

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LEONADO KENDI SUGUAYA ABE

**PROJETO E EXECUÇÃO DA AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE
REFRIGERAÇÃO VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓIO
2016

LEONARDO KENDI SUGUAYA ABE

**PROJETO E EXECUÇÃO DA AUTOMAÇÃO DE UM SISTEMA DE
REFRIGERAÇÃO VISANDO A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, do curso superior de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Endo

CORNÉLIO PROCÓPIO
2016



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Leonardo Kendi Suguaya Abe

Projeto e execução da automação de um sistema de refrigeração visando a eficiência energética

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 17:30hs do dia 08/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Wagner Endo - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Rodrigues Sumar - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Membro)

À minha mãe, um exemplo de mulher guerreira e batalhadora, que sempre esteve junto a mim.

AGRADECIMENTOS

Certamente, não irão aparecer todas as pessoas que fizeram parte da minha vida nesta importante fase e desde já peço desculpas, mas com certeza estão todos em meu coração.

Primeiramente agradeço à Deus, por todas as graças já alcançadas.

Aos meus pais, e principalmente a minha mãe, Lourdes Suguaya, por ter me dado a vida e pelo simples fato de sempre estar ao meu lado.

A minha namorada, Larissa Sertorio, que esteve comigo em todo momento que precisei; de maneira evidente sem ela, não consigo imaginar o quão difícil seria. E a sua avó Maria Ione, pelos cuidados e preocupações comigo.

Aos amigos de Macaubal, Medianeira e Cornélio Procópio, a Tradiça e cia, pela parceria, apoio e amizade. Em especial ao meu camarada de estágio, Alan Cibulski, que me auxiliou com ensinamentos técnicos/didáticos e também ao meu amigo Bruno Simões, o qual vivenciei grande parte da minha graduação.

E agradeço por fim, mas não menos importante, ao meu orientador Wagner Endo, pela enorme paciência, compreensão e pelos conselhos dados.

“Você nunca sabe que resultados virão da sua ação. Mas se não fizer nada, não existirão resultados” (Mahatman Gandhi).

RESUMO

ABE, Leonardo Kendi Suguaya. Projeto e execução da automação de um sistema de refrigeração visando a eficiência energética. 2016. 70 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Este trabalho apresenta uma metodologia aplicada ao sistema de refrigeração em uma indústria de alimentos, localizada na região noroeste do Estado do Paraná, com o intuito de realizar a automatização do controle da temperatura e consequentemente melhorar a eficiência energética do setor. O propósito desse projeto foi a substituição de dezoitos acionamentos eletrônicos, compostos por Soft-Starters, por inversores de frequência, que são equipamentos capazes de modular a velocidade dos motores dos compressores. Esta substituição de componentes tem a finalidade de manter a temperatura do setor ideal e consumir menos energia elétrica. A metodologia foi composta por questionários que indicaram a viabilidade e a possibilidade da continuação do projeto. Por seguinte foram realizados experimentos laboratoriais, utilizando os mesmos equipamentos eletrônicos já citados, porém com potências elétricas menores, com a finalidade de verificar a eficácia do estudo. Se fossem obtidos resultados negativos, o projeto seria encerrado, porém como os resultados foram positivos, foi dada continuidade ao projeto e então realizou a coleta de dados antes e depois da execução do mesmo. Ao final dos trabalhos, foram comparados os dados obtidos e realizado o estudo do payback alcançado, ou seja, a determinação do tempo em que o projeto executado começará a dar retorno financeiro para a empresa.

Palavras-Chaves: Eficiência Energética. Inversor de frequência. Sistema de refrigeração.

ABSTRACT

ABE, Leonardo Kendi Suguaya. Design and implementation of the automation of a cooling system in order to improve energy efficiency. 2016. 70 f. Final Paper of Electrical Engineering Major, Federal Technological University of Parana – Cornélio Procópio. 2016.

This paper brings an applied methodology to a cooling system in a food company, located on northwest of Parana State in Brazil, in order to automate the temperature control, and consequently improve the energy efficiency of the plant. The project purpose consist in the replacement of eighteen electronic Soft-Starters for power inverters, that are capable devices of modulate the velocity of fan's motors in order to keep the ambient temperature at an ideal level and save energy. The methodology includes questionnaires that are going to indicate whether the project is executable. Furthermore, lab experiments will be performed with the same electronic devices already mentioned, but utilizing lower electric powers. This experiments can determinate the efficiency of the project. If satisfactory data were obtained, the project continues, and data will be collected before and after the project implementation, otherwise, the project are going to be shut down. Finally, the data will be compared and the payback shall be determined.

Key-words: Energy Efficiency. Power inverters. Refrigeration system

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Corrente e tensão no circuito resistivo.....	19
Figura 2 - Corrente e tensão no circuito indutivo	20
Figura 3 - Corrente e tensão no circuito capacitivo.....	20
Figura 4 - Triângulo de potência.....	21
Figura 5 - Triângulo de potência com φ menor	22
Figura 6 - Triângulo de potência com φ maior	22
Figura 7 - Comparativo da corrente entre os métodos de partida	31
Figura 9 - Etapa 1	37
Figura 10 - Etapa 2	38
Figura 11 - Etapa 3	39
Figura 12 - Motor utilizado nos ensaios	41
Figura 13 - Corrente do Inversor a 60 Hz em Laboratório.....	41
Figura 14 - Potência do inversor a 60 Hz em Laboratório.....	42
Figura 15 - Corrente do inversor a 40 Hz em Laboratório.....	43
Figura 16 - Potência do inversor a 40 Hz em Laboratório.....	44
Figura 17- Diagrama de blocos do processo.....	47
Figura 18 - Sala de comando.....	48
Figura 19 - Porta do painel.....	49
Figura 20 - Painel por dentro	49
Figura 21 - Esquemático de ligação dos bornes	51
Figura 22 - Controle da temperatura	52
Figura 23 - Corrente do inversor a 60 Hz na indústria.....	54
Figura 24 - Potência do inversor a 60 Hz na indústria.....	54
Figura 25 - Corrente do inversor com controle automático na indústria	55
Figura 26 - Potência do inversor com controle automático na indústria	55
Figura 27 - Potência do inversor com controle automático num período específico	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupo A - Alta tensão.....	25
Tabela 2 - Grupo B - Baixa tensão.....	26
Tabela 3 - Média da frequência.....	43
Tabela 4 - Resultado dos ensaios.....	44
Tabela 5 - Resultado na indústria.....	57
Tabela 6 - Valores da tarifa horária azul.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR – Ambiente de Contratação Regular

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CCEE – Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica

FC – Fator de carga

FP – Fator de potência

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

SIN – Sistema Interligado Nacional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	GERENCIAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	16
2.1.1	Agência Nacional de Energia Elétrica	16
2.1.2	Operador Nacional do Sistema Elétrico	17
2.1.3	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica	17
2.1.4	Fator de Potência e Fator de Carga	18
2.1.5	Taxas e Tarifas	25
2.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	29
2.3	MÉTODOS DE CONTROLE E PARTIDA EM MOTORES DE INDUÇÃO	30
2.4	SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	32
2.5	EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	33
2.6	CONTROLADOR DE VELOCIDADE	33
2.6.1	Controlador Vetorial	34
2.6.2	Controlador Escalar	34
2.7	REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL	35
3.	METODOLOGIA PROPOSTA PARA UM PROJETO DE AUTOMAÇÃO PARA UM TÚNEL DE RESFRIAMENTO	36
3.1	ETAPA 1	36
3.2	ETAPA 2	38
3.3	ETAPA 3	39
3.4	ENSAIOS EM BANCADA	40
4.	DETALHAMENTO E EXECUÇÃO DO PROJETO	46
4.1	DETALHAMENTO DO PROJETO	46
4.2	EXECUÇÃO DO PROJETO	47
4.2.1	Sala de comando	48
5.	RESULTADOS E DISCUSÕES	52
5.1	CONTROLE DA MALHA	52
5.2	RESULTADOS NA INDÚSTRIA	53
5.3	CÁLCULO DA EFICIÊNCIA	58

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIA	63
APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DE LIGAÇÃO	66

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um País rico em diversidade natural, por consequência possui um grande potencial em fornecimento de energia. Nos dias de hoje as hidrelétricas correspondem a mais de 60% de toda energia produzida, porém devido ao aumento da temperatura e da escassez de água, novas fontes de energia elétrica são necessárias para suprir a demanda, como por exemplo as usinas termoelétricas, que são responsáveis por quase 30% da produção total, este tipo de produção utiliza o vapor da queima de combustível fóssil ou do carvão para gerar eletricidade, de modo que não é uma fonte renovável e acaba resultando em maior poluição ambiental, portanto esse tipo de geração encarece a tarifa para o consumidor final (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016)

Em meio a tudo isso, o Brasil ainda sofre com a instabilidade financeira, fazendo com que a energia elétrica fique cada vez mais onerosa para o consumidor. Com isso, consumidores residenciais buscam frequentemente diferentes maneiras de economizar energia, como: apagando todas as luzes ao sair, utilizar o ar condicionado somente quando há real necessidade, banhos mais rápidos, entre outros. Já os setores industriais também não ficam atrás, vão à procura de novas tecnologias, soluções e apostam em eficiência energética para combater o aumento na tarifa.

Desde a geração até a distribuição de energia elétrica o Brasil é monitorado por instituições dos setores elétrico; cada instituição possui seu papel fundamental para que haja o controle, sem desperdício de energia elétrica, fiscalização, entre outras funções. Com certeza, se não houvesse estas entidades seria uma verdadeira bagunça com relação a falta de energia, ou a sobra de energia produzida.

Nota-se que existe grande procura acerca de novas tecnologias no mercado industrial, objetivando encontrar uma maneira de consumir gastando menos, para isso contam com a eficiência energética como uma das principais soluções para tal problema.

O termo eficiência energética denota a procura de alguma atividade que visa melhorar o uso das fontes de energia. Neste trabalho utilizou-se inversores de frequência para diminuir potência ativa consumida e, conseqüentemente,

acarretar na diminuição da tarifa energética (CAMPOS, 2004). De fato, observa-se que este equipamento não é apenas um acionamento de motor, pois também é possível variar a velocidade do mesmo, a fim de minimizar a potência gasta com o trabalho sem carência.

Este trabalho propõe então a implementação de um sistema automático de refrigeração em uma indústria de alimentos, com o intuito de melhorar a sua eficiência energética, através dos acionadores de motores. Deste modo, será possível a obtenção de resultados reais, devido as informações serem retiradas de uma unidade consumidora, informações estas ligadas diretamente a tarifa de energia elétrica, portanto será possível realizar o aproveitamento da eficiência energética.

A coleta dos dados será realizada através do software MCT-10, o qual realiza a comunicação com o equipamento instalado, este acesso só será possível por meio de um protocolo de comunicação. A obtenção dos dados, portanto propicia o monitoramento em tempo real das ações que estão sendo tomadas pelo controle automático; para este estudo foi determinado um período de 24 horas.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é propor uma metodologia para a realizar estudos de viabilidade técnica referente a instalação de acionamentos de velocidade variável em um sistema de refrigeração industrial. Tal metodologia trata-se de um estudo de caso, desenvolvido em uma indústria de alimentos congelados situada na cidade de Maringá – PR. Serão realizados testes nos acionamentos utilizados pela referida indústria, posteriormente os testes em bancada serão feitos, a fim de comprovar a eficácia da troca dos acionamentos, comprovado isso e apresentado os resultados à indústria, será realizada a troca dos antigos acionamentos pelos propostos, neste caso: inversores de frequência. Por último, os dados serão comparados com o intuito de verificar a comprovação do estudo em questão.

Os objetivos específicos a serem alcançados com este trabalho são:

- Efetuar um estudo a respeito de um sistema de refrigeração;

- Elaborar uma metodologia acerca da viabilidade técnica e econômica da instalação de inversores de frequência;
- Realizar experimentos laboratoriais com intuito de comprovar a eficácia da metodologia;
- Realizar a coleta de dados antes e depois da instalação dos inversores de frequência;
- Comparar os resultados obtidos em ambos os casos;
- Apresentar os resultados alcançados com a realização do projeto.

1.2 JUSTIFICATIVA

Este projeto possui como principal interesse reduzir o consumo de energia elétrica em uma indústria de alimentos, para isso a proposta foi trocar os acionamentos convencionais utilizados pela referida indústria, por inversores de frequência. Após realizar a substituição dos acionamentos, o objetivo principal será alcançado com sucesso, além de aumentar o tempo de vida útil dos motores, impactar uma economia financeira e obter um payback rápido e seguro.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo abordará o gerenciamento da energia elétrica no Brasil relacionado a um conceito de eficiência energética nas indústrias, que estão diretamente ligados a métodos de controle de acionamento dos motores de indução. Além disso, será abordada uma breve definição de um sistema de refrigeração, e para que possa ser realizado o controle automático, serão apresentados os equipamentos e suas características particulares.

2.1 GERENCIAMENTO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

O principal objetivo do gerenciamento da energia elétrica é basicamente reduzir gastos em relação a geração, transmissão e distribuição, além de monitorar a qualidade da energia elétrica que a unidade consumidora recebe e conseqüentemente põe ordem no setor.

O gerenciamento de energia elétrica no Brasil possui uma estrutura estabelecida por instituições do setor elétrico brasileiro, como por exemplo a Agência Nacional de Energia Elétrica, Operador Nacional do Sistema Elétrico, Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, entre outros departamentos responsáveis.

