Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Educação a Distância da UFSM – EAD
Universidade Aberta do Brasil – UAB
Curso de Pós-Graduação em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos
Polo: Camargo

ANÁLISE DE REDUÇÃO NO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA NO PROCESSO DE RESFRIAMENTO DE RAÇÃO

COLVARA, Carlos Mateus Goularte[1]
SALVADOR, Cesar Addis Valverde[2]

[1] Engenheiro Eletricista. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS
[2] Engenheiro Mecânico. Professor Orientador. Universidade de Santa Maria, Santa Maria, RS

RESUMO

O presente artigo relata o estudo sobre eficiência energética em uma empresa do ramo alimentício, fabricante de ração animal para frango de corte. Para tanto buscou-se analisar o processo de resfriamento do produto “ração peletizada” de modo a identificar no sistema de exaustão e tiragem do ar quente para atmosfera, oportunidades de redução no consumo de energia elétrica. Como referencial teórico, foram apresentados os tipos de motores, as características construtivas e os princípios de funcionamento, além disso, foram feitas considerações sobre o uso de inversores de frequência como dispositivos de controle de velocidade. A metodologia foi desenvolvida com base numa ferramenta do Programa de Qualidade Total, o ciclo PDCA. Neste contexto descreveu-se o conhecimento do processo produtivo, identificou-se e observou-se o problema, evidenciaram-se as causas, utilizando para isto o analisador de energia para monitorar o comportamento do motor, desenvolveu-se a solução teórica com base na aplicação do conjunto inversor de frequência com motor síncrono de ímã permanente de alto rendimento. Sendo que ao final foi apresentada a simulação de um cálculo comparativo com o retorno do investimento e os benefícios obtidos.

Palavras-chave: eficiência energética, motores, rendimento.

ABSTRACT:

This present article reports the study about energy efficiency in a food company, a manufacturer of animal feed for broilers. For this we sought to analyze the cooling process of the product "pelleted feed" in order to identify in the system of exhaustion and circulation of the air to atmosphere, opportunities to reduce the consumption of electric power system. As documents of reference types of motors were presented, the constructive characteristics and principles of operation, furthermore, considerations on the use of frequency inverters as speed control devices were made. The methodology was developed based on a tool of Total Quality Program, the PDCA cycle. In this context is described the knowledge of the production process, we identified and observed the problem, evidence of the causes, using for this purpose the energy analyzer to monitor the behavior of the motor, developed a theoretical solution based on applying the set of frequency inverter with synchronous permanent magnet motor for high performance. Being that at the end was presented the simulation with a comparative calculation with the return on investment and the benefits.

Keywords: energy efficiency, motors, efficiency.

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Φm = fluxo de magnetização (Wb)

CFW = Conversor de Frequência WEG

CLP = Controlador Lógico Programável

Cos φ = Fator de Potência

f = frequência (Hertz)

FC = Fator de Carga

F_{rth} = fator de redução de torque por distorção harmônica

f1 = frequência fundamental da tensão de alimentação de um motor elétrico (Hz)

I = corrente elétrica (Ampere)

I2 = corrente rotórica (Ampere)

N = ordem da harmônica

η = rendimento do motor em %

n = velocidade de rotação (rpm)

η_r = rendimento do motor funcionando com o inversor de frequência

p = número de pólos de um motor elétrico

P = potência elétrica (Watt)

Pa = Potência Absorvida da rede (Watt)

PB = Payback em anos

PT100 = sensor de temperatura do tipo termoresistência

Pu = Potência Mecânica disponível no eixo (Watt)

S = escorregamento de um motor elétrico

T = torque (Nm)

TPA = Tonelada de Produto Acabado

V = tensão (Volt)

V_f = tensão fundamental e seu valor eficaz

V_h = tensão harmônica de ordem N

V1 = tensão estatórica (Volt)

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO ...……...5
2 OBJETIVOS …….....5
2.1 Objetivo geral ……...5
2.2 Objetivos específicos ……..6
3 REFERENCIAL TEÓRICO ……6
3.1 Motores Elétricos ……6
3.1.1 Motor trifásico de indução ……8
3.1.2 Motores síncronos a ímãs permanentes ……12
3.2 Inversores de Frequência ……18
3.2.1 Variação de velocidade de motores ……..19
3.2.2 Características dos inversores de frequência PWM ……..…23
3.2.3 Modos de Controle ……..…….24
3.2.4 Desempenho operacional dos motores ……..…..25
4 METODOLOGIA ……28
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES ……39
6 CONCLUSÕES ……..43
7 REFERÊNCIAS ……43

1 INTRODUÇÃO

Segundo o último relatório do Balanço Energético Brasileiro (BEN), que teve o ano de 2013 como base, o setor industrial no Brasil consumiu cerca de 210.083 GWh de energia elétrica, o equivalente a 34,4% da oferta interna de energia gerada do país. Sabe-se que 68% deste consumo foi utilizado em sistemas motrizes. Com base nestas informações, torna-se relevante a utilização de equipamentos mais eficientes nos processos produtivos, visando a redução no consumo de energia elétrica.

De fato as empresas de vanguarda já estão implementando boas práticas através do consumo eficiente e formando grupos de trabalho com foco em obter a excelência energética em suas plantas industriais e identificar as ações de melhorias.

Dessa forma, este trabalho apresenta um estudo de eficiência energética em uma indústria fabricante de ração animal, tendo como objeto de análise o sistema de exaustão da etapa de resfriamento do produto, onde é proposta a aplicação de uma tecnologia já difundida e aprovada sob o ponto de vista energético, o uso do conjunto Inversor de frequência com motor de ímãs permanentes de alto rendimento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Estudar o processo de resfriamento de rações para encontrar alternativas que visem melhorar a eficiência energética dos equipamentos e a redução do consumo de energia elétrica, de modo que possamos manter o indicador de kWh/TPA dentro da meta proposta, bem como manter o padrão da temperatura de resfriamento da ração.

2.2 Objetivos específicos

Descrever e caracterizar um sistema de resfriamento de ração de uma indústria alimentícia localizada no Planalto Médio do estado do Rio Grande do Sul, para:

- analisar o consumo de energia, o rendimento e eficiência através de medições a serem realizadas em um dos motores elétricos dos exaustores do sistema de resfriamento;
- identificar oportunidades de melhoria e de automação no processo;
- propor a instalação de dispositivos de controle para automatizar o sistema;
- apresentar as vantagens propostas com a instalação de motores de alto rendimento do tipo WMagnet em conjunto com inversores de frequência;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados conceitos sobre os motores elétricos, os tipos existentes, suas características construtivas, bem como o princípio de funcionamento dos mesmos, além disso, será apresentado o princípio de funcionamento e o modo de operação dos inversores de frequência. Esta fundamentação teórica é importante para que se tenha um entendimento técnico do plano de trabalho desenvolvido. O conteúdo descrito terá como base: o livro Instalações Elétricas Industriais do autor João Mamede Filho, o Manual Técnico de Motores e o artigo publicado pelo Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento de Produto da empresa WEG, com o título Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Frequência.

3.1 Motores Elétricos

Os motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica para utilização nas diferentes formas de trabalho.

Segundo Mamede (2011) os motores elétricos são divididos em dois grandes grupos, para tanto, tem-se o valor da tensão como base: a corrente contínua e a corrente alternada. Sendo assim, a figura 1 mostra os diferentes tipos de motores elétricos.

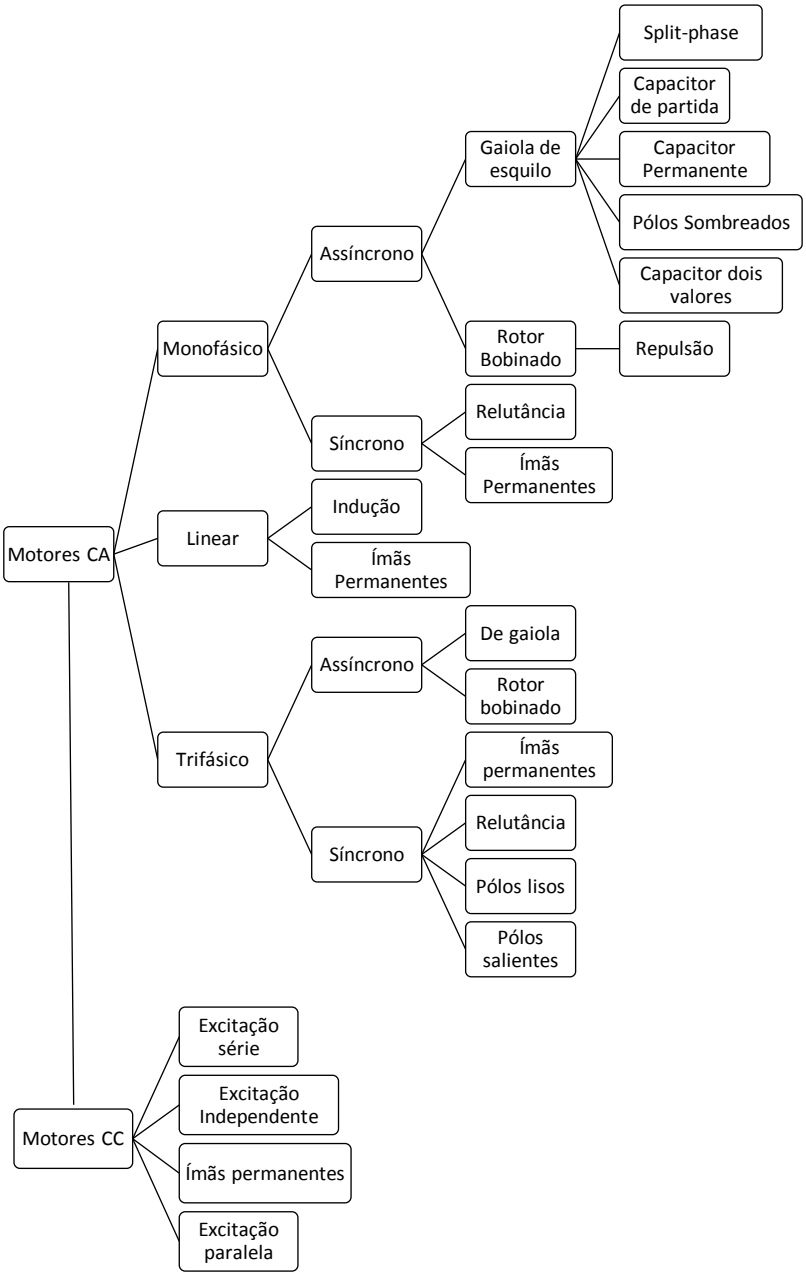

Figura 1- Tipos de motores elétricos
Fonte: Catálogo Weg

Para Mamede (2011) os motores de corrente contínua são acionados através de uma fonte de corrente contínua. Eles são muito usados nas indústrias, quando se faz necessário manter o controle fino da velocidade num processo qualquer de fabricação.

Os motores são fabricados em três diferentes características:

a) Motores série

> São aqueles em que a corrente de carga é utilizada também como corrente de excitação, isto é, as bobinas de campo são ligadas em série com as bobinas do induzido. Estes motores não podem operar a vazio, pois a sua velocidade tenderia a aumentar indefinidamente, danificando a máquina.
>
> b) Motores em derivação
>
> São aqueles que em que o campo está diretamente ligado à fonte de alimentação e em paralelo com o induzido. Sob tensão constante, estes motores desenvolvem uma velocidade constante e um conjugado variável de acordo com a carga.
>
> c) Motores compostos
>
> São aqueles em que o campo é constituído de duas bobinas, sendo uma ligada em série e a outra em paralelo com o induzido. Estes motores acumulam as vantagens do motor em série e do de derivação, isto é, possuem um elevado conjugado de partida e velocidade aproximadamente constante no acionamento de cargas variáveis. (MAMEDE, 2011, p. 202)

Além disso, Mamede (2011) caracteriza os motores de corrente alternada, os quais são acionados através de uma fonte de alimentação de corrente alternada. Esse tipo de motor é usado na maioria das indústrias, a grande utilização nesta área justifica-se pelo fato de ter vida útil longa, além de ser de fácil construção e também de ter um custo de compra e manutenção reduzido.

