

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS-UNIS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

VALDECI MARIANO DE ASSIS

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO PARA ACIONAMENTO FLEXIBILIZANDO
TÉCNICAS DE CONTROLE E ECONOMIA ENERGÉTICA**

**Varginha
2018**

VALDECI MARIANO DE ASSIS

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO PARA ACIONAMENTO FLEXIBILIZANDO
TÉCNICAS DE CONTROLE E ECONOMIA ENERGÉTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Professor Esp. Roberto Lazarino do Prado Mudesto.

**Varginha
2018**

VALDECI MARIANO DE ASSIS

**PROPOSTA DE OTIMIZAÇÃO PARA ACIONAMENTO FLEXIBILIZANDO
TÉCNICAS DE CONTROLE E ECONOMIA ENERGÉTICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como exigência para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas - UNIS pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovada em 01 / 02 /2019

Prof. Esp. Roberto Lazarino do Prado Mudesto

Prof. Esp. Silvio Brottel Guimarães

Prof. Paulo Roberto Novo

OBS.:

Dedico este trabalho principalmente à meus pais, meus irmãos, meus filhos e minha esposa a todo companheirismo e motivação fornecidas ao longo do período cursado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me guiar e me manter firme no propósito.

À minha família, principalmente: minha companheira, Joseleiva, por todo empenho, desgaste, paciência e estímulo para que o sonho de me graduar Engenheiro Elétrico se tornasse real, sem o total apoio e dedicação deles nada disso seria possível. Aos meus filhos Gabriel, Miguel e Manuely que acreditaram em mim fazendo o máximo para que a estrada até aqui fosse a menos árdua possível.

A todos os professores do Grupo UNIS-MG, em especial à meu orientador Roberto Mudesto, que contribuiu para minha formação acadêmica, orientando e cooperando para que eu me transformasse um profissional qualificado.

“Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino”.

Leonardo da Vinci

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo de um projeto implantado e em funcionamento, sobre o acionamento para motor de indução trifásico (MIT) utilizado em dois motores assíncronos com potência de 125cv instalados em um subsistema de geração de ar quente, na indústria de alimentos Kerry do Brasil. Pretende atualizar o mesmo sistema implementando, técnicas adquiridas no curso Engenharia Elétrica para executar arranque dos motores através de um inversor de frequência o qual utiliza o método de controle de frequência e tensão de alimentação usando a tecnologia da Eletrônica de potência para substituir o atual modelo, uma chave compensadora que utiliza-se de autotransformadores para abaixar a tensão elétrica no circuito estático minimizando o pico de partida dos motores. O presente estudo busca conhecer o motor de indução trifásica, desenvolver automação utilizando lógica de programação em *ladder* para controle de velocidade e melhoria do processo industrial, contribuindo para minimizar os custos com energia elétrica e energia térmica provinda da queima de óleo combustível BPF 1A, e assim refletindo também no controle dos impactos ambientais decorrentes das operações industriais. O presente trabalho tem como objetivo avaliar e propor mudanças no acionamento atual com grande expectativa de economia energética. Através de pesquisas e coletas de dados foi apresentado as necessidades de melhoria sugerindo assim possíveis soluções através do sistema de automação a ser implantado.

Palavras-chave: Motor. Automação. Inversor. Acionamentos. Atualizar.

ABSTRACT

This work presents the study of a project implemented and in operation, on the drive for three - phase induction motor (MIT) used in two asynchronous motors with power of 125cv installed in a subsystem of hot air generation in the Kerry do Brasil food industry . It intends to update the same system by implementing techniques acquired in the Electrical Engineering course to start the motors through a frequency inverter which uses the method of frequency control and voltage supply using the technology of power electronics to replace the current model, a compensating switch that uses autotransformers to lower the electrical voltage in the static circuit minimizing the starting peak of the motors. The present study seeks to know the three-phase induction motor, to develop automation using ladder programming logic for speed control and improvement of the industrial process, contributing to minimize costs with electric energy and thermal energy from the burning of BPF 1A fuel oil, and thus also reflecting on the control of environmental impacts arising from industrial operations. The present work aims to evaluate and propose changes in the current drive with great expectation of energy saving. Through research and data collection, the improvement needs were presented, thus suggesting possible solutions through the automation system to be implemented.

Keywords: *Motor. Automation. Inverter. Drives. Update.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Motor	21
Figura 2- Princípio de funcionamento do motor de indução trifásico	23
Figura 3- Campo de girante	23
Figura 4- Variação da frequência	25
Figura 5-Diagrama de força e potência compensadora	27
Figura 6-Linha de inversores VLT.....	28
Figura 7-Demonstração das fases de um inversor	28
Figura 8- Representação de um CLP	31
Figura 9- Exemplo de envio de sinal	33
Figura 10- Analizador de energia	35
Figura 11- Coleta de dados comprobatórios.....	36
Figura 12- Instrumentação	36
Figura 13- Sistema de aquecimento.....	37
Figura 14-Vista aérea fabrica Kerry do Brasil.....	38
Figura 15- Tela exibindo programação principal de controle	40
Figura 16- Esquema do acionamento em paralelo.....	41
Figura 17- Dados para calculo de retorno	43
Figura 18 - Coleta de dados com inversor a 50%, 30Hz	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Corrente de partida	26
Tabela 2 - Cálculo de retorno	42
Tabela 3 - Custo de instalação	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Ranking de energia mais cara do mundo	18
Gráfico 2 - Potência estantanea com frequencia a 100%	44
Gráfico 3 - Potência estantanea com frequencia a 50%	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação de Brasileira de Normas Técnicas
FIRJAN	Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro
IHM	Interface Homem Máquina
IEA	International Energy Agency
MIT	Motor de Indução Trifásico
NBR	Norma Brasileira
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Força eletromotriz.....	20
Equação 2– Força eletromagnética.....	22
Equação 3 – Velocidade síncrona.....	24

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área
B	Indução magnética
°C	Graus célsius
Cv	Cavalo a vapor
s	Segundo
V	Volt
H ² O	Fórmula da água
Hp	Horse power
I	Corrente
IGBTs	Insulated Gate Bipolar Transistor
mm H ² O	Milímetro de coluna d'água
mm ²	Milímetro quadrado
N	Número de espiras
η_s	Velocidade síncrona
Nm	Newton metro
kW	kilowatt
kV	kilovolt
Wb	Weber
VLT®	Marca registrada Danfos
V_{fem}	Tensão induzida média
$\Delta\Psi$	Variação do fluxo magnético
Δt	Variação do tempo
θ	Ângulo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
2 ENERGIA	17
2.1 Energia Elétrica	17
3 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	20
3.1 Funcionamento do motor de indução trifásico	21
3.2 Velocidade do rotor	23
3.3 Controle de velocidade dos motores de indução.....	24
3.4 Acionamento de um motor de indução.....	25
4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA.....	27
4.1 Definição de inversor	28
4.1.1 Quanto a sua alimentação	28
4.1.2 Componentes de um inversor	29
4.1.2.1 Etapa de retificação	29
4.1.2.2 Etapa de filtragem.....	29
4.1.2.3 Etapa de inversão.....	29
4.1.2.4 Central de controle microprocessada.....	30
5 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL - CLP	31
5.1 Tipos de entrada e saída.....	31
5.1.1 Entrada e saída digital	31
5.1.2 Entrada e saída analógica.....	32
6 METODOLOGIA	34
6.1 Diagnóstica inicial	34
6.2 Diagnóstico final	34
6.3 Características do medidor	35
6.4 Lógicas de funcionamento da planta pelo sistema atual de partida	36
7 ESTUDO DE CASO	38
7.1 Características da empresa	38
7.2 Proposta de otimização com acionamento por inversor de frequência	39
7.3 Relação de custos para implementação e payback	41
8 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Dentre vários custos gerenciais para uma empresa do setor industrial, a energia elétrica vem destacando e assumindo uma importância cada vez maior devido a competitividade do mercado, motivada pela redução de custos e incertezas com a disponibilidade energética. Com a interpretação desta realidade se torna necessário realizar estudos com o objetivo de aplicar a modernização, garantindo a eficiência energética dentro do setor. Devido à complexidade dos sistemas é importante apresentar técnicas e métodos na definição dos objetivos junto com ações para reduzir perdas, melhorando o desempenho energético nos processos de transporte, armazenamento, distribuição e consumo de energia (MARQUES *et al.*, 2006).

Na indústria é comum o uso de técnicas e aplicações convencionais no acionamento de sistemas motriz, e um sistema antigo além necessitar de frequentes manutenções acarreta perdas de energia que podem chegar a mais de 10% do consumo total de uma empresa (MONACHESI; MONTEIRO, 2004).

A motivação principal deste estudo é instalar um modelo de acionamento e controle capaz de gerar economia energética, assim contribuindo com o meio ambiente na redução e no uso consciente de recurso naturais. Para argumentar esta proposta de *retrofit* foi modelado uma simulação com ferramenta computacional da *Weg* disponibilizada em seu *website*, o cálculo de retorno com investimento na economia de energia sendo uma estimativa em resultados da comparação entre sistemas de controle de vazão e pressão convencionais *versus* sistema de controle de vazão e pressão por variação de velocidade utilizando inversores de frequência.

Este trabalho busca identificar e estudar o acionamento atual de dois motores assíncronos utilizados em um sistema de geração de ar quente, instalado na indústria de alimentos Kerry do Brasil. Pretende desenvolver um projeto de acionamento com inversor de frequência controlado por um CLP (Controlador Lógico Programável) usando a lógica de programação em *ladder* para controle da velocidade, visando melhoria dos *startups* e controle energético durante as interrupções no processo de produção através da automação. De acordo com Silveira (2009), “automação é conceito e um conjunto de técnicas que, por meio das quais, se constroem sistemas ativos capazes de atuar com uma eficiência ótima pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam”.

A delimitação do estudo estará na otimização do acionamento, controle e economia energética não apresentando a economia de combustível.

2 ENERGIA

O termo energia aparece pela primeira vez, sugerida pelo físico e médico inglês, Thomas Young, em 1807, relacionada com a concepção que ele tinha de movimento e trabalho mecânico realizado por um corpo (WILSON, 1968).

Com sentido bastante abrangente ligado a vários campos como força gravitacional, força magnética, força elétrica, fenômenos químicos e físicos, o termo energia passou a ser utilizado com uma frequência maior a partir do século XIX, quando estudos estabeleciam o início do Princípio da Conservação da Energia (PCE) (KUHN, 1977).

Veja algumas citações sobre energia no século XIX:

“A posição que procuro estabelecer neste ensaio é que [cada um] dos vários agentes imponderáveis... isto é, calor, luz, eletricidade, magnetismo, afinidade química e movimento, podem, enquanto força, produzir ou converter-se nas outras” (GROVE, 1843, p. 115).

