

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

IGOR SOUZA FERREIRA

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES APLICADOS NO
PROCESSO DE SECAGEM EM SILOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

IGOR SOUZA FERREIRA

**ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES APLICADOS NO
PROCESSO DE SECAGEM EM SILOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020



Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Campus Cornélio Procópio

Departamento Acadêmico de Elétrica

Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Igor Souza Ferreira

Estudo de eficiência energética para motores aplicados no processo de secagem em silos

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 26/11/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges - Presidente (Orientador)

Prof(a). Me(a). Marco Antonio Ferreira Finocchio - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Edson Luis Bassetto - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Agradecimento

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e me fizeram acreditar que seria capaz de chegar até aqui.

Aos meus irmãos Rafaela e Robson, por me fortaleceram ao longo desses anos de estudos.

Ao meu orientador Prof. Esp. Ulisses Pereira Rosa Borges, por todos os ensinamentos transmitidos para que a conclusão desse trabalho fosse possível.

Aos irmãos que a UTF me deu, Vinicius, Vanderlei, Guilherme Ladino, Guilherme Correa e Guilherme Storti. Com certeza os nossos estudos juntos foram um grande aprendizado, mas o companheirismo ao longo desses anos foi sem igual.

Aos colegas da Siemens pelos ensinamentos, e por mostrar as diferentes funções que um engenheiro pode exercer

Por fim, a todos aqueles que contribuíram para a realização do sonho de me formar em uma universidade federal.

RESUMO

FERREIRA, IGOR S. **Estudo de eficiência energética para motores aplicados no processo de secagem em silos.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Este trabalho apresenta um estudo de eficiência energética de um motor comumente empregado em silos. O foco desse trabalho é identificar a eficácia de empregar um inversor de frequência no controle desse motor, e comparar à uma situação que esse mesmo motor não possui nenhum tipo de controle. Com o resultado obtido, será feita uma análise econômica (custo-benefício) sobre a viabilidade desse equipamento junto ao processo de secagem de grão em silos.

Palavras-chave: Eficiência energética. Motor. Inversor de frequência. Silos. Economia.

ABSTRACT

FERREIRA, IGOR S. Energy efficiency study for motors applied in the silo drying process. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Electric Engineer. Federal Technology University of Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

This work presents an energy efficiency study of an engine commonly used in silos. The focus of this work is to identify the efficiency of using a frequency inverter in the control of this motor, and to compare to a situation that the same motor has no type of control. With the result obtained, an economic (cost-benefit) analysis will be made on the feasibility of this equipment in the process of grain drying in silos.

Keywords: Energy efficiency. Motor. Frequency inverter. Silos. Economy.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
1.1. Objetivos	7
1.1.1. Objetivo Geral	7
1.1.2. Objetivos Específicos	7
1.2. Justificativa	7
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
2.1. Acionamentos de motores	8
2.1.1. Ligação estrela - triângulo (Y- Δ)	8
2.1.2. Soft Starter	10
2.1.3. Inversor de frequência	11
2.2. Sistemas de Secagem	12
2.2.1. Secagem Natural no Campo	12
2.2.2. Secagem Artificial com Ventilação Natural	13
2.2.3. Secagem Artificial com Ventilação Forçada	14
2.3. Aeração de grãos	16
2.4. Tipos de Ventiladores	17
2.4.1. Ventilador Axial	17
2.4.2. Ventilador Centrífugo	18
2.5. Termometria em Grãos	18
3. DIMENSIONAMENTO DO VENTILADOR	20
3.1. Formulação Teórica	20
3.2. Dimensionamento do Ventilador	22
4. METODOLOGIA	24
5. SOLUÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	26
5.1. Especificação do motor para o ventilador	26
5.2. Simulação SinaSave	27
5.3. Inversores de frequência e sua utilização em silos	29
5.4. Análise de Payback	31
5.5. Custo de armazenagem	34
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	36
6.1. Proposta de trabalhos futuros	37
REFERÊNCIAS	38

1. INTRODUÇÃO

O armazenamento é uma das principais etapas na cadeia de produção de grãos. É um assunto de grande complexidade devido ao fato de ser multidisciplinar e de envolver uma gama muito grande de operações, equipamentos e estruturas. (SILVA, 2008). O processo de armazenagem está condicionado em dois principais fatores: qualidade do produto e a questão comercial.

Quanto à qualidade do produto, é basicamente manter equilibrado as condições inerentes ao grão armazenado, tais como: umidade, condições de calor, aeração e qualquer outro fator que possa influenciar nas propriedades do alimento. Já a condição comercial está relacionada com o fato de o produtor ter a escolha do melhor momento para fazer a comercialização, decidindo, por exemplo, de vender na entressafra, onde haverá relativo aumento de preço.

O fato é que para atingir maior qualidade de produto e melhores condições comerciais, a armazenagem deve ser um processo eficiente e econômico, e a secagem é a etapa responsável por assegurar isso. Como será observado no Capítulo 2, dentre os diversos tipos de secagem, será considerado a secagem artificial forçada (aquela que necessita de algum equipamento que gere as condições de secagem, que nesse estudo será considerado os ventiladores de silos). Os ventiladores de silos se assemelham a um de uso residencial, diferenciando pela potência mais elevada. É um motor gaiola com hélices helicoidais em seu eixo, e possui a função de manter equilibrados as condições dos grãos, evitando assim a germinação precoce.

De acordo com Silva (1993), um bom sistema de ventilação, além de garantir um produto de melhor procedência, pode ter um desempenho energético significativo, o que pode inferir no custo de armazenagem, tornando o preço do produto final mais atrativo, e será exatamente nesse sistema o foco desse trabalho.

Assim, nesse trabalho será apresentado uma proposta de solução de eficiência energética que atue no processo de secagem, e a partir de uma análise comparativa de custos, será possível identificar a viabilidade de adoção de tecnologias no setor rural, principalmente ao pequeno produtor e cooperativas familiares.

1.1. Objetivos

Nessa seção serão apresentados os objetivos geral e específicos do trabalho.

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar a viabilidade de implementação de equipamentos de maior apelo tecnológico no setor rural.

1.1.2. Objetivos Específicos

Desenvolver um estudo de eficiência energética voltado para o desempenho de motores aplicados no processo de secagem de grãos, comparando a eficiência do processo com e sem o uso de um inversor de frequência no controle do motor.

Fazer uma análise de payback com o sistema estudado.

Construir o conceito de modernização na indústria rural.

1.2. Justificativa

O Brasil é um dos maiores produtores de grãos do mundo, e por essa ser uma atividade de grande impacto na economia nacional, é imprescindível que todos os processos que envolvam a cadeia de produção estejam orientados para o melhor desempenho possível. Este trabalho tem a finalidade de identificar o desempenho dos motores aplicados no processo de secagem dos grãos, e a partir disso, analisar a viabilidade de implementação de tecnologias no campo para pequenas cooperativas de beneficiamento.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para melhor compreensão do assunto desse trabalho, nesse Capítulo será abordado algumas definições e conceitos que possam auxiliar o leitor.

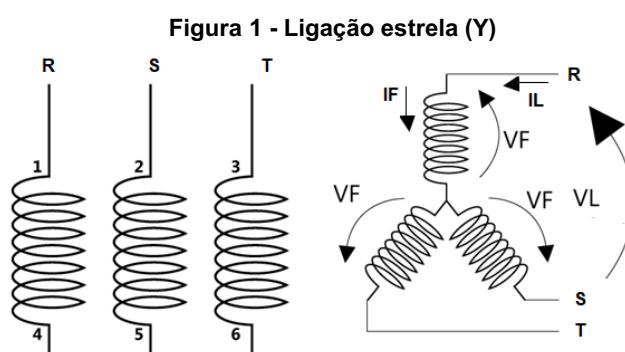
2.1. Acionamentos de motores

Os tópicos subsequentes mostram como funciona cada tipo de acionamento: ligação estrela – triângulo (Y- Δ), soft start e inversor de frequência.

2.1.1. Ligação estrela - triângulo (Y- Δ)

Esse acionamento é caracterizado pela alimentação do motor com redução de tensão nas bobinas durante a partida.

A Figura 1 apresenta o esquema de ligação estrela (Y).



