

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

YASMIN DELBANY CURY

Eficiência Energética em Indústria Alimentícia

Uberlândia

2022

YASMIN DELBANY CURY

Eficiência Energética em Indústria Alimentícia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eficiência Energética

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Ferreira de Paula Silva

Uberlândia

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

C982 Cury, Yasmin Delbany, 2001-
2022 Eficiência Energética em Indústria Alimentícia
[recurso eletrônico] / Yasmin Delbany Cury. - 2022.

Orientador: Sérgio Ferreira de Paula Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Elétrica.

Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica. I. Silva, Sérgio Ferreira de
Paula ,1973-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

CDU: 621.3

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

YASMIN DELBANY CURY

Eficiência Energética em Indústria Alimentícia

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Eficiência Energética

Uberlândia, 19 de agosto de 2022.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sérgio Ferreira de Paula Silva (UFU)

Prof. Dr. Ivan Nunes Santos (UFU)

Prof. Dr. Paulo Henrique Oliveira Rezende (UFU)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família pelo apoio e incentivo nesta jornada dentro da Universidade;

Agradeço ao Prof. Dr. Sérgio Ferreira de Paula, pela boa orientação e apoio na construção deste trabalho;

Agradeço aos professores Adélio José (in memoriam), Edgard Lamounier e a meus colegas petianos pelo convívio no Programa de Educação Tutorial, onde pude aprender e me desenvolver durante a graduação;

Agradeço ao prof. Dr. Ivan Nunes Santos por todo o apoio e auxílio durante minha Iniciação Científica;

Agradeço a meus colegas de estágio pela ajuda e incentivo;

Agradeço, também, a meus amigos da Turma 95, pelo companheirismo e união que deram forças para não desistir.

“Se você quiser alguém em quem confiar, confie em si mesmo.” – Renato Russo

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) quantidade de produção. Tais iniciativas contribuem muito para reduzir custos das empresas, além de diminuir o impacto que estas causam no meio ambiente, sendo assim um tema muito atraente quando se trata de atingir metas corporativas em termos de sustentabilidade e gastos empresariais. 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. Esta análise faz uso de dados técnicos coletados em campo, cálculos de potencial de redução no consumo de energia por parte dos equipamentos, cálculos de tempo de retorno do investimento e cálculos de potencial de redução na emissão de gases poluentes. O resultado esperado foi obtido, pois foi possível observar que vários equipamentos poderiam estar operando de maneira mais eficiente, de modo a trazer ganhos para a empresa. Conclui-se, portanto, que estudos em Eficiência Energética são benéficos em todas as áreas de utilização da energia e devem ser adotados como parte essencial do controle de produção industrial.

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

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. Such initiatives contribute a lot to reduce companies' costs, in addition to reducing their impact on the environment, thus being a very attractive topic when it comes to achieving corporate goals in terms of sustainability and business expenses. 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. This analysis makes use of technical data collected in the field, calculations of potential reduction in energy consumption by the equipments, calculations of payback time and calculations of potential reduction in the emission of polluting gases. The expected result was obtained, as it was possible to observe that several equipments could be operating more efficiently, in order to bring gains to the company. It is concluded, therefore, that studies in Energy Efficiency are beneficial in all areas of energy use and should be adopted as an essential part of industrial production control.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Matriz Energética Brasileira de 2000 a 2020.....	16
Figura 2 -	Matriz Elétrica Brasileira 2021.....	16
Figura 3 -	Modelo de Selo PROCEL.....	19
Figura 4 -	Modelo de Etiqueta PBE.....	19
Figura 5 -	Curva de Rendimento de Motor WEG.....	21
Figura 6 -	Mecanismo de transporte por correia em V.....	21
Figura 7 -	Mecanismo de transporte por correia dentada.....	22
Figura 8 -	Esquema de acionamento por SoftStarter.....	23
Figura 9 -	Diagrama de Blocos de um Inversor de Frequência.....	24
Figura 10 -	Circuito Simplificado de um inversor de frequência.....	24
Figura 11 -	Rotor de bomba centrífuga radial.....	25
Figura 12 -	Exemplo de determinação da economia energética por meio das curvas da bomba e do sistema.....	26
Figura 13 -	Curva de rendimento do Motor 1.....	29
Figura 14 -	Curva de rendimento do Motor 2 com marcações para operação em 70% de válvula aberta.....	30
Figura 15 -	Curva de rendimento do Motor 2 com marcações para operação em 40% de válvula aberta.....	31
Figura 16 -	Curva de rendimento para a bomba do motor 2 (80-315 1750rpm)	32
Figura 17 -	Curva de rendimento do Motor 3.....	33
Figura 18 -	Curva de rendimento do Motor 4 com marcações para operação em 60% de válvula aberta.....	34
Figura 19 -	Curva de rendimento do Motor 4 com marcações para operação em 40% de válvula aberta.....	35
Figura 20 -	Curva de rendimento para bomba do motor 4 (150-315 1750rpm).	36
Figura 21 -	Curva de rendimento do novo motor de 100cv escolhido.....	38
Figura 22 -	Curva de rendimento para variação de velocidade para o Motor 2.	41
Figura 23 -	Curva de rendimento para variação de velocidade para o Motor 4.	41
Figura 24 -	Curva do Sistema e curva da bomba para o motor 2.....	43
Figura 25 -	Curva do Sistema e curva da bomba para o motor 4.....	43
Figura 26 -	Curvas da bomba e do sistema para H0=5mca. Motor 2.....	45

