

ESTUDO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E VIABILIDADE DE INVESTIMENTO EM ACIONAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO PARA EXAUSTORES DE UMA CALDEIRA

**SEBASTIÃO APARECIDO DOS SANTOS¹
WILLIAN RICARDO BISPO MURBAK NUNES²
LAERCIO BERGAMIN³**

Resumo

A eficiência energética no acionamento de máquinas é um tema muito relevante para a indústria. Estudos comprovam que diversas indústrias brasileiras ainda apresentam sistemas de acionamento que estão defasados. Neste contexto, este trabalho apresenta informações de resultados obtidos através de análise e observação do acionamento de um conjunto de motores de exaustores de uma caldeira, por meio de partida compensadora. Dados e características do acionamento atual são tabulados. Por meio de revisão de literatura, as tecnologias de acionamento de máquinas elétricas mais atuais são apresentadas. A análise do custo de investimento, o tempo de retorno de investimento, os valores de redução do consumo de energia e índices de eficiência energética e qualidade de energia de cada um dos sistemas são apresentados.

¹Graduação, Curso de Manutenção Industrial, Faculdade de Tecnologia Senai de Londrina, sebastiaoaparecido@yahoo.com.br

²Doutorando em Engenharia Elétrica, Docente Faculdade de Tecnologia Senai Londrina, willian.murbak@fiepr.org.br

³Especialista, Docente Faculdade de Tecnologia Senai Londrina, laercio.bergamin@pr.senai.br

Palavras chave: Partida compensadora; *Soft starter*; Inversores de frequência; Usinas sucroalcooleiras.

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética e sustentabilidade são temas relevantes para a indústria no atual cenário, tendo em vista a crescente demanda industrial, a crise energética do setor elétrico e as multas elevadas para enquadramento nas exigências legais das normas vigentes.

Estudos indicam que aproximadamente a metade da energia elétrica é consumida pelo setor industrial. Sendo que motores elétricos são os maiores consumidores de energia de elétrica, correspondendo em cerca de 62% de acordo com a EPE (2015). Uma análise da perspectiva energética das indústrias denota que muitas estão com baixíssimos índices de eficiência energética em virtude de um dimensionamento inadequado dos sistemas de acionamento, baixo rendimento e fator de potência das máquinas elétricas, além de altos índices de distorção harmônica (TDH) presente na instalação.

Nas indústrias sucroalcooleiras, as caldeiras são elementos importantíssimos de geração de vapor para movimentação de máquinas térmicas e como fonte de calor para processos industriais. Todavia, caldeiras apresentam grandes perdas energéticas de natureza térmica e elétrica.

A melhoria de eficiência em caldeiras é objeto de estudo na literatura por vários autores. Salum (2011) analisou a eficiência energética em sistema de combustão de caldeira, no qual indicou deficiências no acionamento dos processos de ventilação. Domański et. al. (2012) otimizou a eficiência energética de uma caldeira analisando vários aspectos importantes da

operação da caldeira, tais como: instrumentação, equipamento, análise de sensibilidade dos dados de processo, lógicas de controle, aspectos operacionais, tecnologia e restrições de sistema. No que se refere a melhoria da eficiência no acionamento, Scarmin (2011) propôs uma técnica de controle adaptativo no acionamento de motores de indução, obtendo resultados significativos de redução no consumo de energia. Vale ressaltar que algumas iniciativas governamentais proporcionam ações de eficiência energética para o setor industrial por meio do PROCEL-Indústria e o PROESCO, com uma linha crédito junto ao BNDES.

Diante deste panorama, este trabalho propõe avaliar o sistema de acionamento de motores de indução presentes em exatores de uma caldeira de uma usina sucroalcooleira. Neste processo estão instalados doze motores com partida compensadora. Entretanto, esta partida é considerada obsoleta e com alta demanda de manutenções. Os motores são antigos e com baixo índice de fator de potência e rendimento.

Portanto, este trabalho busca estudar o acionamento por *soft-starter* e inversor de frequência, comparando-os com a partida compensadora para a aplicação. A análise do custo de investimento, o tempo de retorno de investimento, os valores de redução do consumo de energia e índices de eficiência energética e qualidade de energia de cada um dos sistemas são apresentados.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Caldeira

Caldeiras são amplamente utilizadas por indústrias, possibilitando a geração de energia térmica e elétrica.

As caldeiras podem ser divididas basicamente em dois tipos: flamotubulares e aquotubulares. As flamotubulares se caracterizam pela circulação interna dos gases da combustão pelos tubos. Enquanto que nas aquotubulares ocorre a circulação externa dos gases de combustão e os tubos conduzem vapor.

A caldeira em estudo neste trabalho possui um gerador de vapor V-2\5 SS, que possibilita uma produção de 60 t/h de vapor superaquecido com pressão de 61kg/cm² e a uma temperatura de aproximadamente 400°C.

Vale ressaltar ainda que a caldeira é do tipo aquatubular de dois tambores sobreposto e circulação natural suspensa. O combustível usado é à base de bagaço de cana, resíduo da produção de etanol, com umidade máxima do bagaço em 50%. O sistema ainda aprecia um combustível auxiliar por meio de *fuel-oil*.

Os índices de produção máxima queimando bagaço é em torno de 60.000 kg\h, enquanto que combustível *fuel-oil* é de 40.000kg\h.

2.2 Sistema de ventilação e tiragem de gases em caldeiras

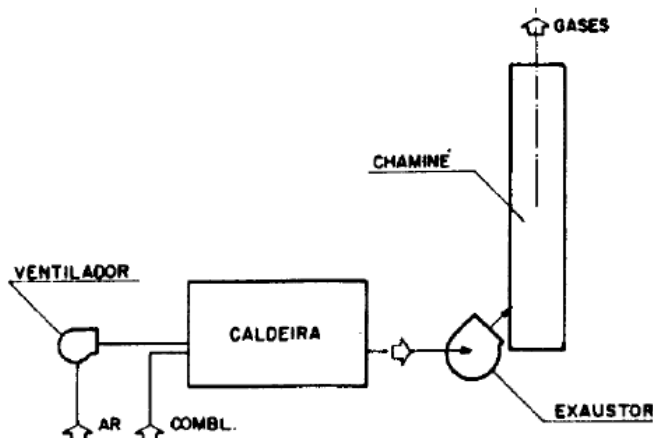
Em caldeiras um importante elemento a ser considerado no processo é a tiragem e circulação de gases.