“Não podemos dizer se alguma [destas forças] é a causa das outras, mas apenas que todas estão conexas e se devem a uma causa comum” (FARADAY, 1834, p. 115).

De acordo com Maxwell apud Moreira (1983) “energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança”.

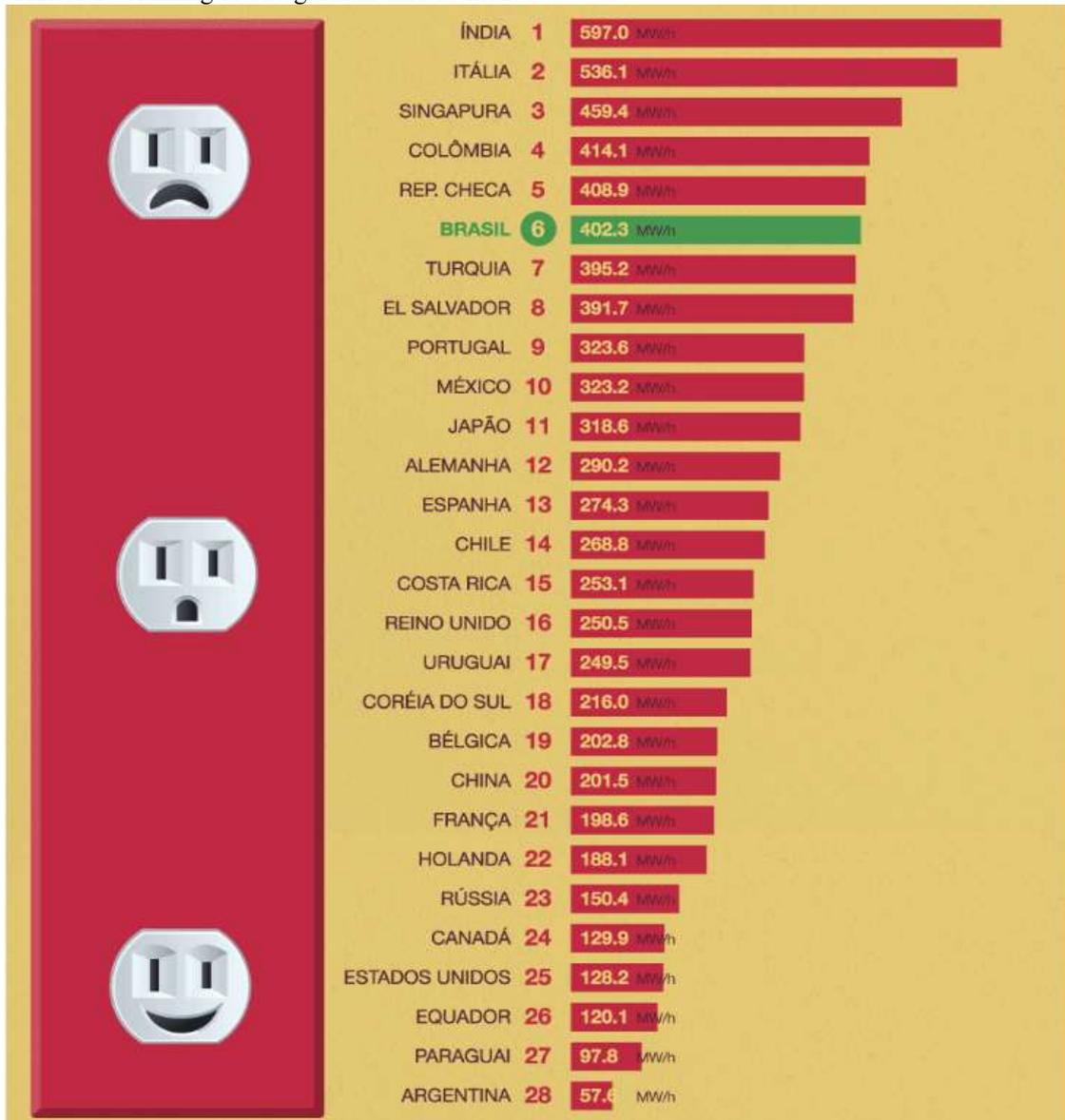
Referindo-se a mudanças de condições e alterações do estado de um sistema assim como aspectos relacionados a vida cotidiana é a energia que permite alcançar estas, implicando em se ter fluxos energéticos para vencer resistências ou seja realizar trabalhos sendo definida como “capacidade de um corpo, um sistema de corpos ou uma substância têm de realizar trabalho, entendendo-se por trabalho a deslocação do ponto de aplicação de uma força” (MICHAELIS, 2018).

2.1 Energia elétrica

A energia elétrica é uma das principais componentes do avanço e modernização da sociedade, amplamente utilizada em indústrias e residências. Nos cerca por todos os lados, sendo definida como diferença de potencial entre dois pontos, com origem na descoberta das cargas elétricas por Tales de Mileto, na Grécia antiga (CREDER, 2010, p. 516). Provém em grande parte das transformações ocorridas nas usinas hidráulicas, eólicas, solares, nucleares, entre outras.

Segundo dados estatísticos da Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN) a energia elétrica no Brasil é umas das mais caras dentre os países do mundo chegando a ocupar a 6ª posição geral do ranking. Informação indicada conforme o Gráfico 1.

Gráfico 1 - Ranking de energia mais cara do mundo



Fonte: (FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, 2016)

Diante de tal situação, o consumo de energia elétrica essencial à produção industrial sai a um custo bastante elevado no Brasil, sendo os motores elétricos os maiores consumidores de energia dentro cenário industrial, a aplicação de projetos sobre eficiência energética é de suma importância.

A ELETROBRÁS/PROCEL (2013) confirma a posição da International Energy Agency (IEA), ao identificar que o setor industrial brasileiro consome cerca de 40% da energia elétrica

do país em detrimento aos demais segmentos, tais como residencial e comercial e que 2/3 da energia utilizada pelas indústrias são empregadas em sistemas motrizes. Por esse motivo a força motriz tornou-se o principal foco de atuação dos programas de eficiência energética.

A energia sendo um fator de custo e não de resultados para a indústria em geral torna-se um peso no custo final do produto produzido podendo atingir, em até 60 % do custo de produção (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2009).

Portanto, o quadro atual de eficiência energética na indústria pode ser resumido nas seguintes características:

- a) Energia para indústria é custo e não fator de resultado;
- b) Energia para indústria é fator de competitividade;
- c) Investimento em eficiência energética concorre com investimento na produção;
- d) Grande indústria compete em nível internacional: eficiência deve ser estimulada;
- e) A tecnologia é fator de competição, ou seja, não está livremente disponível;
- f) Os empreendimentos em eficiência energética têm dificuldade de acesso às linhas de financiamento;
- g) Necessidade de equipes multidisciplinares para tratar das questões de eficiência energética;
- h) Limitação dos cursos tradicionais de engenharia na formação de profissionais para tratar das questões de eficiência energética;
- i) Limitação de projetos de eficiência destinados para economia de combustíveis e um maior
30
foco em projetos de energia elétrica;
- j) Necessidade de definição de indicadores de desempenho energético por setor industrial que reflitam o consumo energético e a produção, incluindo treinamento de pessoal;
- k) Necessidade de firmar parcerias entre instituições de ensino com especialistas em Eficiência Energética e o sistema CONFEA-CREA com o objetivo de fomento à valorização profissional dos especialistas nessa área, em função de uma fiscalização multiprofissional competente, mais atuante e eficiente;

3 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

O motor elétrico é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica sendo esta conversão de energia uma propriedade da indução magnética. O motor de indução trifásico foi inventado e desenvolvido durante estudos de Nikola Tesla, no século XIX, tendo seu princípio de funcionamento na Lei de Indução de Faraday e na Lei de Lenz que de acordo com Vieira (2014, p. 117-121), “a força eletromotriz ou tensão induzida média V_{fem} é diretamente proporcional a variação do fluxo magnético ($\Delta\Psi$) produzido em uma bobina com η espiras é inversamente proporcional a variação do tempo (Δt). O sinal negativo remete a Lei de Lenz que diz a corrente induzida gera um campo magnético com direção contrária ao campo magnético que a gerou” exemplificado na Equação 1, veja:

$$V_{fem} = -\eta \frac{\Delta\Psi}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde:

- a) η - Número de espiras.
- b) $\Delta\Psi$ - Variação do fluxo magnético. [Wb]
- c) Δt - Variação do tempo. [s]

O funcionamento do motor de indução trifásico depende diretamente do fluxo de corrente alternada. É esta corrente alternada que durante a frequência de 60 ciclos por segundo (60 Hz padrão estabelecido no Brasil pela Lei nº 4.454, de 6 de novembro de 1964) estabelece um fluxo magnético variável para o funcionamento do motor.

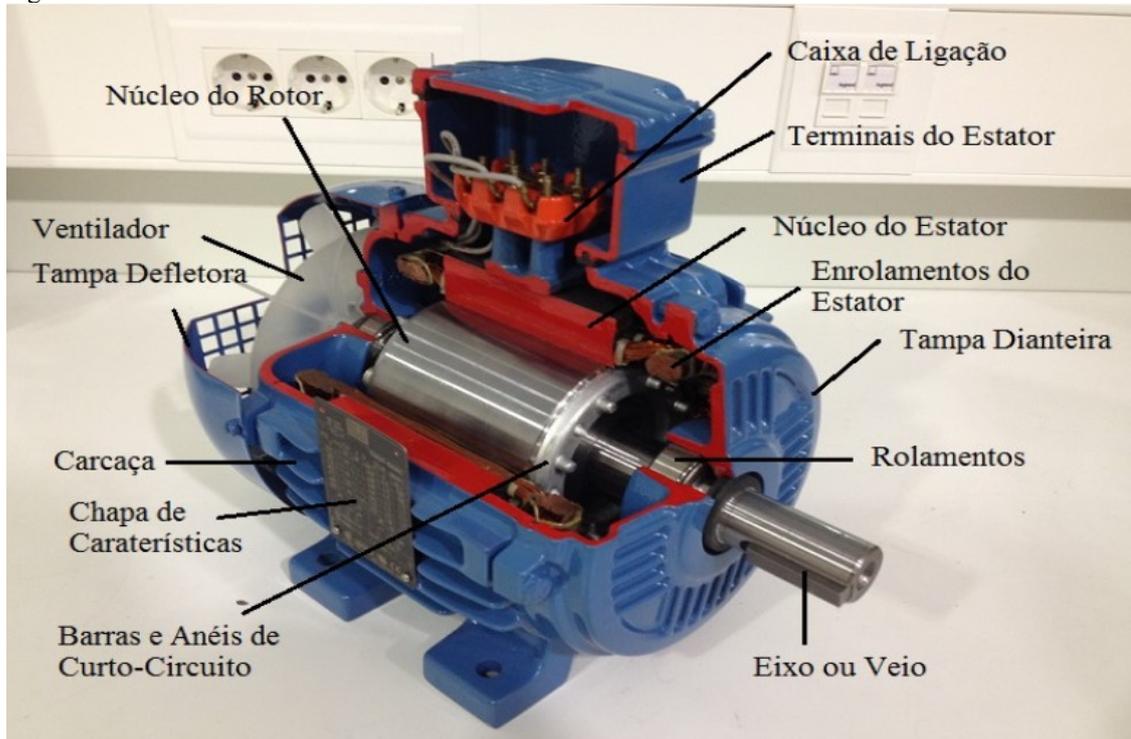
Motores de indução são responsáveis pela execução de boa parte de trabalho no mundo. Segundo Vieira, (2014 p. 56) é o tipo de motor elétrico mais utilizado. Sendo largamente utilizado em instalações industriais devido à sua simplicidade, robustez, durabilidade e pequena necessidade de manutenção (AL MORELATO FRANCA, 2001, p. 132).