Figura 27 -	Curvas da bomba e do sistema para $H_0=10\text{mca}$. Motor 2.....	45
Figura 28 -	Curvas da bomba e do sistema para $H_0=20\text{mca}$. Motor 2.....	46
Figura 29 -	Curvas da bomba e do sistema para $H_0=5\text{mca}$. Motor 4.....	46
Figura 30 -	Curvas da bomba e do sistema para $H_0=10\text{mca}$. Motor 4.....	47
Figura 31 -	Curvas da bomba e do sistema para $H_0=20\text{mca}$. Motor 4.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Dados dos motores elétricos em análise.....	27
Tabela 2 -	Dados dos sistemas de iluminação.....	27
Tabela 3 -	Pontos H/Q para bomba do motor 2.....	40
Tabela 4 -	Pontos H/Q para bomba do motor 4.....	40
Tabela 5 -	Dados de economia energética e redução de emissões de CO2.....	58
Tabela 6 -	Resultados consolidados do trabalho.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
IBGE	Instituto Brasileira de Geografia e Estatística
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AMBIENTES INDUSTRIAIS.....	13
	2.1. CONCEITO DE ENERGIA.	14
	2.2. CONSERVAÇÃO DE ENERGIA.....	2414
	2.3. MATRIZES ENERGÉTICA E ELÉTRICA – BRASIL E MUNDO	2415
	2.4. PRINCÍPIOS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA.	2417
	2.5. PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL.....	2417
	2.6. ESPECIFICAÇÃO ADEQUADA DE MOTORES ELÉTRICOS	2420
	2.7. CORREIAS DE ACOPLAMENTO	2420
	2.8. ACIONAMENTO DE MOTORES	2420
	2.9. SISTEMAS DE BOMBEAMENTO	2420
3	ESTUDO DE CASO: LEVANTAMENTO DE DADOS.....	26
4	ANÁLISE DE OPORTUNIDADES	28
	4.1. DEFINIÇÃO DAS AÇÕES.....	28
	4.2. CÁLCULO DE CONSUMO ATUAL	28
	4.3. CÁLCULO DE CONSUMO PLANEJADO.....	37
5	ANÁLISE ECONÔMICA.....	51
	5.1. TOTAL DE ECONOMIA EM ENERGIA.....	2851
	5.2. TEMPO DE RETORNO DO INVESTIMENTO	2853
	5.3. REDUÇÃO EM EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA.....	37
	5.4. CONSOLIDAÇÃO DE RESULTADOS.....	28
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
7	REFERÊNCIAS	5861
8	APÊNDICE A – FICHA TÉCNICA DO MOTOR 1: SUBSTITUIÇÃO.....	5864

1 INTRODUÇÃO

Um processo eficiente pode ser definido como tal que se utiliza de uma quantidade ótima de recursos para a produção de determinados resultados, com o mínimo de perdas possível e sem desperdícios [1]. A eficiência é frequentemente buscada em corporações de diferentes ramos, seja industrial, comercial, tecnológico, entre outros. Ela pode servir como indicativo da relação custo e benefício das empresas, logo é um fator importante a ser medido, estudado e acompanhado com frequência.

Em termos de energia, recurso amplamente utilizado em praticamente todos os processos empresariais, seja ela elétrica, térmica, intelectual ou humana, práticas eficientes devem ser sempre almejadas e incentivadas pelos gerentes, a fim de que se forneça bons resultados utilizando-se da mínima quantidade de energia possível.

Se tratando da energia elétrica, é gasta todos os dias uma grande quantia de recursos naturais para produzi-la, além de todos os custos e materiais empregados na construção dos parques geradores [1]. Mesmo sendo o Brasil um país composto majoritariamente por geração de energia por fontes renováveis, ainda são utilizadas usinas termoelétricas que queimam combustíveis fósseis, e, nos outros países do mundo, a aderência às fontes renováveis não é tão amplamente existente como no território brasileiro. Os consumidores industriais, comerciais e residenciais têm expressiva parte de seus custos mensais tomada pelos gastos com eletricidade e, com os recursos cada vez mais escassos, o preço que pagam por esta energia está mais elevado com o passar do tempo. Dessa forma, estudos relacionados à eficiência energética se fazem cada dia mais necessários e importantes, tanto para o bem-estar econômico de empresas como para a preservação do meio ambiente e seus recursos.

