



Retrofit em Sistema Elétrico de Caldeira de Alta Pressão de uma Usina Sucroalcooleira

Retrofit of the Electrical System of a High-Pressure Boiler in a Sugar and Ethanol Plant

Renan Henrique da Silva

Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

Ronaldo Gomes Figueira

Orientador, Docente Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

Resumo: Este trabalho apresenta um estudo sobre o processo de retrofit realizado no sistema elétrico de uma caldeira de alta pressão em uma usina do setor sucroalcooleiro. O objetivo foi modernizar equipamentos obsoletos, como inversores de frequência, soft starters, relés inteligentes e o CLP, substituindo-os por modelos mais modernos, com recursos avançados de automação e eficiência energética. A modernização possibilitou a integração de novas funcionalidades, como a aplicação da função Fly Starter, que permitiu o religamento seguro dos motores mesmo em movimento, reduzindo o tempo de parada dos exaustores. Além disso, foram implementados módulos e resistores de frenagem, que proporcionaram paradas rápidas e seguras em cargas de alta inércia. A análise comparativa entre o cenário antes e depois do retrofit demonstrou uma redução de aproximadamente 10,05% no consumo total de energia elétrica, equivalente a 734.808 kWh/ano, além de ganhos significativos na confiabilidade e na manutenção do sistema. Os resultados evidenciam que o investimento trouxe benefícios práticos, como maior estabilidade operacional, menor desgaste mecânico e aumento da produtividade da planta industrial.

Palavras-chave: automação industrial; caldeira; eficiência energética; função fly starter; inversores de frequência; retrofit.

Abstract: This paper presents a study of the retrofit process performed on the electrical system of a high-pressure boiler in a sugar and ethanol plant. The objective was to modernize obsolete equipment, such as frequency inverters, soft starters, smart relays, and the PLC, replacing them with more modern models with advanced automation and energy efficiency features. The modernization enabled the integration of new functionalities, such as the Fly Starter function, which allowed the motors to restart safely even while moving, reducing exhaust fan downtime. Furthermore, braking modules and resistors were implemented, providing quick and safe stops for high-inertia loads. A comparative analysis between the pre- and post-retrofit scenarios demonstrated a reduction of approximately 10.05% in total electricity consumption, equivalent to 734,808 kWh/year, in addition to significant gains in system reliability and maintenance. The results show that the investment brought practical benefits, such as greater operational stability, reduced mechanical wear, and increased industrial plant productivity.

Keywords: industrial automation; boiler; energy efficiency; fly starter function; frequency inverters; retrofit.

INTRODUÇÃO

O setor sucroalcooleiro desempenha um papel crucial na economia brasileira, consolidando-se ao longo dos séculos como um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento do país (Cavichioli, D'alessandro, 2024). O setor é um dos principais responsáveis no fornecimento de energia, atendendo cerca de 16,8% da demanda total brasileira (Empresa de Pesquisa Energética, 2024). Contudo, as usinas sucroalcooleiras, muitas em operação há décadas, apresentam equipamentos obsoletos que demandam modernização e aplicação de retrofit, com o objetivo de melhorar a eficiência e a confiabilidade na produção.

O retrofit é um processo de modernização que visa atualizar máquinas e sistemas antigos por meio da substituição de componentes obsoletos por tecnologias mais recentes, sem a necessidade de alterar toda a estrutura existente. Esse processo é fundamental para prolongar a vida útil dos equipamentos, reduzir custos operacionais e otimizar a eficiência energética. Um exemplo relevante pode ser observado no setor industrial, onde diversas usinas realizaram retrofits em caldeiras e sistemas de automação, substituindo inversores antigos por modelos mais modernos e integrando funções avançadas de controle, resultando em maior estabilidade operacional e menor consumo de energia. A modernização de sistemas elétricos industriais é essencial para garantir eficiência, segurança e confiabilidade operacional. No setor sucroenergético, essa atualização possibilita a redução de falhas, a otimização dos processos e a melhoria na manutenção. No caso em estudo, o sistema elétrico da caldeira passará por um processo de retrofit, no qual serão substituídos inversores, soft starters, relés inteligentes e o CLP por modelos mais modernos. Essas mudanças foram motivadas pela necessidade de garantir maior eficiência energética, facilitar a manutenção e implementar novas funcionalidades, como a aplicação da função Fly Starter nos exaustores da caldeira.

Este trabalho tem como objetivo apresentar os dados do retrofit em um sistema elétrico, destacando os possíveis benefícios relacionados à economia de energia, manutenção e operação. Para isso, será realizada uma comparação entre os equipamentos antigos e os novos, identificando as vantagens da modernização e analisando os ganhos em eficiência energética e automação. Além disso, serão avaliadas as reduções de custos e a facilidade de manutenção, bem como os benefícios trazidos pela implementação da função Fly Starter nos exaustores da caldeira.