O motor de indução trifásico é a máquina elétrica mais utilizada no acionamento de cargas mecânicas e com conhecimento do seu princípio de funcionamento é possível desenvolver novas estratégias de controle que permitem uma boa adaptação das suas características de funcionamento, as necessidades da carga mecânica acionada.

A grande vantagem do motor de indução trifásico é a sua capacidade de operar sem necessidade de contato com os enrolamentos do rotor. Isso reduz significativamente os custos de manutenção. Sua fonte de alimentação de corrente alternada é feita diretamente no

bobinamento do estator protegida por uma caixa de ligação, conforme Figura 1, onde também fazemos a interligação das bobinas conforme o nível de tensão na qual o motor irá funcionar, seu rotor é do tipo gaiola de esquilo que é composto de barramentos curto circuitados e alojados nas ranhuras do rotor. É a forma mais comum dos motores de indução trifásico.

Figura 1- Motor



Fonte: (ADAPITADO DE COPYRIGHT RENATO PINTO ASSUNÇÃO, FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA, 2014)

A Figura acima mostra um motor de indução trifásico revelando seu interior, note as bobinas do estator em corte e o núcleo ferromagnético na qual ficam enroladas. Observe que as barras condutoras do rotor tipo gaiola são de fato internas em um núcleo de material ferromagnético usado para potencializar o fluxo magnético, formando um conjunto integrado.

O motor com rotor em gaiola de esquilo *squirrel cage*, é o mais comum e mais robusto dos motores de indução para potências até 500 HP (WEG).

3.1 Funcionamento do motor de indução trifásico

Fundamental em um de motor elétrico é entender como se produz o movimento rotório no seu rotor, a partir de corrente elétrica alternada em dizeres mais técnicos, como se produz um torque eletromecânico no rotor.

Como se sabe, torque (ou conjugado) é definido pelo produto de uma força pela distância, sendo medido em Newton-metro (N.m) como mostra a Equação 2:

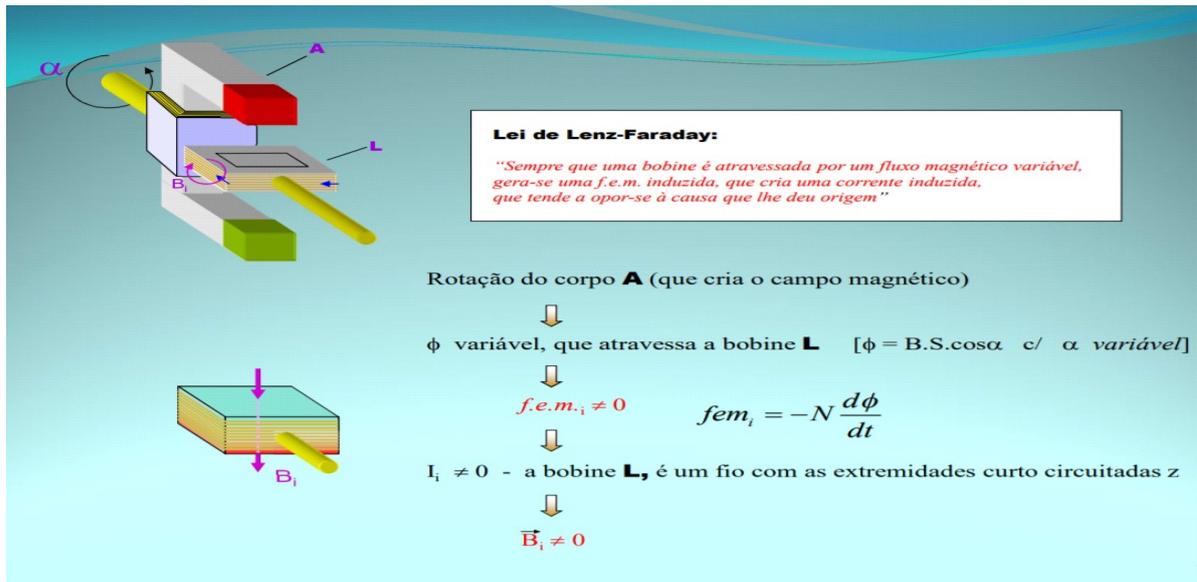
$$\tau = (NIA)B\text{sen}\theta \quad (2)$$

Onde:

- a) N- Números de espiras
- b) I - Corrente [Amperes]
- c) A- Área da espira [m²]
- d) B- Indução magnética [T]
- e) θ - Ângulo entre a espira e campo de indução B

Em um motor de indução, a criação do torque fundamenta-se na Lei de Indução de Faraday e na Lei de Lenz. O princípio de funcionamento de um motor de indução pode ser entendido com a ajuda da Figura 2, onde tem-se um ímã permanente em formato de ferradura e quando através da bobina as linhas de fluxo magnético induzem uma tensão ao rotacionar o corpo “A” com uma corrente que tende a se opor ao fenômeno que a originou.

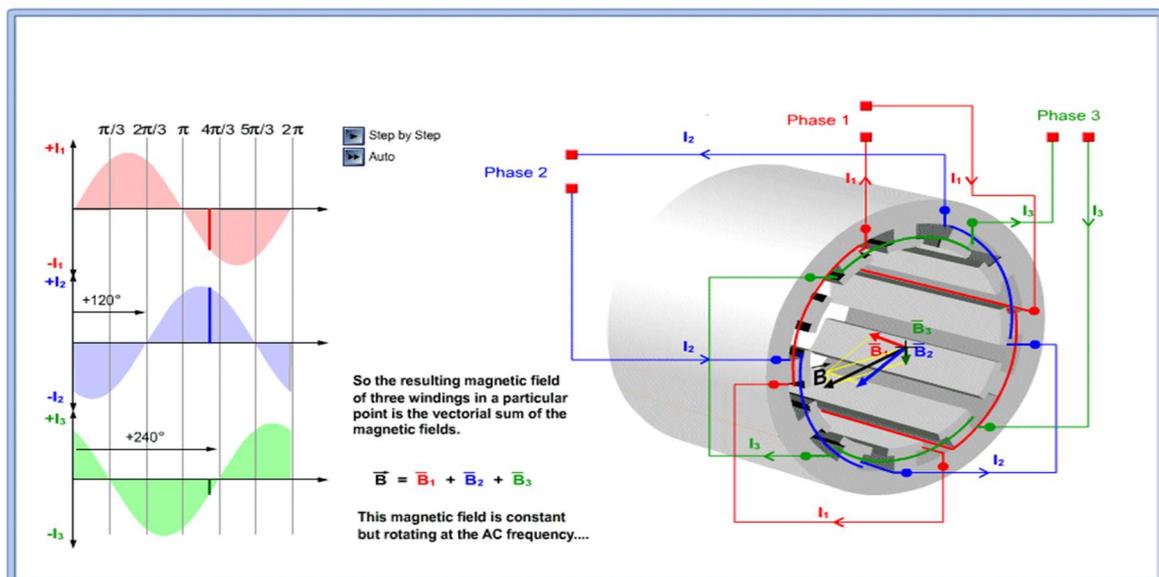
Figura 2- Princípio de Funcionamento do Motor de Indução Trifásico



Fonte: (APOSTILA MOTORES TRIFÁSICOS DE CA, PROF. HÉLIO HENRIQUE)

O seu princípio de funcionamento é demonstrado na Figura 3. Sendo que em um motor de indução real, o ímã permanente é substituído por um campo girante que segundo Kosow (1982, p. 216), “três enrolamentos idênticos e individuais fixos no estator e defasados 120° elétricos, nas quais circulam correntes alternadas defasadas de 120° no tempo. Já o corpo “A” é substituído por um rotor cilíndrico”.

Figura 3- Campo girante



Fonte: (MAQUINAS ELÉTRICAS- PROF. ÁLVARO A, 2011.)

Em um motor de indução trifásico o fluxo girante é produzido por três enrolamentos iguais fixados em um núcleo de material ferromagnético (estator) e alimentados por tensão trifásica. O fluxo girante ao atravessar as barras do rotor tipo gaiola induz correntes que, por sua vez, criam um contra fluxos (como se fossem eletroímãs de polaridade oposta ao fluxo girante) que se opõem ao movimento do fluxo girante (Lei de Lenz). Fazendo o rotor gaiola girar no mesmo sentido do fluxo girante, tentando alcançá-lo para reduzir a intensidade da indução, como se sabe é proporcional à variação do fluxo (Lei de Faraday). Assim estabeleceu-se o torque que faz o rotor gaiola girar.

3.2 Velocidade do rotor

Em um motor de indução, a velocidade do rotor é sempre menor que a velocidade síncrona (do campo girante). Se, por hipótese, o rotor conseguisse alcançar a velocidade síncrona, então o campo girante e o rotor gaiola estariam efetivamente parados (um em relação ao outro), não haveria variação relativa de fluxo.

Em regime permanente, a velocidade do rotor depende da diferença relativa as frequências da tensão de alimentação e da tensão induzida no rotor.

A velocidade de operação do MIT é aproximadamente constante e calculada pela Equação 3.

$$N_s = \frac{120xf}{P} \quad (3)$$

Onde:

- a) N_s Rotação.
- b) f Frequência [Hz]
- c) P Números de polos.

