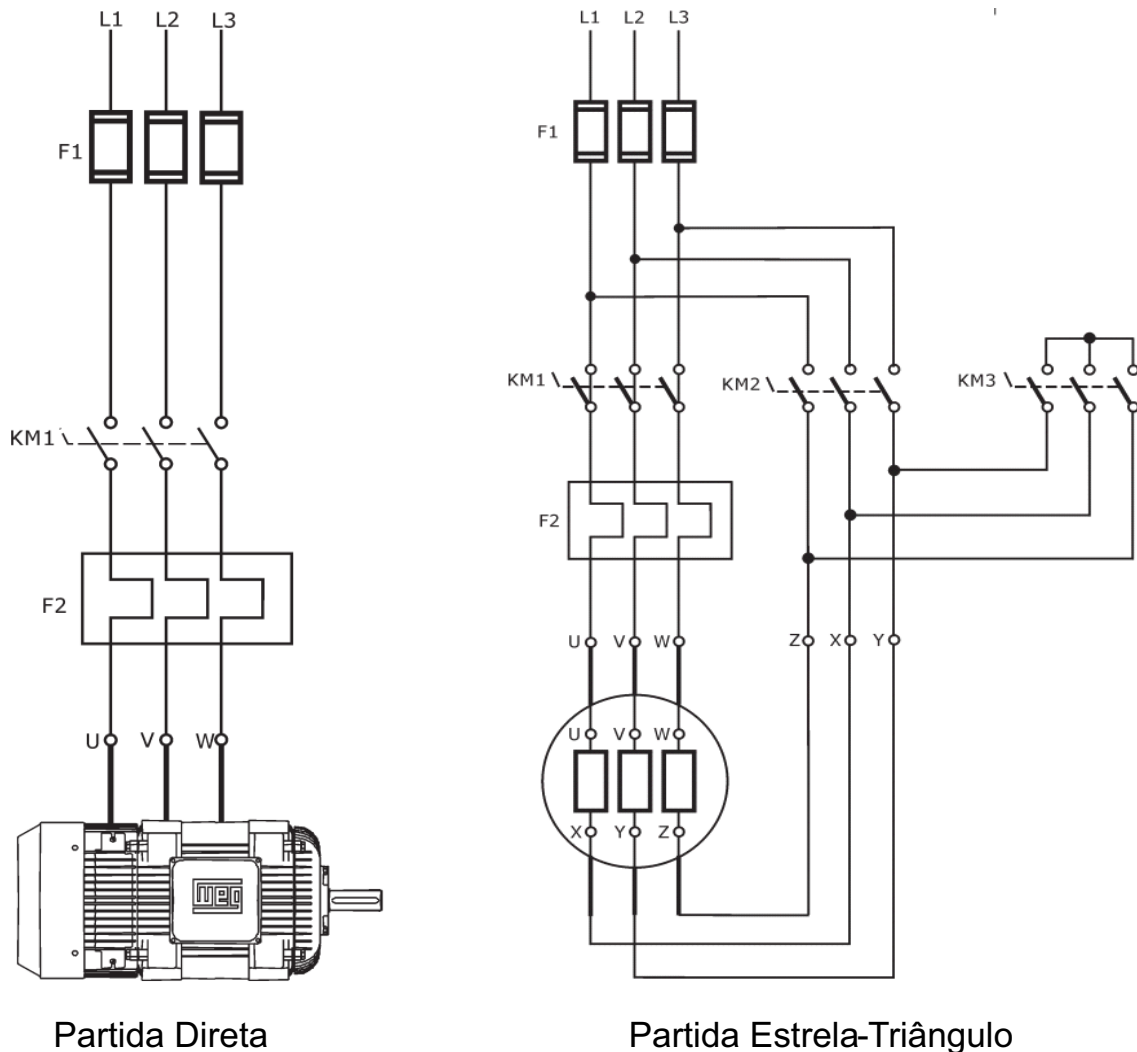
Dentre todas as partidas, a partida direta é a de mais simples e de menor custo para implantação, o motor é ligado diretamente por meio de contadoras. Este método de partida tem um alto torque de partida, mas há algumas restrições que devem ser levadas em consideração devido seu acionamento ser diretamente ligado à rede elétrica, a corrente de partida é elevada chegando até sete vezes a corrente nominal do motor, por isso o consumo na partida é alto (COSTA, 2014).

Este tipo de ligação não é permitida em acionamentos de motores com potência acima de 5 CV, sendo assim, são utilizadas principalmente em motores de pequeno porte e que têm corrente nominal mais baixo e que não necessitam de inúmeros acionamentos durante seu horário de trabalho (MOURA, 2018).

2.6.2 Partida Estrela-Triângulo

Esta partida é composta por dois contadores conforme a figura 3, o acionamento é feito em duas etapas, inicialmente a ligação das bobinas são em estrela na maior tensão para diminuir a corrente de partida podendo diminuir até $1/3$ da corrente de partida, logo depois automaticamente, é feita a comutação das bobinas passando para ligação em triângulo (COSTA, 2014).

Figura 3 – Partida direta e estrela-triângulo



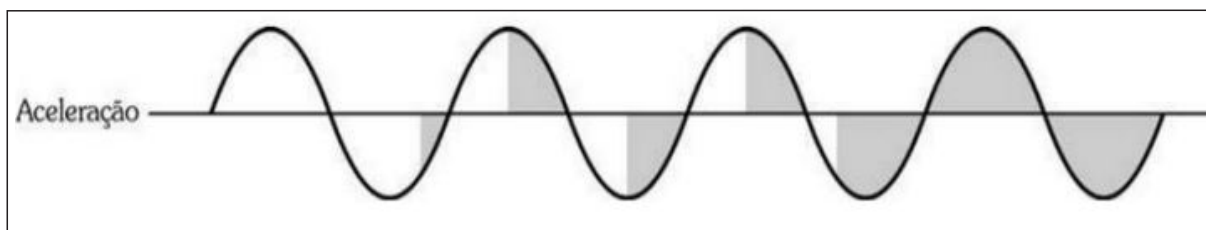
Fonte: Adaptado (WEG, 2012a)

2.6.3 Partida com *Soft-Starter*

Chaves de partida estática, também conhecidas como *Soft-Starter*, são dispositivos que utilizam tiristores (SCRs) na configuração antiparalelo controladas por sistemas eletrônicos para controlar o ângulo de disparo, regulando a tensão de saída conforme a necessidade (MOURA, 2018).

Os parâmetros de frequência ou velocidade não são alterados nesses acionamentos, é feito um controle do ângulo do disparo da tensão de forma que a corrente de partida seja controlada. As *Soft-Startes* são equipamentos eletrônicos responsáveis para suavizar o acionamento de partida e parada de motores, evitando picos de tensão, em empresas que possuem motores que necessitam de vários acionamentos em um dia, a uma economia considerável (COSTA, 2014).

Figura 4 – Ângulo de disparo da *Soft-starter*



Fonte: Adaptada (FRANCHI, 2013)

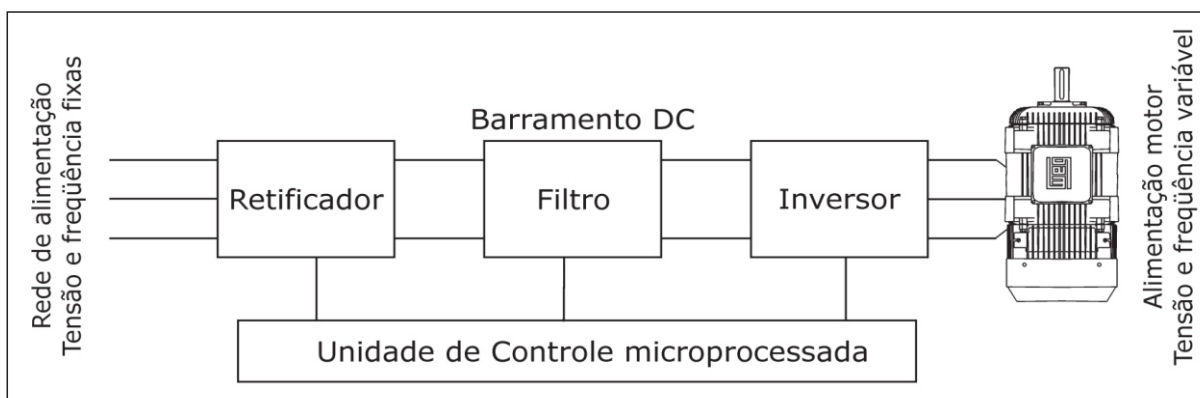
2.6.4 Partida com Inversores de Frequência

A indústria já fez uso de motores de corrente contínua CC para controlar a velocidade, porém este sistema gerava um custo elevado à empresa, pois o custo desses motores era maior em comparação aos motores CA, bem como a manutenção dos motores CA bem menor pois requer menos peças na sua fabricação. Com os avanços tecnológicos, principalmente nas áreas de eletrônica de potência surgiram vários equipamentos para trabalhar com motores de corrente alternada (FRANCHI, 2013).

Os inversores de frequência, também chamados conversores de frequência, vem ganhando espaço no setor industrial, aumentando a vida útil de equipamentos, controle de torque, controle de velocidade e economia de energia (FRANCHI, 2013).

Estes inversores podem ser classificados pelas suas topologias, que são divididas em três unidades, sendo a primeira unidade o circuito retificador, a segunda responsável pelo circuito de controle e a terceira refere-se a tensão de saída.

Figura 5 – Diagrama de blocos inversor de frequência



Fonte: (WEG, 2012a)

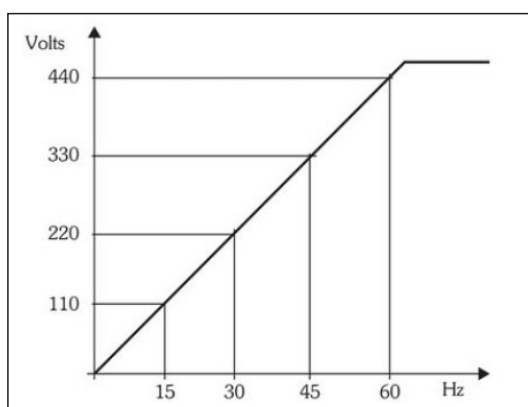
A primeira unidade retificadora é responsável pela retificação da Corrente Alternada

(CA) de entrada, entregue pelas concessionárias de energia, em uma Corrente Contínua (CC) pulsante. Para o processo de retificação são utilizados dispositivos semicondutores que permitem a passagem de corrente somente em uma direção, os dispositivos mais comuns para realizar a retificação de onda completa são os diodos. A segunda unidade é responsável por regular os níveis de tensão e filtrar altas frequências no barramento CC, por meio de bancos de capacitores (FRANCHI, 2013; COSTA, 2014).

A terceira unidade é responsável pela inversão da corrente contínua oriunda do barramento CC em corrente alternada, com seus parâmetros de tensão e frequência variáveis. O circuito é formado por Insulated Gate bipolar Transistor (IGBT), os IGBT fazem o chaveamento da corrente CC gerando trem de impulsos na saída, estes trens de impulsos são denominados Modulação por Largura de Pulso (PWM). O PWM modula uma onda senoidal de saída com tensão e frequências variável quando entregue a carga (FRANCHI, 2013).

Segundo Costa (2014), os inversores de frequência possuem diferentes tipos de controle baseados em algoritmos, existem quatro tipos que se sobressaem perante os outros: controle escalar, controle vetorial *sensorless*, controle de fluxo vetorial e controle de campo orientando. O controle escalar é baseado no conceito fundamental e original dos inversores de frequências, que é manter a relação de tensão e frequência constantes como evidenciado na figura 6, mantendo o fluxo aproximadamente constante. Este tipo de controle é utilizado onde não necessitam de uma resposta rápida de torque e velocidade, seu sistema de controle é realizado em malha aberta.