2.1.1 Agência Nacional de Energia Elétrica

Sua missão é proporcionar condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes e em benefício da sociedade, possuindo como principais atribuições:

- Regular a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica;
- Fiscalizar, diretamente ou mediante convênios com órgãos estaduais, as concessões, as permissões e os serviços de energia elétrica;
- Implementar as políticas e diretrizes do governo federal relativas à exploração da energia elétrica e ao aproveitamento dos potenciais hidráulicos;
- Estabelecer tarifas;

- Mediar, na esfera administrativa, os conflitos entre os agentes e os consumidores;
- Por delegação do governo federal, promover as atividades relativas às outorgas de concessão, permissão e autorização de empreendimentos e serviços de energia elétrica.

Todas essas atribuições possuem a principal função, proporcionar melhores condições para que o setor de energia elétrica se desenvolva e proporcione benefícios ao consumidor final (Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016).

2.1.2 Operador Nacional do Sistema Elétrico

Essa entidade é responsável pela coordenação e controle da operação na geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), de acordo com a própria entidade. Este órgão desenvolve uma série de estudos e ações a serem exercidas sobre o sistema e também sobre seus agentes, a fim de manejar o estoque de energia garantindo a segurança do suprimento contínuo em todo o País (Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2016).

Garantindo assim para os consumidores padrões adequados de qualidade e continuidade do suprimento, confiabilidade e menor custo na energia elétrica produzida, minimizando a falta de energia elétrica entre outros benefícios.

Conforme Barros et al. (2011), o ONS controla a operação de usinas de médio e grande porte, de tensão superior a 230 kV. Já para tensão inferior, é de responsabilidade da transmissora ou distribuidora de energia elétrica local.

2.1.3 Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

A CCEE é responsável pela operação do mercado de energia elétrica no Brasil, pela contabilização e pela liquidação financeira no mercado de curto prazo de energia. Atua como instituição responsável por oferecer esta estrutura e viabilizar as operações de compra e venda de energia em todo o SIN (Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, 2016).

Entre suas principais atribuições estão:

- Implantar e divulgar regras e procedimentos de comercialização;
- Manter o registro de dados de energia gerada e de energia consumida;
- Realizar leilões de compra e venda de energia no ACR, sob delegação da Aneel;
- Realizar leilões de Energia de Reserva, sob delegação da Aneel, e efetuar a liquidação financeira dos montantes contratados nesses leilões;

2.1.4 Fator de Potência e Fator de Carga

São estes fatores que indicam se a energia está sendo bem aproveitada e se existe a possibilidade de melhoria. Através desses índices é possível gerar maior eficiência e segurança nos equipamentos, além de proporcionar uma redução na tarifa energética.

2.1.4.1 Fator de Potência e Correção

Fator de potência é o índice de aproveitamento de energia consumida, expressa em porcentagem pela razão da energia que é paga (energia aparente), pela energia que realmente é utilizada em trabalho útil (energia ativa).

Os valores deste fator variam entre 0 e 1; quando se assume que o valor é próximo a 1 ou 100%, representa que toda energia elétrica aplicada na máquina foi transformada em energia mecânica no eixo, porém como se trabalha em corrente alternada é fundamental mantê-lo mais próximo possível de 100%, inclusive é exigido pelos concessionários um índice mínimo de 0,92. Para aumentar este índice é preciso observar a defasagem que há entre tensão e corrente. Existem 3 casos para a defasagem:

- Circuito resistivo

É o circuito que apresenta somente resistores e obedece à Lei de Ohm;

$$U = R \cdot I \quad (1)$$

Sendo:

U = Tensão em Volts [V];

R = Resistência em Ohms [Ω];

I = Corrente em Ampères [A].

Neste caso o ângulo de defasagem é igual a 0° , pois não ocorre diferença entre tensão e corrente. Se aumentar a tensão aplicada no resistor, a corrente aumenta na mesma proporção, ou seja, circuito linear. Conforme demonstrado pela Figura 1:

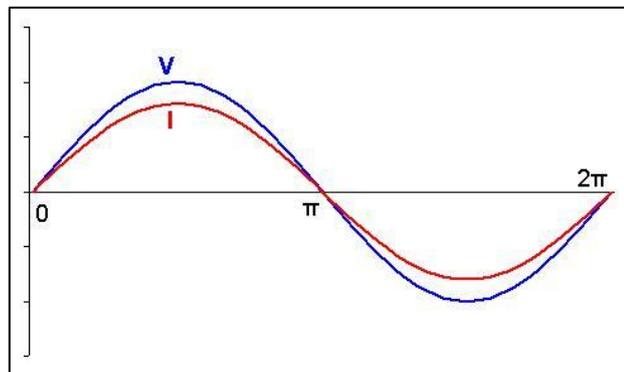


Figura 1 – Corrente e tensão no circuito resistivo
Fonte: Autoria Própria

- Circuito Indutivo:

Este circuito gera campo magnético através das bobinas que existem nos equipamentos, produzindo assim potência reativa. Portanto, determina-se circuito indutivo quando a corrente estiver atrasada em relação a tensão, e por existir uma defasagem entre a tensão e a corrente, determina-se que quanto maior for esta defasagem menor será o fator de potência. De acordo com a Figura 2:

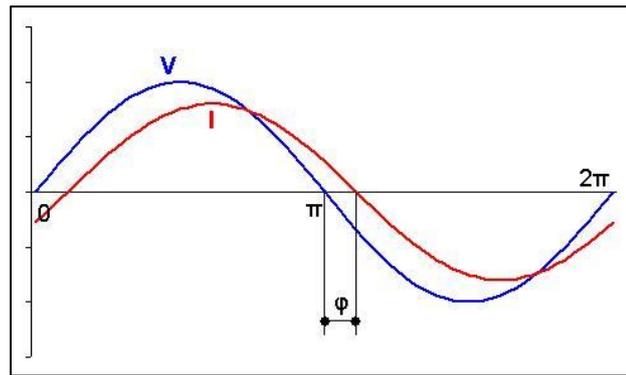


Figura 2 - Corrente e tensão no circuito indutivo
Fonte: Autoria Própria

O fenômeno constituído pela resistência à circulação de corrente é denominado reatância indutiva, expressa da seguinte forma:

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (2)$$

Sendo:

L = Indutância da bobina ou condutor em Henry [H]

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ = Frequência angular [rad/s]

f = Frequência do sistema [Hz]

- Circuito Capacitivo:

São circuitos capazes de gerar campo elétrico por meio dos capacitores existentes. Sendo que neste ocorre o oposto do circuito indutivo, pois a corrente está adiantada em relação a tensão, conforme disposto na Figura 3:

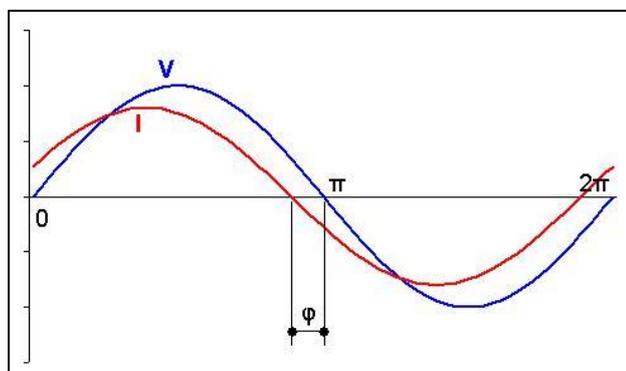


Figura 3 - Corrente e tensão no circuito capacitivo
Fonte: Autoria Própria

Sendo assim a reatância capacitiva, expressa por:

$$X_c = 1/\omega.C \quad (3)$$

Onde:

C = Capacitância em Farad [F]

$\omega = 2.\pi.f$ = Frequência angular [rad/s]

f = Frequência do sistema [Hz]

A maioria das máquinas nas industriais são motores e transformadores, sendo estas máquinas indutivas. Conforme apresentado os circuitos indutivos possuem uma corrente atrasada em relação a tensão, e para corrigir tal defasagem é necessária a instalação de um banco de capacitores. Dessa maneira, será possível equilibrar a defasagem existente, agregando ao circuito indutivo as características do circuito capacitivo.

O fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente. O interessante para eficiência energética é sempre obter um alto fator de potência, caso contrário indica um baixo aproveitamento em relação a eficiência energética.

A fim de acrescer, é fundamental a compreensão sobre o triângulo de potência, representado por um triângulo retângulo, que descreve as três potências existentes, conforme Figura 4:

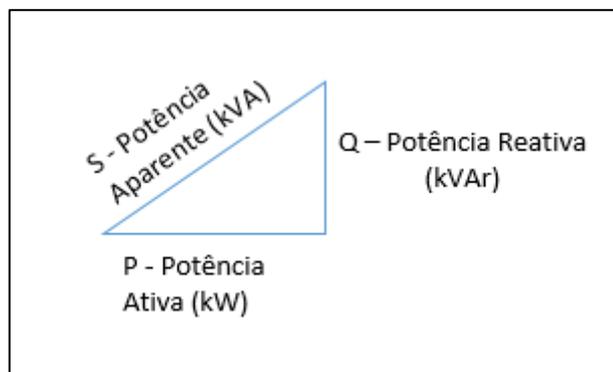


Figura 4 - Triângulo de potência
Fonte: Autoria Própria

Por equações matemáticas entende-se que:

$$\text{Fator de Potência} = \frac{(kW)}{(kVA)} = \cos \varphi \quad (4)$$

Conforme tratado, a questão é que para se obter maior fator de potência é preciso diminuir a potência reativa, assim o ângulo φ será correspondente a sua diminuição, expresso da seguinte maneira:

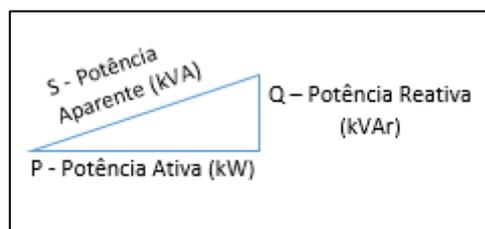


Figura 5 - Triângulo de potência com φ menor
Fonte: Autoria Própria

Em hipótese oposta, quanto maior a carga reativa no circuito, maior o ângulo φ , por consequência o fator de potência será menor, de acordo com figura abaixo:

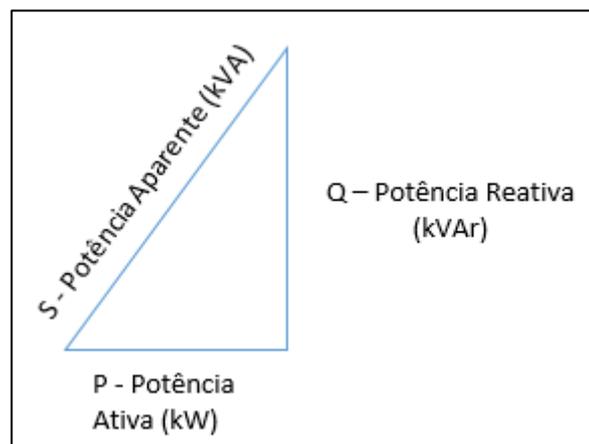


Figura 6 - Triângulo de potência com φ maior
Fonte: Autoria Própria

2.1.4.2 Fator de Carga

Este índice indica se a energia está sendo utilizado de forma racional e econômica, varia também entre zero e um, igual ao fator de potência. Sendo definido pela razão entre a energia ativa consumida e a energia máxima que pode ser utilizada em um determinado intervalo de tempo, pode ser obtida também através da demanda média pela demanda máxima registrado em um determinado período.

Como o estudo principal visa a eficiência energética, é necessário que o fator de carga seja o mais próximo possível de 1, obtendo assim um melhor fator de carga, indicando que o circuito elétrico utiliza a potência disponível durante a medição.

Aos consumidores de energia que estão no grupo B (residenciais), não há necessidade dos valores da demanda, portanto é impossível demonstrar o fator de carga. Porém para consumidores do grupo A (industriais) o fator de carga apenas pode ser apresentado na fatura de energia elétrica, não podendo ser cobrado.

Para realizar o cálculo do fator de carga dos consumidores da classe A, é necessário conhecer o enquadramento tarifário, sendo convencional ou horossazonal.

Se considerado a tarifa convencional, o fator é expresso da seguinte forma:

$$FC = \frac{C}{D \times T} \quad (5)$$

Onde,

FC = Fator de carga;

C = Consumo (kWh);

D = Demanda (kW);

T = Tempo (h).

Se forem considerados consumidores da tarifa horossazonal, são elaborados dois cálculos, sendo um para horário de ponta e outro para fora de ponta, é obtido:

$$FC(p) = \frac{C(p)}{D(p) \times T(p)} \quad (6)$$

Sendo que,

$FC(p)$ = Fator de carga em horário de ponta;

$C(p)$ = Consumo na ponta (kWh);

$D(p)$ = Demanda na ponta (kW);

$T(p)$ = Tempo na ponta (h).

$$FC(fp) = \frac{C(fp)}{D(fp) \times T(fp)} \quad (7)$$

Onde,

$FC(fp)$ = Fator de carga em horário fora de ponta;

$C(fp)$ = Consumo fora da ponta (kWh);

$D(fp)$ = Demanda fora da ponta (kW);

$T(fp)$ = Tempo fora da ponta (h).

Resultado próximo a 1 representa que as demandas consumidas ao longo do dia são bem próximas a demanda máxima, conseqüentemente a demanda contratada pode ser próxima a este valor.

Caso ocorra uma melhoria do fator de carga haverá então uma redução do valor da demanda contratada, conseqüentemente diminuindo o valor na tarifa de energia elétrica, mas antes é necessário a realização de um estudo para analisar se é economicamente viável a redução da demanda.

Para realizar a análise do estudo do fator de carga, é importante verificar em qual período do dia acontece o maior valor da demanda, para isso é necessário equipamento de medição, como analisadores de energia.