Fonte: Adaptado de Mundo da Elétrica (2018)

Em que:

$$VF = \frac{VL}{\sqrt{3}} \quad (5)$$

$$IF = IL \quad (6)$$

Sendo:

VL - Tensão de linha [V]

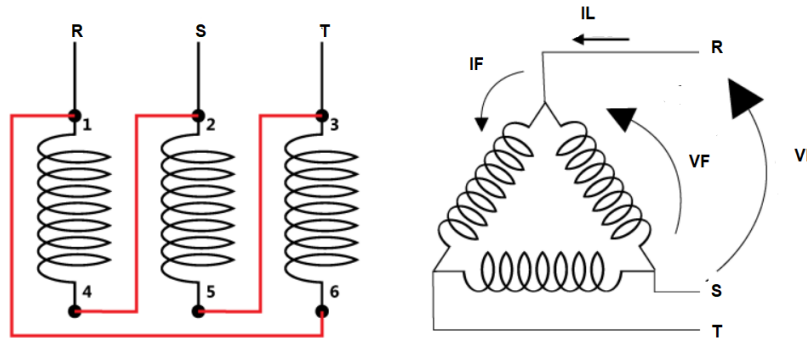
VF - Tensão de fase [V]

IL - Corrente de linha [A]

I_F - Corrente de fase [A]

A Figura 2 representa o esquema de ligação para a ligação triângulo (Δ).

Figura 2 - Ligação triângulo (Δ)



Fonte: Adaptado de Mundo da Elétrica (2018)

$$VF = VL \quad (7)$$

$$IF = \frac{IL}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

A partir dessa construção, pode afirmar algumas características desse esquema de ligação:

Devido a razão $\frac{VL}{\sqrt{3}}$, o motor parte em Y com 57,7% da tensão nominal.

Segundo Fitzgerald (2003), o torque de um motor é proporcional ao quadrado da tensão, assim, o motor terá diferentes características de acordo com a sua ligação.

Sendo:

T – Torque ou conjugado do motor [Nm]

Temos:

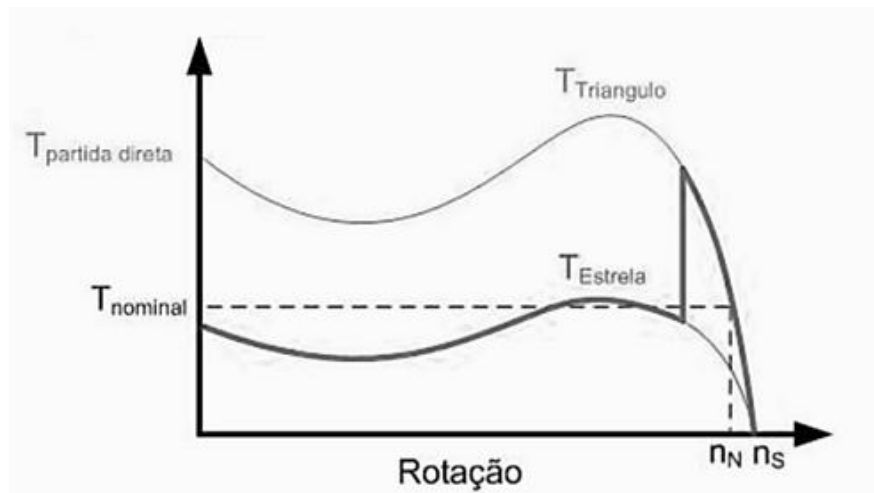
$$\text{Ligação Y: } T \propto VF^2 \rightarrow T \propto \left(\frac{VL}{\sqrt{3}}\right)^2 \rightarrow T \propto \frac{VL^2}{3} \quad (9)$$

$$\text{Ligação-}\Delta: T \propto VF^2 \rightarrow T \propto (VL)^2 \quad (10)$$

Com essas características, é possível identificar que torque inicial é baixo, reduzido a 33,3%, porém quando ocorre a comutação, o torque aumenta significativamente.

A Figura 3 mostra o comportamento do torque nessa simulação.

Figura 3 - Curva de Torque estrela- triângulo (Y-Δ)



Fonte: Adaptado de Salin (2011)

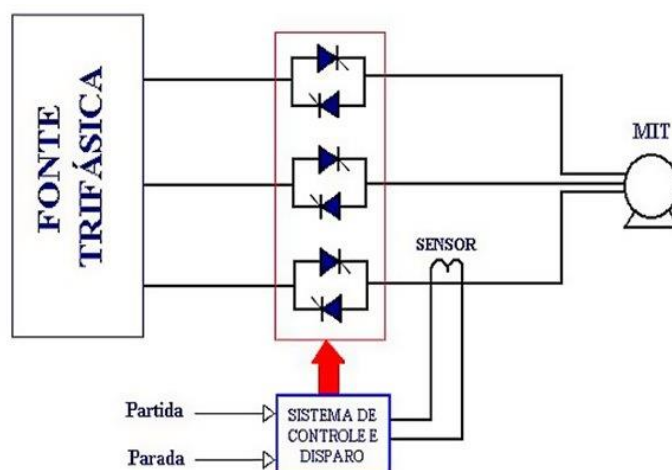
Vale dizer que esse tipo de ligação é utilizado quase que exclusivamente para partidas de máquinas a vazio, e mudança de passagem da ligação estrela (Y) para triângulo (Δ) é geralmente controlada por um temporizador. Apesar de se tratar de uma implementação de baixo custo, essa ligação não permite alterações na forma de controle.

2.1.2. Soft Starter

A soft starter é um dispositivo eletrônico que é utilizado na partida de motores de indução trifásico, e é uma alternativa ao uso de chave estrela-triângulo (Y- Δ). O funcionamento desse equipamento está baseado na utilização de pontes de tiristores antiparalelos que são controlados a partir de uma placa eletrônica que possui um sistema microcontrolado inteligente. Esse sistema é responsável em definir os limites de tensão baseado nas configurações pré-definidos pelo operador de acordo com a aplicação desejada.

A Figura 4 mostra o esquema simplificado do circuito de uma soft starter. É válido dizer que a disposição antiparalela dos tiristores se dá para garantir a condução de corrente tanto no semicírculo positivo, quanto no semicírculo negativo da corrente alternada.

Figura 4 - Circuito simplificado de uma soft starter



Fonte: Mundo da Elétrica (2019)

A soft starter tem o simples objetivo de realizar a partida eletrônica controlando a corrente de partida/torque, e algumas vezes possui até o sistema de frenagem, no entanto, não controla efetivamente a velocidade do motor elétrico. Os motores de indução trifásicos possuem altas correntes de partidas, e o uso de soft starter atenua esses picos, mas em regime permanente não realiza nenhum tipo de controle.

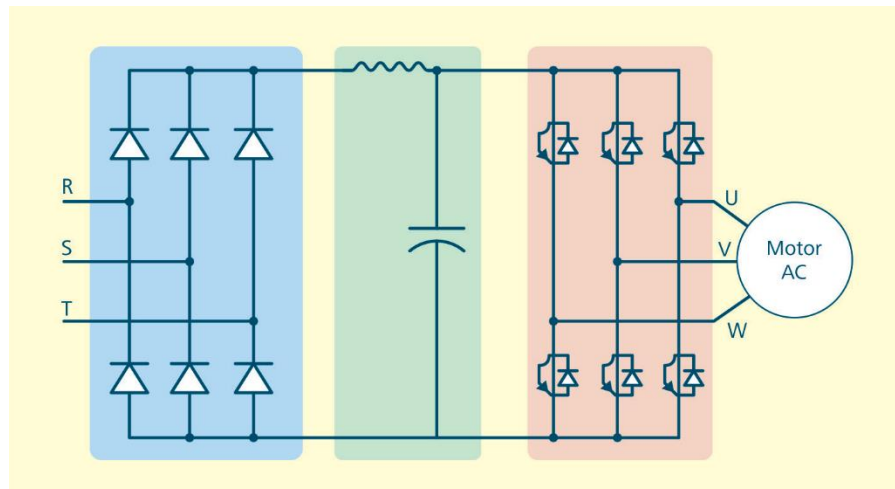
Segundo Barbi (2006), esse tipo de acionamento tem a vantagem de não provocar trancos no sistema, limitar a corrente de partida, evitar picos de corrente, incorporar parada suave e também proteção térmica e mecânica.

2.1.3. Inversor de frequência

Além do controle de partida de motores de indução, a indústria passa a necessitar do controle de velocidade variável ao longo do processo. Esses controles que antes eram feitos por motores de corrente contínua, agora passam a ser realizados por motores de indução e isso é possível graças aos conversores de frequência (CAMARGO, 2011).

A Figura 5 mostra o esquema elétrico de um inversor de frequência trifásico. Basicamente o inversor de frequência é composto por um circuito retificador, um filtro e um circuito inversor.

Figura 5 - Esquema elétrico do inversor de frequência



Fonte: Adaptado de Weg (2019)

A energização se dá pelas fases R,S e T, e a alimentação é retificada através de uma ponte de diodos e o capacitor é conectado para a formação do barramento CC, enquanto a ponte inversora é composta por transistores. Segundo Camargo (2011), a função destes transistores é enviar uma tensão de alimentação, proporcional ao controle programado no inversor, para acionar um motor. Eles são chaveados em grupos de três, formando uma tensão na saída defasada de 120° elétricos

De acordo com Fitzgerald (2003), o inversor de frequência, além de controlar a partida do motor, permite fazer o controle de velocidade de operação. A grande vantagem de controlar a velocidade do motor é que isso permite o controle da corrente de operação em regime permanente. Esse tipo de controle faz com que o consumo de energia seja menor.