A função Fly Starter é um recurso presente em inversores de frequência modernos, como os da linha WEG CFW11, voltado à religação de motores que já se encontram em movimento no momento da partida. Essa funcionalidade é especialmente útil em sistemas com cargas de alta inércia, como ventiladores, exaustores e centrífugas, onde o rotor do motor pode continuar girando por vários segundos ou até minutos após o desligamento do inversor.

As máquinas e equipamentos na referida caldeira apresentam obsolescência, além de dificuldades de manutenção e baixa disponibilidade de peças de reposição. Espera-se que a substituição dos inversores Siemens Master Drive Simovert

pelos inversores da WEG modelo CFW11, bem como a troca da soft starter, dos relés inteligentes e do CLP, permitirá ganhos operacionais significativos. Além disso, a modernização possibilitará a implementação de novas funcionalidades, como o controle otimizado dos exaustores e ventiladores, proporcionando maior estabilidade ao sistema. O problema central abordado neste trabalho é compreender como a substituição dos equipamentos elétricos da caldeira impactou a eficiência e a confiabilidade do sistema. A hipótese considerada é que a modernização com retrofit trará benefícios significativos, como a redução no consumo de energia, maior confiabilidade e vida útil dos equipamentos, além de maior facilidade na manutenção e integração com sistemas automatizados.

Foi realizada pesquisa bibliográfica, bem como um estudo de caso em uma usina do setor sucroalcooleiro, visando analisar o retrofit realizado na caldeira. Para isso, serão utilizados dados operacionais coletados antes e depois das modificações, além de revisão de literatura sobre modernização de sistemas elétricos industriais. A pesquisa será desenvolvida em quatro etapas: levantamento dos equipamentos substituídos e suas especificações técnicas, comparação dos dados operacionais antes e depois do retrofit, análise dos benefícios obtidos em termos de eficiência, manutenção e confiabilidade, e, por fim, discussão dos resultados e sugestões para futuras melhorias.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresenta os principais conceitos técnicos que fundamentam a modernização do sistema elétrico da caldeira. São abordados os motores de indução trifásicos, amplamente utilizados na indústria por sua robustez e confiabilidade; as caldeiras industriais, essenciais na geração de vapor, com destaque para os tipos flamotubulares e aquatubulares, e os inversores de frequência, que possibilitam o controle da velocidade dos motores, com benefícios como eficiência energética e a função Fly Starter, que permite o religamento suave de motores em movimento. Também foram explorados os CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), que são responsáveis pelo controle automatizado dos processos e cuja atualização facilita a integração com os novos equipamentos. A revisão reforça a importância da modernização para aumentar a eficiência, confiabilidade e facilidade de manutenção dos sistemas industriais.

Motores Elétricos

Entre as várias formas construtivas de um motor de corrente alternada o mais aplicado em soluções industriais é o motor de indução trifásico. Seu princípio de funcionamento está baseado no princípio da indução eletromagnética entre o estator e rotor. Segundo Franchi (2007) o estator é a parte estática do motor onde são encontrados a carcaça, o núcleo de chapas e o enrolamento trifásico. Ainda no estator, o enrolamento trifásico é constituído de bobinas defasadas por um ângulo de 120 graus entre si, as quais são responsáveis pelo campo magnético girante (Carvalho, 2007).

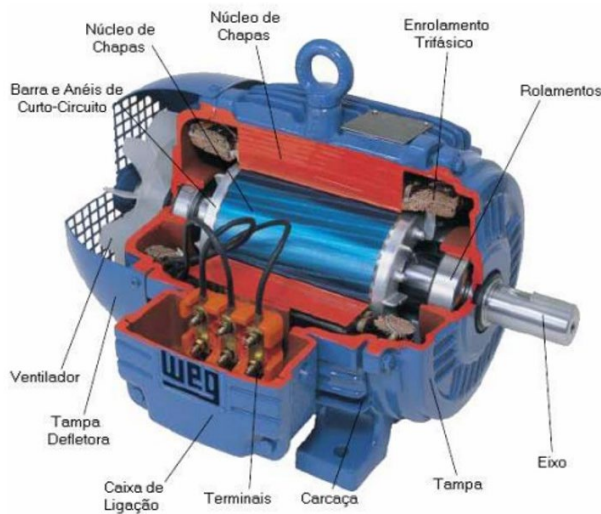
Motores de indução trifásicos aplicam um simples, mas inteligente e eficiente sistema de conversão eletromagnética de energia. No motor de gaiola de esquilo, o qual constitui a vasta maioria das máquinas de indução trifásica, o rotor é inacessível. Nenhum contato móvel é necessário, tais como o comutador e as escovas das máquinas de corrente contínua ou os anéis deslizantes e as escovas nos motores e geradores assíncronos. Este arranjo eleva consideravelmente a confiabilidade dos motores de indução e elimina os riscos de centelhas, permitindo aos motores do tipo gaiola de esquilo serem utilizados com segurança em ambientes muito agressivos ou em áreas classificadas contendo atmosferas potencialmente explosivas (Bulgarelli, 2006).

