

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DANILO EXPEDITO MICHELIN

**CONTROLE DE TORQUE EM LAMINADOR DE SOJA BUSCANDO EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA**

**CAMPO MOURÃO
2021**

DANILO EXPEDITO MICHELIN

**CONTROLE DE TORQUE EM LAMINADOR DE SOJA BUSCANDO EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA**

Torque control in soy laminator seeking energy efficiency

Trabalho de Dissertação apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre em Inovações Tecnológicas do Programa de Mestrado Profissional de Inovações Tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Roberto Ribeiro Neli

**CAMPO MOURÃO
2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



DANILO EXPEDITO MICHELIN

CONTROLE DE TORQUE EM LAMINADOR DE SOJA BUSCANDO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Inovações Tecnológicas da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Inovações Tecnológicas.

Data de aprovação: 25 de Junho de 2021

Prof. Roberto Ribeiro Neli, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Leandro Castilho Brolin, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Leonardo Breseghello Zoccal, Doutorado - Universidade Federal de Itajubá - Unifei

Prof. Marcio Rodrigues Da Cunha, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 25/06/2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me guiou durante o período de mestrado, do qual foram muitas horas de esforço e tempo longe da família.

Agradeço também a minha esposa Adriana que me apoiou todo esse tempo e entendeu o tempo que estive fora de casa para estudar, além da Maria Clara que está por vir que antes mesmo de estar aqui já me motiva muito.

À minha irmã Ana Paula, que me ajudou muito na elaboração textual desse trabalho.

Aos meus pais, pois sem eles por mim nem teria começado os estudos e graças ao empenho deles estou cursando um mestrado hoje.

Gostaria de agradecer a diretoria e gerência industrial da empresa onde trabalho, pela confiança e apoio para execução física deste trabalho, onde apresentou retorno financeiro para empresa.

“Quem não luta pelo o que quer não
merece o que deseja.”
(Desconhecido)

RESUMO

Atualmente, a agroindústria nacional está em franco desenvolvimento, tanto em expansão como tecnológico. Para esse desenvolvimento é importante levar em consideração a demanda energética, bem como, o impacto ambiental. No setor privado, além da necessidade de desenvolvimento também existe a necessidade de aprimorar modelos e técnicas já utilizadas, visando o aumento da produtividade e, conseqüentemente, dos lucros. O objetivo deste trabalho é aprimorar o uso eficiente da energia elétrica utilizando inversores de frequência para controlar torque nos motores de laminação de soja, um processo que é responsável por grande parte do consumo de energia elétrica nas indústrias de esmagamento. Para alcançar esse objetivo a metodologia proposta baseou-se em cálculos e teorias que verificaram a possibilidade de melhorar o desempenho dos laminadores. Assim, na prática, foram instalados inversores de frequência em dois laminadores, que tiveram os consumos de energia elétrica monitorados antes e depois da instalação dos inversores de frequência. Durante os testes pode-se verificar que não houve melhoria quanto a redução de custos com consumo de energia elétrica, verificou-se porém que houve uma melhoria com relação á qualidade de energia, outro ponto avaliado foi necessidade de reavaliar o banco de capacitores instalado atualmente na fábrica.

Palavras-chave: agroindústria; inversor de frequência; laminação de soja; preparação de soja.

ABSTRACT

Currently, the national agro-industry is in full development, both in expansion and in terms of technology. For this development, it is important to take into account the energy demand, as well as the environmental impact. In the private sector, in addition to the need for development, there is also a need to improve models and techniques already used, aiming at increasing productivity and, consequently, profits. The objective of this work was to improve the efficient use of electric energy using frequency inverters to control torque in the soy rolling motors, a process that is responsible for a large part of the electric energy consumption in the crushing industries. To achieve this objective, the proposed methodology was based on calculations and theories that verified the possibility of improving the performance of the rolling mills. Thus, in practice, frequency inverters were installed in two rolling mills, which had their electricity consumption monitored before and after the installation of the frequency inverters. During the tests, it can be seen that there was no improvement in terms of cost reduction with electricity consumption, it was found, however, that there was an improvement in relation to power quality, another point evaluated was the need to reassess the currently installed capacitor bank in the factory.

Keywords: agro-industries; frequency inverter; soy preparation; soy rolling.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Orçamento para aquisição dos IF.....	23
Tabela 2. Resultados Laminador 9.....	27
Tabela 3. Comparativo média com IF X sem IF – Laminador 9.....	28
Tabela 4. Resultados Laminador 13.....	29
Tabela 3. Comparativo média com IF X sem IF – Laminador 13.....	29
Tabela 5. – Variação da potência aparente do trafo em função do fator de potência.....	30
Tabela 6. – Variação da seção de um condutor em função do fator de potência.	30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estimativa de consumo de máquinas acionadas por motores elétricos	19
Figura 2 – Representação fluxo do processo de laminação se soja.....	20
Figura 3 – Esquema de ligação Embrasul para sistema trifásico balanceado.....	22
Figura 4 – Laminador de soja e seus principais componentes.....	23
Figura 5 – Fluxo linha laminadores linha B.....	24
Figura 6 – Partidas Suaves que originalmente partiam os motores.....	25
Figura 7 – Inversores de frequências instalados no lugar das partidas suaves...	26
Figura 8 - Comparativo laminador 9.....	28
Figura 9 – Comparativo laminador13.....	30

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A	Ampères
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CV	Cavalo vapor
EL	Energia Elétrica
IF	Inversor de Frequência
kVAr	kilovolts- Ampér- Reativos
kWh	Quilowatts/hora
RPM	Rotações Por Minuto
V	Volts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	14
2.1	OBJETIVO GERAL	14
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3	DESENVOLVIMENTO	15
3.1	REFERENCIAL TEÓRICO	15
3.1.1	Motores Elétricos	16
3.1.2	Inversores de Frequência	17
3.2	METODOLOGIA	20
3.3	INSTALAÇÃO DO IF	24
4	RESULTADOS	27
4.2	RESULTADOS PRÁTICOS	27
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
	REFERÊNCIAS	34

1 INTRODUÇÃO

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 energia elétrica (EL), pois é um dos maiores insumos industriais, que em algumas unidades industriais, pode representar até 40% no custo total do processo produtivo (FIRJAN, 2016).

A energia é um bem valorizado na sociedade, pois com ela é possível produzir bens de consumo e proporcionar a maioria dos serviços que existem, beneficiando a maioria da população mundial. Devido ao seu extenso uso, vem surgindo na comunidade científica o questionamento do ponto de vista sustentável e da otimização do uso da energia, e de maneira direta, dos recursos naturais (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2011).