2.2. Sistemas de Secagem

O processo de secagem possui grande importância na armazenagem de grãos, e por isso, é válido entender os principais métodos.

2.2.1. Secagem Natural no Campo

Ocorre logo após a maturação fisiológica do produto, quando esse apresenta elevado teor de umidade. A movimentação do ar é feita pela ação do

vento e energia para evaporação da unidade, provendo potencial de secagem ambiente e da incidência direta da energia solar.

A secagem natural é caracterizada pela secagem do produto no campo na própria planta, sem interferência do homem. A secagem total no campo é pouco utilizada na produção comercial da maioria dos grãos.

Se adotada, apresentará desvantagens como: atraso na preparação do solo para novos cultivos devido a permanência prolongada no campo, facilitará o desenvolvimento de ataque de pragas, dificuldade na colheita, e tratando-se da colheita mecânica, o baixo teor de umidade faz com que durante a colheita e a debulha aparece grande quantidade de danos mecânicos e perdas no campo.

É utilizado em regiões tropicais subdesenvolvidas e/ou em desenvolvimento. Várias razões justificam essa utilização, como: desconhecimento de técnicas mais modernas, condições climáticas que permitem tal método, e também baixo investimento para implementação.

2.2.2. Secagem Artificial com Ventilação Natural

A secagem em terreiros, se difere da secagem natural, simplesmente pelo fato de o produto ser retirado da planta, e espalhado em camadas de espessura inferior a 5cm em um pátio previamente preparado (podendo ser de asfalto, concreto ou terra "batida" - o chamado terreiro). A energia proveniente para remoção da umidade é proveniente da radiação solar e da entalpia do ar. No Brasil, além do café, o produto de maior valor comercial que utiliza esse método é o cacau.

Segundo Silva (1983), a secagem em terreiros apresenta a desvantagem da dependência dos fatores climáticos que se forem desfavoráveis retarda o processo e propiciam uma infecção do produto por microrganismos que causam a deterioração e depreciação do produto.

2.2.3. Secagem Artificial com Ventilação Forçada

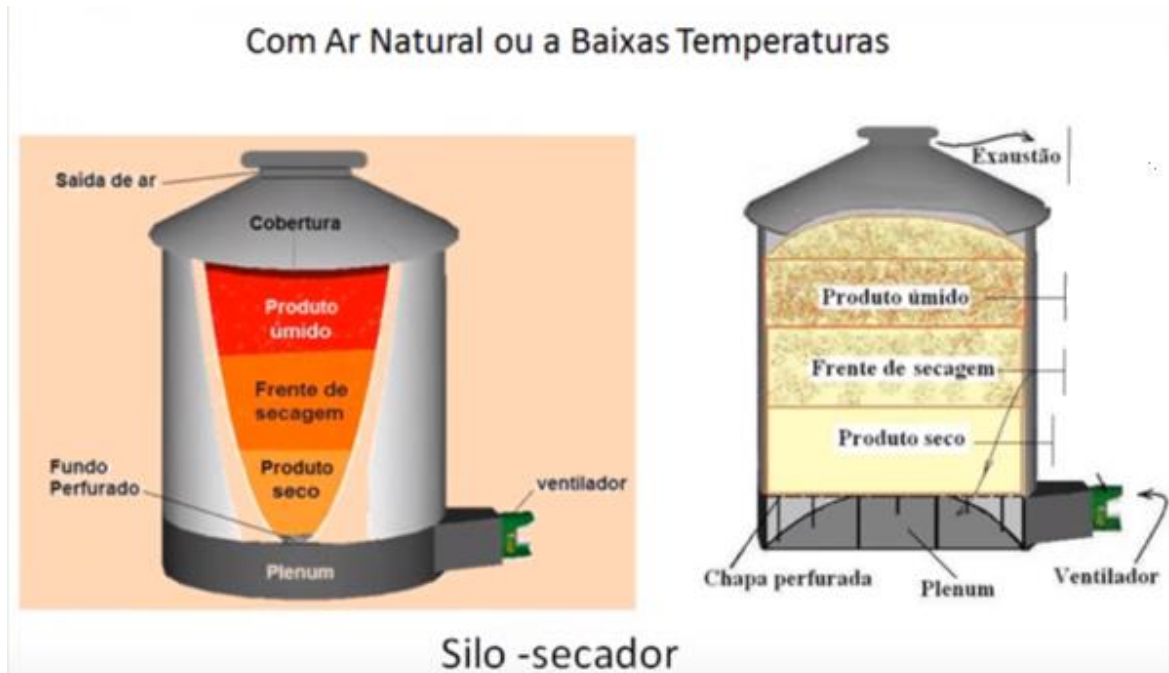
Pode ser realizada com ar natural, com ar a baixas e altas temperaturas, em sistemas combinados ou por seca-aeração com o emprego do silo secador armazenador. A secagem com ar natural não utiliza fontes de aquecimento para o ar de secagem (SILVA, 1993).

Nesse tipo de secagem, o ar é forçado a passar pela camada de grãos nas condições ambientais, podendo sofrer leve aquecimento ou podendo passar pelo ventilador. A pequena quantidade por unidade de massa de grãos torna o processo lento. A baixa temperatura do ar dificulta a capacidade de evaporar água do produto, dificultando o processo em regiões de alta umidade relativa. Algumas vezes, se faz o uso de fontes suplementares que auxiliam no processo. Essas fontes, no entanto, podem provocar uma super secagem que resulta em prejuízo para os usuários.

De acordo com Silva (2000), para esse tipo de secagem, pode-se empregar o uso de silo armazenador que deve apresentar características especiais, como: piso em chapa metálica com mínimo de 15% de área perfurada. Esse sistema promove a distribuição uniforme de ar, deve possuir um ventilador capaz de fornecer a quantidade de ar suficiente para realizar a secagem em toda massa de grão sem que ocorra a deterioração. A potência do ventilador é em função das dimensões do silo, e das características do produto armazenado.

A Figura 6 mostra o modelo esquemático das diferentes frentes de secagem em um silo.

Figura 6 - Modelo esquemático de silo



Fonte: Silva 2008

A secagem com ar natural com baixas temperatura, inicia na parte inferior do silo até chegar na última, distinguindo-se em três diferentes camadas.

A primeira camada é formada pelos grãos secos, em que o produto já atingiu o equilíbrio higroscópico com o ar. Vale dizer que o equilíbrio higroscópico está associado ao balanço de pressão de vapor no grão. A retirada de umidade dos grãos se dá pela diferença de pressão do grão com o ar que o envolve. Quando a pressão do grão se iguala à pressão do ar, o equilíbrio higroscópico é atingido.

Na segunda, denominada frente de secagem, está ocorrendo a transferência de umidade do produto com o ar.

A terceira é formada por grãos úmido, pois o ar está com a capacidade de secagem esgotada. A temperatura nessa camada normalmente é inferior a temperatura do ar no plano, uma vez que o ar é resfriado com o produto na frente de secagem.

2.3. Aeração de grãos

Um sistema de aeração consiste em um conjunto de equipamentos necessários para permitirem uma distribuição perfeita de passagem de ar ambiente, ou ar modificado, para a massa de grãos armazenados.

Basicamente é composto por um ventilador, sistemas de dutos, silos ou unidades armazenadoras e sistemas de controle:

- Ventiladores: máquinas utilizadas para o movimento de ar através da massa de grãos. Fornecendo a quantidade de ar requerida e vencendo a resistência oferecida a passagem desse ar pela massa de grão armazenada.
- Dutos: permitem a inflação e sucção de ar através da massa de grãos. Podem ser divididos em duto principal ou de suprimento, e duto secundário ou de aeração. Duto principal conecta o ventilador a um ou mais dutos secundários, e esses distribuem o ar através da massa de grão o mais uniformemente possível.
- Unidade armazenadoras: a função principal da unidade armazenadora é de proteger a massa de grãos contra agentes de deterioração. a célula armazenadores podem ser vertical ou horizontal.

A aeração permite o fluxo de entrada do produto úmido na unidade sem necessitar de secadores com maior capacidade ou secadores extras. Existe um limite de umidade de produto em relação ao tempo de espera para a secagem, variando de acordo com cada tipo de produto armazenado. É importante ressaltar que é necessário grande quantidade de ar para manter o produto em condições de alta qualidade.

Algumas vantagens do processo de aeração são: inibir a atividade de insetos, inibir o desenvolvimento de microflora, preservar a qualidade, uniformizar a temperatura, permitir o aquecimento de grão, remover odores, promover a secagem.