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 [19]. 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 [6]. 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. Também, serão analisados dois circuitos de iluminação que operam nesta fábrica com lâmpadas

de vapor metálico. O objetivo é, a partir das informações levantadas, observar como se encontra a situação da máquina 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 estão circulando 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, troca de seu acoplamento e, também, inserção de acionamento por inversor de frequência.

Complementarmente, será verificada a operação de dois circuitos de iluminação compostos por lâmpadas de vapor de mercúrio presentes em duas instalações, e será analisada a possibilidade da troca das lâmpadas para modelos mais eficientes.

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.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

Anteriormente à abordagem da eficiência energética e suas aplicações, faz-se necessária uma introdução teórica aos fundamentos da energia e de sua conservação. Neste tópico, também serão abordados os principais recursos energéticos no Brasil e no mundo, além de como trabalhar com eficiência pode trazer benefícios para a economia e para o meio ambiente.

2.1. Conceito de Energia

Desde os primórdios da história humana, pessoas dependem de vários tipos de energia para manter suas civilizações em um estado mínimo de conforto, além de ser o principal recurso em que se baseiam as principais inovações e melhorias já construídas.

Nesse sentido, alguns filósofos e cientistas se dedicaram a caracterizar processos de transformação envolvendo forças, além do foco em entender padrões entre diferentes processos de transformação envolvendo, principalmente, a força gravitacional. Galileu Galilei foi um deles, o qual definiu o conceito de “ímpeto” [1], característica interna dos corpos que provou ser conservada por meio de diversos experimentos, descritos em sua obra “Duas novas ciências”. Depois de observar experimentos de colisão de corpos, o cientista Christian Huygens identificou um padrão na multiplicação da massa de um corpo pela sua velocidade, resultado que se conservava ao longo do processo. [13]

No século XXI, o conceito de energia mais utilizado é “a capacidade de realizar trabalho” [1]. Além disso, a potência representa a velocidade na qual esta energia é consumida ou transformada em trabalho. Existem diversos tipos de energia que podem ser convertidos entre si e/ou utilizados para processos industriais, comerciais ou naturais [1]. Nestes processos podem ocorrer muitas perdas, as quais podem ser evitadas (ou mitigadas) por meio de ações em prol da eficiência energética.

2.2. Conservação de Energia

A primeira Lei da Termodinâmica, proposta por Julius Mayer, enuncia que, em processos de transformação, a energia total do sistema sempre se conserva, ela não é criada e nem destruída [1]. Assim, a energia total equivale à soma do trabalho realizado e do calor gerado no processo.

Dessa forma, pode-se definir eficiência energética (η), uma grandeza que representa a razão entre a energia que foi útil para gerar trabalho e a energia total consumida em um sistema [1], assim como pode-se observar na equação a seguir:

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{total}}} = 1 - \frac{E_{\text{perdas}}}{E_{\text{total}}} \quad (1)$$

Quando são tomadas medidas para aumentar a eficiência energética de um sistema, o objetivo é tornar a parcela de energia útil cada vez mais próxima da energia total consumida, embora atingir os 100% não seja tecnicamente possível, haja vista que em todos os processos de transformação uma parcela da energia se transforma em energia térmica, segundo a segunda Lei da Termodinâmica [1].

Reduzir as perdas energéticas significa também reduzir gastos desnecessários de energia e dos recursos utilizados em sua geração, mostrados a seguir nas matrizes energética e elétrica, o que é uma das principais motivações que se têm atualmente para estudar o tema.