A tiragem é o fluxo de gases provocado por diferenças de pressão ou de densidade. O processo de tiragem pode ser natural, forçado, induzido ou balanceado (ZOTTIS e PAGNOSSIN, 2008).

Dentre tais a configuração utilizada neste trabalho é a da tiragem balanceada. Na qual tem-se um ventilador insuflando ar na fornalha e com um exaustor na saída da caldeira, responsável por gerar uma pressão negativa no interior da caldeira. Zotti e Pagnossin (2008) esclarecem que por tal ação os gases e produtos provenientes da combustão são succionados e direcionados para a chaminé da caldeira. O ar de combustão é alimentado pela pela pressão negativa existente na fornalha.

A Figura 1 mostra um sistema de tiragem balanceada em caldeiras.

Figura 2: Sistema de tiragem balanceada em caldeiras.



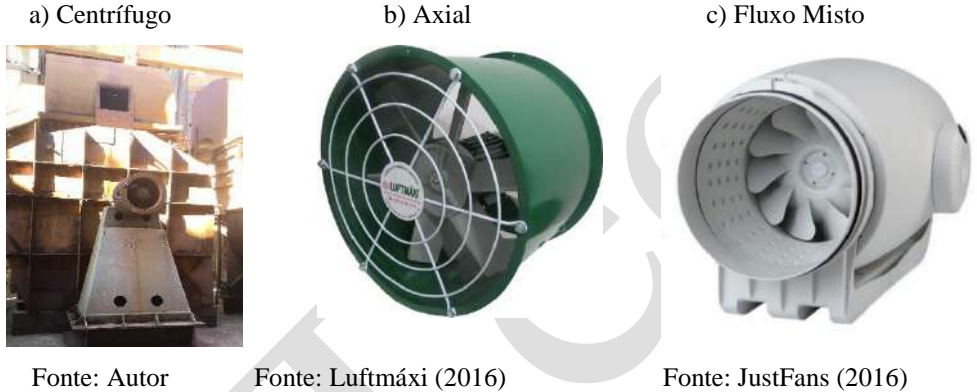
Fonte: (ZOTTIS e PAGNOSSIN, 2008).

Salum (2011) destaca que os ventiladores “são máquinas de fluxo geradoras que trabalham com fluido no estado gasoso provocando uma diferença de pressão inferior a $0,20\text{kgf/cm}^2$ ”. Neste contexto, tem-se então que os exaustores se configuram como elementos nos quais promovem a circulação inversa do fluxo de ar dos ventiladores, provocando uma diferença de pressão negativa.

Assim, um exaustor pode ser definido como um sistema de ventilação que retira ar de determinado ambiente em direção a outro.

A classificação dos exaustores quanto a forma do rotor são: centrífugos, de fluxo misto e axiais, conforme Figura 2.

Figura 3: Classificação de exaustores industriais



Os exaustores centrífugos ou também denominado radiais operam com pequenas vazões e grandes pressões, utilizado em caldeiras industriais, Figura 6 a) Exaustores axiais, Figura 6 b) operam com grandes vazões e pequenas pressões. São geralmente instalados em fabricas, armazéns e cozinhas industriais.

Os de fluxo misto, ilustrado na Figura 6 c), operam com médias vazões e médias pressões, podendo em algumas aplicações substituir os centrífugos e os axiais.

Um elemento importante de atuação é o sistema de regulação de vazão. Para sistemas de ventilação há os *dampers* e os variadores de velocidade.

Os *dampers* são as válvulas dos sistemas de ventilação, ilustrado na Figura 3, as quais podem ser manuais ou automáticas e são utilizadas para controlar a vazão ou até mesmo isolar elementos dos sistemas de ventilação, como por exemplo, os *dampers* corta fogo.

Figura 3: *Dampers*



Fonte: Autor

Os variadores de velocidade referem-se ao conjunto motor e inversor de frequência, o qual possibilita controlar a rotação da máquina eletronicamente.

2.3. Sistema de partida compensadora

O acionamento de máquinas elétricas é importante para a qualidade de energia da instalação industrial. O acionamento de motor com partida direta, por norma, é limitado a motores de até 5 CV. O inconveniente da partida direta é a ocorrência de uma grande elevação da corrente de partida e uma subtensão na alimentação da instalação. O que acarreta o funcionamento indesejável de outros equipamentos da instalação elétrica.

Neste contexto de qualidade de energia elétrica uma alternativa é o emprego da chave de partida estrela-triângulo. Todavia, a norma estabelece que tal acionamento seja utilizado para motores, cuja potência seja de até 15 CV.

Sendo assim, para solucionar tal limitação de potência da partida estrela triângulo uma opção muito utilizada em sistemas de acionamento antigo é a partida compensadora. Com tal se reduz a corrente de partida, evitando sobrecarregar a linha de alimentação. Reduzindo-se a tensão V_l aplicada, o torque mecânico T_{mec} da máquina decai com o valor quadrático da tensão (NUNES, 2015):

$$T_{mec} = \frac{1}{\omega_s} \left[\frac{n_{fases} V_1^2 (R_2/s)}{(R_{1,eq} + R_2/s)^2 + (X_{1,eq} + X_2)^2} \right] \quad 1)$$

onde: n_{fases} é o número de fases, V_1 a tensão aplicada no estator, R_2 é resistência do enrolamento do rotor, R_{1eq} é a resistência equivalente do

enrolamento do estator, X_{1eq} é a reatância indutiva do estator, X_2 é a reatância indutiva do rotor.

A tensão V_1 aplicada no motor por meio da chave compensadora é reduzida através de um auto transformador trifásico que possui *tap*'s de 50%, 65% e 80% da tensão nominal.

O primário do autotransformador é ligado em estrela na tensão nominal da instalação e o secundário fornece uma tensão reduzida provinda do *tap* para alimentação do estator da máquina.

Com a máquina operando no regime permanente, desconecta-se o autotransformador e passa a alimentar o motor com a tensão nominal da rede. O intervalo de tempo para a comutação entre o autotransformador e a alimentação da rede é de aproximadamente 20 segundos, em que o motor atinge 90% da rotação nominal.

