

Controle de exaustão de uma caldeira movida a cavaco buscando eficiência energética**Exhaustion control of a boiler moved to cavaco seeking energy efficiency**

DOI:10.34117/bjdv6n9-246

Recebimento dos originais:08/08/2020

Aceitação para publicação:11/09/2020

Danilo Expedito Michelin

Engenheiro Eletricista

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) / COAMO

Endereço: Via Rosalina Maria Dos Santos, 1233 - Campo Mourão - PR - Brasil - CEP 87301-899

E-mail: danilo_michelin@live.com

Roberto Ribeiro Neli

Doutor em Engenharia Eletrônica

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Endereço: Via Rosalina Maria Dos Santos, 1233 - Campo Mourão - PR - Brasil - CEP 87301-899

E-mail: rrneli@yahoo.com.br

Wyrllen Everson de Souza

Doutor em Métodos Numéricos para Estatística

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Endereço: Via Rosalina Maria Dos Santos, 1233 - Campo Mourão - PR - Brasil - CEP 87301-899

E-mail: wyrrlensouza@utfpr.edu.br

Eduardo Giometti Bertogna

Doutor em Métodos Numéricos para Estatística

Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Endereço: Via Rosalina Maria Dos Santos, 1233 - Campo Mourão - PR - Brasil - CEP 87301-899

E-mail: ebertonha@gmail.com

RESUMO

Atualmente, as empresas buscam mais eficiência em seus processos para se manterem competitivas no mercado. Para isso, existe a necessidade de buscar novos métodos de inovação para se alcançar essa eficiência, tendo em vista principalmente um retorno financeiro. Nessa busca por eficiência o mundo observa atentamente novas maneiras de aproveitar melhor a energia utilizada, para que as máquinas se movimentem, podendo ser elétrica, térmica ou eólica. Nesse projeto, o foco é voltado para a eficiência e para o consumo de energia elétrica na área industrial, mais especificamente na geração de vapor. Sendo assim, o objetivo deste trabalho é a instalação de um inversor de frequência em um motor de exaustor de tiragem, com o intuito de eliminar controles eletromecânicos que restringem a tiragem de ar conhecidos como damper. Assim, o inversor irá fazer o controle de velocidade do exaustor em questão proporcionando economia de energia elétrica e melhoria no

controle da tiragem de ar, além da eliminação de alguns dispositivos eletromecânicos que necessitam de constantes manutenções preventivas.

Palavras-chave: Inversor de Frequência, Controles Eletromecânicos, Energia Elétrica, Economia de Energia.

ABSTRACT

Currently, companies seek more efficiency in their processes to remain competitive in the market. For this, there is a need to seek new methods of innovation to achieve this efficiency, mainly in view of a financial return. In this search for efficiency, the world attentively observes new ways to make better use of the energy used, so that the machines can move, which can be electric, thermal or wind. In this project, the focus is on efficiency and electricity consumption in the industrial area, more specifically on steam generation. Therefore, the objective of this work is the installation of a frequency inverter in a draft exhaust motor, in order to eliminate electromechanical controls that restrict the draft of air known as damper. Thus, the inverter will control the speed of the extractor in question, providing energy savings and improving the control of draft air, in addition to the elimination of some electromechanical devices that require constant preventive maintenance.

Keywords: Frequency Inverter, Electromechanical controls, Electricity, Energy saving.

1 INTRODUÇÃO

Durante o processo de geração de vapor é necessário um controle sensível da relação entre entrada e saída de ar, que é realizado por dispositivos eletromecânicos conhecidos como como *dampers*, que é um dispositivo que controla o fluxo de ar. Este dispositivo terá seu funcionamento mais detalhado no decorrer do trabalho. Um dos problemas desse dispositivo é sua pouca precisão no controle do fluxo de ar, além de possuir uma alta frequência de manutenção pelo fato de ser um dispositivo quase inteiramente mecânico.