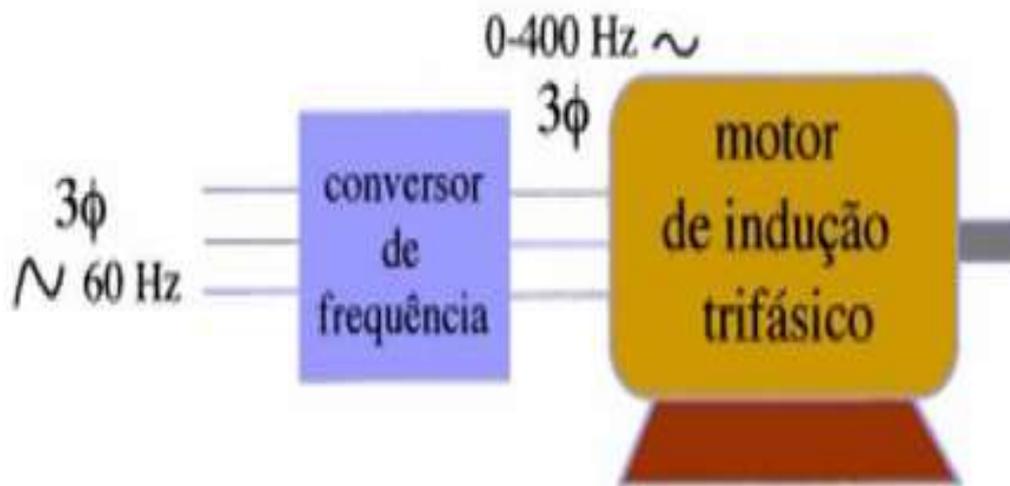
A velocidade do rotor calculada pela equação acima é sempre menor que a velocidade síncrona do campo girante, por esta razão este motor é também chamado motor assíncrono.

3.3 Controle de velocidade dos motores de indução

Em algumas aplicações de motores de indução é necessário controlar a velocidade da carga. Um modo frequentemente usado para variar a velocidade de motores de indução é através da variação da frequência e da tensão de alimentação. Sabe-se que a velocidade do campo

girante é diretamente proporcional ao valor da frequência e que a velocidade do motor depende da velocidade do campo girante. A variação da frequência, é obtida através de um conversor de frequência (também chamado inversor de frequência) que deve ser instalado entre a fonte de tensão e o motor a ser controlado, conforme a Figura 4:

Figura 4- Variação de Frequência



Fonte: (GUIA DE APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA, WEG 2015)

3.4 Acionamento de um motor de indução

A definição de acionamento é pôr-se em ação, movimentar, ligar, acionar e sendo o momento de iniciar o movimento o ponto mais crítico em um motor de indução trifásico, com o parâmetro I_p/I_n (tempo de rotor bloqueado) retirado da placa de um motor podemos calcular a corrente de partida. Motor utilizado no projeto 125cv com seguintes dados: ($I_p/I_n 7,2$), ($I_n 169$ amperes) ligado em 380 volts. A tabela 1 apresenta a seguinte relação de corrente para partida direta:

Tabela 1 - Corrente de partida

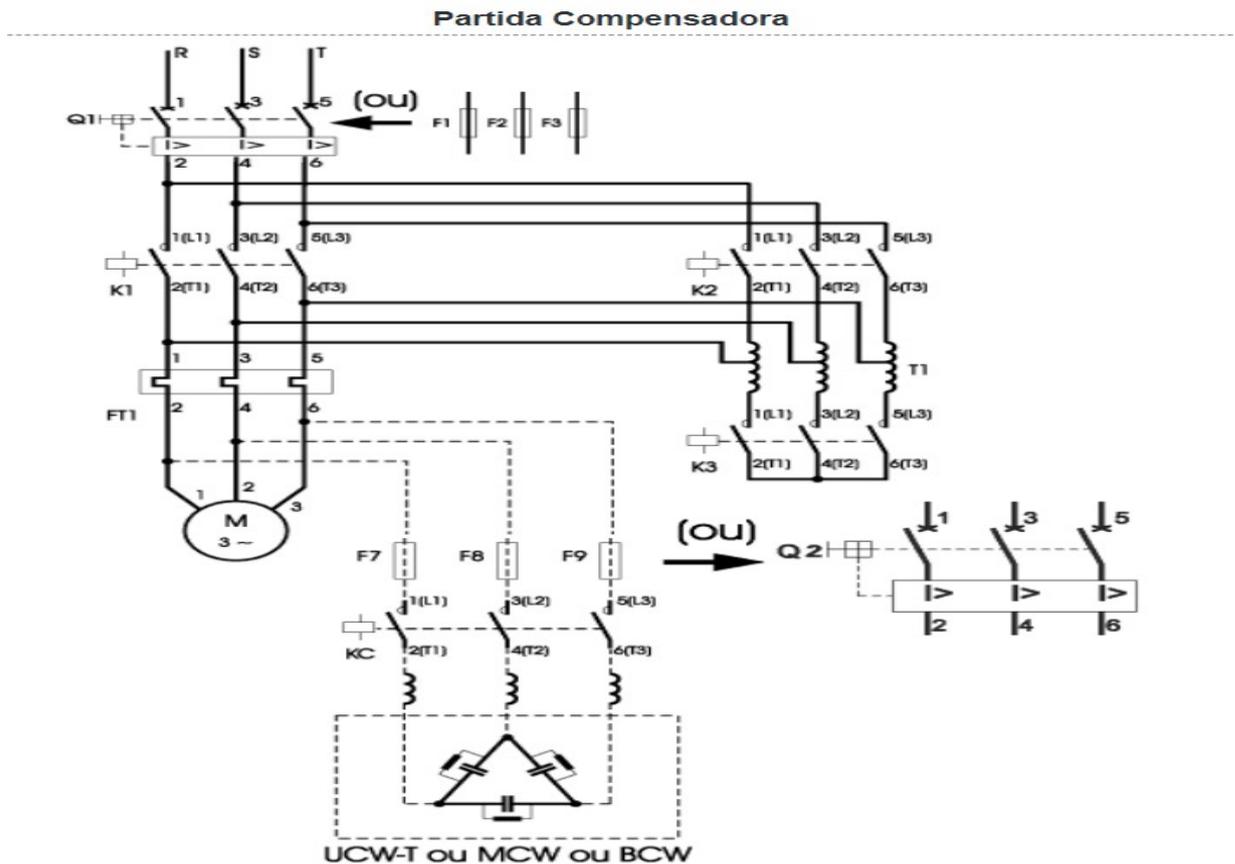
$\frac{I_p}{I_n} = 7,2$	$I_p = I_n \times 7,2$	$I_p = 169 \times 7,2$
$I_p = 1216,8 A$		

Fonte: (AUTOR, 2018)

Sendo a partida direta o meio mais simples de ligar um motor, pois este é ligado diretamente à rede elétrica fornecendo torque total na partida, porém apresenta grande desvantagem para motores de potência alta como podemos analisar no resultado obtido nos cálculos mencionados acima, com cálculo de uma corrente de 1216,8 amperes durante uma partida direta e para minimizar esta corrente de partida o atual projeto utiliza a tecnologia de partida por chave compensadora. É o modelo de partida utilizado hoje para acionar os dois motores de 125 cv, sendo uma partida por vez com tensão reduzida, utilizando de um autotransformador trifásico em configuração de abaixador de tensão com *taps* de 50%, 65% e 80% a serem definidos conforme o conjugado de partida.

Para o sistema de partida analisado, o *tap* está em 65% do autotransformador, ficando ligada em série com o circuito estatórico do motor, como o ponto de estrela do autotransformador fica disponível durante a partida é curto circuitado por (K3) como exemplificado no diagrama de força, na Figura 5, e esta ligação se desfaz no mesmo instante que o motor é alimentado pela rede. Como os autotransformadores ocupam um grande espaço no painel de montagem junto com os barramentos, proteções e intertravamentos a área deste meio de acionamento para os dois motores é 50% maior que o sistema projetado.

Figura 5- Diagrama de força partida compensadora



Fonte: (CATALOGO PARTIDA DE MOTORES, WEG 2015)

4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Inversor de frequência é um dispositivo eletrônico de potência capaz de gerar tensão e frequências ajustáveis, sendo ideal para acionamentos de motores com conjugado de partida alto. Possui grande vantagem acelerando e desacelerando o motor com rampas programáveis e controle de velocidade sendo o “método mais eficiente de controle de velocidade de motores de indução trifásicos com menores perdas” (FRANCHI, 2008, p. 196).

A Figura 6 mostra a linha de inversores VLT da Danfoss, senão veja:

Figura 6- Linha de inversores VLT

VLT®AutomationVTDrive

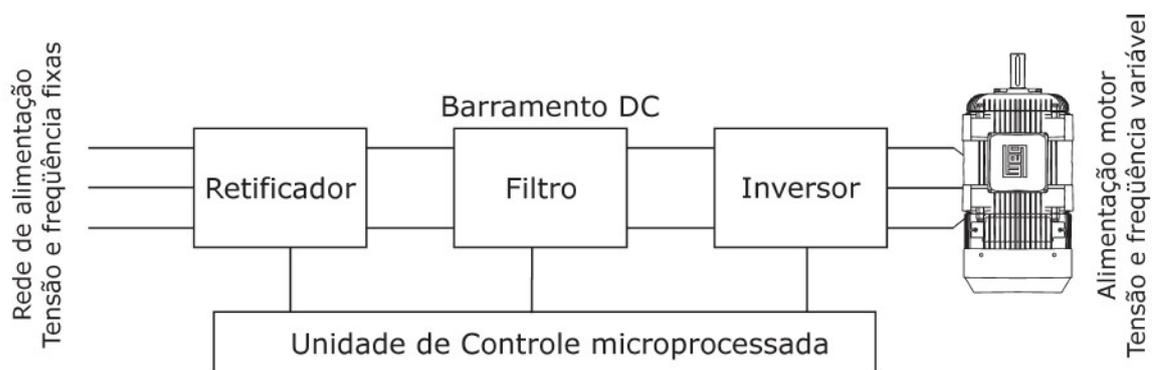


Fonte: (MANUAL DANFOSS DRIVES, 2001)

O projeto de acionamento consiste em utilizar um inversor *Danfoss VLT® 3250* de 250 cv de potência de saída, para acionamento de dois motores *Weg* de 125 cv alimentados em paralelo.

A Figura 7 representa os principais blocos do inversor de frequência, veja abaixo:

Figura 7- Demonstração das fases de um Inversor



Fonte: (GUIA DE APLICAÇÃO DE INVERSOR DE FREQUÊNCIA, WEG, 2017)

4.1 Definição de inversor

De acordo com Braga (2016) “o inversor de frequência ou conversor de frequência como também são chamados convertem a tensão da rede alternada senoidal para tensão contínua e que posteriormente é convertida em tensão de amplitude e frequências moduladas”.

Ele também atua como proteção para o motor perante falhas no sistema elétrico como desbalanceamento entre fases, queda de tensão, sobre tensão, sobrecarga, entre outras. Protegendo também o sistema elétrico, pois, é uma fonte de corrente e não reflete energia reativa no sistema elétrico de potência e afundamento de tensão por falhas no motor por ele controlado.

4.1.1 Quanto a alimentação

São geralmente alimentados por sistema trifásico, mas existem também inversores monofásicos e trifásicos que aceitam alimentação monofásica podendo ser duas fases ou fase neutro, desde que atinja a tensão para qual foram projetados e sempre fornecendo uma saída trifásica, surge então a grande utilização em sistemas de alimentação monofásica onde se necessita instalar um motor trifásico.