A partida compensadora, cujo esquema de acionamento é mostrado na Figura 3, é utilizada para aplicações com motores de potência elevada tais como: laminadoras, moinhos, britadores, exaustores e grandes ventiladores, bombas helicoidais e axiais, entre outros.

2.4. Sistema de acionamento com *soft starter*

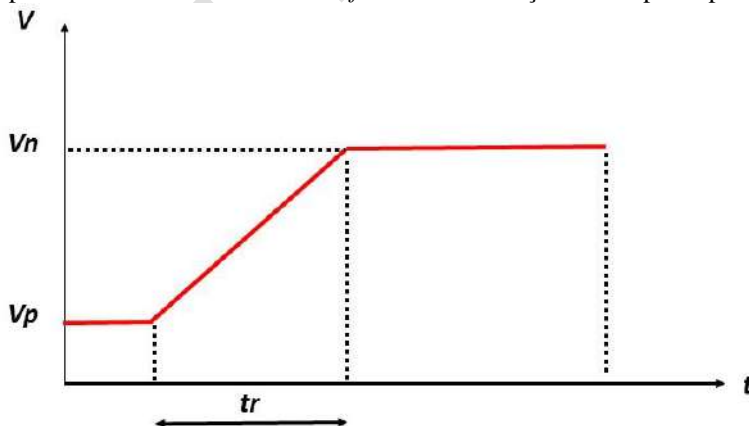
Em substituição aos acionamentos de partida estrela triângulo e partida compensadora utilizam-se atualmente as partidas com *soft starter*.

O *soft starter* é um equipamento eletrônico dotado de tiristores, com os quais é possível controlar o torque, a potência do motor na partida e frenagem (WEG, 2010, p.15)

No acionamento de partida do motor com *soft starter* deve-se parametrizar a tensão inicial de partida (V_p). Tomando-se como referência o valor de V_p , a tensão é incrementada linearmente durante um intervalo parametrizado denominado de tempo da rampa de aceleração t_r , no qual se atinge o valor de tensão nominal V_n , conforme ilustrado na Figura 5.

Com isso, segundo Azevedo e Mendes (2008), picos de correntes são evitados e o conjugado de aceleração é amenizado, evitando desgastes em peças mecânicas e amenizando efeitos na rede elétrica.

Figura 6: Comportamento da tensão de uma *soft starter* em função do tempo de partida.

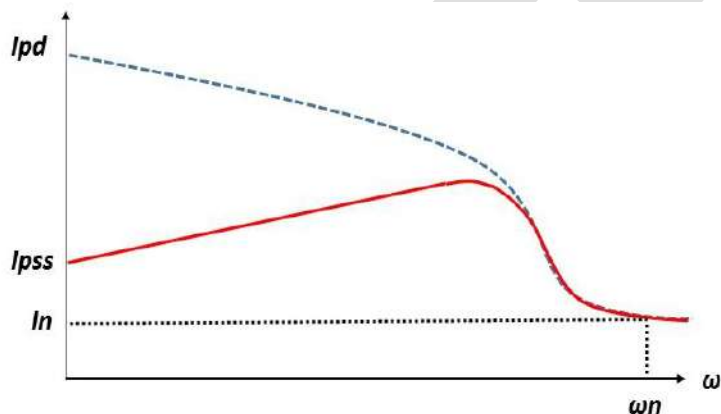


Fonte: Autor

A partir do intervalo de tempo t_r , atinge-se o valor de tensão nominal da máquina e assim a corrente de partida do motor tem um comportamento parecido com a de partida e com isso, não se tem picos que ocorrem em outros meios de acionamentos, ilustrado na Figura 6.

Segundo Mamede (2005) o ajuste do tempo da rampa de aceleração t_r e a tensão inicial de partida V_p a serem parametrizados na *soft starter* dependem do tipo de carga que a que é acionada.

Figura 7: Comparativo da corrente entre partida direta e *soft starter* em função da velocidade.



Fonte: Autor

Para o cálculo da tensão inicial de partida V_p , é obtida por meio de (2):

$$V_p = \frac{V_n \sqrt{C_i + 0.15 C_n}}{C_p} \quad 2)$$

onde: V_p é a tensão inicial de partida; V_n é a tensão nominal do motor; C_n é o conjugado nominal do motor; C_i = conjugado nominal de partida da carga; C_p é o conjugado nominal de partida do motor.

O outro parâmetro para a *soft starter* é o do tempo da rampa de aceleração tr , obtido por meio de (3):

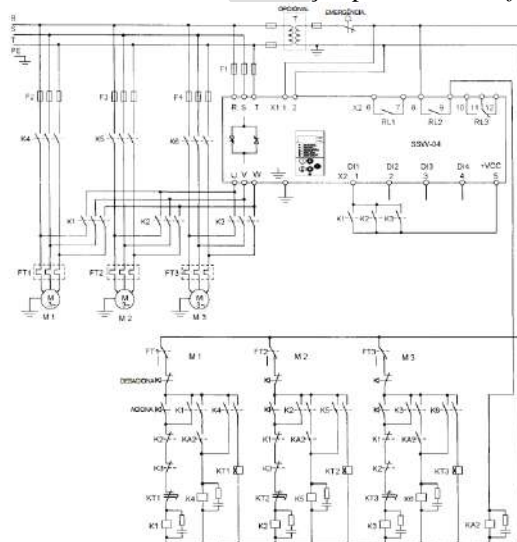
$$tr = tpd \frac{Vn}{Vp} \quad 3)$$

onde: tpd é o tempo de partida do motor ligado diretamente a rede de alimentação. Sendo assim, é perceptível pela expressão (3) que o valor do tempo da rampa de aceleração tr é maior que o tempo de partida com o motor ligado diretamente na rede.

As aplicações com *soft starter* incluem cargas como bomba centrífuga, compressores, refinadores de celulose, britadores, esteiras transportadoras, moinhos, ventiladores axiais e centrífugos, entre outros.

O diagrama de comando de um acionamento de motores de indução em cascata por meio de uma *soft starter* é ilustrado na Figura 7.

Figura 8: Acionamento de um motor de indução por meio de *soft starter*.