Figura 6 – Tensão X Frequência

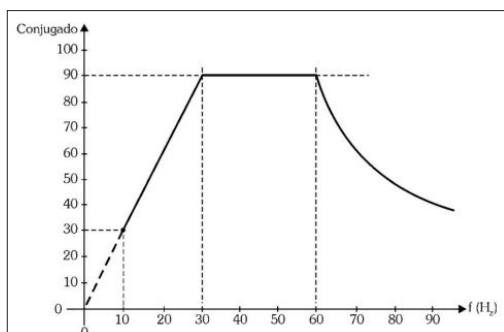


Fonte: (FRANCHI, 2013)

É preciso tomar algumas precauções quando os inversores de frequência forem utilizados em acionamento e controle de velocidade de motores. Os fabricantes disponibilizam a curva de operação dos motores, evidenciando suas características operacionais, quando estas não forem devidamente observadas podem ocorrer danos nos motores. Se utilizados em baixa frequência, o

rotor do motor opera com uma baixa rotação, os ventiladores que são acoplados ao eixo do rotor e operam na mesma rotação, deixando a retirada de calor se tornar ineficiente, sobreaquecendo o motor podendo até queimar. Quando sua operação está acima da frequência nominal, há perda de torque, ocasionado pelo enfraquecimento do campo, conforme pode ser visto na figura 7, (FRANCHI, 2013).

Figura 7 – Curva operacional dos motores



Fonte: (FRANCHI, 2013)

2.7 Automação Industrial

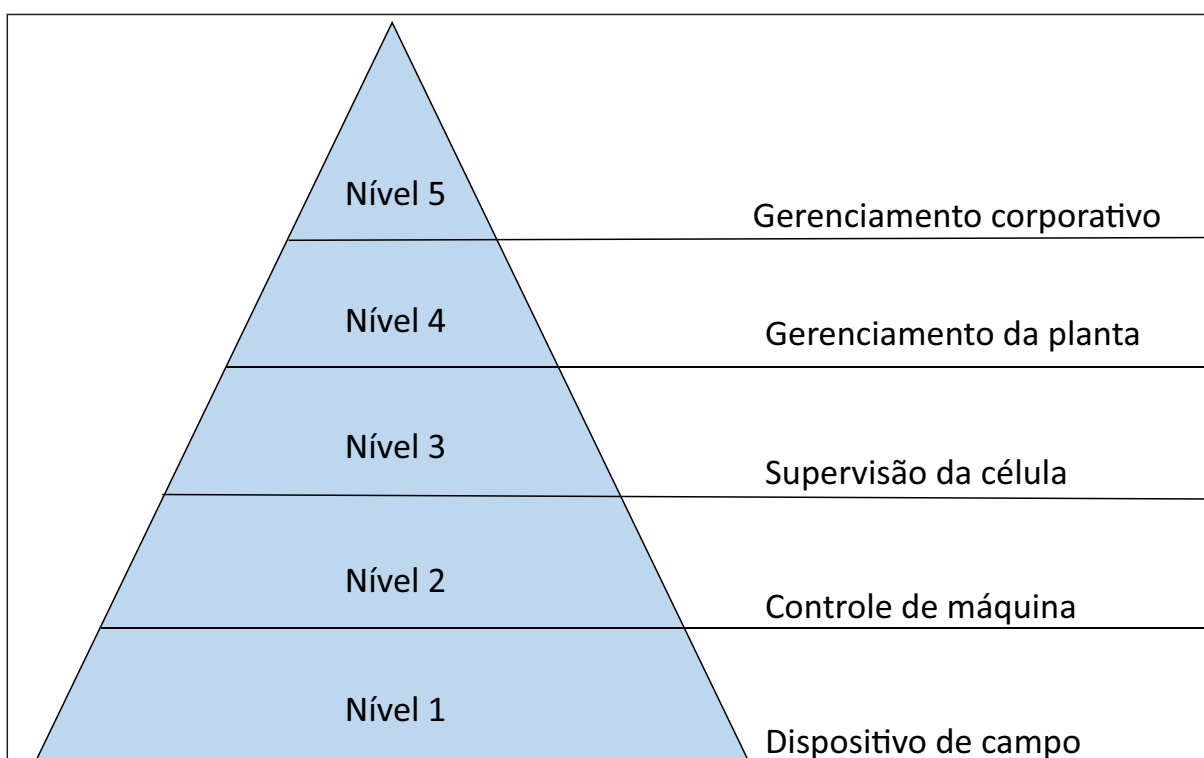
Segundo Moraes e Castrucci (2010), a automação tem como conceito um sistema baseado em computadores, que visa auxiliar e executar algumas funções práticas, como diminuição ou até substituição do trabalho humano. Gerando benefícios aumentando a segurança na operação do processo, otimizando os sistemas e aumentando a produtividade.

A automação nas indústrias pode ser feitas em diferentes métodos e passos, em grande parte ela é constituída por 5 categorias em forma de pirâmide conforme a figura 8, começando pelo nível mais básico, dispositivos encontrados no chão de fábrica até o gerenciamento de todos os dados nos escritórios.

- Primeiro nível - É a categoria mais baixa da automação, é responsável pela aquisição e transferências dos dados. São encontrados em máquinas e sistemas industriais, são componentes básicos, como sensores, chaves, relés, válvulas, transmissores, entre outros.
- Segundo nível - O segundo nível é responsável pelo funcionamento sequencial e controle de máquinas e sistemas, também são responsáveis por meios de comunicação homem/máquina através de interfaces. No controle da planta geralmente são utilizados o CLP, PC, CNC, SDCD (SILVA, 2017).

- Terceiro nível É responsável pelo controle de um conjunto de máquinas industriais, fazendo com que um processo inteiro de uma planta industrial seja interligado, coleta dados e otimiza o processo (CAPELLI, 2013).
- Quarto nível Este nível é responsável pela organização da planta industrial, como planejamento da produção, controle de qualidade dos produtos, controle de estoque, entre outros processos (SILVA, 2017).
- Quinto nível Está no último e mais alto nível da pirâmide de automação industrial, é responsável pelo gerenciamento das estratégias adotadas pelas empresas, desde a entrada do material na empresa até a venda do produto (SILVA, 2017).

Figura 8 – Pirâmide de automação



Fonte: Adaptado de(SILVA, 2017)

2.7.1 Controladores Lógicos Programáveis

Para o processo de implementação industrial é primordial sistemas e equipamentos que implantam o controle do processo industrial e também façam a conexão e transferência dos dados coletados. Os CLPs são muito utilizados para desenvolver esta função de controle e

transferência de dados (MAGALI; BRUM, 2018).

Os controladores lógicos programáveis (CLP) são tecnologias de desenvolvimento operacional de equipamentos em indústrias, sua construção faz com que ela consiga operar em ambientes severos, esses fatores tornaram este tipo de equipamento o mais utilizados em processos de automação industrial.

Os CLPs substituíram os painéis de comando formados por relés lógicos, devido ser mais compacto, reduzem a fiação, têm uma maior flexibilidade na mudança de parâmetros devido seu processo de programação via *software*, confiabilidade, menor custo, capacidade de comunicação, tempo de resposta em tempo real, mais facilidade para identificação de erros, entre outros (PETRUZELLA, 2014).

2.7.2 Arquitetura CLP

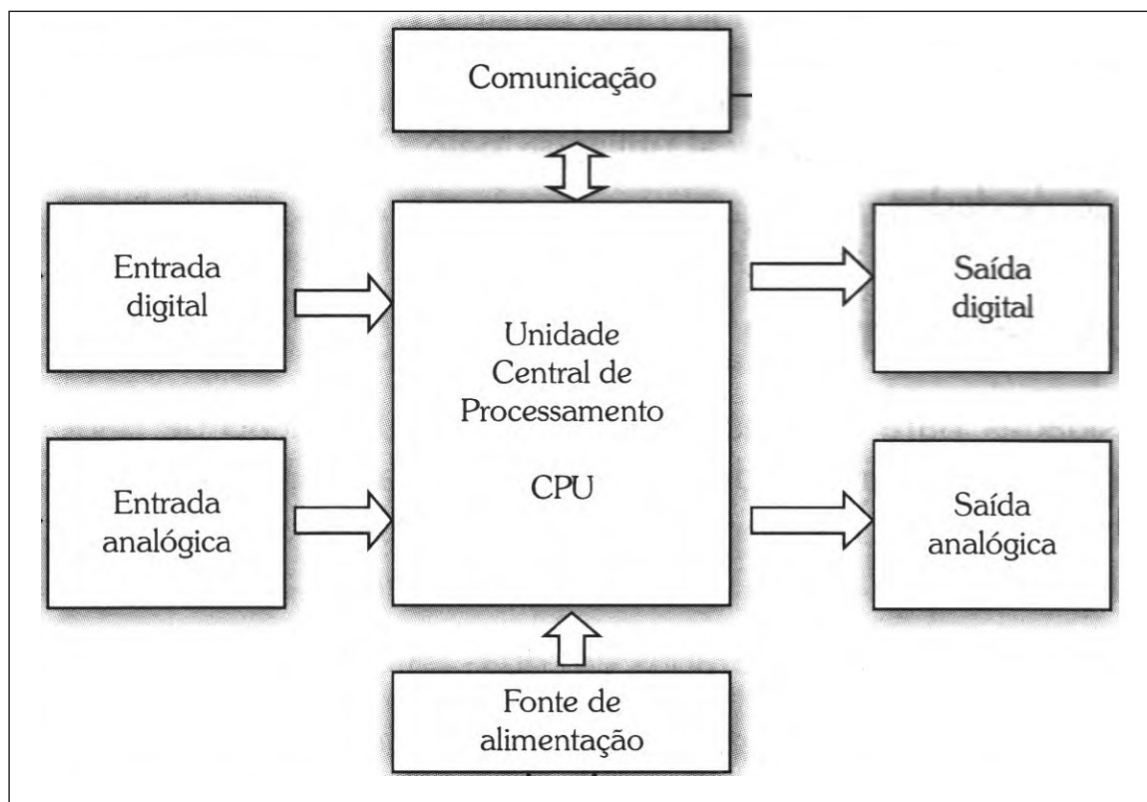
Segundo Franchi (2008), a arquitetura dos CLPs podem ser divididas em 5 partes. A figura 9 mostra o diagrama de blocos de um CLP.

- Fonte de alimentação - É responsável pela alimentação de energia para os módulos da CPU, entradas e saídas, também fornece os diferentes níveis de tensão para a operação interna do CLP;
- Entradas (analógicas e/ou digitais) - Informa a unidade central de processamento os níveis de tensão e corrente;
- Saídas (analógicas e/ou digitais) - O CPU envia sinais de comando de tensão e corrente, para o acionamento dos atuadores;
- Unidade Central de Processamento (CPU) - É responsável por controlar as operações efetuadas pelo CLP;
- Unidade de comunicação - É responsável pela comunicação do CLP para sua programação, também faz a comunicação com os supervisórios e com outros dispositivos.

2.7.3 Linguagem de Programação

A linguagem de programação é onde o programador efetua o desenvolvimento da programação e utiliza o CLP para a execução de determinadas funções. Existem inúmeros tipos

Figura 9 – Diagrama de blocos CLP



Fonte: Adaptado (FRANCHI, 2008)

de linguagens de programação, a mais utilizada é a linguagem *LADDER* (FRANCHI, 2008; PETRUZELLA, 2014).

A linguagem *Ladder* é uma representação gráfica de um processo em diagramas de contato, projetada para reproduzir a automação que era feita polos relés. A figura 10 expõem algumas funções básicas da programação em *LADDER*.

Figura 10 – Linguagem *ladder*

Fabricante	Contato Normalmente Fechado (NF)	Contato Normalmente Aberto (NA)
IEC 61131-3		
Allen-Bradley		
Siemens S7		
GE Fanuc		

Fonte: (FRANCHI, 2008)

2.8 Sensor de Temperatura PT100

A temperatura é um dos parâmetros mais importantes a serem controlados em todos os seguimentos industriais. Os sensores mais comuns são os termopares, termistores e os RTDs (PT100, por exemplo). Os sensores PT100 são amplamente utilizados nas indústrias devido ter uma alta velocidade de resposta, tem uma grande faixa de operação e uma ótima precisão nas medidas (SANTOS, 2010).