A técnica de aeração é utilizada também visando evitar ou prevenir a migração de umidade de um ponto para outro da massa de grãos. A aeração

quando é feita para promover a uniformização de temperatura da massa de grão evita os focos de aquecimento, principalmente pelo ataque de insetos. Um dos maiores problemas consequentes à migração de umidade consiste na mistura das camadas contaminadas. Dentre os danos causados é a contaminação de microtoxinas.

2.4. Tipos de Ventiladores

Quando se fala de secagem de grãos em silos, o que não pode ficar de fora é o principal equipamento responsável por isso: o ventilador.

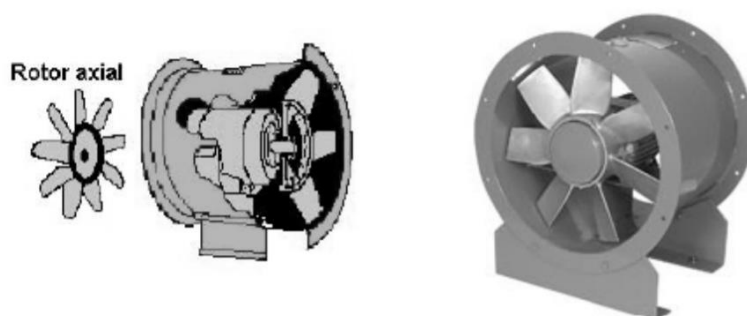
Logo após a colheita, o grão tem um nível elevado de umidade, e isso deve ser devidamente controlado para evitar o desenvolvimento de microrganismos e a germinação precoce (SILVA, 1992). Assim, o ventilador é o responsável no processo de secagem através da movimentação do ar através da massa de grãos.

Os dois tipos principais de ventiladores empregados no processo de secagem de grãos são centrífugos e axiais.

2.4.1. Ventilador Axial

Esse tipo de ventilador tem maior capacidade de fluxo de ar e menor pressão. É caracterizado pelo fato de que o ar entra e sai paralelamente em relação ao eixo do rotor. A Figura 7 ilustra o modelo de ventilador axial.

Figura 7 - Ventilador Axial



Fonte: Material de Aula Nestor Pérez – FEG Unesp (2014)

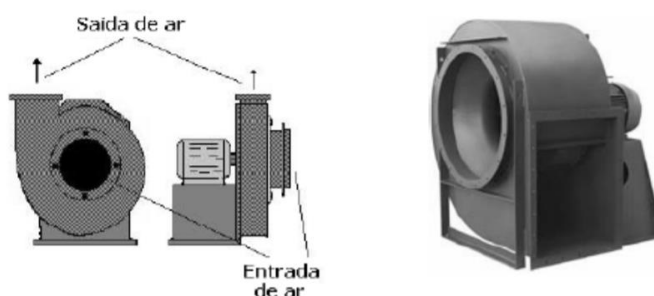
Vale mencionar que o esse tipo de ventilador é vantajoso por ser mais econômico e por ser de fácil aplicação.

2.4.2. Ventilador Centrífugo

Esse tipo de ventilador é caracterizado por ter maior pressão e menor capacidade de fluxo de ar. A característica principal desse tipo de ventilador é por possuir um rotor no interior de uma carcaça em espira. O ar entra no ventilador na direção axial ao eixo de rotação, e sai perpendicularmente ao próprio eixo.

A Figura 8 mostra o modelo do ventilador centrífugo, no qual é possível identificar como se dá a entrada e saída de ar.

Figura 8 - Ventilador Centrífugo



Fonte: Material de Aula Nestor Pérez – FEG Unesp (2014)

Esse tipo de ventilador é vantajoso pois apresenta maior eficiência energética, e devido a sua robustez, torna-se mais silencioso. É o mais empregado na indústria.

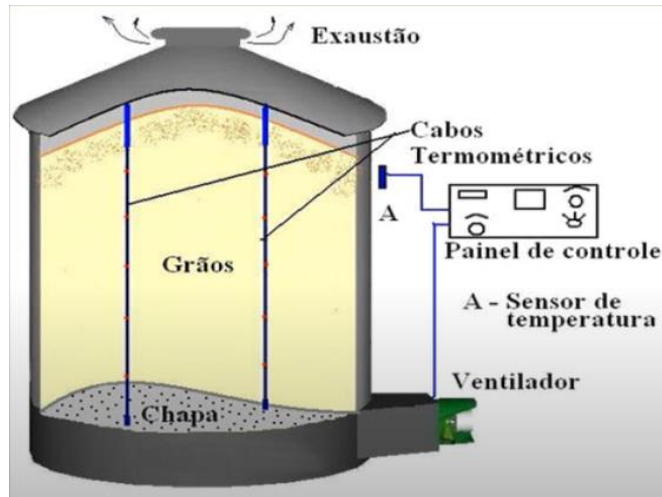
2.5. Termometria em Grãos

Quando se trata do controle de umidade de grãos, também tem que ser considerado as características termométricas do produto armazenado.

Em aplicações de poucos recursos tecnológicos o controle é feito manualmente, e apesar da expertise do operador, a chance de ocorrer erro no processo e afetar a integridade dos grãos é bastante significativa.

A Figura 9 mostra um modelo esquemático de um sistema controle através de sensores e cabos medidores de temperatura

Figura 9 - Sistema Termométrico aplicado em grãos



Fonte: Silva 2008

O sistema de termometria em grãos consiste na dispersão de cabos medidores de temperatura, que em conjunto com os sensores, servirão para mapeamento de pontos quentes no interior do silo, e com base na leitura dos sensores, o inversor de frequência controla a velocidade de operação do ventilador. Assim, o sensor faz a identificação de pontos de calor, e o inversor de frequência, através do controle do ventilador, garante as condições ideais para a conservação dos grãos.

Vale dizer que para aplicações mais complexas a leitura do sensor é realizada pelo controlador lógico programável, que em comunicação com o inversor de frequência, faz o controle do ventilador.

3. DIMENSIONAMENTO DO VENTILADOR

3.1. Formulação Teórica

Como já mencionado anteriormente, o ventilador é a fonte externa do processo de secagem que será responsável em equilibrar as condições internas no silo. Segundo Silva (2006):

Na secagem, na aeração de grãos e nos sistemas que usam ventilação forçada, como as máquinas de separação, de limpeza e de transporte, há necessidade de um componente para criar um gradiente energético que promova o movimento do ar através dos elementos do sistema e do produto. Na secagem de grãos, o ar carrega a água evaporada do produto para fora do secador. Já na aeração, a função do ar é de apenas esfriar a massa de grãos, embora, às vezes, carreando pequenas quantidades de água evaporada. Os ventiladores são máquinas que, por meio da rotação de um rotor provido de pás adequadamente distribuídas e acionado por um motor, permitem transformar a energia mecânica do rotor em formas de energia potencial de pressão e energia cinética. Graças à energia adquirida, o ar torna-se capaz de vencer as resistências oferecidas pelo sistema de distribuição e pela massa de grãos, podendo assim realizar a secagem, o resfriamento, a separação, a limpeza e o transporte do produto.

Uma vez entendido o processo de secagem a ser trabalhado nesse estudo, devemos ter em mente que para dimensionar o motor do ventilador, devemos considerar algumas variáveis, tais como: dimensões do silo, massa de grãos a ser armazenada e fluxo de ar necessário.

$$P = \frac{Q.P_{et}}{450.\eta} \quad (1)$$

Em que:

$$P_{et} = P_e + 0,2P_e + 0,6P_e \quad (2)$$

$$Q = \phi.k \quad (3)$$

Ainda é valido dizer que:

$$k = A.H.Me \quad (4)$$

Sendo:

P – Potência do motor [cv]

Q – Vazão de ar [m^3/min]

P_{et} – Pressão estática total [cmca]

η – Rendimento do Sistema

ϕ – Fluxo de ar tabelado [$m^3/min.ton$]

k – Capacidade do sistema [kg]

P_e – Pressão estática [ca/m]

A – Área do silo [m^2]

H – Altura da coluna de grãos

Me – Massa específica do produto [kg/m^3]

Segundo Silva (2006), o fluxo de ar considerado em (3) é diferente para casa tipo de secagem. A Tabela 1 apresenta os valores adotados na literatura para cada tipo de finalidade.