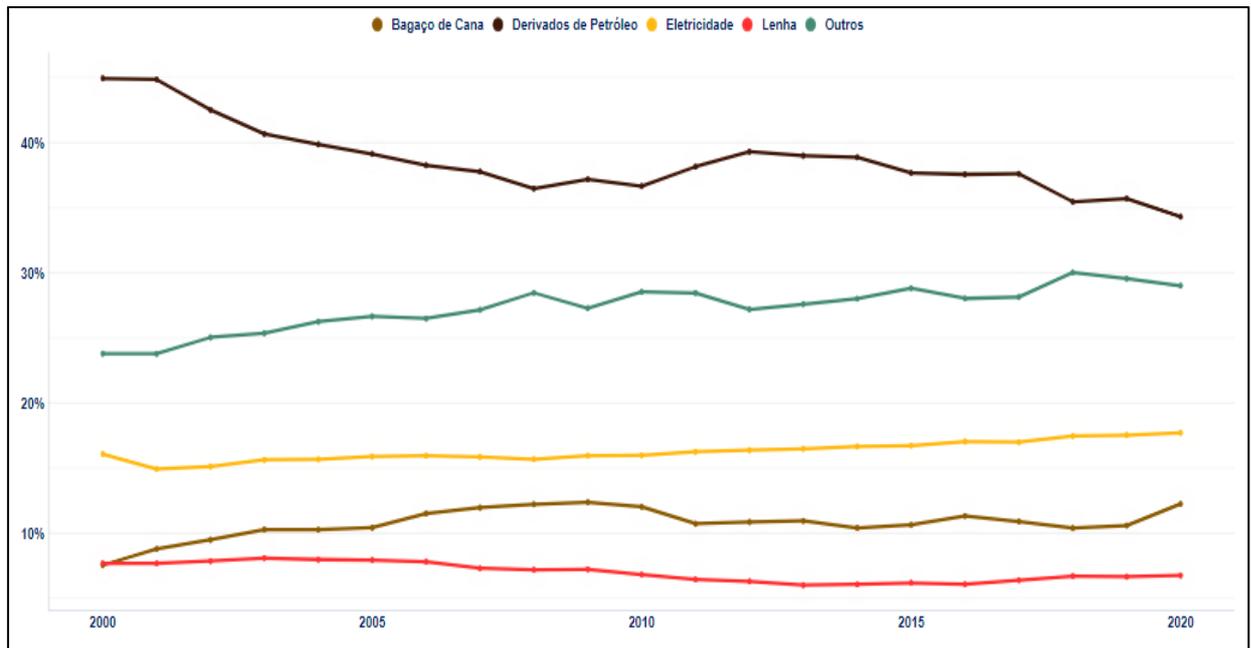
2.3. Matrizes energética e elétrica – Brasil e Mundo

A matriz energética mundial é composta principalmente de recursos não renováveis (também conhecidos como recursos fósseis), os quais possuem fontes finitas e, conseqüentemente, muito desejadas e caras, como por exemplo o petróleo e gás (principais responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa). De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética e a International Energy Agency (IEA) [14], o petróleo e seus derivados compõem mais de 30% da matriz energética mundial, enquanto carvão e gás representam 27% e 23%, respectivamente[15]. No Brasil, o cenário é um pouco diferente, devido ao fato de se utilizarem mais fontes renováveis como forma de energia. O petróleo compõe 31% de sua matriz energética, enquanto 19% são referentes a derivados da cana de açúcar e 13% são de recursos hidráulicos, conforme se pode observar no gráfico da Figura 1.

Diferentemente da matriz energética, a qual apresenta dados acerca da transformação de todos os tipos de energia (como energia cinética, energia térmica, energia química, entre outras), a matriz elétrica traz informações específicas sobre a geração de energia elétrica e a proporção de utilização dos diferentes recursos nestes processos [15].

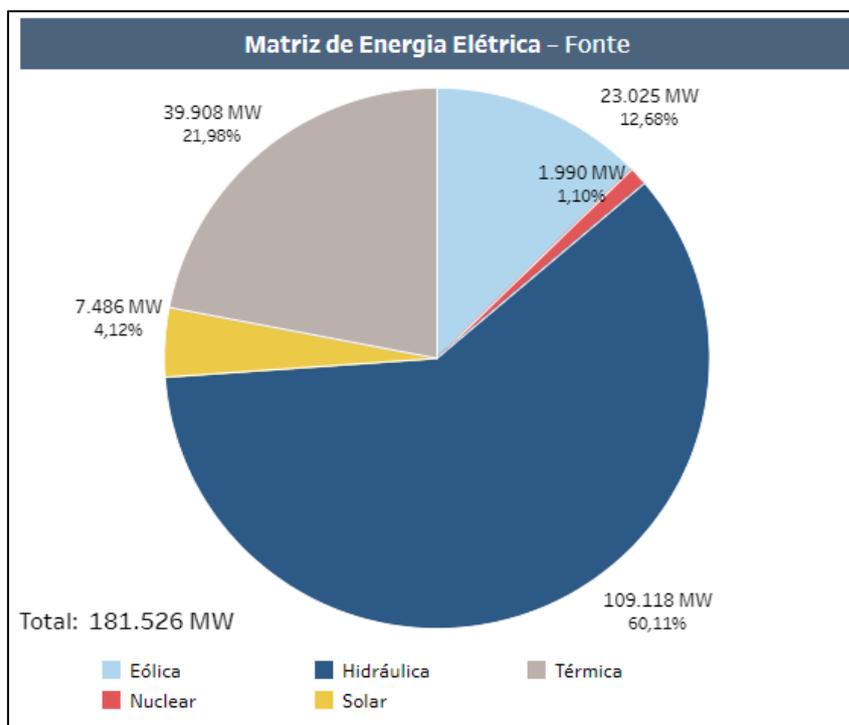
No Brasil, a matriz elétrica foi composta em 2021 em 53,4% de fontes hidráulicas, 12,8% de gás natural e 10,6% de eólica [15], o que representa uma matriz elétrica bem diferente e mais renovável que a mundial [15].

Figura 1 – Matriz Energética Brasileira de 2000 a 2020.



Fonte: Balanço Energético Nacional – EPE, 2022 [15].