No motor de indução trifásico ocorre uma interação magnética entre o rotor e o estator. Quando o motor está parado a frequência das correntes que surgem nos enrolamentos do rotor é idêntica à frequência das correntes do estator. A partir do momento que o motor acelera, a frequência das correntes do rotor diminui, de tal forma que sob condições de carga nominal ela é de apenas uma pequena parcela do estator (tipicamente de 2 a 10%).

Por outro lado, a rotação mecânica é muito próxima da velocidade com que o campo magnético do estator gira, chamada de velocidade síncrona n_s , que é dada por (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2006).

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

Figura 1 - Motor de indução trifásico.

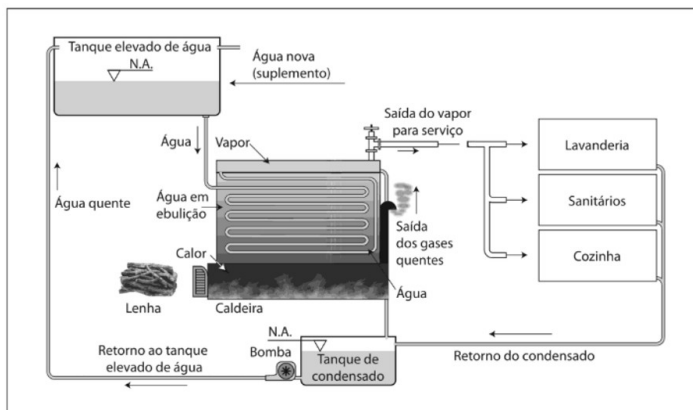


Fonte: catálogo do fabricante WEG (2.005).

Caldeiras Industriais

As caldeiras industriais são equipamentos projetados para gerar vapor por meio da queima de combustíveis. Esse vapor pode ser utilizado em diversos processos industriais, como aquecimento, geração de eletricidade, esterilização, entre outros. Basicamente, uma caldeira industrial consiste em um sistema fechado onde a água é aquecida e transformada em vapor. Existem diferentes tipos de caldeiras industriais, caldeiras flamotubulares e aquatubulares, cada uma adequada para uma aplicação específica. As caldeiras a vapor, as caldeiras a óleo térmico e as caldeiras a água quente são algumas das variantes mais comuns encontradas na indústria (SAG Industrial, 2025). As caldeiras flamotubulares são caldeiras a vapor em que os gases quentes da combustão passam por tubos localizados no interior da caldeira, aquecendo a água que circula externamente aos tubos. Esses tubos geralmente são curtos e possuem um diâmetro pequeno, o que torna esse tipo de caldeira mais compacta e mais fácil de instalar (Multiagua, 2025). Outro ponto a ser citado é que elas são utilizadas em aplicações de baixa e média pressão, o que as tornam ideais para indústrias que possuem processos que não necessitam de uma grande quantidade de vapor (Multiagua, 2025). As caldeiras aquatubulares são caldeiras a vapor em que a água circula pelos tubos localizados no interior da caldeira, enquanto os gases quentes da combustão passam externamente aos tubos, os quais são mais longos e possuem um diâmetro maior do que os tubos das caldeiras flamotubulares (Multiagua, 2025).

Figura 2 - Diagrama de funcionamento de uma Caldeira.



Fonte: Multiagua, 2025.

Inversores de Frequência

Os dispositivos utilizados para controle de velocidade de motores de indução denominados conversores de frequência ou inversores de frequência, trabalham convertendo uma tensão CA em CC e depois novamente em CA, permitindo o controle da frequência de saída dos motores (Franchi, 2007).

Os inversores de frequência geralmente são utilizados junto a motores de indução, para que haja a possibilidade de variação da velocidade de operação e/ou da carga acoplada ao motor. No entanto, o conteúdo harmônico gerado pelo inversor varia de acordo com esta variação de velocidade, assim, podendo causar danos à carga acoplada do inversor, bem como à rede elétrica (Callegaro; Rheinheimer; Kotlinski; Jappe, 2004).

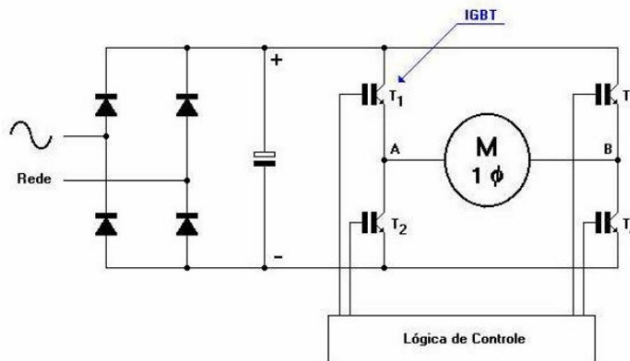
Os inversores de frequência são formados basicamente por uma ponte retificadora e dois capacitores de filtro, que alimentam um barramento DC, que por sua vez alimenta tiristores IGBT's que são comandados através de uma lógica de controle, ligando e desligando-os de modo a alternarem o sentido da corrente que circula pelo motor (Rodrigues, 2007).

