



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

Luan Silva do Nascimento



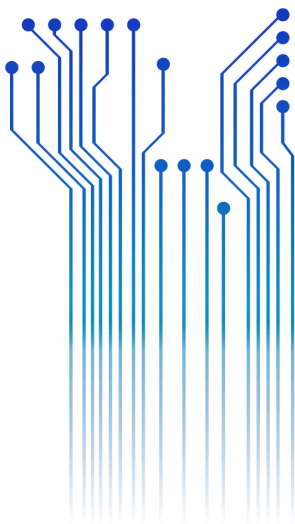
Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA EM INDÚSTRIAS: UM ESTUDO DE CASO



Departamento de
Engenharia Elétrica



Campina Grande - PB
2021

LUAN SILVA DO NASCIMENTO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA EM INDÚSTRIAS: UM ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eficiência Energética

Orientador:

Professor Pablo Bezerra Vilar, D. Sc.

Campina Grande
2021

LUAN SILVA DO NASCIMENTO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA EM INDÚSTRIAS: ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eficiência Energética

Aprovado em / /

Luiz Augusto Medeiros Martins Nobrega, D.Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Pablo Bezerra Vilar, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

*“Suba o primeiro degrau com fé.
Não é necessário que você veja toda
a escada. Apenas dê o primeiro
passo.”*

Marthin Luther King

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar em todos os momentos, por me dar discernimento, proteção e sabedoria durante os desafios encontrados diariamente.

Aos meus pais Jozivandro e Luzenir por todo apoio prestado em todos os seguimentos da minha carreira pessoal e profissional, por terem sido os principais responsáveis da minha formação de caráter e ser a minha maior inspiração para alcançar os meus objetivos.

Agradeço a Clarisse por toda paciência, amor, cuidado, palavras de apoio e todos os conselhos que são muito importantes no meu processo de amadurecimento.

Agradeço a Bisneta e aos meus irmãos Jozivandro Júnior e Matheus por toda cumplicidade, companheirismo, cuidado e preocupação.

Aos meus amigos mais próximos Kamylla, Luis, Marcus, João Marcos, Vicente, Hugerles, Paulo, Thiago e Lucas, por estar comigo em todos os momentos e me acompanharem em toda essa trajetória e sempre desejarem o meu sucesso na carreira profissional.

Ao meu orientador Pablo por todo conhecimento e experiência transmitida durante esse período e toda paciência e apoio prestado não só durante a orientação do trabalho de conclusão de curso, como também, durante alguns meses sendo orientado com orgulho por ele na monitoria do laboratório de instalações elétricas.

A todos os profissionais colaboradores da manutenção central da unidade 04 da empresa Acumuladores Moura S/A, Lucas, Uallas, João, Breno, Sávio e Amistein por toda paciência, conhecimento transmitido e apoio diário durante a realização do estágio.

Finalmente, gostaria de agradecer a toda equipe da manutenção elétrica em especial ao meu supervisor Wyll Wagner pela oportunidade de trabalhar durante 07 meses com uma equipe incrível, muito comprometida e referência dentro da unidade 04. Oportunidade única de muito conhecimento e experiência industrial transmitida.

RESUMO

A preocupação econômica e ambiental com relação ao consumo consciente de energia elétrica nas indústrias brasileiras está cada vez mais evidente, já que os recursos naturais são limitados e as necessidades humanas estão sempre tendendo a aumentar cada dia mais. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) considerando o anuário estatístico de energia elétrica do ano de 2019, que considera como o ano base 2018, o setor que mais consome energia elétrica no Brasil é o industrial com 35,7%, sendo assim, um dos gastos mais relevantes que uma indústria possui é com energia elétrica, quanto mais a indústria conseguir economizar ao mesmo tempo que eleva o volume de produção, maior o seu lucro. Por isso, para que esse lucro cresça, deve-se reduzir os custos com energia. Essa economia cria novas possibilidades de investimentos e faz com que a indústria se desenvolva cada vez mais, aumentando a produção, consolidando-se no mercado e aumentando as vendas. Sendo assim, o estudo da eficiência energética torna-se algo indispensável para o bom desenvolvimento de uma cultura de produção maximizada com os menores impactos ambientais e econômicos possíveis. Este trabalho inicia apresentando algumas das principais medidas que podem ser executadas com o objetivo de realizar eficiência energética em uma empresa, baseados em resultados de estudos das principais autarquias nacionais ao se tratar de eficiência energética. Além disso, é apresentado um estudo de caso realizado na empresa Acumuladores Moura S.A. e seus impactos econômicos. Por fim, são apresentados as principais conclusões e os principais desafios encontrados durante a sua implementação.

Palavras-chave: energia elétrica, trabalho, eficiência energética, EPE, economia, indústria, impactos econômicos.

ABSTRACT

The economic and environmental concern regarding the conscious consumption of electric energy in Brazilian industries is increasingly evident, since natural resources are known and as needed, they are always tending to increase more and more. According to the Energy Research Company (EPE) considering the statistical yearbook of electricity for 2019, which it considers as the base year 2018, the sector that consumes the most electricity in Brazil is the industrial sector with 35.7%, that is, one of the biggest fixed expenses an industry has is with electricity, the more the industry can save while increasing the volume of production, the greater its profit. Therefore, in order for this profit to grow, energy costs must be reduced. This economy creates new investment possibilities and causes the industry to develop more and more, an increase in production, consolidating itself in the market and increasing sales. Thus, the study of energy efficiency becomes something indispensable for the good development of a culture of production maximized with the lowest possible environmental and economic impacts. This work starts some of the main measures that can be carried out with the objective of obtaining energy efficiency in a company, based on the results of studies of the main national authorities when dealing with energy efficiency. In addition, a case study carried out at the company Acumuladores Moura S.A. and its impact dimensions are presented. Finally, they are important as the main challenges encountered during their implementation.

Keywords: electricity, work, energy efficiency, EPE, economy, industry, economic impacts.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Processos de conversão energética.	6
Figura 2 – Sistema energético generalizado.	7
Figura 3 – Instalação elétrica com transformadores na entrada de energia elétrica.	22
Figura 4 – Circuito com transformadores distribuídos próximos as cargas de alimentação. ...	22
Figura 5 – Perdas em condutores por efeito joule.	23
Figura 6 – Exemplo de inversor de frequência WEG	26
Figura 7 – Rendimento e fator de potência em função do carregamento do motor.....	27
Figura 8 – Sistema típico de acoplamento ventilador – motor.....	31
Figura 9 – Selo PROCEL.	33
Figura 10 – Etiqueta PBE.	34
Figura 11 – Exemplo do filtro de mangas	37
Figura 12 – Manga utilizada no sistema de filtragem.	38
Figura 13 – Motor elétrico trifásico de 250 cv.....	39
Figura 14 – Soft starter SSW06 WEG.	40
Figura 15 – Sistema de dumper.....	41
Figura 16 – Transmissor de pressão diferencial.....	42
Figura 17 – Gráfico do controle por range.	43
Figura 18 – Programação da CLP para comando abrir e fechar o dumper.....	43
Figura 19 – Sistema montado para acompanhamento dos dados.....	46
Figura 20 – Inversor de Frequência WEG CFW - 11.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Perdas em transformadores conforme Normas ABNT	19
Tabela 2– Uso de Energia Elétrica pela Iluminação no Brasil	23
Tabela 3– Carga Térmica para Ar Condicionado.	31
Tabela 4– Dados de placa do motor.....	39
Tabela 5– Características da soft - starter.....	40
Tabela 6– Características do inversor de frequência.....	48
Tabela 7– Economia anual do projeto para o filtro C.	50
Tabela 8– Economia anual do projeto para o filtro E	50
Tabela 9– Economia anual do projeto para o filtro F	51
Tabela 10– Economia anual do projeto para o filtro Refino.....	51
Tabela 11– Investimento total para aplicação do projeto	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
PEE	Programa de Eficiência Energética
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
ABESCO	Associação Brasileira de Empresas de Serviço de Conservação de Energia
LED	Diodo Emissor de Luz
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
PROCEL	Programa de Conservação de Energia Elétrica

SUMÁRIO

1 SUMÁRIO

Agradecimentos.....	vi
Resumo.....	vii
Abstract.....	viii
Lista de Ilustrações.....	ix
Lista de Tabelas.....	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas.....	x
Lista de Símbolos.....	x
Sumário.....	xi
1 Introdução.....	13
2 Fundamentação teórica.....	14
2.1 ENERGIA.....	14
2.2 LEIS DAS CONVERSÕES ENERGÉTICAS.....	15
2.3 Eficiência Energética.....	17
2.3.1 Instalações Elétricas.....	18
2.3.2 Energia Ativa e Energia Reativa.....	18
2.3.3 Perdas em Transformadores.....	18
2.3.4 Circuitos de distribuição.....	21
2.3.5 Eficiência energética aplicada a iluminação.....	23
2.4 Eficiência energética aplicada em motores de indução.....	25
2.5 Eficiência energética aplicada em sistemas de Refrigeração, Ar Comprimido, Ar Condicionado e Ventilação.....	28
2.5.1 Sistemas de Refrigeração.....	28
2.5.2 Ar Comprimido.....	29
2.5.3 Ar Condicionado e Ventilação.....	30
Pr.....	32
ogramas de eficiência energética.....	32
2.6.....	32
2.6.1 Programa de Eficiência Energética – PEE.....	32
2.6.2 Programa de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL.....	32
2.6.3 Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE.....	33
2.6.4 Resultados obtidos pelos programas.....	34
3 Estudo de caso.....	36
3.1 Contextualização.....	36
3.1.1 Descrição do sistema.....	36
3.1.2 Etapas de realização do estudo de caso.....	43
3.2 Processo de coleta e análise de dados.....	45
3.2.1 Etapa 1.....	45

3.2.2	Etapa 2.....	46
3.2.3	Etapa 3.....	48
3.2.4	Etapa 4.....	48
3.3	Resultados.....	49
4	Conclusão.....	53
	Referências.....	54

1 INTRODUÇÃO

A eficiência energética tem como principal objetivo utilizar a menor quantidade possível de energia (eletricidade, gás, diesel, etc.) para conseguir atender as necessidades (luz, calor, frio e comodidade em geral). Nos últimos anos com o auxílio de programas em prol da causa da eficiência energética o Brasil mostrou grandes avanços, mas, ainda se encontra longe do ideal, levando-se em consideração todos os seus recursos. A proporção de riquezas naturais mais abundantes no Brasil em comparação com outros países faz com que a nossa preocupação com o desperdício seja menor do que em países que não possuem tantos recursos. Em junho de 2018 o American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE) lançou o international scorecard, um relatório bianual que avalia as políticas em eficiência energética e performances entre os 25 países que mais consomem energia globalmente, o Brasil ficou na 22^a posição. Embora o país esteja bastante atrasado, o Programa de Eficiência Energética (PEE) já conseguiu economizar 52 TWh entre os anos de 1998 e 2017 (GNPW group). Isso significa que em 19 anos o país conseguiu reduzir em R\$ 13,3 bilhões o custo com a compra de energia gerada.

