

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM UMA INDÚSTRIA COM ÊNFASE EM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Leonardo Luiz Dos Santos Mergulhao

Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNISOCIESC

leonardomergulhao17@gmail.com

Vinícius da Conceição

Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário UNISOCIESC

vc.vini@hotmail.com

Carlos Roberto da Silva Filho

Mestre, Centro Universitário UNISOCIESC

carlos.silva@unisociesc.com

Solange Alves C. Andrade

Mestra, Centro Universitário UNISOCIESC

solange@unisociesc.com.br

RESUMO

O trabalho desenvolvido tem como objetivo apresentar um estudo de eficiência energética, tendo ênfase na aplicação de um inversor de frequência para o acionamento dos motores elétricos das injetoras dos artefatos de borracha do setor de uma indústria. Desse modo, a análise abrange o consumo de energia elétrica a partir da utilização de motores elétricos trifásicos. Visando a redução no consumo de energia no setor, foi elaborado um estudo que define uma solução diretamente aplicada na economia de energia elétrica no ciclo de trabalho das injetoras. A aplicação do inversor de frequência proporciona a variação de velocidade do motor para que durante o período em que a máquina não esteja injetando material, ou seja, durante o período de vulcanização da borracha, o motor elétrico reduza sua velocidade a 1/3 da nominal a qual é necessária para lubrificar a máquina. Considerando os custos de aquisição do sistema de acionamento por inversor de frequência, e a economia de energia em um dado período, estabelece o tempo de *payback* e a viabilidade do projeto.

Palavras-chave: Eficiência energética. Consumo. Inversor de frequência. Velocidade.

ABSTRACT

The work developed with the objective of presenting an energy efficiency study, with the application of a frequency inverter for driving electric motors of rubber artifact injectors in the sector of an industry. Thus, an analysis covers the consumption of electric energy from the use of three-phase electric motors. Aiming at a reduction in energy consumption in the sector, a study was elaborated that defines a solution applied in the saving of electric energy in the work cycle of the injection molding machines. The application of the frequency inverter provides a variation of the motor speed during the period when the machine is not injecting material, that is, during the period of circulation of oil for lubrication, or the electric motor reduces its speed by 1/3 of the rating is required to lubricate a machine. The acquisition costs of the drive system by frequency inverter and the energy savings in a determined period, define the return on investment and the feasibility of the project.

Keywords: Energy efficiency. Consumption. Frequency inverter. Velocity.

1 INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo às fontes de energia tem se tornado cada vez mais escassas devido ao aumento das demandas por energia, que cresce a cada ano, diante deste cenário se tornou necessário obter o maior aproveitamento do consumo de energia para que assim possa a vir ter uma redução no desperdício da energia já produzida. Com base no relatório do Balanço Energético Nacional de 2019 (BEN 2019) atualmente o maior consumo de energia elétrica no Brasil está relacionado ao setor industrial onde consomem cerca de 37,5% de toda energia produzida no país, nas empresas o maior consumo está concentrado nos motores elétricos já que os mesmos são indispensáveis para as indústrias. Os motores correspondem a uma estimativa de 70% da energia consumida na indústria. (BEN, 2019)

O uso da energia elétrica pelos consumidores vem se tornando um insumo valioso não só para o setor industrial, como também para o setor residencial e comercial, diante a essa situação tornou-se a necessidade de aplicar projetos de eficiência energética principalmente nas indústrias já que as mesmas são as maiores consumidoras. Saber o comportamento e a forma de consumo de energia na indústria traz uma importância para que os consumidores saibam como reduzir o seu consumo, fazendo com que se tornem mais interessados em melhorar o rendimento energético nas suas instalações elétricas. (BEN, 2019)

Para aplicação de um projeto de eficiência energética é necessário trabalhar a fundo as informações e características de cada empresa/indústria estudada. Porém, o ponto fundamental em qualquer que seja a aplicação é a etapa de viabilidade econômica. Embora o cenário acadêmico e profissional seja muito rico em conhecimentos referentes à importância de se preservar o meio ambiente e encontrar formas de economizar energia, reduzir consumo de água, poluir menos, ainda sim o ponto crucial na realização de um projeto desse porte é o custo que ele terá ou o ganho que proporcionará. Mensurar esses índices é um grande desafio e exige conhecimento técnico e prático para evitar erros.

No decorrer deste trabalho será apresentada a aplicação da eficiência energética em motores elétricos de indução utilizados na empresa, evidenciando os meios necessários para que o projeto seja viabilizado demonstrando o que deve ser medido, como deve ser interpretado e quais os resultados que podem ser obtidos. O projeto apresenta também os estudos de viabilidade econômica e eficiência energética, implementando inversores de frequência em suas instalações que possui motores de indução trifásicos, com o intuito de controlar a velocidade dos mesmos trazendo para o consumidor uma redução no consumo de energia tornando sua instalação mais eficiente, além da redução na fatura de energia.

A metodologia do trabalho consiste em analisar o consumo de energia elétrica de todas as injetoras dos artefatos de borracha do setor. Ao todo foram analisadas 16 injetoras, sendo que 13 máquinas possui um motor de 20 CV e 3 máquinas que trabalham com motor de 30 CV. As injetoras de borracha funcionam com um alimentador de borracha pré-aquecida em tiras onde as mesmas entram na máquina até chegarem aos bicos injetores, uma vez o molde travado há uma comutação de válvula que tem finalidade de liberar a entrada de pressão produzida pelo motor elétrico, gerando uma força para que a borracha entre no molde, os moldes podem ser para produtos como *O'ring*, *V'ring*, retentores e etc. Após a borracha preencher o molde por completo, haverá o processo de cozimento, que dependendo do material que se está fabricando poderá demorar até 400 segundos, essa etapa a qual é chamada de vulcanização.

O processo de análise para viabilizar as ações de eficiência energética consiste na obtenção do processo de trabalho das injetoras e dos dados do motor a ser estudado. Faz-se necessário ter conhecimento de parâmetros fundamentais, tais como tensão de operação, corrente nominal do motor, fator de potência, rendimento e tarifa de energia elétrica. A partir dos dados da placa do

motor elétrico da máquina, e também das informações de quantas horas diárias e quantos dias por ano o motor exerce seu trabalho, se torna possível calcular a demanda do mesmo além do seu consumo de energia anual. O próximo passo é avaliar a aplicação do inversor de frequência para variar a velocidade de rotação do motor elétrico de acordo com as especificações técnicas do mesmo, onde que para essa aplicação decidiu-se através dos levantamentos técnicos das injetoras e dos motores utilizarem inversores da linha CFW500 de 39 A e 49 A. Todos os detalhes do levantamento de dados até a aplicação dos inversores serão demonstrados ao longo do atual trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