Figura 3 - Inversor WEG modelo CFW11.



Fonte: Manual WEG.

Figura 4 - Diagrama de Funcionamento de inversor de Frequência.



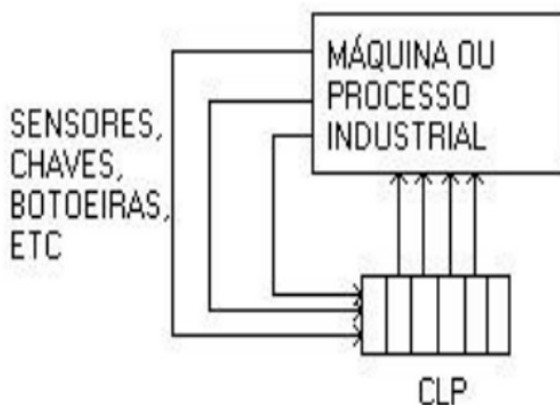
Fonte: Manual WEG.

CLPs (Controladores Lógicos Programáveis)

CLPs, ou PLCs (Programmable Logic Controller), são frequentemente definidos como miniaturas de computadores industriais que contêm um hardware e um software que são utilizados para realizar as funções de controles. Embora um tanto esdrúxulo, este conceito de pequenos computadores não fere a sua real concepção, visto que os CLPs também se encaixam na antiga Arquitetura de Von Neumann. Uma unidade central de processamento recebe informações através de uma unidade de entrada de dados, processa estas informações segundo as especificações de um programa armazenado em uma unidade de memória, e devolve os resultados através de uma unidade de saída. O sistema de entrada e saída é conectado fisicamente nos dispositivos de campo (interruptores, sensores etc.), e provem também uma interface entre a CPU e o meio externo (Lima; Silveira, 2003).

Segundo Warnock (1997), um CLP é definido como “um sistema eletrônico de operação digital desenvolvido para uso em ambiente industrial que possui memória programável para o armazenamento interno de instruções e que implementa funções específicas de lógica, sequenciamento, temporização e aritmética para controle através de módulos de E/S (Entrada e Saída) digitais e analógicos de vários tipos de máquinas ou processos.

Figura 5 - Diagrama de Funcionamento de CLP.



Fonte: Corret, 1998.

Funcionamento da Função Flystarter em Inversores de Frequência

Possibilita a partida do motor de forma suave quando este estiver rodando. A captura da frequência de giro do motor evita picos de corrente e impactos mecânicos na carga. Este recurso se utiliza quando é necessário o religamento do motor mesmo que ele ainda esteja em movimento. Para os inversores comuns sem este recurso, o religamento não é possível devido ao fato de que quando o motor ainda encontra-se girando, existe uma magnetização residual que faz com que seja gerada uma

tensão nos seus terminais. Com o religamento do inversor, surgem então picos de corrente transitórias que fazem com que a proteção contra curto-circuito do inversor atue, bloqueando-o (Chiarelli, 2011).

PROCESSO DE RETROFIT E MELHORIAS IMPLEMENTADAS

Será apresentada a realização do retrofit do sistema elétrico da caldeira da usina. O objetivo principal foi modernizar os equipamentos de comando e controle, visando melhorar a confiabilidade, facilitar a manutenção e aumentar a eficiência energética do sistema. As modificações foram realizadas com base em critérios técnicos, operacionais e de segurança, respeitando as características do processo industrial existente.

Situação Anterior ao Retrofit na Caldeira

Antes da modernização, o sistema elétrico da caldeira contava com diversos componentes já defasados e com dificuldades de reposição no mercado. Dentre os principais elementos obsoletos, destacam-se:

- Soft Starter Siemens SikoStarter no ventilador pneumático.
- Inversor Siemens MicroMaster 440 no ventilador primário.
- Inversor Siemens MicroMaster 440 nos dosadores de bagaço.

Figura 6 - Inversores Dosadores de Bagaço, Softstarter e Ventilador Primeiro.



Fonte: autoria própria.

A substituição da soft starter Siemens SikoStarter foi necessária devido à sua obsolescência e dificuldade de manutenção. Sendo um modelo antigo, já não possuía suporte técnico adequado nem peças de reposição disponíveis no mercado,

o que aumentava os riscos de falhas e paradas prolongadas na caldeira. Além disso, o equipamento não permitia recursos modernos de proteção e comunicação com sistemas de supervisão.

Da mesma forma, o inversor do ventilador primário, um Siemens MicroMaster 440, apresentava limitações operacionais para a demanda atual do processo. Com o tempo, sua configuração se tornou rígida e a falta de suporte técnico dificultava ajustes finos e integração com o novo CLP.

