



EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Yasmin Delbany Cury*¹, Sérgio Ferreira de Paula Silva¹

¹Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT

Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Resumo - A Eficiência Energética é um tema cada vez mais necessário em todos os setores produtivos, principalmente nas indústrias, as quais representam a maior parte do consumo de energia mundial. A temática se trata da implementação de ações em prol da conservação de energia elétrica e dos recursos dispendidos para gerá-la, focando em utilizar uma menor quantidade de energia para uma mesma (ou maior) quantia de produção. Neste trabalho, serão investigadas oportunidades de melhorar a eficiência no uso da energia elétrica em uma planta industrial do ramo alimentício por meio da análise da operação de motores elétricos aplicados em bombas, ventiladores, exaustores e compressores de ar, focando em como se podem reduzir custos de operação e emissões de gases do efeito estufa.

Palavras-Chave - eficiência energética; energia elétrica; motores elétricos; redução no consumo.

ENERGY EFFICIENCY IN FOOD INDUSTRY

Abstract - Energy Efficiency is an increasingly necessary topic in all productive sectors, especially in industries, which represent most of the world's energy consumption. The theme concerns the implementation of actions in favor of the conservation of electric energy and the resources spent to generate it, focusing on using a smaller amount of energy for the same (or larger) amount of production. In this work, opportunities to improve the efficiency in the use of electric energy in an industrial plant in the food sector will be investigated through the analysis of the operation of electric motors applied in pumps, fans, exhausters and air compressors, focusing on how operation costs and greenhouse gas emissions can be reduced.

Keywords - energy efficiency; electrical energy; electrical motors; consumption reduction.

I. INTRODUÇÃO

As indústrias são os principais consumidores de eletricidade tanto no Brasil como no mundo [1], devido à

grande quantidade de equipamentos elétricos e de sistemas motrizes utilizados em seus processos produtivos. Os motores elétricos, essenciais nas plantas industriais de qualquer ramo, correspondem a cerca de 70% do consumo de energia elétrica no Brasil [2]. Porém, muitas vezes, estas máquinas perdem muita energia desnecessariamente em sua operação, ora por serem superdimensionados para a carga em questão, ora pelo tipo de acionamento inadequado [2]. Assim, grande parte das ações em prol da eficiência energética em indústrias gira em torno destes equipamentos.

Dessa maneira, o foco deste trabalho será a análise da operação de motores industriais, com dados coletados em campo de uma planta alimentícia na cidade de Uberlândia/MG. O objetivo é, a partir das informações levantadas, observar como se encontra a situação das máquinas em termos de rendimento, fator de potência e qual a porcentagem da potência entregue ao eixo com relação à nominal (carregamento).

Isto será feito a partir de medições de corrente elétrica que circulam nas fases dos motores no momento da medição e, em seguida, analisando como estas máquinas se comportam submetidas a tais circunstâncias de carga. Em seguida, serão analisadas possibilidades de desenvolver projetos para tornar sua operação mais eficiente, ou seja, com menos perdas e um rendimento melhor. Dentre estas iniciativas, estão a troca dos motores e inserção de acionamento por inversor de frequência.

Com os dados das análises em mãos, serão calculados os consumos energéticos atuais e os planejados (após a implementação das iniciativas identificadas) e, assim, será calculado o potencial de energia a ser economizada. Dessa forma, é possível obter o montante financeiro que poderá ser poupado pela empresa e, conseqüentemente, o tempo de retorno para o investimento nas iniciativas. A partir da quantidade de energia que será economizada, também pode-se obter a quantidade de emissões de dióxido de carbono que deixará de ser emitida na atmosfera, por meio do fator de conversão de kg.CO₂/kWh referente ao Brasil disponibilizado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia.

Assim, espera-se que, com este presente estudo, possam ser identificadas boas oportunidades de economia de energia e, conseqüentemente, possibilidade de redução de custos com eletricidade. Além disso, com a implementação das iniciativas poderá ser obtida uma redução nas emissões de gases do efeito estufa e, assim, contribuir para uma produção industrial mais sustentável.

II. LEVANTAMENTO DE DADOS

Nesta seção serão apresentados os dados coletados em campo de uma indústria alimentícia na cidade de Uberlândia/MG. Em seguida, nas próximas seções, serão feitos cálculos e análises referentes à eficiência energética utilizando estas informações.