Esse questionamento sobre a otimização do uso de energia também surgiu no âmbito industrial. Nesse setor, o conceito de eficiência energética é recente, pois, antigamente, não existia essa preocupação em relação ao consumo, além da energia ser mais barata. Com o passar dos anos, o consumo de EL já faz parte dos custos a serem gerenciados e planejados no setor industrial (TASSINI, 2012).

O conceito de eficiência energética é, de maneira geral, fornecer mais serviços utilizando a mesma quantidade de energia, ou, os mesmos serviços com um consumo de energia menor (SHOVE, 2018). Esse conceito no âmbito industrial está interligado com o nível de competitividade da empresa, sendo que a melhoria da eficiência energética é uma estratégia vital que maximiza resultados e diminui os custos operacionais. Esses fatores aumentam a competitividade da empresa no mercado (LI; TAO, 2017).

Nesse contexto, para a extração do óleo de soja existe uma etapa que se chama laminação, que consiste em fazer com que o grão de soja, após a quebra e separação de casca, se pareça como uma lâmina. Nesse processo são utilizadas 13 máquinas denominadas laminadores com capacidade de processamento de 125 toneladas/hora de soja, cada uma delas com 2 motores elétricos trifásicos 380 V, 130 A de 100 CV e 1160 RPM para mover os rolos de laminação que pesam em torno de 7 toneladas cada. Observa-se que os motores trabalham em torno de 70% de sua capacidade nominal se comparados com a corrente elétrica nominal de placa. O

motivo disso é a necessidade de vencer a inércia dos rolos, que após vencida, necessita de uma força menor para manter o movimento.

A motivação do trabalho surgiu observando o comportamento dos motores via supervisor de operação, onde é possível verificar os motores em funcionamento e por sua vez os percentuais de corrente elétrica com base na corrente elétrica nominal de cada motor. Foi observado um percentual de corrente elétrica muito baixa se comparado aos demais motores, com isso foi dado início ao estudo proposto por este trabalho.

A partir da observação do funcionamento destes motores, surgiram algumas hipóteses para melhorar a eficiência energética nesse ponto produtivo, sendo assim, as hipóteses levantadas foram as seguintes:

- Trocar os motores por uma potência menor.
 - Porém isso já foi testado no passado e não obteve bons resultados, essas máquinas tem manutenções preventiva periódicas ficando um ou mais laminadores parados. Para não ocorrer perda de produção nesse período as demais tem que suprir a demanda e com motores de potência menor essa necessidade não era suprida.
- Implementar um sistema de embreagem que transferisse a potência para um motor secundário de menor potência que assumisse após a partida;
 - Demandaria altos custos com esse sistema de embreagem além de grandes alterações na parte mecânica dos laminadores. Outro problema ao se adotar este tipo de solução é que o espaço no local é limitado.
- Instalar um motor com duas potências na mesma carcaça;
 - Esse tipo de motor não é padrão de fabricação, sendo fabricado para esta aplicação de forma bem específica, quase que personalizado. Outro ponto é que com um tipo de motor desse, suas peças são específicas e feitas sob medida o que aumentaria os custos de manutenção.

- Instalar um Inversor de frequência (IF) para fazer o controle de torque.
 - O inversor de frequência é de fácil instalação e parametrização. Sua manutenção é baixa, e os painéis existentes comportam sua instalação.

Dentre as hipóteses a que se mostrou mais vantajosa foi a de fazer um controle de torque com IF, pois se mostrou mais simples, eficiente e com menos custos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar o controle do torque e da velocidade dos motores elétricos de um laminador de soja com o objetivo de reduzir o consumo de EL.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo específico desse trabalho é buscar uma melhor eficiência energética para a etapa de laminação de soja assim tem-se os seguintes objetivos secundários:

- Instalar inversores de frequência em dois laminadores, sendo um no meio da linha e outro no final da linha de produção;
- Coletar dados do equipamento no estado anterior a instalação do IF;
- Avaliar novas possíveis configurações de velocidade para melhorar a lâmina de soja.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 REFERENCIAL TEÓRICO

A EL está presente na maioria dos processos agrícolas, sendo de imprescindível importância no desenvolvimento e funcionamento de uma agroindústria. Sendo a eletricidade um recurso tão importante, ela deve ser utilizada de forma racional e conservatória, pois crises ambientais ameaçam sua geração, e conseqüentemente, sua oferta, implicando em aumento dos custos econômicos, sociais e ambientais. Diante da flutuação/sazonalidade do custo da EL no Brasil é justificada a necessidade da EL ser melhor aproveitada, contribuindo para a diminuição de desperdícios e do seu uso racional, bem como com impactos positivos no âmbito econômico do setor agroindustrial (DAVID, *et al*, 2016).

Nesse contexto é inserido o conceito de eficiência energética, que pode ser definida como um conjunto de atividades sistêmicas que possuem o objetivo principal de otimizar o uso de energia, bem como, de suas fontes. A eficiência energética visa otimizar o uso das energias não renováveis, e também das renováveis. Esse conceito dentro da indústria está relacionado com a energia gerada na saída e a energia disponível na entrada de um sistema. Nesse sentido, pode-se dizer que para um sistema ser considerado eficiente ele precisa reduzir as perdas, otimizando o uso da energia disponibilizada na entrada (PEREIRA, 2009).

Sendo assim, entender e utilizar os conceitos de eficiência energética dentro da agroindústria pode diminuir os impactos sociais e ambientais, bem como, diminuir os custos com a produção, aumentando a competitividade da empresa. Para que isso ocorra é importante não só conhecer os conceitos de eficiência energética, mas também conhecer os equipamentos utilizados na indústria e os pontos possíveis de melhora em cada um deles.

A maioria das unidades armazenadoras de grãos estão inseridas no sistema trifásico de alta tensão, superior a 2300 V, enquadrando-as em um sistema tarifário específico (DAVID, *et al*, 2016).

3.1.1 Motores Elétricos

A partir da descoberta de Nicola Tesla sobre a existência do campo girante, em 1887, os motores elétricos vem sofrendo constantes modificações. Essas mudanças são decorrentes da necessidade em se obter potência e conjugado para atender vários tipos de demanda. Assim, surgiram motores elétricos com melhores sistemas de ventilação, novos isolantes elétricos e com propriedades magnéticas melhoradas. Essas alterações também visam a eficiência energética e contribuem na economia da energia elétrica utilizada (RAMOS, 2009).

Em relação ao consumo de EL na região Sul do Brasil, o setor industrial é responsável por utilizar 37,8% entre os setores, seguido pelo uso residencial com a marca de 25,3% (BRASIL, 2019). Este elevado consumo do setor industrial está relacionado com a utilização de motores elétricos (RAMOS, 2009).