Nesse contexto, este trabalho apresenta como objetivo mostrar algumas das principais atividades de eficiência energética que podem ser realizadas em indústrias e um estudo de caso realizado no ano de 2020 na empresa Acumuladores Moura S/A. Para isso, o mesmo foi dividido em 4 capítulos: O capítulo 1 é introdutório e mostra a importância do tema, objetivos e divisão do trabalho; o capítulo 2 mostra a fundamentação teórica e os principais conceitos e aplicações necessários para o bom entendimento do capítulo 3 que mostra o estudo de caso e seus resultados em uma indústria brasileira. Finalmente, o capítulo 4 é conclusivo e explicita as principais dificuldades encontradas durante a realização do estudo de caso e seus impactos para a empresa.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A energia está presente em nossa vida de diversas maneiras. Por exemplo, quando usamos motores ou músculos, quando acendemos o queimador de um fogão, quando nos alimentamos ou mesmo quando nos informamos pela televisão ou nos jornais, que frequentemente se referem a alguma questão energética no Brasil ou no mundo. Por tal diversidade, o campo dos estudos energéticos é vasto, cobrindo desde o uso dos recursos naturais até os aspectos relacionados ao desempenho das modernas tecnologias, permitindo uma abordagem que considere apenas os temas de caráter técnico ou envolva seus componentes socioeconômicos e ambientais, inclusive quanto à sua evolução histórica e suas perspectivas futuras. Nesse contexto, procura-se nesta sessão efetuar uma revisão das definições, das leis básicas e da terminologia empregada, em particular buscando fundamentar a racional utilização dos fluxos de energia.

No decorrer deste capítulo serão apresentadas algumas definições iniciais para auxiliar a compreensão do trabalho e algumas das principais medidas que podem ser executadas com o objetivo de realizar eficiência energética em uma empresa.

2.1 ENERGIA

Do ponto de vista físico a energia pode ser previamente definida como a capacidade que um corpo, uma substância ou um sistema físico apresenta ao realizar uma ação, normalmente associada a movimento. Por outro lado, no Século IV A.C., Aristóteles em sua obra *Metafísica*, identificava energia (“*energeia*”) como uma realidade em movimento. Na acepção moderna, energia corresponde ao conceito desenvolvido juntamente com a Termodinâmica a partir de meados do Século XIX e utilizado para descrever uma ampla variedade de fenômenos físicos. Uma definição usual, encontrada em muitos livros, afirma que “energia é a medida da capacidade de efetuar trabalho”. A rigor, esta definição não é totalmente correta e aplica-se apenas a alguns tipos de energia, como a mecânica e a elétrica, que, em princípio são totalmente conversíveis em outras formas de energia. Esta definição não pode ser aplicada ao calor, forma de energia que é apenas parcialmente conversível em trabalho.

Em 1872, Maxwell propôs uma definição que pode ser considerada mais correta do que a anterior: “energia é aquilo que permite uma mudança na configuração de um sistema, em oposição a uma força que resiste a esta mudança”. Esta definição refere-se a mudanças de condições, a alterações do estado de um sistema e inclui duas ideias importantes: as modificações de estado implicam em vencer resistências e é justamente a energia que permite obter estas modificações de estado. Assim, para elevar uma massa até uma determinada altura, aquecer ou esfriar um volume de gás, transformar uma semente em planta, ler este texto, enfim, qualquer processo que se associe a alguma mudança, implica em se ter fluxos energéticos. Nesse contexto denomina-se sistema à região de interesse, delimitada por uma fronteira, que pode existir fisicamente ou ser uma superfície idealizada, que separa o sistema do ambiente, que neste caso significa, portanto tudo aquilo que está fora da região de interesse. Desta forma, o universo, o todo, resulta da soma do sistema com o ambiente.

Boa parte das leis físicas que governam o mundo natural são no fundo variantes das leis básicas dos fluxos energéticos, as eternas e inescapáveis leis de conservação e dissipação, que estruturam todo o universo, desde o micro ao macrocosmo.

Potência muitas vezes tem um conceito interligado com o de energia, que corresponde a variação de energia no tempo, de enorme importância ao se tratar de processos humanos e econômicos, onde o tempo é essencial.

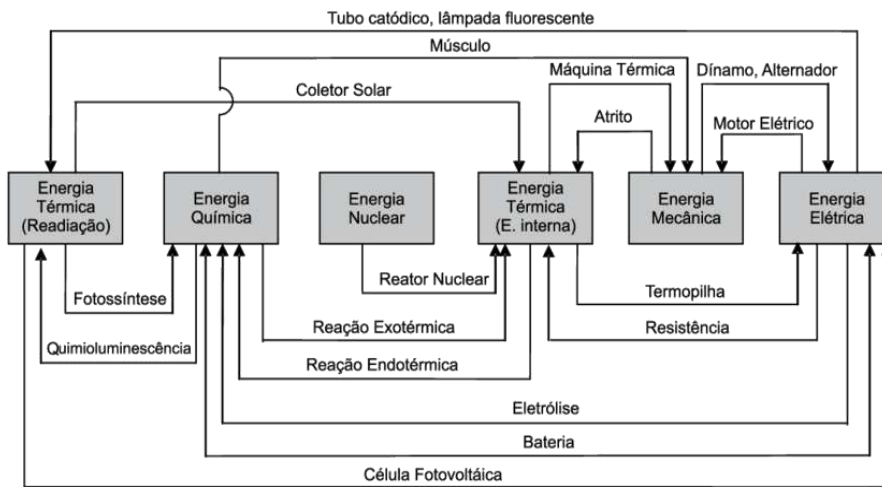
2.2 LEIS DAS CONVERSÕES ENERGÉTICAS

Uma característica essencial das formas energéticas é a possibilidade de interconversão. Isto é, uma forma energética eventualmente pode ser convertida em outra, de modo espontâneo ou intencional, permitindo neste último caso adequar-se a alguma utilização desejada. Frequentemente se empregam as expressões “processos de geração de energia” ou “sistemas de consumo de energia”, quando o mais correto, a rigor, seria falar em “processos de conversão de energia”.

A figura 1 apresenta as principais formas de conversão entre seis formas básicas de energia, podendo se observar que, enquanto alguns processos foram desenvolvidos e aperfeiçoados pelo homem, outros só são possíveis mediante processos naturais, como a conversão energética muscular e a fotossíntese. Nesta figura pode-se também notar como

são bastante variados os processos que resultam em energia térmica e como a energia mecânica está envolvida em diversos processos tecnológicos.

Figura 1- Processos de conversão energética.



Fonte: HADDAD, 2012.

Quaisquer que sejam os sistemas considerados e as formas de energia envolvidas, todos os processos de conversão energética são regidos por duas leis físicas fundamentais, que constituem o arcabouço essencial da ciência energética.

A primeira lei básica é a Lei da Conservação da Energia, segundo a qual energia não se cria nem se destrói, salvo nos casos em que ocorrem reações atômicas ou nucleares e então podem se observar transformações de massa e energia. Como na grande maioria das situações, tal dualidade massa-energia não precisa ser considerada, é suficiente afirmar que, em um dado período de tempo, a somatória dos fluxos e estoques energéticos em um processo ou sistema é constante, como se apresenta na expressão (1);

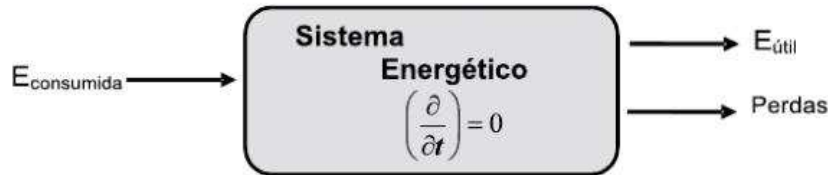
$$\Sigma E_{entra} = \Sigma E_{sai} + \Delta E_{sistema} \quad (1)$$

Nota-se que a aplicação desta lei pressupõe uma convenção de sinais para os fluxos energéticos, convencionando-se como positivo o que tende a aumentar a energia do sistema.

A Lei da Conservação de Energia também é conhecida como Primeira Lei da Termodinâmica e permite efetuar balanços energéticos, determinar perdas, quantificar enfim, fluxos energéticos. Baseia-se também nesta lei, o conceito de desempenho ou eficiência energética de um sistema energético, η_{energ} , relacionando o efeito energético útil com o consumo energético no sistema, como se explicita na figura 2 e na equação (2);

$$\eta_{energ} = \frac{E_{\acute{u}til}}{E_{consumida}} = \frac{E_{consumida} - Perdas}{E_{consumida}} = 1 - \frac{Perdas}{E_{consumida}} \quad (2)$$

Figura 2- Sistema energético generalizado.



Fonte: HADDAD, 2012.

A equação (2) é válida para um sistema em regime permanente, isto é, quando não há variação da energia no sistema. Lembrando que, como energia nunca desaparece, mas apenas muda de forma, a palavra “consumo” refere-se efetivamente ao aporte de energia.

A outra relação física básica dos processos energéticos é a Lei da Dissipação da Energia, segundo a qual, em todos os processos reais de conversão energética, sempre deve existir uma parcela de energia térmica como produto. Em outras palavras, existem inevitáveis perdas térmicas nos processos de conversão energética, que se somam às outras perdas inevitáveis decorrentes das limitações tecnológicas e econômicas dos sistemas reais, tais como isolamento térmico imperfeito, atrito, perdas de carga e inércias, entre outras.

2.3 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) “Eficiência significa fazer mais (ou, pelo menos, a mesma coisa) com menos, mantendo o conforto e a qualidade. Quando se discute energia, eficiência energética significa gerar a mesma quantidade de energia com menos recursos naturais ou obter o mesmo serviço (“realizar trabalho”) com menos energia” (EPE, 2020).

A eficiência energética consiste da relação entre a quantidade de energia empregada em uma atividade e aquela disponibilizada para sua realização. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Serviço de Conservação de Energia (ABESCO) “se trata da utilização racional de energia, do uso de modo eficiente para obter-se um

determinado resultado” (ABESCO, 2020). A seguir são apresentadas algumas das principais medidas que podem ser adotadas e verificadas como eficiência energética.

2.3.1 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Um adequado projeto e um bom plano de operação e manutenção das instalações elétricas podem representar significativas economias de energia, assim como garantir boas condições para funcionamento e segurança dos equipamentos e continuidade da produção. As principais perdas que ocorrem em circuitos elétricos são as perdas por histerese, perdas por efeito joule e perdas por corrente de Foucault.

As perdas por histerese são provocadas pela imantação remanescente do ferro, manifestando-se em todos os circuitos magnéticos submetidos a campos alternados: transformadores, motores, reatores, etc. Já as perdas por efeito joule são provocadas pela passagem de corrente elétrica através de condutores, ocasionando seu aquecimento. Aparecem em todos os componentes do circuito: transformadores, condutores, motores, lâmpadas, etc. Estas perdas são, as mais significativas, variando com o quadrado da corrente elétrica. Por fim, as perdas por corrente de Foucault são originadas pelas correntes parasitas induzidas. Tornam-se mais significativas nos circuitos magnéticos de maior porte e nos condutores de maior seção.