Com isso este trabalho faz uma sugestão para uma inovação interna com controle da relação de ar. Essa sugestão está baseada na instalação de um inversor de frequência para realizar o controle de velocidade do exaustor que faz o controle de tiragem de ar, com o objetivo de economizar energia elétrica (EL), visto que esse motor demanda um alto consumo de EL a 100 % de sua capacidade, sendo esse consumo o equivalente a aproximadamente 260 kWh. Sendo assim, o objetivo do trabalho é buscar uma redução no consumo de EL com a instalação do inversor de frequência.

Atualmente, as indústrias buscam cada vez mais formas de reduzir seus custos de produção para se tornarem mais competitivas no mercado. Uma das formas é reduzir o consumo de EL, que atualmente é um dos maiores insumos industriais, em algumas unidades industriais, tendo em vista que o insumo EL pode representar até 40% no processo no custo total do processo produtivo (FIRJAN, 2016).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

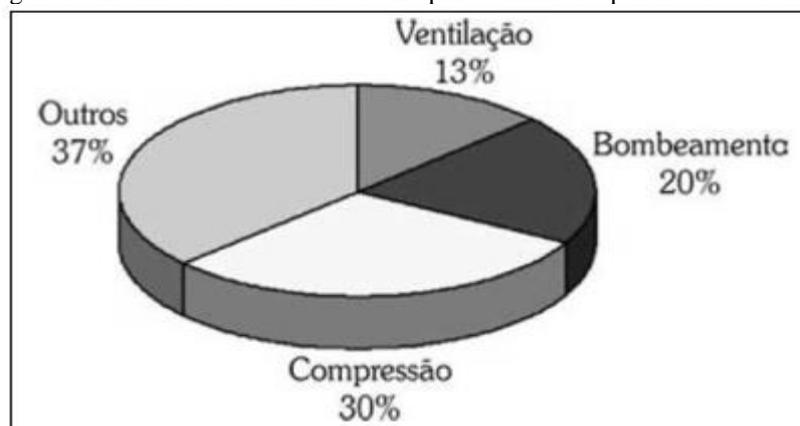
Inversores de frequência (IF) são amplamente utilizados em plantas industriais, principalmente para o controle de velocidade, torque e eficiência energética em motores elétricos convencionais que são utilizados em muitas aplicações. (FRANCHI, 2013).

Existem várias formas para a aplicação de IF visando economia de EL que muitas vezes não são notadas pela maioria dos usuários, dentre as aplicações que mais se destacam são bombas centrífugas e ventiladores onde o torque da carga aumenta com o quadrado da velocidade e o consumo de energia com o cubo da velocidade (FRANCHI, 2013).

Um exemplo prático seria como o controle da velocidade de um carro quando preciso aumentar a velocidade ou em situação de subida. Nesse caso é necessário acelerar e faz com que o carro gaste mais combustível. Quando se está em locais sem desnível não é necessária uma grande aceleração, visando apenas a manutenção da velocidade, sem a necessidade de acelerar se economiza combustível. Quando o carro se encontra em uma descida, ocorre a desaceleração e não acontece o envio de combustível para o motor, e muitas vezes precisa-se reduzir a velocidade utilizando os freios. Se compararmos com um IF ele faz o papel do acelerador e freio e o motor elétrico o papel do carro. Bem sucintamente, é essa a função de um IF em uma indústria na maioria das aplicações regulando a velocidade e torque de um motor conforme as necessidades do processo. (FRANCHI, 2013).

Segundo Franchi, (2013) os acionamento de máquinas e equipamentos mecânicos são feitos por meio de motores elétricos, essa forma os motores elétricos têm grande importância econômica para as indústrias de maneira geral. Há uma estimativa de que 75 % do consumo de EL em processos industriais seja com motores elétricos. A figura 1 representa o consumo de diferentes tipos de máquinas movidas com motores elétricos.

Figura 1 - Estimativa de consumo de máquinas acionadas por motores elétricos



Fonte: (FRANCHI, 2013).