Figura 2 – Matriz Elétrica Brasileira 2021.



Fonte: Balanço Energético Nacional – EPE, 2022 [15].

Utilizando-se de atitudes que promovam a eficiência energética, é possível reduzir o consumo de recursos fósseis e que emitem GHG, contribuindo para a conservação do meio ambiente e dos recursos naturais presentes no planeta.

2.4. Princípios de eficiência energética

A eficiência energética é um tema bastante útil, principalmente em sistemas motores utilizados em indústrias, mas também pode ser aplicada em menor escala a nível residencial e comercial. No último caso, as práticas mais comuns adotadas em prol da eficiência energética estão relacionadas à iluminação e ao uso de aparelhos eletrodomésticos mais eficientes (como chuveiro, freezers, geladeiras, ar condicionado e outros equipamentos altamente consumidores de energia). [1]

Já no âmbito industrial, existem oportunidades em motores elétricos aplicados em ventiladores, bombas, compressores de ar, sistemas de refrigeração e até transformadores. Com a especificação correta de motores e de equipamentos adjacentes (adequados às condições do ambiente e à respectiva carga) pode-se obter altos níveis de rendimento [6]. Também, é possível melhorar a eficiência de sistemas por meio de modificações em alguns aspectos da operação dos motores, como troca do tipo de correias e troca do sistema de acionamento [3]. É uma prática comum a implementação de controle de velocidade nos motores por meio de inversores de frequência, substituindo válvulas que realizam o controle retirando ou inserindo de perdas de carga no sistema [1]. Além disso, a realização de limpeza dos equipamentos é bastante importante para evitar perdas por atrito e ventilação. Iniciativas em iluminação também são realizadas, porém terão menor impacto do que as demais já citadas anteriormente, visto que o consumo das lâmpadas é muito inferior se comparado aos motores elétricos [1].

Atualmente, estão sendo desenvolvidos diversos programas de eficiência energética em indústrias de países como Estados Unidos (Indústrias do Futuro – Departamento de Energia (DOE)), Canadá (EcoEnergia para a Indústria - Office de l'Efficacité Energétique (OEE)), China (Programa de Eficiência Energética por Usos Finais - Comissão Nacional de Desenvolvimento e Reforma (NDRC)), Japão (Promoção de Projetos de Conservação de Energia – Centro de Conservação de Energia – (ECC)), França (Gestão da Demanda de Energia – Electricité de France (EDF)), entre outros. Tal fato evidencia que a preocupação com o tema está cada vez mais necessária e recorrente em países desenvolvidos e/ou emergentes.

2.5. Programas de eficiência energética no Brasil

O Brasil é um país com grande parte de sua matriz elétrica renovável, conforme discutido no item 1.3. Porém, ainda se utilizam recursos fósseis em

termelétricas eventualmente, em épocas de seca, o que se torna uma motivação para estudo do tema de Eficiência Energética [15]. Também, os consumidores pagam um preço elevado pela energia utilizada, sendo assim interessante que não seja desperdiçada.

Tendo tais fatos em vista, o Governo Brasileiro fomenta o tema por meio de instituições como Ministério de Minas e Energia – MME, Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Eletrobrás, PETROBRAS, entre outras. Os principais programas existentes neste ímpeto são o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Procel e o Programa brasileiro de Etiquetagem – PBE [1].

O Procel atua realizando investimentos em eficiência energética, além de fornecer uma classificação de equipamentos e um selo de qualidade próprio, conforme Figura 3, indicando se o dispositivo se encaixa nos padrões de eficiência definidos. Também, o Programa também fornece recomendações especializadas e simuladores para promover o uso eficiente da energia em construções civis e edificações residenciais e comerciais; proporciona treinamentos e manuais para auxiliar indústrias a se tornarem mais energeticamente eficientes; apoia prefeituras no dimensionamento e troca de equipamentos referentes à iluminação pública, entre outros.

Já o PBE também fornece etiquetas conforme Figura 4, porém possui uma escala de eficiência e informa em qual delas o equipamento ou edificação se encaixa, com base em testes laboratoriais [1]. É possível observar modelos das etiquetas nas figuras 3 e 4.

Neste trabalho, será desenvolvido um estudo sobre possíveis melhorias em eficiência energética em uma indústria do ramo alimentício. Assim, nos próximos tópicos serão detalhadas as principais oportunidades encontradas como forma de melhoria na eficiência em diversas plantas.

Figura 3 – Modelo de Selo Procel.



Fonte: Procel Info – Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, 2016 [1].

Figura 4 – Modelo de Etiqueta PBE.