2.3.2 ENERGIA ATIVA E ENERGIA REATIVA

Energia ativa: é aquela que efetivamente produz trabalho. Energia reativa: é aquela que, apesar de não produzir trabalho efetivo, é indispensável para produzir o fluxo magnético necessário ao funcionamento dos motores, transformadores, etc. Todos os equipamentos que possuem um circuito magnético e funcionam em corrente alternada (motores, transformadores, etc.) absorvem esses dois tipos de energia.

É importante observar em cada equipamento da instalação esses dois parâmetros e verificar se o consumo principalmente da energia reativa se configura dentro dos limites, para eliminar as perdas por reativos e pagar multas pelo consumo excedente de reativos na instalação.

2.3.3 PERDAS EM TRANSFORMADORES

As perdas são de dois tipos: em vazio (no ferro) e em carga (no cobre).

- As perdas em vazio correspondem às ocorridas no circuito magnético, por histerese e correntes de Foucault;

- As perdas em carga são provocadas por efeito Joule, ocasionando aquecimento.

Uma vez que o transformador é projetado para operar adequadamente em condições de carga nominal, quanto maior for a carga do transformador acima dessa carga nominal do equipamento, maior será o aquecimento do equipamento, provocando uma redução em sua vida útil.

As perdas no núcleo existem desde que o transformador esteja ligado à rede elétrica e são devidas às características magnéticas dos materiais empregados na sua fabricação e se caracterizam por praticamente não variarem com a carga solicitada do transformador. Já as perdas nos enrolamentos acontecem quando ocorrem as chamadas perdas ôhmicas ou perdas joule, que se caracterizam por variar com a resistência do condutor e com o quadrado da corrente elétrica que por ele circula, ou seja:

$$\text{Perdas no Enrolamento} = RI^2_{\text{carga}} \quad (3)$$

Onde:

R = Resistência total;

I = Corrente no enrolamento.

Tabela 1 - Perdas em transformadores conforme Normas ABNT.

Potência (kVa)	Perdas no Ferro (W)	Perdas Totais (W)
15	120	460
30	200	770
45	260	1040
75	390	1530
112,5	520	2070
150	640	2550
225	900	3600
300	1120	4480
500	1350	6700
750	1500	13500
1000	1900	16500

1500	2500	25000
2000	3900	25100
3000	4900	31700

Fonte: (COPEL, 2020).

2.3.3.1 Redução das perdas nos enrolamentos pela redistribuição das cargas entre os transformadores

Quando uma indústria dispõe de mais de um transformador, pode-se obter uma redução das perdas com uma adequada redistribuição das cargas elétricas entre os transformadores, de forma que os que operam com carregamento elevado tenham sua corrente reduzida, enquanto que outros, com carregamento baixo, recebam parte da carga.

2.3.3.2 Redução das perdas nos enrolamentos pela elevação do fator de potência

A elevação do fator de potência com o qual o conjunto das cargas alimentadas pelo transformador opera. A elevação do fator de potência reduz a componente indutiva da corrente, reduzindo o valor da corrente da carga, diminuindo assim, as perdas nos enrolamentos do transformador. A expressão para tal funcionalidade pode ser expressa como:

$$R = 1 - \left(\frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right)^2 \quad (4)$$

onde:

$\cos \phi_1$ - é o fator de potência antes da correção.

$\cos \phi_2$ - é o fator de potência depois da correção.

2.3.3.3 Redução das perdas de energia no núcleo de um transformador

Indústrias que não operam no período noturno e/ou em fins de semana podem reduzir os seus consumos de energia elétrica se desligarem seus transformadores durante esses períodos, uma vez que como as perdas no núcleo praticamente independem do carregamento do transformador, elas ocorrem mesmo operando em vazio. Dessa forma,

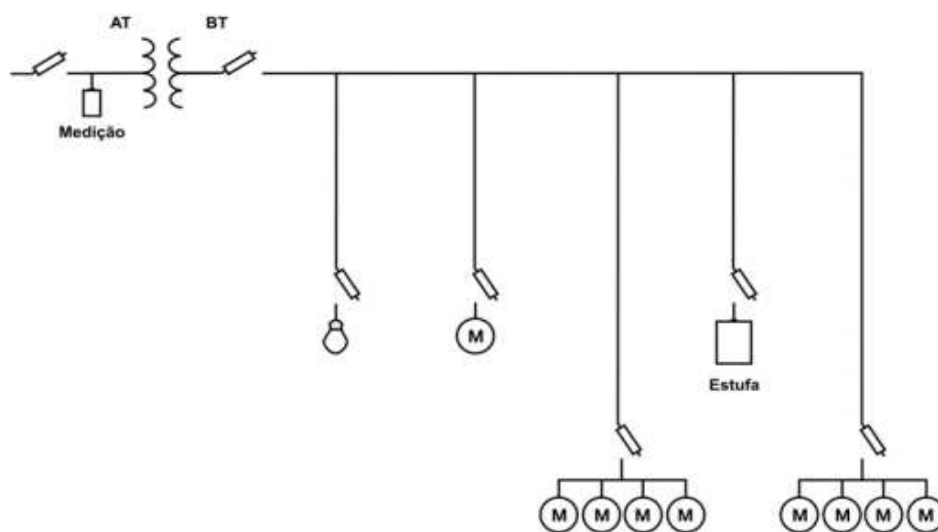
uma das maneiras de se reduzir perdas é desligar o transformador quando ele não estiver alimentando nenhuma carga.

2.3.4 CIRCUITOS DE DISTRIBUIÇÃO

O transporte de elevadas correntes em distribuição de baixa tensão em comparação com as elevadas distâncias existentes entre os transformadores e as cargas que estes equipamentos estão alimentando é uma das principais causas que se pode encontrar na problemática de perdas por efeito joule. Nesse contexto, na maioria dos casos, principalmente em indústrias de médio porte, os transformadores de médio-baixa tensões se encontram instalados em um único local. Por via de regra, próximo à entrada de energia, exigindo longos circuitos de distribuição em baixa tensão, o que encarece a instalação e eleva substancialmente as perdas de energia.

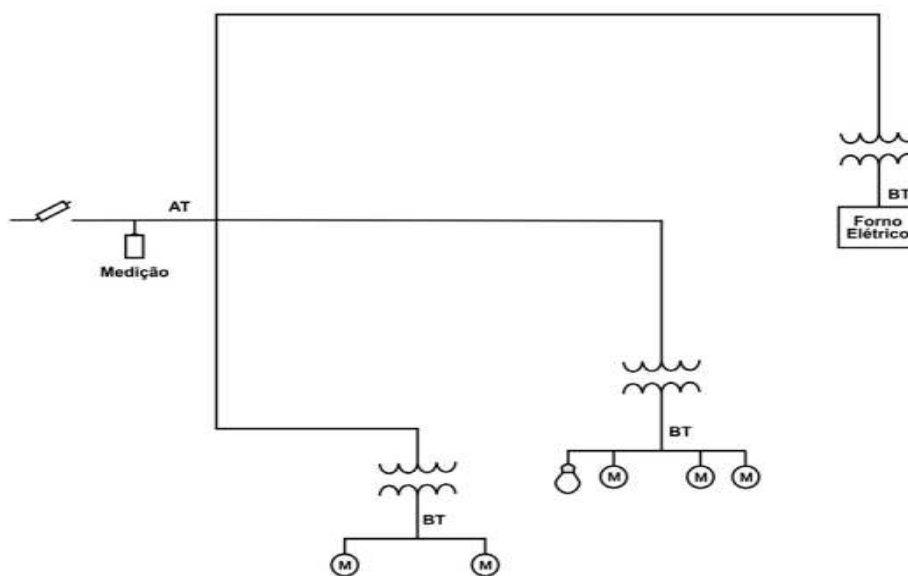
Sistemas radiais bem projetados em termos de redução de quedas de tensão e de perdas de energia são aqueles em que os transformadores são instalados próximos as suas cargas de alimentação. Nessa configuração, os sistemas de distribuição em baixa tensão são menores, tendo como consequência, menores quedas de tensão e reduções significativas de perdas de energia nos circuitos. A figura 3 indica um esquema resumido de como é encontrado as instalações elétricas na maior arte das indústrias de médio porte no Brasil, a figura 4 indica um esquema de como deveria ser realizado a distribuição de energia elétrica dentro dessas empresas, com o objetivo de minimizar as perdas. Já a figura 5 mostra um gráfico que referência as perdas em condutores por efeito joule (kW/km) em função da corrente que circula nos condutores, além de mostrar a seção de cada um desses condutores.

Figura 3 - Instalação elétrica com transformador na entrada de energia elétrica.



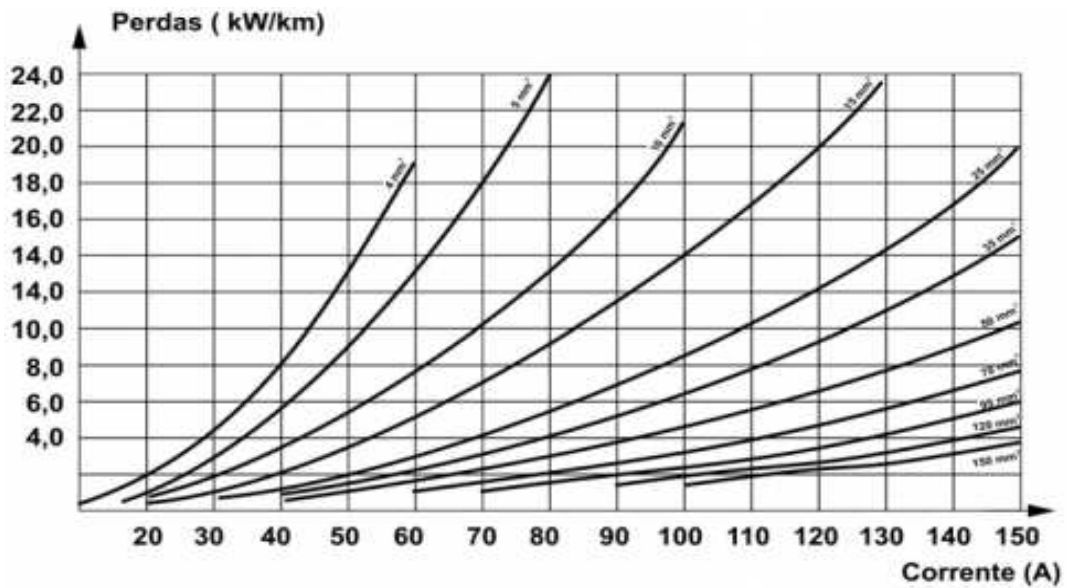
Fonte: (COPEL, 2020).

Figura 4- Circuito com transformadores distribuídos próximos as cargas de alimentação.



Fonte: (COPEL, 2020).

Figura 5 - Perdas em condutores por efeito joule.



Fonte: (COPEL, 2020).