3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os procedimentos metodológicos para o desenvolvimento do trabalho proposto. Primeiramente, será mostrado as etapas do sistema de refrigeração na empresa atualmente. Posteriormente, serão escolhidas as partes dos sistemas que foi desenvolvido o projeto de automação.

3.1 Descrição do Processo de Refrigeração de Água

O sistema de refrigeração estudado é composto por uma torre de resfriamento cujo o modelo de construção é do tipo cascos e tubos. É composto por alguns componentes como: bombas, ventiladores, venezianas, módulo de troca de calor, bicos aspersores de água, bacia de água, entre outros.

Figura 11 – Torre Resfriamento



Fonte: Elaborado pelo autor

Para a aplicação nesta empresa do ramo metalúrgico faz-se necessário que o sistema de circulação de água seja um circuito fechado, sendo assim, é dividido em duas partes o circuito água interna e o circuito de água externa, como demonstra a figura 1

- Circuito de água interna - Esse fluido circula em um circuito fechado, onde o fluido passa por um processo de deionização antes de ser colocada no circuito, onde é utilizada para o processo industrial interno, devido a necessidade de resfriamento dos equipamentos e componentes elétricos como: as bobinas dos fornos de indução, bancos de capacitores, tiristores e barramentos. Após esta água percorrer o circuito interno, a seguir volta para a torre de resfriamento para ser resfriada novamente. Este sistema é bombeado por uma bomba da WEG de 20 cv.

- Circuito de água externa - Este circuito é responsável pelo resfriamento da água interna. O ciclo desse processo consiste em conduzir a água da bacia de água fria localizada na parte inferior da torre de resfriamento e bombeá-la para parte superior. Quando esta água chega na parte superior ela é dividida em 3 tubos onde é pressurizada e através dos bicos aspersores de água é pulverizada em cima dos módulos trocadores de calor. O sistema de bombeamento utiliza uma bomba de 7,5 cv.

Neste sistema há 6 ventiladores que são responsáveis pela retirada de calor das gotículas de água. Para uma melhor utilização desta água do sistema, entre meio aos bicos aspersores e os ventiladores têm uma proteção chamada de eliminador de gotículas, onde seu papel é não deixar que as gotículas sejam puxadas para fora da torre.

3.2 Análise do Consumo Energético

Para análise e coleta dos dados de consumo energético do sistema de refrigeração foi utilizado o analisador de energia RE6000 (figura 12), disponibilizado pelos laboratórios de engenharia elétrica da Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões (URI).

Figura 12 – Analisador de energia



Fonte: Manual EMBRASUL

É de importância ressaltar o cuidado com as ligações deste dispositivo. É necessário

conhecer como é feita a ligação elétrica da carga por parte da empresa. Após foi efetuado a ligação do equipamento aos barramentos de entrada do quadro elétrico.

Bem como é importante também avaliar a configuração do RE6000 de entrada de corrente, determinar a ponteira e a escala utilizada e quais fases da medição, para que, consiga adquirir os valores de tensão, corrente e potência em cada fase com exatidão.

A partir da análise do funcionamento do sistema, em específicos dos acionamentos dos motores, foi necessário observar os períodos de aquisição de dados. O analisador de energia RE6000 tem algumas especificações de tempo, sendo assim, foi estabelecido a aquisição dos dados de 1 em 1 segundo.

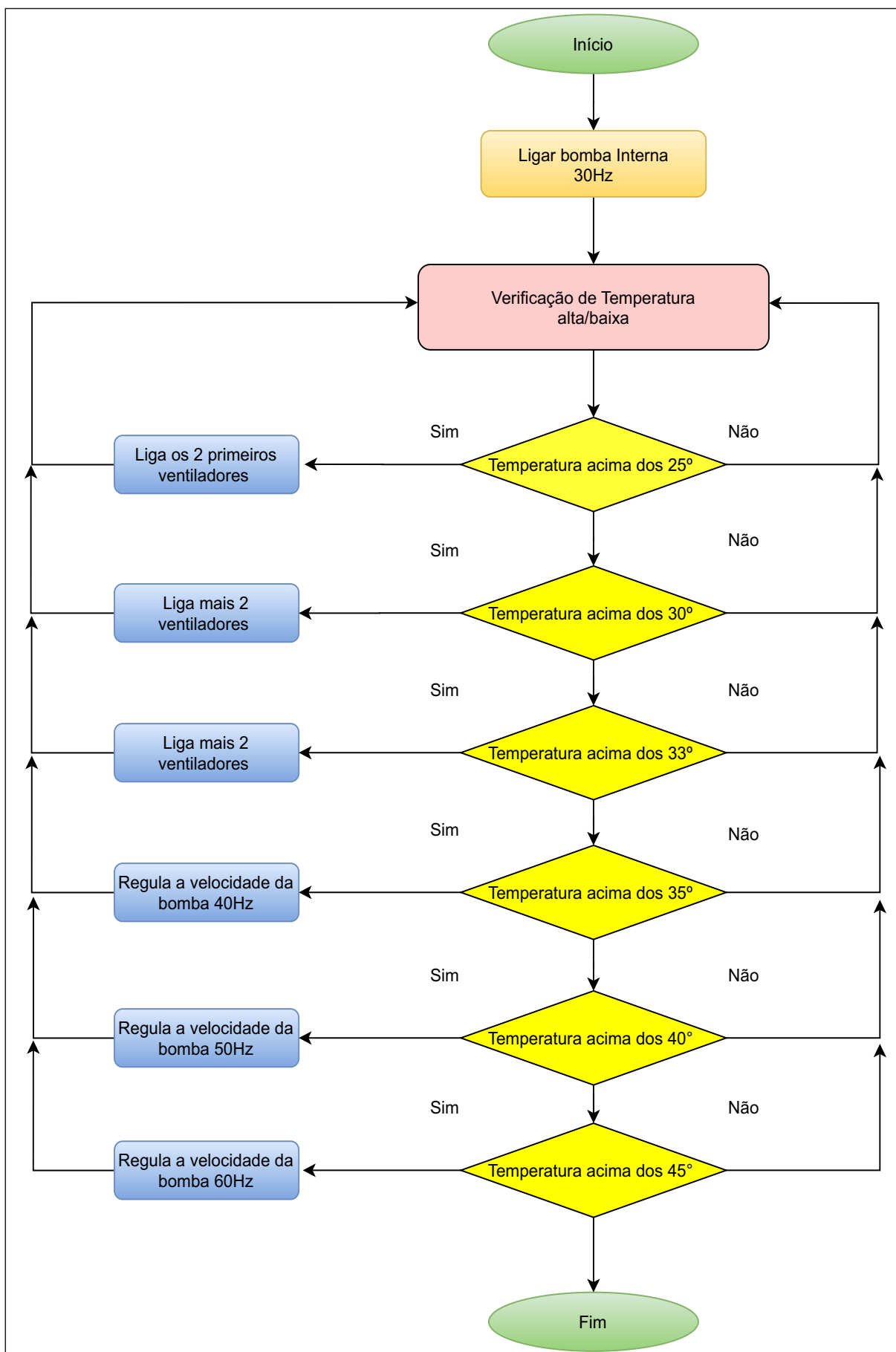
3.3 Descrição do Processo de Automação Proposto

O processo de automação proposto é para obter uma melhor eficiência energética do sistema, o que implica em fazer com que os equipamentos operem somente o tempo necessário e que operem com um menor consumo de energia possível.

Este processo consiste em realizar um controle de temperatura da água interna e externa e dos equipamentos do sistema de refrigeração, para controlar os equipamentos que compõem o sistema, motores, bombas e ventiladores, mais detalhada na figura 13. Para realização do controle da torre de resfriamento foi utilizado um CLP TPW04 (controlador lógico programável), a programação dos ventiladores foi feita em malha fechada figura 15, devido a necessidade de fazer o acompanhamento de temperatura para regular os acionamentos dos motores.

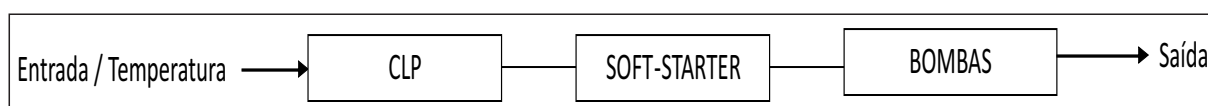
Os acionamentos das bombas de água interna e externa foram realizados com controle em malha aberta e malha fechada. O controle da bomba da água externa foi feito em malha aberta, a figura 14 mostra como foi feito o controle da bomba externa, esta bomba necessita estar operando em todo o processo produtivo com carga nominal. O sistema de bombeamento de água interna foi efetuado com malha fechada, onde foi realizado o monitoramento de variáveis de temperatura dos equipamentos, esta temperatura foi processada pelo CLP e após enviada para inversor de frequência para que efetuasse a modulação da velocidade da bomba.

Figura 13 – Programação do CLP



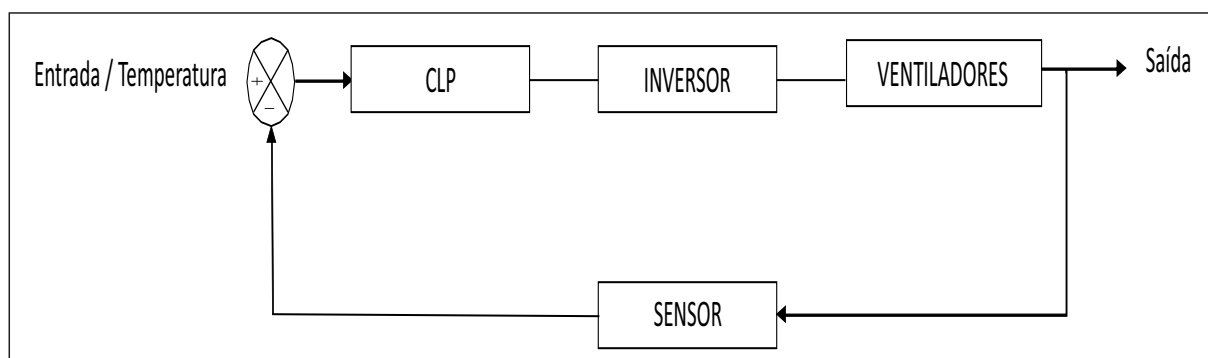
A 14 representa o diagrama de blocos do controle de malha aberta, onde não há uma realimentação para verificação da saída. Já o controle de malha fechada (figura 15) tem uma realimentação através de sensores onde é possível identificar se o equipamento está operando nos parâmetros definidos, caso ocorra divergências dos parâmetros e das medições realizadas pela realimentação o controle em malha fechada busca zerar este erro fazendo com que a operação do dispositivo sempre opere nas especificações de projeto.

Figura 14 – Controle de malha aberta



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 15 – Controle de malha fechada



Fonte: Elaborado pelo autor

3.4 Simulações

Com os dados coletados na planta industrial, foi possível desenvolver o projeto da automação dos sistemas. Foi utilizado a plataforma de projeto e simulação *software* CAdE SIMU 3.0, para visualizar o funcionamento do sistema proposto.