<p>Energia (Elétrica)</p> <p>Fabricante Marca</p> <p>Tipo de degelo Modelo/tensão(V)</p>		<p>REFRIGERADOR → Indica o tipo de equipamento</p> <p>ABCDEF → Indica o nome do fabricante</p> <p>XYZ(Logo) → Indica a marca comercial ou logomarca</p> <p>ABC/Automático → Indica o modelo/tensão</p> <p>IPQR/220</p>
<p>Mais eficiente</p> <p>Menos eficiente</p>		<p>A → A letra indica a eficiência energética do equipamento / Veja a tabela correspondente na coluna ao lado</p>
<p>CONSUMO DE ENERGIA (kWh/mes) <small>(adotado no teste clima tropical)</small></p> <p>Volume do compartimento refrigerado (l) 000</p> <p>Volume do compartimento do congelador(l) 000</p> <p>Temperatura do congelador (°C) -18</p>		<p>XY,Z → Indica o consumo de energia, em kWh/mês</p>
<p><small>Regulamento Específico Para Uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia Linha de Refrigeradores e Asseslhados - RES/1001-REF</small></p> <p><small>Instruções de instalação e recomendações de uso, leia o Manual do aparelho.</small></p> <p>PROCEL PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</p> <p>INMETRO</p> <p>IMPORTANTE: A REMOÇÃO DESTA ETIQUETA ANTES DA VENDA ESTÁ EM DESACORDO COM O CÓDIGO DE DEFESA DO CONSUMIDOR</p>		

Fonte: INMETRO, 2011 [1].

2.6. Especificação adequada de motores elétricos

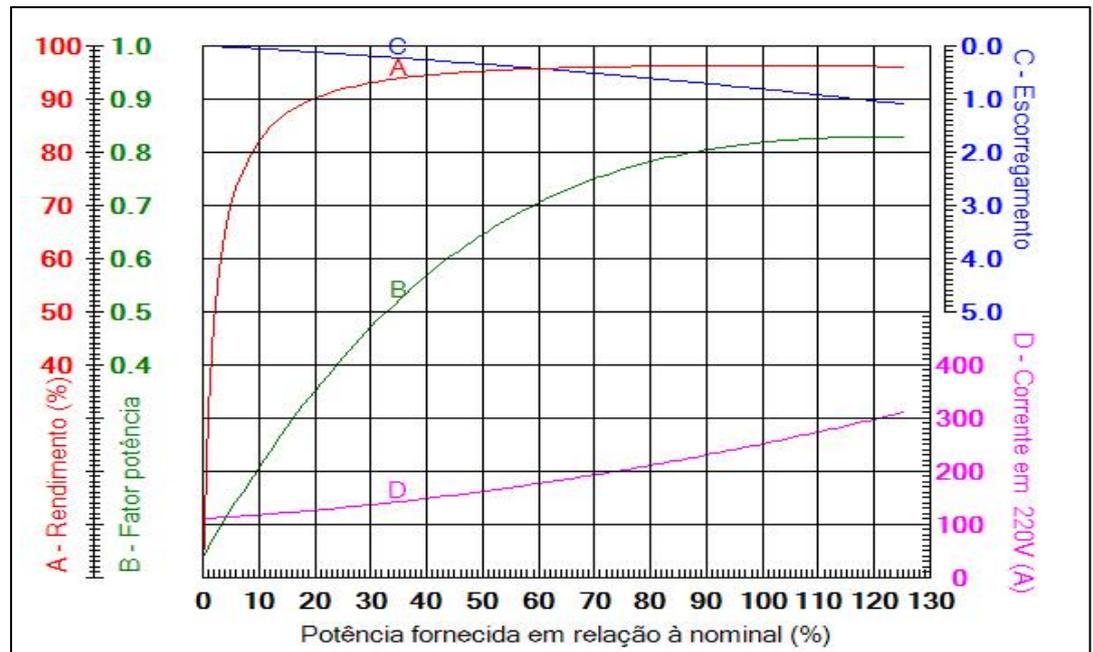
Estima-se que cerca de 70% do consumo de energia elétrica em indústrias é proveniente de motores elétricos [19]. É comum a ideia de que basta simplesmente utilizar motores de alto rendimento para obter um processo mais eficiente, porém é necessário colocá-los em operação de maneira inteligente para que se alcance o ponto ótimo de eficiência [6].

Os motores, assim como qualquer outro sistema motriz, possuem perdas atreladas a seu funcionamento, as quais podem ser divididas em perdas fixas e variáveis [6]. As perdas fixas estão relacionadas às perdas no núcleo, geradas pela histerese no estator e rotor, e às perdas mecânicas, causadas por atrito e ventilação. Já as perdas variáveis são as perdas no cobre, que surgem devido ao aquecimento dos enrolamentos.

O rendimento do motor é a relação entre a quantidade de energia ativa (W) que está sendo entregue à carga e a energia total que está sendo consumida pelo motor, conforme equação (1) [1]. Quando a máquina está alimentando uma carga que requer uma potência muito menor do que sua potência nominal, ocorre o que é conhecido como superdimensionamento de motores, que pode se dar por falta de informação sobre a carga no momento do dimensionamento ou pela substituição inadequada de máquinas danificadas. Nesta situação existem vários malefícios, tais como aumento de custos do próprio motor, visto que sua estrutura é maior, além da redução no fator de potência, no rendimento e aumento na corrente de partida, o que pode causar danos nos equipamentos e no sistema. Consequentemente, quanto mais cair o fator de potência, mais corrente estará circulando na rede de forma desnecessária, acarretando maiores perdas [6].