Foram coletados dados de 2 motores elétricos em operação na fábrica, que podem ser observados na Tabela 1. O motor 2 possui 2 configurações ao longo de um dia, sendo 12 horas com válvula de estrangulamento 70% aberta e 12 horas com válvula de estrangulamento 40% aberta. Assim, foram coletadas correntes para as duas condições de operação e, para fins visuais, a nomenclatura “Motor 2” foi abreviada para “M2”.

Tabela 1: Dados dos motores elétricos em análise.

TAG	Potência (cv)	Polos	I operação (A)	Ano
Motor 1	150	6	122,15	1999
M2 – 70%	150	4	120,43	2001
M2 – 40%	150	4	98,76	2001

Fonte: Autora.

Será considerado que os motores operam em um ciclo de 8400 horas anuais, a frequência de operação admitida é 60Hz e a tensão de operação para todos os motores é 440V.

Nas imagens 1 e 2 é possível verificar as curvas de rendimento dos motores escolhidos. Os pontos e linhas em vermelho correspondem aos pontos de operação baseados na corrente medida.

A bomba do motor 2 é do modelo KSB 150-315 com 332 mm de diâmetro. Na figura 5 é possível observar as curvas de rendimento das bombas.

III. ANÁLISE DE OPORTUNIDADES

O motor 1 possui mais de 20 anos de fabricação, logo, a primeira opção a ser considerada é a troca deste por um modelo mais novo e eficiente. Porém, também serão feitos cálculos de viabilidade para troca do tipo de correias (de lisas para dentadas).

Para o motor 2, utilizado em uma bomba, a oportunidade considerada para melhoria na eficiência será o acionamento via inversor de frequência, pois este atualmente está sendo acionado com Partida Suave (Soft Starter) com 70% de abertura da válvula de estrangulamento.

1. Cálculo do consumo atual

A energia consumida anualmente (em kWh) pelos motores será dada pela multiplicação entre a potência nominal do motor em cavalos, o carregamento do motor, as horas de operação e o fator de conversão 0,746 dividida pelo rendimento, conforme equação (1) abaixo [18]:

$$CM = \frac{PM(cv) * 0,746 * Carregamento * Horas}{\eta_{motor}} \quad (1)$$

A energia consumida pelas bombas será de [18]:

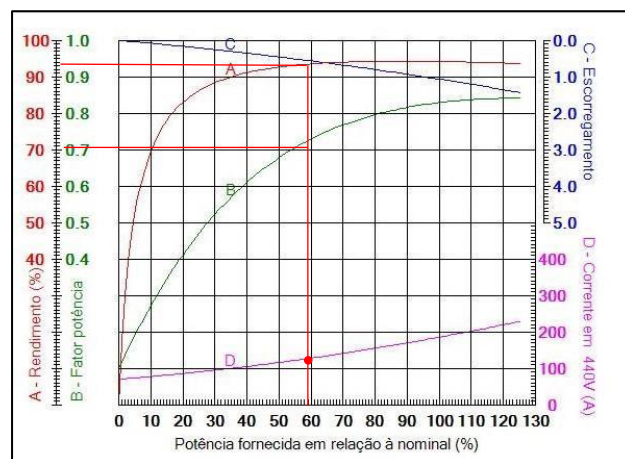
$$CB = \frac{Q * H * 2,725 * Horas}{\eta_{bomba}} \quad (2)$$

1.1. Motor 1

Analisando a curva de rendimento do Motor 1 disponível na Figura 1, com a corrente de operação de 122,7A, obtemos que ele está operando com um rendimento de 93%, um fator de potência de 0,71 e um carregamento de 56%. Logo, o consumo anual do Motor 1 será dado por:

$$CM = \frac{150 * 0,746 * 0,56 * 8400}{0,93} = 565.998kWh /ano$$

Figura 1 - Curva de Rendimento do motor 1.