2.1.5 Taxas e Tarifas

No Brasil as tarifas de energia elétrica estão divididas em dois grupos; tendo o grupo A para alta tensão e o grupo B para baixa tensão. O grupo A, é utilizada em indústrias e subdividido por níveis de tensão, que varia entre 2,3 a 230 kV. O grupo é classificado conforme Tabela 1 abaixo:

Tabela 1 - Grupo A - Alta tensão

Grupo A	Tensão (kV)
A-1	≥ 230
A-2	88 a 138
A-3	69
A-3 ^a	30 a 44
A-4	2,3 a 13,8
A-S	A partir do sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste grupo em caráter opcional.

A tarifa aplicada a este grupo é a binômica, ou seja, segundo a COPEL é o conjunto de tarifas de fornecimento, constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável (alta tensão).

Já o grupo B, relativo a baixa tensão, possuem tensões inferiores a 2,3 kV e são classificados por categoria como mostrada na Tabela 2. E a tarifa aplicada a este grupo é a monômica, que conforme a COPEL é a tarifa de fornecimento de energia elétrica, constituída por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa (baixa tensão).

Tabela 2 - Grupo B - Baixa tensão

Grupo B	Categoria
B-1	Residencial
B-1	Residencial de baixa renda
B-2	Rural
B-2	Cooperativa de utilização rural
B-2	Serviço público de irrigação
B-3	Demais classes
B-4	Iluminação pública

As especificações do grupo A, nas tarifas para indústrias, além do cálculo que é feito para a cobrança da taxa (kWh), o qual é determinado pela categoria do grupo A, ainda é cobrada outra taxa, que é a demanda, fornecida em kW. A tarifa trata-se de um custo fixo para a prestação de um serviço por determinada unidade. Representa o preço em reais da energia elétrica e da demanda utilizada pelos consumidores (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2011).

Assim para cada subgrupo A é utilizada uma tabela específica, ou seja, para cada classe de consumidor do subgrupo A, há uma tabela de valores correspondente.

2.1.5.1 Tarifa convencional

A estrutura binômica é ainda subdividida em convencional e horossazonal, a diferença entre as duas trata-se da relação entre os valores em diferentes horários do dia.

A tarifa convencional independe das horas de utilização do dia e dos períodos do ano, são aplicadas para tensões inferiores a 69 kV e com demanda contratada inferior a 300 kW. Tal modalidade de tarifa é aplicada apenas para

consumidores que não tenham optado pela tarifa horossazonal, sendo assim o cálculo para a tarifa é realizado da seguinte forma:

$$\text{Preço} = PT(c) \times T(c) \times R\$(c) \quad (8)$$

Onde,

$PT(c)$ = Potência Total Consumida (kW);

$T(c)$ = Tempo Total (horas);

$R\$(c)$ = Valor do kWh.

2.1.5.2 Tarifa horossazonal

Em contrapartida a tarifa horossazonal esta subdivida em azul e verde. Cada uma com sua particularidade relacionada a valores em diferentes horários do dia. Tais particularidades são determinadas como ponta, fora da ponta e por períodos no ano (úmido e seco).

A tarifa azul conforme a COPEL, é destinada a consumidores que têm alto fator de carga no horário de ponta, com capacidade de modulação de carga neste horário. Esta tarifa é composta por valores diferenciados, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano. Composta de:

- Demanda na ponta (seco ou úmido)
- Demanda fora da ponta (seco ou úmido)
- Consumo na ponta úmido
- Consumo fora da ponta úmido
- Consumo na ponta seco
- Consumo fora da ponta seco

Esta tarifa está disponível a todos os consumidores ligados em alta-tensão, sendo obrigatória a aplicação desta a todos os consumidores dos níveis

A-1, A-2 e A-3, e opcional aos demais níveis, sendo a equação feita da seguinte maneira:

$$Preço = PT(p) \times T(p) \times R\$(p) \quad (9)$$

Onde,

$PT(p)$ = Potência Total Consumida na ponta (kW);

$T(p)$ = Tempo Total na ponta (horas);

$R\$(p)$ = Valor do kWh na ponta.

$$Preço = PT(fp) \times T(fp) \times R\$(fp) \quad (10)$$

Sendo que,

$PT(fp)$ = Potência Total Consumida fora da ponta (kW);

$T(fp)$ = Tempo Total fora da ponta (horas);

$R\$(fp)$ = Valor do kWh fora da ponta.

A Tarifa Verde em contrapartida é destinada aos consumidores com baixo fator de carga no horário de ponta, com capacidade limitada de modulação neste mesmo horário. Este tipo de tarifa é composta por valores diferenciados de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, e por uma única tarifa de demanda de potência em qualquer horário de utilização, composta de:

- Demanda na ponta e fora (seco ou úmido);
- Consumo na ponta úmido;
- Consumo fora da ponta úmido;
- Consumo na ponta seco e
- Consumo fora da ponta seco.

Observando que, o horário de ponta é das 18 às 21 horas, com exceção do horário de verão que é das 19 às 22 horas, portanto, os demais horários do dia e os finais de semanas são considerados fora de ponta (Companhia de Energia Elétrica do Paraná, 2016). E o cálculo é realizado da mesma forma do horossazonal azul, mudando apenas os valores.

O grupo B, que são as unidades consumidoras ligadas em baixa tensão, são faturadas pela “tarifa monômnia”. A REN 414/2010 define “Tarifa monômnia de fornecimento: aquela que é constituída por valor monetário aplicável unicamente ao consumo de energia elétrica ativa, obtida pela conjunção da componente de demanda de potência e de consumo de energia elétrica que compõem a tarifa binômnia”.

Segundo Barros, Borelli e Gedra (2011) isso ocorre porque a empresa tem que manter seu sistema elétrico e sua estrutura de atendimento em perfeito funcionamento, permitindo assim que o consumidor utilize a energia elétrica no momento em que desejar. E o chamado custo de disponibilidade, presente nas tarifas aplicáveis ao faturamento de unidades consumidoras atendidas em baixa tensão de fornecimento. Para os consumidores do grupo B a cobrança do fator de potência é facultativa, ficando a critério da distribuidora cobrar ou não do consumidor. Caso a distribuidora opte por cobrar o fator de potência, a medição não necessariamente precisa ser permanente, como ocorre no grupo A, podendo ser transitória, por um período mínimo de sete dias (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2011).

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo Sola e Mota (2015), o conceito de eficiência é atingir o melhor resultado com um mínimo de perda de recursos, isto é, fazer o melhor uso possível do dinheiro, do tempo, materiais e pessoas. No caso em questão, trata-se em fazer um melhor uso da energia elétrica, na questão econômica e também ambiental.

As indústrias que investem em eficiência energética podem economizar vários recursos como energia, manutenção, durabilidade da máquina, ganhar competitividade no mercado e amenizar o aumento no consumo de energia

elétrica, porém as mesmas enfrentam dificuldades como a avaliação do risco e a maneira de realizar este investimento (ARAGÓN et al., 2013).

O assunto eficiência energética tem estado em pauta na comunidade científica mundial por ser uma maneira de reduzir gases de efeito estufa, contribuindo assim, para mitigar as mudanças climáticas, portanto a questão hoje não é apenas a economia financeira, mas também em relação ao meio ambiente.

Assim, a maioria dos projetos acontece com a simples troca dos equipamentos (CAMPOS, 2004). Investimentos de forma correta nesta área podem se tornar lucrativos e obter um resultado de imediato, o qual chamamos de payback, um retorno de investimento de forma rápida e segura (ARAGÓN et al, 2013).

É de se perceber que a eficiência energética está também vinculada aos métodos de partida dos motores elétricos, pois dependendo da partida o consumo de corrente elétrica pode ultrapassar a corrente nominal em até 6 vezes, acarretando num alto consumo da energia elétrica e uma diminuição na vida útil dos equipamentos.

2.3 MÉTODOS DE CONTROLE E PARTIDA EM MOTORES DE INDUÇÃO

Segundo Solak (2012), pode-se controlar a variação da temperatura, pressão e carga através do controle on-off, que é realizado por meio de um operador que utiliza o relé de liga e desliga. Em setores que há grandes variações da unidade medida, ocorre diversas vezes este controle, que acarreta em menor tempo na vida útil dos motores e um alto gasto na energia elétrica.

Para Kopelvska (2013), existem diversos tipos de partida no motor para este tipo de controle, como partida direta, estrela-triângulo, partida eletrônica utilizando soft-starter e para o controle automático utiliza-se o inversor de frequência.

A partida direta, é a forma mais simples de se partir um motor, sendo o mesmo ligado diretamente na rede através de contatoras apenas, para este tipo de partida deve-se atentar a corrente de partida, pois quando ligado diretamente a tensão da rede é 5 a 6 vezes maior que a corrente nominal, porém a vantagem

é seu menor custo e alto torque de partida quando comparada as outras formas de partida (GONÇALVES, 2012).

Outro método de partida é estrela-triângulo que realiza a partida no motor com um fechamento em estrela e logo após conduz o motor ao fechamento em triângulo, com o intuito de diminuir o consumo da corrente no momento da partida, com isso também há uma diminuição do torque no motor, deve-se conhecer a aplicação antes de utilizar o método (KOPELVSK, 2013).

A partida utilizando soft-starter consiste em 3 pares de tiristores ou SCRs ligados em paralelo, a fim de aplicar uma tensão variável durante a aceleração, o ângulo de disparo é controlado eletronicamente para que tenha uma partida suave, e sua vantagem em comparação as outras é a corrente de partida que chega aproximadamente três vezes da nominal e o torque próximo a nominal, outra vantagem é o aumento na vida útil dos motores, porém possui um custo alto e não modela a velocidade dos motores como os inversores (WEG).

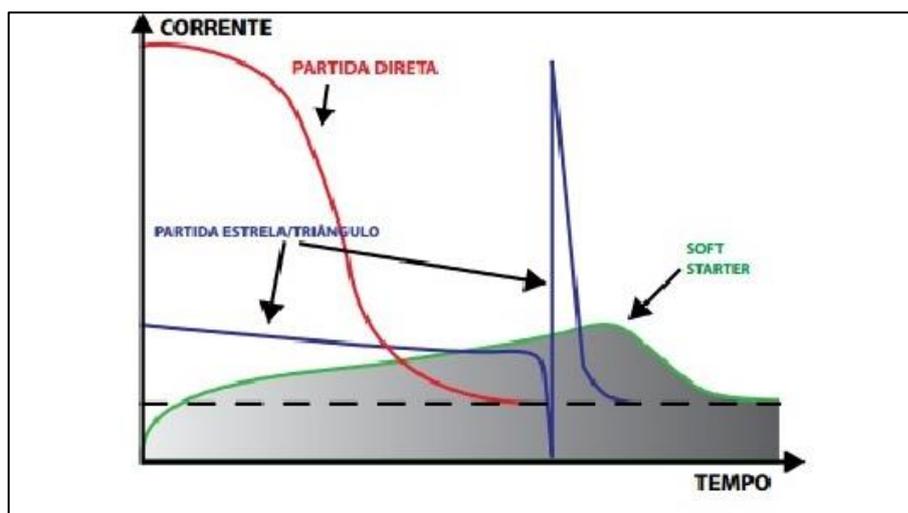


Figura 7 - Comparativo da corrente entre os métodos de partida
Fonte: Kopelvsk, 2013

A partida através de inversores de frequência é parecida com a da soft-starter, porém os inversores possuem a característica de modular a velocidade de saída dos motores, esta vantagem é acompanhada pela economia de energia que pode gerar, através do menor consumo da potência ativa. Por este motivo utiliza-se em diversas aplicações como, sistemas de refrigeração, esteiras, e muito mais.

2.4 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

As instalações de refrigeração industrial utilizam-se muitas vezes do controle on-off, no qual não há preocupação com a eficiência energética, para o presente caso o controle será automático.

Sistemas de refrigeração podem ser de médio e grande porte, presentes nos frigoríficos de resfriamento, congelamento e estocagem de grandes volumes de alimentos, possuem como característica principal a utilização de amônia como refrigerante primário. As aplicações tipicamente industriais são a produção de gelo e estocagem de produtos resfriados e congelados, tais como: carnes, aves, peixes, cervejarias, fábricas de laticínios entre outras. A temperatura de estocagem de congelado situa-se entre -18°C e -30°C , utilizando câmaras frigoríficas de grande porte e túneis de congelamento, mas podem variar de acordo com determinado processo (STOECKER, 1985).

No congelamento, os produtos são expostos a baixas temperaturas, geralmente através de um túnel de congelamento, fazendo com que os mesmos atinjam o mais breve possível a temperatura adequada ao armazenamento congelado, ou seja, igual ou inferior a -18°C , com a conseqüente cristalização de uma parte da água e alguns solutos.

A velocidade do processo de congelamento é um fator importante para a qualidade final do produto, sendo que no método de congelamento lento há remoção de água das células e grandes cristais de gelo são formados, podendo ocorrer danos físicos aos tecidos e as paredes celulares, o que pode ocasionar reações indesejáveis, como o desenvolvimento de aroma, sabores desagradáveis, redução do valor nutricional, alterações na textura e aparência dos produtos após o descongelamento (VIEIRA, 2007).

Já no método de congelamento rápido, os cristais de gelos formados são menores e a qualidade final do produto tende a ser superior. Os túneis de congelamento funcionam a uma temperatura de -36°C , e o processo de congelamento varia em relação ao produto que está sendo congelado. No caso do frango inteiro, leva cerca de 10 horas para que o produto atinja uma temperatura entre -25°C a -35°C e sair do túnel de congelamento dentro do padrão, pronto para receber sua embalagem final e seguir no processo. Já o

túnel de congelamento de cortes e miúdos leva cerca de 15 horas para o congelamento dos mesmos (VIEIRA, 2007).

Como o controle da temperatura do setor será realizada de maneira automática, será necessário a utilização de mais equipamentos além do inversor de frequência, como sensores de temperatura e conversores.