4.1.2 Componentes de um Inversor

O inversor é composto por três blocos em série controlados por uma unidade micro processada.

Estes são blocos representados na configuração do inversor:

- Bloco retificador;
- Bloco de filtragem;
- Bloco inversor;
- Unidade de controle microprocessada.

Todos controlados pela unidade de controle microprocessada do inversor.

4.1.2.1 Etapa de retificação

Essa etapa é responsável por receber a tensão de rede trifásica e através de seus de circuitos retificadores disponibilizar uma tensão contínua para etapa de filtragem.

Esta tensão alimenta o barramento do link de tensão contínua do inversor

4.1.2.2 Etapa de filtragem

Realiza a filtragem da tensão contínua utilizando grandes capacitores ligados em paralelo com barramento de tensão contínua que é monitorado pelo microprocessador para alimentar a etapa de inversão.

4.1.2.3 Etapa de inversão

Compreende o circuito responsável pelo chaveamento da tensão com controle de amplitude e frequência, simulando uma onda senoidal e para realizar esta função utiliza-se de módulos IGBTs, que são como chaves eletrônicas acionadas pela central de controle micro processada.

Todo o controle do motor vem desta parte do inversor, estes módulos IGBTs são acionados tanto no controle de frequência quanto na amplitude de tensão estabelecendo rampas de partidas e paradas suáveis evitando choques mecânicos ocasionados pelas cargas acionadas.

4.1.2.4 Central de controle microprocessada

Formada por um microprocessador onde roda o programa que controla todo o conjunto através de parâmetros que podem ser alterados pelo usuário durante a programação podendo ser feita através de sua IHM (Interface homem máquina) ou por softwares disponibilizado pelo fabricante.

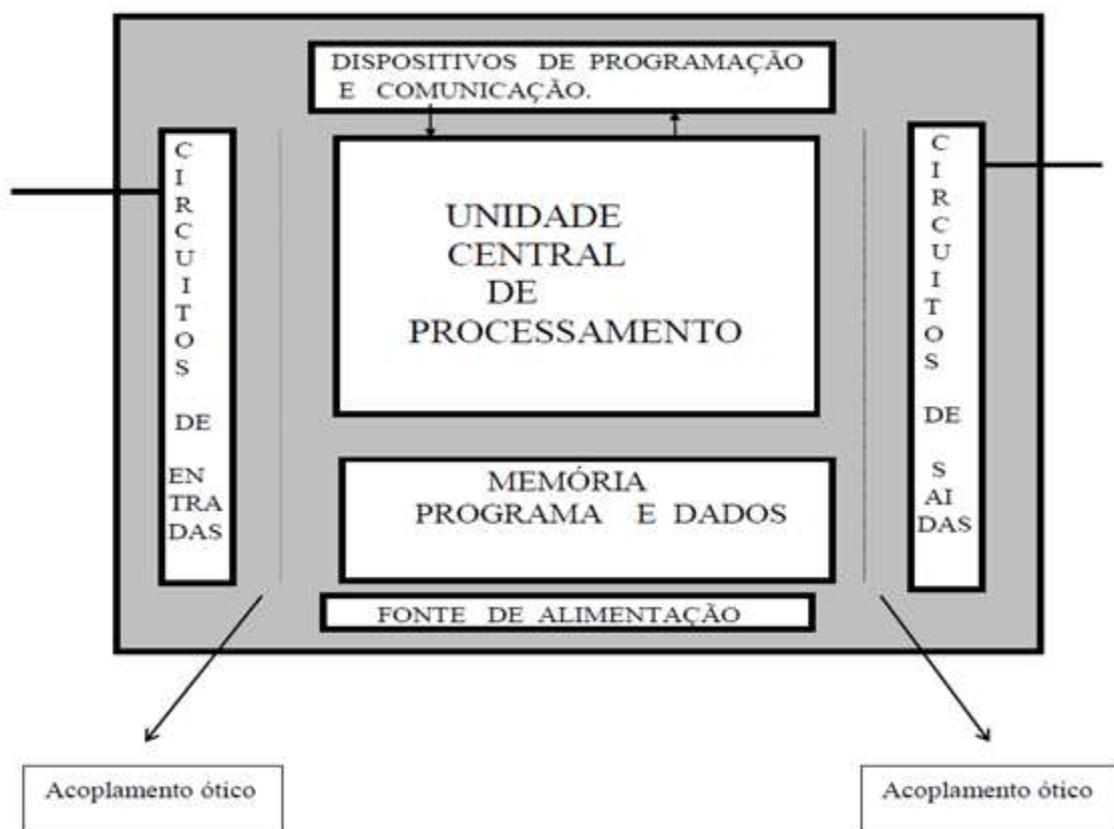
A central microprocessador é onde acontecem as tomadas de decisões intitulando tempos de rampas, proteções contra sobre correntes, sobre e sub tensões, níveis de chaveamentos dos módulos de saídas e interconexões com o meio através de entradas e saídas analógicas, digitais ou por redes de comunicação industrial, sendo a mais utilizada nos dias atuais a rede *hethernet*.

5 CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL - CLP

Dispositivo eletrônico de estado sólido com memória programável para o armazenamento de instruções destinadas ao controle lógico monitorando entradas e saídas executando controle para qual foi programado.

Veja a Figura 8 com o esquema representativo de um PLC mostrado toda sua arquitetura.

Figura 8 -Representação de um PLC



Fonte: (CURSO DE PLC INTENSIVO, p.8, 2015)

5.1 Tipos de entrada e saída

São portas digitais ou analógicas que trabalham com tensão, corrente e frequência sendo de fundamental importância sua correta ligação para sucesso de um projeto.

5.1.1 Entrada e saída digital

As entradas e saídas digitais utilizam sinais de tensão sendo comum utilizarem VCC como nível lógico 1 e GND como nível lógico 0.

Os sinais de entrada digital podem vir de diversos equipamentos, tais como:

- a) Sensores magnéticos, óticos, capacitivos dos mais variados tipos;
- b) Termostato;
- c) Botões;
- d) Pressostato.

Estas saídas são encontradas do tipo relé, transistor e tiristor. As saídas digitais são sinais destinadas para acionamentos de dispositivos, tais como:

- a) Solenoides;
- b) Válvulas;
- c) Lâmpadas;
- d) Atuadores.

5.1.2 Entrada e saída analógica

São sinais que podem assumir valores diversos dentro de uma faixa denominada de *ranger* sendo considerado como sinal padrão de transmissão eletrônico o de 4@20ma pela IEC (*Internacional Eletromechanical Commission*) em maio de 1975.

Vantagens do 4@20ma:

- a) O sinal de corrente é independente das variações de tensão e da resistência da linha;
- b) O sinal pode ser utilizado com os mesmo dois fios de alimentação da instrumentos;
- c) Insensibilidade às quedas de tensão a grandes distâncias;
- d) O instrumento pode ficar localizado distante da fonte de alimentação.

Exemplos de outros sinais analógicos são:

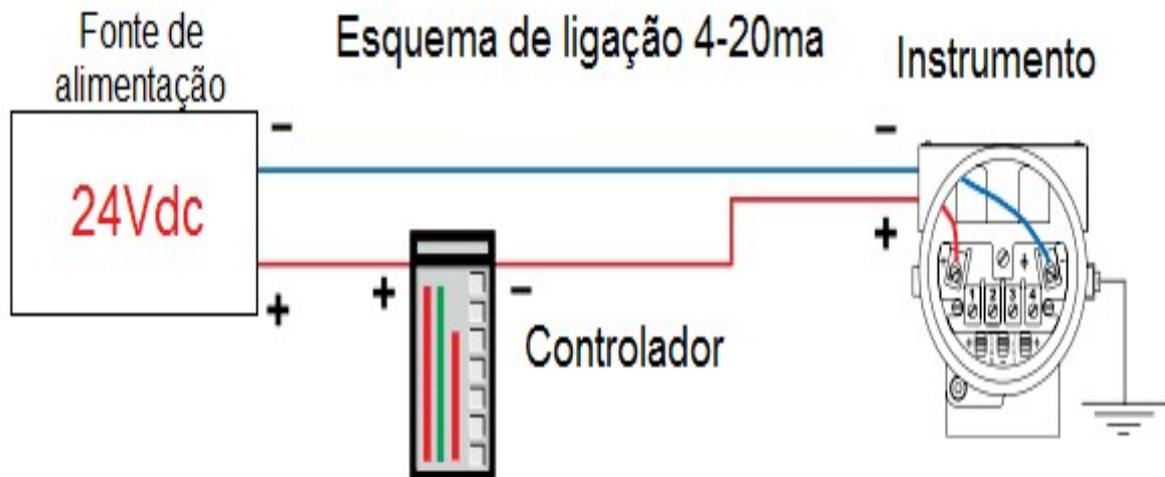
- 0-10 V
- 0 – 1 V
- 0 – 20mA

- -10 +10

Os equipamentos utilizam sinais analógicos para transmitir ou receber informações de controle ou medição como pressão, nível, velocidade, temperatura etc.

A figura 9 mostra um exemplo de um instrumento enviando sinal para uma entrada analógica, senão veja:

Figura 9- Exemplo de envio de sinal



Fonte: (MANUAL TRANSMISSOR TEMPERATURA SMAR TT301, 2000)

O instrumento é ligado em série com cartão analógico de um CLP e uma fonte de alimentação.

Um inversor de frequência comandado por um sinal analógico proveniente de um CLP é capaz de controlar variáveis do motor elétrico, tais como velocidade, torque. Tornando o equipamento flexível no controle do processo.

6 METODOLOGIA

A metodologia aplicada no trabalho se baseia no estudo de caso realizado na indústria de alimentos Kerry do Brasil, localizado na cidade de Três Corações, Minas Gerais, tomando como base o referencial teórico citado neste trabalho. Ambas as etapas se completam e atendem todos os usos finais, as demais formas de economia e melhorias tecnológicas e ambientais.

Este estudo baseia-se em pesquisa bibliográfica, normas NBR5410 de instalação elétrica de baixa tensão, NBR13570 de instalações elétricas locais de influência pública, NBR 14039 instalações elétricas de baixa tensão 1,0KV a 36,2 Kv. Utilizou-se também o manual Danfos VLT3500 pertinente a área de acionamento, com isso desenvolveu-se o embasamento teórico. Foi estudado o diagrama de comando e potência do painel onde está instalada as duas chaves compensadoras e onde será proposto a instalação do inversor disponível para execução do novo projeto de acionamento que ficará disposto em paralelo com o atual acionamento, garantindo uma troca rápida entre ambos acionamentos evitando paradas que por ventura possa ocorrer devido falhas no inversor.