Os motores trifásicos representam a grande maioria dos motores empregados nas instalações industriais, eles são alimentados por um sistema trifásico a três fios, em que as tensões estão defasadas de 120º elétricos, podem ser do tipo indução ou síncrono.

3.1.1 Motor trifásico de indução

Os motores de indução são constituídos por duas partes básicas: o estator e o rotor.

O estator é composto por três elementos: a carcaça com uma estrutura robusta é fabricada de ferro, aço ou alumínio, resistente a corrosão, a superfície aletada suporta todas as partes do motor. O núcleo de chapas é formado por chapas magnéticas fixadas no estator; e por fim os enrolamentos dimensionados em material condutor isolado, dispostos sobre o núcleo e ligados à rede de energia elétrica de alimentação.

O rotor possui alguns elementos básicos, dentre os quais podemos destacar:

- Eixo: responsável pela transmissão da potência mecânica gerada pelo motor.
- Núcleo de chapas: constituído de chapas magnéticas adequadamente fixadas

sobre o eixo.

- Barras e anéis de curto-circuito (motor de gaiola): constituído de alumínio injetado sobre pressão.
- Enrolamentos (motor com rotor bobinado): constituídos de material condutor e dispostos sobre o núcleo.

Demais componentes:

- Ventilador: responsável pela remoção do calor acumulado na carcaça.
- Tampa defletora: componente mecânico provido de aberturas instaladas na parte traseira do motor sobre o ventilador.
- Terminais: conectores metálicos que recebem os condutores de alimentação do motor.
- Rolamentos: componentes mecânicos sobre os quais está fixado o eixo.
- Tampa: componente metálico de fechamento lateral.
- Caixa de ligação: local onde estão fixados os terminais de ligação do motor.

A figura 2 ilustra os componentes de um motor de indução trifásico:

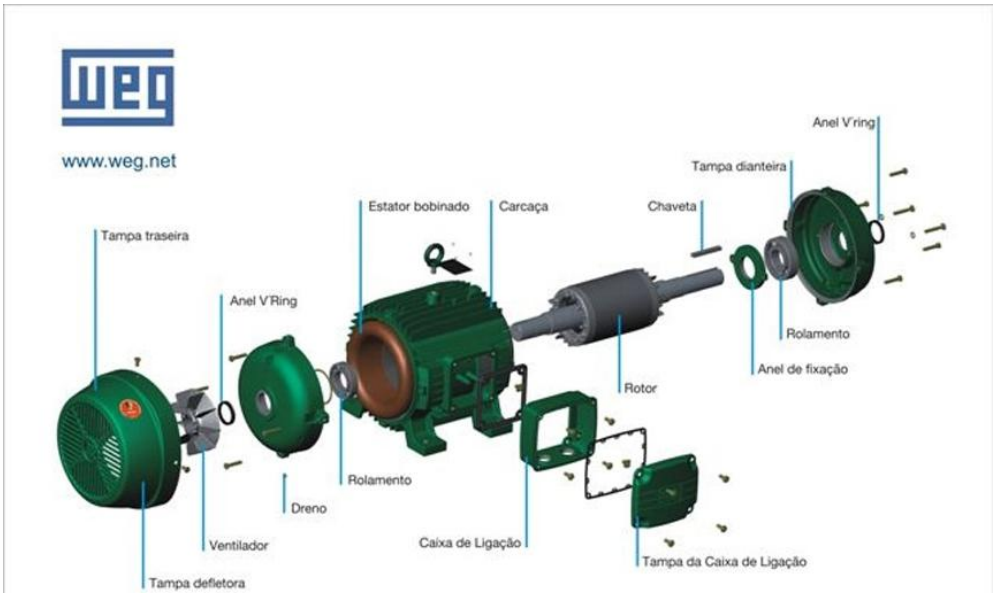

Figura 2 - Componentes de um motor elétrico trifásico de indução.
Fonte: Catálogo Weg.

Mamede (2011) afirma que as correntes rotóricas são geradas eletromagneticamente pelo estator, único elemento do motor ligado à linha de alimentação. O comportamento de um motor elétrico de indução relativo ao rotor é

comparado ao secundário de um transformador.

O rotor pode ser constituído de duas maneiras: o rotor bobinado e o rotor em gaiola.

Será aprofundado neste trabalho o princípio de funcionamento dos motores caracterizados por rotores em gaiola, visto que possui uma grande aplicação na indústria. O rotor em gaiola é constituído por um conjunto de barras não isoladas e interligadas através de anéis condutores curto-circuitados.

> O motor de indução opera normalmente a uma velocidade constante, variando ligeiramente com a aplicação da carga mecânica. O funcionamento de um motor de indução baseia-se no princípio da formação de campo magnético rotativo e produzido no estator pela passagem da corrente alternada em suas bobinas, cujo fluxo, por efeito de sua variação, se desloca em volta do rotor, gerando neste correntes induzidas que tendem a se opor ao campo rotativo, sendo, no entanto, arrastado por este. (MAMEDE, 2011, p. 204)

Conforme o catálogo da Weg (2013, p.13), “quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, é criado um campo magnético orientado conforme o eixo da bobina e de valor proporcional à corrente”, conforme as figuras abaixo:

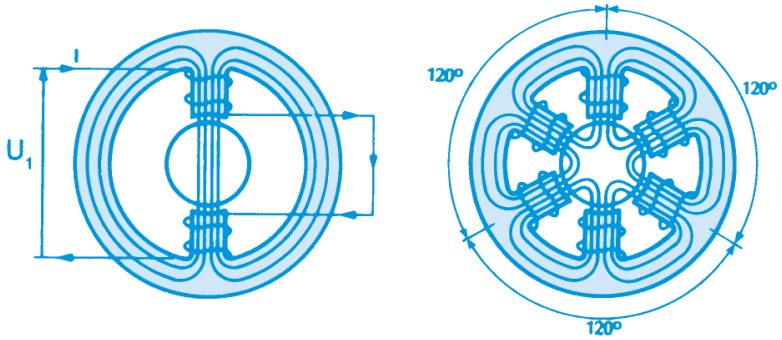

Figura 3.1 - Enrolamento monofásico. Figura 3.2 - Enrolamento trifásico.
Fonte: Catálogo da Weg.

Segundo o catálogo de motores Weg (2013, p.14) a figura 3.1 indica

> um “enrolamento monofásico” atravessado por uma corrente I e o campo H criado por ela. O enrolamento é constituído de um par de polos (um polo “norte” e um polo “sul”), cujos efeitos se somam para estabelecer o campo H. O fluxo magnético atravessa o rotor entre os dois polos e se fecha através do núcleo do estator.
> Se a corrente I é alternada, o campo H também é, inclusive invertendo o sentido em cada meio ciclo. O campo H é “pulsante”, pois sua intensidade

> “varia” proporcionalmente à corrente, sempre na “mesma” direção norte-sul. Weg (2013, p.14)

Na figura 3.2, conforme descrito no catálogo da Weg é

> indicado um “enrolamento trifásico”, que é composto por três monofásicos espaçados entre si de 120°. Se este enrolamento for alimentado por um sistema trifásico, as correntes I1, I2 e I3 criarão, do mesmo modo, os seus próprios campos magnéticos H1, H2 e H3. Estes campos são deslocados 120º entre si. Além disso, como são proporcionais às respectivas correntes, serão defasados no tempo, também de 120° entre si. O campo total H resultante, a cada instante, será igual à soma gráfica dos três campos H1, H2 e H3 naquele instante. Weg (2013, p.14)

A figura 4, nos mostra a soma gráfica para seis instantes sucessivos:

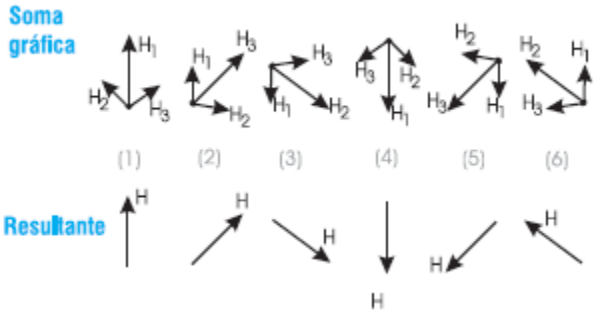

Figura 4 - Campo total resultante H.
Fonte: Catálogo da Weg.

A figura 4, conforme catálogo da Weg nos mostra que

> o campo H1 é máximo e os campos H2 e H3 são negativos e de mesmo valor, iguais a 0,5. O campo resultante (soma gráfica) é mostrado na parte inferior da figura, tendo a mesma direção do enrolamento da fase 1.
> [...] observa-se que o campo resultante H tem intensidade “constante”, porém sua direção vai “girando”, completando uma volta no fim de um ciclo.
> Assim, quando um enrolamento trifásico é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um “campo girante”, como se houvesse um único par de polos girantes, de intensidade constante. Este campo girante, criado pelo enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor (linhas de fluxo magnético cortam as barras do rotor), que por estar curto-circuitadas geram correntes, e, consequentemente, um campo no rotor, de polaridade oposta à do campo girante do estator. Como campos opostos se atraem e como o campo do estator é rotativo, o rotor tende a acompanhar a rotação deste campo. Desenvolve-se então, no rotor, um conjugado motor que faz com que ele gire, acionando a carga. Weg (2013, p.14)

Nos últimos anos os fabricantes de motores elétricos têm buscado aumentar o rendimento dos mesmos. Estes motores têm materiais de qualidade melhor, para a

mesma potência do eixo, além de consumir menos energia no mesmo ciclo de utilização.

Motores de alto rendimento possuem as seguintes características:

> - Uso de chapas magnéticas de aço silício de qualidade superior, que proporcionam a redução da corrente de magnetização e, consequentemente, aumentam o rendimento do motor;
> - Uso de maior quantidade de cobre nos enrolamentos, permitindo reduzir as perdas Joule;
> - Alto fator de enchimento das ranhuras, proporcionando uma melhor dissipação do calor gerado pelas perdas internas;
> - Tratamento térmico do rotor, reduzindo as perdas suplementares;
> - Dimensionamento adequado das ranhuras do rotor e anéis de curto-circuito, permitindo reduzir as perdas Joule. (MAMEDE, 2011, p. 225)

Dessa forma, constata-se que os motores de alto rendimento operam com temperaturas inferiores às dos motores convencionais, permitindo assim uma maior capacidade de sobrecarga, o que resulta num fator de serviço geralmente superior a 1,10.

Quando se realiza uma auditoria energética numa indústria, normalmente se estuda a viabilidade econômica de substituição de alguns motores de alto rendimento. Tais análises recaem especialmente sobre os motores que operam constantemente e de maior potência consumida.

Mamede (2011, p. 225) “o rendimento dos motores pode crescer e atingir um número muito próximo à unidade, porém a um custo comercialmente insuportável para o comprador”.