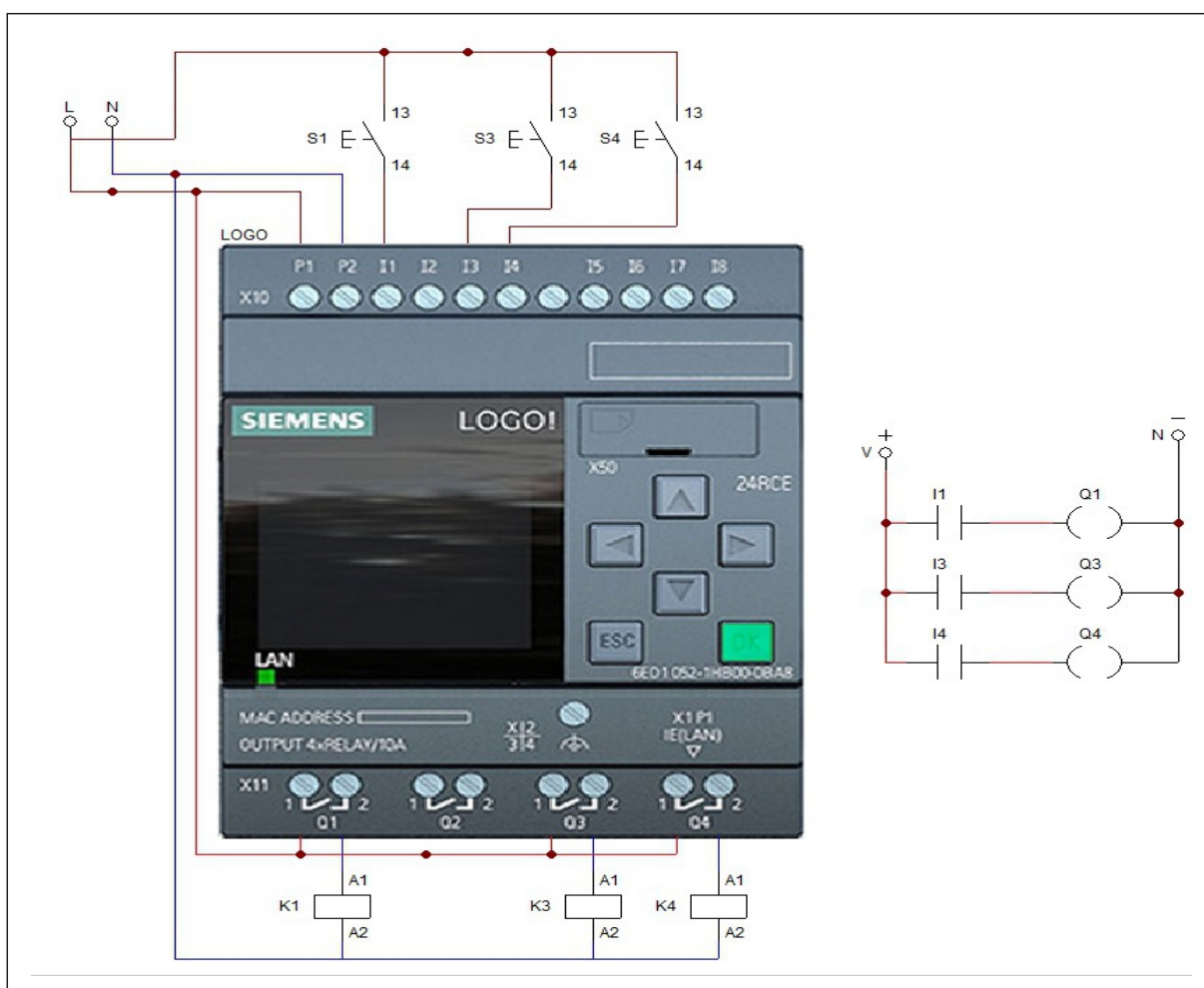
Para o sistema de controle da torre de resfriamento, foi necessário desenvolver um programa no CLP, evidenciado na figura 16 para controlar as velocidades das bombas e motores que compõem o sistema. A linguagem de programação foi efetuada em linguagem *LADDER*, o sistema tem três entradas e funcionará da seguinte maneira:

- Entrada I1: Habilita a saída Q1 do CLP, onde a mesma é responsável por viabilizar o

funcionamento do inversor;

- Entrada I3: Habilita a saída Q3 quando a temperatura for baixa de 29 graus fazendo com que o inversor de frequência opere em 40 Hz;
- Entrada I4: Habilita a saída Q3, quando a temperatura estiver alta habilitará que o sistema funcione com toda a potência.

Figura 16 – Programação do CLP



Fonte: Elaborado pelo autor

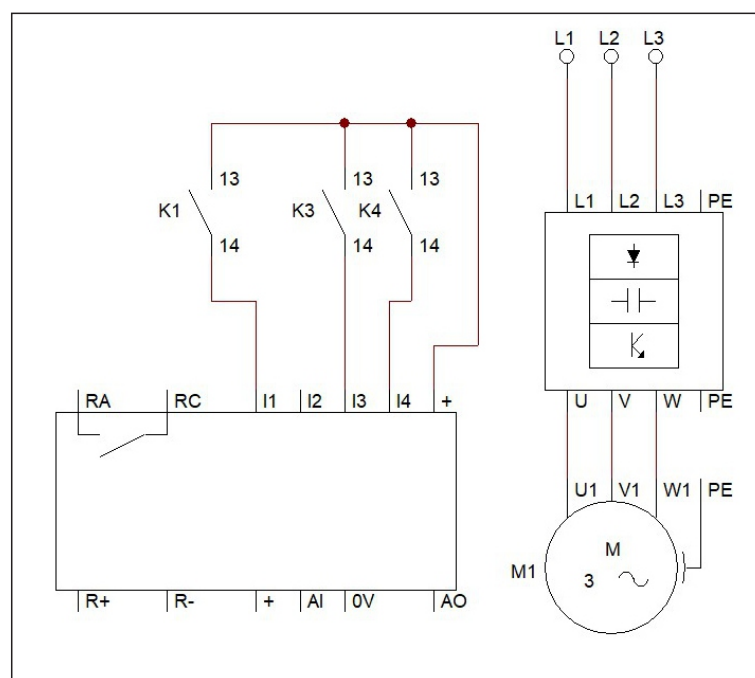
No processo de resfriamento de água, foi proposto uma automação no sistema para regular a temperatura da água interna, para o monitoramento das informações foi utilizado sensores de temperatura, em seguida as informações foram processadas por um CLP.

O sistema de exaustão da torre de resfriamento é composto por 6 ventiladores, para seus respectivos acionamentos foram utilizados *Soft-Starters*. No processo de bombeamento da água

externa também foi comandada por uma *Soft-Starter*.

Para o sistema de bombeamento da água interna, foi utilizado um inversor de frequência para modular o velocidade da bomba. O motor foi ligado individualmente em cada inversor de frequência que controlou a velocidade. Foi configurada a velocidade máxima de 1150 rpm para 60 Hz, com uma frequência mínima definida em 30 Hz. As velocidades foram predefinidas utilizando o *Drive Speed* do inversor de frequência, que a figura 17 evidencia, juntamente com o circuito de acionamento.

Figura 17 – Acionamento dos motores e bomba



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Prototipagem

Nessa sessão fica evidenciada a metodologia utilizada para o desenvolvimento do protótipo em bancada. Também demonstra quais os parâmetros e configurações dos dispositivos utilizados, os inversor de frequência, as entradas e as saídas do controlador lógico programável TWP04.

O presente trabalho não foi possível ser desenvolvido e implementado na empresa onde foram coletadas as amostras de tensão, corrente e potência, devido a problemas externos alheios a nossa vontade. Nesta época de pandemia do Covid 19, que o mundo está vivendo no momento, fez-se necessário o controle de gastos por parte da empresa. Portanto, foi desenvolvido um protótipo similar ao que seria implantado na empresa para simulação do processo industrial.

3.5.1 Materiais Utilizados

Para desenvolver o protótipo foram necessários alguns dispositivos utilizados no processo de prototipagem da automação do sistema de refrigeração, como CLP, sensor de temperatura, inversor de frequência e a bomba centrífuga.

3.5.1.1 Inversor de Frequência CFW11

Para o desenvolvimento do projeto de controle da velocidade da bomba, será utilizado o Inversor de Frequência da marca WEG, modelo CFW11, figura 18. Este modelo de inversor de frequência tem como suas principais especificações:

- Modelo: BRCFW110003T4SZ;
- Potência: 2 CV;
- Tensão de alimentação: 380 V
- Corrente nominal: 3,6 A
- Controle escalar, vetorial de tensão, vetorial *sensolerss*

Figura 18 – Inversor de Frequência CFW11



Fonte: Manual (WEG, 2012b)

O controle de velocidade da bomba centrífuga foi efetuada de forma analógica, onde foi possível controlar a velocidade da bomba variando a tensão de 0 a 10 V na entrada analógica

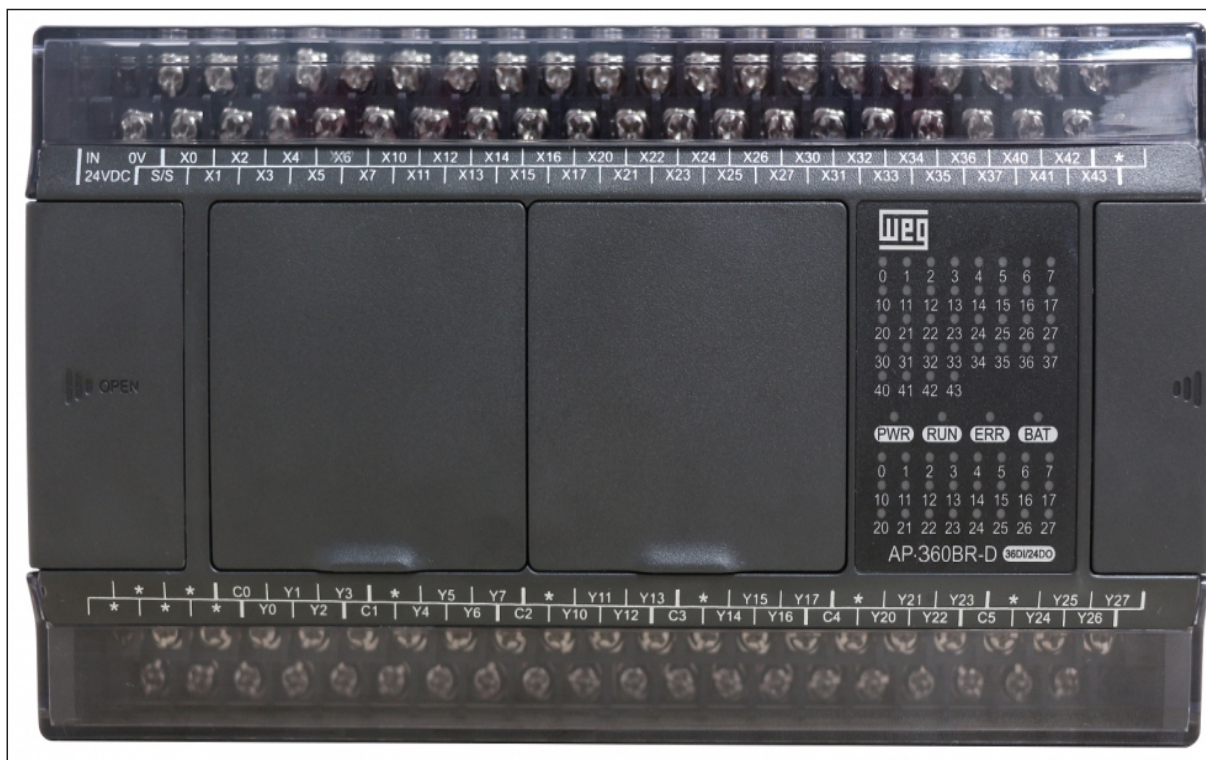
do inversor CFW11. Na escolha do modelo do inversor foi levado em consideração a corrente nominal da bomba que foi utilizada no processo para que não ultrapasse a corrente máxima de operação do inversor.