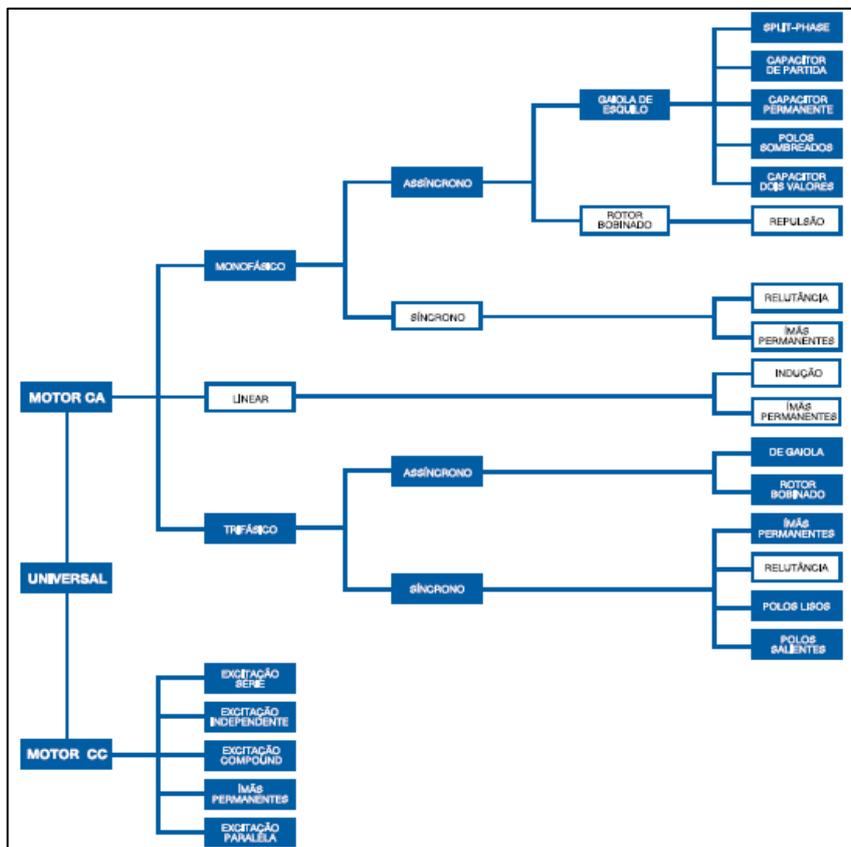
2.1 MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico destina-se a transformar energia elétrica em energia mecânica. O princípio de funcionamento de qualquer motor elétrico é baseado na interação entre campos magnéticos do rotor e do estator, tendo como resultante um torque, que produz a rotação do seu eixo. No caso do motor de indução, seu funcionamento é similar a de um transformador. O campo do rotor é induzido por meio do campo produzido pelo estator. (UMANS, 2014)

No momento em que o enrolamento do estator é energizado por uma tensão alternada, cria-se o campo magnético girante. Na medida em que esse campo corta os condutores do rotor, uma *f.e.m.* (força eletromotriz) é induzida, ocasionando circulação de corrente. Essa corrente também gera um campo magnético que interage com o campo do estator, produzindo um torque magnético cujo resultado é a rotação do rotor. Porém, para que haja indução e, conseqüentemente, conjugado, a velocidade do rotor deve ser diferente da velocidade do campo do estator ou rotação assíncrona, essa diferença é denominada de escorregamento. (UMANS, 2014)

Os tipos mais comuns de motores elétricos são apresentados na Figura 1.

Figura 1 – Tipos de Motores Elétricos



Fonte: WEG (2020)

2.1.1 Motores CA

Os motores CA são os mais utilizados, devido à rede de distribuição de energia elétrica ser normalmente em corrente alternada. Atualmente possui duas classes principais de máquinas CA, máquinas síncronas e máquinas de assíncronas. (CHAPMAN, 2013)

Os motores síncronos são máquinas cuja corrente de campo é obtida através de uma fonte de potência CC, o princípio de funcionamento é através da tensão alternada aplicada nos terminais do estator, excitando o campo rotórico por meio de uma fonte de corrente contínua que é diretamente obtida de uma rede CC de um conjunto retificador, e com a excitatriz diretamente acoplada no eixo do motor. A excitação do campo é produzida diretamente dos anéis coletores acoplados no eixo. As máquinas síncronas possuem o conjunto excitatriz e anéis coletores, para que haja o sincronismo entre o rotor e a velocidade síncrona do campo magnético do estator. (CHAPMAN, 2013)

Já os motores assíncronos, também denominados motor de indução são máquinas das quais a corrente de campo é fornecida por indução magnética em seus enrolamentos de campo. Sua rotação é influenciada pelo escorregamento, ou seja, sua velocidade nominal não é igual à velocidade síncrona na frequência da rede. (CHAPMAN, 2013).

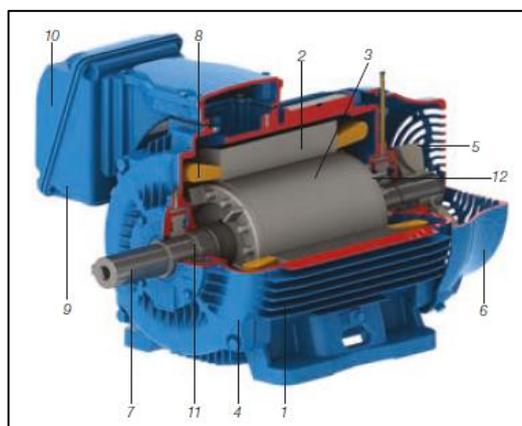
2.1.2 Motores CC

São motores que necessitam de uma fonte de corrente contínua, ou de um retificador que converta a corrente alternada em contínua. A vantagem de sua utilização é por possuir uma velocidade ajustável, mantendo-se um torque constante, com precisão para diversas aplicações. Por isso, seu uso é restrito a casos especiais em que estas exigências compensam o custo muito mais alto da instalação e da manutenção. (WEG, 2020)

2.1.3 Características do motor elétrico

O motor de indução é o mais utilizado em processos industriais e o mesmo é composto por duas partes principais, as quais são o estator e rotor. Sua forma construtiva está detalhada na Figura 2. (WEG, 2020)

Figura 2 – Características construtivas do motor elétrico



Fonte: WEG (2020)

O estator é composto: Carcaça (1): É normalmente construída em ferro fundido, aço ou alumínio e apresenta grande resistência a corrosão; Núcleo de chapas (3): As chapas são de aço magnético; Enrolamento trifásico (8): Três conjuntos iguais de bobinas sendo uma para cada fase, formando assim um sistema trifásico equilibrado ligado a rede trifásica de alimentação.

O rotor é composto por Núcleos de chapas (2): As chapas possuem as mesmas características das chapas do estator; Eixo (7): Transmite a potência mecânica desenvolvida pelo motor; Barras e anéis de curto circuito (12): São de alumínio injetado sob pressão em uma única peça.

Outras partes constituintes do motor de indução: Tampa frontal do estator (4); Ventilador (5); Tampa defletora (6); Caixa de ligação (9); Terminais de alimentação do motor (10); Rolamentos (11).

2.1.3.1 Perdas no motor elétrico

A potência absorvida da rede pelo motor elétrico não se converte totalmente em potência útil disponível no eixo. Isso ocorre devido a possuir perdas de características diferentes, desse modo, o rendimento da máquina nunca é de 100%. Essas perdas ocorrem no cobre, no núcleo e perdas mecânicas devido ao atrito. (CHAPMAN, 2013).