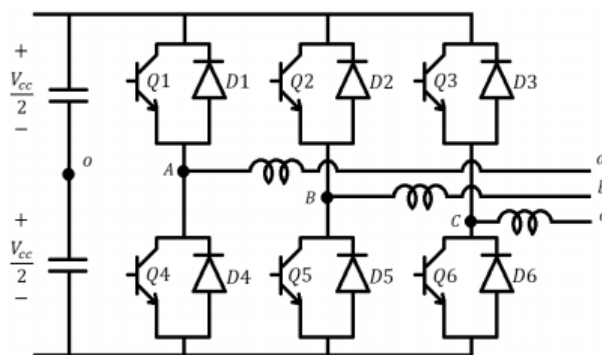
Fonte: WEG (2016).

2.5. Sistema de acionamento com inversor de Frequência

Consiste num sistema eletrônico, que realiza o chaveamento de um barramento CC de entrada utilizando três ramos, com as chaves superiores Q1-Q2-Q3 e chaves inferiores Q4-Q5-Q6, conforme ilustrado na Figura 8.

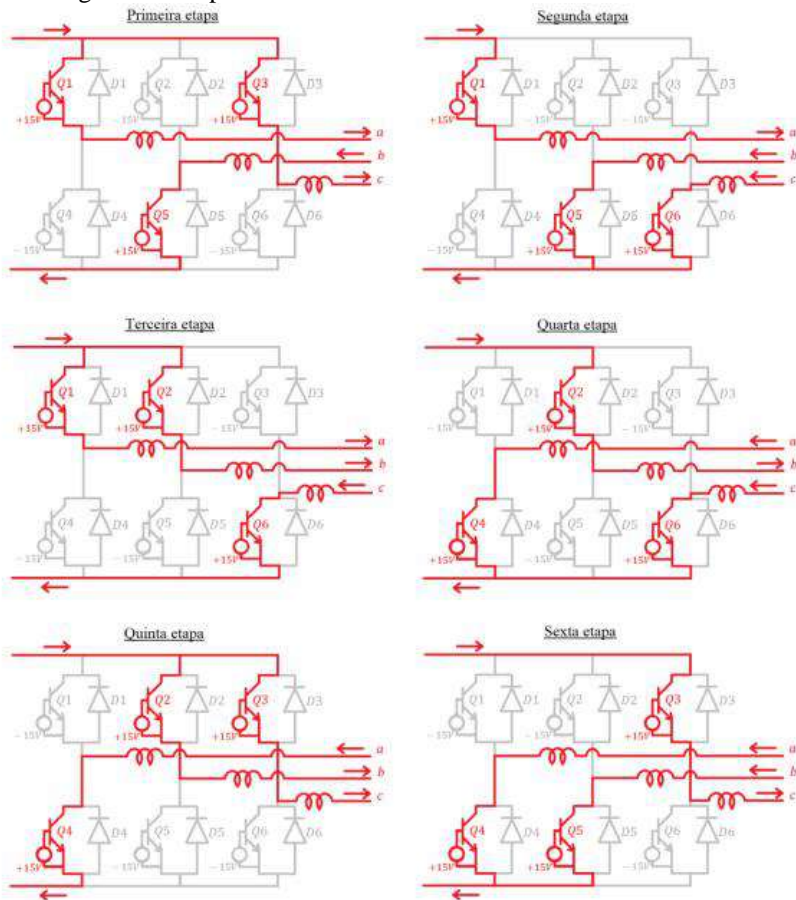
A Figura 9 mostra a sequência de acionamento do inversor trifásico com carga indutiva. A Tabela 1 indica as tensões do inversor em cada etapa de acionamento do inversor.

Figura 9: Circuito de um inversor trifásico.



Fonte: GUEDES (2015)

Figura 10: Etapas de funcionamento de um inversor trifásico.



Fonte: GUEDES (2015)

Tabela 4: Tensões do inversor em cada etapa de chaveamento.

Etapas	Presença de corrente		Tensões de polo			Tensões de linha		
	Com	Sem	v_{Ao}	v_{Bo}	v_{Co}	v_{AB}	v_{BC}	v_{CA}
1ª	1, 5, 3	4, 2, 6	$\frac{V_{CC}}{2}$	$\frac{-V_{CC}}{2}$	$\frac{V_{CC}}{2}$	V_{CC}	$-V_{CC}$	0
2ª	1, 5, 6	4, 2, 3	$\frac{V_{CC}}{2}$	$\frac{-V_{CC}}{2}$	$\frac{-V_{CC}}{2}$	V_{CC}	0	$-V_{CC}$
3ª	1, 2, 6	4, 5, 3	$\frac{V_{CC}}{2}$	$\frac{V_{CC}}{2}$	$\frac{-V_{CC}}{2}$	0	V_{CC}	$-V_{CC}$
4ª	4, 2, 6	1, 5, 3	$\frac{-V_{CC}}{2}$	$\frac{V_{CC}}{2}$	$\frac{-V_{CC}}{2}$	$-V_{CC}$	V_{CC}	0
5ª	4, 2, 3	1, 5, 6	$\frac{-V_{CC}}{2}$	$\frac{V_{CC}}{2}$	$\frac{V_{CC}}{2}$	$-V_{CC}$	0	V_{CC}
6ª	4, 5, 3	1, 2, 6	$\frac{-V_{CC}}{2}$	$\frac{-V_{CC}}{2}$	$\frac{V_{CC}}{2}$	0	$-V_{CC}$	V_{CC}

Fonte: GUEDES (2015)

2.6. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Regulamentações exigem que as usinas atendam às restrições ambientais e de eficiência energética.

Neste sentido, o emprego de tecnologia de controle e acionamento visam melhorar e solucionar problemas na geração de combustão e nas perdas de produção provinda por meio de sistemas de alimentação e exaustão de ar, através de ventilações forçadas.

Quanto aos fatores de desperdício de energia, pode-se elencar: perdas físicas no sistema e mau aproveitamento da energia gerada. Dentre tais, é possível combater o desperdício de energia com a implementação de estratégias de eficiência energética, visando a redução de custos e consumo de energia.

Vale ressaltar, que a evolução tecnológica industrial provinda com a automação e informatização aliados a eficiência energética são um diferencial na competitividade das empresas.

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

No que se refere a metodologia de pesquisa, a seguir é apresentado a tipologia de pesquisa, a unidade de análise, os instrumentos de coleta e a forma de análise dos dados.