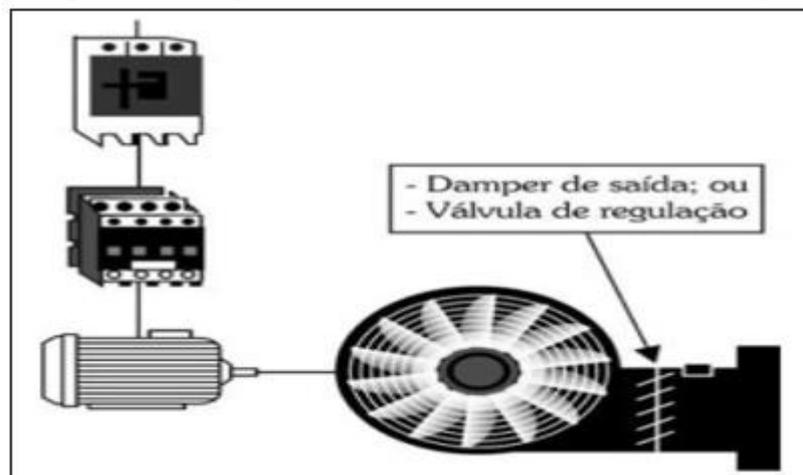
Segundo Franchi, (2013), um exemplo de viabilidade econômica é o uso de IF em processos de ventilação onde é largamente utilizada, pois apresenta diversas vantagens:

- Proteção térmica do inversor e do motor;
- Configuração de tipos de parada em caso de falhas;
- Operação forçada em casos de emergência;
- Religamento automático com retomada de velocidade.

Nesse sentido, umas das principais vantagens é a economia de EL que pode ser obtida com a instalação de um IF, em comparação com um sistema de ventilação tradicional, ou seja, uma partida direta sem qualquer controle eletrônico no motor.

Na figura 2 pode-se observar um esquema tradicional onde o motor é alimentado diretamente pela rede e opera em sua velocidade nominal. Nesse caso, para se obter a variação de vazão de ar é utilizado um dispositivo de restrição ou perda de carga, também conhecido como *damper*. Quando ocorre uma redução da variação do fluxo de ar a potência elétrica absorvida pelo motor diminui pouco no caso do *damper* estar regulado para 80 % da vazão nominal, a potência elétrica absorvida pelo motor se mantém a 95 % da vazão nominal. Exatamente nesse ponto que é gerada a perda de energia elétrica ou seja um alto consumo de energia elétrica gerar uma vazão relativamente baixa se comparado ao percentual de consumo do motor para uma vazão pequena (FRANCHI, 2013)

Figura 2 – Instalação elétrica tradicional em um sistema de ventilação

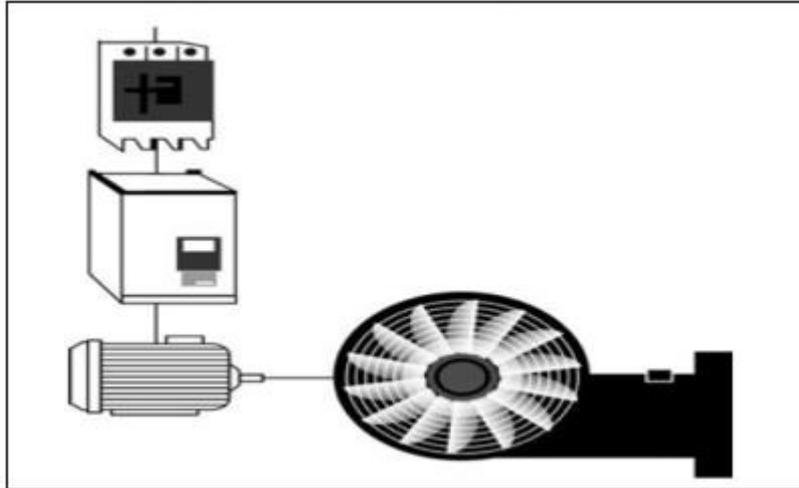


Fonte: (FRANCHI, 2013)

Na figura 3 é exemplificado um sistema com uso de IF para controle de velocidade do ventilador onde o *damper* é removido do sistema ficando apenas a cargo do inversor o controle de ar, nesse modelo a variação de velocidade do motor é quem controla a vazão de ar conforme *setpoint*. Nesse exemplo quando a redução de vazão ocorre há uma redução de vazão de ar para 80% que é

um valor muito significativa da redução na potência elétrica nominal absorvida pelo motor que antes era de 95% agora se reduz para 50% gerando uma grande economia no consumo de energia elétrica.