2.5 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Neste projeto serão utilizados três equipamentos, sendo um sensor de temperatura, a fim de coletar a temperatura ambiente do setor; um controlador N1200, com o intuito de converter o sinal do sensor da temperatura em 4 – 20 mA e um inversor de frequência, que irá receber o sinal enviado pelo controlador.

O sensor de temperatura utilizado trata-se do PT-100 que possui uma resistência de 100 Ω para uma temperatura a 0 °C. Este sensor é de alta precisão sendo utilizado em diversas modalidades (MORGADO, 2008).

O controlador N1200 é um equipamento da marca NOVUS, que possui a finalidade de converter o sinal de 0-10 V_{cc} recebido do sensor de temperatura para um sinal de 4-20 mA e enviá-lo ao inversor de frequência, além disso fará os ajustes necessários para a regulação da velocidade dos motores.

Conforme Rashid (2004), o inversor de frequência trata-se de um equipamento eletrônico capaz de modular a frequência da rede, a qual é de 60 Hz ou 50 Hz dependendo do país, para diferentes valores conforme a aplicação, sendo que o resultado varia diretamente na velocidade de rotação do motor. Além desta vantagem, o inversor possui característica de controle de velocidade, sendo vetorial ou escalar.

Por meio do inversor, pode-se configurar valores para uma rampa de aceleração/desaceleração, que significa em quanto tempo o motor irá atingir a velocidade desejada e o tempo da sua parada, podendo ser por inércia ou utilizando o break do equipamento.

2.6 CONTROLADOR DE VELOCIDADE

O acionamento dos motores de indução pode ser realizado de diferentes maneiras, conforme mencionado anteriormente, através da ligação direta,

estrela-triângulo, soft-starter, inversores de frequência, entre outros. E na indústria uma aplicação bastante utilizada é a variação de velocidade através de inversores de frequência, com controlador vetorial ou escalar. (AGUIAR; CAD, 2000).

2.6.1 Controlador Vetorial

É um método utilizado em aplicações em que é primordial um alto desempenho dinâmico, a fim de controlar o torque e a velocidade do equipamento.

O controle vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle tanto do torque quanto da velocidade do motor. O nome vetorial advém do fato que para ser possível este controle, é feita uma decomposição vetorial da corrente enviada ao motor nos vetores que representam o torque e o fluxo no motor, de forma a possibilitar a regulação independente do torque e do fluxo (SENAI, 2009).

Assim, este método por ser mais preciso no controle do torque e da velocidade, faz com que minimize a potência ativa consumida e também a corrente eficaz. Dependendo do fabricante ou do modelo do inversor de frequência é preciso utilizar encoder, dispositivo que reproduz pulsos elétricos que ficam acoplados ao motor; porém para o projeto não será necessário este dispositivo.

2.6.2 Controlador Escalar

Também conhecido como controle V/f , atua diretamente sobre o módulo e frequência das variáveis do motor, sem dar importância à fase instantânea. Esse tipo de controle tem por intuito manter o torque eletromagnético constante.

Este controle é utilizado em aplicações em que não precisam de um alto desempenho, que não requerem bruscas frenagens, respostas dinâmicas de aceleração e nem precisão no controle de torque e velocidade.

Este tipo de controle apresenta uma maior corrente de partida, provocando um esforço muito maior, tornando-o menos eficiente que o controle

vetorial. Sendo assim o controle escalar não consegue controlar com eficiência a velocidade e a potência da máquina durante transitórios rápidos (SOARES, 2015)

2.7 REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL

A comunicação entre equipamentos é de extrema necessidade na indústria, sendo que a utilização de redes permite com que seja mais rápida e viável, fatores indispensáveis. Além disso, utilizam protocolos de comunicação padronizados, ou seja, permitem a interligação de equipamentos entre diversos fabricantes. (NOGUEIRA, 2009)

Pode-se destacar como umas das suas principais funções a transmissão da informação coletada através de um sensor para um controle ou para uma unidade de processamento e, também, a transmissão de comando enviado através de um controle para os respectivos elementos atuadores, como motores, válvulas, entre outros equipamentos (SIMAS, 2011)

Conforme Nogueira (2009), a importância das redes de comunicação industrial está relacionada a grande quantidade de informações que são trocadas entre os mais variados equipamentos e aplicações, seja apenas para monitoramento, ou até mesmo para gerenciamento da unidade, assim é primordial que as informações sejam em tempo real.

Com o aumento na comunicação há também um aumento no número de Entradas/Saídas, assim as especificações nos cabos são elevadas. Por consequência cada vez mais as ligações em série dos componentes utilizam Fieldbus, devido ao menor custo de mão de obra e material, pois não necessitam de tanto trabalho e maior agilidade na comunicação. (SCHNEIDER ELECTRIC, 2007).

Conforme comentado a respeito dos protocolos padronizados, os mesmos são de grande importância, tanto que as redes passam a ser denominadas pelos protocolos. Resumindo, o protocolo é um conjunto de regras sobre o modo como se dará a comunicação entre as partes envolvidas. A escolha do protocolo depende da aplicação, caso ocorra violação, o mesmo irá dificultar ou até mesmo impossibilitar a comunicação. Pode-se utilizar diversos protocolos como, Modbus, Profibus, Devicenet, entre outros. (NOGUEIRA,

2009). Para realização da comunicação há diversos tipos de métodos de troca de dados, podendo ser mestre/escravo, multimestre, ponto a ponto, etc.

Para o projeto está sendo utilizado o protocolo de comunicação MODBUS, que permite com que até 247 equipamentos trabalhem na mesma comunicação. Este protocolo é aberto e utilizado em comunicação em série, com saída serial pelo padrão RS-485, sendo dois fios (positivo e negativo), para a troca de informações. Este tipo de protocolo só é viável até 120 metros de distância, após esta metragem a comunicação não se torna tão confiável.

E o método utilizado é do tipo mestre/escravo, como se este protocolo criasse uma estrutura hierárquica, onde o mestre envia informações para os escravos e espera a resposta, ou o mestre manda instruções para um conjunto de escravos sem esperar resposta. Como se o mestre enviasse uma ordem e esperasse ou não pela resposta, porém dois escravos não podem dialogar ao mesmo tempo (SCHNEIDER ELECTRIC, 2007). Assim, para o projeto o papel do inversor mestre é calcular a resposta de saída e enviar o comando para os drives seguintes. O envio da ordem é instantâneo para os drives.

3. METODOLOGIA PROPOSTA PARA UM PROJETO DE AUTOMAÇÃO PARA UM TÚNEL DE RESFRIAMENTO

Neste capítulo será apresentada a metodologia de viabilização da automatização do setor de resfriamento em uma empresa de alimentos, para melhor entendimento se faz necessário subdividir os questionamentos em três importantes etapas. Após o estudo de viabilidade será apresentado os ensaios realizados em bancada.

3.1 ETAPA 1

Se inicia os questionamentos do processo de viabilização do projeto de automatização de resfriamento de um túnel pela etapa 1, exibida na figura 9.

Equipamentos que se utilizam do controle on-off com pouca frequência, possuem grandes chances de redução na energia elétrica, caso permanecerem

a maioria do tempo desligados, caso contrário, é baixa a redução na energia elétrica. Para dar seguimento aos estudos é importante que haja o controle on-off com frequência, ou se os equipamentos ficarem a maioria do tempo ligado, com isso é necessário analisar se há possibilidade de instalação dos inversores de frequência.

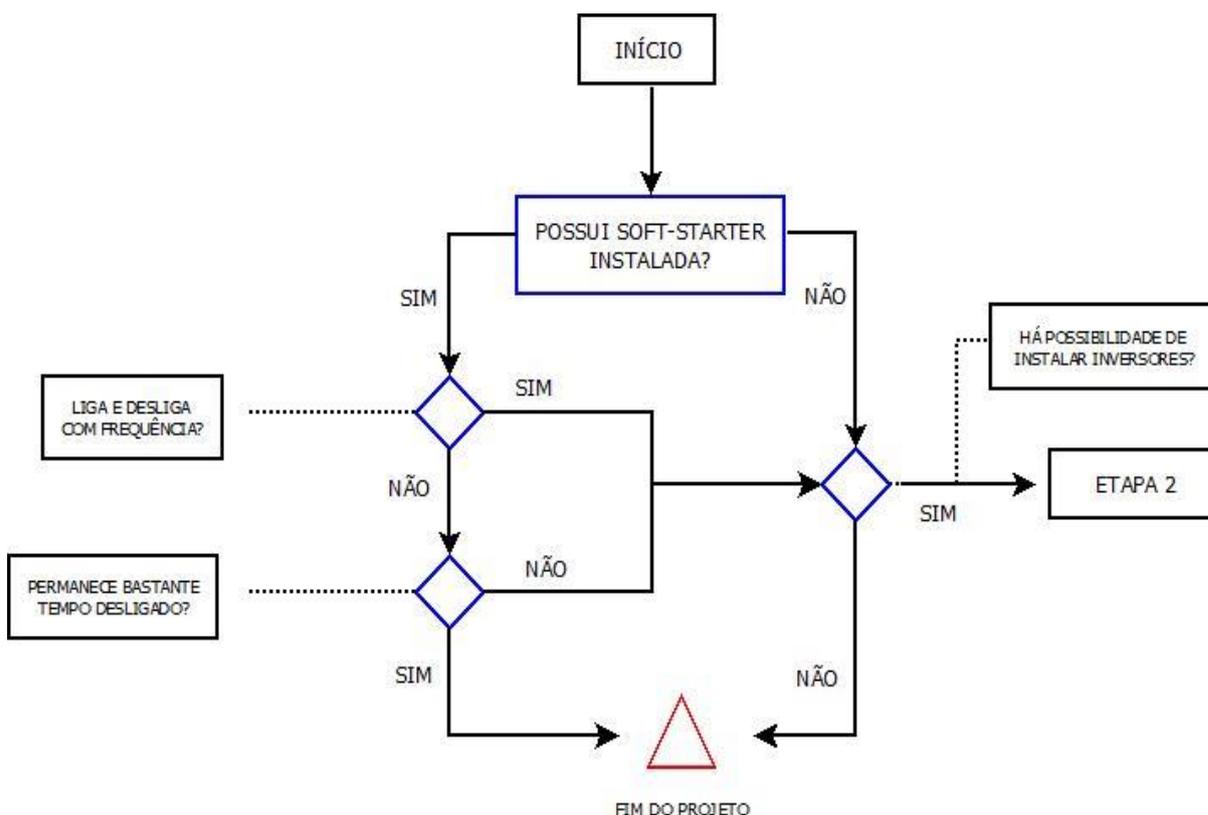


Figura 8 - Etapa 1
Fonte: Autoria Própria

Ao iniciar os estudos se faz necessário conhecer os dados de placa dos motores, pois se forem motores de baixa potência a economia de energia não será tão significativa.

É essencial verificar se é permitido a redução da velocidade nos motores dos compressores, pois dependendo da estrutura e do processo poderão acarretar em sérios problemas, como o superaquecimento no setor. Se não for possível a instalação dos inversores de frequência o estudo será finalizado. Se possível a instalação dos equipamentos o estudo prossegue para a etapa 2.

3.2 ETAPA 2

Esta etapa inicia-se com o questionamento se existe a possibilidade de realizar uma parada no setor, pois por questões de segurança é necessário que haja o desligamento do painel de alimentação das soft-starters, que estão instaladas para que possa ocorrer a troca dos acionamentos, senão o projeto é finalizado sem sucesso, conforme Figura 10.

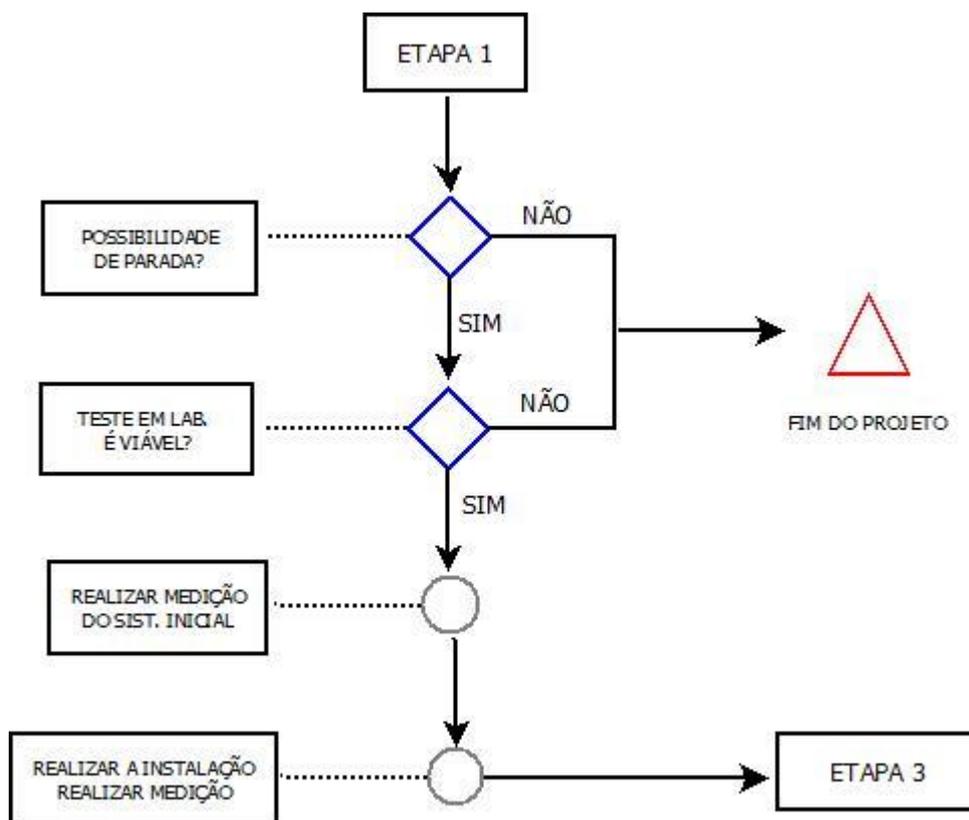


Figura 9 - Etapa 2
Fonte: Autoria Própria

Havendo possibilidade de parada, os testes em laboratórios foram iniciados, utilizando-se equipamentos com mesmas características, mas com menores potências.