Outro fator relevante que se deve levar em consideração em circuitos de distribuição são as perdas ôhmicas devido às resistências elétricas dos componentes de um sistema da distribuição, que podem ser potencializadas pelo dimensionamento inadequado de elementos como: disjuntores, chaves seccionadoras, chaves fusíveis, cabos condutores e conexões elétricas.

2.3.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA A ILUMINAÇÃO

O bom sistema de iluminação nos ambientes de trabalho é indispensável, uma vez que, proporciona um ambiente visual adequado que forneça a intensidade luminosa necessária à realização de tarefas visuais executadas por ocupantes de postos de trabalho, ou seja, a luz deve ser fornecida e direcionada à superfície de trabalho para que os ocupantes do posto consigam desenvolver suas atividades. A Tabela 2 mostra o consumo de energia elétrica por iluminação em diversos setores da economia brasileira.

Tabela 2 – Uso de Energia Elétrica pela Iluminação no Brasil.

Setores	En. total GWh/a	Destinação [1]	Em. final GWh/a	Coef. EE [1]	Coef. Ref. [1]	En. Útil GWh/a	Potencial GWh/a
Setor Energético	12.818,00	0,068	871,6	0,245	0,29	213,5	135,3

Setor Residencial	78.577,00	0,24	18.858,50	0,09	0,172	1.697,30	8.990,70
Setor Comercial	50.082,00	0,418	20.949,80	0,24	0,28	5.028,00	2.992,80
Setor Público	30.092,00	0,497	14.961,70	0,25	0,3	3.740,40	2.493,60
Setor Agropecuário	14.895,00	0,037	551,1	0,09	0,172	49,6	262,7
Setor de Transportes	1.039,00	0	0	-	-	0	0
Setor Industrial	172.061,00	0,021	3.594,40	0,243	0,286	873,6	540,6
Total	359.564,00	0,166	59.787,20	0,194	0,261	11.602,40	15.415,70

Fonte: (EPE, 2007).

As lâmpadas elétricas utilizam energia elétrica para gerar energia luminosa tornando possível a realização de trabalhos em ambientes com pouca iluminação natural ou no período noturno. No ambiente industrial diversos tipos de lâmpadas são utilizados, dentre os quais podemos destacar as lâmpadas incandescentes, as fluorescentes, as de vapor de sódio, as de vapor metálico e as de LED (Diodo Emissor de Luz). As principais características que as diferenciam são:

- Lâmpadas incandescentes: vida útil de aproximadamente 1000 horas, eficiência luminosa em média 15 lm/W, geração de calor alta.
- Lâmpadas fluorescentes: vida útil de aproximadamente 7500 horas, eficiência luminosa em média 70 lm/W, geração de calor baixa.
- Lâmpadas a Vapor de Sódio de Alta Pressão: vida útil de aproximadamente 18000 horas, eficiência luminosa em média 130 lm/W, geração de calor alta.
- Lâmpadas a Vapor Metálico: vida útil de aproximadamente 15000 horas, eficiência luminosa em média 90 lm/W, geração de calor alta.
- Lâmpadas de LED: vida útil de aproximadamente de 25000 horas a 60000 horas, eficiência luminosa em média 100 lm/W, geração de calor baixa.

Quando se fala em eficiência energética aplicada a iluminação é muito comum relacionar com a substituição de lâmpadas por outras lâmpadas mais eficientes. Esta substituição é muito importante para a eficiência, mas existem outros fatores que contribuem negativamente para os gastos com iluminação em empresas. Entre esses fatores podemos destacar:

- Iluminação em excesso;

- Falta de aproveitamento da iluminação natural;
- Falta de utilização de novas tecnologias para auxiliar com a eficiência energética, tais como: *timers*, sensores de presença, etc;
- Falta de comandos (interruptores) das luminárias;
- Ausência de manutenção, depreciando o sistema;
- Hábitos de uso inadequado

2.4 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA EM MOTORES DE INDUÇÃO

Reduzir a solicitação da corrente elétrica durante a partida de motores elétricos de indução é uma boa oportunidade de economia de energia elétrica ao se tratar de eficiência energética em grandes indústrias. A participação dos motores elétricos no consumo industrial no Brasil é expressiva, exigindo atenção especial em qualquer programa de eficiência energética, representam uma das maiores solicitações de potência em indústrias. Nesse contexto, suavizar a partida desses motores de grande porte faz com que otimize a vida útil do equipamento, evite perdas por efeito joule nos cabos de alimentação e diminua o consumo de energia elétrica. Equipamentos como inversores de frequência são constantemente utilizados nesse processo. Em contrapartida, a utilização em excesso desses equipamentos pode trazer alguns prejuízos no que diz respeito a THD - Taxa de Distorção Harmônica Total do sistema em questão, por se tratar de equipamentos considerados como cargas não lineares. Sendo assim, é importante ser realizado um estudo detalhado antes da utilização desses equipamentos. A figura 6 mostra um exemplo de um inversor de frequência fabricado pela WEG que é bastante utilizado nas indústrias brasileiras atualmente.

Figura 6 – Exemplo de Inversor de frequência WEG.



Fonte: Catálogo WEG.

O rendimento de um motor de indução é dado por:

$$\eta = 1 - \frac{P_e}{P_a} = \frac{P_u}{P_a} \quad (5)$$

Onde:

P_e = perdas de energia;

P_a = potência solicitada da rede elétrica (Potência aparente) ;

P_u = potência útil;

As principais perdas em motores de indução são:

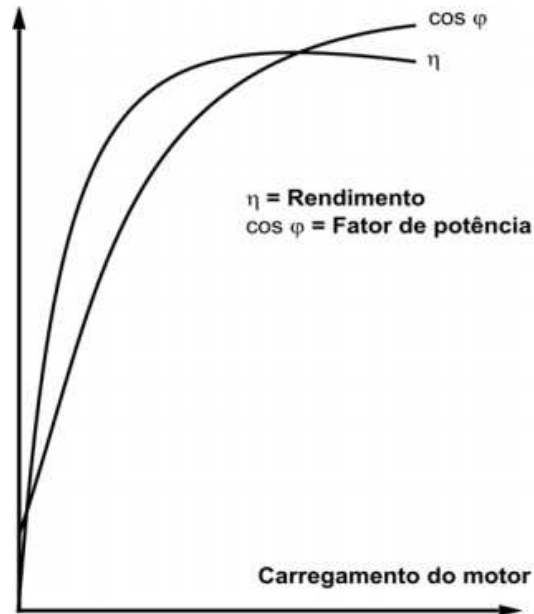
- Perdas no enrolamento, ou no cobre;
- Perdas mecânicas, referentes a atritos nos mancais e potência para ventilação;
- Perdas suplementares, decorrentes da distribuição não uniforme da corrente no enrolamento e das perdas adicionais no ferro.

- Perdas no ferro, ou em vazio;

A figura 7 mostra o rendimento e fator de potência em função do carregamento de um motor genérico. Percebe-se que de forma natural em todos os motores elétricos quando o carregamento do motor cresce, o rendimento se eleva até alcançar o seu valor máximo, que ocorre quando as perdas em vazio e as perdas devido à corrente de carga se

equivalentes. Além desse ponto, as perdas no cobre se tornam elevadas em relação às perdas em vazio, fazendo com que o rendimento diminua.

Figura 7 - Rendimento e fator de potência em função do carregamento do motor.



Fonte: Manual de eficiência energética COPEL.

As perdas no ferro, devido a ventilação e ao atrito são consideradas constantes, assumindo que o motor opera em condições próximas as nominais. Como já dito, as perdas no cobre que variam com o quadrado da corrente é um exemplo de perda variável. Pequenas cargas com relação a potência nominal do motor implicam em um baixo rendimento, o que implica em grandes perdas fixas em comparação com a potência fornecida.

O principal parâmetro a ser observado no momento da escolha do melhor motor para ser utilizado no serviço a que se destine é a potência nominal. Potências nominais muito superiores à realmente necessária resultam em desperdícios de energia, elevação da potência solicitada, redução do fator de potência da instalação elétrica da indústria e maiores perdas nas redes de distribuição de energia e nos transformadores. Sempre que possível segundo manuais de eficiência energética, deve-se escolher o motor de modo que seu carregamento seja no mínimo superior a 50 %, dando preferência a que ele seja maior que 75 %.

Tendo em vista as características técnicas dos motores de indução, além da escolha adequada de sua potência nominal, uma boa operação desses equipamentos pode representar grandes economias de energia elétrica, pois, como foi visto, motores operando

muito abaixo de sua potência nominal apresentam baixo rendimento energético e baixo fator de potência.

A manutenção adequada de um motor elétrico e de sua carga pode representar significativa economia de energia elétrica. Em grandes indústrias muitas vezes o que acontece é que a manutenção é feita somente quando a produção permite, ou quando as condições de funcionamento se tornam tão precárias que impedem a sua operação. Tal procedimento, além de poder danificar a máquina, reduz sua vida útil e, geralmente, provoca grandes desperdícios de energia.

Finalmente, ao se realizar uma boa manutenção e até mesmo uma modernização de baixo custo realizadas nas máquinas que os motores elétricos estão acionando podem resultar em menores solicitações de potência e, conseqüentemente, redução do consumo de energia elétrica. Em alguns casos a substituição de máquinas que requerem mais consumo, para as que consomem menos energia elétrica e que possam realizar a mesma produção ou até mesmo superiores podem se tornar mais vantajosas.

Em resumo, com manutenção e lubrificação convenientes, operação adequada e modernização da máquina, o motor que aciona essas máquinas pode tornar-se superdimensionado, operando em faixas de potência que resultam em baixo rendimento energético e baixo fator de potência. Para esses casos é aconselhável a sua substituição por outro de potência nominal adequada às novas condições.

2.5 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO, AR COMPRIMIDO, AR CONDICIONADO E VENTILAÇÃO

2.5.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Existem dois tipos de sistemas de refrigeração industrial: os sistemas de expansão direta que compreendem os processos de refrigeração em que a unidade evaporadora do ciclo frigorígena retira calor diretamente do meio a ser resfriado (Ex: câmaras frigoríficas, trocadores de calor para refrigeração de fluidos, massas, etc.), e os sistemas de expansão

indireta que compreendem os processos de refrigeração em que a água gelada é o meio de transporte da potência frigorígena, sendo que os equipamentos de geração (*chillers*, centrífugas, etc.) resfriam a água que será utilizada como volante térmico em processos específicos.