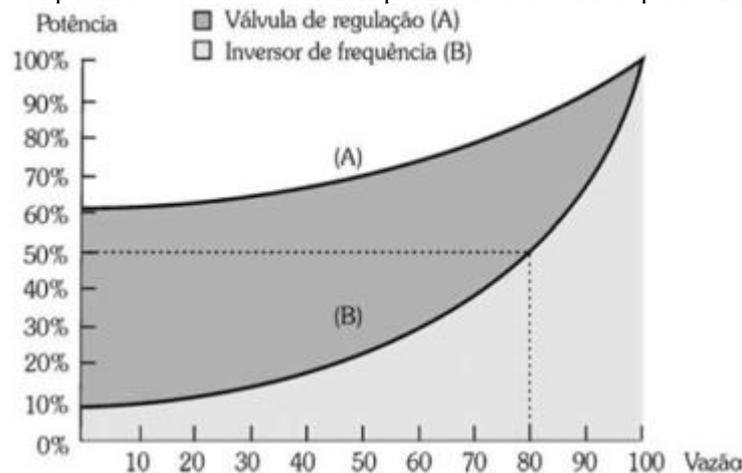
Figura 3 – Instalação elétrica com inversor de frequência para controle de velocidade do motor em um sistema de ventilação.



Fonte: (FRANCHI, 2013)

Para uma melhor visualização do resultado obtido a figura 4 mostra um gráfico da diferença entre a operação com o motor ligado diretamente à rede com um controle de vazão de ar por meio de restrição mecânica utilizando o *damper* e a mesma operação de controle apenas por variação de velocidade do motor por meio do uso de inversor de frequência sem o uso de *damper*.

Figura 4 – Comparação de potência absorvida – Controle por inversor x Controle por restrição mecânica (*damper*)



Fonte: (FRANCHI, 2013)

3 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

O processo de tiragem de ar da caldeira, objeto do estudo, trabalha com um *setpoint* de depressão de -5mBar , que serve para fazer com que o fogo seja direcionado para as paredes de

água da caldeira além de puxar os gases gerados pela queima de cavaco de lenha. Um motor de 350 CV (260 kW) (cavalo-vapor) 1190 rotações por minuto e 590 A de corrente nominal a 380 V trifásico com partida direta acionado via *simocode DP* e *softstarter 3RW22*, é responsável pelo acionamento do exaustor de tiragem de ar que é composto também por polias e correias que transferem a força do eixo do motor para o mancal do exaustor onde o motor em média consome 80 % de sua corrente nominal.

Para a realização do controle existe um transmissor de pressão que faz a leitura em tempo real via rede *profibus PA* e entrega esse valor para o controlador lógico programável que tem em sua programação um controlador proporcional derivativo integrativo (PID) que é amplamente utilizado no controle de variáveis de processo em indústrias. Esse, faz uma avaliação do comportamento da variável e prevê qual deve ser o *setpoint* de controle adequado para manter o processo estável, nesse caso o controle da abertura do *damper* (OGATA, 2010).

O controle do *damper* é realizado por um posicionador com rede *profibus PA* e que recebe comandos para o pistão abrir/fechar e enviar uma realimentação com valores de 0 a 100% de abertura para o controle PID avaliar se a proporção com que o *damper* abriu é a adequada para atender o processo. O pistão da figura 5 movem aletas mecânicas internamente realizando o controle da vazão, restringindo ou liberando a passagem de ar realizando a tiragem de ar da caldeira.

Figura 5 – Pistão pneumático e posicionador para controle do *damper*.



Fonte: (SMAR, 2011).

