

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM COMPRESSOR COM O USO DE INVERSOR

Elizangela M. Oliveira, Eric Fernando I. Alves, Flávio M. Araújo, Thiago G. Seixas, Marcel T. Coelho, Luís Fernando Quintino e Cesar Augusto Della Piazza

Faculdade Carlos Drummond de Andrade/ Engenharia Eletrônica com Ênfase em Automação, São Paulo - SP.
elizamorais.em@gmail.com, ericalves98@hotmail.com, flaviomi2008@hotmail.com, thiseixas@ig.com.br,
marceltc@uol.com.br, luis.quintino@drummond.com.br e della_piazza@yahoo.com.br

Resumo - Qualidade e economia de energia elétrica são aspectos importantes para estudo, devido a constante busca de empresas em vários setores do mercado, pelo melhor aproveitamento de energia através de produtos e soluções com alta eficiência energética.

Este artigo propõem um breve estudo sobre a otimização da operação de um compressor com o uso do inversor de frequência como solução econômica para uma empresa do ramo alimentício, que na busca da ampliação do seu sistema de refrigeração visando atender a nova demanda, estudou diversas soluções de automação elétrica no mercado para sua necessidade.

Palavras-chave: Compressor parafuso, inversor de frequência, indústria alimentícia.

ENERGY SAVINGS WITH FREQUENCY INVERTERS IN COMPRESSORS

Abstract - Quality and energy saving are important to study because of the constant search for various market companies for best energy use through products and solutions with high energy efficiency.

The paper proposes a brief study on optimization operation of a screw compressor using the frequency inverter as an economic solution in a food industry, which in the pursuit of expansion for the cooling system to meet the new demand, studied several solutions electric automation in the market for your needs.

Keywords: screw compressor, frequency inverter, food industry.

I. INTRODUÇÃO

A situação energética atual do Brasil é um fator preocupante, sendo um gargalo para a economia, porém este fato já era previsto por especialistas do setor há muitos anos. Em 2014, a falta de investimentos em energia chegou ao limite e resultou em problemas de abastecimento em várias regiões do país [4], no qual a indústria que representa um consumo de energia elétrica da ordem de 87,502 TWh, aproximadamente 32,9% do total consumido no país, sofreu muito com este apagão, fazendo acender um sinal de alerta para todos e principalmente para a indústria.

A energia elétrica é algo essencial para o crescimento econômico e social de um país, sendo que o uso racional desta energia é uma opção de baixo custo e de grande valia na economia [4]. Para o setor industrial, o investimento em produtos com alta eficiência energética é cada vez mais presente na atividade industrial, no qual este ganho é um diferencial na conquista de novos mercados e clientes, além da potencialização de um aumento competitivo na ampliação de projetos que visem à diminuição de custos através de economia de energia.

Para esta economia de energia na indústria alimentícia, o trabalho propõem métodos de acionamento e operações em controle de compressores parafusos como uso de inversor de frequência para redução significativa no consumo de energia em processos industriais [1].

II. COMPRESSOR PARAFUSO

Os compressores parafusos são equipamentos próprios para o serviço industrial pesado, com elevada confiabilidade e baixo índice de manutenção, com destaque para a eficiência energética e a capacidade de operar continuamente em plena carga.

Em poucos anos o compressor parafuso ganhou espaço no mercado, substituindo o compressor pistão, sendo muito utilizado para geração de ar comprimido e sistema de refrigeração industrial. Suas características principais são: baixo custo, manutenção reduzida, menor quantidade de peças móveis, ausência de válvula de entrada e saída, temperatura interna baixa, pouca vibração e tempo de vida útil maior.

A. Ciclo de trabalho

Os compressores parafusos são constituídos de dois rotores helicoidais, sendo um macho e uma fêmea, transmitindo movimento através do rotor fêmea, conforme a Figura 1.

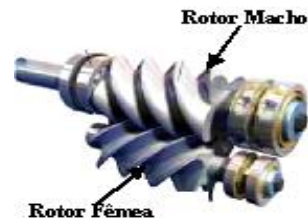


Fig. 1 - Rotores macho e fêmea

Em alguns compressores, o rotor fêmea é ligado diretamente no motor, o que resulta em um aumento de 50% de velocidade do rotor para a mesma velocidade no motor, melhorando sua eficiência em um ciclo de trabalho com



ganho ou perda de pressão ao término do processo de compressão [2].