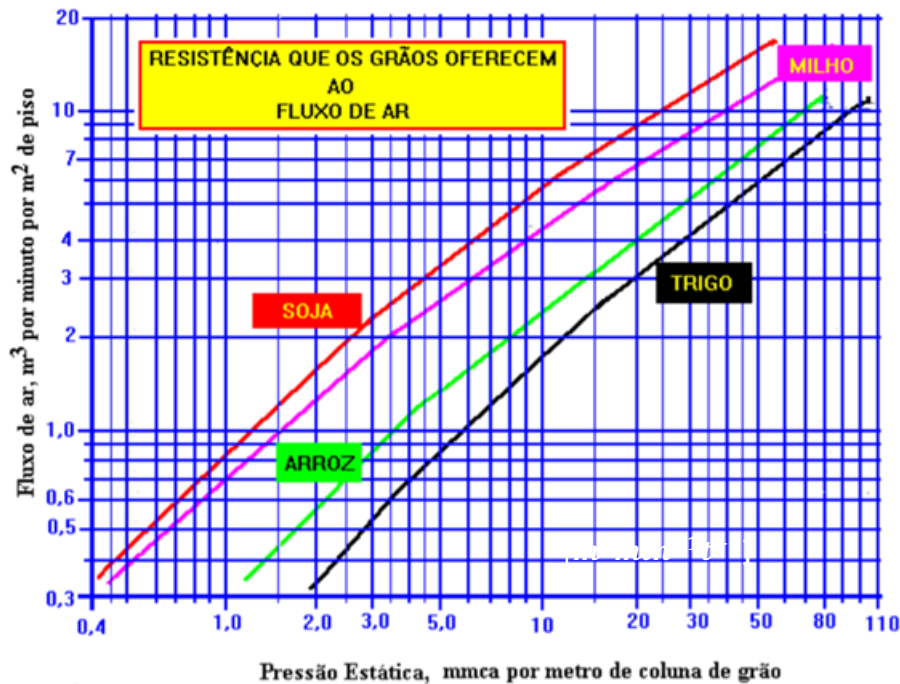
Tabela 1 - Fluxo de Ar

Fluxo de Ar [$m^3 min^{-1} t^{-1}$]		
Tipo de unidade/finalidade	Região Fria	Região Quente
Horizontal/grão seco	0,05 a 0,10	0,10 a 0,20
Vertical/ grão seco	0,02 a 0,05	0,03 a 0,10
Pulmão/grão seco	0,30 a 0,60	0,30 a 0,60
Seca-aeração	0,50 a 1,00	0,50 a 1,00

Fonte: Adaptado de Silva (2006)

Além disso, a pressão estática é uma característica intrínseca ao produto armazenado. A Figura 10 mostra um gráfico pressão estática por fluxo de ar de diferentes grãos.

Figura 10 - Gráfico Pressão Estática x Fluxo de Ar



Fonte: Adaptado de Silva (2006)

3.2. Dimensionamento do Ventilador

Para o ambiente de estudo, será dimensionado um sistema de aeração de milho para um silo com 15m de raio e 20m de altura. A eficiência do sistema de refrigeração é de 93%.

Adotando a massa específica como 1321,87 kg/m³, pode-se utilizar a equação (4) para determinar a capacidade do sistema.

$$k = (\pi 15[m]^2) \cdot 20[m] \cdot 1321,87[kg/m^3] \rightarrow k = 18687 [t]$$

Para de terminar a vazão na equação (3), são necessárias as informações da Tabela 1. Assim, o fluxo será para uma aplicação vertical quente. O valor indicado para essa aplicação é 0,05 m³ min⁻¹ t⁻¹.

Assim, a equação (3) passa a ficar:

$$Q = 0,05[m^3\text{min}^{-1}t^{-1}].18687[t] \rightarrow Q = 947,37[m^3\text{min}^{-1}]$$

Uma vez encontrado a vazão de ar, deve-se determinar a pressão estática, por metro de camada de grãos. Assim, devemos identificar vazão de ar pela área do piso.

$$\frac{Q}{A} \rightarrow \frac{947,37[m^3\text{min}^{-1}]}{\pi(15m)^2} = 1,32[m^3\text{min}^{-1}m^{-2}]$$

Na Figura 10, observando a curva para referente ao milho, encontra-se a pressão estática. Com isso, identifica-se que:

$$Pe = 2[mmca] = 0,2[cmca.m^{-1}]$$

A partir disso, pode-se determinar a pressão estática total, escrito na equação (2), lembrando que deve ser considerado os 20m de altura.

$$Pet = 7,2[cmca]$$

Com todos os fatores já definidos, é possível determinar a potência do ventilador, e assim, a equação (1) passa a ficar:

$$P = \frac{947,37[m^3\text{min}^{-1}].7,2[cmca]}{450.0,93} \rightarrow P = 15,97[cv]$$

Para esse dimensionamento, será considerado um motor comercial padrão de 20[cv] ou 15[kW].

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho será utilizada uma ferramenta de análise de desempenho de motor já consolidada na indústria.

Na indústria encontram-se ferramentas de renomados fabricantes do setor elétrico: See+ (Weg), EnergySave(ABB), EcoStruxure (Schneider) e outros mais. Para as análises desse estudo será utilizado a plataforma SinaSave - Siemens.

Segundo o próprio desenvolvedor, a descrição da plataforma é a seguinte:

O SinaSave determina o potencial de economia de energia e os tempos de retorno baseados nas condições particulares de sua aplicação. A ferramenta oferece uma ampla gama de opções de comparação de vários modos de controle e combinações de produtos para sistemas de acionamento para aplicações de bombas e ventiladores. Estes são mostrados graficamente com seus componentes, bem como os resultados mais importantes, por exemplo, o sistema e as perdas de energia de acordo com EN50598. Como consequência, o SinaSave oferece suporte na decisão de selecionar o investimento mais econômico.

Figura 11 - Tela inicial da plataforma SinaSave



Fonte: Siemens SinaSave (2020)

Uma vez sabendo como é dimensionado o motor de ventilação de silo, apresentado no Capítulo 3, é possível escolher um modelo de equipamento empregado no mercado, escolhendo o fabricante que melhor se adeque a necessidade.

Depois de determinar o modelo de motor a ser analisado, alguns dados como ciclo de máquina, potência e eficiência do equipamento, serão inseridos na plataforma SinaSave- Siemens.

Figura 12 - Tela de inserção de dados (ventilador)

The screenshot shows the Siemens SinaSave software interface for fan data entry. The interface is divided into several sections:

- Dados técnicos** (Technical Data):
 - Ventilador: Padrão (Fan: Standard)
 - Tipo de ventilador (Fan type): [Dropdown]
 - Fluido (Fluid): [Dropdown]
 - Densidade (Density): ρ [Input] kg/m³
 - Diferença total de pressão (Total pressure difference): Δp [Input] mbar
 - Vazão volumétrica (Volumetric flow): Q [Input] m³/s
 - Velocidade da ventoinha (Fan speed): n [Input] 1/min
 - Estágios do ventilador (Fan stages): [Dropdown]
 - Rendimento no ponto de medição (Efficiency at measurement point): [Input] %
 - Diferença de pressão total estática (Static total pressure difference): Δp 0,0 mbar
 - Velocidade específica (Specific speed): n_q 54,9 1/min
 - Potência necessária do veio (Required shaft power): 6,6 kW
- Dados de operação** (Operational Data):
 - Horas de operação / ano (Operating hours / year): 8 760 (24 h * 365 d) h/a
 - Distribuição (Distribution): Padrão
 - Dias de operação / ano (Operating days / year): 365
 - Horas de operação / dia (Operating hours / day): 24,0
 - Vazão (Flow): 10% 20% 30% 40% 50% 60% 70% 80% 90% 100%
 - Horas de funcionamento (Operating hours): 0,0 0,0 1,0 2,0 3,0 4,0 5,0 4,0 2,0 3,0 Por defeito
- Sistema de referência** (Reference System):
 - Modo de controle (Control mode): [Dropdown]
 - Controlador (Controller): Válvula de controle
 - Motor: SIMOTICS GP
 - Potência (Power): P_N [Input] kW
- Sistema alternativo** (Alternative System):
 - Modo de controle (Control mode): [Dropdown]
 - Controlador (Controller): Conversor
 - Motor: SIMOTICS GP VSD4000-Line
 - Potência (Power): P_N [Input] kW

Fonte: Siemens SinaSave (2020)

A partir disso, ao determinar todas as especificações de catálogo do motor, será especificado o inversor de frequência que poderá atuar com esse motor, através disso, inicia-se os estudos que são o foco do trabalho.

Além disso, dependendo da necessidade, será utilizado outras ferramentas do mesmo desenvolvedor, tais como Siemens My Motor (utilizada para especificação de motores) e Siemens DT Configurator (utilizado em recursos gráficos dos objetos de estudo). Todos os recursos são disponibilizados gratuitamente.

5. SOLUÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Nesse capítulo será apresentado o comparativo de viabilidade entre motor que utiliza a ligação estrela-triângulo (Y- Δ) e motor que utiliza controle por meio de conversor de frequência.