2.1.3.2 Conjugado do motor elétrico

O conjugado do motor, ou torque, se define como sendo o esforço que a máquina necessita para rotacionar o eixo, ou seja, sair do seu momento de inércia. No momento em que o motor elétrico aciona uma carga, e conforme o aumento da mesma, a rotação do motor diminui até o torque atingir um valor máximo. Se o torque de carga sofre um aumento, o motor terá que realizar um torque maior que seu conjugado máximo, a rotação do motor decairá, e há possibilidade de travamento do rotor. (FRANCHI, 2014)

2.1.3.3 Escorregamento

No motor assíncrono o rotor possui velocidade diferente da velocidade síncrona do campo magnético girante produzido no estator. Desse modo, o rotor corta as linhas de força magnética do campo e conseqüentemente circulam correntes induzidas no mesmo. Na medida em que a carga aplicada no eixo for aumentando, maior será o conjugado de partida necessário para acionar a mesma. (FRANCHI, 2014)

Para que se possa obter o conjugado, a diferença de velocidade entre o campo magnético girante e o rotor terá que ser maior para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores. Devido a isso, com o aumento da carga no eixo a rotação do motor diminui. Essa diferença entre a velocidade do motor e a velocidade síncrona, é denominada como escorregamento a qual pode ser expressa em rpm ou em porcentagem. (FRANCHI, 2014)

2.1.3.4 Rendimento

O rendimento é a eficiência na qual é realizada a conversão da energia consumida da rede elétrica em energia mecânica no eixo do motor. Desse modo, a potência fornecida da rede não é completamente convertida em potência mecânica, ou seja, motor elétrico não atinge os 100% de rendimento. Isso ocorre devido às perdas no enrolamento, núcleo e por atrito. Quanto maior o rendimento do motor elétrico, mais potência útil o mesmo consegue converter no eixo. E quanto menor o rendimento, maiores são as perdas e conseqüentemente, haverá potência desperdiçada. (WEG, 2020)

2.1.3.5 Fator de potência

O fator de potência é definido por $\cos \Phi$ que expressa a relação entre a potência ativa (P) e potência aparente (S), onde Φ é o ângulo que representa a defasagem da tensão em relação a corrente. O motor elétrico não consome apenas potência aparente (VA) a qual posteriormente é transformada em trabalho, mas também potência reativa (Var) que não é transformada em trabalho, porém é necessária para a magnetização do motor, ou seja, para assegurar a existência de campos magnéticos. O fator de potência mínimo para as cargas atualmente é de 0,92 para que possa haver um maior índice de potência ativa disponível na rede, isso porque se deve ao fato de que a potência

reativa reduz o fator de potência, desse modo, o motor necessitaria de um consumo maior de potência aparente vindo a sobrecarregar o sistema elétrico (WEG, 2020).

2.2 INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Os inversores de frequência proporciona ao motor de indução trifásico a variação de rotação do mesmo. O conversor de frequência como também é chamado tem como finalidade de realizar conversão CA/CC e posteriormente em CA novamente, ou seja, receber na entrada a tensão elétrica com frequência e amplitude constante da rede, e converter para tensão com amplitude e frequência variáveis na saída. Devido à capacidade de variação da frequência fornecida pela rede, propicia um controle eficaz na potência demandada pela carga. Com a variação da frequência, a velocidade síncrona também varia, conseqüentemente variando a velocidade de rotação do motor (WEG, 2020).

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os sucessivos problemas econômicos os quais aconteceram a partir da crise do petróleo nos anos 70, época em que foi um marco mundial para que os paradigmas voltados a ações que viabilizassem o desenvolvimento do país diante do crescimento da demanda energética. Foi quando se verificou que os serviços e a sociedade necessitariam tomar uma providência em questão ao uso consciente da energia elétrica, e assim obter um menor desperdício no consumo de energia. Dessem modo, alcançar o menor custo de energia possível e conseqüentemente atingir menores impactos ambientais, econômicos, sociais e culturais. (MAMEDE, 2010)

Diante a esse problema, o governo tornou-se conhecimento da necessidade da criação de programas com a finalidade de alcançar objetivos de promover o uso consciente da energia elétrica, com intuito de ter o menor desperdício de energia elétrica possível. Através dos fatos, o Ministério de Minas e Energia (MME) e junto com a Indústria e Comércio em 1985, instituiu-se o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, o PROCEL. (MAMEDE, 2010)

Esse programa tem como finalidade combater o desperdício de energia, as ações do PROCEL contribuem para o desenvolvimento de hábitos e conhecimentos em relação ao consumo

eficiente da energia elétrica. Além de postergar os investimentos no setor elétrico, evitando os impactos ambientais e colaborando para um país mais sustentável (PROCEL, 2019).

Apesar de existir muitos programas os quais apoiam e incentivam o aumento da eficiência energética no país, não se tem uma política governamental mais efetiva e abrangente a qual incentive as indústrias a investirem no uso racional e na conservação de energia elétrica, tal investimento que passaria pela substituição de equipamentos ineficientes para equipamentos novos e mais eficientes. (Mariotoni e Naturesa, 2007)

3 DESENVOLVIMENTO

Nesta parte do trabalho, será feita a análise do desempenho e consumo dos motores elétricos das máquinas injetoras, identificando os pontos de maior consumo de energia na empresa, e realizar a comparação com a análise de operação do motor com acionamento via inversor de frequência.

3.1 LEVANTAMENTO DE DADOS DOS MAQUINÁRIOS

Para realizar o projeto de eficiência energética no setor, faz-se necessário realizar o levantamento de dados de todas as máquinas injetoras dos artefatos de borracha do setor, assim como os dados técnicos do motor elétrico. Ao todo foram analisadas 16 injetoras, sendo que 13 máquinas possui um motor elétrico de 20 cv e 3 máquinas com motor de 30 cv, onde a potência instalada do setor é de 261 kW.

3.1.1 Dados das injetoras

As injetoras com motores de 20 CV possuem uma força no fechamento do molde de 2200 kN, a Figura 5 mostra os detalhes técnicos da máquina.

Figura 5 – Dados das injetoras I12 à I24



Fonte: Os autores (2020)

Modelo da máquina YL-V220L; Força da prensa = 2200 kN; Volume de injeção = 3000 cm³; Data de fabricação = 10/2013; Potência total = 25 kW; Peso = 6500 kg.

A Figura 6 mostra os detalhes técnicos das injetoras com motores de 30 CV, onde a mesma possui uma força no fechamento do molde de 3300 kN.

Figura 6 – Dados das injetoras I25 à I27



Fonte: Os autores (2020)

Modelo da máquina YL-V220L; Força da prensa = 3300 kN; Volume de injeção = 2000 cm³; Data de fabricação = 04/2013; Potência total = 45 kW Peso = 7000 kg.

3.1.2 Motor Elétrico W22 IR2 20 CV

As injetoras nomeadas I12 até I24, trabalham com motor de 20 CV modelo W22 IR2 trifásico como ilustra a Figura 7.

Figura 7– Motor W22 IR2 de 20 CV



Fonte: Os autores (2020)

3.1.3 Motor Elétrico W22 IR2 30 CV

As injetoras I25 até I27 trabalham com motor de 30 CV cada máquina, onde o modelo utilizado também é o W22 IR2 trifásico, porém com uma potência maior do que os motores das outras injetoras como ilustra a Figura 8.

Figura 8 – Motor W22 IR2 de 30 CV



Fonte: Os autores (2020)

3.2 CÁLCULOS DE DEMANDA DOS MOTORES

Após ter concluído o levantamento dos dados dos motores elétricos, se faz necessário realizar os cálculos de demanda dos motores a partir de quantas horas diárias e quantos dias por ano o motor exerce seu trabalho, com esses dados se torna possível calcular a demanda do motor e do seu consumo de energia anual. O motor opera durante 24 horas diárias, sendo 22 dias por mês no período de 12 meses, custo médio da tarifa neste período é de R\$ 0,40 kWh. A partir desses dados calcula-se a demanda de energia.