Os motores elétricos podem ser divididos em motores de corrente alternada e de corrente contínua. No âmbito industrial, os motores mais utilizados são os que possuem corrente alternada, pois possuem construção simples e manutenção com custos reduzidos, em comparação com motores de corrente contínua (RAMOS, 2009). Além disso, a maioria dos motores elétricos de corrente alternada utilizados na indústria são assíncronos, por possuírem estruturas simples e robustas, possuindo baixo custo (KORKMAZ, *et al*, 2014).

Entre os motores mais utilizados pelo setor industrial destaca-se o motor trifásico de indução com rotor de gaiola. O funcionamento deste motor está relacionado com o princípio de formação do campo magnético girante, que é gerado no estator por meio da passagem da corrente elétrica em suas bobinas, cujo fluxo, por efeito de sua variação, se desloca em torno do rotor. Assim, são geradas correntes induzidas que possuem a tendência de se opor ao campo girante, mas são arrastadas por ele. O rotor deste tipo de motor é formado por barras em conjunto, que são interligadas por anéis condutores, isso confere uma velocidade de operação praticamente constante, com pequenas variações (RAMOS, 2009).

Este tipo de motor possui algumas perdas, tendo em vista que o motor elétrico é um conversor de energia que se baseia em princípios eletromagnéticos, sendo assim, impossível que a conversão tenha 100% de aproveitamento, devido as perdas que ocorrem no interior do motor. Os principais tipos de perdas são as de Histerese e Foucault (RAMOS, 2009).

Ainda em relação às perdas pode-se citar as perdas fixas, que são de maneira geral independente da carga instalada no eixo, são as perdas mecânicas e relacionadas ao núcleo do motor. Também existem as perdas variáveis, que podem variar com o carregamento do motor, esse tipo de perda está relacionado com perdas suplementares e nos enrolamentos do estator (LIMA, *et al*, 2015).

Em se tratando de motores elétricos, o momento mais crítico de sua operação é a partida, porque para sair do estado de inércia o motor precisa de uma corrente maior do que para se manter movimentando. O aumento da corrente durante a partida do motor está a cerca de 6 a 8 vezes acima da corrente nominal do motor, dependendo da carga aplicada ao seu eixo (FRANCHI, 2008).

Para tanto, existem vários tipos de estratégias utilizadas na partida, como partida direta, partida estrela, partida compensadora e a partida eletrônica *soft-starter*. Esse sistema *soft-starter*, é composto por chaves de partida baseadas em componentes eletrônicos. Esses componentes são destinados à proteção de motores de indução trifásicos, aceleração e também a desaceleração. Assim, de maneira geral, apenas uma fração da tensão média que está disponível na rede é aplicada ao motor no momento da partida (MAMED, 2010).

Cada um dos tipos de acionamento de motores elétricos precisa levar em consideração a aplicação para o qual será destinado o motor. Além desses tipos de partida, existe a possibilidade da instalação de IF, que em alguns casos otimiza o uso da EL além de durante sua partida e operação.

3.1.2 Inversores de Frequência (IF)

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).

O IF é um equipamento que atua variando a rotação de acionamento de um motor elétrico, com eficiência e rapidez, alterando a frequência da tensão que é aplicada ao motor, permitindo que se controle sua rotação (LIMA, *et al*, 2015).

Existem várias formas para a aplicação de IF visando economia de EL e que muitas vezes não são notadas pela maioria dos usuários. Das aplicações que mais se destacam se enquadram as bombas centrífugas e ventiladores, onde o torque da

carga aumenta com o quadrado da velocidade e o consumo de EL com o cubo da velocidade (FRANCHI, 2013).

O IF tem como função básica o fornecimento de uma tensão ou corrente alternada, apresentando como amplitude, frequência e forma o resultado de um sistema de controle com esta finalidade. Os IFs devem, a princípio, ter um sinal de saída independente de quaisquer flutuações ou alterações no sinal aplicado na entrada. Como resultado, pode controlar a potência (velocidade + torque) dos motores AC. Na fórmula mostrada a seguir, é possível verificar que a velocidade de rotação de um motor AC depende da frequência da rede que alimenta este motor. Portanto, quanto maior a frequência, maior a rotação.

$$N = \frac{120 * F}{P}$$

Para um motor de dois polos temos:

$$N = \frac{120 * 60}{2} = \frac{7200}{2} = 3600$$

Onde:

N: rotação do motor em RPM;

F: frequência da alimentação, em Hz (frequência de rede do brasil 60Hz);

P: número de polos do motor.

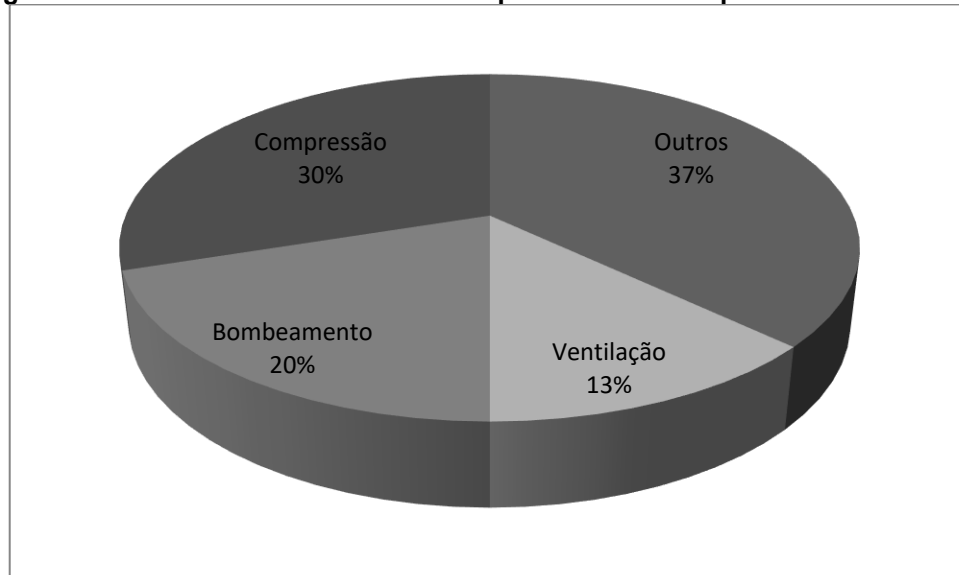
Então, a função prática de um IF é controlar a frequência do sinal de alimentação que será aplicado no motor a ser controlado, alterando assim a sua rotação.