Para todos os sistemas de refrigeração é possível obter melhoria no rendimento pela aplicação de alguns dos seguintes procedimentos:

- Procurar sempre armazenar na mesma câmara produtos que necessitem a mesma temperatura, percentual de umidade e mesmo período de armazenagem;
- Manter sempre que possível as portas das câmaras frigoríficas completamente fechadas e vedadas as portas das antecâmaras;
- Manter sempre limpos em bom funcionamento o termostato (os que operam com válvulas de três vias e/ou com válvulas de expansão) e a resistência de aquecimento das unidades evaporadoras que operem em faixas de congelamento, pois o gelo é isolante e dificulta a troca de calor;
- Usar, nas câmaras frigoríficas, somente lâmpadas mais eficientes, preferencialmente frias, manter o nível de iluminação adequado (200 lux);
- Evitar, sempre que possível, instalar condensadores ao alcance de raios solares ou próximos a fornos, estufas, etc., ou seja, equipamentos que irradiem calor;

2.5.2 AR COMPRIMIDO

Sistemas de ar comprimido são indispensáveis para o funcionamento de muitas máquinas industriais, que podem ser ferramentas pneumáticas, máquinas operatrizes, prensas, etc. que utilizam o ar comprimido, definindo os níveis terminais de pressão e vazão, além das exigências específicas de qualidade do ar. Nesse contexto, planos de manutenção preventiva nesses equipamentos são muito importantes no sentido de otimizar o funcionamento dos sistemas. Para exemplificar, alguns procedimentos devem constar nesses planos, tais como:

- evitar trajetos entre a geração e o reservatório de distribuição, com tubulações de diâmetro variado, curvas desnecessárias, etc. De preferência, este trajeto deve envolver uma tubulação mestra dimensionada para uma perda de carga máxima de 0,08 kg/cm²

para cada 100 m de tubulação (comprimento equivalente), quanto menor esse trajeto, menor será os riscos com as perdas. Aumentando a eficiência energética;

- eliminar todos os vazamentos existentes no trajeto geração – reservatório central;
- inspecionar tubulações, válvulas e elementos de ligação quanto a vazamentos de água de arrefecimento das unidades compressoras, condensadores dos sistemas de desumidificação e resfriadores intermediário e posterior;
- verificar periodicamente as condições físicas dos compressores, realizar limpeza na sala dos compressores, realizar manutenções preventivas nos compressores (Trocar no tempo correto óleo, filtro de óleo, filtro de ar e outros equipamentos).
- fazer tratamento apropriado periodicamente da água de resfriamento das unidades compressoras;
- efetuar inclinação de 5 a 10 mm por metro linear de rede para facilitar o sistema de purga de condensado;

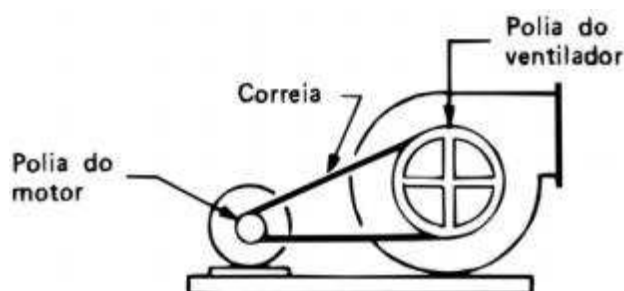
2.5.3 AR CONDICIONADO E VENTILAÇÃO

Até passado recente, os fatores de segurança adotados em projeto estabeleciam capacidades de ventilação e ar condicionado superiores à máxima demanda prevista fazendo com que de uma forma geral a maior parte das instalações de ventilação e condicionadores de ar se tornassem super dimensionadas.

Sendo assim, a manutenção periódica nesses sistemas auxilia para manter o bom funcionamento, evitando a sujeira e o excesso de atrito nas partes rotativas. Para isso, devem-se limpar e lubrificar com frequência mancais e rolamentos, visando minimizar o atrito, reduzir ruído e evitar perdas de energia. Além disso, realizar a limpeza na parte das pás dos ventiladores e das suas grades de proteção evita o acúmulo de poeira, que dificulta a passagem de ar, que pode sobrecarregar ainda mais o equipamento e aumentar as perdas por efeito joule.

Em sistemas de ventilação em grandes indústrias, do ponto de vista de conservação de energia, o sistema que apresenta melhores resultados é a redução da velocidade dos ventiladores, isto é, as suas rotações por minuto. Isso pode ser obtido pela substituição da polia do motor ou da polia do ventilador. A figura 8 exemplifica um sistema típico de acoplamento ventilador – motor para auxiliar no entendimento.

Figura 8 – Sistema típico de acoplamento ventilador – motor.



Fonte: Manual de eficiência energética COPEL.

Para proporcionar o conforto térmico para os seus colaboradores muitas empresas recorrem a utilizar equipamentos condicionadores de ar, nesse contexto, é notório que uma das principais fontes do consumo de potência em grandes indústrias partem desses equipamentos. Sendo assim, o dimensionamento, a manutenção periódica e a utilização de novas tecnologias são ferramentas indispensáveis para auxiliar na constante eficiência energética nesses equipamentos.

A seguir, é apresentado na Tabela 3, a prática para o cálculo de carga térmica, ou seja, para determinar a capacidade dos equipamentos. A unidade usualmente empregada é o BTU por hora.

Tabela 3 - Carga Térmica para Ar Condicionado.

Cálculo de carga térmica									
Área <i>m</i> ²	Sombra o dia todo			Sol da manhã			Sol da tarde		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
15	6000	7000	8000	8000	10000	11000	10000	12000	14000
20	6000	8000	11000	8000	12000	14000	11000	14000	14000
30	6000	9000	14000	8000	14000	18000	12000	16000	17000
40	7000	12000	16000	10000	14000	18000	13000	17000	22000
60	10000	16000	22000	14000	20000	30000	17000	23000	30000
70	10000	18000	23000	14000	22000	30000	18000	30000	30000
90	12000	22000	30000	16000	30000	35000	20000	30000	40000

Fonte: Manual de eficiência energética COPEL.

Os cálculos da tabela consideram a permanência de duas pessoas no ambiente.
Acrescentar 600 BTU/h para cada pessoa a mais;

Em grandes ambientes é preferível a utilização de dois ou mais aparelhos, com capacidade total equivalente a entrada na tabela, para melhorar a circulação de ar e diminuir o nível de ruído.

Outrossim, boas práticas de manutenção e utilização como já citados, são indispensáveis para se ter um bom resultado. Tais como:

- sempre que possível ligue o aparelho de ar condicionado uma hora após o início do expediente e desligue uma hora antes do seu término;
- regule o termostato para uma temperatura ambiente de forma a atender as condições de conforto;
- manter fechadas as portas e janelas nos ambientes condicionados;
- desligar aparelhos elétricos localizados em ambientes condicionados, quando não estiverem sendo utilizados;
- utilização de novas tecnologias, como sensores de presença para realizarem o controle automático de ligar/desligar os condicionadores de ar de acordo com a presença ou não de pessoas no ambiente;

2.6 PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.6.1 PROGRAMA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – PEE

De acordo com a ANEEL, o PEE atua em todos os setores da economia por meio de projetos que demonstrem a importância e a viabilidade econômica de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia. Com o objetivo de maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada, promovendo a transformação do mercado de eficiência energética, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica.

2.6.2 PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL

Outro programa com grande relevância no cenário brasileiro ao se tratar de eficiência energética é o PROCEL, promove ações de eficiência energética que colaboram com a economia de energia no país, incentivando o consumo consciente e beneficiando toda a sociedade. O programa foi criado em 1985 e mesmo com altos e baixos é considerado o maior programa na área de eficiência energética no Brasil. Criado pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Procel, programa do Governo Federal executado pela Eletrobras, o Selo Procel foi instituído por Decreto Presidencial em 8 de dezembro de 1993. O Selo Procel de Economia de Energia, ou simplesmente Selo Procel, tem como finalidade ser uma ferramenta simples e eficaz que permite ao consumidor conhecer, entre os equipamentos e eletrodomésticos à disposição no mercado, os mais eficientes e que consomem menos energia.

Tendo em vista a criação desse programa, parcerias junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, a agentes como associações de fabricantes, pesquisadores de universidades e laboratórios, com o objetivo de estimular a disponibilidade, no mercado brasileiro, de equipamentos cada vez mais eficientes começaram a entrar em vigor.

Para que isso se torne possível, são definidos índices de consumo e desempenho para cada categoria de equipamento. Cada equipamento candidato ao Selo deve ser submetido a ensaios em laboratórios indicados pela Eletrobras. Apenas os produtos que atingem esses índices são contemplados com o Selo Procel. Sendo assim, Além de contribuir para o consumo sustentável de energia, existe a economia na fatura de energia elétrica. A figura 9 representa o símbolo utilizado para representação do selo PROCEL.

Figura 9- Selo PROCEL.

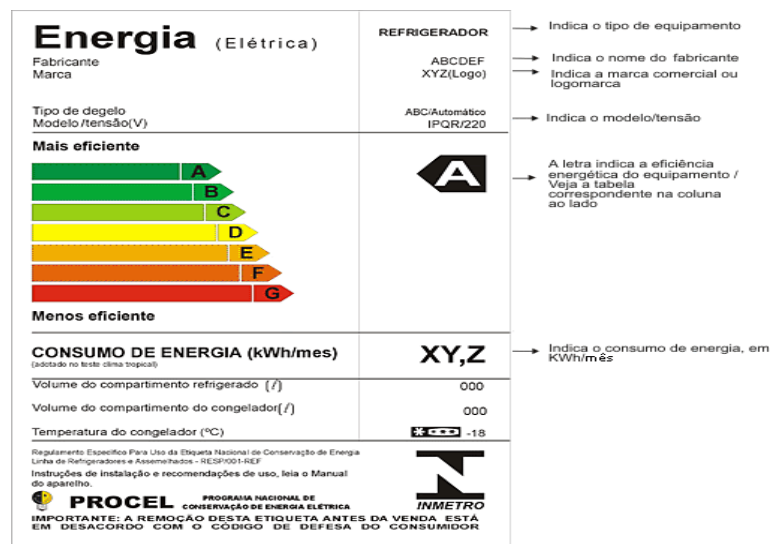


Fonte: PROCEL Info.

2.6.3 PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM – PBE

O PBE é coordenado e regulamentado pelo INMETRO e executado em parceria com o CONPET para os equipamentos que consomem combustíveis (fogões, fornos, aquecedores de água a gás e automóveis). Por meio da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), afixada nos produtos de forma voluntária ou compulsória, o consumidor é informado, no momento da compra, sobre a eficiência energética ou consumo de modelos semelhantes, podendo compará-los de "A" (mais eficiente) até "E" (menos eficiente). O PBE contribui para a comercialização e utilização de aparelhos com menor consumo de energia. A figura 10 representa o modelo de etiqueta PBE utilizado e o significado de alguns índices importantes.

Figura 10 - Etiqueta PBE.



Fonte: INMETRO.

2.6.4 RESULTADOS OBTIDOS PELOS PROGRAMAS

Segundo o Procel, os resultados energéticos obtidos pelas ações do programa contribuem para a eficiência dos bens e serviços e para o desenvolvimento de hábitos e conhecimentos sobre o consumo eficiente de energia.

Além disso, possibilitam a postergação de investimentos no setor elétrico, reduzindo os impactos ambientais e colaborando para um Brasil mais sustentável.

A seguir são listados os principais resultados obtidos pelo Procel no ano de 2019:

- Com base em estimativas de mercado e aplicação de metodologias específicas de avaliação de resultados, calcula-se que, em 2019, o Procel

tenha alcançado uma economia de energia de aproximadamente 21,6 bilhões de kWh.