Além disso, o retrofit se estendeu aos inversores dos dosadores de bagaço, que também utilizavam o modelo MicroMaster 440 da Siemens. Estes dispositivos eram responsáveis pelo controle da alimentação de bagaço à fornalha, função crítica no processo da caldeira.

- Inversores Siemens Master Drive Simovert nos ventiladores secundários e exaustores.

Figura 7 - Inversores de Frequência Simovert Exaustores.



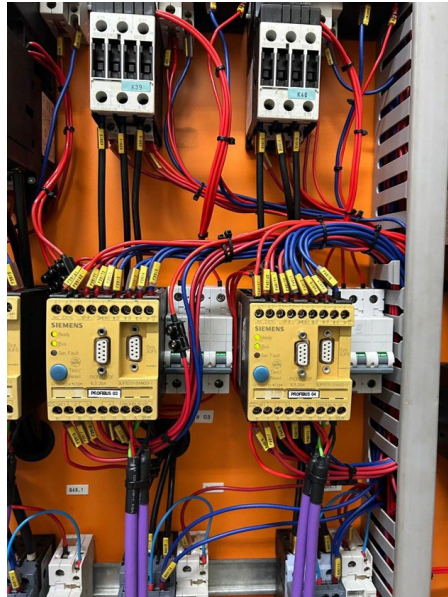
Fonte: autoria própria.

A linha de inversores Siemens Master Drive Simovert, utilizada nos ventiladores secundários e exaustores da caldeira, foi descontinuada pelo fabricante, tornando sua manutenção cada vez mais inviável. A ausência de peças de reposição, firmware atualizável e suporte técnico especializado representava um risco constante à operação contínua do sistema, especialmente em uma aplicação crítica como a ventilação de caldeiras industriais.

Além da obsolescência, os inversores apresentavam limitações em termos de funcionalidades modernas, como comunicação por protocolos industriais padrão (Ethernet/IP), controle vetorial avançado, funções de segurança integradas e recursos de autoajuste. Isso comprometia a eficiência e a integração com o novo sistema de automação implementado no retrofit.

- Relés inteligentes Siemens Simocode antigos.

Figura 8 - Simocode antigos.



Fonte: autoria própria.

Os relés Simocode antigos, embora eficientes à época da instalação, já não dispunham de recursos modernos de diagnóstico, proteção avançada ou integração via redes industriais contemporâneas, como Profibus DP ou Profinet. Além disso, muitos modelos já haviam sido descontinuados, dificultando a reposição de módulos e a atualização de firmware.

- CLP GE (modelo descontinuado), responsável pelo controle geral do sistema.

Da mesma forma, o CLP antigo, de fabricante GE, já estava obsoleto e fora de linha, sem suporte técnico adequado e com dificuldades crescentes para ajustes de lógica ou expansão de entradas e saídas. Esse CLP operava com uma plataforma proprietária e pouco compatível com os padrões atuais de automação, dificultando a integração com inversores modernos, IHMs e sistemas supervisórios.

A manutenção desses equipamentos exigia mão de obra altamente especializada, além de representar risco de paradas não programadas por falhas ou falta de peças.

Modificações Realizadas com o Retrofit

Com base nas necessidades levantadas pela equipe técnica e com foco na padronização e modernização, foram realizadas as seguintes alterações:

- Substituição da soft starter Siemens SikoStarter pela WEG SSW07 no ventilador pneumático, garantindo melhor controle de partida e parada,

além de interface mais amigável.

Figura 9 - SoftStarter WEGSSW900.



Fonte: autoria própria.

- Troca do inversor Siemens MicroMaster 440 pelo WEG CFW11 no ventilador primário, permitindo ajustes mais precisos de velocidade e controle via comunicação.

Figura 10 - Inversor Ventilador Primário WEG CFW011.



Fonte: autoria própria.

- Substituição dos inversores Siemens Master Drive Simovert por inversores WEG CFW11 nos ventiladores secundários e exaustores, com destaque para a função Fly Start nos exaustores, facilitando o religamento com rotor girando.

Figura 11 - Inversor Exaustor e modulo de Franagem WEG.



Fonte: autoria própria.

- Implantação de módulo de frenagem com resistor de dissipação nos exaustores, melhorando o tempo de parada controlada e reduzindo riscos de sobrecorrente.

Figura 12 - Resistor de Frenagem.



Fonte: autoria própria.

- Atualização dos relés Simocode antigos para o modelo Simocode Pro V, que permite maior integração com sistemas supervisórios e diagnóstico em tempo real.

Figura 13 - Simocode Pro V.



Fonte: autoria própria.

- Substituição do CLP GE obsoleto por um modelo moderno e com suporte ativo do fabricante, aumentando a segurança e estabilidade da lógica de controle.