De forma análoga o conceito é parecido com o que acontece em um automóvel no caso de uma subida é necessário acelerar e, conseqüentemente, haverá um gasto maior de combustível. Quando se está em locais sem desnível não é necessária uma grande aceleração, mas sim apenas a manutenção da velocidade, e sem aumento de aceleração economiza-se combustível. Já quando o carro se encontra em uma descida, ocorre a desaceleração e, portanto, não há gasto com o combustível para o motor, além de, muitas vezes, precisar reduzir a velocidade utilizando os freios. Se a comparação for feita 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 acionamentos de máquinas e equipamentos mecânicos são feitos por meio de motores elétricos e estes, por sua vez, têm grande importância econômica para as indústrias. 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 mais utilizados na indústria.

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



Fonte: Adaptado de FRANCHI (2013).

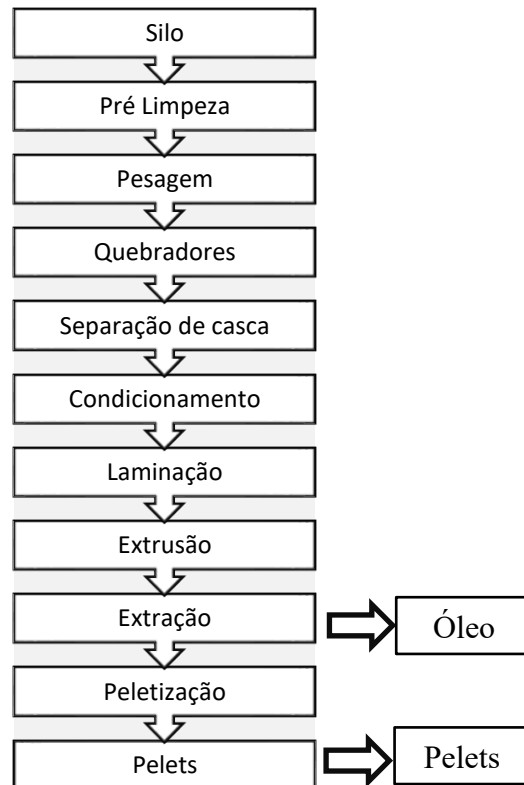
Segundo Franchi (2013), um exemplo de viabilidade econômica é o uso de IF em processos de ventilação onde é largamente utilizada, pois apresenta diversas vantagens, tais como:

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

3.2 METODOLOGIA

A metodologia empregada para execução desse projeto trata-se de, primeiramente, escolher um dos 13 laminadores para o projeto. Existem duas linhas definidas como A e B de laminadores, sendo uma com 6 e outra com 7. A figura 2 apresenta o fluxo do processo de extração de óleo.

Figura 2 – Representação fluxo do processo de laminação se soja



Fonte: Adaptado de MASIEIRO (2020).

Segundo MASIEIRO, o fluxograma para extração de óleo de soja se inicia nos silos de armazenamento, passa pelo sistema de limpeza para remover impurezas através de peneiramento e separação magnética. Após essa etapa são direcionados para um sistema de pesagem onde é realizado o controle de regulagem do que é processado na fábrica. No processo de ruptura, a soja é reduzida para 1/6 do grão inteiro e a separação de cascas é feita por aspiração depois do processo de ruptura para retirar a casca, pois essa reduz a proteína do farelo. Após este processo, é feito o condicionamento da soja onde os grãos são aquecidos a aproximadamente 65°C em um processo chamado de laminação, que é a etapa objeto desse estudo. Nesta etapa os grãos são transformados em flocos com 0,2 à 0,4 mm e um diâmetro entre

10 à 30 mm. Depois de passar pelo laminador um transportador leva a lamina até o processo de extrusão, cujo objetivo é aumentar o peso específico do material facilitando o processo de extração de óleo.

Após isso, ocorre o processo de extração, baseado na extração do óleo da massa expandida gerando dois produtos: o óleo de soja e o farelo; esse segundo é peletizado ou moído.

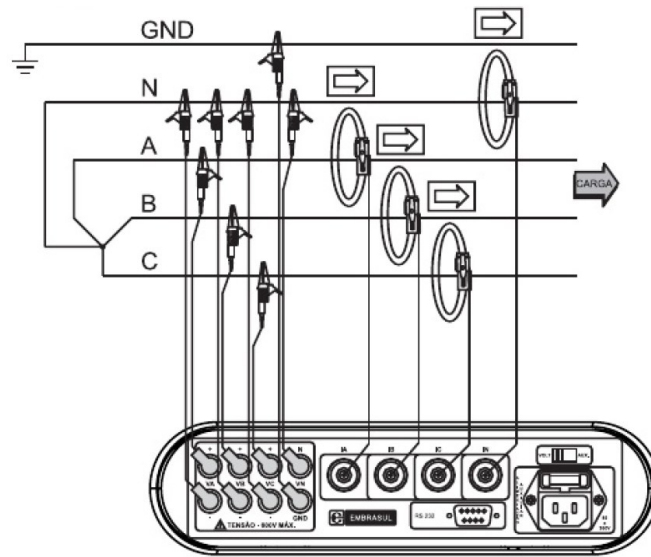
Na etapa de laminação existem dois transportadores de corrente um em cada linha, respectivamente, A e B, que distribuem os grãos entre as máquinas. Os primeiros laminadores recebem uma maior carga durante o processo, os últimos laminadores em alguns momentos durante o processo podem ficar sem produto por serem os últimos da linha.

Devido a esses dois motivos a melhor escolha seria uma máquina que estivesse a nível intermediário no transportador. Essa escolha garante que ela estaria sempre com produto e com carga média. Sendo assim o primeiro laminador escolhido foi o 9.

Primeiramente foi acompanhado o consumo de EL de cada motor por aproximadamente 5 dias corridos por 24 horas. Durante a medição foram registradas as médias do fator de potência, potência ativa, reativa e aparente além da corrente nominal. O instrumento utilizado para as medições de consumo é o analisador de EL RE6000 da empresa Embrasul, ilustrado na figura 3.

O ponto de medição será na saída da seccionadora fusível, conforme figura 3. Esse ponto foi escolhido para que seja medido o consumo da partida eletrônica suave existente. Quando o IF for instalado o mesmo ponto de medição será utilizado.

Figura 3– Esquema de ligação embrasil para sistema trifásico balanceado



Fonte: EMBRASUL (2014).

3.3 INSTALAÇÃO DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA (IF)

Para a execução do projeto, toda a infraestrutura foi fornecida pela cooperativa. Em relação aos técnicos e eletricitas especializados para a instalação do IF, existem os técnicos do setor, além da equipe de automação que realizou toda a interface homem máquina.