Na partida, o ar ainda não está comprimido, de modo que o conjugado resistente possui a característica de variar durante o processo de partida, tendendo a se comportar de forma quadrática com a velocidade conforme Figura 2, onde a curva de torque (T_c) é em função da velocidade de rotação (ω). Importante relatar que quando a carga está em repouso, há um conjugado resistente de 30%.

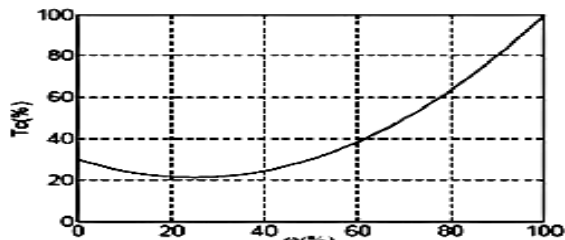


Fig. 2 - Curva de torque, em função da velocidade

Os rotores se movimentam por contatos diretos, imersos em óleo ou indiretos, que possuem engrenagens que realizam o movimento sem contato com os rotores. Sendo assim, os rotores giram em sentido contrário e em velocidade angular diferente. Entre os rotores localizam-se cavidades que funcionam como câmaras de compressão para admissão e descarga do ar, que através do processo de giro o ar é isolado e transmitido para ser comprimido na câmara de pressão, onde é aspirado pelo compressor e novamente comprimido na câmara de volume decrescente até a pressão final pré-estabelecida, realizando então, o processo de abertura da descarga selada após o ar comprimido ser descarregado no compressor, iniciando um novo ciclo que pode ser visualizado através da Figura 3.

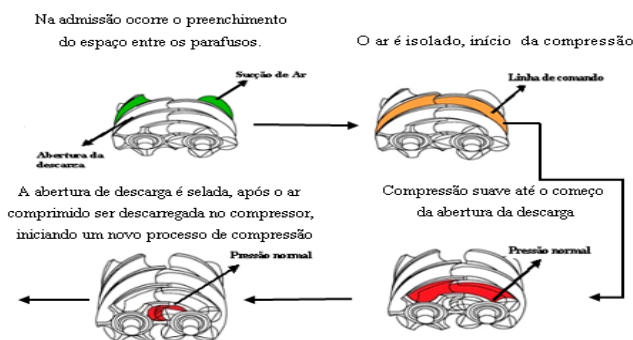


Fig. 3 - Processo de compressão

Devido à diferença na velocidade angular, o volume é reduzido continuamente, elevando a pressão do volume de ar. O trabalho realizado pelo volume de controle tem associação à compressão, sendo que a variação de energia interna do gás ou escoamento correspondem ao transporte definindo o ciclo de trabalho ideal do compressor [2].

O trabalho efetivo por unidade de massa é a pressão pelo volume, que por definição é a relação de compressão interna. Caso a pressão externa seja maior ou menor que a pressão final da fase de compressão, o trabalho efetivo será maior que o trabalho ideal no processo de compressão.

B. Sistema de ar comprimido

O ar comprimido é muito utilizado na indústria. Sua produção é relativamente simples, porém muito cara, pois necessita do uso de energia elétrica. Na indústria os compressores são responsáveis pela geração de ar comprimido para suprimento de alguns equipamentos e tem mostrado excelente fonte para impulsionar motores a ar e martelos pneumáticos, além de puxar ou empurrar substâncias ao mesmo tempo de forma eficiente e controlada.

C. Controle do compressor

O compressor entra em níveis de desligamento quando a pressão que é gerada fica acima do nominal ou alcança níveis acima do permitido. Sendo assim, possui um estado de redução de produção que é controlado por alívio de pressão, redução de entrada de ar, controle por desvio, partida, parada e controle pela velocidade de rotação.

A compressão por alívio de pressão é feita através do comando de um regulador de pressão que ao alcançar o limite superior, uma válvula de alívio é aberta para que o excesso de pressão gerado pelo compressor seja devolvido a atmosfera.

Para a redução de produção através do controle de entrada de ar na admissão, uma válvula (damper) fecha a entrada de ar admitida, realizando a redução da massa de ar na entrada.

No controle de desvio de pressão ocorre uma injeção de gás que é aliviado num refrigerador de calor, realizando uma redução considerável na produção [2].