RESULTADOS

A modernização do sistema elétrico da caldeira trouxe mudanças significativas em relação à eficiência energética e confiabilidade operacional. Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos através de uma estimativa baseada em dados operacionais típicos e nas especificações técnicas dos equipamentos antigos e novos. O principal objetivo desta análise foi avaliar como a substituição dos inversores, soft-starters e relés inteligentes impactou no consumo total de energia, bem como quantificar as perdas elétricas associadas a cada tecnologia.

Os inversores antigos da linha Siemens MicroMaster 440 e Siemens Master Drive Simovert apresentam uma taxa de perda estimada em torno de 3,5% da potência nominal do motor durante a operação. Essa perda ocorre principalmente devido ao aquecimento interno, conversão eletrônica e limitações de projeto, típicas de equipamentos mais antigos. Com a substituição por inversores modernos da linha WEG CFW11, essa perda caiu para aproximadamente 2,5%, representando uma melhoria na eficiência energética do sistema. Além disso, os novos inversores incorporam recursos como controle vetorial avançado, protocolos modernos de comunicação e a função Fly Starter, que otimiza o religamento dos exaustores, reduzindo picos de corrente e impactos mecânicos. Nos equipamentos que utilizam

soft-starter, como o ventilador pneumático, a perda em regime é mínima (cerca de 1%), uma vez que o dispositivo opera em by-pass após a partida.

A tabela 1 apresenta uma estimativa do consumo anual de energia elétrica dos principais motores da caldeira, considerando operação 24h por dia, durante 330 dias por ano, com fator de carga médio de 80%.

Para os ventiladores e exaustores, além da redução direta das perdas do inversor, foi considerada uma economia adicional de 10% no consumo do motor, devido ao controle de velocidade mais eficiente proporcionado pelos novos inversores, ajustando a vazão conforme a demanda real do processo.

Tabela 1 – Comparativo do consumo anual antes e depois do retrofit.

Equipamento	Qtde	Potência Total (kW)	Consumo Antes (kWh/ano)	Consumo Depois (kWh/ano)
Ventilador Pneumático (soft-starter)	1	73,55	470.672	470.672
Dosadores	6	13,24	86.816	77.936
Exaustores (2×450 CV)	2	661,95	2.529.074	2.253.672
Ventilador Primário	1	110,32	420.103	375.169
Ventilador Secundário	1	257,42	3.803.339	3.397.747
Total	—	1.116,48	7.310.004	6.575.196

Fonte: autoria própria.

Economia anual estimada: 734.808 kWh/ano (10,05% de redução no consumo total).

Os resultados mostram que a maior parte da economia está concentrada nos ventiladores secundário e primário, bem como nos exaustores, que possuem motores de grande porte. A substituição dos inversores antigos por modelos modernos não só reduziu as perdas internas dos conversores como também permitiu o controle preciso da rotação dos ventiladores e exaustores, garantindo que os equipamentos operem apenas com a potência necessária para atender à demanda.

Essa melhora no controle impacta diretamente na eficiência energética do processo. Pela lei do cubo, uma redução de 10% na rotação de um ventilador pode resultar em até 27% de redução na potência consumida. Mesmo considerando apenas 10% de economia média, já foi possível observar uma queda significativa no consumo total.

Além da economia de energia, a modernização também trouxe benefícios operacionais:

- Menor desgaste mecânico, devido ao controle suave de partida e parada.
- Religamento seguro dos exaustores por meio da função Fly Starter.

- Integração facilitada com sistemas de automação modernos, melhorando o monitoramento e a manutenção preditiva.

Com base nos valores estimados, a redução anual de aproximadamente 735 MWh representa uma economia expressiva, que pode ser convertida em redução de custos, diminuição do impacto ambiental e aumento da confiabilidade do sistema.

A aplicação do Fly Starter trouxe benefícios importantes para o sistema da caldeira, principalmente no tempo de parada e religamento. Antes da modernização, era necessário aguardar que os exaustores desacelerassem totalmente antes de realizar uma nova partida, aumentando o tempo de indisponibilidade do equipamento.

Com a nova configuração, o sistema consegue detectar automaticamente a rotação residual e efetuar o religamento quase imediato. Nos gráficos mostrados nas Figuras X e Y, é possível visualizar essa melhoria:

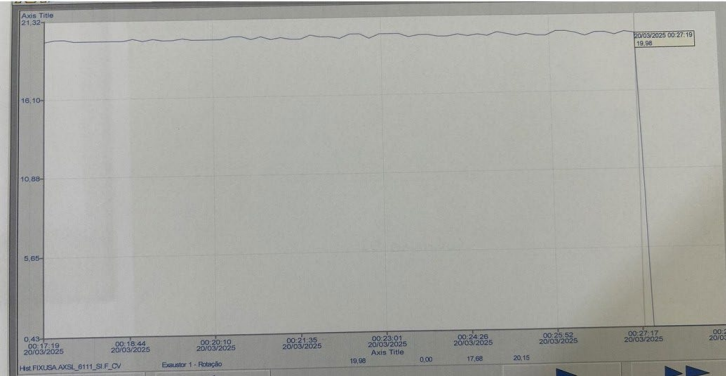
- Antes do Fly Starter: o tempo de parada era prolongado, exigindo que a velocidade do motor caísse praticamente a zero antes de um novo acionamento.
- Depois do Fly Starter: a curva evidencia uma desaceleração controlada, seguida de religamento quase instantâneo, reduzindo significativamente o tempo de espera.