3.1.2 Motores síncronos a ímãs permanentes

Os motores síncronos de ímãs permanentes são alimentados por dispositivos inversores de frequência, utilizados na indústria esse tipo de motor tem a variação da velocidade com torque constante e elevado desempenho, são comumente usados em esteiras e compressores, dentre outras aplicações que requerem confiabilidade, torque suave, baixos níveis de vibração e ruído, no caso de elevadores. Conforme o artigo técnico publicado pela empresa Weg (s/d, p. 01) “são muito atrativos para aplicações com espaço reduzido e necessidade de eliminação de redutores, pois os PMSMs (Permanent Magnet Synchronous Motor) possuem

tamanhos e volume reduzidos e podem funcionar em uma ampla faixa de velocidades, sem necessidade de ventilação independente.”.

Segundo o mesmo artigo, há dois principais tipos de PMSM: Brushless DC e Brushless AC.

O motor tipo Brushless DC

> é projetado para desenvolver uma forma de onda da força contra eletromotriz (*fcem*) trapezoidal e a forma de onda da corrente de alimentação idealmente retangular para geração de torque suave, conforme mostrado na figura 5.Para se obter a *fcem* trapezoidal, em geral, os ímãs permanentes são montados na superfície do rotor.
> O controle do acionamento trapezoidal é mais simples, pois não há necessidade de ter um sensor de posição de alta resolução no rotor, uma vez que somente seis instantes de comutação da corrente das três fases devem ser monitorados a cada ciclo elétrico. Além disso, requer somente um sensor de corrente no link CC. Desta forma, o custo do *drive* é menor. Entretanto, este tipo de motor apresenta um torque mais pulsante em relação ao Brushless AC.
> Geralmente, estes motores são utilizados em aplicações de baixas potências, alguns poucos kW, e não necessitem de alta performance. Para aplicações com potências maiores e alta performance, o acionamento Brushless DC apresenta desvantagens em relação ao motor Brushless AC. WEG (s/d, p. 01)

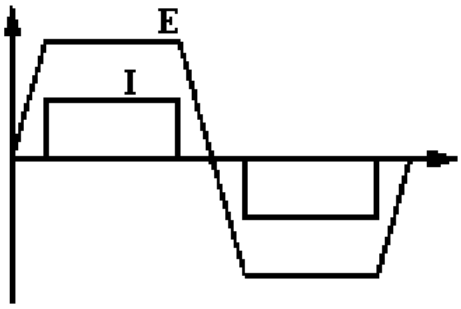

Figura 5 - Forma de onda da fcem e da corrente de alimentação.
Fonte: Artigo técnico Weg.

Agora, o PMSM - Brushless AC

> é projetado para que a *fcem* e a corrente de alimentação sejam senoidais, resultando em um torque suave, conforme figura 6.
> A *fcem* senoidal requer uma distribuição dos enrolamentos do estator aproximadamente senoidal no entreferro e/ou uma forma de onda da indução magnética (B) radial, gerada pelos ímãs, com variação senoidal no entreferro. O motor pode ser projetado com ímãs superficiais ou ímãs internos no rotor [...].
> Ao contrário do acionamento trapezoidal, o controle do acionamento senoidal é mais complexo, pois são necessários sensores de correntes em cada fase e um sensor de posição de alta resolução para manter a

sincronização precisa da forma de onda da corrente com a posição angular do rotor em cada instante de tempo. O sensor de posição pode ser um encoder óptico ou resolver. O motor Brushless AC, em geral, é utilizado em aplicações onde se necessita de alto desempenho. WEG (s/d, p. 01)

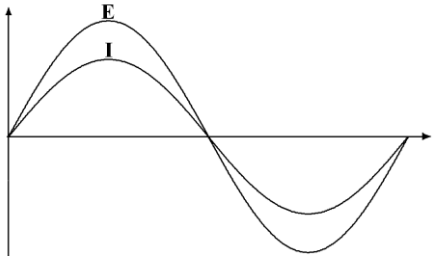

Figura 6 - Formas de onda da fcem e da corrente de alimentação.
Fonte: Artigo técnico Weg.

Os motores com ímãs superficiais e internos - Brushless AC ilustrados pela figura 7 também são conhecidos como motor de polos lisos

pois as indutâncias do eixo direto (Ld) e quadratura (Lq) são praticamente iguais e constantes.
O motor de ímãs internos ou pólos salientes, [...], possui ímãs montados internamente no rotor. Devido à geometria do rotor, este tende a produzir saliência e indutâncias Ld e Lq diferentes. Esta saliência produz torque de relutância que, somado ao torque eletromagnético devido aos ímãs, produz um maior torque resultante. Os motores de ímãs internos são capazes de funcionar em uma grande faixa de velocidades acima da nominal, com potência constante, conforme figura 9. O motor com ímãs superficiais apresenta uma limitada capacidade de operar em velocidades acima da nominal conforme figura 8, com potência constante, devido à baixa indutância resultante do grande entreferro. Outra vantagem do motor com ímãs internos sobre os ímãs superficiais são: ímãs inseridos no interior do rotor, o que permite que o ímã fique protegido contra a força centrífuga. WEG (s/d, p. 01)

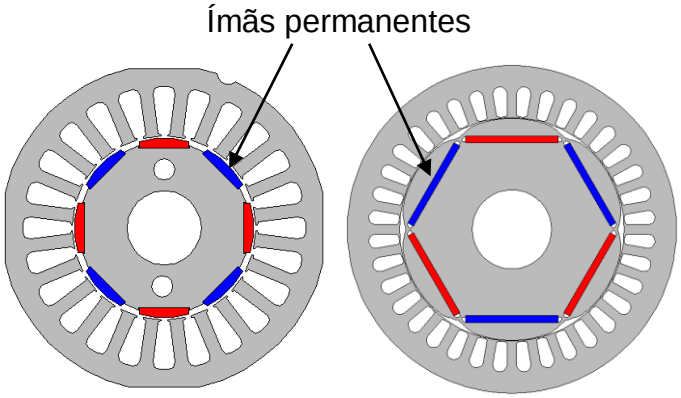

Figura 7- Motor com ímãs superficiais, e motor com ímãs internos.
Fonte: Artigo técnico Weg.

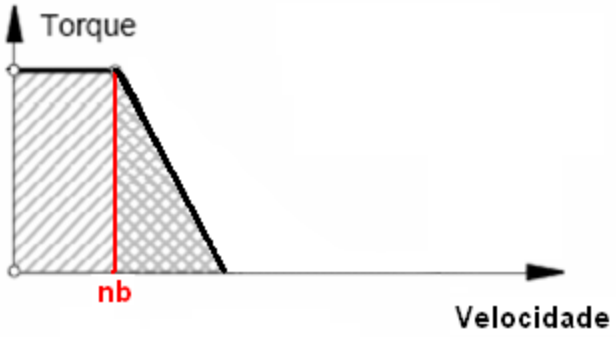

Figura 8 - Curva de torque x velocidade do motor com ímãs superficiais.
Fonte: Artigo técnico Weg.

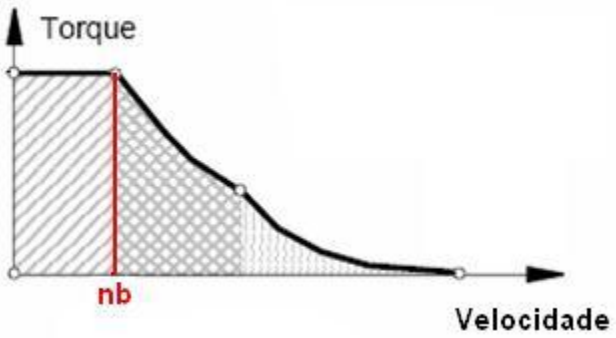

Figura 9 - Curva de torque x velocidade do motor com ímãs internos.
Fonte: Artigo técnico Weg.

Segundo departamento de Pesquisa e Desenvolvimento (PeD) da empresa WEG que publicou o artigo técnico aqui referenciado (s/d, p. 03), os motores de ímãs permanentes fabricados por ela são denominados de WMAGNET, neste trabalho iremos relacionar as vantagens em se aplicar este tipo de motor no estudo de eficiência energética implementado em uma indústria fabricante de ração animal .

Conforme descrito no artigo o acionamento do motor de ímãs WEG

> é do tipo Brushless AC com ímãs no interior do rotor (pólos salientes) e ímãs de alta energia (NdFeB). Os motores Wmagnet com ímãs de NdFeB quase não possuem perdas Joules (RI2) no rotor, ao contrário dos motores de indução com gaiola de esquilo convencional. Como as perdas Joule são uma parcela significativa das perdas totais nos motores de indução, retirando a gaiola de esquilo e substituindo-a por ímãs, o Wmagnet assegura um rendimento muito maior do que os encontrados nos motores das linhas Standard e Alto Rendimento Plus, conforme figura 10. WEG (s/d, p. 03)

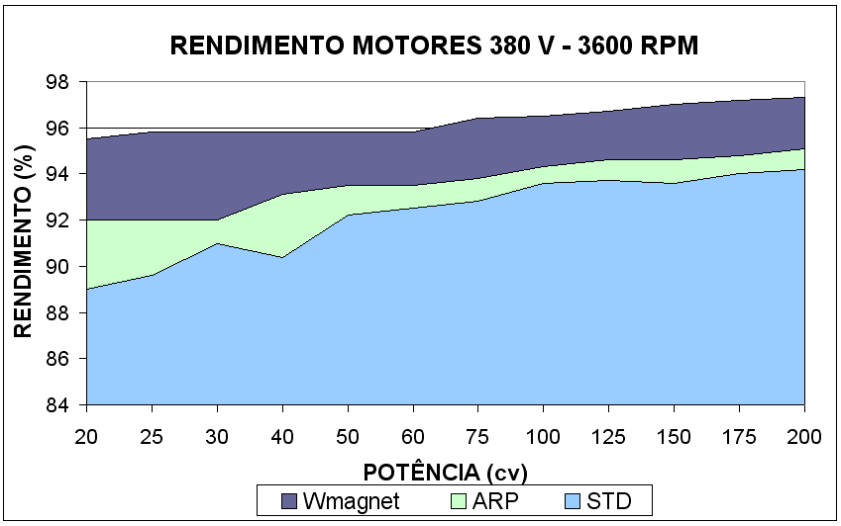

Figura 10 - Gráfico comparativo de rendimento dos motores Wmagnet, Alto Rendimento Plus e Standard.
Fonte: Artigo técnico Weg.

Na figura 11 podemos observar que os ímãs do rotor garantem uma redução nas perdas elétricas, logo a elevação da temperatura do motor será menor. Por esses benefícios o volume conforme ilustrado na figura 12 e peso do Wmagnet se comparado a um motor de indução de mesma potencia será menor, mas a durabilidade será maior.

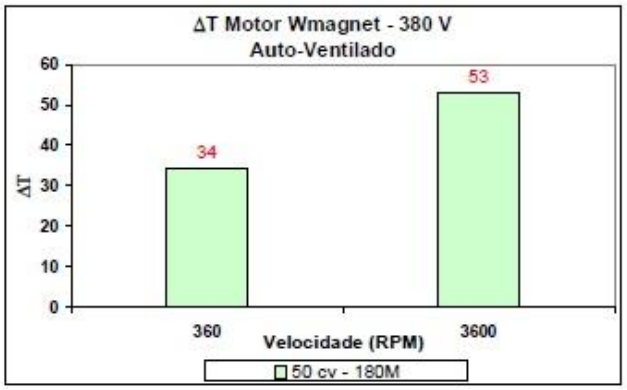

Figura 11 - Variação de temperatura (ΔT) para faixa de rotação 10:1
Fonte: Artigo técnico Weg.