Fonte: WEG Seleção de Motores [6]

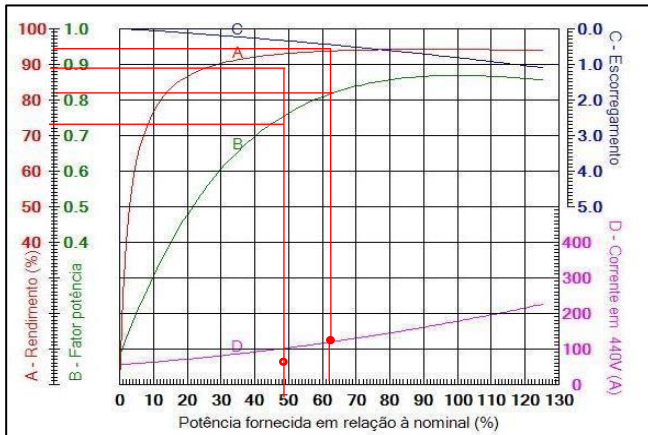
1.2. Motor 2

Inicialmente, será analisada a condição operacional para 70% de abertura da válvula de estrangulamento. Conforme as curvas do Motor 2 disponível na Figura 2, com uma corrente de, aproximadamente, 120A, obtém-se um carregamento de 62% (93cv). Utilizando-se tal potência no eixo, pela Figura 3

(contendo as curvas da bomba), obtém-se uma pressão de, aproximadamente, 48mca e uma vazão de 430m³/h. Assim, o rendimento observado na bomba é de 84%. De acordo com a Figura 2, o rendimento do motor 2 para esta condição de operação é de cerca de 94%. Logo, a primeira metade do consumo anual do Motor 2 será:

$$CM^{270} = \frac{430 * 48 * 2,725 * 4200}{0,84 * 0,94} = 299.170kWh /ano$$

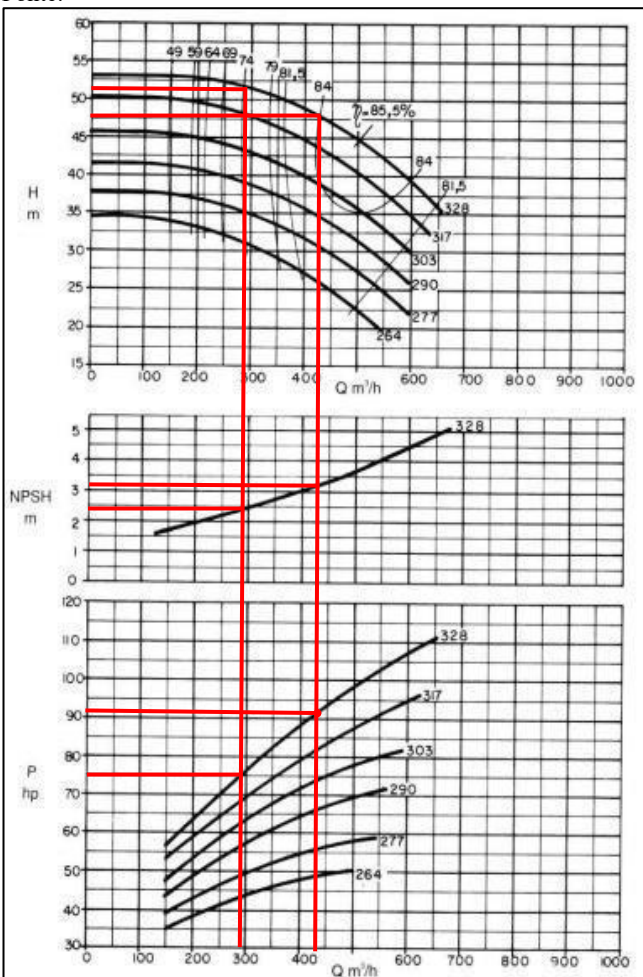
Figura 2 - Curva de rendimento do motor 2.



Fonte: WEG Seleção de Motores [6]

Figura 3 – Curva de rendimento para bomba do motor 2.

Fonte:



Catálogo de Bombas KSB [7].

Em seguida, será analisado o segundo caso (condição operacional para 70% de abertura da válvula de estrangulamento). Conforme as curvas do Motor 2 disponível na Figura 2, com uma corrente de, aproximadamente, 100A, obtém-se um carregamento próximo de 50% (75hp). Com tal potência no eixo, pela Figura 3, obtém-se uma pressão de cerca de 51,5mca e uma vazão de 295m³/h. Assim, o rendimento

observado na bomba é próximo de 74%. De acordo com a Figura 3, o rendimento do motor 2 para esta condição é de cerca de 93%. Logo, o consumo anual do Motor 2 para este caso será:

$$CM^{240} = \frac{295 * 51,5 * 2,725 * 4200}{0,74 * 0,93} = 252.656kWh /ano$$

2. Cálculo do consumo planejado

2.1. Motor 1

Para a troca do motor 1 por um modelo mais moderno, seria necessário adquirir um motor de 100cv (para o motor 1, visto que seu carregamento está em 56% = 84cv). A Figura 4 contém a curva de rendimento do novo motor de 100cv, 6

polos, WEG W22 Super Premium. Nota-se que o novo ponto a ser marcado na Figura 4 corresponderá a um carregamento de:

$$C^1 = 0,56 * \frac{150}{100} = 84\%$$

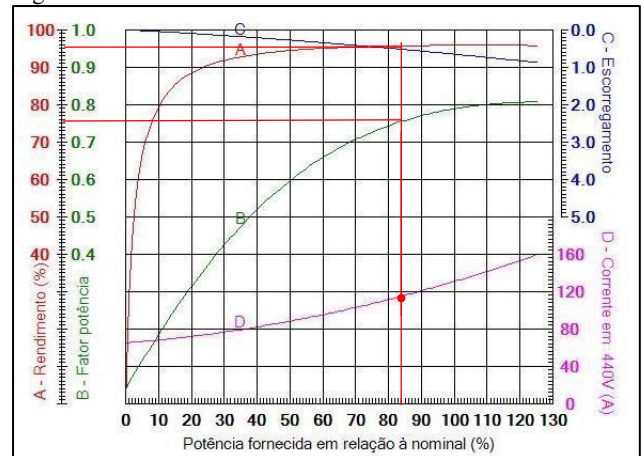
Com tal carregamento, de acordo com o gráfico, a corrente do novo motor será de aproximadamente 112A, rendimento de 95% e um fator de potência de 0,75. Considerando a troca das correias lisas por dentadas, há um acréscimo de 2% na eficiência. Assim, temos um consumo anual de:

$$CM^{1100} = \frac{100 * 0,746 * 0,84 * 8400}{0,95 * 1,02} = 543.219kWh /ano$$

A economia anual deste motor será de:

$$\Delta CM_1 = 565.998 - 543.219 = 22.779kWh/ano$$

Figura 4 – Curva de rendimento do motor 1 – 100cv.



Fonte: WEG _ Seleção de Motores [6].

2.2. Motor 2

Para o motor 2, será analisada a possibilidade de implementação de acionamento via inversor de frequência. Para isso, o primeiro passo será construir as curvas de rendimento para variação de velocidade [18], com base nas

curvas da bomba na figura 3. As novas curvas de rendimento para utilização do inversor foram construídas com base nas leis de afinidade entre vazão, pressão e rotação, conforme observadas abaixo:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{N}{N_1} \quad (3)$$

$$\frac{H}{H_1} = \frac{N^2}{N_1^2} \quad (4)$$

$$\frac{P}{P_1} = \frac{N^3}{N_1^3} \quad (5)$$

Para definição das curvas de rendimento para variação de velocidade, serão utilizados pontos homólogos, ou seja, pontos que possuem a mesma relação da equação (4), porém, aplicada para a vazão Q, visto que, a partir da equação (3), a vazão Q e a rotação N são diretamente proporcionais. Assim, temos que, para os pontos homólogos:

$$H = \alpha Q^2 \quad (6)$$

A partir da imagem 3, foram identificados os pontos de H/Q para cada valor de rendimento, conforme se pode observar na tabela 2. O valor de α foi obtido para cada rendimento por meio da equação (6).

Tabela 2: Pontos H/Q para bomba do motor 2.

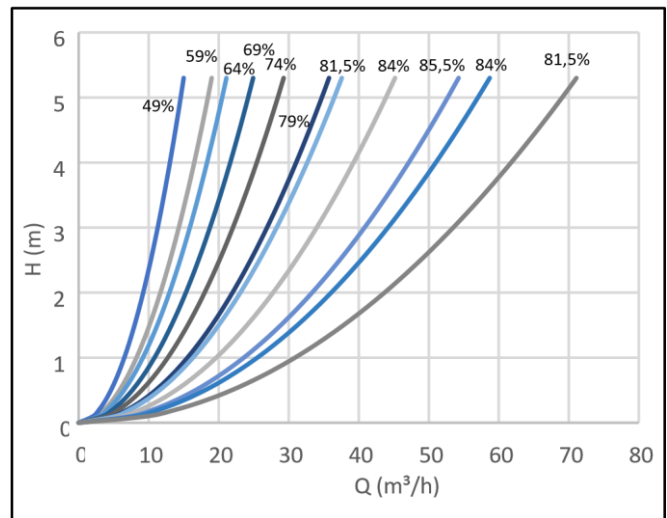
Rendimento	Q	H	α
49	150	53	0,002356
59	190	53	0,001468
64	210	52,5	0,00119
69	248	52,5	0,000854
74	290	52	0,000618
79	349	50,5	0,000415
81,5	365	50	0,000375
84	430	48	0,00026
85,5	500	45	0,00018
84	510	40	0,000154
81,5	590	36,5	0,000105