Logo, um bom dimensionamento de motores é sempre uma oportunidade de melhorar a eficiência de uma indústria. Abaixo pode-se observar uma curva de rendimento [1] de um motor WEG de 100cv, 220/380V, 4 polos, a qual relaciona a corrente de operação do motor com seu fator de carga (%), fator de potência, escorregamento e rendimento (%), facilitando os cálculos do estudo de eficiência.

Figura 5 – Curva de Rendimento de Motor WEG.

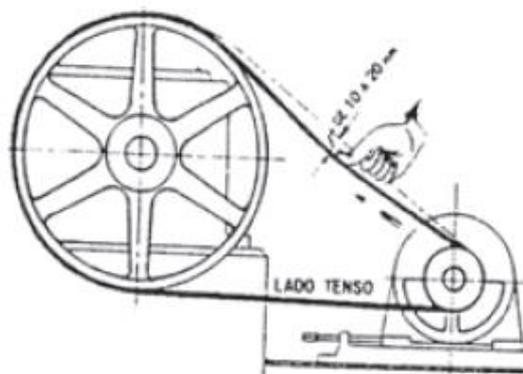


Fonte: WEG Seleção de Motores Elétricos [26].

2.7. Correias de acoplamento

As correias transportadoras são mecanismos de transporte de material utilizados amplamente em indústrias, e são conhecidas como conectores flexíveis que transmitem potência e movimento entre dois eixos envolvendo polias, conforme Figura a seguir [3].

Figura 6 – Mecanismo de transporte por correia em V.



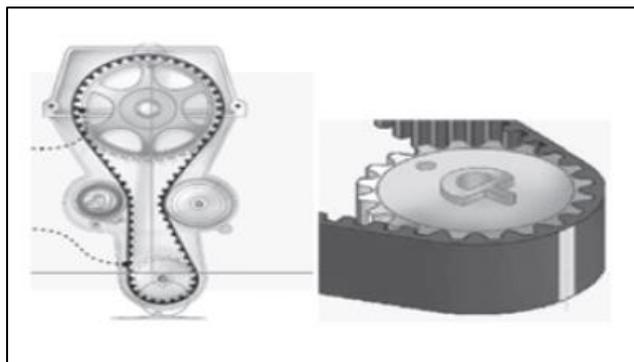
Fonte: Acoplamento motor carga: guia básico. PROCEL/ELETROBRÁS, 2009 [3].

Neste sistema, há uma transferência de força entre a polia e a correia, a qual acontece pela aderência entre as superfícies de contato. Porém, quando estão frouxas ou são mal instaladas, tais correias podem causar perda de velocidade e escorregamento. Também, quando estão muito esticadas, há maiores tensão e desgaste, podendo até

mesmo causar a quebra dos eixos. Assim, este modelo amplamente utilizado em indústrias não é o mais eficiente.

Assim, o uso de correias dentadas é indicado pois são capazes de transmitir potência sem perdas de velocidade pois sua área de contato com a polia é maior. Logo, é um sistema que pode chegar a 99% de eficiência [1].

Figura 7 - Mecanismo de transporte por correia dentada.



Fonte: Acoplamento motor carga: guia básico. PROCEL/ELETROBRÁS, 2009 [3].

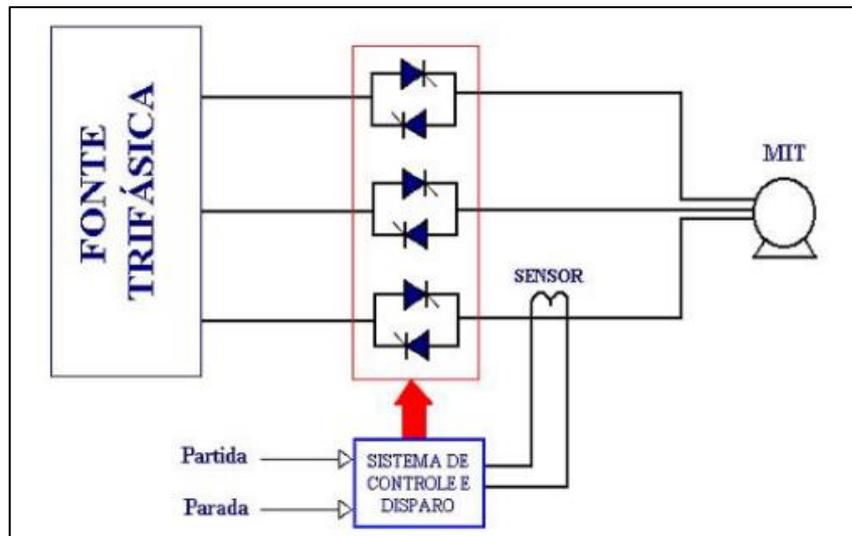
2.8. Acionamento de motores

Os principais métodos de partida aplicados para economia de consumo em motores elétricos são o “Soft-Starter” e o Inversor de Frequência (também conhecido como Controlador de Velocidade).