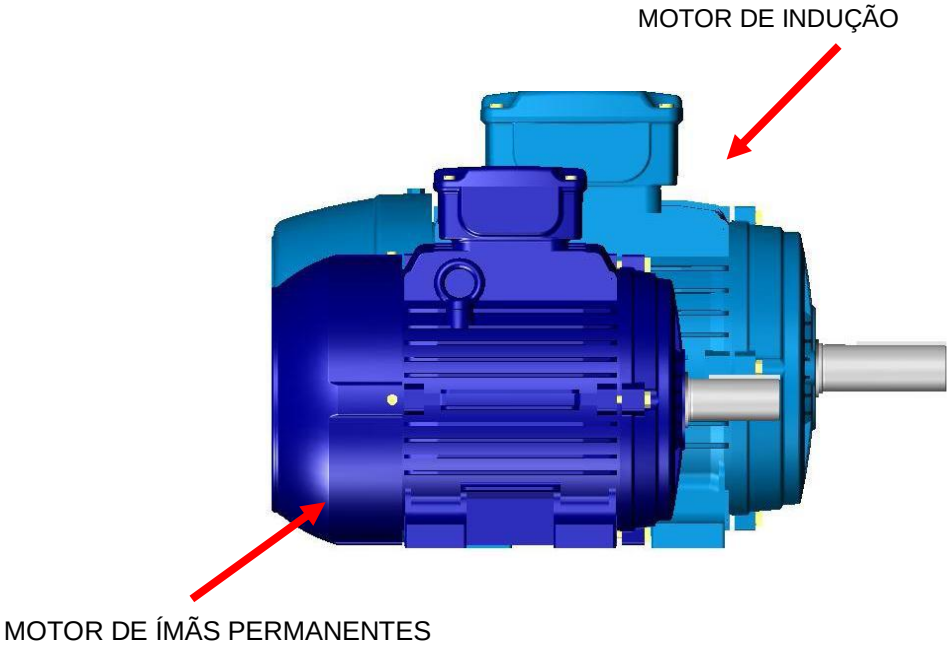

Figura 12 - Comparação de volume entre motor de indução e motor de ímãs.
Fonte: Artigo técnico Weg.

Ao se comparar um motor de indução equivalente

o volume do Wmagnet é reduzido em aproximadamente 47%, resultando em uma alta relação de torque/volume e uma redução de 36% no peso.
Para uma mesma relação de torque/potência, diminuindo-se o tamanho da carcaça, o sistema de resfriamento também é reduzido. Desta forma, é verificado um significativo decréscimo no nível de ruído causado pelo ventilador acoplado ao eixo do motor, o que pode ser verificado pela figura 13. Weg (s/d, p.3)

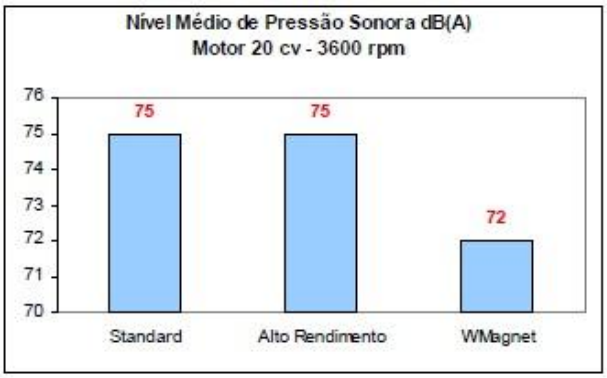

Figura 13 - Gráfico comparativo do nível de ruído entre os motores Wmagnet, Alto Rendimento Plus e Standard.
Fonte: Artigo técnico Weg.

Outra grande vantagem do Wmagnet autoventilado é que este pode operar com torque constante em uma ampla faixa de velocidade, conforme figura 14.

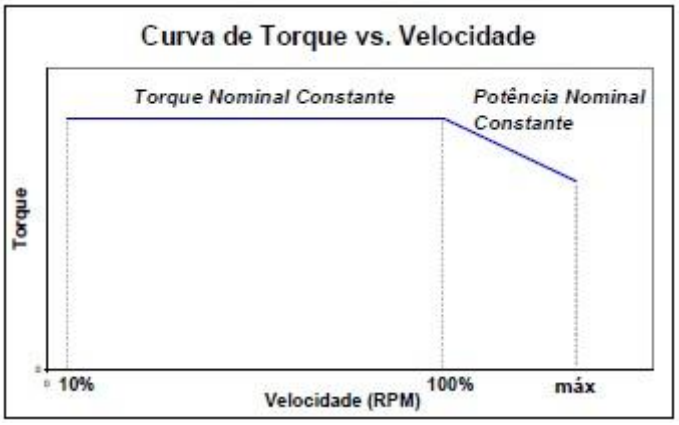

Figura 14 - Curva de torque nominal constante.
Fonte: Artigo técnico Weg.

3.2 Inversores de Frequência

A utilização de motores elétricos com inversores de frequência aumentou expressivamente nos últimos anos. As razões principais são: facilidade no ajuste de velocidade, obtenção de economia de energia através da modulação da velocidade, precisão no controle de posição e partida suave das cargas.

Motores de diversas tecnologias podem ser ativados por inversores de frequência, como: indução CA, síncrono, síncrono de ímãs permanentes, de relutância chaveado, etc.

Encontramos o conjunto motor e inversor instalado em diversos equipamentos, entre os quais destacamos: lavadoras de roupa, bombas, ventiladores, compressores, sopradores, máquinas ferramentas, elevadores, servoacionamentos, equipamentos de refrigeração, condicionadores de ar, aplicações automotivas, esteiras e tantos outros.

Com relação ao uso de inversores de frequência em conjunto com motores de ímãs permanentes, o artigo técnico da Weg (s/d, p. 01) descreve que o mesmo

> se encontra em ampla expansão, também na indústria, pois o motor possui alto rendimento, baixo volume e peso, torque suave, baixo nível de vibração e ruído, ampla faixa de rotação com torque constante e, com o advento, a partir dos anos 80, dos ímãs de Neodímio Ferro Boro (NdFeB), de elevada

> energia, houve um aumento do número de aplicações, onde se utiliza esta tecnologia. Weg (s/d, p. 01)

3.2.1 Variação de velocidade de motores

O guia técnico da Weg (2009, p.5) estabelece que a relação entre a rotação, a frequência de alimentação, o número de polos e o escorregamento de um motor de indução obedece à seguinte equação:

$$n = \frac{120 \,.\, f1}{p} \, (1 - S)$$

Onde:

n: velocidade de rotação mecânica (rpm);

$f1$: frequência fundamental da tensão de alimentação (Hz);

p: número de polos;

S: escorregamento.

Dessa forma, podemos destacar que se pode atuar em três parâmetros, no intuito de variar a velocidade de um motor desse tipo, conforme se pode observar na tabela a seguir:

Tabela 1 - Variação de velocidade

Variação de velocidade	
Parâmetro de variação de velocidade	Característica de aplicação
Número de polos	Variação discreta
	Sobredimensionamento da carcaça
Escorregamento	Variação contínua
	Perdas rotóricas
	Faixa de variação pequena
Frequência da tensão estatórica	Variação contínua
	Uso de INVERSORES DE FREQUÊNCIA!

Fonte: Guia Técnico da Weg.

Segundo o Guia Técnico da Weg (2009) o uso de inversores estáticos de

frequência abrange o método mais eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução. Os inversores mudam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, para uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Quando varia a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e a velocidade mecânica de rotação da máquina.

O torque desenvolvido pelo motor de indução segue a equação:

$$T = k_1.\emptyset_m.I_2$$

Segundo o Guia Técnico da Weg (2009, p.06) o seu fluxo magnetizante, desprezando-se a queda de tensão ocasionada pela resistência e pela reatância dos enrolamentos estatóricos, vale:

$$\emptyset_m = K_{2.} \frac{V_1}{f_1}$$

Onde:

T: torque ou conjugado disponível na ponta de eixo (N.m)

Φm: fluxo de magnetização (Wb)

I2: corrente rotórica (A) , depende da carga

V1: tensão estatórica (V)

k1 e k2 : constantes que dependem do material e do projeto da máquina

No Guia Técnico da Weg (2009) é possível compreender que a corrente depende da carga e que essa é constante (portanto, corrente praticamente constante). Dessa forma, percebe-se que variando proporcionalmente a amplitude e a frequência da tensão de alimentação, o fluxo e o torque continuam constantes. O motor fornece um ajuste contínuo de velocidade e conjugado com relação à carga mecânica. As perdas podem ser minimizadas de acordo com as condições de carga, mantendo-se constante o escorregamento da máquina em qualquer velocidade, para a mesma carga.

A partir das equações acima, obtêm-se os gráficos abaixo.

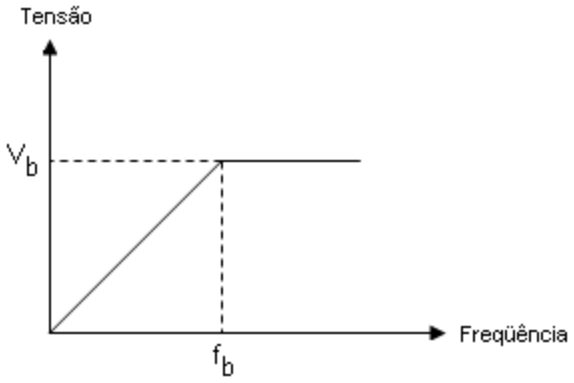

Figura 15 - Variação da relação V1/f1 linear.
Fonte: Guia Técnico da Weg.

Segundo o Guia Técnico da Weg (2009) a variação da relação V1/f1 é feita de maneira linear até a frequência base (nominal) do motor. Acima dessa, a tensão é máxima (igual à nominal) e permanece constante, havendo então apenas a variação da frequência aplicada ao enrolamento estatórico do motor, conforme se pode observar na figura anterior.

Segundo o Guia Técnico da Weg (2009, p.06) acima da frequência base caracteriza-se a chamada região de enfraquecimento de campo, pois ali o fluxo decresce com o aumento da frequência, provocando também a diminuição de torque.

A seguir, podemos observar a curva característica torque x velocidade do motor acionado por inversor de frequência.

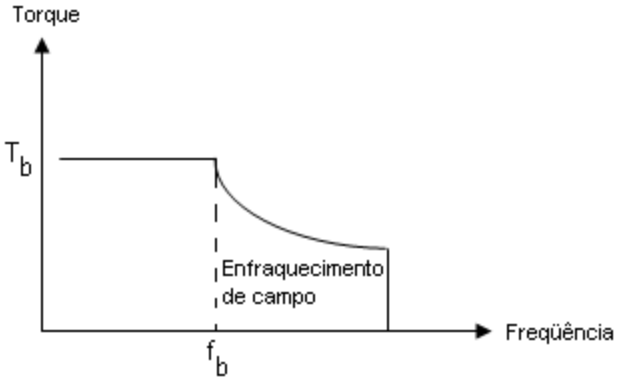

Figura 16 - Curva característica torque x velocidade do motor acionado por inversor de frequência.
Fonte: Guia Técnico da Weg.

Dessa forma, podemos observar que o torque permanece constante até a

frequência base e decresce gradativamente acima desta. Como Potência = Torque x Rotação, a potência útil do motor cresce linearmente até a frequência base e permanece constante acima desta, conforme podemos verificar a seguir.

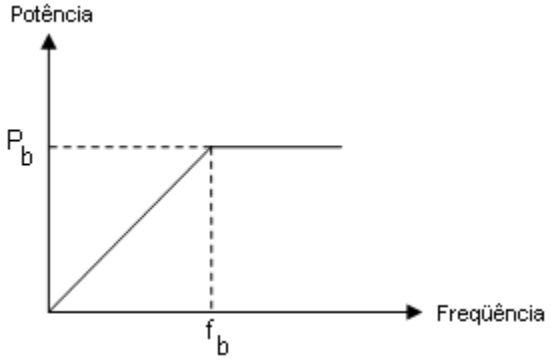

Figura 17 - A potência útil do motor cresce linearmente até a frequência base e permanece constante acima desta.
Fonte: Guia Técnico da Weg.