3.5.2 Controlador Lógico Programável TPW04-360BR-D

Para o desenvolvimento do projeto de controle foi utilizado o controlador lógico programável TPW04, modelo 360BR-D, fabricado pela WEG. O TPW04, figura 19, é um dispositivo que atende todas as funções requeridas para o projeto proposto. As principais características desse modelo são:

- Tensão de alimentação 24 VCC;
- 36 entradas digitais;
- 24 saídas digitais;
- 4 entrada analógicas (módulo de expansão);
- Linguagens de programação, *Ladder* e lista de instruções;
- Comunicação RS 485;

Figura 19 – Controlador Lógico Programável



Fonte: Manual (WEG, 2015)

Para elaboração do projeto foi utilizado um *Software* compatível com o CLP TPW04. A WEG disponibiliza, gratuitamente, em seu site uma plataforma de programação TPW-PCLINK versão V1.11.

3.6 Motobomba centrífuga FAMAC

Para o desenvolvimento foi utilizado uma motobomba da marca FAMAC figura 20, que tem como principais características uma baixa pressão e alta vazão de saída de água. Suas configurações estão descritas nos itens listados abaixo:

- Modelo:FSG-S 2,0T;
- Potência: 2 CV;
- Tensão de alimentação:220/380 V;
- Corrente nominal: 5,56/3,22 A;
- Pressão:1 a 33 mca;

- Vazão: 19,6 a 1,7 m³/h;

Figura 20 – Bomba centrífuga FAMAC



Fonte: Manual

3.7 Programação do CLP TPW04

Para a elaboração do processo de programação foi necessária entender o funcionamento das entradas e saídas digitais do CLP. As tabelas 1 e 2 evidenciam quais são as entradas analógicas e saídas utilizadas na programação. No projeto foi utilizado 4 entradas analógicas (AI), 1 saída analógica (AO) e 8 saídas digitais (Y).

Tabela 1 – Entradas do TPW04

Entradas	Descrição do Sinal
AI01	Entrada Sensor de Temperatura 1
AI02	Entrada Sensor de Temperatura 2
AI03	Entrada Sensor de Temperatura 3
AI04	Entrada Sensor de Temperatura 4

Fonte: Elaborado pelo autor

O programa foi desenvolvido em linguagem *Ladder*, por que é mais intuitiva, de fácil entendimento comparada com a programação de tabela de comando. A comunicação dos dispositivos foi realizada por meio da comunicação RS-485.

Primeiramente, foi necessário fazer a comunicação dos dois módulos de expansão TPW04-3MA com o CLP e a configuração do modo de operação da saída e entrada analógica dos módulos. Posteriormente, foram utilizados alguns recursos disponíveis no *Software*

Tabela 2 – Saídas do TPW04

Saídas	Definição do Sinal
AO01	Saída analógica para o controle de velocidade (0 a 10V)
Y000	Saída para habilitar 2 ventiladores
Y001	Saída para habilitar 4 ventiladores
Y002	Saída para habilitar 6 ventiladores
Y003	Alarme de temperatura 1 sensor
Y004	Alarme de temperatura 2 sensor
Y005	Alarme de temperatura 3 sensor
Y006	Alarme de temperatura 4 sensor
Y007	Habilita o inversor de frequência

Fonte: Elaborado pelo autor

TPW-PCLINK, como elementos comparadores que permite que os sinais de entrada sejam comparados e analisados também os elementos movedores e armazenadores onde são enviadas as leituras analógicas para que as mesmas sejam utilizadas em tempo real para controlar a velocidade do motor da bomba.

3.8 Parâmetros do inversor de frequência

O inversor de frequência CFW11 tem a principal função controlar a velocidade do motor da bomba centrífuga conforme a temperatura da água. Para a realização da configuração dos parâmetros do inversor é prudente resetar as configurações deixando-a com os parâmetros de fábrica, após é necessário configurar o parâmetro 204 com o número 5 que é responsável por habilitar a mudança dos demais parâmetros.

Após as configurações do inversor de frequência estarem habilitadas é necessária a configuração de inúmeros parâmetros como: de tensão, corrente nominal, rotação máxima e mínima da bomba centrífuga, entre outros. As leituras das temperaturas serão realizadas pelo CLP, sendo assim, é crucial a mudança configuração do modo de operação local para a remota, fazendo com que os dois dispositivos se comuniquem corretamente.

A tabela 3, evidencia alguns dos principais parâmetros para que o inversor de frequência opere adequadamente juntamente com a bomba centrífuga. Os parâmetros foram definidos conforme a necessidade de operação da bomba centrífuga e alguns parâmetros como tempo de aceleração de desaceleração foram determinados conforme os sugestões de modo de operação dos manuais da WEG.

Tabela 3 – Parametrização Inversor de Frequência

Funções de parametrização	Parâmetros de fábrica	Parâmetros do projeto
P0000- Parâmetro de acesso	00	05
P0100- Tempo de aceleração (s)	20	06
P0101 - Tempo de desaceleração (s)	20	06
P0133- Velocidade mínima (rpm)	90	0
P0134- Velocidade máxima (rpm)	0	3275
P0220- Seleção da fonte (local / remota)	2	1
P0222- Seleção de velocidade analógica	1	1
P0263- Entrada Digital 1	0	0
P0266- Entrada digital 4 (sentido de giro)	8	8

Fonte: Elaborado pelo autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo tem como objetivo descrever os resultados obtidos a partir dos procedimentos metodológicos adotados na planta industrial, nas simulações, nas análises de eficiência energética, no processo de montagem do dispositivo em bancada e nos resultados.

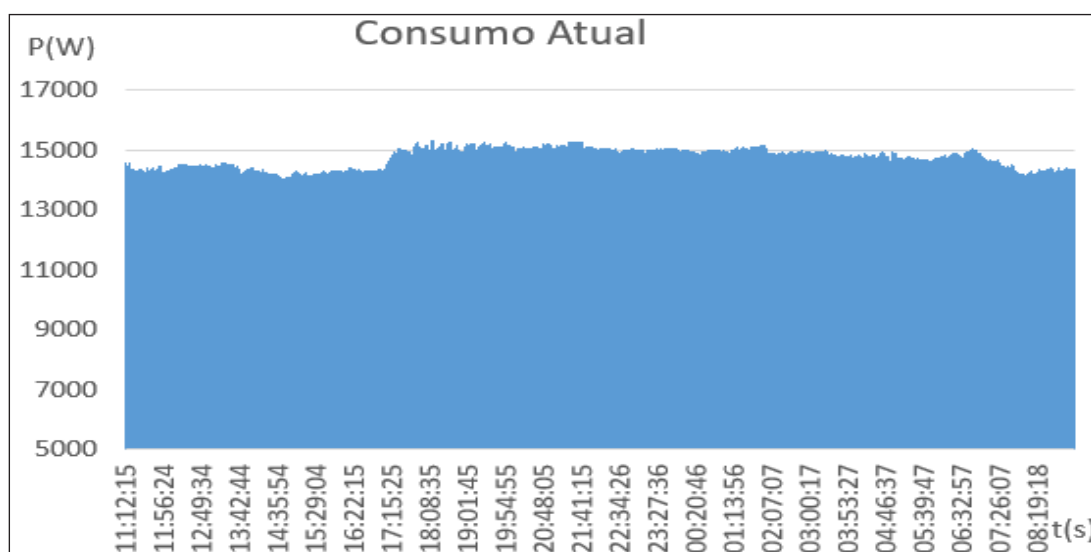
4.1 Análise do Consumo Energético

Os dados de tensão (V), corrente (A), potência (W) e fator de potência (FP) foram obtidos individualmente pelo analisador de energia RE6000, pois o quadro de comando (CCM), em questão, possui outros equipamentos ligados no mesmo barramento de entrada inviabilizando a coleta do consumo global da torre.

4.1.1 Bomba Interna

Os dados de potência foram adquiridos a cada segundo, no período diurno e noturno, sendo possível analisar que o consumo da bomba se manteve em operação constante, como podemos ver na figura 21.

Figura 21 – Consumo de energia atual



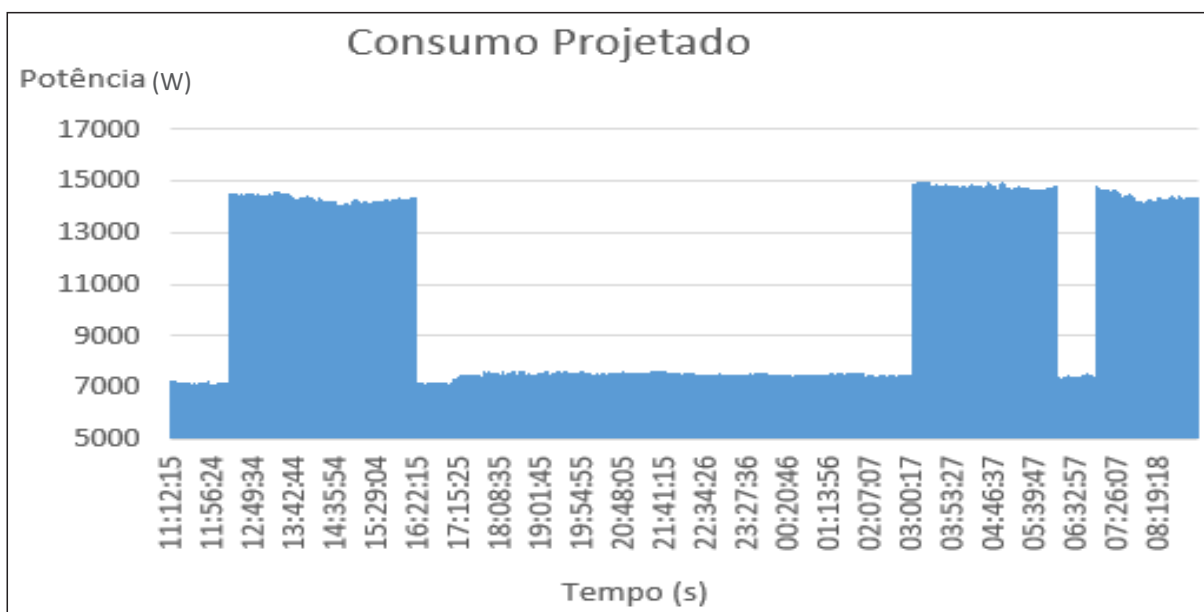
Fonte: Elaborado pelo autor

Comparando os dados da bomba e dos ventiladores apresentados na Figura 21 e 23 respectivamente, é possível observar que há períodos em que os ventiladores não estão em

operação e o sistema de bombeamento continua ativo 100 %. Nesses momentos a temperatura da água e dos equipamentos estão abaixo do especificado, ou seja, 30 graus. Sendo assim, foi possível desenvolver o estudo de um sistema de monitoramento de temperatura da água e dos equipamentos, para que possa ser modulada a velocidade da bomba quando o sistema atinja uma temperatura mais baixa.

A figura 22 mostra a redução de consumo de energia elétrica projetada com a modulação realizada pelo inversor de frequência. Esse projeto foi desenvolvido no *software* CAdE SIMU, o *software* possui somente ferramentas que controlam os acionamentos não contendo ferramenta para análise de potência, corrente e tensão, por isso, foi necessário fazer o cálculo do consumo de energia da bomba operando em 30 Hz para elaboração do consumo projetado. A figura 22 apresenta uma redução significativa nos períodos em que a empresa não está em produção.

Figura 22 – Consumo de energia projetada



Fonte: Elaborado pelo autor

As tabelas 4 e 5 evidenciam os consumos diários e mensais em kWh e em reais, dos dados coletados na empresa e dos dados projetados neste estudo. Observa-se que houve uma redução mensal no consumo de energia elétrica de R\$ 1.152,61.