Para o estudo inicial será considerado as informações abaixo. Para o estudo, todas as características permanecerão constantes, modificando apenas o tipo de controle

Tabela 2 - Comparativo de Estudo

Informação Técnica	Situação A	Situação B
Potência do Motor[kW]	15	15
Acionamento	Y- Δ	Conversor de frequência
Tensão [V]	220/380/440	220/380/440

Fonte: Autor (2020)

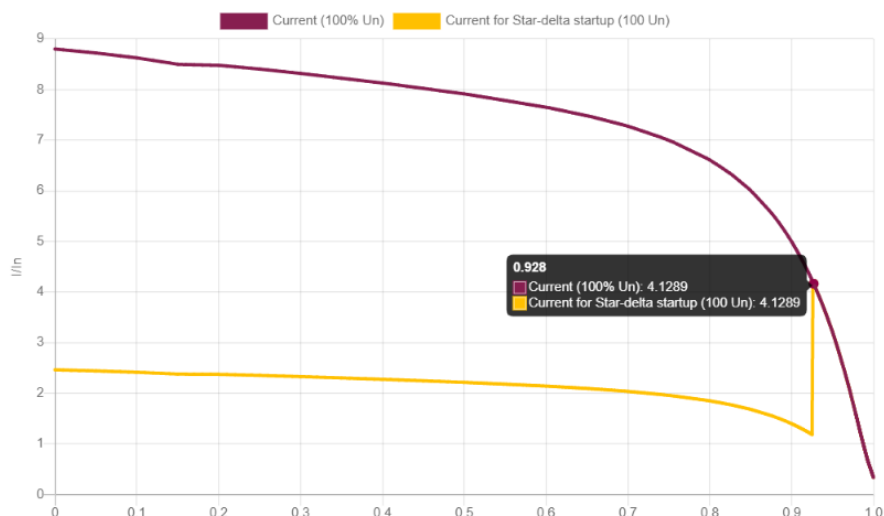
5.1. Especificação do motor para o ventilador

Foi utilizado o portal Siemens MyMotor para especificar o motor mais adequado para a aplicação. Assim foi selecionado um motor da linha SIMOTICS GP 1LE, que é recomendado em aplicações generalistas.

Depois de selecionado o motor, foi utilizado recursos da própria plataforma para identificar suas características de operação do motor selecionado. A Figura 13 representa o diagrama de corrente por velocidade, quando o motor está em ligação estrela- triângulo (Y- Δ).

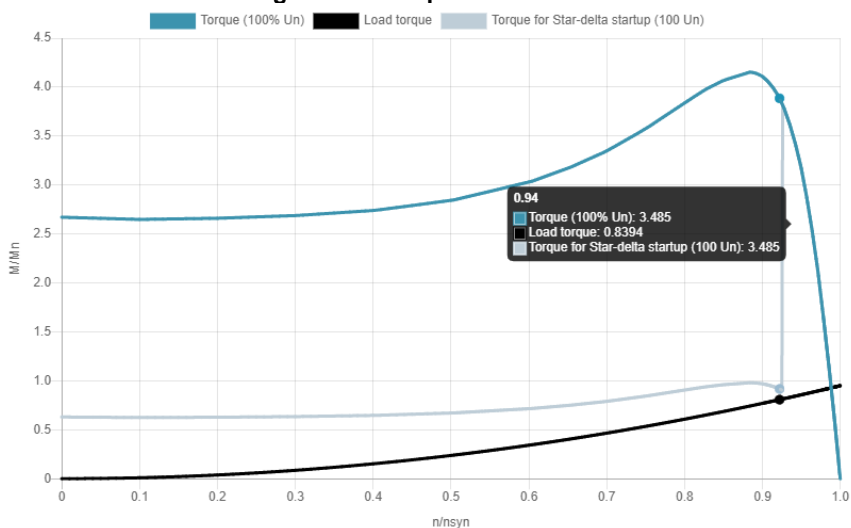
A Figura 14 mostra a curva de torque para o mesmo motor.

Figura 13 - Corrente x Velocidade



Fonte: Siemens MyMotor (2020)

Figura 14 - Torque x Velocidade



Fonte: Siemens MyMotor (2020)

5.2. Simulação SinaSave

Com os parâmetros que temos até então, será utilizado o software SinaSave para fazer o comparativo econômico entre as alternativas de controle para o motor apresentado na seção anterior.

Para realizar a simulação, é necessário indicar o período de operação do ventilador. As figuras abaixo são de um sistema referenciado em uma operação 24h/dia e 250dias /ano.

Figura 15 - Inserção de dados SinaSave

Ponto de carga e perfil de serviço

Potência necessária do veio P 15,0 kW
 Horas de operação / ano 6 000 (24 h * 250 d) h/a
 Velocidade da ventoinha n 3 000 1/min
 Distribuição Padrão

Sistema Y-Δ **Sistema Otimizado**

Modo de controle
 Controlador Válvula de controle Controlador Conversor

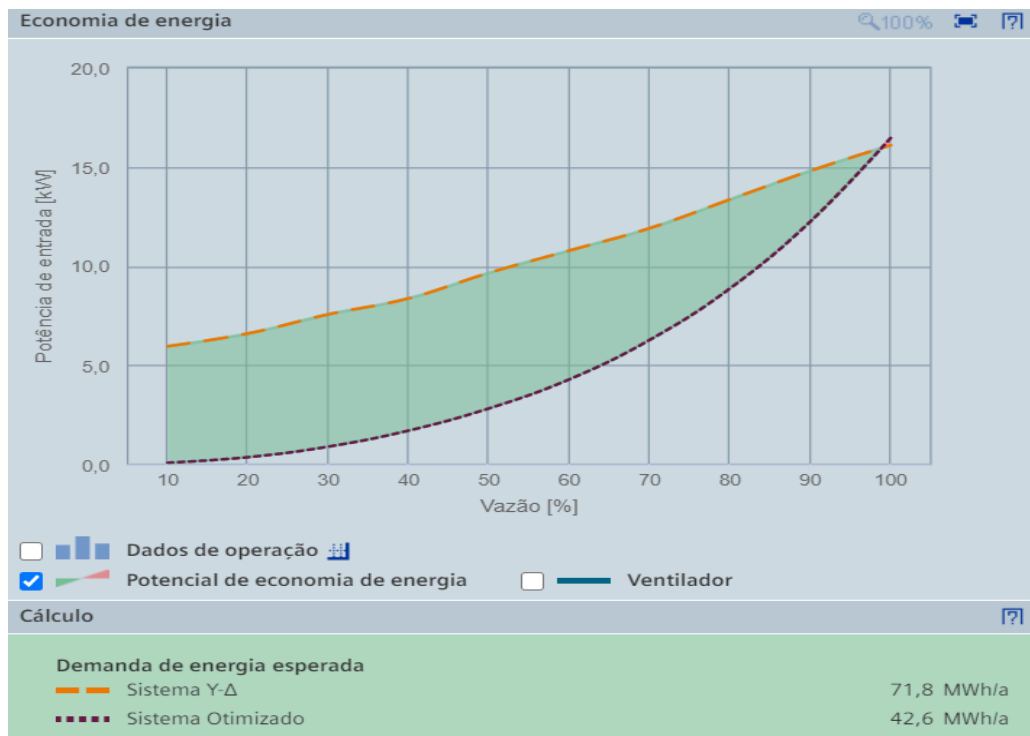
Motor: SIMOTICS GP **Motor: SIMOTICS SD Basic Line**
 Potência P_N 15 kW Potência P_N 15 kW
 Eficiência η_N IE4 93,3 % Eficiência η_N IE4 93,3 %

Contator: SIRIUS 3RA Star-Delta Combination **Conversor: SINAMICS G120 Modular**
 Potência nominal P_N 15 kW Potência nominal P_N 15 kW
 Tipo Combinação estrela-tr Tipo de montagem Chassis

Fonte: Siemens SinaSave (2020)

Com os dados inseridos como na Figura 15, é possível gerar um gráfico comparativo entre os dois sistemas: um com ligação estrela – triângulo (Y-Δ) e um outro sistema otimizado considerando o uso de inversor de frequência. Esse gráfico pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 - Comparação energética entre os dois sistemas



Fonte: Siemens SinaSave (2020)

É notável que a demanda de energia entre os dois sistemas possui diferenças consideráveis, e o sistema com inversor de frequência tem um custo energética reduzido em relação ao sistema mais rudimentar

Ainda, vale dizer que o tipo de operação pode ser modificado. A Tabela 3 mostra o comparativo entre o consumo de energia em relação as diferentes faixas de operações.

Tabela 3 - Consumo de energia x operação

Consumo de Energia x Operação			
Operação	Sistema Y- Δ [MWh/a]	Sistema Otimizado [MWh/a]	Redução
24h/365dias	104,8	62,3	40,55%
24h/250dias	71,8	42,6	40,67%
18h/250dias	53,9	32,0	40,63%
12h/250dias	35,9	21,3	40,67%
6h/250dias	18,0	10,7	40,56%

Fonte: Autor (2020)

Ao analisar os dados de consumo de energia, podemos afirmar que, independentemente do tipo de operação, o sistema otimizado tem um rendimento médio de 40,62% em relação ao sistema sem nenhum tipo de controle.