6.1 Diagnostico inicial

Foi realizada uma avaliação do conjunto gerador de ar quente na empresa Kerry do Brasil, na cidade de Três Corações, Minas Gerais. Foi levantado dados de potência, tensão de alimentação e consumo do projeto atual. Avaliou-se também a confiabilidade do sistema de partida e peças de reposição e sistema de intertravamentos e segurança para acionar os motores.

6.2 Diagnostico final

Após a avaliação inicial realizou se cálculos e simulação de acionamento considerando picos e quedas de tensão, horas de funcionamento com carga máxima e horas de funcionamentos com sistema em alívio, isto é, com carga mínima. Levantou-se dados estatísticos determinando a relação custo benefício, investimento e tempo de retorno (*Payback*). Buscou-se maior eficiência do equipamento através do *retrofit* de acionamento, gerando economia com a redução do consumo de energia elétrica consumida.

6.3 Características do medidor

Como o principal objetivo do estudo é a economia de energia, utilizaremos um analisador de energia modelo CW240, da fabricante Yokogawa (YOKOGAWA, 2005), conforme apresenta a Figura 10.

Para a comparação da potência elétrica absorvida nos dois comandos o equipamento fornece uma gama variável de medições, tais como: corrente, demanda, fator potência, distorção harmônica, frequência entre outros.

Figura 10- Analisador de energia



Fonte: (AUTOR, 2018)

O equipamento analisador de energia foi instalado no sistema atual para gerar parâmetros de comparação entre os dois sistemas de acionamento.

A Figura 11 demonstra a coleta de dados para ser usado no *software cwviewer* da Yokogawa (YOKOGAWA,2005). Coletando dados no sistema de partida por chave compensadora.

Figura 11- Coleta de dados comprobatórios



Fonte: (AUTOR)

6.4 Lógicas de funcionamento da planta pelo sistema atual de partida

A finalidade do sistema é disponibilizar ar quente, que é a fonte de energia para o equipamento de secagem denominado secador, com temperatura de 300°C a 400°C e pressão de 2000 a 2500 mm² de H²O conforme parâmetros da receita de produção.

ObserveP a Figura 12 a qual apresenta a instrumentação:

Figura 12- Instrumentação

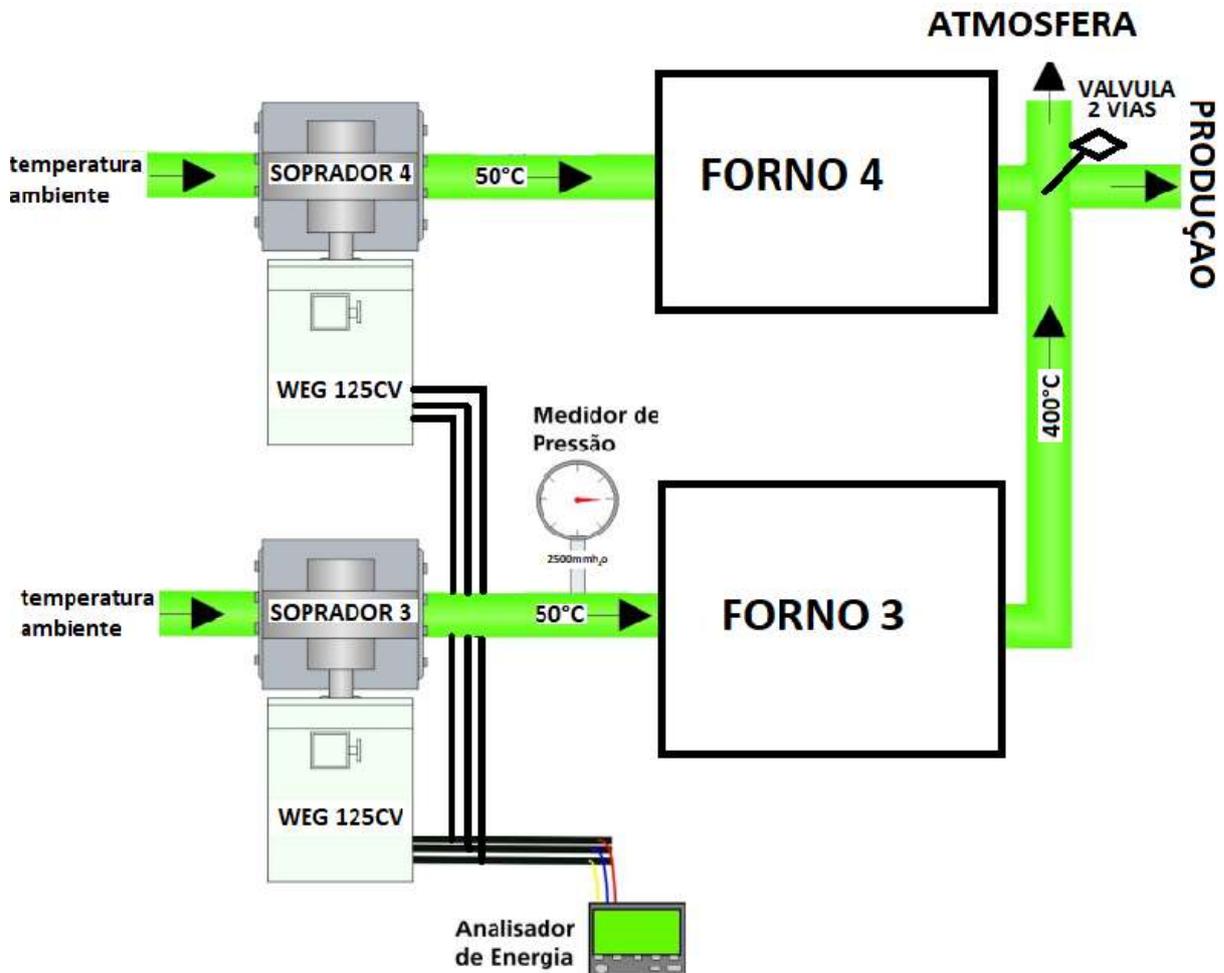


Fonte: (AUTOR, 2018)

Durante a curva de aquecimento o conjunto de motores e sopradores são acionados recalçando o ar nos trocadores de calor localizados no interior dos fornos, onde recebem um contra fluxo de gases quentes fornecidos pelos queimadores, os quais realizam a troca de calor.

O sistema é monitorado e controlado por 4 PLCs modelo SLC500-4 da marca Rockweel que se comunicam através de uma rede dedicada, conhecida como DH+. O acionamento da linha de produção acontece com a liberação do operador da torre de secagem para ligar os sopradores e fornos de aquecimento o qual funcionam por uma hora e vinte minutos em regime de aquecimento com a vazão de ar desviada para atmosfera. Após a temperatura ser liberada, o operador aquece o equipamento de secagem durante quarenta minutos com a válvula de 2 vias acionada em 50% de vazão, é o que demonstra a Figura 13.

Figura -13 Sistema de aquecimento



Fonte: (AUTOR, 2018)

7 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado na empresa do setor alimentício Kerry do Brasil, situada na cidade de Três Corações, Minas Gerais, a qual faço parte do quadro de colaboradores com lotação no setor *Engineerng-Food Systems e Taste* atuando como eletricitista 3 na área de manutenção eletroeletrônica há 15 anos. A foto abaixo mostra a vista aérea da fábrica Kerry.

Figura- 14 Vista aérea fabrica Kerry do Brasil



Fonte: (KERRY DO BRASIL, 2018)

7.1 Características do empresa

De origem Irlandesa, a Kerry do Brasil teve um volume de venda anual acima de 6 bilhões de euros em 2017, atualmente emprega 23 mil colaboradores em todo mundo, sendo na América Latina mais de 2 mil funcionários, distribuídos em 11 fábricas, 3 Centros Regionais

de Desenvolvimento e Aplicação e diversos escritórios comerciais. Utilizando a tecnologia de *Spray Drying* (secagem do leite por aspersão), a unidade de Três Corações junto com a recém adquirida unidade de Rialma, no estado de Goiás. Mantém a liderança em composto lácteos no Brasil.

No Quadro 1 são apresentados dados do local do estudo:

Quadro 1- local de estudo

Nome ou razão social:	Kerry do Brasil Ltda.
CNPJ:	02.332.686/0009-09
Endereço:	Av. Cristiano Alves da Silva, 15 – Parque Jussara
Cidade / CEP:	Três Corações / 37.410- 000
Estado:	Minas Gerais
Site:	www.kerry.com/br-pt
Telefone de contato:	(35) 3239 - 5588
Característica lucrativa:	
Ramo de atividade:	Indústria do setor alimentício
Missão	“Na Kerry, nossa missão é ajudar a nutri e encantar os consumidores em todo mundo”.
Visão	Ser líder em <i>Taste and Nutrition</i> para as indústrias globais de alimentos, bebidas e farmacêuticas; criando valor sustentável para nossos clientes, colaboradores, meio ambiente, comunidade e acionista
Valores Básicos Kerry	Na Kerry, entendemos que para ser líder mundial global em <i>Taste e Nutrition</i> , devemos todos aderir a uma série de valores compartilhados. Compromisso, trabalho em equipe, excelência, empreendedorismo e criação de valor é a base de tudo que fazemos

Fonte: (AUTOR, 2018)