O controle de velocidade de rotação regula a produção de ar comprimido de acordo com a rotação do eixo do motor. Esse controle é combinado com o controle de alívio de pressão.

D. Sistema de refrigeração

No sistema de refrigeração é feita a transferência térmica da região de baixa temperatura à custa do fornecimento de trabalho, portanto, no ciclo de compressão a vapor, o trabalho fornecido ao compressor é utilizado para elevar a pressão e a temperatura do vapor, que vai para o condensador para que o calor seja desprezado no meio condensando e fluido refrigerante. O líquido condensado segue em direção a um dispositivo de expansão, onde o fluido passa do estado líquido a alta pressão para uma mistura líquido-vapor a baixa pressão e temperatura; o fluido refrigerante então retira do ambiente ou sistema a ser refrigerado, utilizando esse calor para se vaporizar, seguindo em direção ao compressor onde completa o ciclo.

III. INVERSOR DE FREQUÊNCIA

O inversor de frequência é utilizado para o controle de velocidade em motores de indução e é constituído basicamente dos seguintes estágios: retificador, filtro e inversor ou barramento CC, conforme mostrado na Figura 4. Sendo projetado para variação contínua de velocidade, proporciona uma economia de energia melhorando o desempenho de máquinas e equipamentos, devido ao controle da velocidade nos processos com redução de frequência e eliminação do pico de corrente na partida do motor [3].

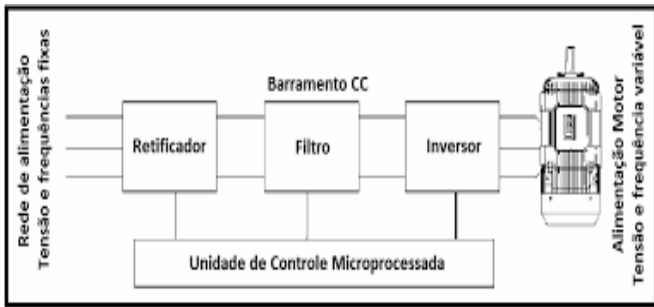


Fig. 4 – Funcionamento do inversor de frequência

Tem como princípio de funcionamento uma ponte retificadora CA/CC a diodos, um circuito intermediário em corrente contínua com um banco de capacitores para estabilizar a tensão CC e uma ponte inversora a transistores do tipo Transistor Bipolar de Porta Isolada (IGBT), para criar a forma de onda com tensão e frequência variável na saída para o motor.

A. Eficiência Energética e o Inversor de Frequência

Em um mercado globalizado, a competitividade e demanda com excelência de qualidade, associados ao conceito de redução dos custos operacionais força a indústria a aperfeiçoar cada vez mais seu processo produtivo. Neste contexto, inversores de frequência foram incrementados ao processo de variação de velocidade com a função de manter a operação em níveis necessários ao pleno atendimento das demandas, permitindo evitar desperdícios e proporcionar um melhor controle operacional [3].

O uso do inversor de frequência se justifica por representar o percentual mais significativo de economia de energia, aproximadamente 30% e contribui para a redução do desgaste mecânico, redução da demanda de energia, melhoria do fator de potência e automatização do sistema para empresas que buscam reduções de custo, conforme gráfico apresentado na Figura 5.

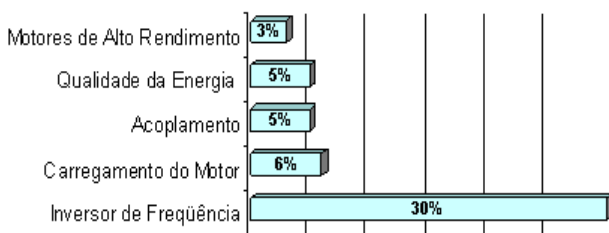


Fig. 5 - Percentual econômico

B. Proporcional –Integral- Derivativo PID

O controlador Proporcional –Integral- Derivativo (PID) é o algoritmo mais usado na indústria que calcula inicialmente o “erro” entre a sua variável controlada e seu valor desejado, e em função deste “erro” gera um sinal de controle, de forma a eliminar este desvio. O algoritmo PID usa o erro em três módulos distintos para produzir a sua saída ou variável manipulada, sendo a saída proporcionalmente ao erro, proporcionalmente à integral do erro e proporcionalmente à derivada do erro [1].