3.2.1 Cálculo de demanda do motor W22 IR2 20 CV

Sabendo que o motor possui potência de 20 CV, tem como potência em kW conforme equação 1.

$$P_e = 20 \cdot 736 \quad (1)$$

$$P_e = 14,72 \text{ kW}$$

Para o motor de 20 CV com uma potência nominal de 14,72 kW, operando com 100% de carga, 24 horas por dia e 22 dias mensais no período de um ano e com rendimento de 85%. A partir desses dados, se torna possível determinara o consumo anual do motor conforme equação 2:

$$Co = \frac{14,72 \cdot 24 \cdot 22 \cdot 12}{0,85} \quad (2)$$

$$Co = 109.724,61 \text{ kWh}$$

Nesse período, fica determinado o valor do consumo de energia do motor de 20 cv com acionamento de partida direta, o qual corresponde a 109.724,61 kWh. O custo do consumo total no período anual é demonstrado na equação 3:

$$Ct = 109.724,61 \cdot 0,40 \quad (3)$$

$$Ct = \text{R\$ } 41.489,54$$

Considerando as 13 injetoras as quais trabalham com motor de 20 cv cada máquina, tem-se o valor total da demanda desse grupo no período anual conforme equação 4:

$$\text{Demanda total} = 109.724,61 \cdot 13 \quad (4)$$

$$\text{Demanda total} = 1.426,41 \text{ MWh}$$

Já o custo total da demanda é demonstrado na equação 5:

$$\text{Custo total} = 41.489,54 \cdot 13 \quad (5)$$

$$\text{Custo total} = \text{R\$ } 539.364,02$$

3.2.2 Cálculo de demanda do motor W22 IR2 30 CV

Conhecendo a potência do motor de 30 CV, tem-se como potência em kW conforme equação 6.

$$Pe = 30 \cdot 736 \quad (6)$$

$$Pe = 22,08 \text{ kW}$$

O cálculo para definir o consumo do motor no período de um ano, é dado conforme equação 7. Já para o motor de 30 cv com uma potência nominal de 22,08 kW, com as mesmas condições de trabalho igual ao anterior e com rendimento de 86%. A partir desses dados, se torna possível determinara o consumo anual do motor.

$$Co = \frac{22,08 \cdot 24 \cdot 22 \cdot 12}{0,86} \quad (7)$$

$$Co = 162.673,11 \text{ kWh}$$

Nesse período, fica determinado o valor do consumo de energia do motor de 30 cv com acionamento de partida direta, que corresponde a 162.673,11 kWh. O custo do consumo total no período anual é demonstrado na equação 8:

$$Ct = 162.673,11 \cdot 0,40 \quad (8)$$

$$Ct = \text{R\$ } 65.069,24$$

Já o outro grupo com 3 injetoras que trabalham com motor de 30 CV cada máquina, obtém-se o seu valor total da demanda desse grupo no período anual conforme equação 9:

$$\text{Demanda total} = 162.673,11 \cdot 3 \quad (9)$$

$$\text{Demanda total} = 488.019,35 \text{ kWh}$$

Já o custo total da demanda é demonstrado na equação 10:

$$\text{Custo total} = 65.069,24 \cdot 3 \quad (10)$$

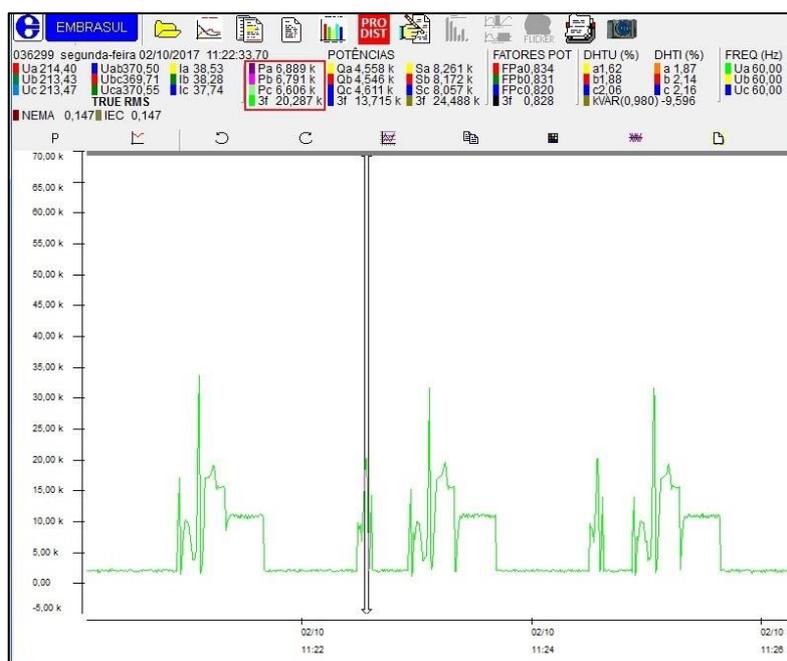
$$\text{Custo total} = \text{R\$ } 195.207,73$$

3.3 MEDIÇÕES EFETUADAS EM CAMPO

Para deixar mais claro o estudo do consumo de energia do motor e mais a frente comparar as medições realizadas nos acionamentos por partida direta e inversor de frequência com intuito de viabilizar o projeto, foi realizada as medições do consumo do motor através do analisador de energia RE6000 e repassado essas informações para o *software* RE6000, onde é mostrado o gráfico de consumo de energia. O *software* RE6000 mostra todos os valores de tensão, corrente, potência aparente, potência ativa, potência reativa, fator de potência e frequência no ponto do gráfico em que é feita a análise. O gráfico é em relação a potência x tempo.

A Figura 9 mostra os valores medidos no ponto em que ocorre o fechamento do molde.

Figura 9 – Consumo durante o fechamento do molde

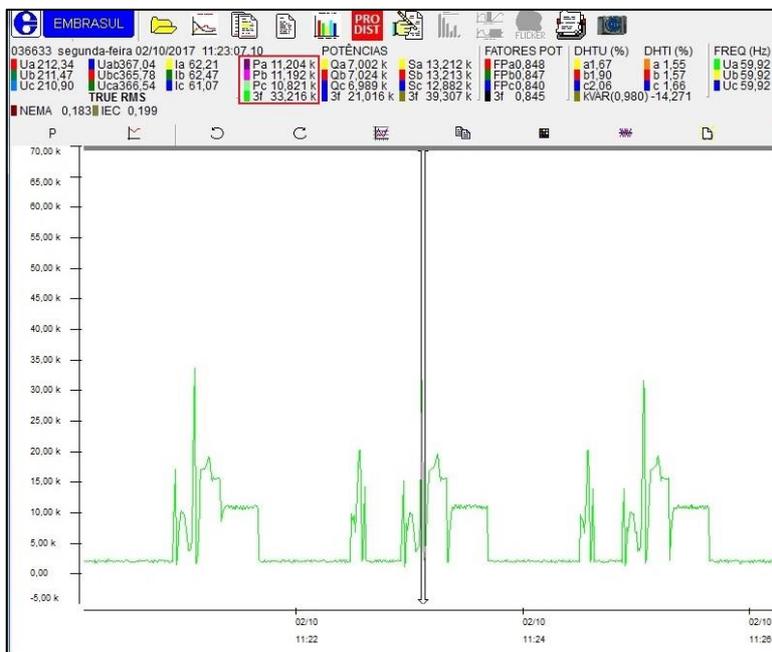


Fonte: Os autores (2020)

Esse ponto de análise mostra o consumo de energia do motor no momento do fechamento do molde. Os valores medidos no ponto podem ser visto na parte superior do *software*.