Uma das desvantagens desse tipo de controle é a grande necessidade de manutenções preventivas semestrais em todo sistema de controle pistões, *dampers* e posicionadores, além do risco de travamentos mecânicos do *damper*/pistão gerando paradas para manutenção.

4 PROPOSTA PARA NOVO CONTROLE DO PROCESSO

A proposta para o novo sistema de controle de exaustão é a instalação de um IF para controle de velocidade do eixo do motor e, conseqüentemente, do sistema de exaustão. Eliminando assim o controle por *dampers* que será retirado do sistema. O controle se mantém por meio de uma malha PID que será ajustada conforme o comportamento do processo após a instalação do inversor.

Para isso, é necessário dimensionar um inversor adequado para o sistema de exaustão para uma potência de aproximadamente 260 kW em uma tensão de alimentação de 380 V. Segundo a Siemens Industry, (2014) o melhor equipamento para operar com essa potência são os IF da linha Sinamics G150.

Com o valor da potência do motor é possível especificar qual modelo de inversor deverá ser adquirido para a aplicação. Nesse caso o exaustor da caldeira, verificando na folha de dados da linha Sinamics G150 encontramos o seguinte modelo 6SL3710-1GE36-1AA3, que atende tanto em potência do motor tanto em baixa sobrecarga quanto em alta sobrecarga. Deve-se realizar uma previsão para prever um possível aumento de carga pois o processo pode demandar diferentes cargas no motor conforme característica do processo, esse modelo de IF atende à potência típica de até 315 kW em alta sobrecarga gerando um fator de serviço de 13% se comparado a potência nominal do motor (SIEMENS INDUSTRY, 2016).

Para o controle de exaustão é necessário um controle de velocidade seja o mais exato possível ou seja o motor deve-se manter na velocidade indicada pelo controle PID. Entretanto, o exaustor é uma carga com alta inércia, ou seja, no momento que é necessário a redução da velocidade o inversor reduz intensidade do campo magnético, o que faz com que motor mude sua característica normal que é de ser uma carga e passa a ser um gerador. Sendo assim, o motor devolve energia para o inversor, mas toda essa energia precisa ser dissipada para não sobrecarregar o inversor. Para isso, existem várias formas para dissipar essa energia, como:

- Frenagem por injeção de corrente, que dissipa o calor no rotor do motor
- Frenagem por fluxo de corrente que dissipa o calor no estator do motor
- Frenagem resostática que dissipa o calor em um resistor externo
- Frenagem regenerativa que retorna a energia à fonte de alimentação.

Como proposta é um *retrofit*, que significa melhorar o sistema já existente e o motor em questão não foi dimensionado para dissipar a corrente com os componentes internos como rotor e estator, a frenagem regenerativa também não é possível pois o inversor proposto não tem essa função. Assim, decidiu-se utilizar a frenagem resostática para a execução do projeto, dessa forma o

calor é dissipado em um resistor de frenagem que dissipa toda essa energia em forma de calor não sobrecarregando o inversor (FRANCHI, 2013).

Existem 4 tipos de controle em um IF que são amplamente utilizados como:

- Escalar
- Controle vetorial *sensorless*
- Controle de fluxo vetorial
- Controle de campo orientado

O controle mais eficiente de velocidade sem sensor para leitura de velocidade é o vetorial *sensorless* que controla a velocidade compensando o escorregamento do motor promovendo um melhor controle de velocidade sobre a carga. Porém é pouco eficiente esse tipo de controle de torque em baixas velocidades, mas, como o objetivo é controlar a rotação e não o torque esse modelo é o que melhor se encaixa para o projeto proposto.(FRANCHI, 2013).

5 INSTALAÇÃO

Durante uma parada de fábrica foi iniciado o processo de troca do controle de exaustão, onde primeiramente foi posicionado o painel do inversor no centro de comando de motores, conectado à rede elétrica onde estava a partida antiga, foi necessário também a troca dos cabos elétricos do motor. Foi realizado a verificação conforme lista contida no manual do fabricante (SIEMENS INDUSTRY, 2016).