5.3. Inversores de frequência e sua utilização em silos

O uso do sistema com chave partida estrela-triângulo (Y- Δ) apesar de ser um método de baixo custo, gera impactos significativos em relação a qualidade de energia, isso porque esse método provoca distúrbios na rede devido aos afundamentos de tensão.

Segundo a revista O Setor Elétrico (2018), o afundamento de tensão se dá pela seguinte situação:

Durante a partida, os motores elétricos solicitam da rede de alimentação uma corrente de valor elevado, da ordem de seis a dez vezes a sua corrente nominal. Nestas condições, o circuito, que, inicialmente fora projetado para transportar a potência requerida pelo motor, é solicitado agora pela corrente de acionamento durante um certo período de tempo. Em consequência, o sistema fica submetido a

uma queda de tensão muito superior aos limites estabelecidos, podendo provocar sérios distúrbios operacionais nos equipamentos de comando e proteção, iluminação e no sistema elétrico de uma forma geral.

Para resolver isso, deve-se adotar um sistema de controle que faça o amortecimento da corrente de partida, seja através de uma soft starter ou um inversor de frequência.

Alguns fabricantes de inversores de frequência desenvolvem blocos lógicos que permitem a customização de operação para a aplicação desejada, e o mesmo ocorre para uso em silos.

Em aplicações mais generalistas em silos, os inversores são utilizados no controle do sistema de ventilação da secagem de grãos. Em sistemas com poucos recursos tecnológicos, o ciclo de operação depende basicamente do operador, e por ser realizado de maneira manual, pode ocorrer da secagem dos grãos não ser efetiva. Caso o sistema seja acionado antes do período correto, é possível que o grão não esteja totalmente seco, provocando a possível germinação dele. Já em casos que o sistema seja acionado de maneira tardio, é possível que o grão fique ressecado, gerando perda de massa do produto, causando diminuição do produto e aumentando o custo de produção.

Em cooperativas de beneficiamento de grãos com maior apelo tecnológico todo o processo de secagem de grãos é automatizado por sistemas de controle com inversores de frequência. Assim, vale mencionar que a Weg possui um case de sucesso para a armazenagem de grãos na COCARI (Cooperativa Agropecuária e Industrial)

O sistema implementado contava com uma série de sensores para fazer medição de temperaturas em diferentes pontos do silo para o perfeito equilíbrio térmico (assim seria evitado a formação de pontos quentes que poderiam apodrecer os grãos). As informações dos sensores eram enviadas ao próprio inversor de frequência, assim, de acordo com cada tipo de grão armazenado, o inversor calculava a taxa de aeração ideal. A solução implementada gerou uma economia que variava de 40% a 90% de acordo com o grão armazenado. Por mais que os dados da Tabela 3 na seção 5.2 contenha somente a simulação e nenhuma medição real, os números obtidos são da mesma ordem de grandeza do que o projeto implementado pela Weg.

É válido dizer que em silos que não possuem sistemas de controles, a rotação do motor sempre será máxima, já em silos que trabalham com sistemas minimamente inteligentes, o consumo energético passa a ser mais eficiente, e qualidade do produto armazenado é mais eficaz.

5.4. Análise de Payback

Projetos costumam ser grandes empreendimentos que buscam otimizar processos, no entanto, para que um projeto saia do papel, é necessário um estudo de viabilidade de implementação.

A concepção de um projeto se dá exclusivamente na ideia de que o custo de investimento não sobressaia em relação ao ganho de retorno. Esse conceito é conhecido como *payback*.



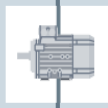
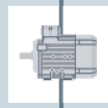


Macedo (2005) atribui a seguinte definição:

O *payback* é uma ferramenta empregada para estabelecer o período que levará para o investidor receber de volta o capital investido no projeto. Esse tempo de retorno é determinado a partir do cálculo dos lucros obtidos em cada período

Uma vez informado o custo de energia, a própria ferramenta SinaSave é capaz de calcular o tempo de retorno do investimento, pois a ideia de um projeto desse tipo é fazer um investimento em equipamentos de melhor desempenho, e com isso, o custo de energia elétrica seja reduzido ao longo do tempo.

Ao indicar qual o motor a ser analisado, a própria ferramenta mostra o preço do mesmo, e já faz o cálculo do custo de um inversor de frequência, acionamentos e proteções da ligação estrela – triângulo (Y- Δ). Note que na Figura 17 o custo do motor é igual para ambas as aplicações, e isso se deve justamente ao fato de ter bases comparáveis.

Figura 17 - Dados comerciais

Sistema Y-Δ		Sistema Otimizado	
Modo de controle ?  Controlador: Válvula de controle		Modo de controle ?  Controlador: Conversor	
Motor: SIMOTICS GP ?  Potência P_N : 15 kW Preço do produto: <input type="text" value="32 875"/> R\$ Get technical data		Motor: SIMOTICS SD Basic Line ?  Potência P_N : 15 kW Preço do produto: <input type="text" value="32 875"/> R\$ Get technical data	
Contator: SIRIUS 3RA Star-Delta Combination ?  Potência nominal P_N : 15 kW Preço do produto: <input type="text" value="542"/> R\$ Get technical data		Conversor: SINAMICS G120 Modular ?  Potência nominal P_N : 15 kW Preço do produto: <input type="text" value="13 996"/> R\$ Get technical data	

Fonte: Siemens SinaSave (2020)

Quando se fala de payback em projetos de engenharia, a vida útil dos periféricos tem muita importância na tomada de decisão. Nesse estudo, foi considerado a vida útil de 5 anos, tempo aceitável, até porque com as devidas manutenções, pode chegar facilmente a 10 anos.

A Figura 18 é de um sistema de referenciamento em operação de 24h/dia e 250dias/anos. Observe na figura que para essa operação o retorno do investimento se dá em 9,2 meses. O custo de energia elétrica utilizado foi o da Tarifa Convencional Rural – Subgrupo B2 Rural Copel de R\$/ kWh 0,60707.

Figura 18 - Retorno de Investimento



Fonte: Siemens SinaSave

A Tabela 4 mostra o tempo de retorno para os diferentes perfis de operação, contudo, é válido observar que quanto mais horas de operação, mais rápido é o tempo de retorno desse investimento. Isso se deve porque independentemente do sistema adotado, o custo de implementação em todos eles serão o mesmo, e como o retorno de investimento se dá em amortização do custo de energia elétrica, logo, o sistema que mais demandam energia tendem ser a mais rentáveis para o payback. A economia de energia é referente a diferença do custo de energia elétrica entre o sistema usual e o sistema otimizado.

Tabela 4 - Payback x Operação

Economia Durante 5 anos de uso		
Operação	Economia de custo energéticos [R\$]	Tempo de retorno de investimento [meses]
24h/365dias	130.000,00	6,3
24h/250dias	88.000,00	9,2
18h/250dias	67.000,00	12,2
12h/250dias	44.500,00	18,2
6h/250dias	22.100,00	36,0

Fonte: Autor (2020)

5.5. Custo de armazenagem

Até o momento, esse trabalho preocupou-se em validar o uso de inversores de frequência para otimizar o desempenho dos motores aplicados em silos. Nessa seção serão abordados os custos que envolvem o armazenamento de grãos e compará-lo com base no custo energético do sistema otimizado.

Da solução de eficiência que foi estabelecida, em ambas as aplicações foi considerado o mesmo motor, diferenciando apenas no tipo de controle. Vale dizer que a ligação estrela – triângulo (Y- Δ) que é voltada somente para o acionamento do motor, possui custo muito menor em relação ao inversor de frequência, que é utilizado no acionamento e no controle de operação. A Tabela 5 mostra o comparativo entre os custos envolvidos nas soluções. Vale dizer que os custos de instalação e manutenção mencionados são estimativas baseadas nas práticas de mercado.

Tabela 5 - Comparativo de implementação

Custos de implementação					
	Motor [R\$]	Acionamento/ Controle [R\$]	Instalação [R\$]	Consumo de energia [MWh/a]	Manutenção [R\$]
Aplicação Geral (referência)	32.287,00	542,00	200,00	71,80	200,00
Aplicação Otimizada	32.287,00	13.996,00	1.400,00	42,60	1.400,00

Fonte: Autor (2020)

Além da comparação quanto a implementação do projeto, deve-se considerar a influência nos custos de produção. Quando se trata de armazenamentos de grãos, deve-se levar em conta todos os custos que envolvem não só a produção, mas também a armazenagem para a formação do preço do produto final. De maneira geral, tem-se dois tipos de custos: Custos Fixos e Custos Variáveis.