Devido ao aumento significativo no número de aplicações em que a variação de velocidade de motores de indução é feita por meio de inversores eletrônicos estáticos de frequência, apresentaremos os benefícios propiciados por essas aplicações:

- Controle a distância: nos sistemas eletrônicos de variação de velocidade, o equipamento de controle pode situar-se em uma área conveniente, ficando apenas o motor acionado na área de processamento, ao contrário dos sistemas hidráulicos e mecânicos de variação de velocidade.
- Redução de custos: partidas diretas ocasionam picos de corrente, que causam danos não apenas ao motor, mas também a outros equipamentos ligados ao sistema elétrico. Inversores estáticos proporcionam partidas mais suaves, reduzindo custos com manutenção.
- Aumento de produtividade: sistemas de processamento industrial geralmente são sobre dimensionados na perspectiva de um aumento futuro de produtividade. Inversores estáticos possibilitam o ajuste da velocidade operacional mais adequada ao processo, de acordo com os equipamentos disponíveis e a necessidade de produção a cada momento.
- Eficiência energética: o rendimento global do sistema de potência depende não apenas do motor, mas também do controle. Os inversores estáticos de frequência apresentam rendimento elevado, da ordem de 97% ou mais. Motores elétricos

também apresentam alto rendimento, chegando a 95% ou mais em máquinas maiores operando sob condições nominais. Na variação eletrônica de velocidade a potência fornecida pelo motor varia de maneira otimizada, influenciando diretamente a potência consumida e conduzindo a elevados índices de rendimento do sistema (motor + inversor).

- Versatilidade: inversores estáticos de frequência são adequados para aplicações com qualquer tipo de carga. Com cargas de torque variável (pequena demanda de torque em baixas rotações), o controle reduz a tensão do motor compensando a queda de rendimento que normalmente resultaria da diminuição de carga. Com cargas de torque (ou potência) constante a melhoria de rendimento do sistema provém da capacidade de variar continuamente a velocidade, sem necessidade de utilizar múltiplos motores ou sistemas mecânicos de variação de velocidade (como polias e engrenagens), que introduzem perdas adicionais.

- Maior qualidade: o controle preciso de velocidade obtido com inversores resulta na otimização dos processos e proporciona um produto final de melhor qualidade.

3.2.2 Características dos inversores de frequência PWM

Atualmente, os equipamentos mais empregados para a alimentação de motores de baixa tensão nas aplicações industriais são Inversores estáticos de frequência com tensão imposta PWM, pois requerem variação de velocidade. Eles operam como uma interface entre a fonte de energia (rede) e o motor de indução.

No Guia Técnico da Weg (2009, p. 07) tem-se que o processo de obtenção da tensão e frequência desejadas por meio de tais equipamentos passa por três estágios, conforme pode-se visualizar na figura 18:

> - Ponte de diodos - Retificação do sinal alternado de tensão e frequência constantes proveniente da rede de alimentação;
>
> - Filtro ou Link DC - Alisamento/regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores;
>
> - Transistores IGBT - Inversão da tensão contínua proveniente do link DC num sinal alternado, com tensão e frequência variáveis. Guia Técnico da Weg (2009, p.07)

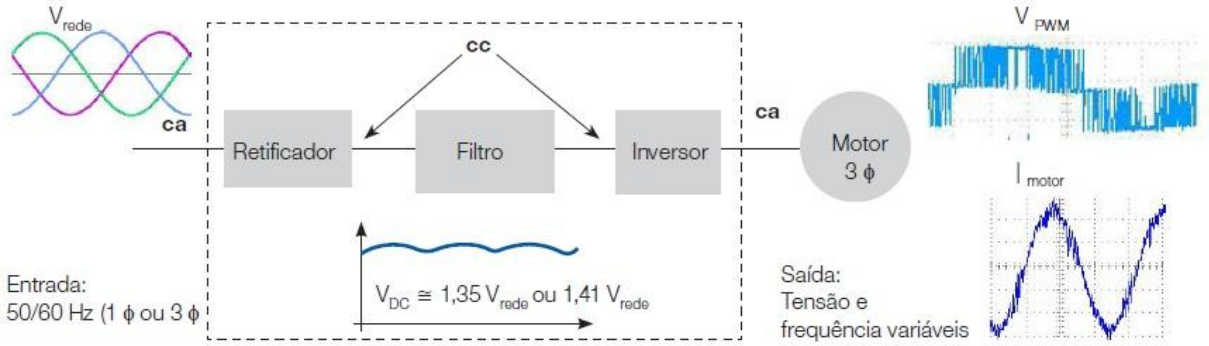

Figura 18 - Diagrama de funcionamento de um inversor de frequência.
Fonte: Guia Técnico da Weg.

Segundo o Guia Técnico da Weg (2009) quando o motor está em vazio ou com cargas leves, a tensão no link DC tende a estabilizar no valor igual a

$$\sqrt{2}\ \mathrm{V}_{\ \mathrm{rede}} \cong\ 1{,}41\ \mathrm{V}_{\ \mathrm{rede}}$$

Porém, quando o motor está com cargas mais elevadas (por exemplo, plena carga), a tensão no link DC tende ao valor

$$\left(\frac{3}{\pi}\right)\sqrt{2}\ \ \mathrm{V}_{\ \mathrm{rede}} \cong\ 1{,}35\ \mathrm{V}_{\ \mathrm{rede}}$$

3.2.3 Modos de controle

Podemos dizer que existem dois tipos de controle dos inversores eletrônicos: o escalar e o vetorial. Segundo o Guia Técnico da Weg (2009)

> *O controle escalar* baseia-se no conceito original do inversor de frequência: impõe no motor uma determinada tensão/frequência, visando manter a relação V/f constante, ou seja, o motor trabalha com fluxo aproximadamente constante. É aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de torque e velocidade e é particularmente interessante quando há conexão de múltiplos motores a um único inversor. O controle é realizado em malha aberta e a precisão da velocidade é função do escorregamento do motor, que varia em função da carga, já que a frequência no estator é imposta. Para melhorar o desempenho do motor nas baixas velocidades, alguns inversores possuem funções especiais como a compensação de escorregamento (que atenua a variação da velocidade em função da carga) e o boost de tensão (aumento da relação V/f para compensar o efeito da queda de tensão na resistência estatórica), de maneira que a capacidade de torque do motor seja mantida. O controle escalar é o mais utilizado devido à sua simplicidade e devido ao fato de que

> a grande maioria das aplicações não requer alta precisão e/ou rapidez no controle da velocidade.
> *O controle vetorial* possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle do torque e da velocidade do motor. O controle decompõe a corrente do motor em dois vetores: um que produz o fluxo magnetizante e outro que produz torque, regulando separadamente o torque e o fluxo. O controle vetorial pode ser realizado em malha aberta ("sensorless") ou em malha fechada (com realimentação).
> - Com sensor de velocidade: requer a instalação de um sensor de velocidade (por exemplo, um encoder incremental) no motor. Este tipo de controle permite a maior precisão possível no controle da velocidade e do torque, inclusive em rotação zero.
> - Sensorless: mais simples que o controle com sensor, porém, apresenta limitações de torque principalmente em baixíssimas rotações. Em velocidades maiores é praticamente tão bom quanto o controle vetorial com realimentação. Guia Técnico da Weg (2009, p.08)

Conforme o Guia Técnico da Weg (2009, p.08) as diferenças entre os dois tipos de controle são que o controle escalar "só considera as amplitudes das grandezas elétricas instantâneas (fluxos, correntes e tensões), referindo-as ao estator, e seu equacionamento baseia-se no circuito equivalente do motor, ou seja, são equações de regime permanente". Agora, o controle vetorial aceita a representação das grandezas elétricas imediatas por vetores, "baseando-se nas equações espaciais dinâmicas da máquina, com as grandezas referidas ao fluxo enlaçado pelo rotor, ou seja, o motor de indução é visto pelo controle vetorial como um motor de corrente contínua, havendo regulação independente para torque e fluxo" Guia Técnico da Weg (2009, p.08).

3.2.4 Desempenho operacional dos motores

Mamede (2011, p. 259) defende que "o inversor de frequência libera para o motor uma onda senoidal distorcida em função dos componentes harmônicos, tanto de corrente como de tensão, que afeta significativamente as características dos motores de indução, notadamente o seu rendimento".

Dessa forma, para manter a elevação da temperatura na classe de isolamento, é preciso reduzir o conjugado inferior à unidade, conforme podemos observar na tabela 2:

Tabela 2 - Fator de redução de torque por presença de harmônicos

Distorção harmônica (%)	Fator de redução de torque do motor
3	1,00
4	0,97
5	0,94
6	0,95
7	0,93
8	0,90
9	0,87
10	0,86
11	0,78
12	0,73

Fonte: Mamede (2011, p. 259)

Os motores elétricos com inversores precisam respeitar as condições em serviço, uma vez que podem ter o seu desempenho alterado, pois tem relação com o comportamento da carga e com as características técnicas dos inversores.

Mamede (2011) comenta que o efeito das correntes harmônicas sobre os motores de indução acontece quando o motor é operado por um inversor, onde é aplicada a seus terminais uma tensão com conteúdo harmônico, gerando assim, correntes harmônicas nas mesmas frequências das tensões aplicadas. Assim, temos como resultados as perdas nos enrolamentos, a elevação da temperatura e a redução do rendimento.

Ao compensar a elevação de temperatura sofrida pelos enrolamentos, é preciso diminuir o valor do torque nominal do motor na proporção dada pela tabela 2. Outra alternativa é utilizar um motor com maior potência.

O fator de distorção harmônica de tensão pode ser determinado através da equação:

$$F_{dh} = 100 \text{ x } \frac{\sum_{N=2}^{n=\infty} V_h^2}{V_f}$$

Onde:

V_f - tensão fundamental e seu valor eficaz;

V_h - tensão harmônica de ordem N;

N - ordem da harmônica.

Agora, para obter o rendimento de um motor de indução acionado por um inversor de frequência, pode-se aplicar:

$$\eta_r = \frac{F_{rth}^2}{\frac{1}{\eta} + F_{rth}^2 - 1}$$

Onde:

η_r - rendimento do motor funcionando com o inversor de frequência;

η - rendimento do motor suprido por onda senoidal perfeita;

F_{rth} - fator de redução de torque por distorção harmônica.

Segundo Mamede (2011, p. 259)

> Se o motor utilizado com inversor de frequência tiver ventilação independente, o aquecimento do motor será pouco afetado. No entanto, se o motor é do tipo autoventilado, a operação com variação de velocidade faz elevar a temperatura do motor, em virtude da deficiência de ventilação em baixas velocidades.