3.1 Tipologia de pesquisa

A tipologia de pesquisa adotada é um estudo de caso, embasada em análise individualizada de uma caldeira de uma usina sucroalcooleira. Por meio da observação e coleta documental de dados da empresa se realiza a análise e discussão dos dados obtidos.

3.2 Unidade de análise

A pesquisa consiste na análise de uma caldeira do tipo aquotubular com capacidade volumétrica de 60000 m³N/h.

Os exaustores da caldeira são da marca Marelli, tipo H-16/1460/3-51W sendo um acionado ao lado direito e outro do lado esquerdo, ambos por polia. O desempenho de cada exaustor é detalhado na Tabela 1.

Tabela 5: Especificação técnica dos exaustores.

Variável	Valor
Capacidade volumétrica	78 000 m ³ /h
Temperatura dos gases exauridos para fora da caldeira	80° C
Temperatura máxima dos gases exauridos	185° C
Depressão estática na sucção	-500 mmCA
Potência ao rendimento de 65%	220 CV

Fonte: Autor

Os motores de cada exaustor possuem as características técnicas da Tabela 2.

Tabela 6: Especificações técnicas dos motores.

Categoria	Classe C
Potência	250 CV
Rotação	1150 rpm
Corrente nominal	386 A
Tensão nominal	440 V

Fonte: Autor

3.3 Instrumento de coleta de dados

O instrumento utilizado neste trabalho é o de coleta de documentos da organização, periódicos e publicações relevantes da literatura nacional e internacional sobre os tópicos de pesquisa.

3.4 Forma de análise dos dados

A análise é um tratamento qualitativo, não é estatístico e baseia-se na estruturação dos dados coletados, de forma a interpretá-los e permitir uma síntese do encontrado, auxiliando assim o processo de análise.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1. Análise e discussão da queima da caldeira

As caldeiras têm uma ótima eficiência na queima do combustível, atualmente o bagaço de cana possui um sério agravante, no qual a matéria prima recebida do campo apresenta-se contaminada com terras ou outros resíduos que dificultam a queima do bagaço nas caldeiras. Com isto baixa-se a eficiência energética das caldeiras.

Vale ressaltar que em algumas situações pode ocorrer o abafamento total das chamas, causando um breve desligamento do gerador que perderá a sincronização, tirando todo o processo fabril de trabalho.

A perda anual na produção de vapores das caldeiras tem gerado uma maior quantidade de hora homem para reparos durante o processo, sendo obrigatória tal parada por motivos emergenciais.

Tendo em vista que o processo atual de lavagem de cana melhora a queima, mas perde uma parte da sacarose do açúcar que é extraído durante a lavagem da cana e não tendo aproveitamento dessa matéria prima durante o processo da fábrica.

Uma condição interessante para o sistema é a implementação do processo de lavagem a seco, mas tal é um alto investimento. Para instalar todo o sistema de lavagem e necessário montar um sistema de logística e manutenção, essa discussão é válida por ser um agravante para as caldeiras, todavia este não é foco deste trabalho.

Hoje a situação atual da empresa está caótica, principalmente devido ao consumo demasiado de energia, situação que ainda não se agravou mais severamente, pois as caldeiras são fontes geradoras de energia. Sendo assim,

depois que as mesmas entram em sincronismo, a usina não necessita realizar a compra de energia da concessionária, mas injeta potência na rede.

Porém, com a melhoria no sistema de acionamento dos motores a tendência é reduzir a demanda de consumo da usina que atualmente está contratada em um valor razoavelmente alto. Nos itens seguintes será avaliado cada um dos sistemas de acionamento para os exaustores.

4.2. Análise do sistema de acionamento com compensadora para exaustores.

O acionamento dos motores da usina atualmente é realizado por meio da partida compensadora. Pela aplicação dos questionários pode ser verificado que a situação dos motores varia conforme a operação da caldeira, o que pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1 – Situação dos motores

Setores	Situação
Caldeira 1	Satura quando atinge 290A
Caldeira 2	Entra em modo de alerta ao subir a temperatura
Caldeira 3	Não consegue entrar em linha com as outras
Caldeira 4	Insuficiência de exaustão para o trabalho
Caldeira 5	Motores aquecendo em condições normais
Caldeira 6	Parada para manutenção

Fonte: Autor (2016).

No conjunto do sistema com a partida compensadora existe um problema quanto aos relés que funcionam como transformadores de corrente (TC). Todavia, por ser um sistema antigo já não encontra peça de reposição no mercado.

Valer enfatizar que esses TCs têm uma grande utilidade, pois são eles que controlam a corrente de pico máximo e mínimo de trabalho dos motores. Sendo assim, em uma eventual falha de um desses componentes, acarretará

em um dano considerável no equipamento, gerando reparos e custos com novos componentes.

Quando há uma falha no sistema, devido ao trabalho excessivo do motor implicando em uma alta corrente no circuito, isto acarreta em um dano para todo o conjunto da partida compensadora. Desta forma a equipe de manutenção tem que dobrar os esforços para manter o mínimo possível de eficiência no funcionamento do sistema.

4.3. Análise do sistema de acionamento com inversor de frequência para exaustores.

É perceptível que o desenvolvimento da eletrônica de potência permitiu a inserção e o aprimoramento de novas tecnologias na área de acionamento de máquinas elétricas nos setores industriais, como por exemplo o inversor de frequência.

O inversor de frequência tem uma série de vantagens em relação as duas outras formas de partidas apresentadas anteriormente, permitindo condições especiais para o trabalho. Deste modo é possível parametrizar um sistema de partida com rampa de aceleração, semelhante a *soft starter*.

Todavia, o inversor de frequência apresenta um diferencial, pois através de uma programação é possível controlar diferentes etapas do processo. Como por exemplo, uma partida suave no acionamento do exaustor, frenagens e o controle da velocidade de rotação do motor do exaustor de acordo com a operação da caldeira.

Embora o sistema de acionamento com inversor seja mais dispendioso, a sua aplicação implica em inúmeras vantagens e lucros provindo da maior eficiência energética comparado ao demais sistemas.