Fonte: Autora.

A partir destes pontos e dos valores de α , pôde-se obter as curvas de isorrendimento, aplicando a equação (6).

Assim, com tais pontos em mãos, pode-se desenhar computacionalmente as curvas de isorrendimento para variação de velocidade dos dois motores, a saber:

Figura 5 – Curva de rendimento para variação de velocidade do Motor 2.



Fonte: Autora.

Para realizar a análise completa de quanto será a economia ao se utilizar o inversor de frequência, é necessário obter a curva do sistema [5], que traduz a energia inicial necessária para começar a haver um fluxo de fluidos naquele sistema. Porém, é uma curva que depende de diversas informações referentes a diferentes equipamentos que compõem todo o sistema hidráulico. Assim, neste trabalho serão feitas estimativas para esta curva. Em um primeiro caso, será considerada como operação nominal a condição para válvula de estrangulamento 70% aberta. Logo, a curva estimada do sistema cruzará a curva da bomba neste ponto de operação.

A curva do sistema seguirá a equação (6), porém possuirá um ponto de partida H_0 onde a vazão Q é nula. Assim, teremos como equação base a equação (8) [18]:

$$H = H_0 + \alpha Q^2 \quad (7)$$

Foi estimado um valor $H_0 = 20m$. A fim de encontrar o valor de α , consideraremos o ponto de operação para 70% (M2 – 430m³/h; 48mca) como um ponto que pertence à curva.

Assim, temos:

$$48 = 20 + \alpha(430)^2$$

$$\alpha = 0,000151433$$

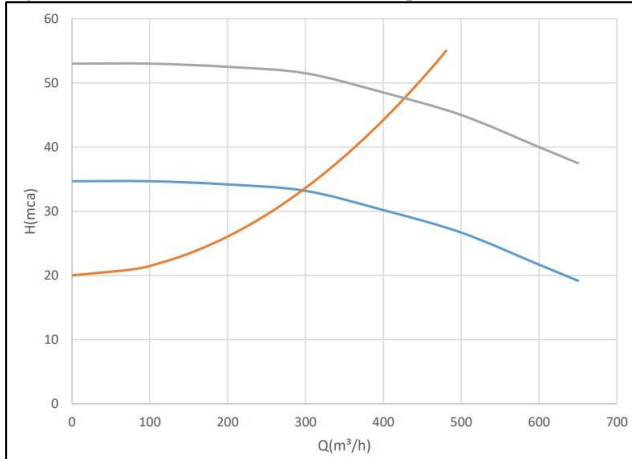
Para reconstrução da curva da bomba foram observados os pontos das curvas da figura 3. Utilizando o valor de α encontrado, pôde-se obter a curva estimada do sistema para $H_0 = 20m$. Os cálculos foram feitos utilizando a equação (7), calculando diferentes valores de vazão para diferentes valores de H. O próximo passo é adicionar os pontos da segunda condição de operação, ou seja, com válvula 40% aberta. O ponto encontrado foi (295m³/h, 51,5mca). É necessário encontrar a altura H_2 na qual a curva do sistema passa por este valor de vazão. Assim, será utilizada a equação (7):

$$H_2 = 20 + (0,000151433) * (295)^2 = 33,178mca$$

Com este ponto em mãos, deve-se traçar a nova curva da bomba, com mesma característica da anterior observada na figura 3, porém deslocadas para baixo no eixo Y. O desnível será de $51,5 - 33,178 = 18,322$ mca.

O gráfico com as duas curvas da bomba e a curva do sistema foi construído via ferramenta computacional e pode ser observado na figura 6.

Figura 6 – Curvas da bomba e do sistema para $H_0 = 20m$.



Fonte: Autora.