A próxima tabela 3, nos mostra

> a redução de conjugado percentual dos motores em função da redução da ventilação como consequência da diminuição da rotação do motor e a redução de conjugado em função da simultaneidade da presença de harmônicos de tensão e da redução da rotação do motor. Para velocidades superiores à nominal, observa-se uma redução de conjugado do motor motivada pelo enfraquecimento do campo magnético. Mamede (2011, p. 259)

Tabela 3 - Fator de redução de torque por presença de harmônicos

Variação de velocidade (%)	Fator de redução de torque devido à rotação	Fator de redução de torque devido à rotação e à harmônica
10	0,64	0,60
20	0,72	0,70
30	0,83	0,77
40	0,85	0,81
50	0,88	0,85
60	0,92	0,87
70	0,96	0,90
80	1,00	0,94
90	-	0,95
100	-	0,95
110	-	0,85
120	-	0,80
130	-	0,74
140	-	0,68
150	-	0,64
160	-	0,64

Fonte: Mamede (2011, p. 259)

4 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido com base no uso de uma ferramenta do Programa de Qualidade Total existente na empresa estudada, o ciclo PDCA. As atividades desenvolvidas seguiram uma sequencia lógica no decorrer da etapa Planejar (conhecimento do processo, identificar problema e meta, observar e priorizar problema, identificar e priorizar causas, identificar e priorizar soluções e elaborar plano de ação), conforme fluxograma apresentado na figura 19:

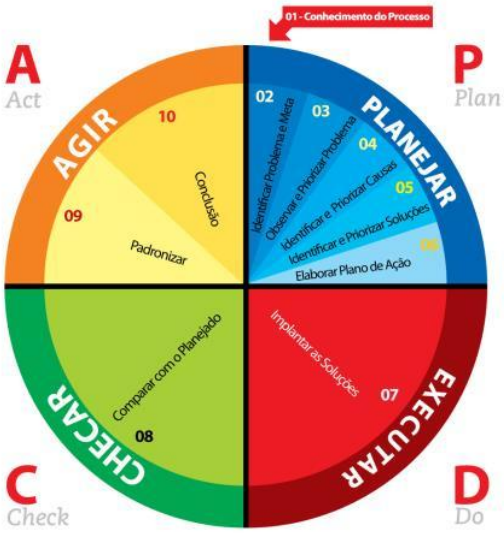

Figura 19 - Fluxograma Ciclo PDCA.
Fonte: Manual do Sistema de Gestão da Unidade.

Iniciou-se o conhecimento do processo através do estudo do fluxograma de produção, o qual é representado pela figura 20.

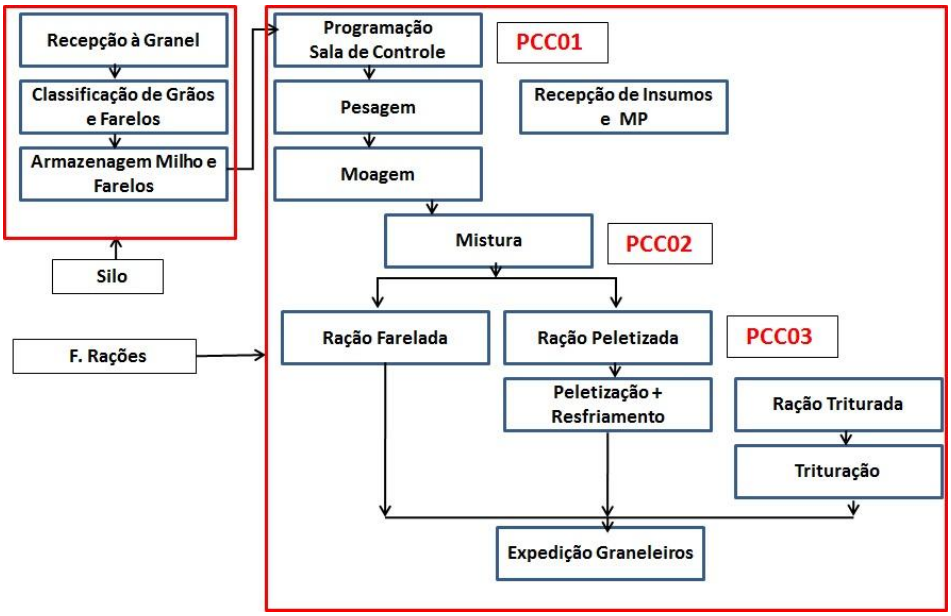

Figura 20 - Fluxograma macro do processo produtivo.
Fonte: Memorial descritivo da fábrica de ração.

A ração fabricada pela empresa estudada é composta por matéria prima (milho e farelo de soja) recebida a granel e armazenada nos silos. A programação da produção é realizada pelo operador da sala de comando, o qual seleciona a receita contendo os ingredientes formulados pela equipe de nutrição animal, todo o

acionamento das máquinas é realizado pelo software supervisório da fábrica, após selecionado a receita, as tarefas de pesagem, moagem, mistura, peletização, resfriamento e expedição são realizadas de forma cadenciada por bateladas.

O processo produtivo de ração exige que o produto acabado denominado de pellet de ração e ilustrado pela figura 21, esteja com uma temperatura de no máximo 10°C acima da temperatura ambiente, para isso é necessário que o mesmo seja resfriado antes de ser armazenado nos silos de expedição .

Temp. ração (°C) = Temp. AMBIENTE (°C) + 10 °C

Figura 21- Pellet de ração.

A fábrica possui três linhas de produção, fabrica em média 2000 Ton. de ração por dia. Os equipamentos resfriadores estão localizados no primeiro piso, os quais são interligados por dutos à outros três exaustores localizados no sexto piso e que são responsáveis pela tiragem do ar quente para atmosfera .

Figura 22 - Resfriadores.

A figura 23 ilustra a instalação dos exaustores, os quais são os objetos de estudo deste trabalho:

Figura 23 - Exaustores.

Atualmente o controle da temperatura é realizado de modo manual, o operador ajusta a entrada de ar no rotor do exaustor abrindo ou fechando o dumper (válvula do tipo borboleta). Não há controle de velocidade sobre o motor, sendo que

o mesmo sempre está trabalhando a 100% de sua potência útil.

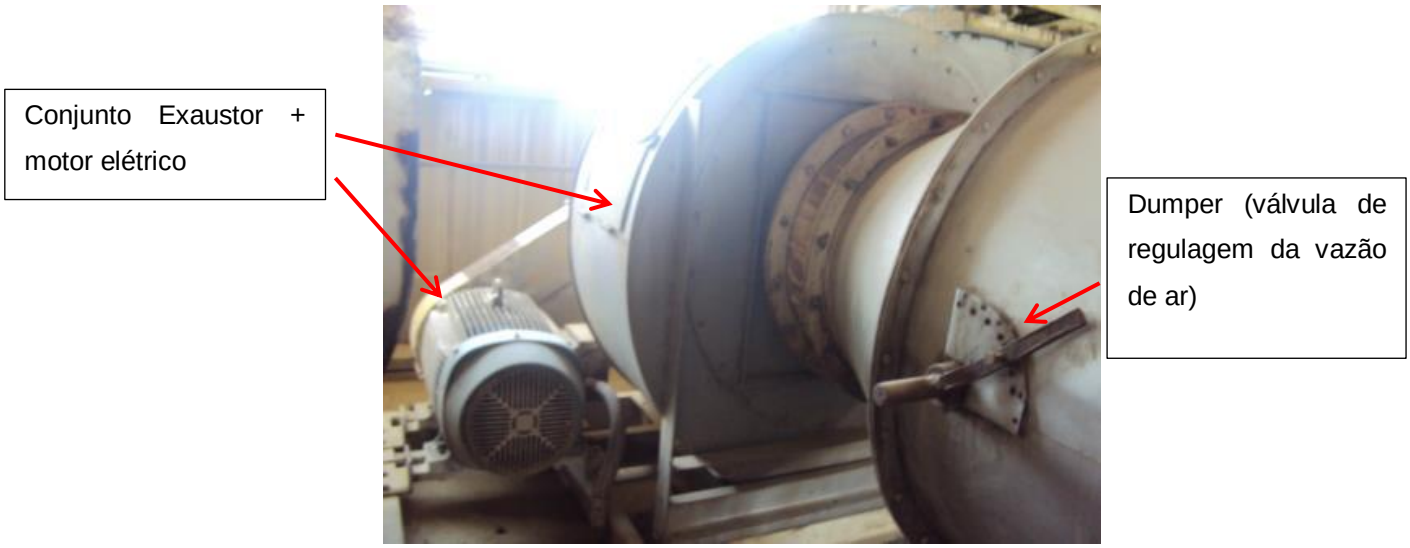

Figura 24 - Conjunto exaustor e dumper.

A temperatura é indicada por um controlador universal modelo N1100, no entanto não há ação sobre o processo, apenas leitura dos sinais dos sensores de temperaturas do tipo PT100.

Figura 25 - Indicadores de temperatura.

Para concluir a etapa de conhecimento do processo, obtiveram-se as informações técnicas apresentadas pelo fabricante dos exaustores:

Vazão : 45000 m³/h

Temperatura de trabalho : 25°C

Rotação de trabalho : 1648 rpm

Tipo : VBR – 342

Fabricante : Bernauer

Sendo que o motor elétrico utilizado para acionar os rotores apresentava as seguintes características:

Marca: Weg

Potência: 100CV

Rotação: 1750 rpm

Carcaça: 250 S/M

Frequencia nominal:60 Hz

Rendimento : 89%

Pode-se observar que os equipamentos eram constituídos por motores de baixo índice de rendimento.

Dando sequência, a identificação do problema e meta foi a próxima etapa a ser trabalhada.

A empresa possui um Programa de Conservação de Energia denominado de PROCEP, o qual tem como objetivo acompanhar o desempenho dos indicadores de consumo dos recursos energéticos por Tonelada de Produto Acabado (TPA), são mensurados o consumo de água em m^3/TPA, vapor em Ton/TPA e energia elétrica em kWh/TPA.

A meta de consumo de energia elétrica em função do volume de produção, representada pelo indicador de kWh/TPA, tem como valor máximo admissível o valor de 25,26 kWh/TPA. Conforme pode-se visualizar pela imagem abaixo, tem-se que o consumo realizado nos meses de Janeiro a Junho de 2014 estava fora da meta estipulada.

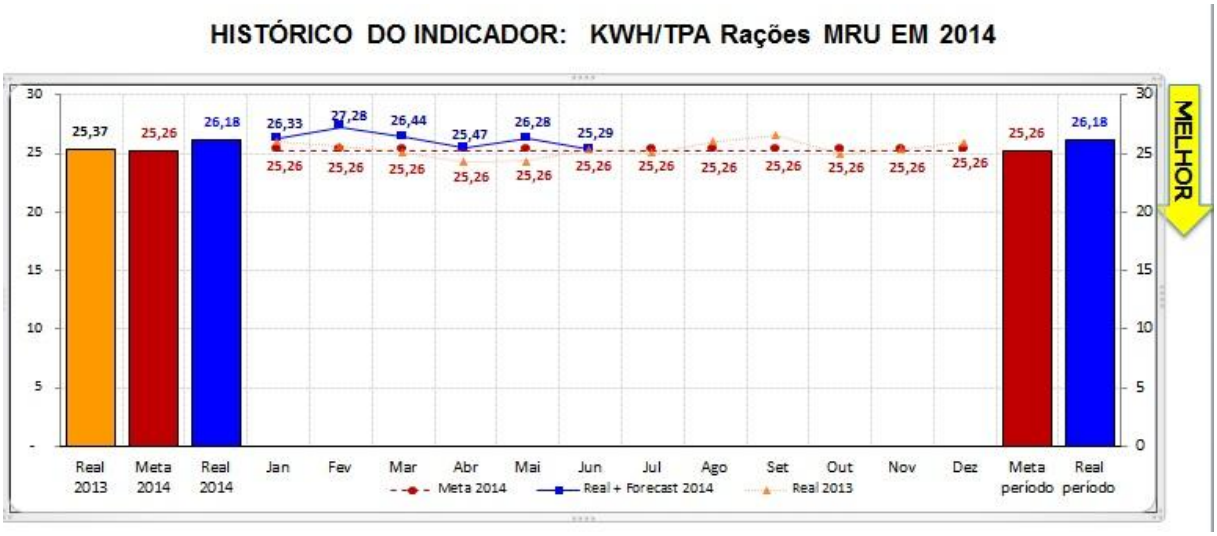

Figura 26 - Histórico do indicador kWh/TPA.
Fonte: Painel de Gestão da Empresa.