Foram adquiridas duas unidades de IF e sendo que marca escolhida para a aplicação foi a Siemens, por razões técnicas e comerciais. Para essa escolha foi levado em consideração o custo do equipamento, a experiência com o equipamento e o tamanho físico, se comparado com as demais marcas disponíveis no mercado, como por exemplo a WEG, Schneider e ABB. Isso ocorreu especialmente devido a parceria que a cooperativa tem com a Siemens, além da grande experiência interna que se tem na configuração e instalação desse tipo de equipamento. O orçamento para aquisição dos IF é de:

Tabela 1. Orçamento para aquisição dos IF.

Item	Descrição	Quantidade	Preço Unitário	Total
1	INVERSOR DE FREQUÊNCIA 3 f 380 - 480 v/ 201 A 132 KW G120 c 6SL3210-1KE324UF1 -SIEMENS	2	R\$ 29.339,18	R\$ 58.678,36

Fonte: Autoria Própria (2021).

Inicialmente, foi realizada uma pesquisa junto aos funcionários de produção, que trabalham diretamente com os equipamentos e conhecem muito bem a fábrica. Nesta pesquisa foram questionados os motivos pelo qual os laminadores do início da linha, que sempre operam com capacidade máxima de entrada de produto, têm correntes elétricas tão baixas. A informação obtida foi que este era um questionamento que também os intrigava e que não se tinha conhecimento sobre os motivos dessa ocorrência.

Para melhor compreender essa questão foi necessário entender a composição de cada laminador. Em relação à parte de controle de dosagem, cada conjunto tem um dosador, que é um motor com IF e uma guilhotina, sendo que o uso concomitante dos dois ajusta a quantidade de produto que o laminador recebe. Esse IF é controlado pelo último laminador que tem um transmissor de nível que ajusta todos os dosadores de sua linha.

Figura 4 – Laminador de soja e seus principais componentes

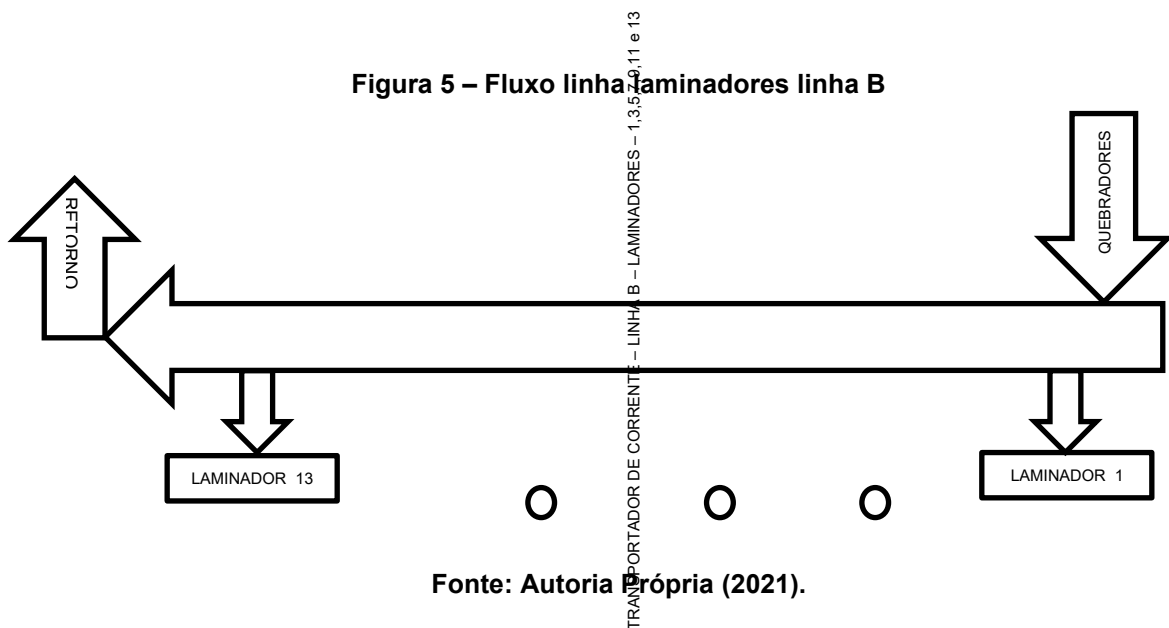


Fonte: Autoria Própria (2021).

1-Motores Principais;2-Dosador;3-Guilhotina

Nesse contexto, foi sugerido por um encarregado de produção deixar os dosadores a 100% até o quinto laminador de cada linha. Operando desta forma, pode-se observar que a potência desses motores foi melhor aproveitada, entretanto, este resultado pode ser notado apenas até o quarto laminador, sendo que nos laminadores subsequentes o produto começava a diminuir, sendo mais adequado deixar o dosador

em modo automático, a figura 5 mostra o fluxo da soja quebrada nos laminadores onde o trabalho será realizado.



Com base nas informações adquiridas durante o processo, o laminador 9 foi o primeiro escolhido para a instalação do IF, pois foi o primeiro a ficar com o dosador em automático. Assim, foram iniciadas as medições conforme metodologia descrita anteriormente. Esse processo foi realizado nos dois motores e os resultados foram armazenados para comparações futuras.

Após a mensuração dos dados do laminador 9, foi solicitado ao responsável do setor uma parada de 4 horas dos laminadores 9 e 13, para troca de suas respectivas partidas. Assim, foi instalado o IF no laminador 13 e aplicada a mesma metodologia realizada com o laminador 9.

O processo de instalação foi, de certa forma, simples, apesar de ser desajeitado, pesado. Na figura 6 pode-se visualizar as *softstarters* montadas antes da troca para IF.

Figura 6 – Partidas Suaves que originalmente partiam os motores.

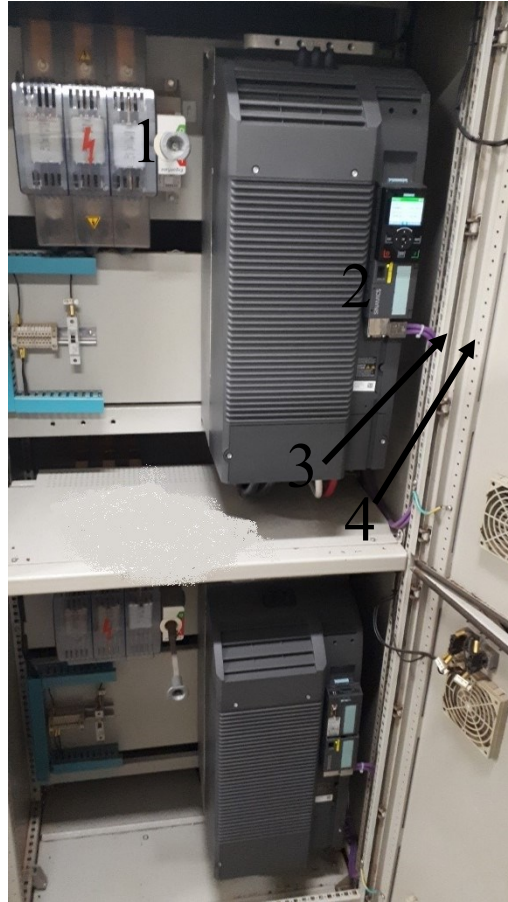


Fonte: Autoria Própria (2021).