4.4. Análise comparativa e discussão entre os sistemas de acionamento.

Ora, a compensadora realiza o acionamento do exaustor somente no intervalo de partida e após tal período não há o controle de velocidade e torque para as possíveis variações de carga existentes durante o funcionamento da caldeira.

Quanto a *soft starter*, em sua atuação predominante durante a partida, conduz a uma redução dos níveis de corrente em comparação a partida compensadora. Entretanto, após o período de partida, o motor acionado pela *soft starter* fica sem controlabilidade de velocidade e torque.

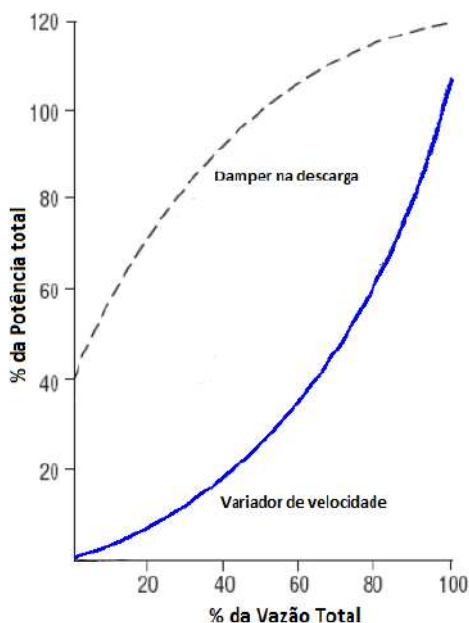
Um aspecto importante do processo da usina é que há vários motores operando na mesma linha de produção e com características nominais semelhantes. Sendo assim, ao utilizar-se o inversor de frequência ganha-se tempo com a programação única, isto é, basta realizar a programação para um inversor e replicar para os demais que possuem parametrização semelhante.

De fato o custo de implementação do acionamento com inversor de frequência é bem maior em relação a *soft starter* e compensadora. A razão para tal é que tanto o inversor de frequência quanto a compensadora necessitam ser dimensionadas especificamente para o acionamento de um motor, enquanto que a *soft starter*, por meio do *by pass*, pode realizar a partida de até 4 motores durante uma hora.

Com a utilização de inversores de frequência obtém-se uma eficiência energética maior em relação ao controle com *dampers*. Conforme mostrado na Figura 10, Salum (2011) destaca em seu estudo que o sistema de ventilação com conversores de frequência no controle de velocidade

possibilitam uma redução de consumo em comparação com os sistemas de controle com *dampers*, principalmente para vazões inferiores a 80% da vazão nominal.

Figura 11: Comparativo de consumo entre *damper* e variador de velocidade no sistema de ventilação.



Fonte: Salum (2011)

4.5. Eficiência energética dos sistemas de acionamento

Quanto ao custo associado entre as técnicas de acionamento, obtém-se os valores explicitados na Tabela 2.

A potência estimada do acionamento de uma máquina elétrica é dado pela soma do período de partida do acionamento t_a com é dado por:

$$P_a = \sum_{i=1}^{12} \frac{736 * P_i(CV)}{\eta_m * fp_m * \eta_a * fp_a} * \frac{t_a}{T} + \sum_{i=1}^{12} \frac{736 * P_i(CV)}{\eta_m * fp_m} * \left(1 - \frac{t_a}{T}\right) \quad 3)$$

onde t_a é dado em segundos; T é o período em segundos, que o motor estará em operação; $P_i(CV)$ é a potência do motor dado em CV; η_m é o rendimento do motor; fp_m é o fator de potência do motor; η_a é o rendimento do acionamento e fp_a é o fator de potência do acionamento.

Considerando que sejam utilizados os motores presentes atualmente no sistema. Logo, substituindo os dados dos motores e os parâmetros estimados do acionamento na expressão (3) considerando uma partida compensadora, obtém-se que:

$$P_{compensadora} = \sum_1^{12} \frac{736 * 250}{0.65 * 0.65 * 0.8 * 0.8} * \frac{1}{48} + \sum_1^{12} \frac{736 * 250}{0.65 * 0.65} * 0.98$$

= 5.29 MVA 4)

Com acionamento utilizando *soft starter* vale ressaltar que não há melhoria do fator de potência e gera harmônicos, como qualquer outro dispositivo de acionamento estático. Utilizando (3) para determinar a potência consumida com os mesmos motores, o acionamento por *soft starter* resulta em:

$$P_{soft\ starter} = \sum_1^{12} \frac{736 * 250}{0.65 * 0.65 * 0.9 * 0.8} * \frac{1}{48} + \sum_1^{12} \frac{736 * 250}{0.65 * 0.65} * 0.98$$

= 5.272 MVA 5)

Enquanto que para o acionamento com inversor de frequência dos motores, utilizando filtros adequados para redução de harmônicos, a potência consumida com os mesmos motores atuais é:

$$P_{inversor} = \sum_1^{12} \frac{736 * 250}{0.65 * 0.65 * 0.95 * 0.98} * \frac{1}{48} + \sum_1^{12} \frac{736 * 250}{0.65 * 0.65} * 0.98$$

$$= 5.238 \text{ MVA} \quad 6)$$

Nota-se que os motores de indução utilizados atualmente na indústria possuem baixos índices de fator de potência e rendimento. Logo, uma possibilidade é a realização da troca dos motores atuais e ineficientes por motores de alto rendimento.

Vale ressaltar que os motores presentes atualmente estão sobredimensionados para os exaustores da caldeira, devido principalmente pelo seu baixo índice de rendimento. Logo, ao se fazer a aquisição de novos motores pode se especificar uma potência nominal de 220 CV, para cada um dos motores dos exaustores da caldeira.

Consultando o catálogo da linha W22 IR3 Premium da WEG, seleciona-se um modelo de motor de seis polos, rendimento do motor η_m igual a 0.956 e fator de potência do motor fp_m igual a 0.81.