Dessa forma, a gerência da unidade buscava uma solução para o problema de desvio do indicador.

Analisando as potências dos motores que representavam o maior consumo de energia da unidade industrial, pode-se visualizar quais eram as cargas de maior representatividade, conforme mostra o gráfico abaixo:

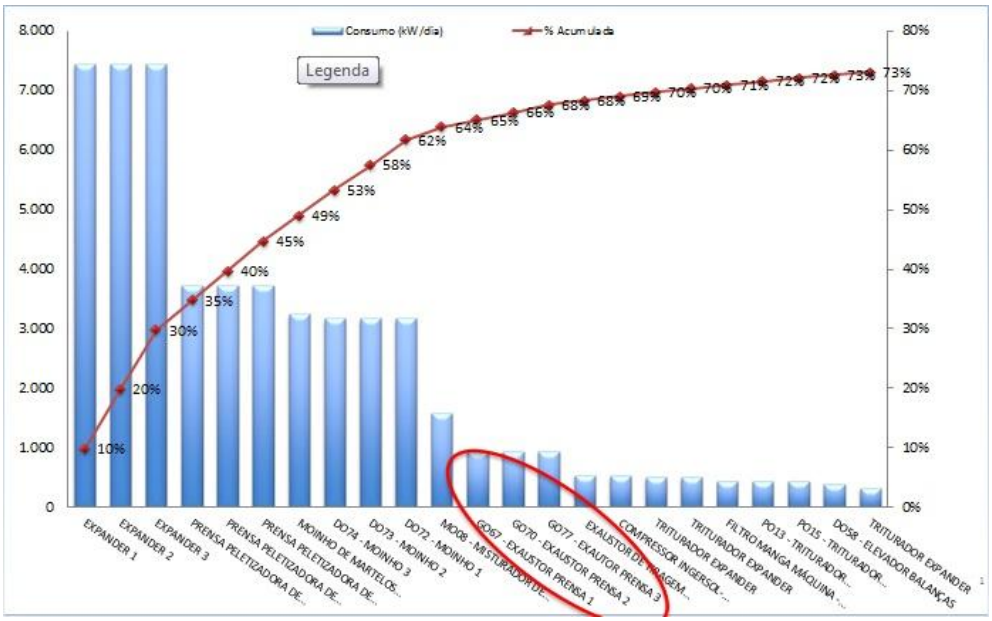

Figura 27 - Cargas que representam o maior consumo de energia elétrica na Fábrica de Rações.
Fonte: Painel de Gestão da Empresa.

Identificou-se a oportunidade de ganhos em eficiência energética com a redução do consumo de energia nos motores dos exaustores do sistema de resfriamento. Para tanto, era preciso estudar o comportamento dos motores, mensurando a potência elétrica consumida e o regime de funcionamento, bem como avaliar os dados técnicos da placa de identificação, como por exemplo, o índice de rendimento que os motores possuíam.

Durante a observação e priorização do problema, os três equipamentos exaustores foram monitorados pelo aparelho analisador de energia modelo RE6000 fabricado pela empresa Embrasul. A figura 28 mostra o gráfico da potência ativa de cada fase e a potência ativa total, totalizando 62 kW em média, o intervalo monitorado foi de 24 horas e evidenciou-se um funcionamento ininterrupto, com exceção de duas pequenas paradas para troca de formulação na ração.

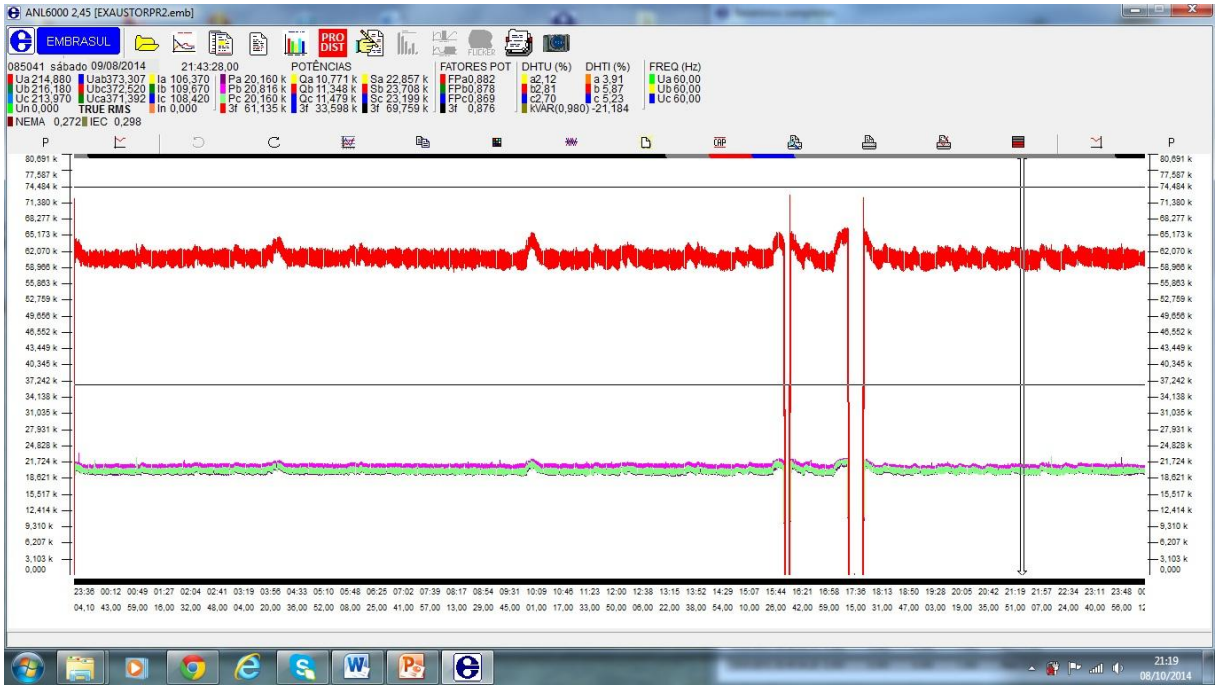

Figura 28 - Gráfico da potência ativa do motor do exaustor da linha de peletização 2.

Um dos fatores que devem ser verificados no estudo de eficiência energética de um motor elétrico é o Fator de Carregamento ou Fator de Carga. Tendo em vista que o fator de carregamento de um motor elétrico é a relação entre a potência de trabalho ou potência de operação e sua potência nominal, conforme abaixo:

$$FC = \frac{Pt}{PN}$$

Pode-se verificar que o fator de carregamento do motor analisado apresentou o seguinte valor:

$$FC = \frac{62kW}{73{,}6kW} = 84\%$$

Sabe-se que para um FC > 75% considera-se que o motor está operando em uma região com rendimento elevado (dentro de seu limite máximo especificado) e que para um FC < 75% o motor pode estar sobredimensionado, pois a relação potência de trabalho é bem inferior a potência nominal.

Outro item verificado pelo analisador de energia foi o fator de potência (cosφ), o qual apresentou o valor médio igual a 0,88, valor considerado abaixo do ideal, conforme preconiza a portaria n° 85 do DNAEE, que estabelece um cosφ = 0,92.

O cosφ é a relação entre a potência ativa(P) e a potência aparente(S), conforme equação $\cos\phi = P/S$, sendo φ o ângulo de defasagem da tensão em relação à corrente.

Na equação $P = \sqrt{3}.V.I.\cos\phi$, pode-se verificar que com o aumento do cosφ tem-se uma maior potência ativa, sendo esta a responsável pela realização de trabalho.

Um motor não consome apenas potência ativa que depois é convertida em trabalho mecânico, também consome potência reativa, necessária para magnetização, mas que não produz trabalho.

Com o fator de potência mais próximo de um, tem-se maior disponibilidade de potência ativa no sistema, já que a energia reativa indutiva limita a capacidade de transporte de energia útil.

Como sugestão de melhoria na instalação, pode-se instalar bancos de capacitores em paralelo com a carga para corrigir o cosφ das máquinas atuais.

A placa de identificação dos motores informava que o índice de rendimento era de η=89%, fator considerado muito baixo se comparado aos motores de super-rendimento utilizados atualmente, com η= 96,5%.

Na fase de identificação e priorização das causas de nosso problema, foi utilizado uma ferramenta do programa de qualidade, onde junto com a equipe de manutenção foi elaborado o Diagrama de Causa e Efeito .

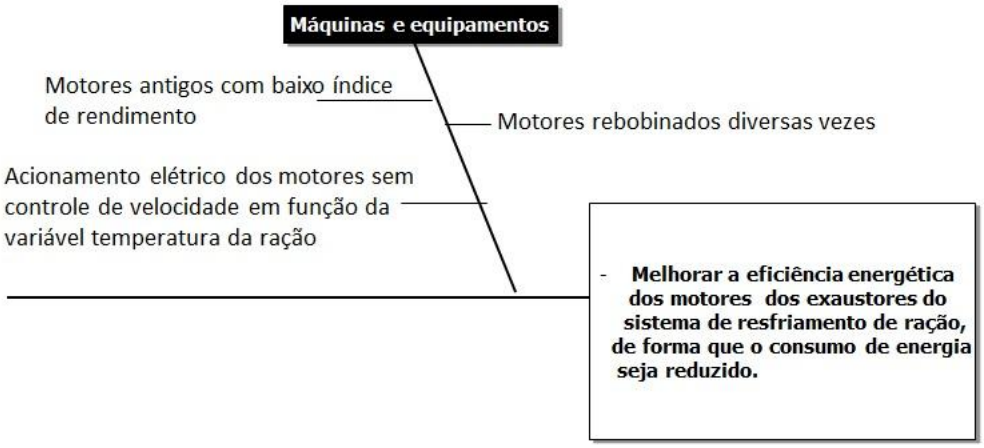

Figura 29 - Diagrama de causa e efeito.
Fonte: Comitê Operacional da Empresa.

Seguindo a fase de identificação da solução, descreveram-se as ações propostas para tornar o sistema de resfriamento de ração mais eficiente:

- Substituição dos motores de indução dos exaustores por motores do tipo Síncronos de Ímas Permanentes, modelo WMagnet Brushless AC, potência 100CV, 6 pólos, rotação 1800rpm, carcaça 225S/M, rendimento η=96,5%, da fabricante WEG. Estes motores possuem alto rendimento, conforme visto no referencial teórico. Poderia ser sugerido que o novo motor a ser instalado tivesse uma potência menor, como por exemplo, 90CV, para que o fator de carga atingisse um índice ainda melhor, no entanto trabalhou-se com valor da potência comercial de fabricação do motor WMagnet, que é de 100 CV.

- Substituição das partidas Estrela-Triângulo dos motores por acionamento com Inversores de Frequência, de modo que se possa modular a velocidade em função da variação da relação tensão/frequência que o drive aplicará no motor.

A imagem abaixo ilustra o conjunto proposto para instalação composto por Inversor CFW11 e Motor WMagnet 100CV da fabricante WEG.

Figura 30 - Conjunto Inversor CFW11 com Motor WMagnet .
Fonte: Catálogo Weg.