O *damper* foi aberto a 100% e o pistão e o posicionador que faziam parte do conjunto também foram retirados. Para os testes iniciais as correias de acoplamento do motor foram retiradas, e o inversor foi parametrizado conforme manual do fabricante inserido os parâmetros básicos como dados de placa do motor, rampa de aceleração/desaceleração e escolhido o parâmetro de controle vetorial verificando bibliografia o controle mais eficiente de velocidade é do tipo *sensorless*.

Testamos o motor a vazio com rotações de 300,600,900 e 1200 para verificar o comportamento da corrente elétrica do motor e se as rampas estavam se comportando como o esperado. Depois disso as correias foram acopladas novamente e foram feitos os mesmos testes citados anteriormente. Ambos os testes se comportaram de acordo com o esperado, ficando liberado para a equipe de produção iniciar os trabalhos, onde após esse início a malha PID seria ajustada conforme a nova necessidade do processo.

6 RESULTADOS

A coleta dos resultados ocorreu após 30 dias, devido aos ajustes necessários no PID para que o novo controle operasse de acordo com as necessidades do processo. Após esse ajuste o sistema de automação foi parametrizado para a cada uma hora coletar dados de corrente nominal, percentual de velocidade e depressão da caldeira para o desenvolvimento da tabela 1. O período de coleta de dados foi de 30 dias.

Tabela 1 – Média das medições e proporções comparando com a nominal do motor

Semana 1						
Média Corrente	249.14	A	% Relação a Nominal	48.2%	Consumo (kWh)	94.67
Média Frequência	66.76	%	Média Frequência em Hz	40.06		
Média Depressão	-6.25	mBar	SetPoint depressão	- 5 mBar		
Semana 2						
Média Corrente	237.91	A	% Relação a Nominal	46.0%	Consumo (kWh)	90.41
Média Frequência	62.16	%	Média Frequência em Hz	37.30		
Média Depressão	-5.30	mBar	SetPoint depressão	- 5 mBar		
Semana 3						
Média Corrente	253.84	A	% Relação a Nominal	49.1%	Consumo (kWh)	96.46
Média Frequência	67.74	%	Média Frequência em Hz	40.64		
Média Depressão	-5.72	mBar	SetPoint depressão	- 5 mBar		
Semana 4						
Média Corrente	262.26	A	% Relação a Nominal	50.7%	Consumo (kWh)	99.66
Média Frequência	68.65	%	Média Frequência em Hz	41.19		
Média Depressão	-5.45	mBar	SetPoint depressão	- 5 mBar		
Mês						
Média Corrente (Mês)	250.99	A	% Relação a Nominal	48.5%	Consumo (kWh)	95.38
Média Frequência (Mês)	66.41	%	Média Frequência em Hz	39.85		
Média Depressão (Mês)	-5.70	mBar	SetPoint depressão	- 5 mBar		

Fonte: O autor

Com os dados da tabela é possível iniciar os cálculos para o quanto de economia a instalação do inversor de frequência gerou. Para isso, foi considerado no cálculo duas modalidades. A primeira modalidade é a de mercado livre, onde se compra energia por meio de leilão os consumidores que tenham consumo maior 3000 kW por mês. A segunda modalidade é o mercado cativo, onde a energia tem valor regulado pelo governo. Ambas as modalidades são reguladas pelo decreto Nº 5.168 de 30 de julho de 2004. As referências de valores foram coletadas para indústria pesada e alimentadas em 138 kV para o estado do Paraná.

Os valores encontrados foram extraídos de sites oficiais da Câmara de comercialização de energia elétrica (CCEE) para o mercado livre na modalidade indústria pesada. Como o valor é variável mês a mês foi feita uma média do ano de 2018 (CCEE,2019). Já para o mercado cativo, os

dados foram da Companhia Paranaense de energia elétrica (COPEL) na modalidade A2 na tabela vigente desde 24/06/2018 nesse caso como há horário de ponta foi considerado um valor médio entre as 21 horas do horário fora de ponta e as outras 3 do horário de ponta pois há diferença entre as tarifas.