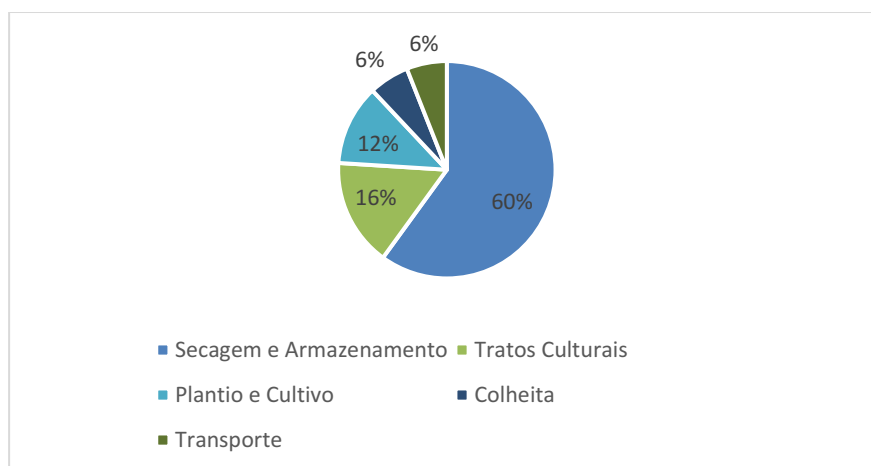
Custos fixos são aqueles que não sofrem alteração do valor em caso de aumento ou diminuição da produção, por exemplo: mão de obra fixa, seguros, depreciação, custos de aluguel/propriedade etc. Custos variáveis são aqueles que mudam de acordo com a produção, podendo variar para mais ou pra menos, por

exemplo: energia elétrica, mão de obra sazonal, custo de carga e descarga, manutenção e reparo, gastos gerais etc.

Para fazer a estimativa do custo de armazenagem do sistema otimizados, será empregado o método mais famoso dos estudos de economia: *coeteris paribus*. De acordo com Blank (2014), esse conceito que é originado do latim significa “tudo o mais constante”, ou seja, independente do custo envolvem o preço de grãos, todos eles serão constantes, e a única variação é um fator que é escolhido para ser analisado. Nesse caso, o fator variável será o custo energético.

Segundo Lopes et al (2000) a secagem e armazenamento requer cerca de 60% do total de energia utilizada na produção, enquanto os tratos culturais consomem 16%, o plantio e cultivos 12,0%, a colheita 6,0% e o transporte 6,0%. A Figura 19 mostra essas informações de maneira gráfica.

Figura 19 - Consumo de energia na produção de grãos



Fonte: Adaptado de Lopes et al (2000)

Note que na Tabela 6 os custos que não envolvem secagem e armazenamento foram classificados como “Outros Custos”, e nessa análise, ficaram fixos em ambas as aplicações. Assim, o custo de “Secagem e Armazenamento” seria reduzido de 60% para 35,53%. Assim, essa redução diminui o produto final em 24,37%.

Tabela 6 - Comparativo no consumo de energia

Consumo de Energia na Produção de Grãos				
	Secagem e Armazenamento	Outros custos	Produto Final	Redução no Produto final
Aplicação Geral (referência)	60,00%	40,00%	100,00%	-
Aplicação Otimizada	35,63%	40,00%	75,63%	24,37%

Fonte: Autor (2020)

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho buscou-se uma análise de efetividade de substituição de um sistema rudimentar e sem muitas tecnologias, para um sistema otimizado por meio de um inversor de frequência.

De acordo com as simulações realizadas, a proposta de solução com inversores de frequência permite a economia média de 40,62% em relação ao sistema de partida estrela - triângulo (Y- Δ), que apesar de não ser o mais eficiente, ainda é bastante utilizado em alguns polos rurais de menor apelo tecnológico. Ainda, em relação a qualidade de energia elétrica, o sistema otimizado elimina os afundamentos de tensão que se são bastante comuns em sistemas com partida estrela - triângulo (Y- Δ).

Além disso, foi considerado o custo de implementação do inversor de frequência de R\$ 13.996,00 e com isso foi realizado o estudo de retorno de investimento (payback). Notou-se que o payback variava de acordo com o tipo de operação do sistema, ou seja, em operações com maior consumo de energia o retorno era mais rápido do que nas operações de menor consumo de energia. Isso ocorre porque o retorno do investimento se dá justamente pela amortização do consumo de energia elétrica. Vale dizer que, de acordo com as simulações e com a composição de custos mencionado por Lopes et al (2000), o sistema otimizado representaria cerca de 24,37% de economia no preço final do produto. Assim, o produto final fica mais competitivo, se tornando vantajoso para o produtor e o consumidor.

Apesar de ter sido apresentado uma tecnologia que já existe, esse estudo ilustra a importância de adesão a metodologias mais inovadoras buscando a automatização do setor rural. Contudo, o estudo realizado serviu para mostrar a viabilidade de adesão aos recursos tecnológicos que já temos disponíveis, e que

certamente não são barato, mas pensando a longo prazo, a viabilidade se torna promissora, e o próprio investimento tende a se pagar.

6.1. Proposta de trabalhos futuros

O foco central desse trabalho foi provar a viabilidade de implementação conjunta de inversor de frequência por meio de ferramentas que se encontram consolidadas na indústria. Os dados que foram apresentados são referentes somente a simulação, e não foi realizado nenhuma medição física. Para trabalhos futuros, pode-se realizar a medições com analisador de energia em sistema físico e comparar os resultados obtidos nas simulações

Além disso, seria pertinente acrescentar estudo de mercado de energia, analisando as diferentes tarifas e comparar com a migração para o livre mercado de energia.

REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo. **Eletrônica de potência**. 6. ed. Florianópolis, SC: Ed. do Autor, 2006. 315 p.

BLANK, L., TARQUIN, A. **Engenharia Econômica**. Tradução da sexta edição. Editora McGraw Hill. São Paulo. 742 p. PINDICK, R., S. ; RUBINFELD, D., L. Microeconomia - 8ª Edição. Ed. Pearson. 2014.

CAMARGO, Cícero Benedito. **Acionamentos de motores de indução através das técnicas de controle escalar e vetorial**. Sorocaba, São Paulo, p 55-60, 2011.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Electric machinery**. 6th ed. Boston, MA: McGraw-Hill, c2003. xv, 688 p. (McGraw-Hill series in electrical engineering. Power and energy).

LACERDA FILHO, A. F. ; SILVA, J. S. . **Secagem em combinação**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 10, p. 671-678, 2006.

O SETOR ELÉTRICO. **Queda de tensão na partida de motores em sistemas industriais**. 2018. Disponível em < [SILVA, J. S.; LOPES, Roberto Precci ; MACHADO, Marise Cotta . **Fornalha a carvão para secagem de produtos agrícolas**. Engenharia na Agricultura, Viçosa-MG, v. 2, n.1, p. 1-24, 2000.](https://www.osetoelettrico.com.br/queda-de-tensao-na-partida-de-motores-em-sistemas-industriais/#:~:text=O%20afundamento%20de%20tens%C3%A3o%20nas,problema%20para%20ind%C3%BAstrias%20e%20distribuidoras.&text=Existem%20diversos%20m%C3%A9todos%20e%20solu%C3%A7%C3%B5es,%20inversores%20de%20frequ%C3%AÂncia%20etc.> Acesso em 24 Setembro 2020.</p></div><div data-bbox=)

SILVA, J. S.. **Estado da Arte da Secagem e Armazenagem de Grãos No Brasil**. Engenharia na Agricultura, v. 3, n.6, p. 1-17, 1993.

SILVA, J. S.; SABIONI, P. M. ; AFONSO, A. D. L. ; PINTO, F. A. C. . **Avaliação de Secadores e Custo de Secagem de Produtos Agrícolas**. Engenharia na Agricultura, v. 2, n.2, p. 1-19, 1992.

SILVA, J. S.; L. FILHO, A. F. ; DALPASQUALE, V. A. . **Metodos de Secagem e Secadores**. Informe Agropecuário (Belo Horizonte), v. 9, n.99, p. 3-5, 1983.

SOUZA, Cristiano Márcio Alves de; QUEIROZ, Daniel Marçal de; LACERDA FILHO, Adílio Flauzino de. **Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa**. Sci. agric. (Piracicaba, Braz.), Piracicaba , v. 59, n. 4, p. 653-660, Dec. 2002 Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-90162002000400005&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 1º Julho 2020.

WEG. **Solução de Eficiência Energética para Aeração de Silos de Armazenagem de Grãos**. 2011. Disponível em <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h61/hfd/WEG-cocari-solucao-de-eficiencia-energetica-para-aeracao-de-silos-de-armazenagem-de-graos-estudo-de-caso-portugues-br.pdf> > Acesso em 01 Junho 2020.