- Automação do sistema de controle da temperatura, sendo que o controle deverá ser do tipo malha fechada com realimentação, conforme diagrama abaixo:

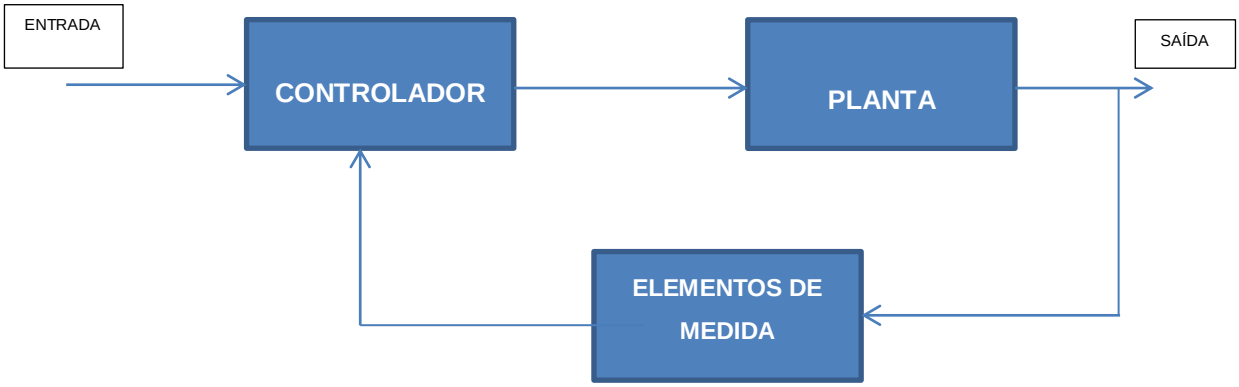

Figura 30 - Diagrama de um sistema de controle em malha fechada.
Fonte: Ogata, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno.

Os elementos de medida são representados pelos sensores de temperatura do tipo termoresistência PT100 com range de medição de -200°C a 850°C e coeficiente de temperatura α= 0,385 Ω/°C, um sensor deve ser instalado para detectar a temperatura ambiente e outro para detectar a temperatura do produto.

O controlador (CLP) irá conter a lógica do algoritmo para controlar o acionamento do inversor de frequência em função da temperatura setada no

supervisório, o programa deverá obedecer a função T max ração = T amb + 10°C , onde o drive deverá ser acionado por um sinal do tipo analógico de 4 – 20 mA oriundo de uma saída física do CLP, o inversor então passará a modular a velocidade do motor do exaustor.

A análise de viabilidade econômica é considerada um critério fundamental na tomada de decisão para aprovação de um projeto. Este trabalho utilizou o método do Tempo de Retorno ou Payback para apresentar o cálculo do retorno do investimento proposto, conforme equação:

$$\mathrm{PB} = \mathrm{I}/\mathrm{A}$$

Onde,

PB = Payback em anos

I = Valor do investimento

A = Somatório dos ganhos obtidos

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os cálculos comparativos de consumo de energia elétrica, entre os motores instalados atualmente na planta industrial e a simulação da substituição destes por motores de alto rendimento.

Sabe-se que o rendimento de um motor é a relação entre a potência mecânica disponível no eixo (Pu) e a potência absorvida da rede, conforme equação abaixo:

$$\eta = \frac{\mathrm{Pu}}{\mathrm{Pa}}$$

onde:

Pu = Potência Mecânica disponível no eixo em W;

Pa = Potência Absorvida da rede em W;

η = rendimento do motor em %;

Considerando que cada motor opera 24 horas por dia, 312 dias por ano, tem-se para a instalação atual, a qual utiliza motores de indução com rendimento de 89%

e potência de 100 CV, os seguintes resultados:

$$\text{Tempo de funcionamento} = 24 \text{ horas por dia x } 312 \text{ dias por ano} = 7488 \text{ h/ano}$$

$$\text{Pu} = 100 \text{ CV} \,.\, 0{,}736 \text{ kW} = 73{,}6 \text{ kW}$$

$$\text{Pa} = \frac{73{,}6 \text{ kW}}{0{,}89} = 82{,}69 \text{ kW}$$

$$\text{Energia consumida} = \text{Pa} \,.\, \text{t} = 82{,}69 \text{ kW} \,.\, 7488 \text{ h} = 619.182{,}72 \text{ kWh/ano}$$

Considerando o valor do kWh igual a R$ 0,20 kWh, tem-se um gasto de R$ 123.836,54 para cada motor ao ano.

Agora, analisando os resultados com a nova aplicação, considerando o mesmo tempo de operação de 7488h/ano, motor do tipo WMagnet com rendimento de 96,5% e potência de 100 CV, tem-se:

$$\text{Pa} = \frac{73{,}6 \text{ kW}}{0{,}965} = 76{,}27 \text{ kW}$$

$$\text{Energia consumida} = \text{Pa} \,.\, \text{t} = 76{,}27 \text{ kW} \,.\, 7488 \text{ h} = 571.109{,}76 \text{ kWh/ano}$$

Multiplicando o custo do kWh pela energia consumida obtém-se um gasto de R$ 114.221,95 para cada motor ao ano.

O resultado da economia é de R$ 9.614,59/ano, como a instalação é composta por três motores tem-se que o valor final será de R$ 28.843,77/ano. Em termos de consumo de energia, tem-se 48.072kWh/ano de economia para cada motor, multiplicando este valor por três o valor final obtido será de 144.218 kWh.

Considerando-se o volume médio de produção mensal de 52.000 Ton de ração e o atual consumo médio geral de energia elétrica da fábrica de 1.226.000 kWh/mês, subtraindo-se o montante de energia a ser economizada de 12.018,16 kWh/mês, tem-se que o consumo mensal previsto será de 1.213.981,9 kWh/mês. Logo, dividindo-se o consumo de energia pelo volume de produção teremos um indicador de 23,34 kWh/TPA, o que atenderá a meta proposta inicialmente de 25,26 kWh/TPA.

Para o cálculo do retorno de investimento, tem-se que o custo do investimento será de R$ 20.000,00 por conjunto, sendo que os ganhos representam R$ 9.614,59 ao ano.

Logo,

$$\text{PB} = \text{R\$ } 20.000{,}00 \ / \ \text{R\$ } 9.614{,}59$$

$$\text{PB} = 2{,}08 \text{ anos}$$

Os cálculos também podem ser obtidos através de um software simulador disponível no site do fabricante dos motores, a empresa WEG. Para se obter o resultado, é preciso inserir os dados do motor, como potência , tensão e rendimento, considerando que cada motor opera em média 24 horas por dia, 312 dias por ano, e que o custo do kWh é de R$ 0,20 , inseriu-se os dados no software conforme ilustra a figura abaixo :

Figura 31 - Cálculo do consumo de energia.
Fonte: Simulador online Weg.

Considerando o rendimento do motor atual de 89%, o rendimento do motor WMagnet de 96,5% e o valor do investimento de aquisição do WMagnet Drive System (conjunto motor com inversor) de R$ 20.000,00 , tem-se o cálculo do Retorno do Investimento, com o valor da economia no consumo de energia em 49.042,32 kWh/ano , no valor da fatura de R$ 9.808,46 /ano e o payback de 2,04 anos conforme apresentado na figura 32 :

ecatalog.weg.net/tec_cat/retornoinvestmotor_web.asp

Cálculo do Retorno do Investimento

Nesta parte é possível simular três condições:

- **Nova instalação** - o sistema mostrará o tempo para o retorno do investimento considerando a diferença entre os preços de aquisição.
- **Reposição de um motor em operação** - o sistema mostrará o tempo para o retorno do investimento de 100% do preço de aquisição do motor novo.
- **Reposição de um motor queimado** - o sistema mostrará o tempo para o retorno do investimento entre o motor novo e o custo do rebobinamento. Motores rebobinados podem apresentar uma queda no rendimento de até 2 pontos percentuais.

Observação: Se você tem acesso a programas governamentais de incentivo à compra de motores de maior rendimento, favor considerá-los ao entrar com os custos de aquisição.

Estado do motor: Reposição de um motor em operação

	Motor existente / de menor rendimento	WMagnet Drive System
Rendimento (%)	89	96,5
Custo aquisição ($)	-	20000

Retorno do Investimento

Análise do Retorno do Investimento

Economia (kWh/ano)	49.042,32	Economia ($/ano)	$ 9.808,46
Investimento Total ($)	$ 20.000,00	Tempo do Retorno do Investimento (anos)	2,04 ano(s)

Figura 32 - Cálculo do retorno de investimento.
Fonte: Simulador online Weg.

Sobre o aspecto ambiental, ter-se-á uma redução de 24.713,33 kg/ano na emissão de CO2, conforme apresentado na figura 33. Segundo dados divulgados pelo BEN sabe-se que o total de emissões antrópicas (resultantes da ação do ser humano) associadas à matriz energética brasileira atingiu 429 milhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO2-eq).

ecatalog.weg.net/tec_cat/retornoinvestmotor_web.asp

Análise do Retorno do Investimento

Economia (kWh/ano)	49.042,32	Economia ($/ano)	$ 9.808,46
Investimento Total ($)	$ 20.000,00	Tempo do Retorno do Investimento (anos)	2,04 ano(s)

Aumentando a Consciência para Eficiência Energética

Ainda não convencido a usar soluções mais eficientes?

O custo de aquisição comparado ao custo da energia em 1 ano é de	17,18 %
O custo de aquisição comparado ao custo da energia durante a vida útil (*) do motor é de	0,86 %
Em quanto tempo o motor consumirá em energia o custo da sua aquisição?	53,61 dias

(*) Vida útil estimada em 20 anos.

Ao usar soluções mais eficientes você também ajuda na conservação ambiental através da redução das emissões de CO2, conforme mostrado abaixo:

Redução de **24.717,33** CO2 (kg/ano)

Figura 33 - Análise do retorno do investimento.
Fonte: Simulador online Weg.

6 CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido na indústria citada no decorrer deste artigo, identificou a oportunidade de melhoria no processo produtivo de modo que seja reduzido o consumo de energia elétrica nos equipamentos exaustores do sistema de resfriamento de ração. Por ser um trabalho teórico que visou identificar e propor uma solução técnica que levasse em consideração a eficiência energética do sistema, os resultados foram decorrentes de análises feitas através de cálculos comparativos entre os motores instalados atualmente na planta com os de alto rendimento sugeridos para aplicação, em função do consumo em kWh e do rendimento.

Dentre as vantagens a serem consideradas em função do uso dos motores WMagnet, destacam-se:

- diminuição no volume da carcaça do motor;
- diminuição do ruído gerado pelo ventilador acoplado a carcaça;
- aumento na confiabilidade do equipamento;
- maior precisão no controle de temperatura do processo;

Conforme os cálculos apresentados, a substituição dos motores de indução por motores síncronos de ímãs permanentes atenderá a meta proposta do consumo de energia por volume de produto de acabado.

Não foi possível mensurar os benefícios que seriam obtidos com a instalação dos inversores de frequência, visto que os equipamentos não estavam dispostos para utilização, no entanto, sabe-se que nas situações em que ocorrer a troca de formulação de ração, limpeza de linha ou redução do volume de produção, a velocidade dos motores poderá ser reduzida através da variação da frequência e da tensão aplicada à carga, o que consequentemente reduzirá a potência consumida.

7 REFERÊNCIAS

MAMEDE F; João. Instalações elétricas industriais. Ed. 8ª. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

OGATA, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. Rio de Janeiro: Prentice/Hall do Brasil,1982.

SIMULADOR ONLINE WEG. Análise de retorno de investimento. Disponível em: http://ecatalog.weg.net/tec_cat/retornoinvestmotor_web.asp. Acesso em:19 set. 2014.

WEG, catálogo. Motores elétricos - Guia de especificação. Disponível em: http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf. Acesso em 15 set. 2014.

WEG, Artigo Técnico. Motor de Ímãs Permanentes e Inversor de Freqüência WEG - Departamento de P&D do Produto – Motores – WEG Equipamentos Elétricos S.A. Disponível em: http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motor-de-imas-permanentes-e-inversor-de-frequencia-artigo-tecnico-portugues-br.pdf. Acesso em: 20 set. 2014.

WEG, Guia técnico. Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM, 2009. Disponível em: http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-027-artigo-tecnico-portugues-br.pdf. Acesso em: 22 set. 2014.