Tabela 4 – Consumo atual e projeto da bomba interna em W

Sistema	Consumo em kWh	Consumo em kW/dia	Consumo em kW/mês
Atual	14,68	352,34	10.570,22
Proposto	10,36	248,78	7.463,44

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5 – Consumo atual e projeto da bomba interna em reais

Sistema	Consumo diário em R\$	Consumo mensal em R \$	Redução em R\$
Atual	130,72	3.921,55	1.152,61
Proposto	92,30	2.768,93	

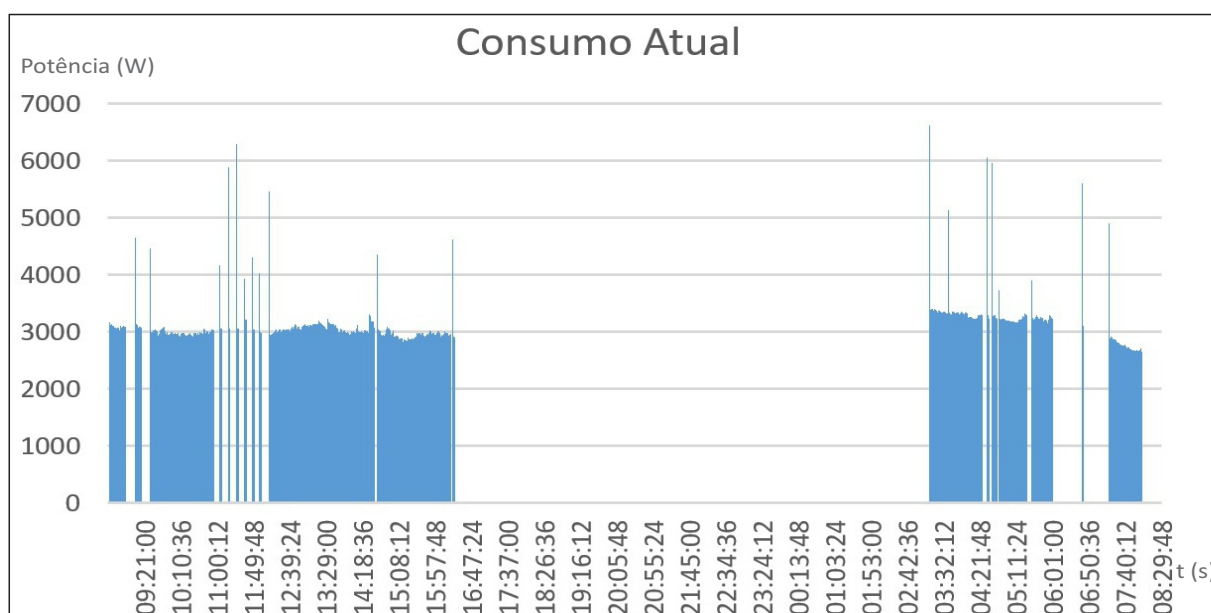
Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.2 Análise dos Ventiladores

A torre de resfriamento é composta por 6 unidades de ventiladores, as amostras de potência foram somente coletados de uma unidade a cada 2 segundos que está representado na figura 23.

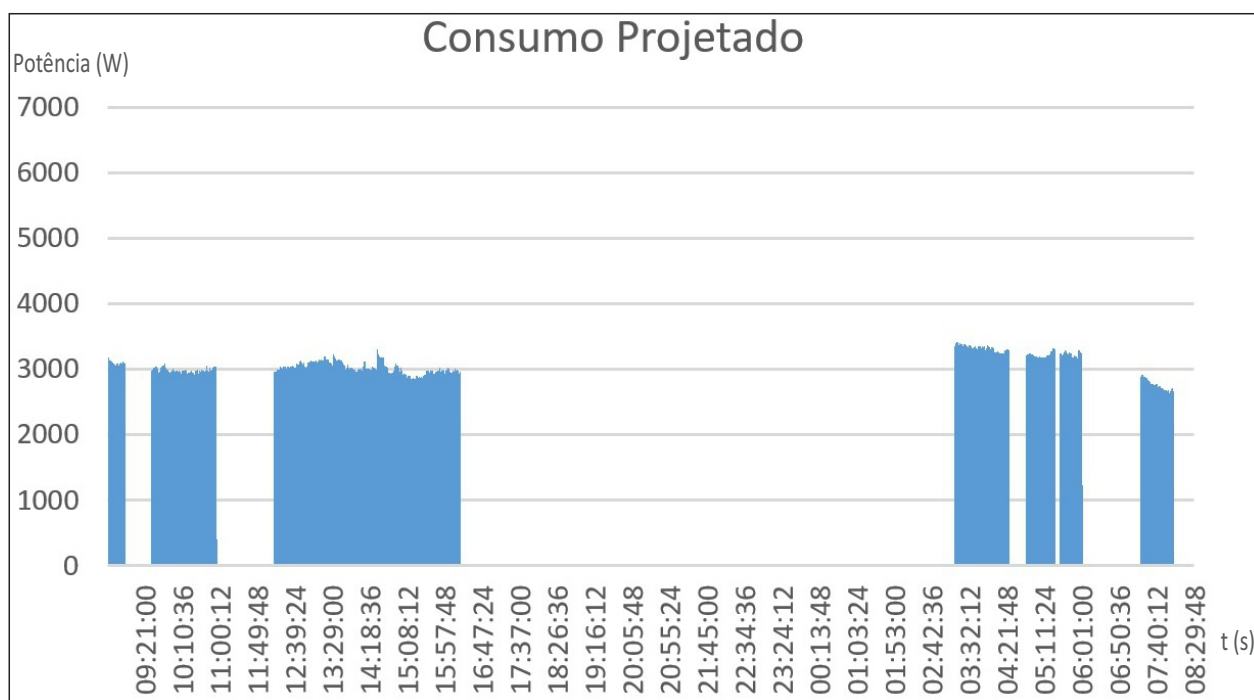
Após a coleta e análise dos dados do consumo durante do processo da empresa foi possível desenvolver uma simulação para verificação da redução do consumo energético. Após realizado as simulações computacionais, utilizando CLP coordenando o dispositivo de acionamento *Soft-Starter* obtêm-se um resultado de redução do consumo representado na Figura 24.

Figura 23 – Consumo atual de um ventilador



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 24 – Consumo projetado de um ventilador



Fonte: Elaborado pelo autor

A tabela 6 representa o consumo atual e consumo proposto quando alterado o tipo de acionamento e a técnica de controle associada ao CLP. Pode-se notar que a uma redução do consumo nos momentos em que o equipamento estava operando ocioso. A tabela evidencia a

redução do consumo.

Tabela 6 – Consumo atual em W e projeto ventiladores

Sistema	Consumo em kWh	Consumo em kW/dia	Consumo em kW/mês
Atual	1,21	28,92	578,42
Proposto	1,14	27,26	545,24

Fonte: Elaborado pelo autor

O projeto realizado traz uma redução de consumo 1,06 % por ventilador, devido os motores consumirem uma potência baixa a redução de energia elétrica não foi significativa. A redução mensal foi de R\$ 12,31, ficando inviável a implementação da automação com *Soft-Starter*.

Tabela 7 – Consumo em reais atual e projeto ventiladores

Sistema	Consumo diário em R\$	Consumo mensal em R\$	Redução em R\$
Atual	10,79	214,60	12,31
Proposto	10,11	202,28	

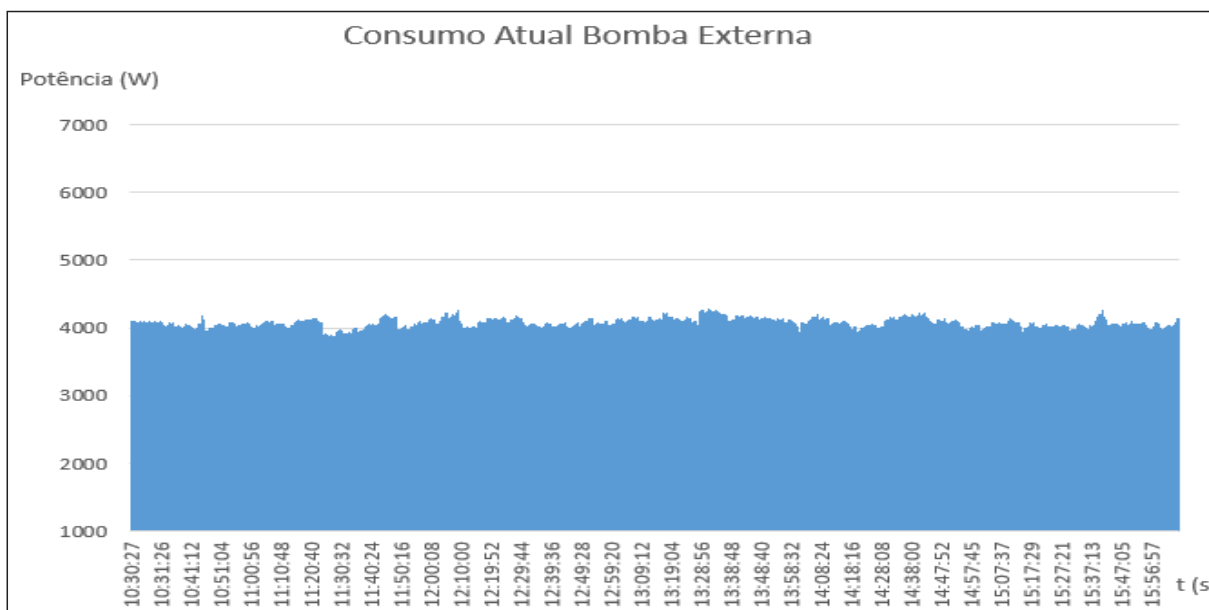
Fonte: Elaborado pelo autor

4.1.3 Bomba Externa

Para o processo de bombeamento externa, após uma pesquisa de campo realizada na empresa, não é possível fazer o desligamento da bomba externa enquanto o sistemas de fundição estiver em operação.

É necessário que a bomba externa continue em operação, resfriando o circuito da água interna, durante e após o término do horário de operação dos fornos. É de extrema importância que os refratários dos fornos de indução sejam resfriados corretamente, este processo pode levar em torno de 12 horas após o desligamento.

Figura 25 – Consumo bomba externa

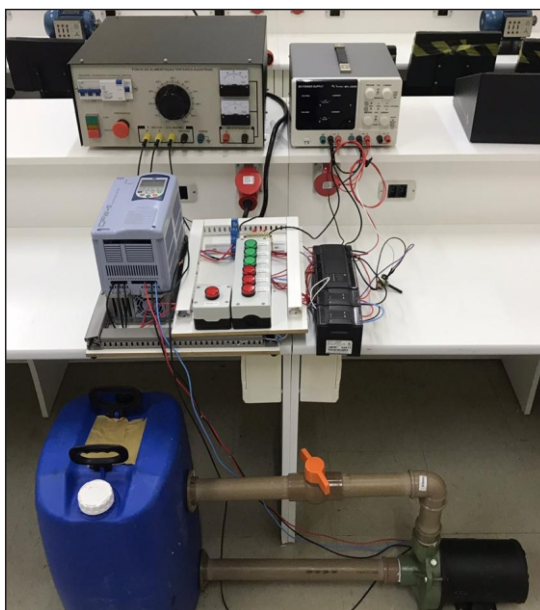


Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Resultados Experimental

Na primeira fase do experimento foi realizada a montagem da bancada demonstrada na figura 26, contendo um inversor de frequência CFW-11, CLP TPW-04, bomba centrífuga de 2 CV e potenciômetros para variação de tensão nas entradas analógicas do CLP simulando a variação de temperatura.