A Figura 10 mostra o ponto analisado no período em que é injetado o material no molde.

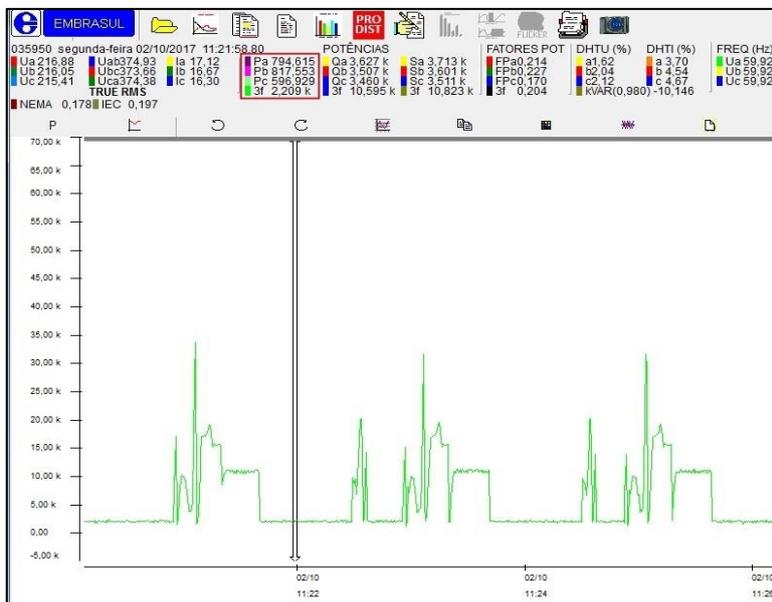
Figura 10 – Consumo de energia na injeção do material



Fonte: Os autores (2020)

O ponto analisado no período da vulcanização da borracha, o qual é o foco do estudo é ilustrado conforme Figura 11:

Figura 11 – Consumo durante a vulcanização da borracha



Fonte: Os autores (2020)

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Para a viabilização do projeto foi proposto à implementação do inversor de frequência CFW500 da WEG de 39 A para os motores de 20 CV e 49 A para os motores de 30 CV, o mesmo é ilustrado na Figura 12:

Figura 12 – Inversor de frequência CFW500



Fonte: WEG (2020)

3.4.1 Parametrização do inversor de frequência

Os parâmetros utilizados na parametrização do inversor de frequência para o correto funcionamento do motor para tal processo são detalhados conforme Tabela 7:

Tabela 7 – Parâmetros do Inversor de frequência CFW500

Parâmetro	Ajustes	Descrição
P0000	5	Acesso aos Parâmetros (senha)
P0204	5	Carrega/Salva Parâmetro
P0000	5	Acesso aos Parâmetros (senha)
P0399	85,00%	Rendimento Nom. Motor

P0400	380 V	Tensão Nom. Motor
P0401	30,2 A	Corrente Nom. Motor
P0402	1775 rpm	Rotação Nom. Motor
P0403	60 Hz	Frequência Nom. Motor
P0404	17	Potência Nom. Motor (lista de potências)
P0407	0,81	Fator de potência Nom. Motor
P0100	5 s	Tempo aceleração
P0101	5s	Tempo desaceleração
P0133	0 Hz	Velocidade Mínima
P0134	60 Hz	Velocidade Máxima
P0220	1	Seleção Fonte LOC/REM (1 = Sempre REMOTO)
P0222	8	Sel. Referência REM (8 = <i>Multispeed</i>)
P0226	1	Seleção Giro REM (1 =Entradas Digitais)
P0227	1	Seleção Giro/Pára REM (1 =Entradas Digitais)
P0263	2	Função de Entrada DI1 (2 = Habilita Geral)
P0264	1	Função de Entrada DI2 (1 = Giro/Pára)
P0265	8	Função de Entrada DI3 (8 = Sentido Giro Horário)
P0266	13	Função de Entrada DI4 (13 = <i>Multispeed</i>)
P0124	30 Hz	Ref. 1 <i>Multispeed</i>
P0125	60 Hz	Ref.2 <i>Multispeed</i>

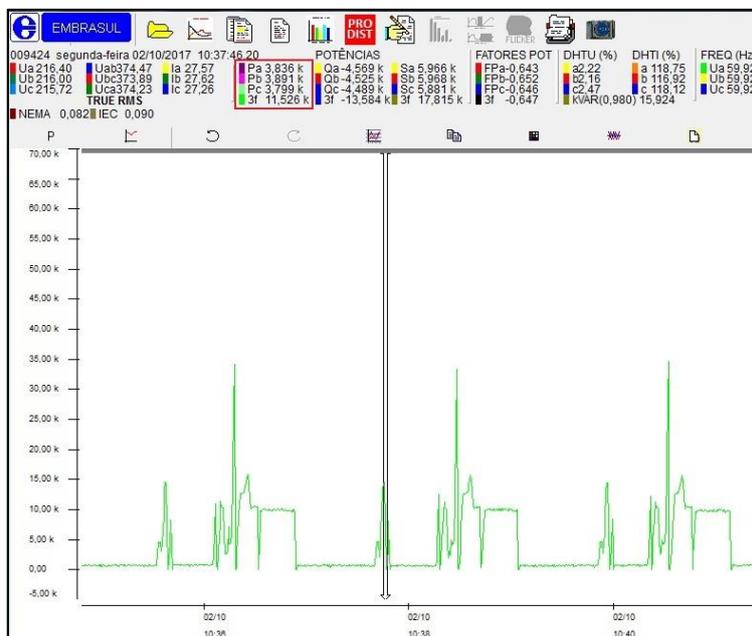
Fonte: Os autores (2020)

3.5 MEDIÇÕES REALIZADAS NO INVERSOR DE FREQUÊNCIA

Após a implementação dos inversores de frequência foi realizada as medições do consumo do motor através do analisador de energia RE6000 e repassado essas informações para o *software* RE6000, onde é mostrado o gráfico de consumo de energia. Como citado anteriormente, o *software* RE6000 mostra todos os valores de tensão, corrente, potência aparente, potência ativa, potência reativa, fator de potência e frequência no ponto do gráfico em que é feita a análise.

A Figura 13 mostra os valores medidos no ponto em que ocorre o fechamento do molde.

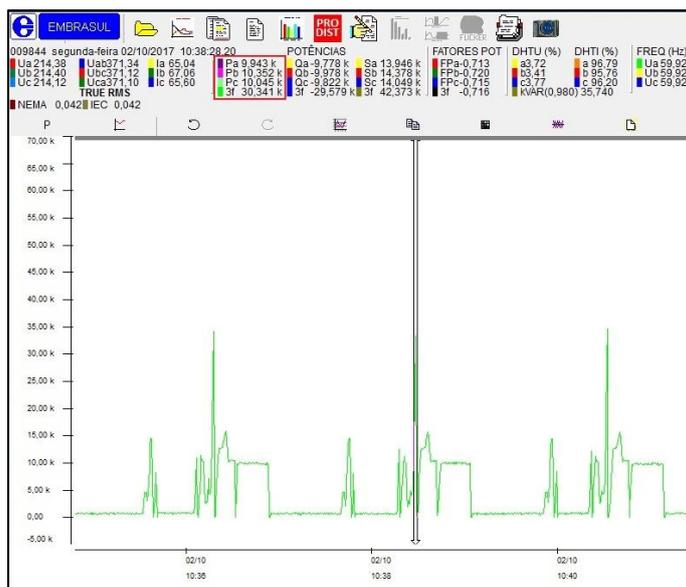
Figura 13 – Consumo durante o fechamento do molde



Fonte: Os autores (2020)

A Figura 14 mostra o ponto analisado no período em que é injetado o material no molde.