- Essa energia economizada ajudou o País a evitar a liberação na atmosfera de 1,6 milhão de tCO_2 equivalentes. (Utilizou-se o fator de emissão médio de CO_2 equivalente. Esse fator tem como objetivo estimar a emissão de CO_2 equivalente associada a uma geração de energia elétrica determinada).
- Conforme 2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* e consulta a especialistas da área. Isso corresponde às emissões proporcionadas durante um ano por 557 mil veículos.
- Os 21,6 bilhões de kWh economizados também equivalem à energia fornecida, em um ano, por uma usina hidrelétrica com capacidade de 5.182 MW. Representam, ainda, 15,22% do consumo residencial de energia elétrica no Brasil e 4,48% do consumo total. Durante um ano, a energia economizada poderia atender a 11,11 milhões de residências
- Além disso, estima-se que as ações fomentadas pelo Procel tenham contribuído para uma redução de demanda na ponta de 8.129 MW.
- O custo anual evitado, por conta dos resultados energéticos proporcionados pelas ações do Procel no ano, foi de aproximadamente R\$ 5,34 bilhões.

Sendo assim, segundo os resultados do programa para o ano de 2020 – ano base 2019, os resultados acumulados do Procel entre 1986 e 2019 revelam que, nesse período, a economia de energia total decorrente das ações do programa foi da ordem de 173,2 bilhões de kWh.

3 ESTUDO DE CASO

A pesquisa pretende analisar um sistema verificando qual a influência do controle de velocidade de um motor no consumo energético do sistema de filtragem de uma fábrica metalúrgica e como tornar o sistema mais eficiente.

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A pesquisa foi desenvolvida na empresa Acumuladores Moura S.A situada no agreste pernambucano. Dentre os seus vários setores o trabalho foi aplicado na área de captação e filtragem de gases provenientes de combustão e fundição, onde foi analisado um sistema de exaustão de gases, que realiza a captação por tubulações ao longo das instalações da empresa, provenientes da combustão dos processos de fundição.

3.1.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema consiste na sucção do material proveniente da combustão e fundição de metais. Tais materiais não podem ser despejados no meio ambiente, necessitando por isso passar por um processo de filtragem para evitar qualquer tipo de contaminação.

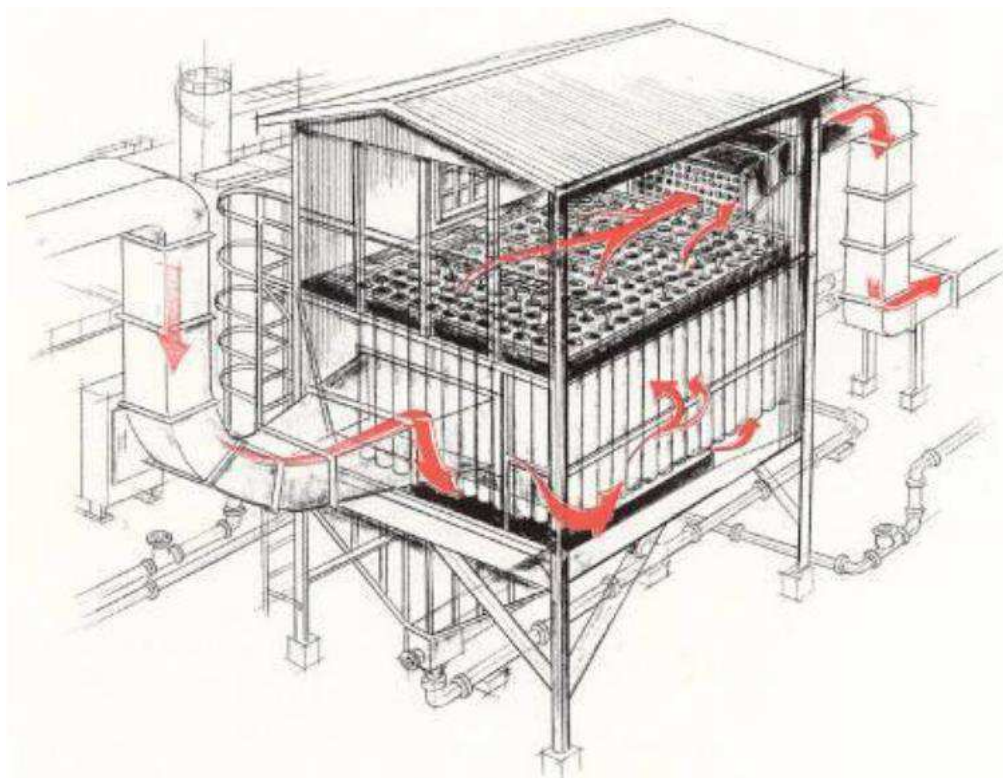
3.1.1.1 Sistema de filtragem

O filtro de mangas, é basicamente composto por plenum superior, corpo central e Moega de recolhimento, pode operar em condições rígidas e contínuas, sendo dotado de sistema de limpeza automática das mangas filtrantes.

O funcionamento do filtro consiste na introdução do ar contaminado no corpo central do filtro, através de antecâmara lateral no sentido de evitar o choque direto do particulado com as mangas, assim como, reduzir a velocidade do fluxo e precipitar, por efeito de gravidade, o particulado de maior granulometria.

O ar, ainda contaminado, é então conduzido para o interior do corpo central e forçado a passar através das mangas de filtração, local de retenção do particulado ainda em suspensão. Na sequência o ar, já isento de impurezas, passa para o plenum superior, saindo do filtro por meio de bocais localizados em uma de suas laterais. A seguir é mostrado na figura 11 o exemplo do esquema acima citado do funcionamento do filtro de mangas.

Figura 11 – Exemplo do filtro de mangas.



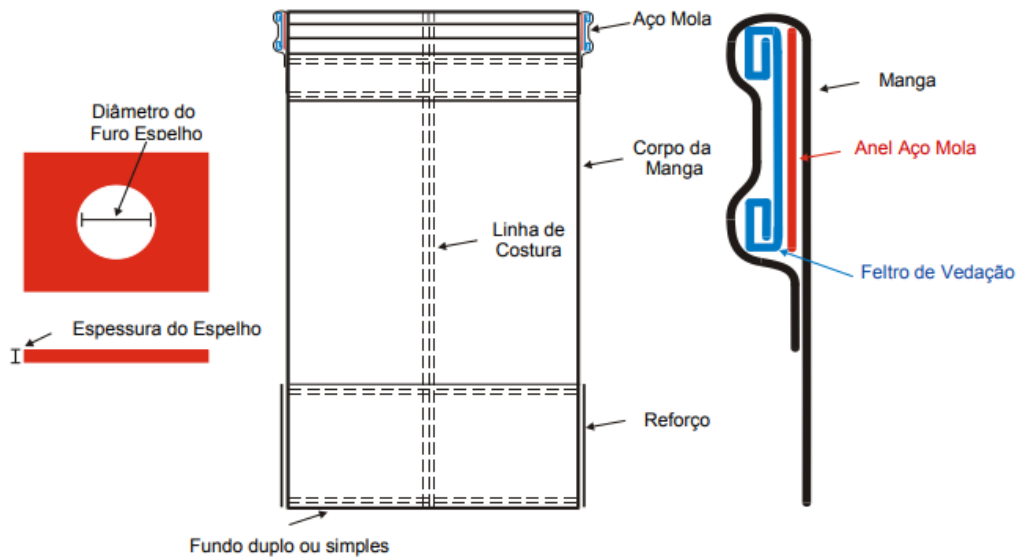
Fonte: Ventec ambiental.

Tal sistema de filtração consiste num conjunto de mangas que são elementos filtrantes de feltro agulhado, através das quais ocorre a separação do ar e do pó, já que o ar atravessa o elemento filtrante e as partículas sólidas ficam retidas em sua parede externa. Após um determinado tempo, as mangas ficam impregnadas com pó, necessitando então que se faça uma limpeza.

As mangas de filtração são montadas sobre gaiolas aramadas, que visam à manutenção de seu perfil cilíndrico, dotadas em sua extremidade superior de um Venturi, cuja finalidade é provocar a aceleração do ar comprimido de limpeza quando injetado no

interior de cada manga. A figura 12 mostra com mais detalhes o tipo de manga utilizado no processo de filtragem.

Figura 12 – Manga utilizada no sistema de filtragem.



Fonte: Ventec ambiental.

3.1.1.2 Motor elétrico trifásico

O sistema de captação dos gases é tracionado por um motor de indução trifásico de 250CV WEG, onde o mesmo faz o acionamento de um ventilador que trabalha na forma de sucção ao invés de ventilação. A conexão entre o motor e o ventilador consiste num conjunto de polias e um conjunto de correias tipo V. A figura 13 mostra um dos motores elétricos que foi utilizado no estudo.

Figura 13 – Motor elétrico trifásico de 250 cv.



Fonte: Autor.

Na tabela 4 pode-se observar os principais dados de placa do motor acima referenciado.

Tabela 4 – Dados de placa do motor.

CARACTERÍSTICAS DO MOTOR	
Fabricante	WEG
Referência	W22 IR3
Modelo	315S
Potência	250 CV
Conjugado nominal	101 kgfm
Corrente nominal	336 A
Velocidade nominal	1780 RPM
Tensão nominal	380 V
Fator de potência	0,87

Fonte: Autor.

3.1.1.3 *Soft - starter*

Para acionamento do motor citado anteriormente é utilizado uma chave de partida suave. Seu princípio de funcionamento consiste em controlar a partida do motor a partir de elementos semicondutores, mais comumente transistores ou tiristores, alimentando o motor com uma tensão eficaz menor que a tensão nominal, reduzindo a corrente de partida e controlando a velocidade de partida pela rampa de aceleração. Para que a perturbação causada na rede elétrica de alimentação seja minimizada o máximo possível devido ao conjugado de partida do motor, após a partida (saída da inércia) do motor, feito um *bypass* do sistema de controle semicondutor para a alimentação direto da rede elétrica com

a tensão nominal de funcionamento do conjunto. A figura 14 mostra a *soft - starter* utilizada para dar partida ao motor. A tabela 5 mostra as características desse equipamento.

Figura 14 – Soft starter SSW06 WEG.



Fonte: Autor.

Tabela 5 – Características da soft - starter.

CARACTERÍSTICAS DA SOFT - STARTER	
Fabricante	WEG
Modelo	SSW06
Corrente nominal	412 A
Tensão nominal	220 V a 575 V

Fonte: WEG.

3.1.1.4 Forma de controle de funcionamento do filtro

O funcionamento do filtro consiste em manter um valor de pressão negativa afim de captar os gases. Como o motor de tração funciona com sua velocidade nominal de fabricação, é preciso utilizar um modo de obstrução da linha de sucção para fazer o controle da vazão captada pelo filtro. O método utilizado para realizar essa obstrução é um *dumper* mecânico acionado por um conjunto motoredutor, que faz o acionamento de abertura e fechamento do acionamento mecânico. O *dumper* era responsável pela proteção do filtro de mangas em caso de excessiva temperatura dos gases do processo, sendo acionada momento em que a leitura da temperatura na entrada do duto de gases do processo atingisse níveis críticos. Neste momento, atuada pelo acionamento, o *dumper*

atinge abertura suficiente de forma a permitir a entrada de volume de ar frio no circuito do duto de transporte de gases que resultasse em uma mistura com os gases do processo de temperatura inferior a dos gases provenientes dos fornos. A figura 15 mostra o sistema de acionamento do *dumper*.