C. Uso do inversor de frequência com o compressor para modulação de energia

A modulação da pressão quando feita pelo controle da gaveta do compressor de tipo parafuso desperdiça energia, já que isso significa perda de rendimento do equipamento.

Para controle dos motores de compressores parafusos é essencial o uso do inversor de frequência, pois mantém sempre em rendimento máximo. Se for necessária modulação da pressão através de sistema PID, a velocidade do motor irá variar. O funcionamento do motor em velocidades diferentes das nominais implica diretamente em redução do consumo de energia [3].

D. Corrente de Partida com Inversores de Frequência

No inversor de frequência, caso a rotação aplicada ao motor seja menor que sua rotação nominal, sua corrente de entrada será menor que a corrente aplicada ao motor.

IV. SOFT STARTERS

A soft-starter (partida-suave) controla a tensão sobre o motor através do circuito de potência, variando o ângulo de disparo dos mesmos e conseqüentemente variando a tensão eficaz aplicada ao motor, porém, não controla a velocidade do motor. Assim, pode-se controlar a corrente de partida do motor, proporcionando uma partida suave, para não provocar quedas de tensão elétrica bruscas na rede de alimentação como ocorre em partidas diretas [1].

V. DIMENSIONAMENTO DO MOTOR

Em sistemas convencionais de partida, independentemente do nível de tensão aplicado, a frequência da tensão é sempre igual à da rede (60Hz). Sendo assim, no momento inicial da partida, o campo magnético girante no estator está à 60Hz, enquanto o rotor está parado [1].

A corrente em um motor elétrico está justamente atrelada ao escorregamento e quanto maior o escorregamento, maior corrente consumida visualizada na Figura 6.

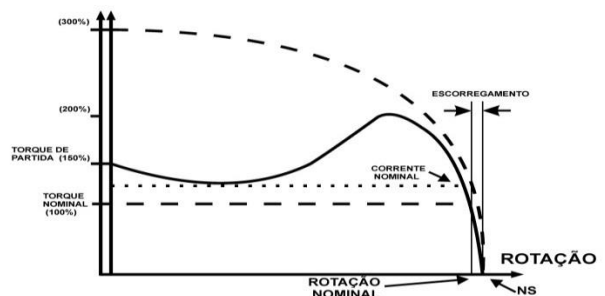


Fig. 6 - Curva torque e corrente

A utilização do inversor de frequência para variação de velocidade altera a tensão e frequência aplicada ao motor, devido ao ajuste da frequência de acordo com a rotação desejada. A rotação do campo magnético girante no estator será sempre próxima à rotação do rotor, desta forma, o escorregamento será mínimo (o suficiente para movimentação da carga) e o motor trabalhará somente no final da curva de torque e corrente versus rotação conforme a Figura 7.

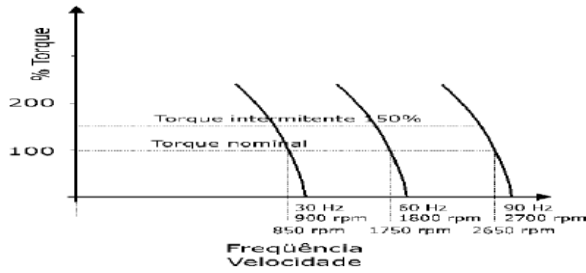


Fig. 7 - Gráfico da curva de frequência e velocidade.

Por este motivo, a corrente de partida do motor tenderá à corrente nominal quando exigido torque nominal; se o torque exigido for menor, a corrente de partida então será menor.

Com base nas premissas de cálculo de corrente de partida, podemos calcular o motor, baseado em sua carga. Assim para obtermos o modelo do motor e para cálculo da potência mecânica, utilizamos a fórmula de torque, abaixo descrito:

$$P_{mec} = \frac{C \times N_s}{9555} \quad (1)$$

- N_s - Rotação síncrona do motor em rpm
 C - Torque exigido em N.m
 P_{mec} - Potência mecânica consumida kW

Logo, a corrente de magnetização pode ser aproximada a 30% da corrente nominal do motor, já a corrente retórica corresponde à corrente efetivamente transformada em energia mecânica, é dada por:

$$I_r = \frac{P_{mec}}{U_{rpm} \times \sqrt{3}} \quad (2)$$

- I_r - Corrente retórica
 U_{rpm} - Tensão aplicada ao motor na rotação requerida
 P_{mec} - Potência mecânica consumida kW