Se os testes fossem satisfatórios, seria dado continuidade ao projeto com a realização das medições do sistema existente, para ser comparado com os dados após a instalação, caso os ensaios não fossem aceitáveis o projeto seria finalizado sem sucesso.

Após medições do sistema inicial, foi possível realizar a substituição dos equipamentos pelos inversores de frequência. Sendo de extrema necessidade que os painéis estivessem totalmente desligados para que não ocorresse nenhum imprevisto com relação à segurança. Os limites mínimos e máximos de velocidades foram ajustados conforme necessidade do setor. E a velocidade, neste caso, foi determinada de 30 Hz a 60 Hz, respectivamente, com base em cálculos de um histórico de medições, e a temperatura ideal para estocagem é de -36 °C.

Com os inversores de frequência já instalados e programados conforme necessidade, foi necessário realizar as medições do novo sistema e dar sequência para próxima etapa.

3.3 ETAPA 3

Nesta etapa os dados foram analisados e realizada uma comparação dos sistemas, a fim de obter o conhecimento do sucesso ou não do projeto. Conforme Figura 11, finalizando o projeto com sucesso.

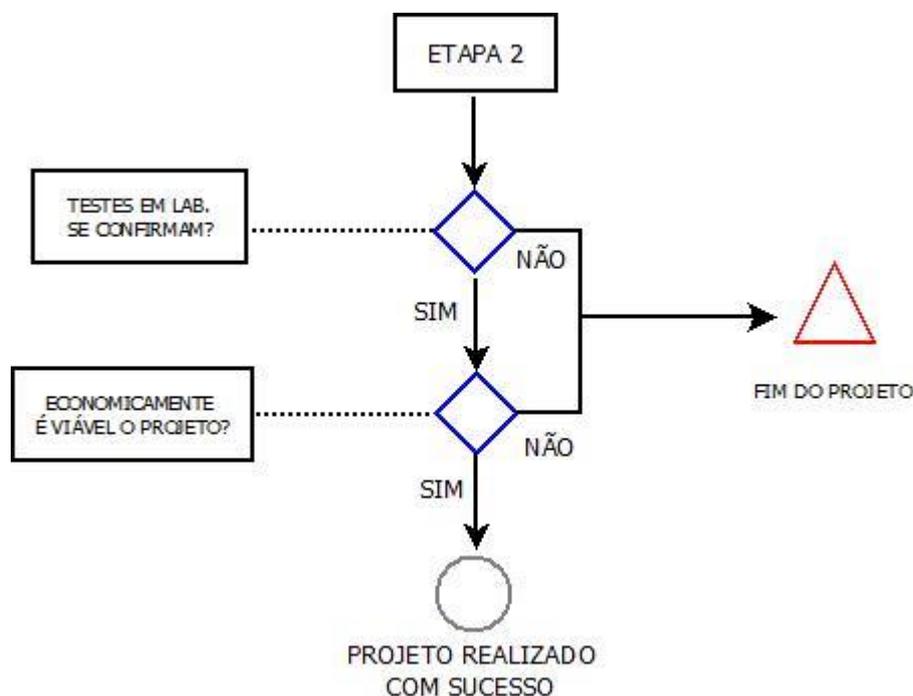


Figura 10 - Etapa 3
Fonte: Autoria Própria

Iniciou-se então a etapa dos testes realizados em bancada, que se confirmaram com o projeto executado, obtendo as respostas em porcentagem, pois os ensaios em laboratório foram de proporções bem menores com relação a indústria. Caso o projeto instalado não conseguisse alcançar os resultados esperados seria o fim do projeto, senão seriam realizados os estudos do payback a fim de saber se o projeto seria economicamente viável.

O payback pode ser encontrado da seguinte maneira:

$$Payback = \frac{Investimento\ Inicial}{Economia\ Diária} \quad (11)$$

O resultado é expresso em dias, com o valor obtido é possível afirmar se o projeto é economicamente viável ou não. Para o projeto em questão será considerado viável um payback inferior a 549 dias (1 ano e meio), caso este tempo de retorno seja superior encerra-se o projeto sem sucesso, senão o projeto será finalizado com total sucesso.

3.4 ENSAIOS EM BANCADA

Antes de executar o projeto, foram realizados testes em bancada do laboratório para comprovar a sua eficácia ou não.

Como não é possível realizar a leitura do software com a Soft-Starter, os dados obtidos do equipamento foram através do analisador de energia e com alicate amperímetro.

Os experimentos em bancada do laboratório foram divididos em três etapas, para que dessa forma pudesse ser comparado valores e então discutidos sobre a eficácia do mesmo.

Para que não houvesse nenhuma desigualdade em relação a apresentação dos resultados, todos os ensaios foram realizados na mesma bancada, com o mesmo motor de potência de 4 kW, corrente nominal de 8,2 A, conforme Figura 12, e todos foram submetidos ao mesmo tempo de experimento, sete minutos. Serão coletados a potência e corrente para a comparação final.



Figura 11 - Motor utilizado nos ensaios
Fonte: Aatoria Própria

Desta forma o primeiro ensaio foi realizado com a Soft-Starter, como já informado sobre a comunicação. Os dados deste ensaio foram apresentados na Tabela 4. Continuando os experimentos, o segundo ensaio foi realizado com o inversor a uma frequência de 60 Hz.

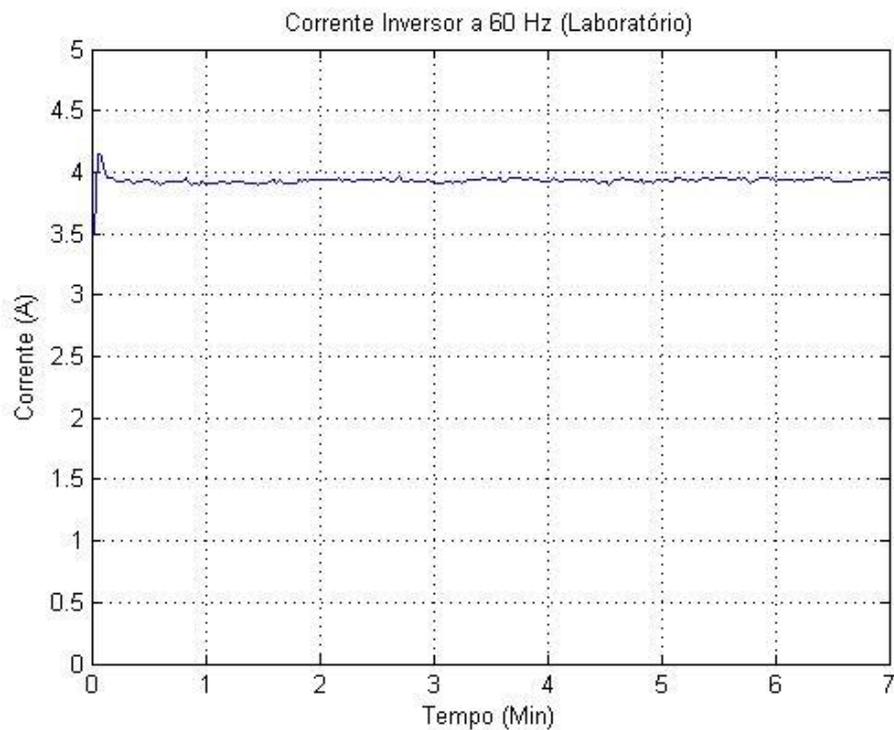


Figura 12 - Corrente do Inversor a 60 Hz em Laboratório
Fonte: Aatoria Própria

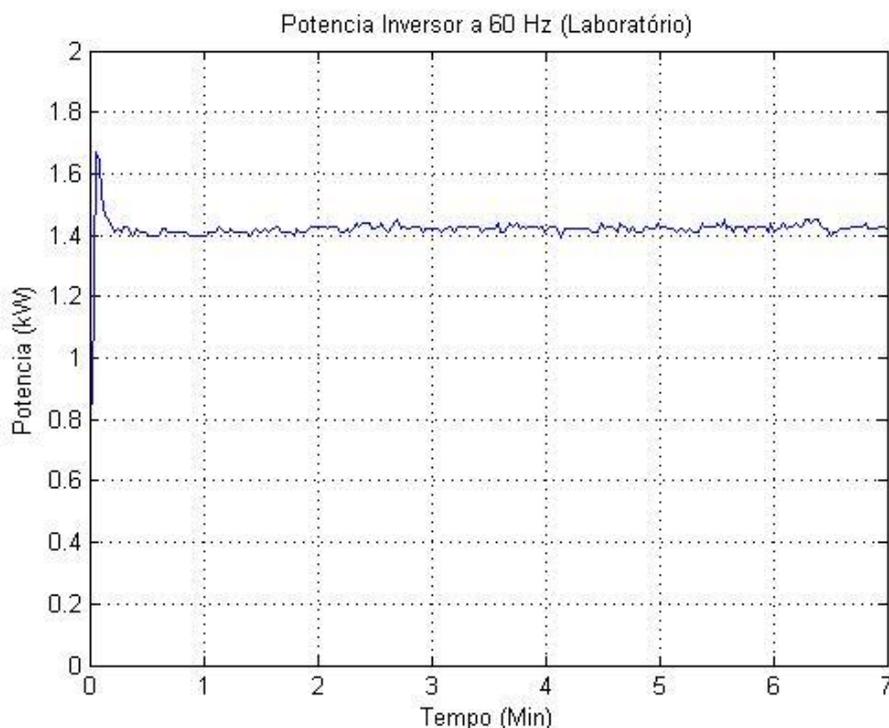


Figura 13 - Potência do inversor a 60 Hz em Laboratório
Fonte: Autoria Própria

Na terceira e última etapa dos ensaios, foi utilizado o mesmo inversor que havia sido instalado no procedimento anterior, porém com uma diferença, a sua frequência, que passa agora ser de 40 Hz, pois a empresa não trabalha durante os finais de semana, então os motores dos compressores não dispõem em trabalhar a uma velocidade a 60 Hz, podendo reduzir seu trabalho em até 60%.

Conforme começa a semana, há necessidade de aumentar a velocidade, para isso foi determinado uma velocidade média para o estudo. Sabe-se que durante os finais de semana a sala, denominada túnel, fica fechada pois não há produção, portanto também não há troca de calor com o ambiente externo. Porém no começo da semana, quando a produção se inicia, utilizando-se primeiramente uma velocidade relativamente baixa, pois ainda há frio acumulado do final de semana, mas com o decorrer da semana, se faz necessário aumentar consideravelmente a velocidade, devido a troca de calor que ocorre com mais frequência. Com a realização dos cálculos, os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 3 - Média da frequência

Dias da semana	Frequência (Hz)
Segunda-feira	35
Terça-feira	45
Quarta-feira	55
Quinta-feira	60
Sexta-feira	50
Sábado	30
Domingo	24

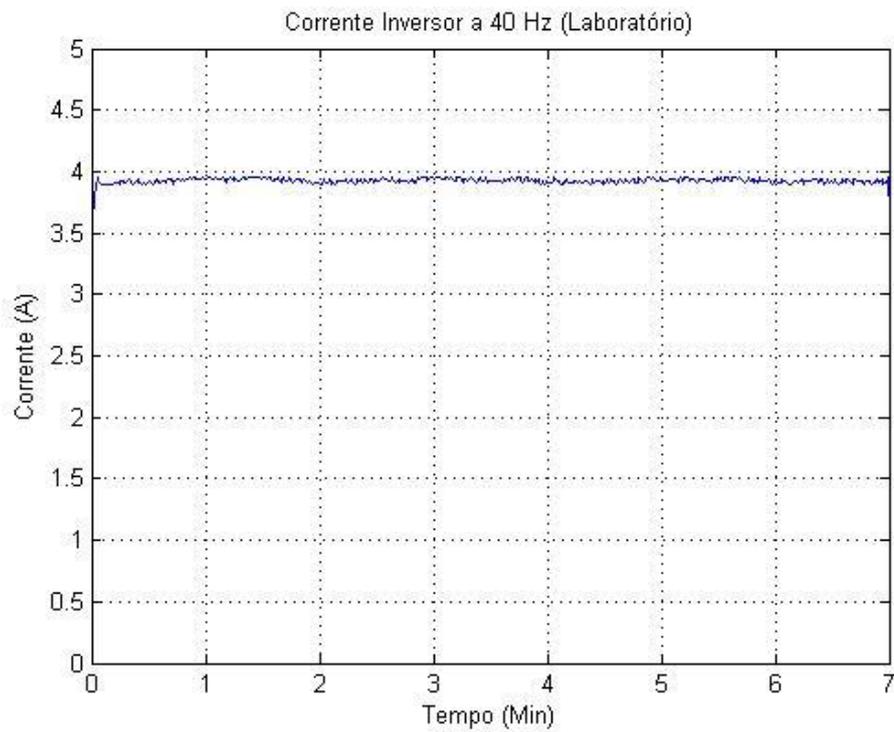


Figura 14 - Corrente do inversor a 40 Hz em Laboratório
Fonte: Autoria Própria

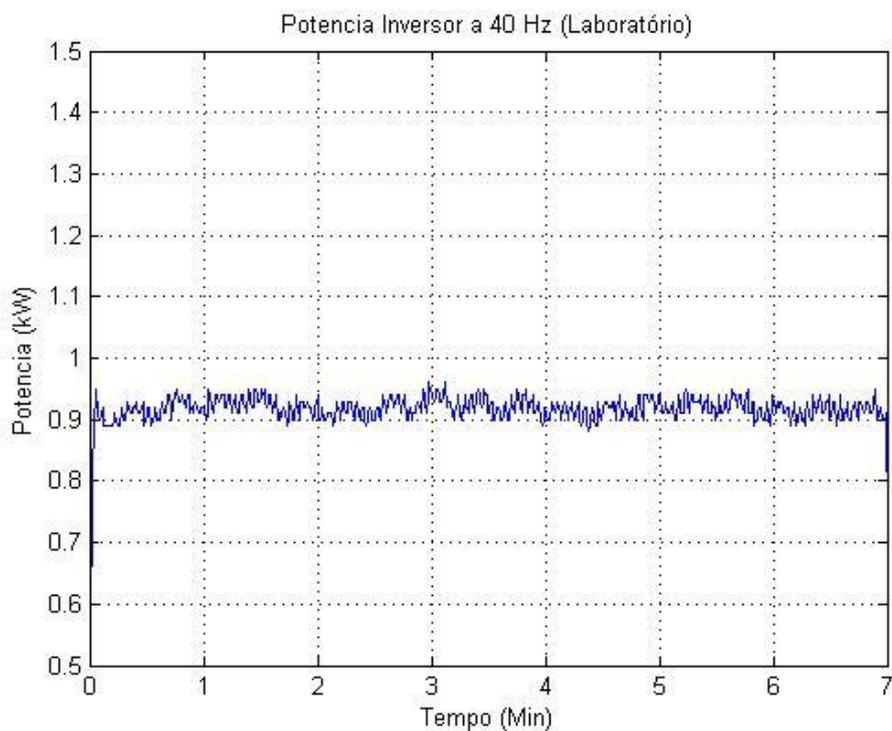


Figura 15 - Potência do inversor a 40 Hz em Laboratório
Fonte: Autoria Própria

Para este ensaio foi utilizado o mesmo motor do experimento anterior, não foi submetido a nenhuma carga também, porém com velocidade controlada a 40 Hz, ou seja, a única diferença que obteve foi a redução da velocidade.