1-Seccionadora; 2-Softstarter; 3-Conector de rede profibus DP; 4-Cabo de rede

Após a instalação dos IFs no painel, foi realizada a configuração inicial desses inversores para que os mesmos pudessem ser integrados à automação da fábrica. A figura 7 apresenta os IF instalados no painel, após isso foi feita a integração o monitoramento do consumo de EL foi iniciado.

Figura 7 – Inversores de frequências instalados no lugar das partidas suaves.



Fonte: Autoria Própria (2021).

1-Seccionadora; 2-Inversor de frequência; 3-Conector de rede profibus DP; 4-Cabo de rede

4 RESULTADOS

4.1 RESULTADOS PRÁTICOS

Após a primeira coleta de dados com IF e download no software ANL6000 da Embrasul, pelo software foi verificado que não houve economia de EL no laminador 9, sem IF temos uma potência ativa de média de 41,97 kWh e com IF uma potência ativa de 43,04 kWh, o que alterou de forma significativa foram:

- O fator de potência que sem IF 0,719 e com IF 0,912;
- Potência reativa reduziu significativamente 47 %
- Potência aparente reduziu em torno de 18%

Nesse caso não houve ganhos em relação ao consumo de EL, apenas na redução da infraestrutura necessárias para manter o fator de potência baixo, a instalação dos bancos de capacitores para correção de fator de potência seria bem menor e os custos com manutenção também. Mas nada que justifique o investimento em inversores de frequência, pois um banco de capacitor de 30 kVAr custa em torno de R\$ 1500,00 e tem vida útil de dois a 3 anos.

Tabela 2. – Laminador 9 – Sem IF e Com IF

Laminador 9 - sem inversor						
Dias	1	2	3	4	5	Média
Potências ativas [kW] S/ Inversor	33,266	39,602	47,671	45,470	43,867	41,975
Potências reativas [kVAr] S/ Inversor	38,962	35,270	42,295	41,948	41,550	40,005
Potências aparentes [kVA]S/Inversor	51,247	53,046	63,757	61,943	60,586	58,116
Fator de potência S/ Inversor	0,649	0,747	0,748	0,732	0,719	0,719
Laminador 9 - com inversor						Média
Potências ativas [kW] C/ Inversor	39,298	41,727	44,837	43,495	45,878	43,047
Potências reativas [kVAr] C/ Inversor	19,540	18,341	20,224	18,946	18,498	19,110
Potências aparentes [kVA] C/Inversor	43,921	45,602	49,203	47,464	49,516	47,141
Fator de potência C/ Inversor	0,893	0,915	0,911	0,916	0,927	0,912

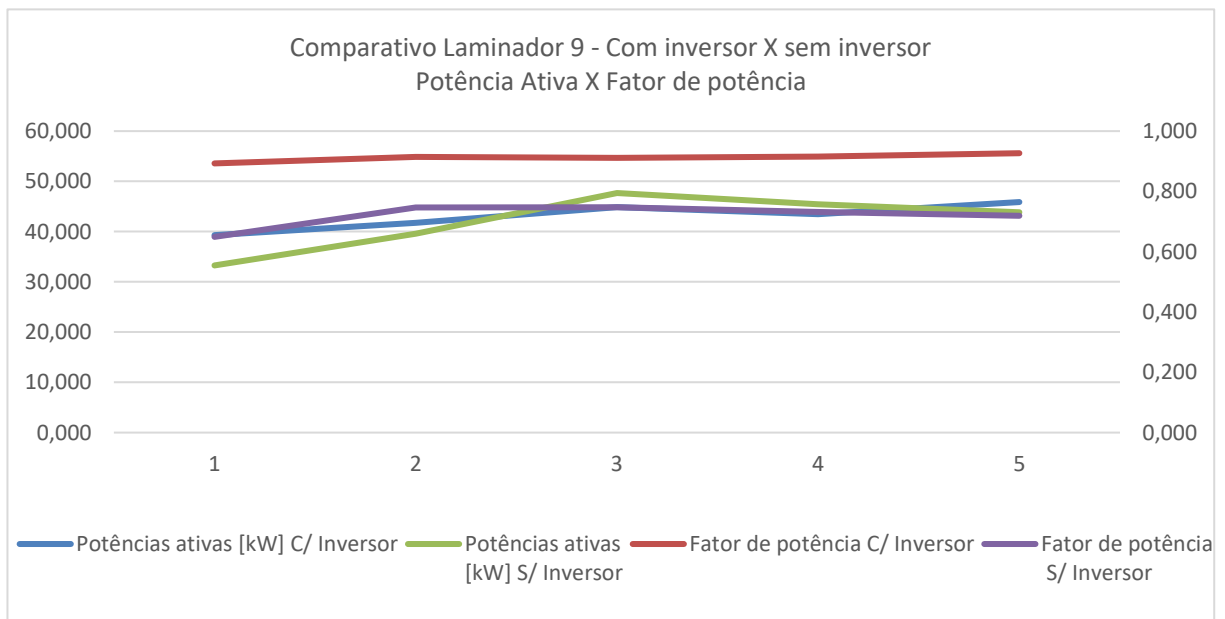
Fonte: Autoria Própria (2021).

Tabela 3. – Comparativo média com IF X sem IF – Laminador 9

Laminador 9			
	Média Com IF	Média Sem IF	Diferença
Potências ativas [kW] S/ Inversor	43,047	41,975	-2%
Potências reativas [kVAr] S/ Inversor	19,110	40,005	109%
Potências aparentes [kVA]S/Inversor	47,141	58,116	23%
Fator de potência S/ Inversor	0,912	0,719	-21%

Fonte: Autoria Própria (2021).

A figura x demonstra melhor como ficou potência ativa no laminador 9 com IF e sem IF como pode-se observar ficaram muito parecidas, a melhoria que houve foi basicamente no fator de potência.