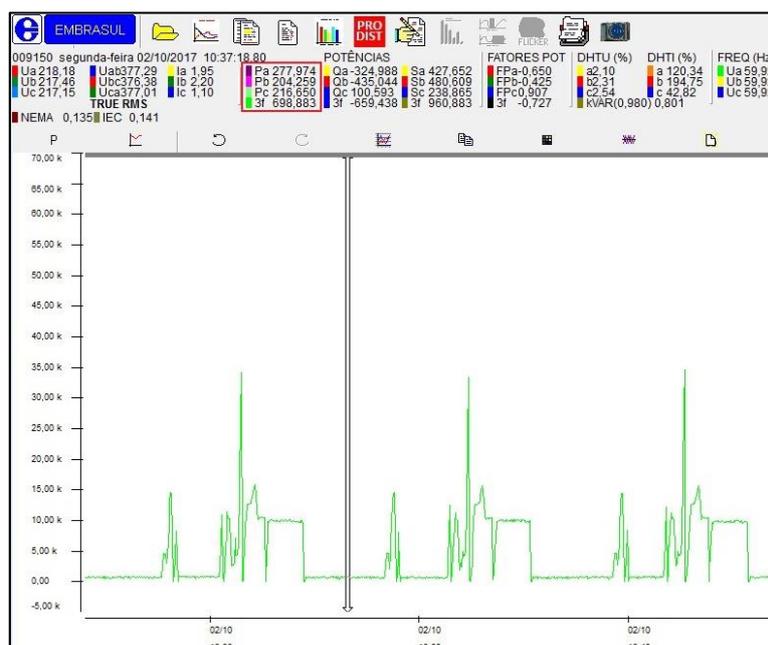
Figura 14 – Consumo de energia na injeção do material



Fonte: Os autores (2020)

O ponto analisado no período da vulcanização da borracha, o qual é o foco do estudo é ilustrado conforme Figura 15:

Figura 15 – Consumo durante a vulcanização da borracha



Fonte: Os autores (2020)

3.5.1 Cálculo de demanda e consumo dos inversores de frequência

Após a implementação dos inversores de frequência, se faz necessário realizar os cálculos de demanda e consumo de energia do mesmo para definir o custo de investimento e *payback* do projeto. Com a aplicação do inversor de frequência, o motor irá trabalhar com a frequência de 20 Hz durante a vulcanização da borracha.

3.5.1.1 Cálculo de demanda e consumo para o inversor de 39 A

O inversor de frequência de 39 A é utilizado nos motores com potência de 20 cv, os quais estão instalados em 13 injetoras. Para o motor de 20 CV o conjugado nominal está nos dados

técnicos da máquina conforme Figura 16, a qual mostra que o conjugado é 8,26 kgfm para 100 % de carga. Desse modo, a equação 11 mostra o valor da demanda do inversor de frequência de 39 A:

$$P_{inv} = \left(\frac{8,26 \cdot 1770}{974 \cdot 0,98} \cdot 1 \right) \quad (11)$$

$$P_{inv} = 15,31 \text{ kW}$$

O período de operação do motor pelo acionamento do inversor de frequência são os mesmos da partida direta, ou seja, são 24 horas, 22 dias por mês no período de 12 meses. O valor do consumo de energia elétrica é conforme a equação 12:

$$Co_{Inv} = 15,31 \cdot 24 \cdot 22 \cdot 12 \quad (12)$$

$$Co_{Inv} = 97004,12 \text{ kWh}$$

Visto que o valor do consumo de energia do motor de 20 CV com acionamento por inversor de frequência, o qual corresponde a 97004,12 kWh. O custo do consumo total no período de um ano é demonstrado na equação 13:

$$C_t = 97004,12 \cdot 0,40 \quad (13)$$

$$C_t = R\$ 38.801,64$$

Conforme o grupo com 13 injetoras as quais trabalham com motor de 20 CV cada máquina determina-se o seu valor total da demanda desse grupo no período anual conforme equação 14:

$$\text{Demanda total} = 97004,12 \cdot 13 \quad (14)$$

$$\text{Demanda total} = 1262,05 \text{ MWh}$$

Já o custo total da demanda é demonstrado na equação 15:

$$\text{Custo total} = 1262,05 \cdot 0,40 \quad (15)$$

$$\text{Custo total} = R\$ 504.820,00$$

3.5.1.2 Cálculo de demanda e consumo para o inversor de 49 A

Para as outras 3 máquinas com motores de 30 CV foi implementado o inversor de 49 A para o acionamento da máquina. O motor possui um conjugado nominal de 12,13 kgfm conforme dados técnicos do motor, a equação 16 mostra o valor da demanda do inversor de frequência.

$$P_{inv} = \left(\frac{12,13 \cdot 1765}{974 \cdot 0,98} \cdot 1 \right) \quad (16)$$

$$P_{inv} = 22,42 \text{ kW}$$

O período de operação do motor pelo acionamento com o inversor de frequência são os mesmos, desse modo, o valor do consumo de energia elétrica é conforme a equação 17.

$$Co_{Inv} = 22,42 \cdot 24 \cdot 22 \cdot 12 \quad (17)$$

$$Co_{Inv} = 142.053,12 \text{ kWh}$$

Visto que o valor do consumo de energia do motor de 30 CV com acionamento por inversor de frequência, o qual corresponde a 142.053,12 kWh. O custo do consumo total no período de um ano é demonstrado na equação 18:

$$C_t = 142.053,12 \cdot 0,40 \quad (18)$$

$$C_t = \text{R\$ } 56.821,24$$

Para o grupo de 3 injetoras com o motor de 30 CV o valor total da demanda desse grupo no período anual é conforme equação 19:

$$\text{Demanda total} = 142.053,12 \cdot 3 \quad (19)$$

$$\text{Demanda total} = 426.159,36 \text{ kWh}$$

Já o custo total da demanda é demonstrado na equação 20:

$$\text{Custo total} = 426.159,36 \cdot 0,40 \quad (20)$$

$$\text{Custo total} = \text{R\$ } 170.463,74$$

3.6 MOTOR W22 IR3

Além da implementação do inversor de frequência para o projeto de eficiência energética, pode-se optar pela substituição dos motores de baixo rendimento por máquinas de maior rendimento conforme a aplicação do processo. A substituição de motores ocorre cerca de 70% das oportunidades, ou seja, nem todo o processo do setor a ser aplicado um projeto de eficiência energética permite a implementação do inversor de frequência. Neste projeto poderia estar substituindo os motores W22 IR2 por motores W22 IR3 os quais possuem melhor rendimento.

3.6.3 Cálculo de demanda dos motores W22 IR3

O cálculo de demanda do motor de melhor rendimento se faz com o mesmo período de funcionamento que o motor de baixo rendimento, o qual operaria durante 24 horas diárias, sendo 22 dias por mês no período de 12 meses, custo médio da tarifa neste período é de R\$ 0,40 kWh. A partir desses dados calcula-se a demanda de energia.