Tabela 4 - Resultado dos ensaios

Grandezas elétricas	Soft- Starter	Inversor (60 Hz)	Inversor (40 Hz)
Frequência (Hz)	60,00	60,00	40,00
Corrente Eficaz (A)	4,20	3,93	3,93
Potência Ativa (kW)	1,45	1,42	0,92
Fator de Potência	0,80	0,83	0,88
Tempo do experimento (Min)	07	07	07

A diferença da Soft-Starter em relação ao inversor com frequência a 60 Hz está apenas relacionada a sua partida, pois o consumo da corrente e da potência é bem maior.

Nota-se que nos inversores com velocidade a 60 Hz e a 40 Hz, houve apenas diferença em relação a potência. Nos ensaios realizados pode parecer pouca a discrepância, porém se visto em porcentagem percebe-se que há uma elevada diferença de 35,21% e se comparado a soft-starter o valor da economia passa a ser de 36,55%. Em grandes valores tal porcentagem é extremamente vantajosa.

Comprovada a eficácia do projeto em bancada, pode-se dizer que em execução o projeto também será realizado com sucesso. Através destes experimentos ainda não foi possível dizer exatamente quanto será economizado e quanto tempo levará para o payback.

4. DETALHAMENTO E EXECUÇÃO DO PROJETO

Este capítulo apresenta o detalhamento do projeto, ou seja, como será realizado, quais as etapas, e quais os procedimentos que serão tomados ao decorrer da execução do projeto, a fim de se obter a eficiência energética.

4.1 DETALHAMENTO DO PROJETO

Para a melhoria da eficiência energética foi proposto a substituição do acionamento convencional, o qual utilizava dezoito soft-starter's, equipamento eletroeletrônico industrial utilizado para partir motor elétrico, e que não possui recurso de variar velocidade. A ideia foi substituir a soft-starter's por inversores de frequência, com o objetivo de modular a velocidade dos motores dos v compressores, e conseqüentemente reduzir o consumo de energia elétrica.

Através do analisador de energia foi constatado o consumo das grandezas elétricas na utilização do equipamento soft-starter, antes da implantação do sistema. Por conseguinte, os instrumentos foram interligados em campo e programados de acordo com as características do processo para obter melhores resultados.

A variável estudada foi a temperatura interna do setor de estocagem do produto final, utilizando um transmissor de temperatura PT-100 de 0 a 10 V_{cc}, o qual varia a sua resistência de acordo com a variação de temperatura. Conforme ocorre a variação da temperatura do setor de estocagem, o sensor rapidamente envia um sinal para o controlador, que o transmite para a entrada analógica do primeiro drive (drive mestre) em 4 – 20 mA, levando em consideração os valores do sensor. A partir deste ponto o inversor de frequência calcula automaticamente a velocidade necessária de trabalho, a fim de manter a temperatura do setor na faixa de -38 °C a -30 °C, sendo que a temperatura ideal para estocagem seria de -36 °C. O sinal é repassado para o drive seguinte através da saída analógica, e assim sucessivamente, conforme a Figura 17.

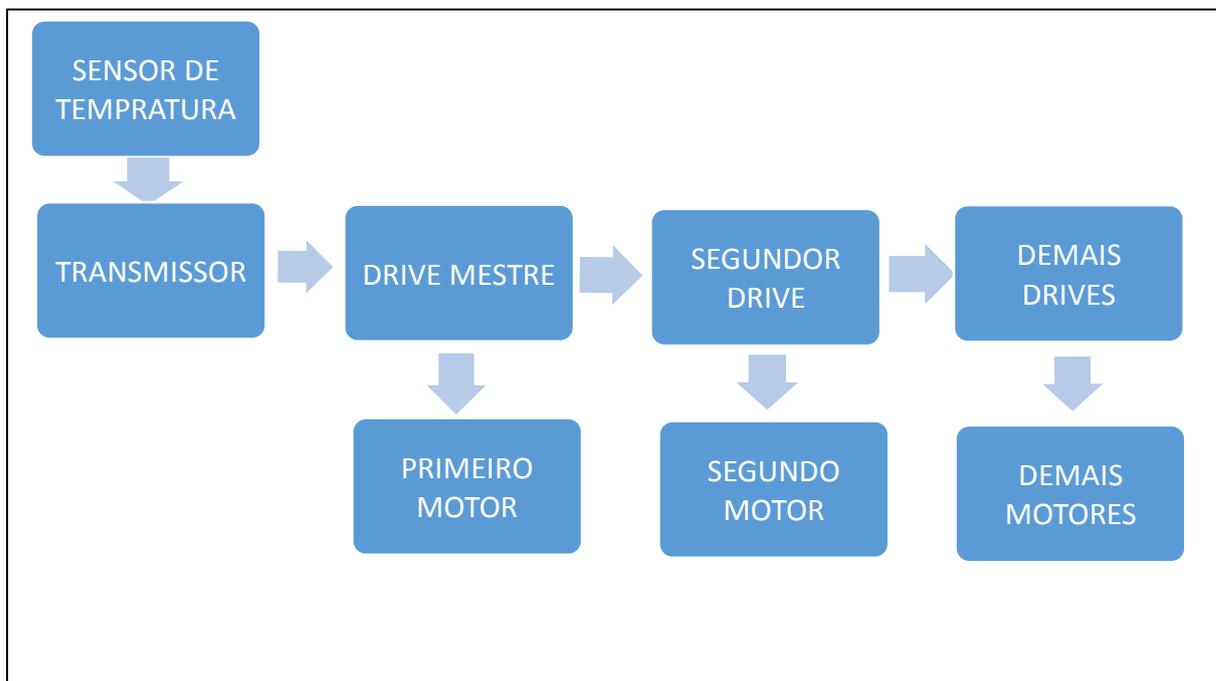


Figura 16- Diagrama de blocos do processo
 Fonte: Autoria Própria

A alimentação dos inversores é de 380 V_{AC}, sendo que a proteção do circuito será realizada por um disjuntor termomagnético de 600 A. Os dezoito motores possuem potência de 22 kW cada, e são responsáveis por manter a temperatura ideal para o processo.

4.2 EXECUÇÃO DO PROJETO

Para a execução do projeto foram selecionados dezoito inversores de frequência com 37 kW idênticos, os quais comandarão os dezoito motores dos compressores que possuem potência equivalente a 22 kW. Foi necessário um dimensionamento superior às futuras alterações, pois a empresa também possui o intuito de aumentar a sua produção. Com isso, os inversores de frequência foram dimensionados já visando esse aumento.

O modelo dos inversores são o FC-101 da marca Danfoss que possuem a particularidade da opção de torque de economia automática de energia, por se tratar de compressores, não há a necessidade do torque constante, tendo um aumento de torque somente no momento da sua partida para tirá-lo da inércia.

Os inversores ficaram instalados dentro do painel elétrico com as devidas seguranças, conforme descrita na Norma Regulamentadora 12 (NR-12), a qual é específica para segurança elétrica.

4.2.1 Sala de comando

Na sala onde os painéis elétricos ficaram instalados, houve uma preocupação em relação a temperatura ambiente, pois uma alta temperatura no local poderia prejudicar a vida útil dos equipamentos elétricos, pois os capacitores e as placas eletrônicas não suportam uma temperatura elevada por muito tempo. Para resolver isso foi necessário instalar ar-condicionado a fim de manter a temperatura ambiente na sala, conforme demonstrado na Figura 18.



Figura 17 - Sala de comando
Fonte: Autoria Própria.

Houve também uma preocupação com relação a temperatura interna dentro dos painéis elétricos, portanto foram instalados coolers nas portas dos painéis. E por uma questão física, os exaustores ficaram na parte inferior da porta do painel e os compressores na parte superior para que o ar quente pudesse ser expelido.

As portas dos painéis possuem botoeiras para escolha do controle manual ou automático do inversor de frequência, botoeiras de emergência e também LED indicando se o painel esta energizado ou não, e display gráfico do equipamento eletrônico, como Figura 19.



Figura 18 - Porta do painel
Fonte: Aatoria própria

Dentro do painel, os inversores de frequência ficaram em posição vertical, com disjuntor individual e contadoras para a ligação dos comandos no equipamento eletrônico, a Figura 20 mostra o painel por dentro.



Figura 19 - Painel por dentro
Fonte: Aatoria Própria

4.2.2 Esquemática de ligação

O diagrama elétrico que se encontra nos anexos, consiste na alimentação trifásica 380 Vac da rede, a qual alimenta os equipamentos instalados através do disjuntor geral termomagnético de corrente nominal: 1000 A.

Em seguida, foi necessário a utilização de dezoito disjuntores de corrente regulável entre 32 A, com isso cada acionamento possui sua chave geral, podendo ser desenergizado individualmente.

Entretanto, o acionamento dos motores não seria mais realizado por soft-starter's e sim por inversores de frequência, equipamentos capazes de modular a sua velocidade, com isso o objetivo foi alcançado.

Já a interligação entre os comandos do equipamento será realizada da seguinte maneira; A alimentação comum ($0 V_{cc}$) da fonte do controlador, é conectada com todas as alimentações comum da fonte do inversor de frequência e a alimentação positiva ($24 V_{cc}$) da fonte do controlador é interligado com todas as alimentações positiva dos inversores de frequência, e também as entradas digitais responsáveis pelo sinal de partida dos motores, desse modo são ligados a uma entrada digital através de uma chave liga e desliga, sendo responsável por habilitar a partida dos motores.

As saídas analógicas são classificadas em comum e positiva (4-20 mA) do controlador, sinais estes que são utilizados como referência de velocidade para o primeiro inversor pelos terminais da entrada analógica. Por meio destes terminais a velocidade mínima e máxima é determinada nos motores, sendo entre 40 e 60 Hz. Para os seguintes inversores, que recebem o sinal da saída analógica do inversor anterior e são interligados nos terminais da entrada analógica dos próximos equipamentos, conforme figura abaixo.

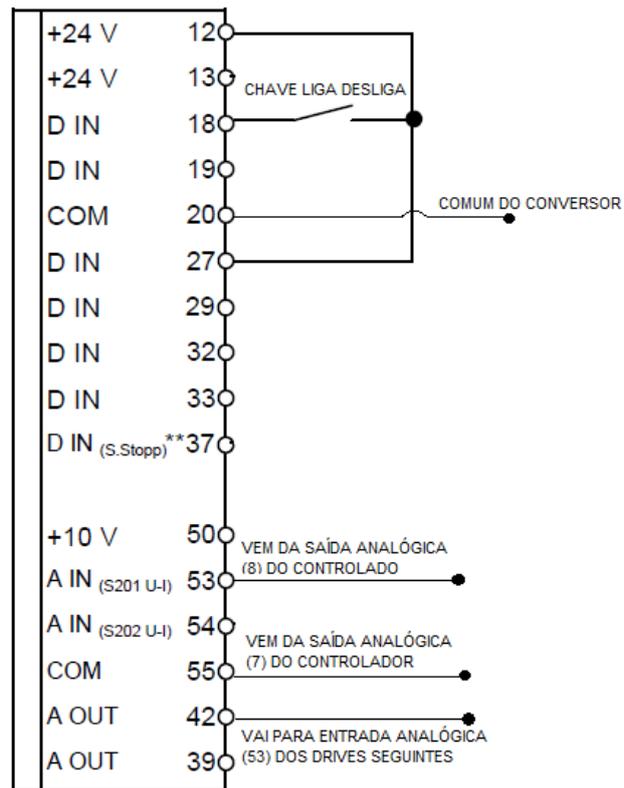


Figura 20 - Esquemático de ligação dos bornes
 Fonte: Autoria Própria

5. RESULTADOS E DISCUSÕES

O ajuste da temperatura é realizado através do controlador N1200 (Novus), além disso o mesmo converte o sinal do sensor de temperatura, sendo possível configurar uma temperatura ideal, uma máxima e também mínima.