Figura 8 – Comparativo Laminador 9

Observando o restante dos laminadores que ficaram com o dosador em automático, notou-se que um dos motores do laminador 13 estava com baixa corrente elétrica, então decidiu-se instalar o IF nesse laminador para testes a intenção é que como está no final da linha o em alguns momentos do dia teria uma menor carga e o

inversor funcionaria melhor, sendo assim o analisador de EL no mesmo respeitando a mesma metodologia.

No laminador 13 se comparamos os dois tipos de partida na potência ativa observa-se um aumento, já nas demais houve uma redução significativa, mas como ocorreu no laminador 9, nada que justifique o investimento.

Tabela 4. – Resultados Laminador 13

Laminador 13 - sem inversor						
Dias	1	2	3	4	5	Média
Potências ativas [kW] S/ Inversor	19,127	20,986	17,826	22,400	22,074	20,482
Potências reativas [kVAr] S/ Inversor	41,699	41,272	42,132	42,393	41,649	41,829
Potências aparentes [kVA]S/Inversor	46,076	46,397	46,212	48,230	47,231	46,829
Fator de potência S/ Inversor	0,393	0,436	0,347	0,436	0,453	0,413
Laminador 13 - com inversor						Média
Potências ativas [kW] C/ Inversor	20,355	15,488	22,069	26,018	29,314	22,649
Potências reativas [kVAr] C/ Inversor	15,419	9,059	11,873	14,324	15,578	13,250
Potências aparentes [kVA] C/Inversor	32,729	17,984	17,130	29,778	33,258	26,176
Fator de potência C/ Inversor	0,868	0,870	0,880	0,868	0,876	0,872

Fonte: Autoria Própria (2021).

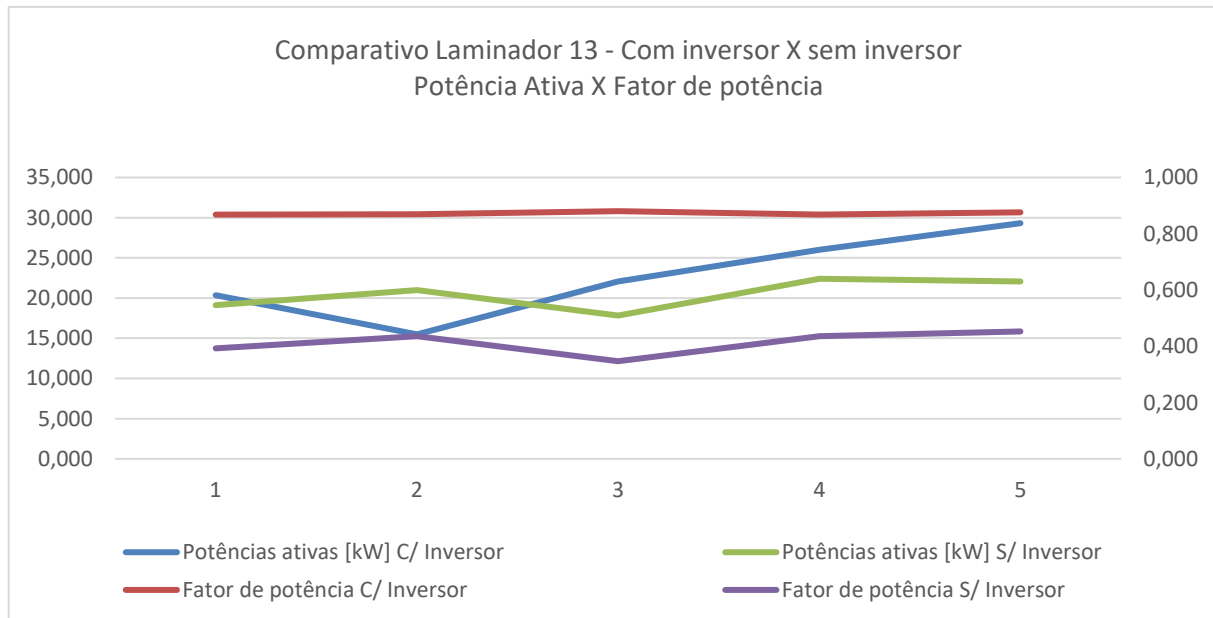
Tabela 5. – Comparativo média com IF X sem IF – Laminador 13

Laminador 13			
	Média Com IF	Média Sem IF	Diferença
Potências ativas [kW] S/ Inversor	22,649	20,482	-10%
Potências reativas [kVAr] S/ Inversor	13,250	41,829	216%
Potências aparentes [kVA]S/Inversor	26,176	46,829	79%
Fator de potência S/ Inversor	0,872	0,413	-53%

Fonte: Autoria Própria (2021).

A melhoria com o uso de IF no fator de potência e potência ativa não justifica o custo com a instalação do IF visto que existe os capacitores que tem um custo bem menor e já fazem essa correção. Segue gráfico com comparativo para o laminador 13:

Figura 9 – Comparativo laminador 13.



Fonte: Autoria Própria (2021).

Aprofundando um pouco mais nas medições que o analisador de energia nos traz, temos os seguintes pontos a considerar:

- Os motores aparentam ser muito superdimensionados para a aplicação seu baixo fator de potência é um indicativo que estão superdimensionados conforme mostra a figura X.
 - Como havia dito no início deste trabalho foi considerada essa hipótese, porém foi descartada pois disseram que já foi testado isso, porém agora temos números que provam que isso deveria ser testado novamente com a metodologia adequada.
- Fator de potência baixo também pode indicar um motor com baixo rendimento, esse pode ser rebobinado o que faz com que o motor perca suas características originais de fábrica.
- Aplicando IF em motores que estão com corrente nominal baixa gera muita distorção harmônica de 5ª e 7ª ordem se comparado com o motor sem IF, que teriam que ser corrigidas.

Depois dos resultados pude observar alguns pontos importantes no manual para correção de fator de potência da WEG em seu manual de correção de fator de potência, nos mostra um exemplo interessante uma carga de 800W com um fator de potência de 0,5 é necessário um transformador de 1600 kVA, isso mostra a importância de ter motores e bancos de capacitores bem dimensionados, a falta disso pode levar ao investimento desnecessário em infraestrutura, segue tabela que demonstra como um fator de potência ideal pode muitas vezes diminuir o custo de instalação / upgrade de fábricas:

Tabela 5. – Variação da potência do trafo em função do fator de potência

Potência Útil Absorvida (kW)	Fator de Potência	Potência Trafo - KVA
800	0,5	1600
	0,8	1000
	1	800

Fonte: Adaptado de WEG (2016).

Outro fato é que um fator de potência baixo leva a um aumento desnecessário na secção nominal dos cabos. A tabela X mostra quanto o dimensionamento dos cabos é impactado conforme o fator de potência muda, quando chega a 0,7 o fator de potência a secção do cabo dobra.