Portanto, a corrente total fornecida no motor será de:

$$I_t = \sqrt{I_r^2 + I_m^2} \quad (3)$$

Já a potência elétrica enxergada pelo inversor será de:

$$P_\theta = U_{rpm} \times I_t \times \sqrt{3} \quad (4)$$

O inversor, portanto, enxerga o motor como uma carga. A corrente de entrada do inversor então será:

$$I_\theta = \frac{C \times N_s}{U_{rede} \times \sqrt{3} \times N_{inv}} \quad (5)$$

- I_r - Corrente de entrada no inversor
 N_{inv} - Rendimento médio do inversor

A rotação de um motor elétrico é diretamente proporcional à frequência do sinal de tensão aplicada.

$$N_s = \frac{120 \times f}{NP} \quad (6)$$

- N_s - Rotação síncrona do motor em rpm
 f - Frequência nominal do motor em Hz
 NP - Número de polos magnéticos do motor

O escorregamento de um motor elétrico é dado pela diferença entre a rotação do campo magnético girante produzido pela corrente circulante nas bobinas do estator (rotação síncrona) e a rotação do rotor.

$$S = \frac{N_s - N_f}{N_s} \quad (7)$$

- S - Escorregamento nominal
 N_s - Rotação síncrona no estator
 N - Rotação do rotor

VI. ESTUDO DE CASO

Sabendo que os motores elétricos são 70% do consumo de energia em plantas industriais conforme dados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL 2015), as empresas estão buscando alternativas para redução do consumo energético, desenvolvendo soluções de economia de energia aliada à diminuição de demanda contratada para sistemas de refrigeração [4].

A. Situação problema

Uma empresa do setor alimentício, que possui sua instalação na cidade de Pereiras, interior de São Paulo, determinou uma audaciosa meta de aumentar sua produção diária de 40 mil frangos abatidos resfriados para 100 mil frangos diários congelados em apenas 2 anos.

Os maiores investimentos concentravam-se em duas áreas: infraestrutura para abatimento e o sistema de refrigeração da empresa. Verificou-se a necessidade de uma nova câmara de resfriamento, assim como um imponente túnel de congelamento, com capacidade para congelar 80.000 frangos em um tempo aproximado de 18 horas, portanto, o sistema de refrigeração da empresa deveria ser totalmente reformulado e ampliado.

B. Solução Inicial

Inicialmente com 200CV instalados em compressores a pistão de baixa pressão e 200CV instalados em compressores a pistão de alta pressão, o sistema passaria a ter mais 800CV instalados em alta pressão e 350CV instalados em baixa pressão, implicando em mais 1150CV/850kW de consumo para o abatedouro. Assim, o grande impasse do investimento: a empresa encontrava-se na condição da instalação da empresa que é fim de uma linha de distribuição a uma distância de 7 km da subestação da concessionária, e os cabos instalados não suportariam tal demanda considerando a partida de motores por sistemas convencionais.

Tal aplicação exigiria investimentos no sistema de suprimento da concessionária, visando proporcionar ao sistema elétrico, a capacidade necessária para permitir a partida do compressor sem afetar os demais clientes conectados ao sistema de distribuição.

A solução convencional era o uso de soft starters, que com correntes de partida da ordem de 3,5 vezes a corrente nominal dos motores, traria benefícios em relação à partida direta, porém ainda com falta de controle no processo.

Assim o uso de soft starter ainda não resolveria todos os problemas, visto que sua corrente de partida permaneceria alta e sem controle do compressor. Desta forma, foi feita uma análise do uso dos compressores parafusos com inversor

de frequência, visto que sua variação de velocidade por controle escalar, na relação tensão x frequência permaneceria constante, não afetando em nada o comportamento do compressor em diferentes frequências de trabalho.

Conforme Tabela I, vemos o comportamento do motor de 350CV / 4 pólos / 380V / 60Hz / 459A, nas diferentes rotações, demonstrando as diferentes tensões nas diversas frequências de trabalho e mantendo a relação V/F:

Tabela I - Variação por controle

Frequência (Hz)	Tensão (V)	Tensão/Frequência (V/F)
60	380	6,33
45	285	6,33
30	190	6,33
23	145,67	6,33
11	69,67	6,33

A partir do modelo matemático do inversor de frequência, realizou-se a simulação da corrente na partida de um motor elétrico [1], tanto na entrada do inversor, ou seja, na rede, quanto no motor.