E o cálculo que será realizado para verificar o payback, ressalta-se que este se refere apenas sobre o projeto executado e não sobre toda a indústria. Então para a análise somente irá utilizar-se o valor do consumo (R\$/kWh). Porém com relação ao valor da demanda, o qual não irá contribuir nos cálculos, pois esta demanda poderá ser utilizada em outras atividades dentro da própria indústria, como o aumento de produção.

5.1 CONTROLE DA MALHA

O ajuste da malha do controle de temperatura pode ser demonstrado conforme o diagrama de blocos a seguir. Sendo que o PT-100 trata-se de um sensor de temperatura que varia a resistência conforme a temperatura, justificando o seu nome, então quando a temperatura for igual a 0 °C, tem-se uma resistência equivalente a 100 Ω . Pois o sistema de refrigeração é composto tanto pelos inversores de frequência como pelos motores dos compressores.

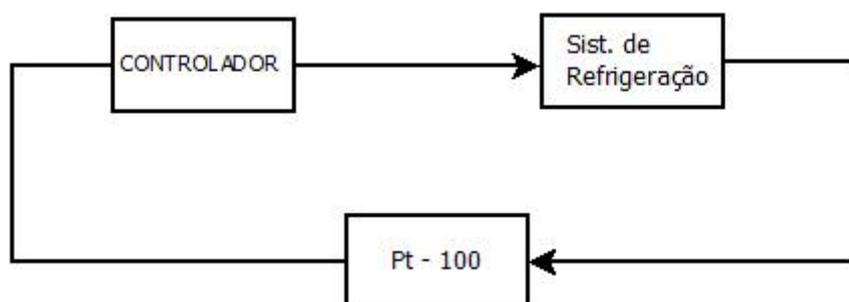


Figura 21 - Controle da temperatura
Fonte: Autoria Própria

No controlador, o ciclo de escala será regulado com a temperatura ideal em 36 °C negativos, com valor mínimo (Setpoint Low Limit) de 38 °C negativos, e valor máximo (Setpoint High Limit) em 30 °C negativos. Assim, quando for registrada uma temperatura mínima de -38 °C o controlador envia uma corrente de 4 mA para o inversor. Já para uma temperatura de -30 °C, o controlador indica uma corrente de 20 mA. Com isso, o inversor de frequência recebe estes sinais do controlador e faz a regulação necessária da velocidade dos motores entre a velocidade mínima e máxima, sendo estas de 40 Hz e de 60 Hz.

O controlador trabalha em modo automático com sintonia auto-adaptativa, ou seja, o desempenho do processo é monitorado e sempre que este piorar a sintonia auto-adaptativa será iniciada pelo controlador. Desse modo, pequenos desajustes da sintonia são praticamente imperceptíveis, mas para o desajuste grande inicia-se a sintonia.

5.2 RESULTADOS NA INDÚSTRIA

Para comprovação da eficácia do projeto, a coleta de dados foi realizada em três momentos, semelhantes aos experimentos em bancada. A primeira coleta foi realizada antes da instalação do projeto, com a utilização das soft-starter's; em segundo momento, foram coletados os dados já com os inversores de frequência instalados a uma velocidade de 60 Hz, e por último os dados foram coletados com o controle automático de velocidade ajustado. Além da utilização do analisador de energia foi utilizado o software MCT-10 para realizar a coleta dos dados

Da mesma maneira que o nos testes, o software não fez comunicação com a soft-starter, com isso os resultados serão apresentados na Tabela 5.

Em segunda instância, as soft-starters foram desinstaladas para a instalação dos novos equipamentos, os inversores de frequência. Os quais foram submetidos a uma velocidade de 60 Hz, durante um dia todo, através do software foi possível obter os seguintes gráficos;

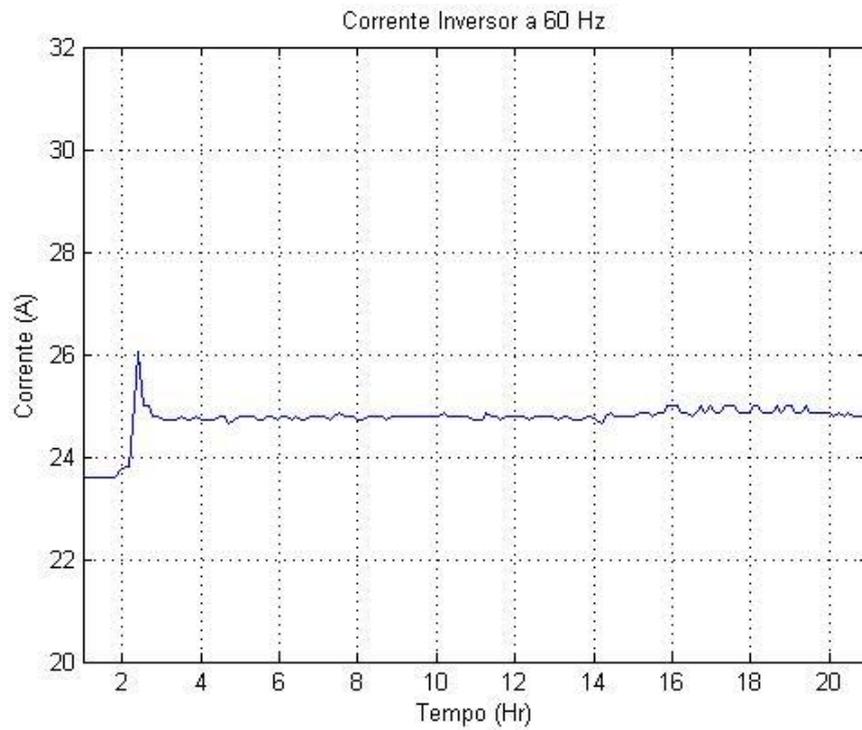


Figura 22 - Corrente do inversor a 60 Hz na indústria
Fonte: Autoria Própria

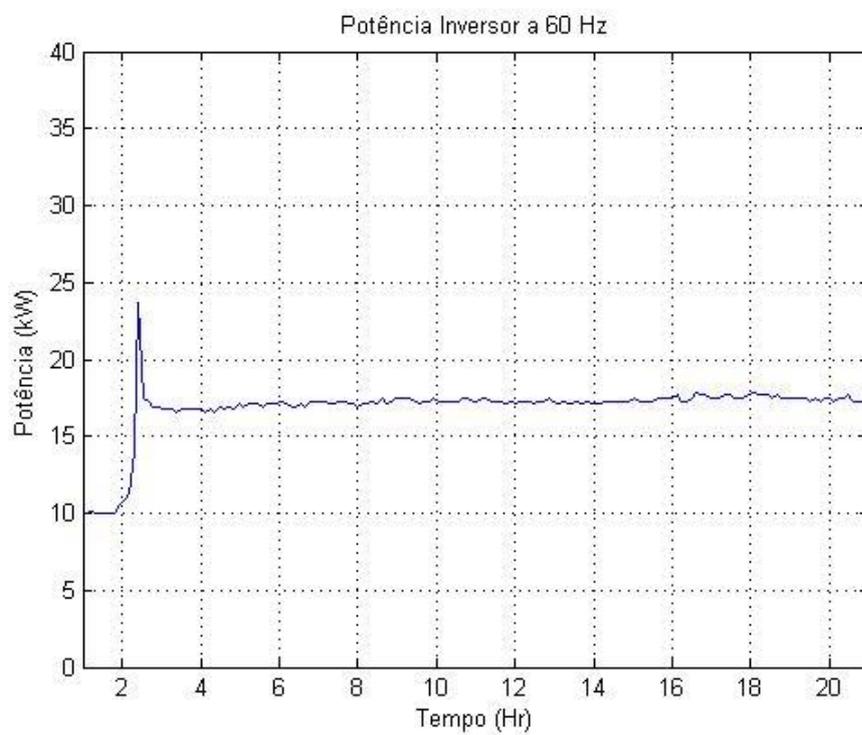


Figura 23 - Potência do inversor a 60 Hz na indústria
Fonte: Autoria Própria

Uma última análise ocorre com o inversor já programado para o controle automático da temperatura, ou seja, o motor está sendo acionado não mais por uma frequência fixa e sim por uma frequência modulada, conforme sua necessidade. Assim, os seguintes resultados da corrente e potência são:

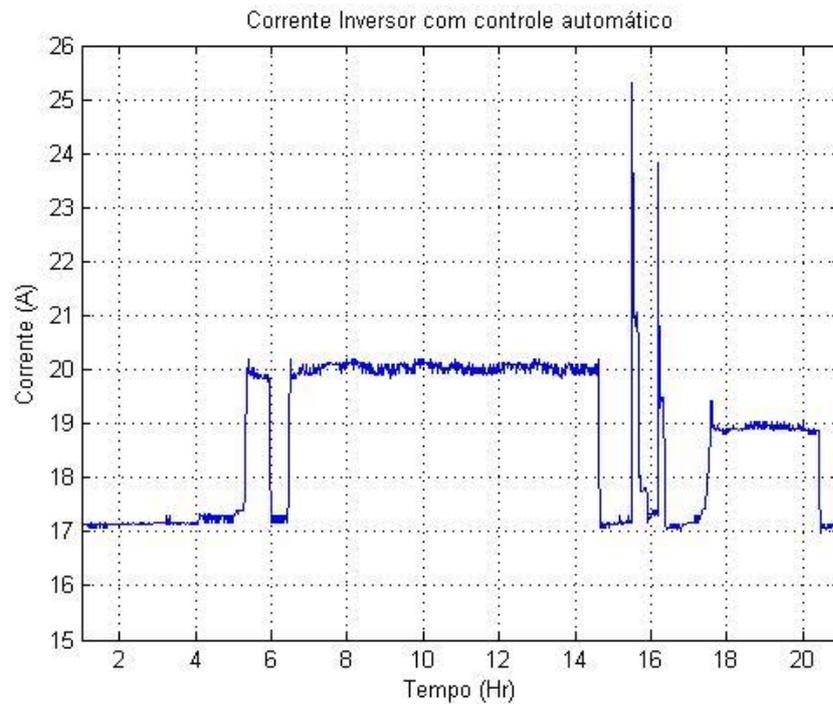


Figura 24 - Corrente do inversor com controle automático na indústria
Fonte: Autoria Própria

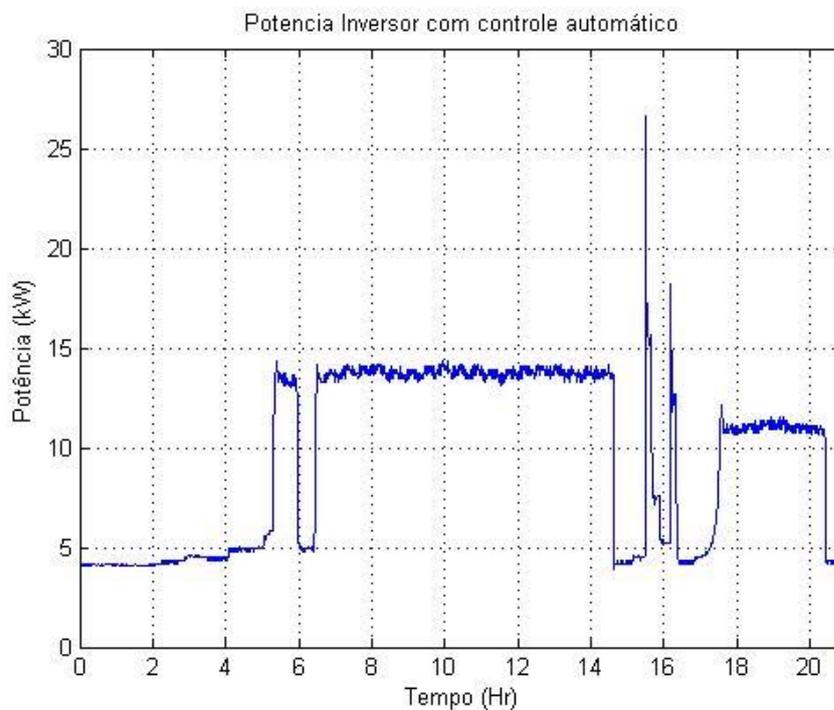


Figura 25 - Potência do inversor com controle automático na indústria
Fonte: Autoria Própria

Vale observar que existem notáveis oscilações no controle automático de velocidade nos gráficos acima, conforme Figuras 25 e 26. Tais oscilações se justificam devido as variações da velocidade de frequência, com isso a potência e a corrente decrescem ou não, conforme a velocidade dos motores dos compressores.

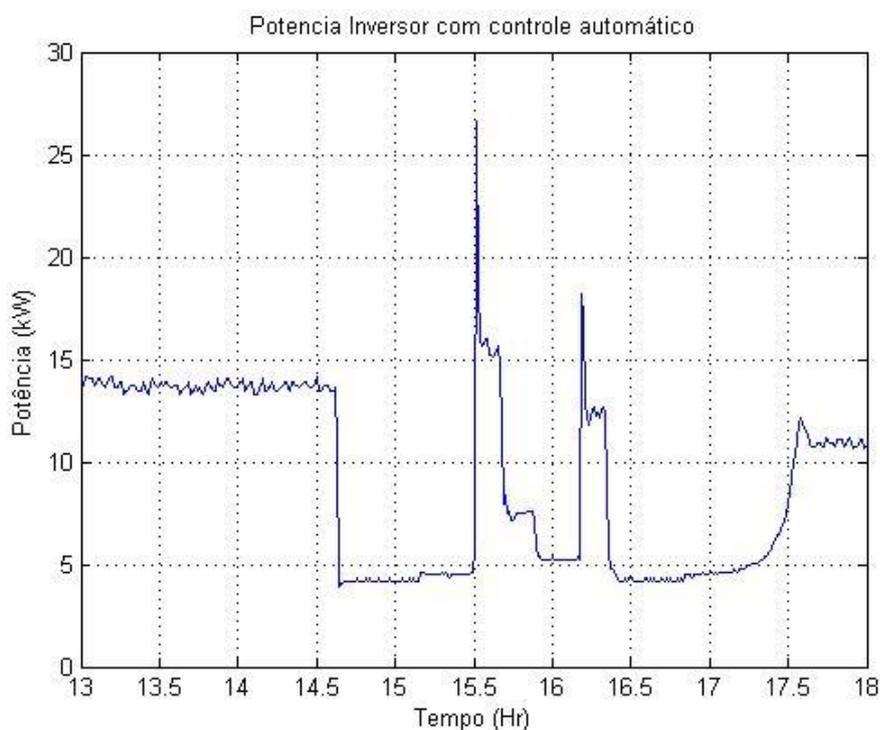


Figura 26 - Potência do inversor com controle automático num período específico
Fonte: Autoria Própria

Conforme gráfico apresentado acima, nota-se algumas oscilações, as quais são decorrentes da troca de calor que ocorre devido a abertura das portas, sendo que neste momento os motores dos compressores variam sua velocidade para manter uma temperatura ideal.