Com este novo ponto que cruza a curva do sistema, pode-se calcular o novo consumo esperado para a situação estimada. O próximo passo é encontrar o rendimento da bomba nas curvas de isorrendimento plotadas na figura 5, utilizando os novos valores de H para a mesma vazão Q anterior.

Analisando os pontos da figura 5, obtemos 81,5% de rendimento para a curva do sistema com $H_0 = 20mca$ ($295m^3/h$; $33,18mca$). É possível, então, calcular o novo consumo para a configuração de 40% de válvula aberta, aplicando os novos dados encontrados na equação (2):

$$PB^{220} = \frac{295 * 33,18 * 2,725}{0,815} = 32,73 \text{ kW}$$

Nota-se que o carregamento do motor, neste caso, será de:

$$C\%_{0M}^{220} = \frac{32,73}{150 * 0,746} = 29,25\%$$

Assim, de acordo com a figura 2, com tal carregamento o motor possuirá um rendimento de 90%. O inversor possui rendimento igual a 97%. Assim, o consumo de energia elétrica final C_{M220} , para a configuração de 40% de válvula aberta será de:

$$C_M^{220} = \frac{32,73 * 4200}{0,9 * 0,97} = 157.464 \text{ kWh/ano}$$

A economia final para este motor será de:

$$\Delta CM_2 = 252.656 - 157.464 = 95.192 \text{ kWh/ano}$$

IV. ANÁLISE ECONÔMICA

O total de economia energética analisado para as duas iniciativas foi de 117.971 kWh/ano .

O motor para substituição do motor 1 foi cotado com a empresa WEG[6]. O preço para sua aquisição é de R\$47.700,00 e sua ficha técnica pode ser encontrada na referência [8]. O custo para a correia em V dentada será de cerca de R\$1.000,00 [9]. O inversor para o motor 2 foi cotado com o fabricante ABB, e o preço para sua aquisição 2 é cerca de R\$73.201,16. A ficha técnica do inversor pode ser encontrada no site do fabricante [10].

A fim de se calcular o tempo de retorno dos investimentos, é necessário encontrar a economia financeira representada pelas economias energéticas identificadas anteriormente. Para isto, é necessário obter o custo do kWh de energia elétrica para aquela indústria. Assim, foi utilizada uma média dos últimos 12 meses para encontrar este custo, e o valor que será utilizado neste trabalho será de R\$0,45/kWh.

$$E = (117.971) * 0,45 = 53.086,95 \text{ R\$/ano}$$

Com a economia anual, é possível calcular o tempo de retorno do investimento citado. Será utilizada a seguinte equação (8) para este cálculo [4]:

$$t_r = \frac{\log\left(\frac{ECO_{R\$}}{ECO_{R\$} - \Delta C * i}\right)}{\log(1 + i)} \quad (8)$$

Sendo i a taxa de juros anual, $ECO_{R\$}$ a economia encontrada em reais, ΔC o custo de implementação e t_r o tempo de retorno. A taxa de juros anual considerada neste estudo será de 13%.

Assim, temos:

$$t_r = \frac{\log\left(\frac{53.086,95}{53.086,95 - 121.901,16 * 0,13}\right)}{\log(1 + 0,13)} = 2,9 \text{ anos}$$

Nota-se que, com a situação atual de alta taxa de juros e preços elevados dos equipamentos, tem-se um tempo de retorno não muito baixo de 2,9 anos. Porém, considerando que uma indústria opera por elevados períodos de tempo, este tempo de retorno para o investimento está razoável e leva à conclusão de que é viável implementar as iniciativas.

V. ANÁLISE AMBIENTAL

A fim de calcular a redução nas emissões devido à economia de consumo energético, é necessário o fator de conversão de energia elétrica em emissões de dióxido de carbono. Este fator é publicado anualmente pelo Ministério da Ciência e Tecnologia [11]. A média dos últimos 5 anos informada foi de $0,09 \text{ kg.CO}_2/\text{kWh}$.

As reduções nas emissões foram calculadas multiplicando a economia energética encontrada em kWh pelo fator 0,09, em kg, e depois o valor encontrado foi transformado para toneladas. A economia energética encontrada foi de 117.971kWh/ano. Assim, temos um total de 10.617,39kgCO₂ reduzidos, ou 10,62 tonCO₂.