Para isto foi utilizado à curva característica de partida de um compressor do tipo parafuso MBR Mycom visualizado na Figura 8 para este motor de 350CV / 4 pólos:

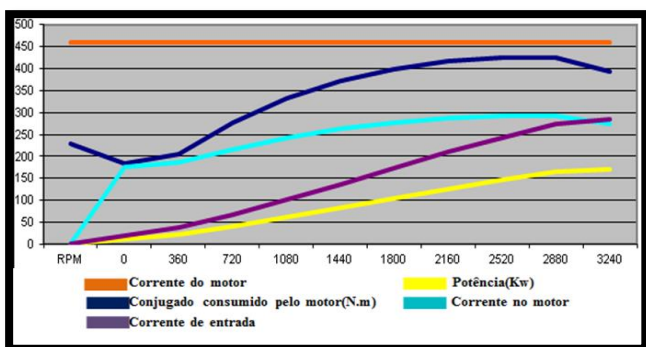


Fig. 8 - Gráfico da curva característica de um compressor parafuso.

C. Solução com inversores de frequência: Economia de Energia com modulação em malha PID.

Após instalação dos equipamentos na indústria, foi eleito o compressor de baixa pressão para medição do consumo de energia, com dados de placa de 350CV / 4 pólos / 60Hz.

Seu consumo efetivo de energia foi medido durante 7hrs com o inversor de frequência sem variação de velocidade e 7hrs com a variação de velocidade, simulando um ciclo normal de trabalho de funcionamento do abatedouro. Os resultados encontrados foram expressivos, pois o inversor de frequência reduziu consideravelmente o consumo de energia elétrica no compressor com velocidade variável, modulando e controlando a potência conforme demanda, utilizando a energia somente nos momentos requeridos [3].

Analisando o gráfico da Figura 9 notamos que há grande diferença no consumo de energia sem controle de carga, pois quando não havia controle o compressor trabalhava em seu máximo de potência, mesmo quando não havia necessidade, problema resolvido com uso do inversor de frequência.

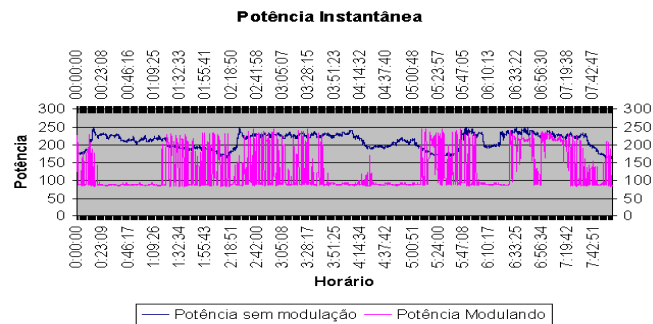


Fig. 9 - Gráfico do consumo de potência do compressor com e sem inversor de frequência

D. Partida do compressor com a aplicação dos inversores

Conforme características construtivas do compressor parafuso, o motor do compressor parte em alívio, com um conjugado máximo de aproximadamente 60% do conjugado do motor. Isso faz com que a corrente de partida seja extremamente baixa em relação a sua nominal, com um pico na entrada do inversor de frequência de 280A, para um pico de corrente nominal de 459A [2].

Assim, o sistema com partida via inversor de frequência foi proposto e aceito pela empresa, pois com o benefício da eliminação dos picos de corrente de partida, não houve necessidade de investimentos na linha com novos transformadores e sobre dimensionamento dos cabos.

Considerando o CAPEX do investimento, percebeu-se uma economia de R\$ 304.000,00 ou 43,8% menor se comparado com soft-starter, conforme demonstrados nas Tabelas 2 e 3:

Tabela 2 - Investimento para partida com o uso de soft starters

Soft Starters	R\$ 110.000,00
Troca de 7 km de linha (cabos, infraestrutura e instalação)	R\$ 372.000,00
Transformadores de MVA/13,8 kV/380V	R\$ 150.000,00
Banco de capacitores para correção do fator de potência	R\$ 12.000,00
Investimento Total	R\$ 694.000,00

Tabela 3 - Investimento para partida com inversor de frequência

Inversor de Frequência	R\$ 390.000,00
Troca de 7 km de linha (cabos, infraestrutura e instalação)	desnecessário
Transformadores de MVA/13,8 kV/380V	desnecessário
Banco de capacitores para correção do fator de potência	desnecessário
Investimento Total	R\$ 390.000,00

Desta forma constata-se que a aplicação dos inversores na partida do compressor trouxe grande benefício, como podemos relatar através dos cálculos obtidos, que comprovam a eficiência energética e econômica para a empresa.