Figura 15 – Sistema de *dumper*.



Fonte: Autor.

Para verificação do valor de pressão e vazão no sistema é utilizado um transdutor de pressão diferencial GTPD – A com faixa de leitura de 0 a 800 mmCA para verificar e regular tais variáveis importantíssimas no processo para que não haja emissão. A figura 16 mostra o transmissor de pressão diferencial usado.

Figura 16 – Transmissor de pressão diferencial.

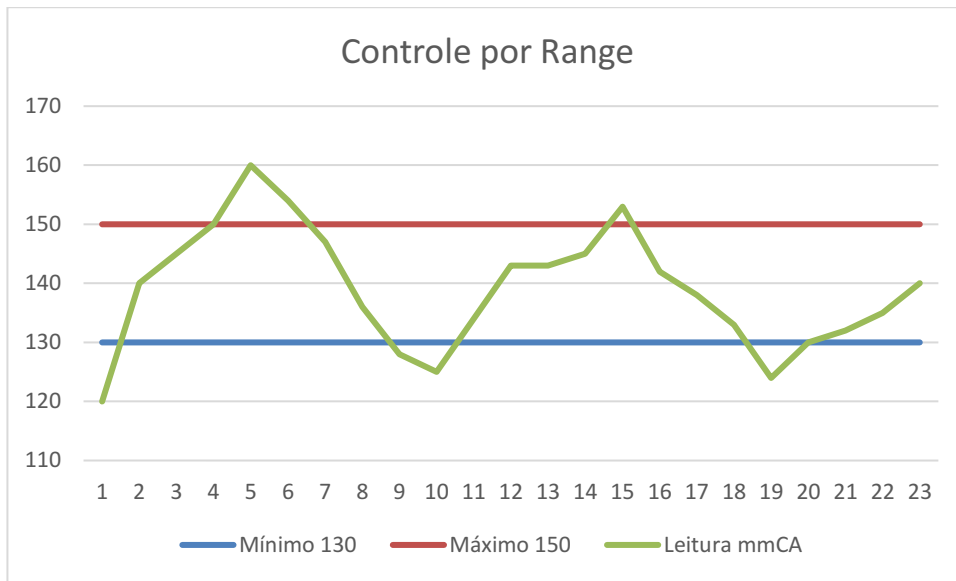


Fonte: Autor.

A partir das leituras deste sensor o sistema é regulado numa faixa de valores pré-definidos onde o sistema varia dentro desta faixa mantendo uma vazão considerada adequada ao processo.

Quando o sistema verificava que o sistema saia de dentro desta faixa de valores, existe uma reação do controle fechando ou abrindo o *dumper*, onde ao passar o limite superior definido o sistema fecha durante um curto período de tempo e durante outro período de tempo faz a verificação da eficácia da ação, se o sistema retornou para a faixa, caso contrário a ação se repete. O mesmo acontece para o limite inferior desse range, onde ultrapassar o limite mínimo o sistema acionara a abertura do *dumper* por um curto período de tempo e passará outro verificando sua eficácia. A figura 17 mostra o gráfico do controle por range com valores pré definidos pelo processo e na figura 18 a programação em linguagem ladder para a CLP realizar o comando do acionamento do *dumper*, caso necessário. Pode-se observar pela programação que o acionamento poderia ser realizado de forma automática de acordo com a leitura do transdutor de pressão diferencial GTPD – A, como também em casos emergenciais pelo comando no painel de controle. Para o controle automático era realizado primeiramente a leitura dos parâmetros e ao se observar que os valores encontravam-se fora da faixa determinada os contatos do CLP eram acionados e a partir desse momento realizado o comando para abertura ou fechamento do *dumper*.

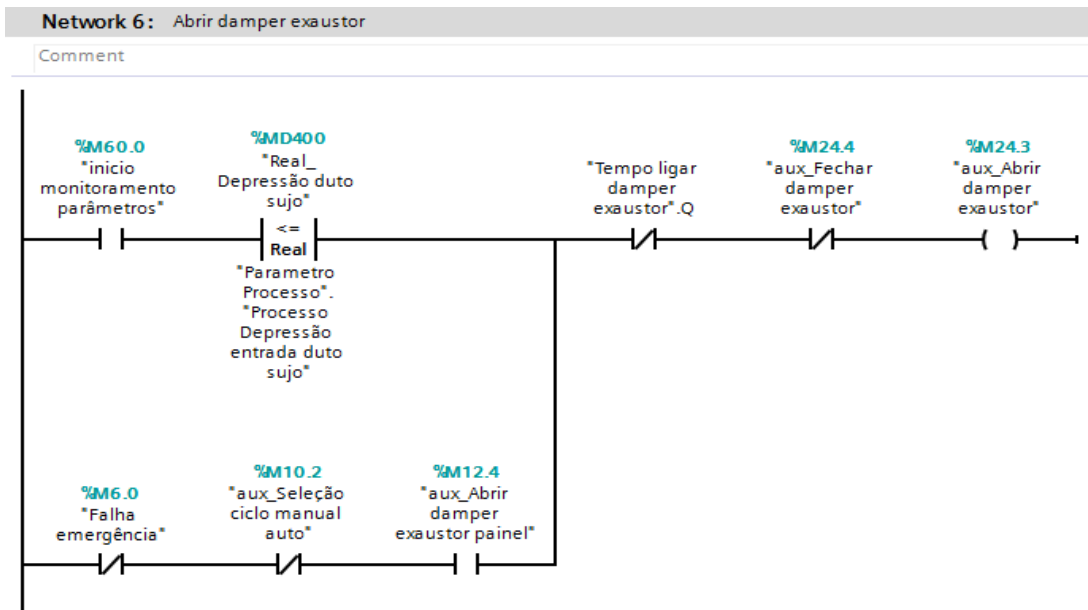
Figura 17 – Gráfico do controle por range.



Fonte: Autor.

O controle do sistema é feito por um CLP, S7-1200 Siemens, o mesmo é exemplificado na figura 18.

Figura 18 – Programação da CLP para comando abrir e fechar o dumper.



Fonte: Acumuladores Moura S.A. (2020).

3.1.2 ETAPAS DE REALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A proposta do estudo foi dividida em 4 etapas para tornar mais fácil o entendimento e a sua aplicação, sendo verificada a oportunidade de melhoria no consumo de energia elétrica do sistema em estudo.

Etapa 1:

Realizar a coleta inicial de dados do consumo de energia do motor elétrico, motor que funcionava a partir de uma chave de partida suave que é usado para evitar a perturbação na rede de alimentação devido ao consumo na partida.

Após a partida estar completa, para que possa ser ajustada o valor desejado de vazão de operação do sistema, o motor passa a funcionar em sua rotação nominal e como citado anteriormente é realizado o controle de vazão do processo por meio de um controle por servo motor, que realiza o acionamento de abrir e fechar o *dumper*, mantenha o sistema dentro dos valores desejados de processo.

Etapa 2:

Como solução para o sistema, deve ser realizado modificações e melhorias no sistema de partida do motor e controle do sistema.

Realizar a partida não mais com a *Soft-start*, mas sim, com um inversor de frequência, onde a característica da partida permaneceria a mesma, porém com a capacidade de controlar a rotação do motor tornando desnecessário a utilização do *dumper* para obstrução da sucção do sistema, assim eliminando uma resistência para o funcionamento do motor.

Para realização desse controle, é necessário a implementação de um sistema em malha fechada com um controle PID, onde será definido um valor padrão de funcionamento e não mais um range de variação do sistema, com a leitura do valor da pressão e cálculo do erro com o controlador dá a oportunidade de realizar correções na velocidade, enviando assim um sinal analógico para o inversor realizar o ajuste de sua rotação, para que o consumo de energia seja apenas o necessário para manter o padrão definido de setpoint.

Etapa 3:

Realizar a coleta de dados do consumo de energia do motor após a realização das modificações e melhorias citadas na etapa 2.

Etapa 4:

Comparar o consumo energético do sistema em kW, estudando antes e após as intervenções, verificando os aspectos relativos ao consumo e a eficiência do sistema.

Por tanto, os dados trabalhados nesse estudo de caso se referem a verificação da possibilidade do aumento da eficiência do consumo de energia do sistema analisado, verificando a redução do consumo de kWh

3.2 PROCESSO DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

3.2.1 ETAPA 1

Para realização dessa etapa foi realizado uma verificação de todo o sistema e a coleta de dados de consumo de energia do motor.

3.2.1.1 Análise e coleta de dados

Para realizar a verificação do consumo de energia no sistema foi então utilizado um CLP LOGO! OBA08 Siemens, o sistema montado é mostrado na figura 19.

Figura 19 – Sistema montado para acompanhamento dos dados.



Fonte: Autor.

O CLP utilizado possui a capacidade de realizar a coleta e armazenamento de dados de suas variáveis, a partir de um bloco de função chamado DataLog, onde esse bloco registra os valores indicados pelo usuário dentro de um micro cartão SD. Tais valores podem ser baixados e transformados em tabelas do Excel.

Foi então verificado a capacidade na Soft-start de fazer com que suas saídas analógicas de controle possam enviar o consumo de energia em KW instantaneamente. A saída analógica funciona com um valor de tensão de 0 a 10 Vcc, onde o valor máximo é igual ao valor máximo possível de ser liberado pela soft-starter trabalhando em regime permanente para que não haja dano aos seus componentes.

Foi utilizada esta capacidade da saída analógica juntamente com a capacidade do CLP de armazenar os dados, para realizar a análise do consumo como não havia uma alternativa e a compra de um analisador era inviável para o trabalho devido ao preço elevado.

3.2.2 ETAPA 2

Para realização desta etapa foi necessário realizar levantamento do material para implementação do projeto, realizar cotação dos valores dos itens a serem comprados, realizar a contratação de uma empresa especializada para realizar a instalação dos componentes, principalmente a desmontagem do sistema de partida do motor para a instalação do novo.

3.2.2.1 Levantamento do material para o projeto

Foi feita uma verificação nas instalações do filtro para verificar o material que existe e definir quais os itens necessários para serem adquiridos. Dentre dos itens levantados foi verificado a necessidade da compra do inversor de frequência para controle de velocidade do motor. Para reduzir a potência consumida pelo motor nas situações de carga reduzida, uma das alternativas é reduzir a velocidade de rotação do exaustor. Neste sentido, dispositivos como inversores de frequência são mais indicados nesses casos, por se tratar de equipamentos com mais automação e ter a possibilidade de utilização dos motores com mais autonomia de acordo com a aplicação. Tanto em momentos que será necessário utilizar os motores em sua rotação nominal, como também nos momentos que não é necessário o motor estar com a sua rotação nominal, além de permitir que o motor apresente uma partida mais suave. Consequentemente, exigindo menor quantidade de energia elétrica para o funcionamento diário. Na figura 20 é mostrado o inversor de frequência utilizado em projeto e a tabela 6 mostra as características desse equipamento.