3.6.3.1 Cálculo de demanda do motor W22 IR3 20 CV

Conhecendo a potência do motor de 20 CV, tem-se como potência em kW conforme equação 21:

$$P_e = 20 \cdot 736 \quad (21)$$

$$P_e = 14,72 \text{ kW}$$

O cálculo para definir o consumo do motor no período de um ano, é dado conforme equação 22. Já para o motor de 20 CV com uma potência nominal de 14,72 kW, com as mesmas condições de trabalho e com rendimento de 93%. A partir desses dados, se torna possível determinar o consumo anual do motor.

$$Co = \frac{14,72 \cdot 24 \cdot 22 \cdot 12}{0,93} \quad (22)$$

$$Co = 100.285,93 \text{ kWh}$$

Nesse período, fica constatado o valor do consumo de energia do motor de 20 CV W22 IR3 com acionamento de partida direta, que corresponde a 100.285,93 kWh. O custo do consumo total no período anual é demonstrado na equação 23:

$$Ct = 100.285,93 \cdot 0,40 \quad (23)$$

$$Ct = R\$ 40.114,37$$

Visto que o setor possui 13 injetoras as quais trabalham com motor de 20 cv cada máquina, calcula-se o valor total da demanda desse grupo com motor de maior rendimento no período anual conforme equação 24:

$$\text{Demanda total} = 100.285,93 \cdot 13 \quad (24)$$

$$\text{Demanda total} = 1.303,71 \text{ MWh}$$

Já o custo total da demanda é encontrado na equação 25:

$$\text{Custo total} = 1.303,71 \cdot 0,40 \quad (25)$$

$$\text{Custo total} = R\$ 521.484$$

3.6.3.2 Cálculo de demanda do motor W22 IR3 30 CV

Sabendo a potência do motor de 30 CV, tem-se como potência em kW conforme equação 26:

$$Pe = 30 \cdot 736 \quad (26)$$

$$Pe = 22,08 \text{ kW}$$

Com o valor obtido pela equação 39, calcula-se o consumo do motor de 30 CV, onde o mesmo possui as mesmas condições de trabalho e com rendimento de 93,6%. A partir desses dados, se torna possível determinar o consumo anual do motor conforme equação 27:

$$Co = \frac{22,08 \cdot 24 \cdot 22 \cdot 12}{0,936} \quad (27)$$

$$Co = 149.464,61 \text{ kWh}$$

Nesse período, fica constatado o valor do consumo de energia do motor de 30 CV W22 IR3 com acionamento de partida direta, que corresponde a 149.464,61 kWh. O custo do consumo total no período anual é demonstrado na equação 28:

$$Ct = 149.464,61 \cdot 0,40 \quad (28)$$

$$Ct = R\$ 59.785,84$$

A demanda desse grupo de 3 injetoras com motor de maior rendimento no período anual é conforme equação 29:

$$\text{Demanda total} = 149.464,61 \cdot 3 \quad (29)$$

$$\text{Demanda total} = 448.393,83 \text{ kWh}$$

Já o custo total da demanda é encontrado na equação 30:

$$\text{Custo total} = 448.393,83 \cdot 0,40 \quad (30)$$

$$\text{Custo total} = R\$ 179.357,53$$

3.6.4 Investimento do motor W22 IR3

O investimento para a substituição do motor de menor rendimento para a máquina de maior rendimento consiste na aquisição do motor W22 IR3 *Premium*. A Tabela 8 apresenta os valores de investimento da substituição dos motores.

Tabela 8 – Valores de investimento do motor W22 IR3

Motores	Preço unitário	Quantidade	Preço do conjunto
20 CV	R\$8.102,97	13	R\$105.338,61
30 CV	R\$13.056,36	3	R\$39.169,08

Fonte: Os autores (2020)

3.6.5 Cálculo do *Payback* do motor W22 IR3

O custo total de investimento para a substituição dos 16 motores do setor de injeção é de R\$ 144.507,69. Já o custo total anual do consumo de energia do setor com os motores W22 IR3 é de R\$ 700.841,53. Sabendo o custo total do consumo anual dos motores W22 IR2 instalados nas máquinas injetoras o qual é de R\$ 765.771,73. A partir desses valores calcula-se a economia anual da aplicação dos motores de melhor rendimento conforme equação 31:

$$\begin{aligned} \text{Economia} &= 765.771,73 - 700.841,53 & (31) \\ \text{Economia} &= \text{R\$ } 64.930,20 \end{aligned}$$

O tempo de retorno do investimento para a aplicação é denominado *Payback* o qual se dá em anos, o cálculo do *Payback* é realiza através do valor de investimento dos motores W22 IR3 *Premium* em relação à economia gerada pelo mesmo, conforme com a equação 32:

$$\begin{aligned} \text{Payback} &= \frac{144.507,69}{64.930,20} & (32) \\ \text{Payback} &= 2,3 \text{ anos} \end{aligned}$$

De acordo com a equação 32, o tempo de retorno é 2 ano e 3 meses.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a implementação dos inversores de frequência foi realizada as medições de consumo do motor e comparada com as medições obtidas do acionamento por partida direta, onde fica clara a redução significativa do consumo do motor elétrico.

4.1 INVESTIMENTOS

Os valores de investimento para a implementação dos inversores de frequência são dados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de investimento dos inversores de frequência

Inversores	Preço unitário	Quantidade	Preço do conjunto
39 A	R\$ 5.700,00	13	R\$ 74.100,00
49 A	R\$ 6.500,00	3	R\$ 19.500,00

Fonte: Os autores (2020)

De acordo com a tabela o valor total do investimento do projeto é de R\$ 93.600,00.

4.2 CÁLCULO DO *PAYBACK* DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA

De acordo com a tabela 9, os custos totais de investimento para a implementação dos inversores de frequência nas máquinas injetoras são de R\$ 93.600,00. Através do cálculo de custo total anual do consumo de energia do setor com os inversores sabe-se que o valor foi de R\$ 670.945,74. Sabendo o custo total do consumo anual dos motores W22 IR2 instalados nas máquinas

injetoras o qual é de R\$ 765.771,73, a partir desses valores calcula-se a economia anual da implementação dos inversores conforme equação 33:

$$\begin{aligned} \text{Economia} &= 765.771,73 - 670.945,74 & (33) \\ \text{Economia} &= \text{R\$ } 94.825,99 \end{aligned}$$

A equação 34 mostra o tempo de retorno do investimento da aplicação:

$$\text{Payback} = \frac{93.600,00}{94.825,99} \quad (34)$$

$$\text{Payback} = 0,98 \text{ anos}$$

De acordo com a equação 34, o tempo de retorno é de aproximadamente 12 meses.

4.2.1 Comparação de consumo e custo de energia do projeto

A Tabela 10 mostra-se a comparação de consumo e custo os quais foram calculados ao longo do projeto.