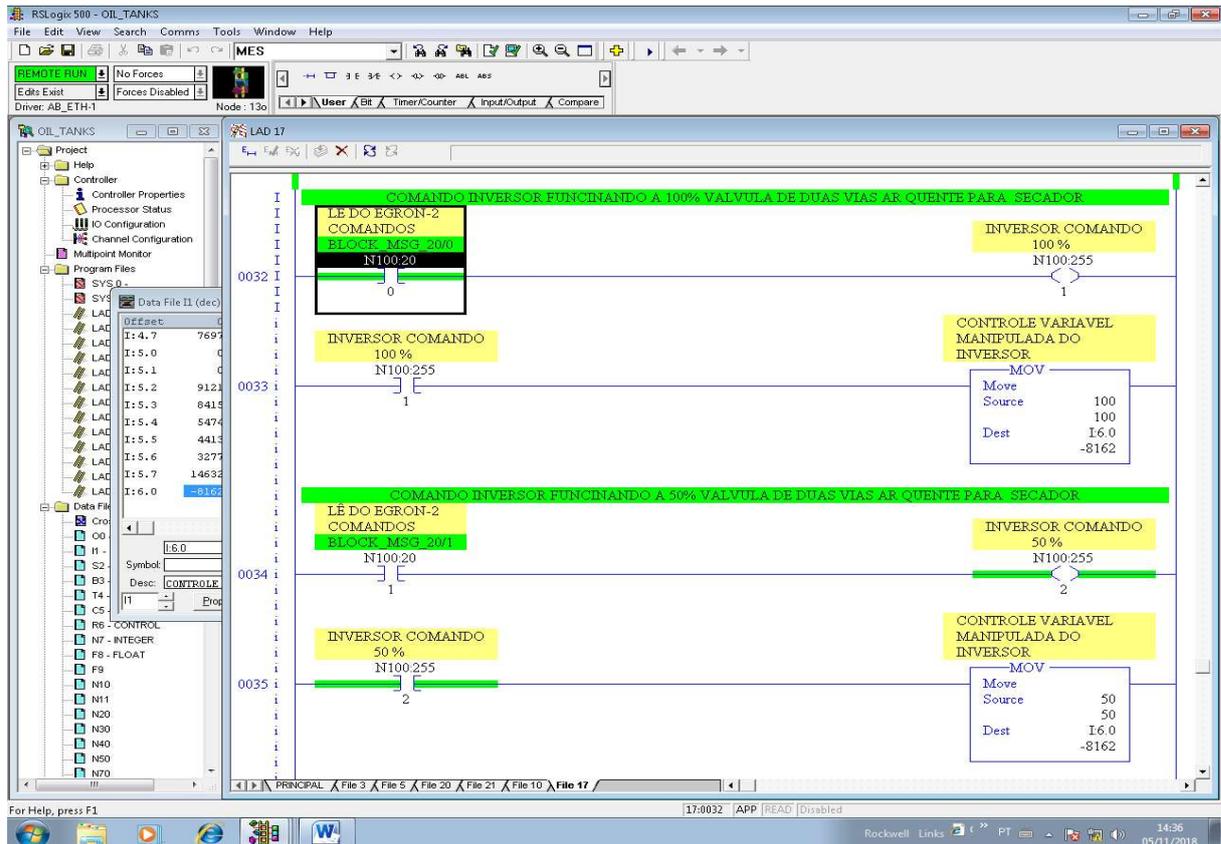
7.2 Proposta de otimização com acionamento por inversor

A proposta consiste em acionar os dois motores com um inversor de frequência, que é um dispositivo eletrônico de potência capaz de gerar tensão e frequência ajustáveis. Ideal para acionamento de motores com conjugado de partida Alto. Possuem grande vantagem acelerando e desacelerando o motor com rampas programáveis e controle de velocidade sendo o “método mais eficiente de controle de velocidade para motores de indução trifásicos com menores perdas” (FRANCHI, 2008, p. 196).

O projeto de acionamento consiste em utilizar a lógica de programação usando software RSLogix 500, conforme apresentado na Figura 15, para criar uma rotina de controle tendo como

entradas digitais os sinais dos fim de cursos localizados na válvula de 2 vias, sendo eles ar para secador quando a válvula fica toda direcionada com fluxo de ar para a câmara de secagem , intermediário quando a válvula fica com 50 % do ar desviado para atmosférica e ar para fora quando a válvula fica toda direcionada para atmosférica.

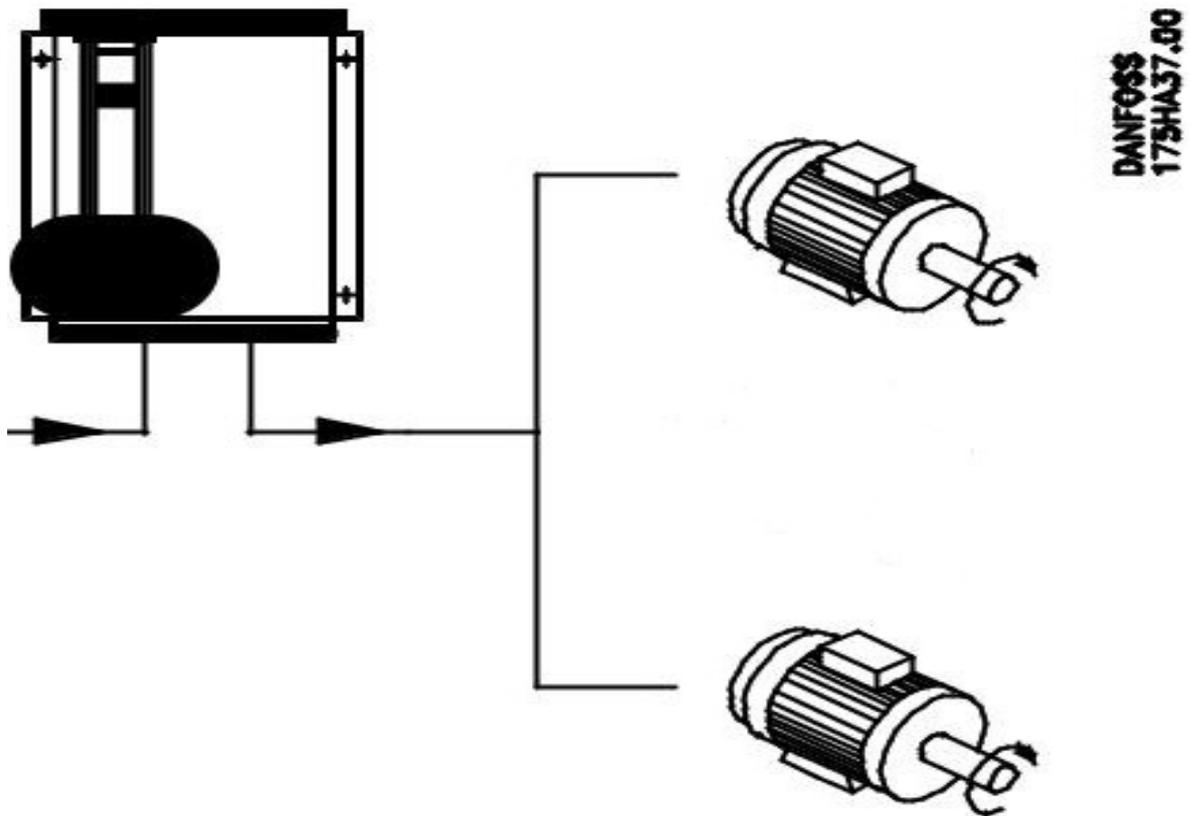
Figura-15 Tela exibindo programação principal de controle.



Fonte: (SOFTWARE ROCKWELL APRESENTANDO PROGRAMA DESENVOLVIDO PELO AUTOR, 2018)

A rotina estabelece momentos oportunos em que podemos utilizar recursos com o uso do inversor Danfoss VLT® 3250 de 250 cv de potência de saída, para acionamento de dois motores Weg de 125 cv alimentados em paralelo conforme mostra a Figura 16. Os motores funcionam com velocidade reduzida quando a válvula estiver comandada para desviar o ar para atmosférica.

Figura 16 – Esquema do acionamento paralelo



Fonte: (MANUAL DANFOS VLT3500)

Foram instalados dois disjuntores *Siemens* de 250 amperes como proteção para cada motor e intertravados com a lógica de comando, evitando funcionamento de apenas um motor por mais de 1 minuto, pois como exemplificado na Figura 10, os sopradores recalcam ar nos fornos ligados em paralelo e esta condição evita o retorno de ar quente no sistema.

7.3 Relação de custos para implementação e *payback*

O inversor utilizado faz parte de uma reserva equipamentos desativados o que possibilitou a execução do projeto com um ótimo custo de instalação. A Tabela 2 exhibe gastos que foram necessários para interligar o inversor em paralelo com o acionamento atual de chave compensadora a instalação em paralelo dos acionamento faz se necessário para garantir o funcionamento do sistema caso aconteça algum imprevistos durante teste de comissionamento do inversor de frequência a interrupção do processo seja a menor possível podendo intercambiar os motores de um acionamento para outro o mais rápido possível.

Tabela -2 Custo de instalação

PLANILHA DE CUSTO						
MATERIAL	ESTOQUE	R\$	DESATIVADO	R\$	COMPRADO	R\$
Inversor Danfos VLT			1	R\$35.000,00		
Disjuntor Siemens					2	R\$2.060,00
Cabos de 90 mm ²	55 m	R\$385,00				
Terminais de comp.	20 PEÇÃS	R\$65,40				
Horas técnicas					80	R\$2.500,00
Valor total do investimento						R\$37.510,40
Valor real investido						R\$5.010,40
Valor total +horas técnicas						R\$40.010,40

Fonte: (ORÇAMENTO AUTOR, 2018)

O valor total retirado da planilha somado com valor das horas técnicas de R\$2.500,00 totalizaram R\$40.010,40 valor mensurado e utilizado para cálculo de *paybak*.

O programa de cálculo e retorno da Weg foi executado com dados estatísticos obtidos em planilhas de controle disponibilizadas pelo setor de operação e produção, que apresentam a seguinte média: para cada 24 horas de produção registrada tem-se a média de 1 hora e 52 minutos de paradas sendo dos mais diversos tipos e pertinentes ao processo. Sendo assim, para fins de cálculo foi definido 22 horas de produção diária com motores a plena carga e 2 horas com motores a 50% conforme apresentado Figura 17, senão veja:

Figura 17 - Dados para cálculo de retorno

Referência		Vazão (%)				Tempo de operação diária (em horas)			
2 Motores 125 cv		100	22	50	2	90	0	40	0
Aplicação		80	0	30	0	70	0	20	0
Ventilador/Exaustor [Inversor de Frequência x Damper na Saída]		60	0	10	0				
Moeda	Potência do Motor (Pn)								
R\$	250	HP (cv)							
Rendimento (%)	Dias anuais de operação								
94.9	365								
Valor do kWh (R\$)	Valor do Inversor (R\$)								
0,50	40010,40								

Fonte: (WEG, 2018)

Executando o programa com tais dados foi prevista uma economia anual de 50,246 (kWh), que em valores de moeda nacional com o preço do quilowatt hora estimado em R\$0,50 tem se um valor de R\$25.123,08 de retorno em 19 meses para um investimento de R\$ 40.010,40, como pode ser visto na Tabela 3:

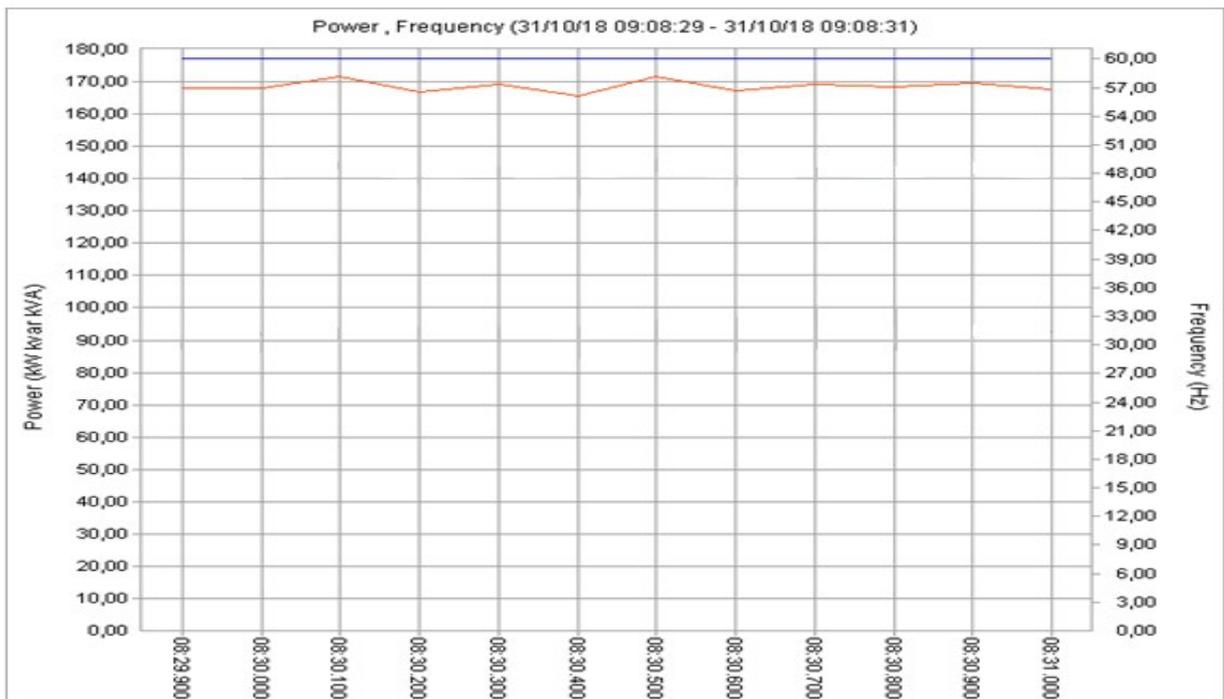
Tabela 3- Calculo de retorno

Resultado			
Economia anual (kWh)	50,246	Economia anual (R\$)	25.123,08
Tempo de retorno de investimento (meses)			19

Fonte: (WEG, 2018)

As paradas somadas com perdas e contratempos na produção que por segurança é necessários o desvio da válvula de ar quente para atmosfera com o sistema atual de acionamento, o Gráfico 2 mostra a potência instantânea consumida tendo média de 170 KW a 60 Hz utilizando motores com rotação a plena potência.

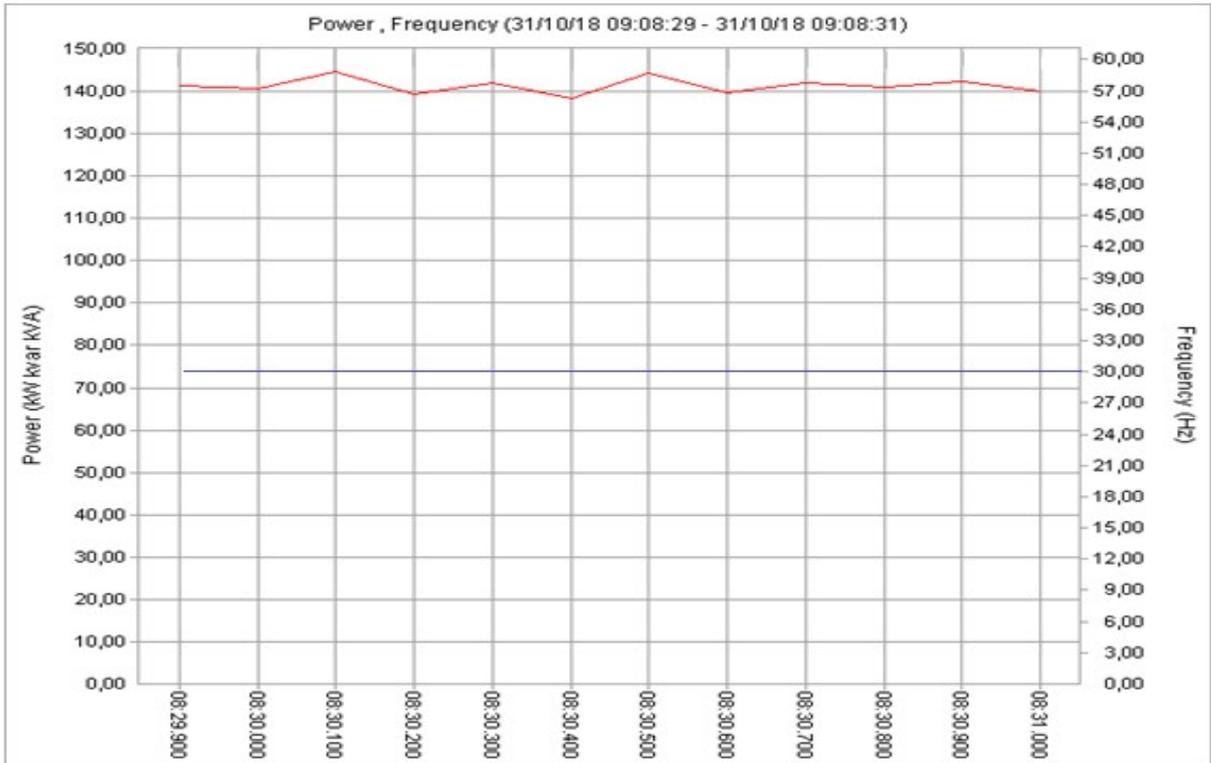
Gráfico 2- Potência instantânea com frequência a 100%



Fonte: (SOFTWARE CWVIEWER EXECUTADO PELO AUTOR, 2018)

Usando o acionamento com o inversor que além atender como sendo o melhor acionamento disponível (SILVEIRA, 2009), conseguimos realizar um *startup* com fluxo de ar menor diminuindo a rotação dos motores com controle da frequência. Toda vez que a válvula é direcionada para atmosfera o micro de ar para fora é acionado e assim torna verdadeira a lógica de controle comandando o inversor a reduzir a frequência para 30 Hz conforme apresentado no Gráfico 3, mostrando potência instantânea de 140 kW indicada no gráfico pela pena vermelha originando da direita para esquerda, a pena azul de origem da esquerda para direita mostra a frequência em 30 Hz. Veja o gráfico 3.

Gráfico 3- Potência instantânea inversor a 50%



Fonte: (SOFTWARE CWVIEWER EXECUTADO PELO AUTOR, 2018)

Este controle está sendo feito por meio de um sinal analógico de 4@20mma liberado pelo PLC a Figura 18 mostra analisador de energia instalado na saída do inversor coletando dados com motor rodando a 50%, 30 Hz

Figura 18- Coletas de dados com inversor a 50%, 30 Hz



Fonte: (AUTOR, 2018)

8 CONCLUSÃO

Através do estudo realizado verificou-se que o *retrofit* do sistema de acionamento apresentou economia no uso energético conforme resultado de *playback*, deixando o sistema mais confiável e com flexibilidade para implantar novas técnicas de controle e novas condições de processo.

Analisando todo o sistema de geração de ar quente comparando os dois acionamentos, percebe-se através do Gráfico 2, que a potência instantânea consumidas pelos motores no acionamento antigo e no Gráfico 3 a potência instantânea consumida no acionamento novo, ambas medidas no barramento que alimenta os dois motores, que o consumo de energia elétrica teve uma queda significativa durante condições reconhecidas pelo programa implantado para controle de velocidade, sendo estas condições o momento de desvio da válvula de duas vias para atmosfera, e também durante o startup que para atingir as parâmetros ideais de fabricação os queimadores são ligados à sua máxima potência para realizar aquecimento dos fornos, mais os motores dos sopradores roots ficam com a rotação reduzida funcionando com uma frequência de 30 Hz, pois durante esta preparação a válvula de duas vias também fica desviada

para atmosfera assim o acionamento novo consome uma potência instantânea de 140 kW a 30 Hz contra os 170 kW a 60 Hz do acionamento antigo. Economizando 30 KW instantâneos que vão refletir na integração do tempo em que a válvula permanecer direcionada para atmosfera.

Após a implantação do projeto, o *startup* da planta tornou-se mais ágil, pois com rotação menor há menos fluxo e ar no sistema e seu aquecimento está acontecendo em menor tempo gerando uma significativa economia de óleo combustível contribuindo diretamente na emissão de poluentes minimizando impactos ambientais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. A. **Montagem do estator de uma máquina síncrona**. 2011. Disponível em:<
<http://maquinas-utfpr.blogspot.com/2011/08/>> Acesso em: 4 jun. 2018.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Programa de Eficiência Energética das Empresas de Distribuição de Energia**. Brasília, 2009.

CEMIG. **Projeto Cemig troca seu motor**, 2018. Disponível em: < <http://www.cemig.com.br/> >. Acesso em: 11 jun. 2018.

CEMIG. **Tarifas e serviços**, 2017. Disponível em: < <http://www.cemig.com.br/> >. Acesso em: 16 out. 2018.

KERRY DO BRASIL. **História da empresa**, 2018. Disponível em: < <http://www.kerry.com/> >. Acesso em: 27 out. 2018.

DRUCKER, PETER. **Conceito de eficiência**, 2016. Disponível em: < <https://www.administradores.com.br/> >. Acesso em: 13 maio, 2018.

ELETROBRAS; PROCEL: **Eficiência energética na indústria: O que foi feito no Brasil, oportunidade de redução de custos e experiências internacionais**. Brasília, 2009. 70

FRANCHI, C. M. **Inversores de frequência: teoria e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Ed. Érica, 2008. 196 p.

FIRJAN. **Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil?** Disponível em: < <http://www.quantocustaenergia.com.br/> >. Acesso em: 4 jun. 2018.

HENRIQUE. H. **Motores trifásicos de TA**. Disponível em:<
<https://docente.ifrn.edu.br/heliopinheiro/Disciplinas/maquinas-acionamentos-eletricos/aula-de-motores-trifasicos-de-ca>> Acesso em: 4 jun. 2018.

MARQUES, S. C. M; *et al.* **Eficiência Energética: teoria e prática**. Minas Gerais: FUPAI, 2006.

MONACHESI, M. G.; MONTEIRO, M. A. G. **Eficiência Energética em Sistemas de Bombeamento**. Procel Sanear, 2004.

VIEIRA, Hugo Rodrigues. **Guia de Estudo: teoria Eletromagnética**. Varginha: GEAD-UNIS/MG, 2014.

WILSON, M. **A energia**. Rio de Janeiro: José Olympio, 1968. 200p.

KUHN, T. **A tensão essencial**. Lisboa: Ed. 70, 1977.

MOREIRA, M. A. **Uma abordagem cognitivista ao ensino de física**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1983.

MICHAELIS. **Dicionário online**. Disponível em:
<<http://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=energia>>. Acesso em: 14 jan.
2018.

CREDER, H. **Instalações elétricas**. 13.ed. Rio de Janeiro: Ed. S. A., 2010. p. 516.