Recalculando a eficiência energética com tais motores com os três tipos de acionamentos estudados, obtém-se primeiramente para a partida compensadora que:

$$P'_{compensadora} = \sum_1^{12} \frac{736 * 220}{0.956 * 0.81 * 0.8 * 0.8} * \frac{1}{48} + \sum_1^{12} \frac{736 * 220}{0.956 * 0.81} * 0.98$$

$$= 2.541 \text{ MVA} \quad 7)$$

Para a *soft starter*:

$$P'_{soft\ starter} = \sum_1^{12} \frac{736 * 220}{0.956 * 0.81 * 0.9 * 0.8} * \frac{1}{48} + \sum_1^{12} \frac{736 * 220}{0.956 * 0.81} * 0.98$$

$$= 2.532 \text{ MVA} \quad 8)$$

E com inversor:

$$P'_{inversor} = \sum_1^{12} \frac{736 * 220}{0.956 * 0.81 * 0.95 * 0.98} * \frac{1}{48} + \sum_1^{12} \frac{736 * 220}{0.956 * 0.81} * 0.98$$

$$= 2.515 \text{ MVA}$$

Os dados obtidos estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 7: Eficiência energética da implementação dos sistemas de acionamento nos motores atuais.

Sistema de acionamento	Potência consumida com motores antigos <i>P</i> (MVA)	Potência consumida com motores redimensionados <i>P'</i> (MVA)	Redução no consumo <i>P'/P_{compensadora}</i> (%)
Partida compensadora	5.292	2.541	51.98
<i>Soft Starter</i>	5.272	2.532	52.15
Inversor de frequência	5.238	2.515	52.48

Fonte: Autor

4.6. Custo de investimento

Considerando para efeitos de cálculos que a tarifa da usina se enquadre no subgrupo A4 (2,3-25kV), Horossazonal Azul, os valores praticados pela concessionária de energia estão enfatizados no Quadro 1.

Quanto ao custo de energia da unidade consumidora com os acionamentos dos motores, utilizou-se o valor da tarifa com impostos agregado.

Considerando o horário de ponta, com funcionamento durante um intervalo de 8 hora diárias, sendo a demanda *D_m* da usina de 7000 kW, *a* a taxa sobre a demanda; *b* a taxa sobre o consumo dado em kWh; o tempo anual considerado de 960 horas, então o custo de energia da usina do sistema

atual (compensadora e motores antigos) é dado pelo cálculo da demanda D e da energia consumida Ec :

$$C = a * Dm + b * P * T_{anual} \quad 10)$$

$$C = 10,74 * 7000 \text{ kW} + 0,53665 * 5292 * 960 = \text{R\$ } 3.177.433,73 \quad 11)$$

Quadro 2: Bandeira tarifária A4 Azul

Tarifa Horária AZUL		Resolução ANEEL Nº 1.897, de 16 de junho de 2015	
A4 (2,3 a 25 kV)			
Tarifas	Resolução ANEEL	com Impostos: ICMS e PIS/COFINS	
Demanda (R\$/kW)			
Ponta	21,91	34,12	
Fora de Ponta	6,90	10,74	
Ultrapassagem Ponta	43,82	68,25	
Ultrapassagem Fora de Ponta	13,80	21,49	
Consumo (R\$/kWh)			
Ponta	0,51424	0,80099	
Fora de Ponta	0,34453	0,53665	
Vigência em 24/06/2015			

Fonte: COPEL (2016)

Avaliando o custo de energia dos três diferentes tipos de acionamento com a suposição de aquisição de motores de alto rendimento, a demanda de potência da usina será reduzida.

Estimando que nesta readequação a demanda média seja aproximadamente de 4300 kW, obtém-se o custo de energia anual do acionamento C_a com a partida compensadora:

$$C = a * Dm + b * P'_{compensadora} * T_{anual} \quad 12)$$

$$C_a = 10,74 * 4300 \text{ kW} + 0,53665 * 2541 * 960 = \text{R\$ } 1.355.264,55 \quad 13)$$

E utilizando a *soft starter* para o acionamento dos motores de alto rendimento, o custo de energia anual C_a deste acionamento será:

$$C_a = a * Dm + b * P'_{soft\ starter} * T_{anual} \quad 14)$$

$$C_a = 10,74 * 4300 \text{ kW} + 0,53665 * 2532 * 960 = \text{R\$ } 1.350.627,88 \quad 15)$$

E com inversor de frequência o custo de energia anual do acionamento C_a para os motores de alto rendimento é:

$$C_a = a * Dm + b * P'_{inversor} * T_{anual} \quad 16)$$

$$C_a = 10,74 * 4300 \text{ kW} + 0,53665 * 2515 * 960 = \text{R\$ } 1.341.869,76 \quad 17)$$

Portanto, avaliando o custo de investimento por meio de valor orçado, conforme descrito no quadro 3 e pela a economia de energia provinda do acionamento com as diferentes técnicas de acionamento dos motores de alto rendimento, obtém-se os valores de *payback* descritos na Tabela 5.

Tabela 8: Custo de investimento dos sistemas de acionamento e com motores de alto rendimento.

Sistema de acionamento	Custo de investimento (R\$)	Economia anual no consumo com (C-Ca) (R\$)	Payback Simples (Mês)
Partida compensadora	843.903,00	1.822.169,18	5,5
<i>Soft Starter</i>	863.285,76	1.826.805,85	5,7
Inversor de frequência	1.252.037,04	1.835.563,97	8,2

Fonte: Autor

Observa-se pela Tabela 5 que o investimento em motores de alto rendimento possibilita a indústria uma grande economia de energia. E os tempos de retorno de investimento são de curto prazo.

Ressalta-se ainda que dentre as soluções para o sistema de acionamento, observa-se que deve ser avaliado os benefícios obtidos a longo prazo do sistema de acionamento com inversor de frequência, pois os retornos são satisfatórios, conforme já analisado e discutido nos itens 4.4 e 4.5.

5 CONCLUSÃO

Este estudo é de grande importância para a empresa estudada pelo fato dela ter sido fundada em 1974. Com o decorrer do tempo é natural ocorrer a defasagem de tecnologia e neste quesito a empresa ficou com seus equipamentos desatualizados que refletem em altos custo com o consumo de energia elétrica.

Com os resultados obtidos neste trabalho enfatiza-se que a empresa deve buscar a melhoria contínua nos sistemas de acionamento das máquinas

do parque fabril, pois possibilitará aumento de produção, aumento de arrecadação financeira e sustentabilidade ambiental.

Portanto, é visível a ausência de tecnologia no acionamento dos exatores da usina e isto reflete-se na atual ineficiência energética. Logo, cabe a equipe de gestão da usina tomar a decisão de reconhecer a necessidade de acompanhar as tendências do mercado tecnológico, visando assim a posição no pódio para as grandes safras vindouras.