O cálculo considerou as tarifas mencionadas acima e com uma operação de 24 horas por dia 7 dias por semana. Assim temos os seguintes resultados:

Quadro 1 - Economia de energia elétrica com a instalação do inversor

Média Consumo (kWh)	95,38	Consumo em kWh Motor a 100%		194211,52		
Acréscimo perca Inversor 2% (kWh)	97,28	Economia (Mês)				
Total kWh com inversor instalado (Mês)	70044,68	Mercado Livre		Mercado Cativo		%
		Valor Médio kWh	R\$ 0,29	Valor Médio kWh	R\$ 0,34	
Economia comparando com a nominal do motor à:	100%	R\$ 35.712,97	R\$ 42.216,72	64%		
Economia comparando com a nominal do motor à:	90%	R\$ 30.127,04	R\$ 35.613,53	54%		
Economia comparando com a nominal do motor à:	80%	R\$ 24.541,11	R\$ 29.010,34	44%		
Economia comparando com a nominal do motor à:	70%	R\$ 18.955,18	R\$ 22.407,15	34%		

Fonte:O autor

7 RETORNO FINANCEIRO

Os custos de instalação estão discriminados de forma simplificada no quadro 2, podemos verificar um custo de instalação de R\$ 191.802,55

Quadro 2 - Custos de Instalação

Cabeamento e conexões	R\$ 14.400,00
Mão de Obra/Instalação	R\$ 17.556,00
Inversor Sinamics G150	R\$ 159.846,55
Total	R\$ 191.802,55

Para uma melhor avaliação do retorno financeiro do projeto, o quadro 3 mostra o tempo em meses para que o projeto se pague e inicie o retorno financeiro para empresa.

Quadro 3-Retorno do Investimento em Meses

Média Potência consumida antes da instalação:	Meses (Mercado Livre)	Meses (Mercado Cativo)
Motor à 100 % da nominal	5,37	4,54
Motor à 90% da nominal	6,37	5,39
Motor à 80% da nominal	7,82	6,61
Motor à 70% da nominal	10,12	8,56

8 CONCLUSÃO

Com os dados informados podemos observar um grande custo-benefício com a instalação do IF no exaustor da caldeira em questão, considerando que conforme informado anteriormente a média de consumo nominal antes da instalação do IF em média era em torno de 80 % da nominal do motor. Nesse caso temos um retorno financeiro em torno de 7 meses. Onde após esse período a empresa já obteve lucros já nos primeiros 12 meses de instalação.

Um ponto importante para ressaltar é quem 12 meses, considerando a mesma média de consumo do motor em torno de 80 % antes da instalação do IF a empresa teve uma economia de R\$ 294.493,32 por ano de operação. Em função do exposto o projeto mostrou que é possível economia de altos valores em EL, gerando competitividade da empresa frente às concorrentes.

REFERÊNCIAS

FIRJAN, S. Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil? Publicações Sistema Firjan, p. 1–7, 2016.

FRANCHI, C. M. Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.

OGATA, K. Engenharia de Controle Moderno. 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

SIEMENS INDUSTRY. Manual de instruções Sinamics G150. Disponível em: <https://support.industry.siemens.com/cs/attachments/109742118/SINAMICS_G150_Converter_Cabinet_Units_pt-BR.pdf?download=true>.

CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica: Preços Médios - PLD. 2019. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afLoop=359059719350868&_adf.ctrl-state=18it38ba0m_319#!%40%40%3F_afLoop%3D359059719350868%26_adf.ctrl-state%3D18it38ba0m_323>. Acesso em: 09 jan. 2019.

COPEL - Companhia Paranaense de Energia Elétrica: Tarifas 2018. 2018. Disponível em: <[https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela_tarifas_-_horaria_azul_-_completa/\\$FILE/Tabela%20Tarifas%20-%20Hor%C3%A1ria%20Azul%20-%20completa.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/tabela_tarifas_-_horaria_azul_-_completa/$FILE/Tabela%20Tarifas%20-%20Hor%C3%A1ria%20Azul%20-%20completa.pdf)>. Acesso em: 09 jan. 2019.