Essa otimização impacta diretamente na produtividade e na segurança operacional, pois:

- Reduz o tempo total de parada da caldeira durante manutenções ou ajustes.
- Diminui o consumo de energia durante as partidas, evitando picos de corrente.
- Minimiza esforços mecânicos nos acoplamentos e rolamentos, aumentando a vida útil dos motores e ventiladores.
- Permite uma operação mais flexível e confiável, essencial em processos contínuos, como na indústria sucroalcooleira.

Com a modernização do sistema elétrico da caldeira, além da substituição dos inversores obsoletos por modelos WEG CFW11, foi implementada uma solução composta por módulos de frenagem e resistores de dissipação. Esta tecnologia tem como finalidade controlar e dissipar a energia regenerativa produzida pelos motores durante o processo de desaceleração, possibilitando paradas rápidas, seguras e controladas, mesmo em cargas de alta inércia, como os exaustores industriais. Nos exaustores, que operam com motores de grande porte, a ausência desse recurso implicava em tempos de parada demasiadamente longos, prejudicando a disponibilidade operacional da caldeira e dificultando intervenções emergenciais. A instalação do módulo de frenagem trouxe uma solução definitiva para este problema, elevando o nível de confiabilidade e agilidade do sistema.

Figura 14 - Gráfico de rotação após retrofit.



Fonte: autoria própria.

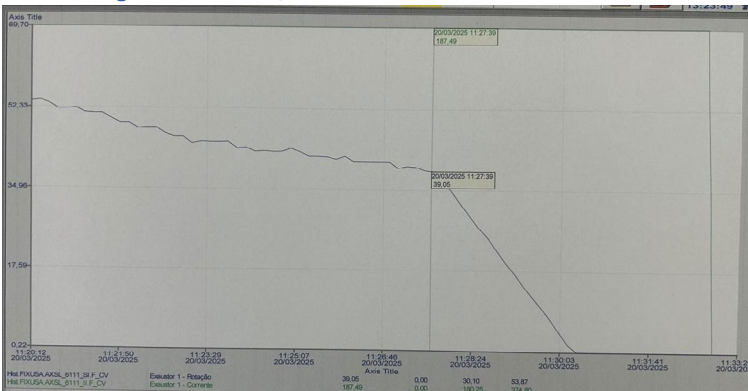
Parada Rápida com Módulo de Frenagem

No primeiro gráfico, obtido após a modernização, observa-se a curva de velocidade do motor de um exaustor durante uma parada controlada com o sistema de frenagem ativo:

- Velocidade inicial: aproximadamente 398,05 rpm às 11:27:39.
- Velocidade final: aproximadamente 0 rpm às 11:27:49.

Portanto, o motor foi desacelerado de 398 rpm para completa imobilização em apenas 10 segundos, evidenciando a eficiência do sistema de frenagem. Esse desempenho demonstra que o inversor, em conjunto com o módulo de frenagem, conseguiu capturar e controlar a energia regenerativa, direcionando-a para os resistores de dissipação, onde foi convertida em calor de forma segura e controlada. Sem este recurso, o motor dependeria exclusivamente da resistência mecânica do conjunto para desacelerar, resultando em uma parada muito mais lenta e imprevisível, com riscos operacionais e menor controle do processo.

Figura 15 - Rotação do Exaustor Antes do retrofit.



Fonte: autoria própria.

Parada Convencional Antes do Retrofit

O segundo gráfico representa a situação anterior ao retrofit, onde não havia sistema de frenagem ativa.

- Velocidade inicial: aproximadamente 586,32 rpm no início do registro.
- Comportamento da curva: praticamente estável, indicando que o motor desacelerava apenas pela resistência natural do sistema mecânico e da carga.
- Tempo de parada: consideravelmente longo, podendo levar 210 Segundos para atingir zero rpm.

Essa característica impunha limitações operacionais severas, principalmente em situações que exigiam respostas imediatas, como paradas emergenciais ou ajustes de processo durante a queima de bagaço. Além disso, dificultava manutenções corretivas, prolongando o tempo de indisponibilidade da caldeira.

Tabela 2 - Comparativo do tempo de Parada.

Situação	Velocidade Inicial (rpm)	Velocidade Final (rpm)	Tempo de Parada
Antes do retrofit (sem frenagem ativa)	586,32	0	210 Segundos
Depois do retrofit (com módulo + resistores)	398,05	0	10 segundos

Fonte: autoria própria.