Figura 26 – Protótipo

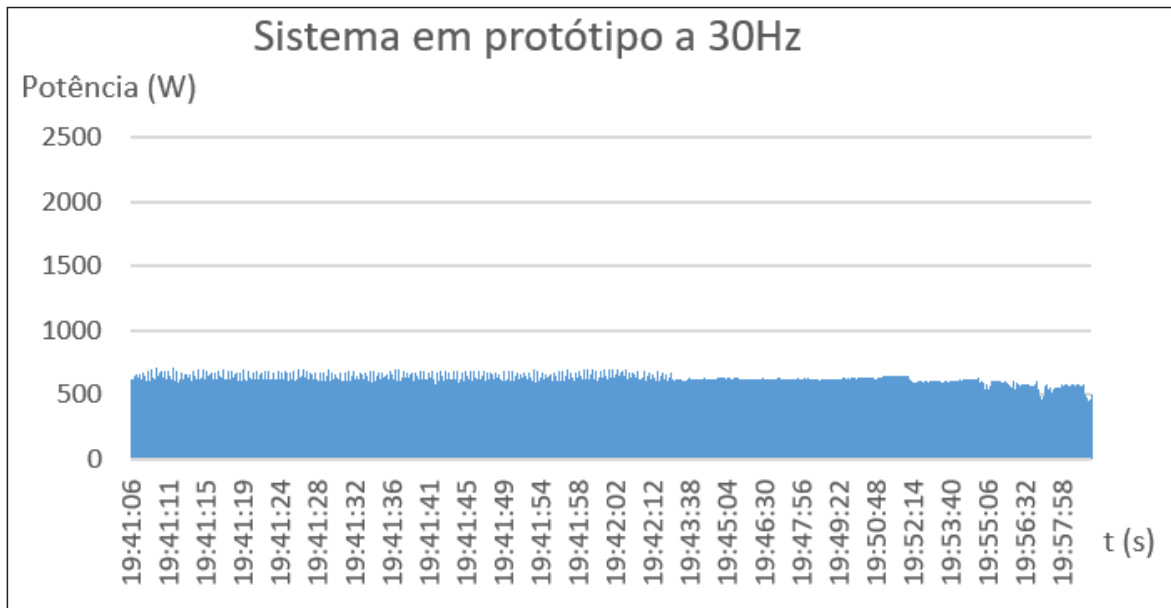


Fonte: Elaborado pelo autor

Inicialmente foram realizadas as configurações dos parâmetros operacionais do inversor de frequência, também foi realizado a comunicação e programação entre a expansão analógica com o CLP. Na sequência foi testado o funcionamento dos dispositivos operando separadamente. Após a validação da operação dos equipamentos, foi realizado a regulação da carga nominal de operação da bomba, por meio, de um registro, estrangulando a saída de água do sistema.

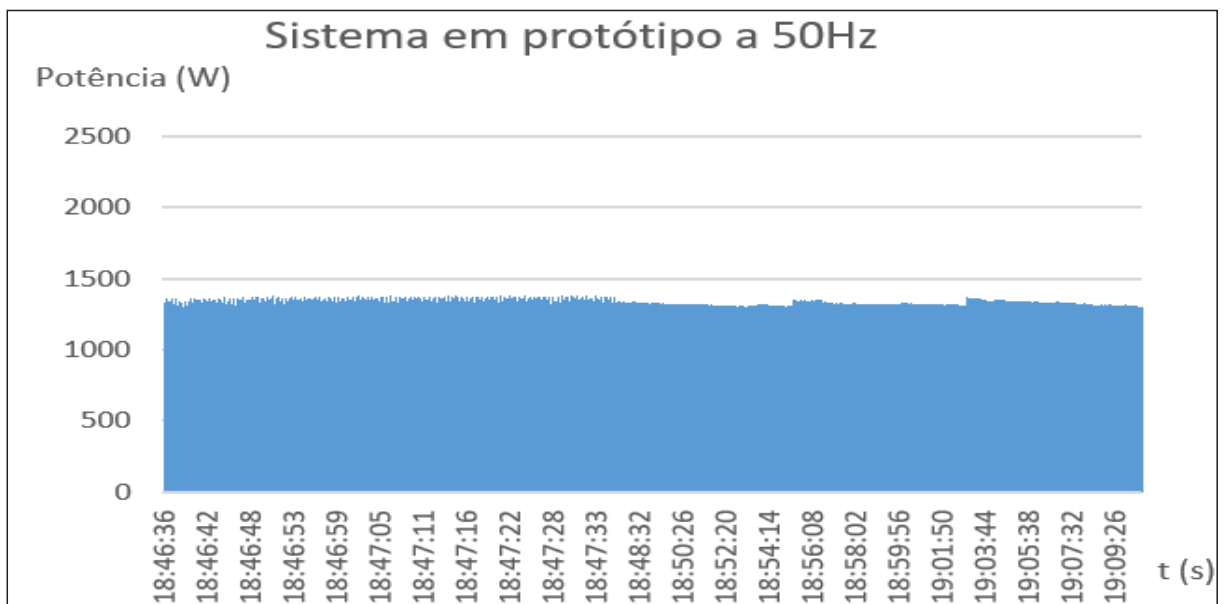
Foram retiradas as amostras de tensão (V), corrente (A), potência (W) e fator de potência (FP) da bomba operando em diferentes velocidade, mas mantendo a carga nominal. Os gráficos 27, 28, 29 e 30 representam a potência da bomba quando sua operando está em 60 Hz, 50 Hz, 40 Hz e 30 Hz respectivamente.

Figura 27 – Consumo do protótipo operando a 30 Hz



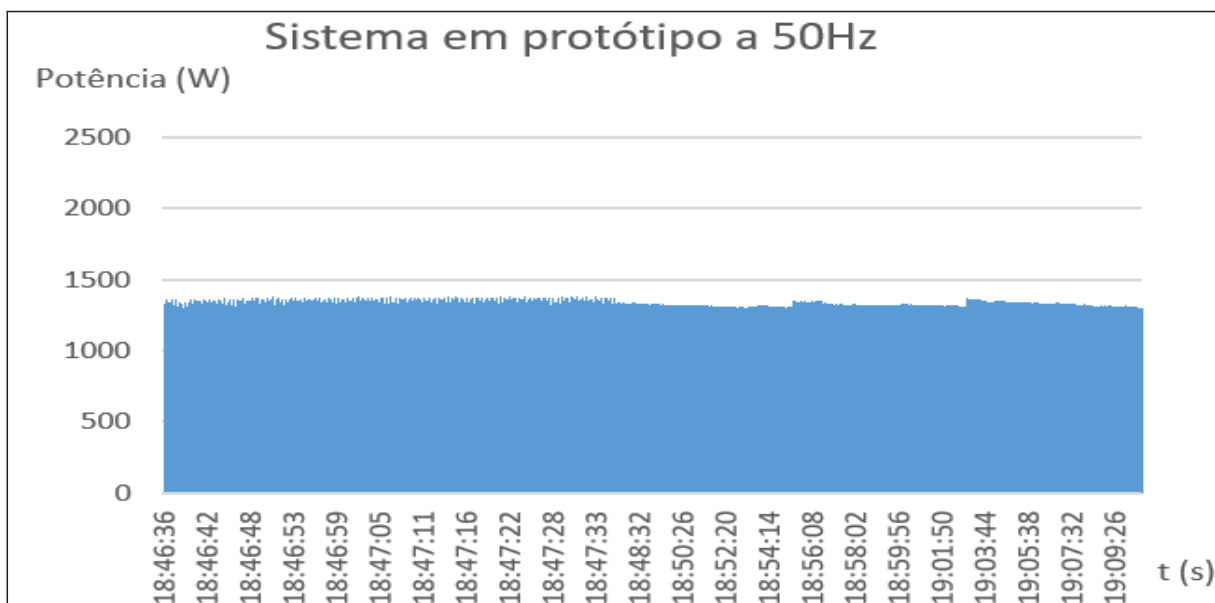
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 28 – Consumo do protótipo operando a 40 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 29 – Consumo do protótipo operando a 50 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

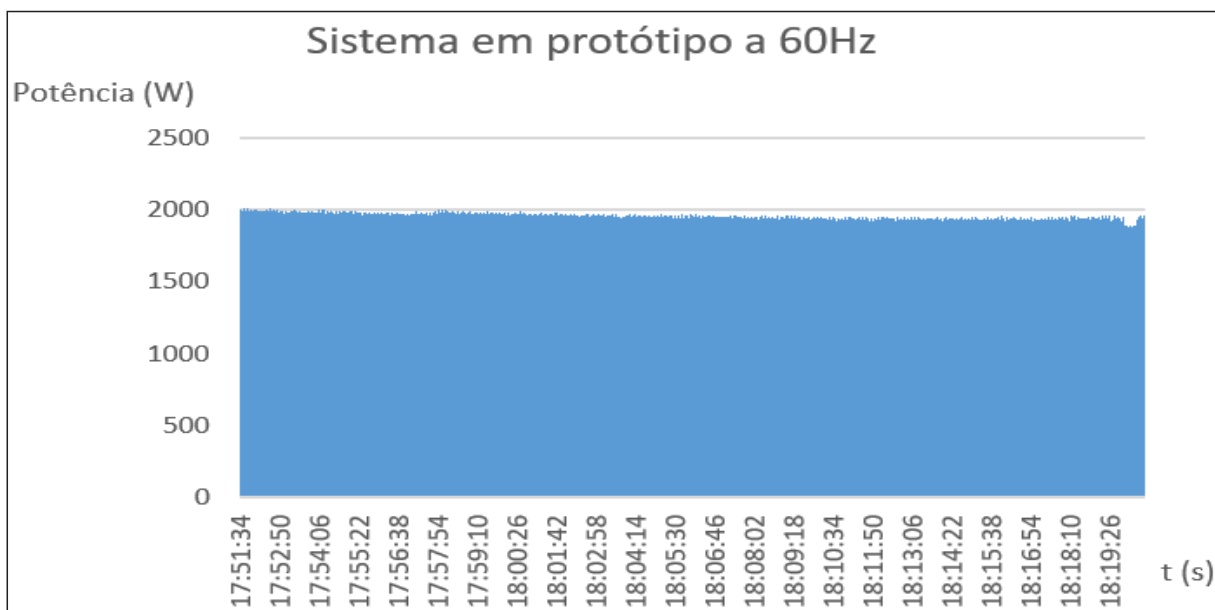
A automação do sistema é baseada na sua temperatura, na figura 23 é possível observar que há períodos que os ventiladores não estão em operação e em outros momentos do dia estão ligando e desligando em pequenos períodos de tempo, nesses momentos a temperatura do sistema está oscilando e ficando mais baixa. Portanto foi analisado os dados adquiridos pelo analisador de energia RE6000. Os dados coletados e utilizados para a análise do consumo energético dos ventiladores foram coletados a cada 2 segundos e por 24 horas.

Para a análise e coleta dos dados da prototipagem foram adquiridos dados de operação da bomba a cada 2 segundos, durante 30 minutos. A figura 30 representa o consumo da operação da bomba centrífuga, simulando a operação da bomba atual que está funcionando na empresa.

No processo da automação a variação de velocidade da bomba se dá conforme a mudança de temperatura vista no comportamento dos ventiladores, conforme a figura 23. Como a coleta e análise dos dados do protótipo montados na bancada foram de 30 minutos, então fez-se necessário fazer uma conversão de tempo, do comportamento de consumo dos ventiladores para 30 minutos, a conversão foi realizado proporcionalmente.