Para uma melhor análise, conforme os gráficos obtidos, apresenta-se os seguintes resultados de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado na indústria

Grandezas elétricas	1º Momento	2º Momento	3º Momento
Frequência (Hz)	60,00	60,00	Variável
Corrente Eficaz (A)	33,00	24,00	17,51
Potência Ativa (kW)	16,63	16,58	9,21
Fator de Potência	0,78	0,79	0,78
Horas de funcionamento/dia	24	24	24

Através do analisador de energia foi possível identificar os valores do fator de potência, e por meio da equação da potência ativa, foi possível identificar a potência consumida pelo motor na utilização da soft-starter, pois o mesmo não se comunica com o software, sendo assim:

$$Potência\ Ativa = I_e \times V_e \times \sqrt{3} \times \cos\varphi \quad (12)$$

$$\cos\varphi\ ou\ Fator\ de\ Potência = \frac{Potência\ Ativa}{I_e \times V_e \times \sqrt{3}} \quad (13)$$

Outro fator positivo que ocorreu, após a implantação do sistema, foi à redução do ruído, causado pelos 18 compressores que era de: 91,7 dB e agora é de: 78,4 dB.

A referência de temperatura (Setpoint) utilizada como limite superior, para funcionamento do sistema foi de $\leq -30^\circ\text{C}$, valor este considerado ideal como margem de segurança para ganho de temperatura do sistema. Os limites de frequência que foram parametrizados nos inversores foram estabelecidos de acordo com as condições reais para congelamento e conservação dos produtos.

Foi constatado que, a temperatura dos mesmos após saírem do túnel se manteve dentro dos padrões estabelecidos pelo ministério da Agricultura. Porém mesmo com os compressores operando em 40Hz, foi possível obter as condições necessárias, ou seja, uma temperatura menor ou igual a -36°C . Caso a temperatura aumente, os inversores estão programados para aumentar a

rotação dos motores dos compressores até 60Hz, com intuito de acelerar a troca térmica e diminuir a temperatura do túnel.

Foi observado por duas semanas, e neste período os equipamentos se mantiveram no limite inferior de velocidade, sem precisar operar em 60Hz, isso acarretará em uma economia de potência ativa consumida de 44,61%.

5.3 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA

Conforme já esclarecido sobre as taxas e tarifas, neste projeto a empresa é pertencente ao Grupo A, subgrupo A4 – Horossazonal azul, pois o fornecimento de tensão pela concessionária é de 13,8 kV e a indústria possui um alto fator de carga no horário de ponta; logo, a Tabela 6 de valores é a seguinte:

Tabela 6 - Valores da tarifa horária azul

Tarifa Horária AZUL	Resolução ANEEL Nº 1.897, de 16 de junho de 2015	
A4 (2,3 a 25 kV)		
Tarifas	Resolução ANEEL	com Impostos: ICMS e PIS/COFINS
Demanda (R\$/kW)		
Ponta	21,91	34,72
Fora de Ponta	6,90	10,93
Ultrapassagem Ponta	43,82	69,44
Ultrapassagem Fora de Ponta	13,80	21,87
Consumo (R\$/kWh)		
Ponta	0,51424	0,81496
Fora de Ponta	0,34453	0,54600
Vigência em 24/06/2015		

Para saber quanto tempo será necessário para que o investimento com o projeto comece a dar retorno, foi preciso saber o consumo de energia elétrica antes da instalação dos conversores de frequência, para que pudesse ser comparado após a implantação.

Conforme mostrado através dos dados coletados, antes do projeto o consumo de potência ativa média era de 16,83 kW por equipamento, com o setor

funcionando vinte e quatro horas por dia, sendo três horas fora da ponta e o restante na ponta.

A potência ativa total consumida pelos dezoito motores é de 302,94 kW e conforme a COPEL, estará relacionado ao grupo A4 – Horossazonal azul, o valor do kWh para indústria de 2,3 a 25 kV é de R\$ 0,81496 na ponta, e fora da ponta o valor é de R\$ 0,54600, todos os valores já incluso com os impostos ICMS e PIS/COFINS. Somando o valor total dentro da ponta com o valor total fora da ponta, conclui-se que o valor pago diariamente de energia elétrica era de R\$ 4.214,16, calculada da seguinte forma:

$$\text{Valor dentro da ponta} = PT(p) \times T(p) \times R\$(p) \quad (14)$$

$$\text{Valor dentro da ponta} = 302,94 \times 3 \times 0,81496 = 740,65$$

Onde,

$PT(p)$ = Potência total consumida na ponta (kW)

$T(p)$ = Total de horas na ponta (h)

$R\$(p)$ = Valor do kWh na ponta

$$\text{Valor fora da ponta} = PT(fp) \times T(fp) \times R\$(fp) \quad (15)$$

$$\text{Valor fora da ponta} = 302,94 \times 21 \times 0,54600 = 3.473,51$$

Sendo que,

$PT(fp)$ = Potência total consumida fora da ponta (kW)

$T(fp)$ = Total de horas fora da ponta (h)

$R\$(fp)$ = Valor do kWh fora da ponta

Com a instalação dos conversores de frequência, a potência ativa média consumida por cada motor foi de 9,21 kW, se utilizado o mesmo raciocínio para calcular o valor gasto com energia elétrica para as Soft-Starter's, é possível determinar que este será de R\$2.306,14 diariamente.

Ao subtrair o valor pago diariamente das Soft-Starter's pelo valor pago diariamente dos conversores de frequência, encontra-se o valor economizado, referente a R\$ 1.908,01.

O investimento do projeto foi a aquisição de 18 inversores de frequência de 37 kW do modelo FC-101 da marca Danfoss, no valor de R\$ 35.500,00 cada, e mais o valor da execução do projeto. No total do investimento foi de R\$ 669.000,00

O projeto começará a dar retorno em dias, conforme a equação (11),

$$\textit{Payback em dias} = \text{R\$ } 669000,00 / \text{R\$ } 1908,01 = 351 \textit{ dias}$$

Portanto, conclui-se que durante os primeiros 351 dias o montante que a indústria irá economizar, será utilizado para cobrir os gastos com a implementação do projeto apresentado. Após estes dias, o que a indústria economizar, será considerado como o retorno do investimento em questão.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou um estudo com relação à viabilidade econômica da energia elétrica consumida em uma indústria de alimentos. Para isso foi realizado a execução de um projeto que consiste em um sistema de refrigeração através do controle automático da temperatura, utilizando inversores de frequência.

Antes de realizar o projeto em questão, foi de suma importância registrar dados da respectiva indústria, referentes ao seu consumo elétrico, para que após a implementação do equipamento indicado, fosse realizada a comparação dos dados coletados com os resultados obtidos.

Constatou-se que a referida indústria, utilizava um sistema convencional de acionamento dos motores, a soft-starter's, sendo que neste não há a possibilidade de variação da velocidade, com isso o consumo elétrico é extremamente alto.

Além dos estudos e questionamentos relatados durante o trabalho, realizou-se ensaios laboratoriais, onde apresentou-se o confronto dos resultados dos acionamentos já existentes na planta com os acionamentos propostos, com o intuito de comprovar a eficácia do controle automático, bem como da eficiência energética.

Com a obtenção de resultados positivos nos testes realizados em bancada, concluiu-se que a execução do respectivo projeto também haveria de ser benéfica à indústria correspondente, porém apenas por tais experimentos, não teria como ponderar qual valor de fato a indústria economizaria, pois se fazia necessário saber o tempo que levaria para o payback.

Após as análises dos dados e da realização de todos os ensaios necessários, foram coletados dados do acionamento inicial e realizou-se a substituição dos antigos acionamentos (Soft-Starters) pelos dispositivos eletrônicos propostos (inversores de frequência), logo em seguida os dados tornaram a ser coletados, porém agora com os novos acionamentos.

Durante a execução do projeto, a coleta de dados foi realizada em três momentos distintos. Sendo que a primeira coleta foi feita antes da instalação

proposta, ainda com as Soft-Starter's funcionando, após a instalação dos inversores de frequência, a uma velocidade de 60 Hz, os dados novamente foram coletados, e por final houve a coleta após o controle de velocidade ajustado.

Após implementação dos inversores de frequência, observou-se que durante o período analisado os equipamentos se mantiveram no limite inferior de velocidade, o que acarretará à indústria uma economia de potência ativa consumida de 44,61%, ainda constatou-se que mesmo com os compressores operando a uma velocidade menor, a temperatura do produto se manteve, não prejudicando de forma alguma a qualidade do alimento e por último notou-se outro fator positivo, a redução dos ruídos que os compressores causavam.

Por fim, registrou-se que após a substituição das Soft-Starter's pelos inversores de frequência, a potência ativa dos motores foi de 9,21 kW, em questão de valores, pode-se determinar que a referida indústria vai economizar cerca de R\$1.908,01 por dia, e considerando o valor investido no projeto, constata-se que o retorno do investimento aparecerá em dias, mais precisamente 351 dias.

Diante de todos os procedimentos apresentados, percebe-se que os objetivos iniciais do projeto foram alcançados com êxito, garantindo a redução do consumo de energia elétrica, uma maior vida útil dos motores, um impacto significativo financeiramente e a obtenção de um payback rápido e seguro. Sendo considerado, portanto, um ótimo negócio para a indústria, em questão de economia financeira e uma forma eficaz de controlar o aumento da tarifa energética bem como o desperdício de energia elétrica.

REFERÊNCIA

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Capacidade de geração do Brasil**. [S.l.], 2016.

AGUIAR, M.L. de; CAD, M. M. The concept of complex transfer functions applied to the modeling of induction motors. In: **Power Engineering Society Winter Meeting**, 2000. IEEE. [S.l.: s.n.], 2000. v. 1, p. 387–391 vol.1.

ARAGÓN, C. S., PAMPLONA, E.,MEDINA, J. R. V. **Identificação de investimentos em eficiência energética e sua avaliação de risco**. Gest. Prod.[online], v. 20, n.03, p. 525-536. São Carlos, 2013.

BARROS, B. F. de; BORELLI, R.; GEDRA, R. L. **Gerenciamento de Energia: Ações Administrativas e Técnicas de Uso Adequado da Energia Elétrica** . 1. ed. São Paulo: Erica, 2011.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/quem-somos?_adf.ctrl-state=4axd0h2fx_4&_afrcLoop=1989776814940733>. Acesso em: Jan. 2016

CAMPOS, J. C. Caracterizacion Energetica: el primer pasohaciael uso racional de la energia. **Publicaciones Científicas**. Revista Ciencias.com, 6 feb. 2004.

COPEL. **Manual de Eficiência Energética na Indústria**. [S.l.], Novembro 2005.

SENAI, Mariano Ferraz. **Filosofia do controle vetorial**. [S.l.], São Paulo. 2009.

GONÇALVES, F. R. **Análise da partida do motor de indução trifásico pelo método dos elementos finitos**. 2012. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

KOPELVSK, M. M. **Categorias dos motores trifásicos com rotor de gaiola.** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2013.

MORGADO, R. J. L. **Estudo e aplicação de um sistema de controle automático de temperatura ambiente.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica. Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

NOGUEIRA, T. A. **Redes de comunicação para sistemas de automação industrial.** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Controle e Automação). Universidade de Outro Preto, Minas Geras, 2009.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno.** 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Disponível em :< http://www.ons.org.br/conheca_sistema/o_que_e_sin.aspx >. Acesso em: Jan. 2016

RASHID, Muhammad Harunur. **Power Electronics – Circuits, devices and applications.** 3ª ed. Prentice Hall, New Jersey: 2004.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Redes de comunicação industrial.** Documento Técnico, nº 2. 2007.

SIMAS, Eduardo. **Redes Industriais.** Monografia (Especialização em Engenharia Elétrica – Ênfase em comunicação industrial). Escola Politécnica - Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

SOARES, M. N. **Projeto de controladores PI para acionamento vetorial de máquinas de indução.** Dissertação de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SOLA, A. V. H.; MOTA, C. M. de M. **Melhoria da eficiência energética em sistemas motrizes industriais**. Prod., ahead of print Epub, [S.I.], 2004.

SOLAK, Erik. **Aplicação de acionamentos de velocidade variável em sistemas de refrigeração para aumento da eficiência energética**. Programa de Pós-graduação em desenvolvimento da tecnologia. LACTEC. Curitiba, 2012.

STOECKER, W.F. e Jones, J.W. **Refrigeração e ar condicionado**. 1. Ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda. 1985.

VIEIRA, E.T.T. **Influência do processo de congelamento na qualidade do peito de frango**. 2007, 119p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI.

WEG. **Manual para correção de Fator de Potência**. Blumenau: Weg [20--].

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DE LIGAÇÃO