Esta defasagem tecnológica faz com que a empresa enfrente problemas com sustentabilidade e fornecimento de energia, pagando um alto preço pela energia elétrica devido a seu alto consumo e baixa eficiência.

Conclui-se que tudo será possível ser desenvolvido com as ajudas de custo benefício e com os ganhos extras que serão obtidos, fica claro que é possível fazer tais mudanças que serão de grandes melhorias para a empresa e também o meio ambiente, olhando do lado que diz a respeito da eficiência energética.

Abstract

Energy efficiency in the machinery drive is a very important issue for the industry. Studies show that many Brazilian industries still have drive systems that are outdated. In this context, this work presents information of results obtained by analysis and observation of a set of drive motors extraction fans of a boiler by means of compensating departure. Data and characteristics of the current drive are tabulated. Through literature review, the most current electrical machinery drive technologies are presented. The analysis of investment cost, the payback time, reduced values of energy consumption and energy efficiency ratios and power quality of each of the systems are presented.

Keywords: Rewarding Starter; Soft Starter; Inverter frequency; sugarcane mills

REFERÊNCIAS

AZEVEDO, V. L.; MENDES, L. E. Análise transitória do motor de indução trifásico. 2006. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2015. Ano base 2014: Relatório Síntese. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

COPEL. Tarifa Horossazonal Azul A4. Disponível em <http://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Frot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F566327c0dbad85e50325768f006950d5> Acesso em 19 de maio de 2015.

CUNHA, L. Motores elétricos: movendo o mundo [Internet]. Agosto de 2009.

Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/132-radiografia-motoreletricos-movendo-o-mundo.html> Acesso em 21 de junho de 2015.

ELETROBRÁS. Eficiência Energética na Indústria; agosto de 2009, p.16; Disponível em: <http://www.cni.org.br/portal/data/files/00/FF808081234E24EA0123627A07156F8E/Eficiencia.pdf> Acesso em 21 de junho de 2015.

FALCONE, A.G. Motores de Indução: Manutenção e Instalação. São Paulo: LVBA Comunicação, 1995. 6 p.

FRANÇA, Leo Sérgio. Acionamentos Industriais. Notas de aula do curso de Comandos Elétricos.

FRANCISCO, A. M. S. Motores de Indução Trifásico. Viseu: [s.n.], 2006. 250 p.

GUEDES, S. D. Projeto de inversor trifásico aplicado ao acionamento de motor de indução. Monografia de Engenharia Elétrica. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

NASCIMENTO JÚNIOR, Geraldo Carvalho do. Máquinas elétricas: teoria e ensaios . São Paulo: Érica, 2006. 260 p.

GARCIA, A. G. P. Impacto da Lei de Eficiência Energética para Motores Elétricos no Potencial de Conservação de Energia na Indústria. 2003. 127 p. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. Rio de Janeiro, 2003.

JUSTFANS. Acoustic Inline Mixed Flow Duct Fan – TDSILENT. Disponível em: <http://www.justfans.co.uk/reviews.php> Acesso em 13 de maio de 2016

DOMAŃSKI, P. D.; LEPPAKOSKI, J.; DURANDO, E. P.; ONOFRE, R. C. Melhoria de eficiência na queima de bagaço em caldeira de grelha. 200-.

LUFTMÁXI. Exaustores axiais: linha industrial. Disponível em: <http://climatizadoresevaporativo.com.br/index.php?pg=exaustoraxialindustria> l Acesso em 13 de maio de 2016.

SALUM, A. D. Eficiência energética em sistema de combustão de caldeira. Monografia Especialização em Engenharia Econômica. Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

SCARMIN, Alcir. Otimização da eficiência energética no acionamento de motores de indução utilizando técnicas de controle adaptativo em tempo discreto. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2011.

SEALE, Eric. DC Motors: How they work in 4 parts. Disponível em: http://www.solarbotics.net/starting/200111_dcmotor/200111_dcmotor.html. Acesso em 18/06/2015.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. Motores Elétricos. Disponível em: <http://catalogo.weg.com.br/files/wegnet/WEG-motores-eletricos-baixa-tensaomercado-brasil-050-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em 21 de junho de 2015

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. Chave de Partida Soft-Starter SSW 04. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/1-2186.pdf> Acesso em 19 de maio de 2016.

WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS. Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM. Jaraguá do Sul, SC. 2010.

ZOTTIS, Juliana; PAGNOSSIN, Rodrigo de Sousa. Tiragem. Disciplina de geração de vapor. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2008.

APÊNDICE

Quadro 3: Orçamento de motores de alto rendimento, soft starter e inversor de frequência.

Seq	Qtde	Un	Descrição	Vlr.Unit.	Vlr.Total	NCM	Prev.Entrega
1	1,000	UN	MOTOR 250CV 6P 355M/L WFF2 MOTOR ELÉTRICO TRIFÁSICO 250 CV 06 355M/L 220/380/440 C/ 12 TERM 60HZ R3D IPW55 IE2 W22 REFRIGERAÇÃO: TPVE TOTAL FECH VENTIL. EXTERNA PLANO DE PINTURA: 203A COR ACABAMENTO: RAL 5009 APLICAÇÃO MOTOR: W22 CHAVETA: CHAVETA B DRENO: DRENO BORRACHA AUTOMÁTICO MATERIAL EIXO: SAE 4140 FUO DE CENTRO ROSCADO: SIM TIPO E FORMA BALANÇAMENTO: NORMAL 1/2 CHAVETA SENTIDO DE ROTAÇÃO: AMBOS GRAKEIRA. COM GRAKEIRA (DIANT/TRAS) TIPO GRAMA: MOBIL DCLVREX EM MATERIAL. INVOLUCRO: FERRO MATERIAL V	70.325,25	70.325,25	85015310	Até 20 dia(s)
2	1,000	PC	SOFT-STARTER BRSSW070312T5EH2Z	6.460,92	6.460,92	90328911	Imediato
3	1,000	UN	INVERSOR ERCFW110312T4SZ	34.011,17	34.011,17	85044050	Até 10 dia(s)
	Sub.Total				110.797,34		
	Icms St						
	Total				110.797,34		