Tabela 10 – Comparação de custo e consumo de energia

Componentes	Consumo anual (kWh)	Custo do consumo anual (R\$)
Motores IR2 20 e 30 CV	1.914.440	765.771,73
Motores IR3 20 e 30 CV	1.752.103,83	700.841,53
Inversores de frequência	1.688.209	670.945,74

Fonte: Os autores (2020)

Pode-se notar um valor muito considerável na redução do consumo e custo de energia após a implementação dos inversores de frequência. De acordo com os valores obtidos, nota-se que a

utilização do inversor de frequência para o projeto é muito viável trazendo um retorno financeiro do investimento em aproximadamente 12 meses.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As indústrias deveriam dar mais importância na seleção, operação e manutenção dos motores de indução trifásicos, devido os mesmos serem os maiores consumidores de energia elétrica na indústria. Com ações simples pode-se obter uma eficiência muito melhor nos motores vindo a reduzir seu consumo e consequentemente sofrer uma redução na conta de energia elétrica.

Através de uma análise detalhada no trabalho dos motores realizado nas máquinas injetoras, tornou-se possível realizar as medições com analisador de energia RE6000 em algumas partes do processo das máquinas e verificar o que influencia diretamente no consumo do motor elétrico. A partir do tempo de operação diária, mensal e anual da máquina calculou-se o consumo e o custo total de energia anual dos motores, aonde se chegou ao valor total de consumo de 1.914,44 MWh e um custo anual de R\$ 765.771,73.

Após a implementação dos inversores de frequência foi realizado os cálculos de demanda e consumo de energia elétrica, aonde se chegou ao valor total de consumo de 1.688,20 MWh e um custo total anual de R\$ 670.945,74. Desse modo o projeto traz uma redução de 12% no consumo de energia elétrica, ou seja, trazendo uma economia de R\$ 94.825,99 anual. O valor de aquisição dos inversores de frequência CFW500 é de R\$ 93.600,00. A partir da economia anual do sistema o tempo de retorno de investimento foi de aproximadamente 12 meses, e devido a esse *payback* de curto prazo fica viável a substituição do acionamento de partida direta por acionamento com inversor de frequência.

Com os valores de consumo e o custo anual dos motores elétricos, fica evidente que a substituição do acionamento de partida direta para a implementação dos inversores de frequência para controlar a potência absorvida da rede é essencial. O inversor de frequência não reduz apenas o consumo de energia, mas também auxilia no momento de partida do motor.

No acionamento por partida direta a corrente de partida é de 7 vezes maior que a corrente nominal do motor, desse modo há um pico de corrente elétrica na rede. O inversor de frequência possibilita parametrizar a rampa de aceleração do motor durante a partida, sendo assim uma partida suave até atingir seus valores nominais de funcionamento.

É de suma importância frisar que o estudo da eficiência energética não leva em consideração apenas a redução do consumo de energia elétrica na indústria, mas também o fato de evitar o desperdício desnecessário de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

BEN. **Balanco energético nacional 2017**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso: 10/03/2020.

BEN. **Balanco energético nacional 2018**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-470/Relat%C3%B3rio%20S%C3%ADntese%20BEN%202019%20Ano%20Base%202018.pdf>>. Acesso: 10/03/2020.

BEN. **Balanco energético nacional 2019**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-377/topico-494/BEN%202019%20Completo%20WEB.pdf>>. Acesso: 10/04/2020.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas** / Stephen J. Chapman: tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

DIAS, Leandro Lourenço. **Inversores de frequência: Aspectos construtivos e aplicação na mineração**. Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET-MG), Minas Gerais. 2015. Acesso: 20/09/2020.

EPE. **Eficiência energética**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/eficiencia-energetica>>. Acesso: 11/04/2020.

EPE. **Relatório final 2013**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-129/topico-101/Relat%C3%B3rio%20Final%202013.pdf>>. Acesso: 11/04/2020.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Motor de Indução**. 2°. ed. São Paulo: Érica, 2013.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos elétricos**. 4°. ed. São Paulo: Éric, 2008.

MAMEDE, João filho. **Instalações elétricas industriais**. 8°. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MARIOTONI, Carlo Alberto e NATURESA, Jim Silva. **Inovação tecnológica, Eficiência energética e os investimentos na indústria brasileira**. UNICAMP, 2007. Acesso: 20/09/2020.

OLIVEIRA, Cássio Alves de e GOMES, Luciano Coutinho. **Estudo do desempenho do motor de indução trifásico acionado a velocidade variável com utilização de técnicas digitais**. Disponível

em: < file:///D:/DADOS/Downloads/27319-Texto%20do%20artigo-120812-1-10-20150512.pdf>.
Acesso: 09/10/2020.

PROCEL INFO. **Resultados PROCEL 2019.** Disponível em:
<http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2019/Procel_rel_2019_web.pdf>. Acesso:
10/04/2020.

PROCEL INFO. **Selo PROCEL.** Disponível em:
<<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID={88A19AD9-04C6-43FC-BA2E-99B27EF54632}>>. Acesso: 11/04/2020.

SARDÁ, José Antônio da Silva. **Estudo da Eficiência Energética Aplicado a Indústria Sudati Painéis.** Disponível em: <https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/64f31-7_jose-antonio_sarda.pdf> . Acesso: 10/10/2020.

UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley / Stephen D. Umans ;** tradução: Anatólio Laschuk. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

WEG. **Motores elétricos - guia de especificação 2020.** Disponível em:
<<https://www.weg.net/institucional/US/en/search/downloadcenter?q=WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso: 10/04/2020.

WEG. **Inversor de frequência CFW500- manual-de-programação 2020.** Disponível em:<<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Inversores-de-Frequ%C3%Aancia/Drives-para-OEMs-e-Uso-Geral/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW500/INVERSOR-CFW500E39P0T4DB20/p/13072263>>. Acesso:
20/04/2020.

WEG. **Folha de dados técnicos motor W22 IR2 20 CV.** Disponível em:<
http://ecatalog.weg.net/FILES/tecnico/motor/FolhaDados/RFD-PT_9321_309460505.PDF>.
Acesso: 24/05/2020.

WEG. **Folha de dados técnicos motor W22 IR3 Premium 20 CV.** Disponível em: <
<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Efici%C3%Aancia-Energ%C3%A9tica/IR3-Premium/W22-Bomba-Monobloco-JP-IR3-Premium/W22-Bomba-Monobloco-JP-IR3-Premium-20-cv-4P-160M-3F-220-380-V-60-Hz-IC411---TFVE---B34D/p/12814905>>. Acesso: 20/08/2020.

WEG. **Curvas características em função das potências motor W22 IR2 20 CV.** Disponível em:<
http://ecatalog.weg.net/FILES/tecnico/motor/CurvaFuncaoPotencia/CFP-PT_92759_309460505.PDF>. Acesso: 24/05/2020.

WEG. **Curvas características em função da rotação motor W22 IR2 20 CV.** Disponível em:<
http://ecatalog.weg.net/FILES/tecnico/motor/CurvaFuncaoRotacao/CFR-PT_93119_309460505.PDF>. Acesso: 24/05/2020.

WEG. **Folha de dados técnicos motor W22 IR2 30 CV.** Disponível em:<
http://ecatalog.weg.net/FILES/tecnico/motor/FolhaDados/RFD-PT_93434_309460505.PDF>.

Acesso: 24/05/2020.

WEG. **Curvas características em função das potências motor W22 IR2 30 CV.** Disponível em:<
http://ecatalog.weg.net/FILES/tecnico/motor/desenho/TP-PT_93515_309460505.PDF>. Acesso:
24/05/2020.

WEG. **Curvas características em função da rotação motor W22 IR2 30 CV.** Disponível em:<
http://ecatalog.weg.net/FILES/tecnico/motor/desenho/TP-PT_9365_309460505.PDF>. Acesso:
24/05/2020.