VI. CONCLUSÕES

Nas seções anteriores foi possível calcular o potencial de economia dos equipamentos analisados, bem como verificar os ganhos financeiros que a implementação destas iniciativas geraria para a empresa. Além disso, também foi calculado o valor da redução de emissões de dióxido de carbono que seria gerada por tal redução no consumo.

De acordo com os cálculos realizados no item 3.1, o total de consumo atual por estes equipamentos é de cerca de 1.117MWh. Logo, a economia calculada corresponderia a, aproximadamente, 10,55% da quantidade de energia consumida atualmente, o que representa uma parcela significativa de seu consumo e, também, dos custos da empresa com sua operação.

As economias calculadas possibilitariam uma redução de cerca de 10 toneladas de dióxido de carbono emitidas anualmente. Este valor pode não ser expressivo quando se refere a uma indústria de grande porte, porém, a análise foi feita apenas para 2 motores elétricos. Um estudo semelhante e mais abrangente pode ser realizado na fábrica, no qual podem ser encontradas muitas oportunidades de economia energética e redução de emissões.

Para cálculo da iniciativa referente ao motor 2, foram feitas estimativas para a curva do sistema, visto que não foi possível obter os dados exatos necessários para sua construção. O carregamento final do motor ficou em cerca de 30%, o que não é adequado para o funcionamento de um motor elétrico, visto que, com um carregamento muito abaixo do nominal, o fator de potência e o rendimento do motor têm seus valores também reduzidos. Este fato pode trazer muitos malefícios para o funcionamento da máquina e, inclusive, aumentar os custos com operação e manutenção, podendo suprimir os ganhos encontrados no estudo. Assim, sugere-se que, além do estudo para inserção do inversor de frequência, futuramente seja realizado um estudo para a troca deste motor, visto que em condições nominais (70% de abertura da válvula de estrangulamento) ele se encontra com cerca de 65% de carregamento.

Com a realização deste estudo, foi possível observar que, com iniciativas pouco complexas e relativamente de baixo custo, indústrias e empresas de grande ou pequeno porte podem melhorar seus resultados em termos de metas de redução de consumo e, conseqüentemente, de custos.

O presente estudo pode ser usado como modelo para uma análise ainda mais abrangente na indústria alimentícia em questão, podendo englobar mais áreas produtivas e um maior número de equipamentos e motores elétricos.

REFERÊNCIAS

- [1] PROCEL/ELETOBRÁS. **Eficiência Energética – Fundamentos e Aplicações**. 1ªed. Elektro, Universidade Federal de Itajubá, FUPAI, Excen, 2012. Disponível em: https://www.voltimum.com.br/sites/www.voltimum.com.br/files/pdflibrary/01_livro_eficiencia_energetica.pdf. Acesso em 09 jun. 2022.
- [2] PROCEL/ELETOBRÁS. **Motor elétrico: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B33595D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BDA6A7397-67A7-4BCA-893FF6F433A41E02%7D;&UIPartUID=%7B057349356950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun, 2022
- [3] PROCEL/ELETOBRÁS. **Análise econômica de investimento: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B33595D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B8AFBBF99-CEB0-4DA1-91352779A59473D9%7D;&UIPartUID=%7B057349356950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun. 2022.
- [4] FILHO, João Mamede. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. LTC, 2017. [5] SILVA, Sérgio Ferreira de Paula. Anotações de Aula – Eficiência Energética. Universidade Federal de Uberlândia.
- [6] WEG – Seleção de Motores. Disponível em: https://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_motor_dat_web.asp
- [7] CATÁLOGO DE BOMBAS KSB. Disponível em: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/daniel/downloads/materia/graduacao/it%20503/mc_a2740_42_44_4p_e_s_5%5b1%5d.pdf
- [8] WEG, **Seleção de Produtos**. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/MotoresEI%3%A9tricos/Trif%3%A1sico---BaixaTens%3%A3o/UsosGerais/W22/W22-/W22-IR3-Premium100-cv-6P-280S-M-3F-220-380-440-V-60-Hz-IC411--TFVE---B14D/p/12219882>
- [9] Correia dentada industrial para motor 3. Disponível em: <https://bit.ly/3bNFhi3>
- [10] Inversor ABB 150cv – Disponível em: <https://loja.br.abb.com/inversor-de-frequenciatrifasico150cv-110kw-380-440v-206a-acs580-01-206a-4-b056.html#>
- [11] BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhamentocti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-deemissao>