Tabela 6. – Variação da seção de um condutor em função do fator de potência

Seção relativa	Fator de Potência
1,00	1,00
1,23	0,90
1,56	0,80
2,04	0,70
2,78	0,60
4,00	0,50
6,25	0,40
11,10	0,30

Fonte: Adaptado de WEG (2016).

Para dar um exemplo prático no trabalho podemos utilizar um exemplo prático o do laminador 13 A, o cálculo abaixo mostra a diferença de corrente entre os dois

casos, isso nos leva a verificar se o dimensionamento do cabeamento dos motores da fábrica está correto, é um ponto a se avaliar.

Sem inversor:

$$I = \frac{P_{(VA)}}{U} = \frac{41,82 * 1000}{380 * \sqrt{3}} = 71,13A$$

Com inversor:

$$I = \frac{P_{(VA)}}{U} = \frac{26,17 * 1000}{380 * \sqrt{3}} = 39,76 A$$

Uma análise considerando um pior caso que seria considerar o fator de potência do laminador 13 sem inversor e considerar a potência nominal do motor, com isso temos:

$$I = \frac{P_{(W)}/Fp}{U} = \frac{(75 * 1000)/0,413}{380 * \sqrt{3}} = 275A$$

Nesse caso a corrente elétrica se eleva bastante o que vale fazer uma medição em todos os laminadores afim de avaliar se não estão com problemas de dimensionamento do cabeamento ou rendimento, o cabeamento dos laminadores foi dimensionado para sua corrente nominal mais 20% ou seja conforme informado no início o dado de placa do motor é 130 A então os cabos foram dimensionados para 150 A.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para a realização deste trabalho, um dos objetivos específicos apresentados era a instalação e teste do uso de IF em dois laminadores sendo um no meio da linha, como primeira escolha e outro no final da linha.

O uso de IF nos laminadores se mostrou ineficaz quanto a redução no consumo de EL, não gerando o retorno financeiro esperado, como dito no início do trabalho caso não houvesse retorno esses inversores seriam instalados em ventiladores da caldeira em um outro estudo que será realizado.

Durante a execução do trabalho as hipóteses foram frustradas, como a tentativa de colocar rotações diferentes em cada rolo, essas rotações diferentes acarretaram o superaquecimento do IF com menor rotação, fazendo com que ele falhasse. Esse fato pode ser explicado pois o motor que possuía menor velocidade se empenhava em reduzir a velocidade do motor com maior rotação, ou seja, é como se o acelerador e o freio de um veículo fossem acionados ao mesmo tempo. Isso, iria induzir um superaquecimento dos freios, como ocorreu com o IF de menor rotação. Outra hipótese que não se concretizou foi a economia de EL, houve resultados na melhoria da qualidade de energia, mas nada que justifique o investimento.

Um ponto positivo do trabalho é que durante as medições podemos constatar algumas novas hipóteses para esse trabalho que serão avaliadas:

- Os motores aparentam estar superdimensionados para a aplicação sendo necessário um novo dimensionamento para esses pontos, possivelmente com uma potência menor, agora com mais dados é possível solicitar um novo teste.
- Os motores não estão entregando a eficiência de fábrica, seja por uma manutenção inadequada ou por serem muito antigos e terem um rendimento menor, cabe um estudo de viabilidade para troca.

Outro ponto positivo do trabalho é que durante o processo metodológico, especificamente, após colocar os dosadores do início de linha em 100%, foi possível verificar uma melhora na extração de óleo devido a uma lâmina de melhor qualidade. Nesse contexto, foi possível extrair mais óleo com a mesma quantidade de equipamentos. De acordo com o processo metodológico e os resultados obtidos não foi possível atingir o objetivo principal do trabalho, constatando que não é possível economizar EL controlando torque do motor utilizando IF.

REFERENCIAS

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Anuário estatístico de energia elétrica 2019**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, dez. 2019. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicação-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2019_WEB_alterado.pdf. Acesso em 20 jul. 2020.
- DAVID, E.; SANTOS, F. C. C.; NETO, J. G. V.; ESCANO, G. M. G. Demanda Contratada e Consumo de Energia Elétrica em Unidades Armazenadoras de Grãos. **Energia na Agricultura**, v. 31, n.4, p.305-311, 2016.
- EMBRASUL. **Manual analisador de energia RE6000 e software de análise de qualidade de energia ANL6000**, 2014.
- FIRJAN, S. Quanto custa a energia elétrica para a indústria no Brasil? **Publicações Sistema Firjan**, p.1–7, 2016.
- FRANCHI, C.M. **Acionamentos elétricos**. São Paulo: Érica, 2008.
- FRANCHI, C. M. **Inversores de frequência: teoria e aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.
- HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. dos. **Energia e meio ambiente**. Tradução da 4.ed. norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 708p.
- KORKMAZ, Y.; KORKMAZ, F.; TOPALOGLU, I.; MAMUR, H. Comparing of Switching Frequency on Vector Controlled Asynchronous Motor. **International Journal on Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI)**, v.3, n.3/4, p.19-27, 2014.
- LI, M. J.; TAO, W. Q. Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry. **Applied Energy**. v.187, p.203-215, 2017.
- LIMA, A. D. S.; ZOCOLER, J. L.; JADOSKI, S. O.; MAGGI, M. F.; AMARANTE, R. R. Desempenho operacional no bombeamento em pivô central utilizando inversor de frequência. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v.8, n.2, p.51-61, 2015.
- MAMED, J, F. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- MASIERO, L. C., **Preparo de grãos de soja para extração**, disponível em: <https://www.yumpu.com/pt/document/read/14321773/preparo-de-graos-de-soja-para-extracao> Acesso em: 18 julho 2020.
- PEREIRA, M. J. **“Energia: eficiência e alternativas”**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009.
- PINTO, A.; ZILLES, R.; BET, I. Excedente de reativos em sistemas fotovoltaicos conectados à rede. **Revista Brasileira de Energia Solar**, v.3, n.2, p. 110–116, dez.

2012.

RAMOS, Mario Cesar de Espirito Santo. **Metodologia para avaliação e otimização de motores elétricos de indução trifásicos visando a conservação de energia em aplicações industriais**. 2009. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SHOVE, E. What is wrong with energy efficiency? **Building Research & Information**. v.46, n.7, 779–789, 2018.

TASSINI, Jussara Oliveira. **Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial: estudo de caso**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia - Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

WEG. **Capacitores Correção do Fator de Potência**. p. 24, 2011.

WEG. **Manual para Correção do Fator de Potência**. v.1, n.1, p.40, 2016.