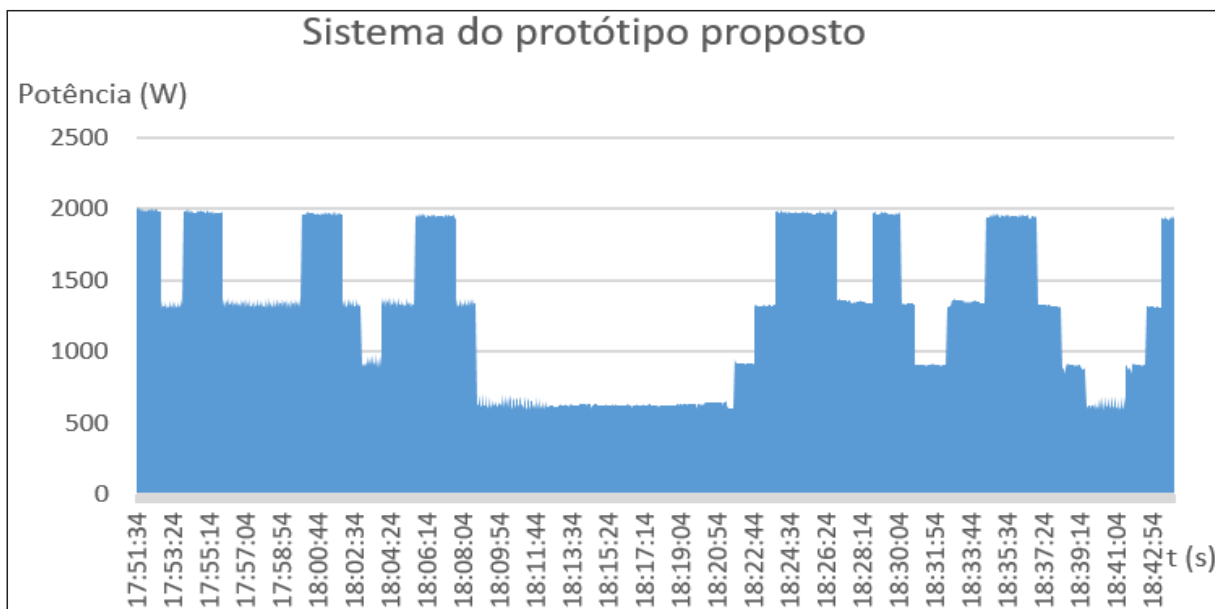
Após a coleta e análise do consumo energético da bomba operando 100 %, foi inserido a automação no protótipo. Com o sistema em operação demonstrou um menor aproveitamento dos equipamentos, fazendo com que o consumo diminui-se, conforme demonstrado na figura 31.

Figura 30 – Consumo do protótipo operando a 60Hz



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 31 – Consumo do protótipo com o sistema de automação



Fonte: Elaborado pelo autor

As tabelas 8 e 9, evidenciam os consumos diários e mensais em reais e kWh do protótipo montado em bancada. É possível observar que houve uma redução de R\$ 183,86 reais de consumo de energia elétrica.

Tabela 8 – Consumo atual e projeto do protótipo em W

Sistema	Consumo em kWh	Consumo em kW/dia	Consumo em kW/mês
Atual	1,96	46,99	1.409,83
Proposto	1,27	30,47	914,24

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9 – Consumo atual e projeto do protótipo em reais

Sistema	Consumo diário em R\$	Consumo mensal em R\$	Redução em R\$
Atual	17,43	523,04	183,86
Proposto	11,30	339,18	

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados experimentais foram realizados por meio de equipamentos com uma escala 10 vezes menor, mas com as características operacionais iguais. Na prototipagem, as análises realizadas constaram que houve uma redução de 35 % do consumo de energia elétrica.

Aplicando o fator de redução 35 % adquirido com as análises do protótipo no consumo atual da bomba obteve-se uma redução evidenciada na tabela 10.

Tabela 10 – Consumo Atual e prototipado da bomba água interna

Sistema	Consumo diário em R\$	Consumo mensal em R\$	Redução em R\$
Atual	130,72	3.921,55	1.391,45
Protótipo	84,33	2.530,1	

Fonte: Elaborado pelo autor

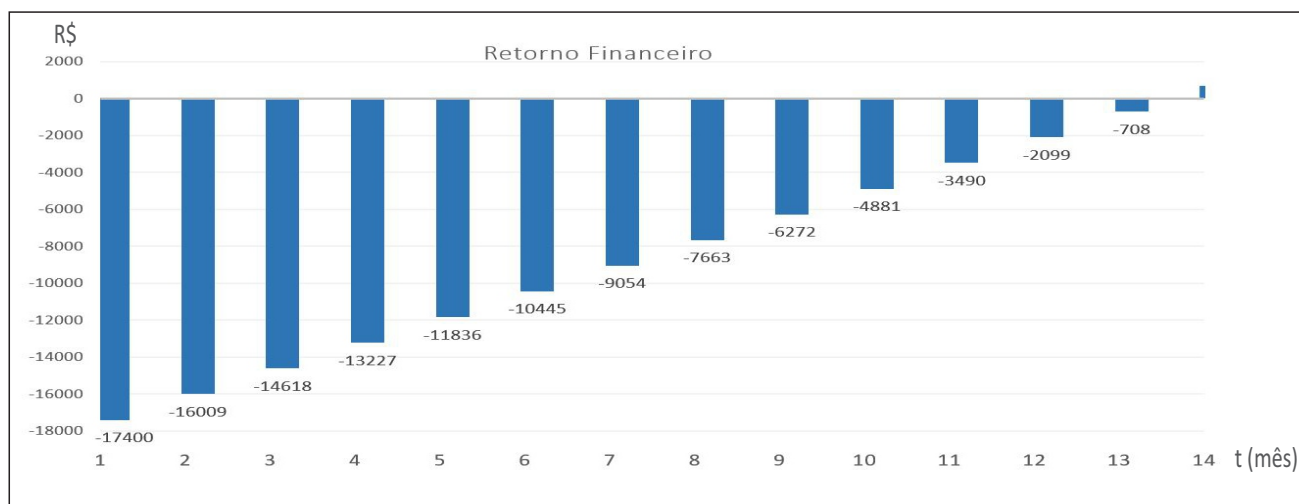
4.3 Retorno do Investimento

Para realizar o cálculo do custo necessário para a automação e analisar o retorno do investimento *feedback*, foram realizadas várias pesquisa de preço em diversas distribuidoras e revendedoras de materiais elétricos. Os orçamentos das distribuidoras e revendedoras foram analisados, e chegando ao menor valor atribuído a automação foi de R\$ 17.400,00, sendo que os orçamentos foram realizados no mês de outubro de 2020.

O *feedback* do investimento foi baseado na redução do consumo energético dos resultados

obtidos na prototipagem em laboratório. O retorno financeiro se dá no décimo quarto mês de implantação do sistema, como mostra a figura 32. A redução foi de R\$1.391,00 reais mês.

Figura 32 – Retorno Financeiro



Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs o desenvolvimento de um projeto de análise de eficiência energética e automação em uma torre de resfriamento de água de uma empresa metalúrgica, visando uma melhor eficiência do processo. A análise mais aprofundada possibilitou a percepção de que o uso da aplicação da análise de eficiência energética no processo industrial é possível e viabiliza maneiras de melhorar o processo produtivo e ao mesmo tempo reduzir desperdícios, aumentando a lucratividade e competitividade das empresas no mercado.

Conforme apresentado nos resultados que foram obtidos através do analisador de energia discutidos na seção 4, as informações de consumo energético em reais dos sistemas atuais de bombeamento e de ventilação evidenciado nas tabelas 5 e 7 respectivamente. A tabela 10 evidência a redução do consumo de energia do protótipo montado bancada em experimental.

Para que a torre de resfriamento consuma menos energia é necessário entender algumas variáveis que influenciam diretamente no seu funcionamento como a temperatura ambiente e quais são as características dos equipamentos que utilizam essa água para sua refrigeração.

Ao conhecer os princípios de operação da torre de resfriamento e do processo que está vinculado a ela, foi possível evidenciar períodos onde a torre estava operando ociosa, neste período foi utilizado os métodos estudados de controle e acionamento para o seu desligamento dos ventiladores e redução da velocidade do sistema de bombeamento com o intuito de reduzir o consumo energético e desgastes de equipamento.

O projeto de análise de eficiência energética e automação se deteve em um controle de temperatura da água e dos equipamentos. Foi utilizado o *Software* CAdE SIMU 3.0 para simulação de acionamentos e de comandos dos motores, as figuras 22 e 24 respectivamente, evidenciando o comportamento positivo do sistema proposto. Também foi utilizado o *Software* TPW-PCLINK para o desenvolvimento do programa do CLP TPW-04, onde foi determinado todo os parâmetros e o determinado quais faixas de operação do controle de velocidade para informar o inversor de frequência.

A primeira etapa do projeto onde foi realizado a parte de simulação, houve uma redução de consumo energético projetada de 4,39 kWh. Essa redução foi possível fazendo o controle dos acionamentos dos ventiladores e a utilização de um inversor de frequência para o controle da velocidade do sistema de bombeamento interno. Na segunda etapa onde foi desenvolvido o protótipo e estima-se que a economia mensal seja de R\$ 1.391,00 e o tempo do retorno do investimento seja de 14 meses.

5.1 Perspectivas Futuras

Quando um sistema de automação é realizado, almeja-se colocar em funcionamento em uma planta industrial para monitorar e acompanhar o projeto em loco, verificando assim a redução do consumo de energia elétrica e também o aumento de vida útil dos equipamentos. Desenvolver um projeto de interface na IHM para um melhor visualização e comando do funcionamento deste sistema de refrigeração.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, A. R. A. **Utilização da fluidodinâmica computacional como ferramenta de estudo em bombas centrífugas**. Tese (Doutorado) — UFRGN, 2018.
- CAPELLI, A. **Automação Industrial Controle do Movimento e Processos Contínuos**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- CHAPMAN, C.; STEPHEN, J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. ISBN 9788580552072.
- COSTA, M. H. F. **Análise comparativa da utilização de dois equipamentos para partida direta de motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo: inversores de frequência x chaves de partida estática (soft-starter) Matheus**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica) — CEFET, Belo Horizonte, 2014.
- CRUZ, C. E. d. J. **automação de torres de resfriamento**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica) — UNISUAM, Rio de Janeiro, 2019.
- EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019 ano base 2018. 2019. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>>. Acesso em: 2020-05-28.
- FERREIRA, C. K.; SCHILLER, M.; COSTA, P. R. **DESENVOLVIMENTO DE UMA TORRE AUTOMATIZADA PARA O RESFRIAMENTO DE ÁGUA**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnologia em Automação Industrial) — UTFPR, Curitiba, 2014.
- FILHO, G. F. **Automação de processos e de sistemas Biblioteca virtual**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.
- FRANCHI, C. M. **Controladores Lógicos Programáveis**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- _____. **Inversores de Frequencia Teoria e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.
- INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- MAGALI, T.; BRUM, M. Proposta de automação industrial em uma empresa fabricante de borrachas escolares. v. 8, p. 4159–4172, 2018.
- MEDEIROS, W. S.; QUELHAS, O. L. G.; LAMEIRA, V. d. J. A AUDITORIA COMO FERRAMENTA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA . EMPRESAS LOCALIZADAS NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO . **Congresso Nacional de Excelência em Gestão**, n. 7, 2011.
- MELLO, L. C. **Influência de variáveis de processo no desempenho de torre de resfriamento**. Tese (Doutorado) — EPUSP, 2008.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. d. L. **Engenharia de Automação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MOURA, M. C. d. P. **Qualidade de energia durante partidas de motores de indução trifásicos: análise de distorções harmônicas**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica) — UNIS, Varginha, 2018.

OLIVEIRA, E. **Eficiência energética no setor industrial**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Elétrica) — UNOPAR, Ponta Grossa, 2018.

PETRUZELLA, F. D. **Controladores Lógicos Programáveis**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

SABINO, R. S. **INSPEÇÃO DE FEIXES TUBULARES DE TROCADORES DE CALOR**. Tese (Doutorado) — UFMG, 2008.

SANTOS, R. C. **Utilização de redes neurais artificiais para determinar o tempo de resposta de sensores de temperatura tipo RTD**. Tese (Doutorado) — IPEN, 2010.

SERRENHO, T.; BERTOLDI, T.; CAHILL, C. Survey of energy audits and energy management systems in the Member. 2015.

SILVA, L. F. **Projeto de automação CLP-SCADA de uma linha de produção simulada de portas automotivas**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso - Engenharia Automotiva) — UnB, Brasília, 2017.

SOLA, A. V. H.; MOTA, C. M. d. M. Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais. **Production**, v. 25, n. 3, p. 498–509, 2015. ISSN 0103-6513.

WEG. **Guia de Aplicação de Inversores de Frequência. WEG Automação**. [S.l.], 2012.

_____. **Inversor de Frequência CFW-11, Manual de Programação**. [S.l.], 2012.

_____. **Manual de Programação TPW-04**. [S.l.], 2015.

APÊNDICE A – Programação em *Ladder* da automação