Figura 20 – Inversor de Frequência WEG CFW - 11.



Fonte: WEG.

Tabela 6 – Características do inversor de frequência.

CARACTERÍSTICAS DO INVERSOR DE FREQUÊNCIA	
Tensão nominal de entrada (V)	380 ~ 480
Número de fases de entrada	3
Corrente nominal ND (A)	370
Corrente nominal HD (A)	312
Grau de proteção	IP20

Fonte: WEG.

Para implementação do controle PID, é necessário ter disponível uma saída analógica do CLP para enviar o sinal de controle para o inversor, assim possibilitando o ajuste da velocidade pela rotação da rotação do motor.

Foi realizado cotação para contratação de uma empresa especializada para realização da desenergização do sistema, desmontagem do controle antigo, instalação mecânica e elétrica do novo sistema, instalação elétrica do novo controle e programação do PID no CLP. Após o levantamento dos itens e serviços necessários, foi verificado o custo da execução do projeto.

3.2.3 ETAPA 3

Para análise do consumo após a implementação das modificações devidamente realizadas na etapa 2 deve ser realizado o mesmo procedimento de análise realizado na etapa 1 para que tenhamos a mesma base de banco de dados para análise dos consumos. Foi então verificada a capacidade do inversor de frequência, como a soft-starter, de fazer com que suas saídas analógicas de controle possam enviar o consumo de energia em kW instantaneamente. A saída analógica funciona com um valor de tensão de 0 a 10 Vcc. Onde o valor máximo é igual ao valor máximo possível de ser libera liberado pelo inversor trabalhando em regime permanente para que não haja dano aos seus componentes.

3.2.4 ETAPA 4

Após o levantamento do consumo de energia, antes e depois das modificações e melhorias, foram colocados em tabelas no Excel e feito o levantamento das médias de consumo de energia e realizado a comparação entre os valores encontrados.

3.3 RESULTADOS

Ao se observar que os motores de acionamento da exaustão desses filtros são motores de grande porte, o fato de operarem sempre em velocidade plena, mesmo com carga reduzida, resultava em gasto excessivo com energia elétrica nas situações de carga reduzida, tendo em vista que a soft-starter não controla a rotação do motor.

Para reduzir a potência consumida pelo motor nas situações de carga reduzida, uma das alternativas é reduzir a velocidade de rotação do exaustor. Neste sentido, dispositivos como inversores de frequência são mais indicados nesses casos, por se tratar de equipamentos com mais automação e ter a possibilidade de utilização dos motores com mais autonomia de acordo com a aplicação. Tanto em momentos que será necessário utilizar os motores em sua rotação nominal, como também nos momentos que não é necessário o motor estar com a sua rotação nominal, além de permitir que o motor apresente uma partida mais suave. Consequentemente, exigindo menor quantidade de energia elétrica para o mesmo funcionamento diário.

Sendo assim, após a instalação dos inversores de frequência foi possível acompanhar a economia de energia elétrica nos primeiros 04 meses e com base nos dados já conhecidos foi possível realizar uma projeção de economia anual, como pode ser observado nas tabelas 7, 8, 9 e 10. Além disso, pode-se verificar na tabela 11 os valores dos investimentos em equipamentos e mão de obra especializada para a realização do projeto:

Tabela 7 - Economia anual do projeto para o filtro C.

Consumo de energia do filtro C com o inversor de frequência	
Potência do motor (CV)	250
Potência do motor (kW)	183.88
Tempo de operação (Horas/dia)	24
Dias de operação no mês	27
Quantidade de meses em operação	9
Consumo (kW)	119151
Valor (kW/h)	R\$ 0.24
Custo mensal	R\$ 28,882.20
Economia aproximada de 30%	R\$ 8,664.66
Economia (Ano)	R\$ 77,981.95

Fonte: Moura, 2020.

Tabela 8 - Economia anual do projeto para o filtro E

Consumo de energia do filtro E com o inversor de frequência	
Potência do motor (CV)	250
Potência do motor (kW)	183.88
Tempo de operação (Horas/dia)	24
Dias de operação no mês	28.25
Quantidade de meses em operação	9
Consumo (kW)	124667.25
Valor (kW/h)	R\$ 0.24
Custo mensal	R\$ 30,219.34
Economia aproximada de 30%	R\$ 9,065.80
Economia (Ano)	R\$ 81,592.22

Fonte: Moura, 2020.

Tabela 9 - Economia anual do projeto para o filtro F

Consumo de energia do filtro F com o inversor de frequência	
Potência do motor (CV)	250
Potência do motor (kW)	183.88
Tempo de operação (Horas/dia)	24
Dias de operação no mês	28.25
Quantidade de meses em operação	9
Consumo (kW)	124667.25
Valor (kW/h)	R\$ 0.24
Custo mensal	R\$ 30,219.34
Economia aproximada de 30%	R\$ 9,065.80
Economia (Ano)	R\$ 81,592.22

Fonte: Moura, 2020.

Tabela 10 - Economia anual do projeto para o filtro Refino

Consumo de energia do filtro Refino com o inversor de frequência	
Potência do motor (CV)	250
Potência do motor (kW)	183.88
Tempo de operação (Horas/dia)	24
Dias de operação no mês	30
Quantidade de meses em operação	8
Consumo (kW)	132390
Valor (kW/h)	R\$ 0.24
Custo mensal	R\$ 32,091.34
Economia aproximada de 30%	R\$ 8,985.57
Economia (Ano)	R\$ 71,884.59

Fonte: Moura, 2020.

Tabela 11 – Investimento total para aplicação do projeto.

Investimento total do projeto		
ÍTEM	QUANTIDADE	VALOR
Inversor de frequência CFW11	4	R\$ 114.212,04
Expansão analógica Siemens	4	R\$ 3.960,00
Equipe especializada	1	R\$ 24.000,00
Total		R\$ 142.172,04

Fonte: Moura, 2020.

Nesse contexto, pode ser realizado o cálculo do Payback simples (Retorno sobre o investimento) e verificar o tempo de retorno do projeto, mostrando a viabilidade e o impacto econômico que projetos de eficiência energética podem trazer para a sociedade.

$$PB = \frac{\textit{Investimento inicial}}{\textit{Ganho no período}} = \frac{142.172,04}{313.050,98} = 0,4541498$$

Diante do resultado acima obtido, observa-se que o retorno do projeto deve ser em aproximadamente 5 meses e 15 dias após as alterações realizadas e o sistema retornar ao seu funcionamento acionado pelos inversores de frequência.

4 CONCLUSÃO

No presente trabalho foram apresentados alguns conceitos importantes para o bom entendimento acerca do tema, algumas das principais atividades com o objetivo de melhoria na eficiência energética realizadas principalmente em indústrias atualmente e um projeto de estudo de caso realizado em uma indústria multinacional a Acumuladores Moura S/A, onde, ao se apresentar os seus resultados torna-se claro a importância desse tipo de atividade em termos de impactos econômicos e ambientais.

A melhoria realizada no processo de acionamento de alguns dos motores responsáveis pela exaustão dos filtros de mangas foi de uma forma geral satisfatória e pode facilmente ser replicada em diversos tipos de acionamentos de outras máquinas industriais utilizando o mesmo princípio apresentado.

Durante a realização das atividades para colocar em desenvolvimento o projeto, pode-se destacar algumas dificuldades encontradas, dentre elas, o momento em que o país e o mundo se encontra durante a realização desse trabalho com a presença da pandemia causada pelo Covid-19 (*SARS-CoV-2*) dificultou a liberação para a aquisição dos equipamentos e materiais necessários para realizar alguns projetos com foco em eficiência energética, além disso, o tempo de duração do estágio na empresa dificultou a realização de outras intervenções sugeridas pelo aluno.

Contudo, o desenvolvimento desse trabalho permitiu ao aluno desenvolver habilidades em diversas áreas da engenharia, entre elas, instalações elétricas industriais, gerenciamento de energia, máquinas elétricas, técnicas de medição, sistemas elétricos, engenharia econômica, entre outras.

Com o pensamento em trabalhos futuros, pode-se apontar: Realização de mais projetos com foco em equipamentos de pequeno porte, mas, que exista em grande quantidade em ambientes industriais, como por exemplo os condicionadores de ar, uma melhor automação desses equipamentos com a utilização de sensores pode causar um bom impacto econômico e ambiental.

REFERÊNCIAS

HADDAD, J. et al., Conservação de Energia: Eficiência energética de Instalações e Equipamentos, ELETROBRAS/PROCEL, Editora da UNIFEI; Itajubá, MG, 3a Edição, - 2006.

HADDAD, J. et al.; Eficiência energética: Integrando Usos e Reduzindo Desperdícios, ANEEL; ANP; MCT e PNUD, Editora Designum; Rio de Janeiro, 1a Edição, - RJ, 1999.

COPEL, **Manual de Eficiência Energética na Indústria**. Disponível em: <https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/964/1/MONOGRAFIA_Efici%C3%AanciaEnerg%C3%A9ticaAplicada..pdf>. Acessado em: 27/03/2020.

EPE, **Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt>>. Acessado em: 27/03/2020.

INMETRO, **Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial**. Disponível em: <<https://www4.inmetro.gov.br/>>. Acessado em: 27/03/2020.

MOURA. **Arquivos Internos da Empresa Unidade 04**. 2020.

SISTEMA FILTRO DE MANGAS. Disponível em: <<https://www.apoioprojetos.com.br/filtros-de-manga/>>. Acessado em: 22/09/ 2020.

RESULTADOS PROCEL DO ANO 2020 – ANO BASE 2019. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2020/>> Acessado em: 23/11/2020.

FUNCIONAMENTO DO FILTRO DE MANGAS. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/91727/000742775.pdf?sequence=1&isAllowed=y#:~:text=Em%20um%20filtro%20de%20mangas,do%20elemento%20filtrante%2C%20as%20mangas.&text=A%20velocidade%20de%20filtra%C3%A7%C3%A3o%20deste,na%20vida%20%C3%BAtil%20das%20mangas.>> Acessado em: 24/11/2020.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. Disponível em: <<https://www.cubienergia.com/eficiencia-energetica/>> Acessado em: 25/01/2021.

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. Disponível em: <<https://www.naturgy.com.br/br/conhecamos/eficiencia+energetica/o+que+e+/1297250116249/a+importancia+da+eficiencia.html#:~:text=A%20efici%C3%Aancia%20energ%C3%A9tica%20%C3%A9%20a,frio%20e%20comodidade%20em%20geral.&text=A%20efici%C3%Aancia%20energ%C3%A9tica%20%C3%A9%20fundamental%20para%20conseguir%20um%20mundo%20sustent%C3%A1vel.>> Acessado em: 25/01/2021.