Após medições em campo, percebeu-se uma economia de 91 kWh com uso do inversor. Considerando um ciclo normal de trabalho de 23 horas por dia, com uma hora de parada de manutenção, teremos uma economia energética de

aproximadamente 763.945kWh/ano, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4: Economia em (kWh) com o uso do compressor

Compressor Parafuso	Consumo	Total Econômico
Ligado durante todos os dias (23 horas por dia)	23 hrs X 91kWh	2093,00kWh
Economia por ano (365dias)	365 dias X 2093kWh	763,945kWh

Aplicando um preço médio de R\$ 0,10 por kWh, será gerada uma economia de R\$ 76.394,50 por ano, conforme Tabela 5:

Tabela 5: Custo com o uso do compressor

Compressor Parafuso	Consumo	Total Econômico
Ligado durante todos os dias (23 horas por dia)	2093,00kWh X R\$0,10	R\$ 209,30
Economia por ano (365dias)	763,945kWhXR\$0,10	R\$ 76.394,50

Como o investimento inicial do inversor de frequência foi de R\$ 55.875,00, vemos na Figura 10 o retorno do investimento inicial em aproximadamente 9 meses, o que representa para padrões nacionais, um retorno de investimento interessante e plausível de desembolso em quaisquer bancos de fomento.

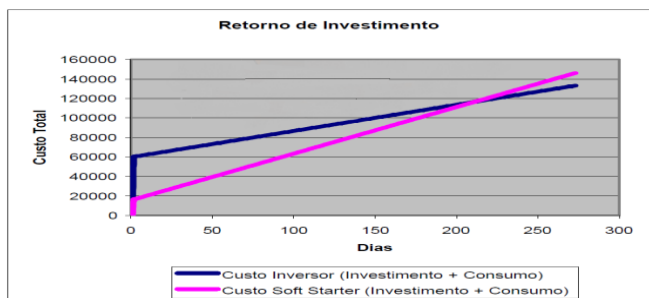


Fig. 10 - Gráfico do retorno do investimento

VII. CONCLUSÃO

Como resultado e observação do trabalho, percebemos que a aplicação do inversor de frequência no compressor parafuso demonstra ser de grande eficiência para a indústria em geral, onde podemos destacar como benefícios alcançados a melhoria e economia de energia para a concessionária, ponto de vista dos afundamentos de tensão, ocasionados pelos picos de corrente nas partidas dos motores. Com esta aplicação, podemos ver a redução dos investimentos para melhoria da infraestrutura e no sistema de suprimento de energia como um todo, seja da concessionária como internamente na planta do cliente.

Conforme constatado no estudo de caso, evidenciou-se uma economia de 91kWh ou 763.945kWh/ano, uma economia considerável para o total da energia que consumiria sem inversor de frequência nos compressores parafusos. Podemos verificar também que ao aplicar esta tecnologia, teremos um retorno de investimento em aproximadamente 9 meses, um número bem plausível para padrões brasileiros de investimento.

O trabalho conjunto entre a distribuidora de energia elétrica, cliente e fabricantes dos equipamentos proporcionam soluções capazes de minimizar as inconveniências causadas por operações de cargas e permitem a aplicação das melhores alternativas energéticas no modelo do sistema elétrico.

REFERÊNCIAS

- [1] K. Ogata, *Engenharia de Controle Moderno*. 4ª edição, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 2003.
- [2] N.R. Rocha. *Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido – Manual Prático*. Rio de Janeiro: Eletrobrás; Procel, 2005. 13 p.
- [3] V. Brandão, P. Thé Pontes, R. S. Moreira, A. B. Schmidlin Jr, C. R. *Simulação do Percentual de Eficiência Energética em um Sistema de Ar Comprimido com acionamento a velocidade variável*. Anais II Congresso da ABEE 2007 em Vitória - ES, Brasil ABEE e CBEE.
- [4] Balanço Energético Nacional (BEN). *Índices de Preços na Produção Industrial (2015)*. Acesso em 24 de maio de 2016, em: <http://ben.epe.gov.br>.