A tabela 2 apresenta o impacto positivo da modernização: a redução do tempo de parada, que anteriormente era da ordem de minutos, agora ocorre em apenas 10 segundos. Esse ganho é fundamental para a operação contínua, proporcionando maior segurança, agilidade e confiabilidade em processos industriais de alta criticidade.

A introdução do sistema de frenagem trouxe benefícios que vão além da simples redução do tempo de parada. Entre os principais impactos, destacam-se:

- Aumento da segurança operacional, permitindo paradas rápidas em situações emergenciais e evitando riscos para os operadores e para o equipamento.
- Preservação mecânica, ao evitar esforços bruscos nos eixos, acoplamentos e rolamentos durante a desaceleração.
- Agilidade em manutenções, reduzindo o tempo necessário para intervenções programadas ou corretivas.
- Otimização do processo produtivo, uma vez que a caldeira pode ser reiniciada em menor intervalo de tempo, minimizando perdas de produção.
- Controle preciso do processo, permitindo ajustes dinâmicos em condições variáveis de operação.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de retrofit realizado no sistema elétrico da caldeira demonstrou-se essencial para a modernização e a otimização do processo produtivo da usina. A substituição dos equipamentos obsoletos por tecnologias mais atuais resultou em uma operação mais confiável, segura e eficiente. Os resultados obtidos comprovaram ganhos expressivos em termos de eficiência energética, com destaque para a redução significativa no consumo de energia, além de melhorias na confiabilidade operacional. A implementação do sistema de frenagem e da função Fly Starter foi determinante para aumentar a disponibilidade dos equipamentos e agilizar paradas emergenciais, proporcionando maior flexibilidade ao processo e menor impacto na produção.

De forma geral, o projeto atendeu plenamente aos objetivos propostos, mostrando que a modernização por meio do retrofit não apenas prolonga a vida útil dos equipamentos, mas também agrega valor estratégico ao negócio, reduzindo custos operacionais e fortalecendo a competitividade da usina no setor sucroalcooleiro.

REFERÊNCIAS

- BULGARELLI, Roberval. **Proteção térmica de motores de indução trifásicos industriais**. Revista O Setor Elétrico, São Paulo, n. 16, 2006.
- CALLEGARO, A. D.; RHEINHEIMER, C.; KOTLINSKI, E.; JAPPE, T. K. **Influência de inversores de frequência na qualidade da energia elétrica**. Ijuí: CRICTE, 2004.
- CARVALHO, Geraldo. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: Editora Érica, 2007.
- CHIARELLI, Jorge Augusto. **Ensaio de motores em plataforma de ensaios com recuperação de energia por inversores de frequência regenerativos**. Porto: Universidade do Porto; Blumenau: Universidade Regional de Blumenau, 15 jul. 2011.
- D’ALESSANDRO, Victor; CAVICHIOLI, Fábio. **A Importância Do Setor Sucroalcooleiro Na Economia Brasileira**. Revista Interface Tecnológica, Taquaritinga, SP, v. 21, n. 1, p. 665–680, 2025. DOI: 10.31510/inf. v21i1.1922. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1922>. Acesso em: 29 set. 2025. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/1922>. Acesso em: 21 mar. 2025.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **BEN Síntese 2025**. Brasília: EPE, [s.d.]. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico_767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 27 set. 2025.

FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. 2ª edição. São Paulo: Editora Érica, 2007.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JUNIOR, C.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas: com introdução à eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

GOMES, Ivan da Costa. **Um breve histórico conceitual da automação**. Cadernos de História da Ciência, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 13–29, jan./jun. 2013. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/cadernosdehistoriadaciencia/article/view/18121>. Acesso em: 17 abr. 2025.

MULTIÁGUA. **Os principais componentes de uma caldeira a vapor e seu funcionamento**. Disponível em: <https://multiagua.com.br/solucoes-industriais/geracao-de-vapor/os-principais-componentes-de-uma-caldeira-a-vapor-e-seu-funcionamento/>. Acesso em: 16 abr. 2025.

PUPO, Maurício Santos. **Interface Homem-Máquina (IHM): funcionamento e aplicações**. São Carlos: Universidade de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica, 2002. Apostila técnica.

RODRIGUES, Wlamir. **Critérios para o uso eficiente de inversores de frequência em sistemas de bombeamento de água**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, 2007. Tese de doutorado.

SAG INDUSTRIAL. **Caldeiras industriais: tudo que você precisa saber**. Disponível em: <https://www.sagindustrial.com.br/caldeiras-industriais-tudo-que-voce-precisa-saber>. Acesso em: 16 abr. 2025.

SILVEIRA, Leonardo; LIMA, Weldson Q. **Um breve histórico conceitual da automação industrial e redes para automação industrial**. Natal: UFRN – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2003.

WARNOCK, I. G. **Programmable controllers – operation and application**. Prentice Hall Europe, 1997.