O “Soft Starter” é um dispositivo baseado em eletrônica de potência que permite partidas mais suaves e com correntes iniciais não muito elevadas. Isto ocorre por meio do controle da tensão aplicada ao motor e do ângulo de disparo dos tiristores presentes em sua estrutura, pois com estes controles o torque é alterado de acordo com o que a carga necessita e, conseqüentemente, a corrente também será a mínima possível [24].

Os 6 tiristores retratados na figura 8 possuem determinado ângulo de condução, os quais se ajustados provocam alteração na tensão que estará alimentando o motor. Sua atuação não provoca variação na frequência de operação, dessa forma é necessário realizar um controle para tensão zero e outro para corrente zero. Isto significa que os circuito de controle precisa realizar a temporização dos pulsos de disparo a partir do último valor zero da tensão e da corrente, captados pelo sensor (o qual normalmente é um Transformador de Corrente - TC) [24].

Figura 8 – Esquema de acionamento por Soft Starter.



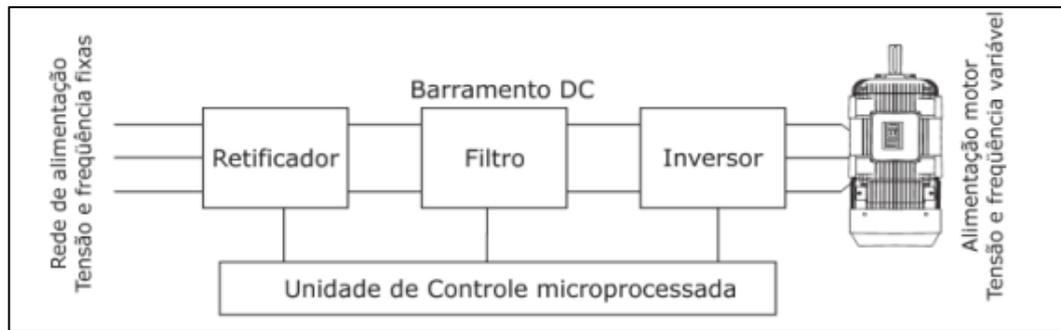
Fonte: Unesp, 2012. [24]

Algumas vantagens de se utilizar tal método de partida são: a redução dos picos de corrente durante as partidas; redução de esforços desnecessários sobre elementos construtivos da máquina; paradas mais suaves, entre outras.

Já o Controlador de Velocidade (também um dispositivo baseado em eletrônica de potência) atua na variação da rotação do motor de acordo com a potência que a carga está solicitando [25]. Isto é feito por meio da variação na frequência de operação. Esta tecnologia é aplicada a fim de reduzir a utilização de válvulas, as quais realizam o controle por meio da inserção ou retirada de perdas no sistema [1].

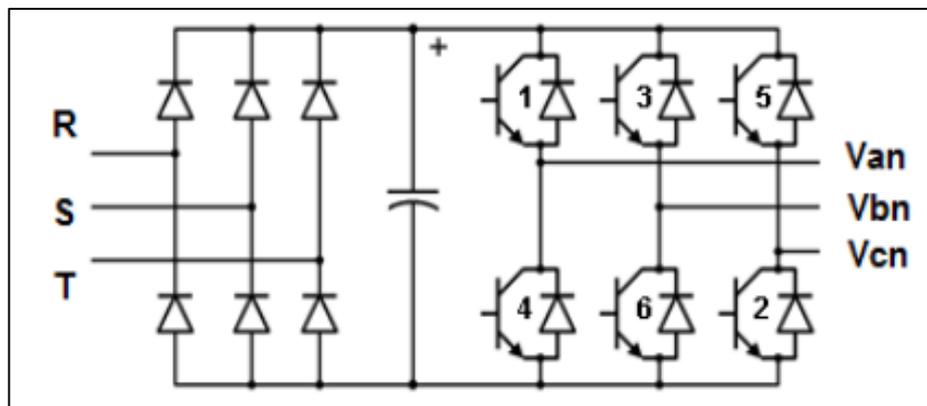
Na Figura 9 pode-se observar um circuito simplificado que exemplifica o funcionamento de um Inversor de Frequência. Possui 4 blocos principais, sendo o primeiro deles um retificador de onda completa que retifica a tensão de alimentação AC recebida pela rede. Em seguida, há um filtro para as possíveis oscilações existentes na tensão DC retificada, o qual também atua como chopper (circuito regulador que controla a tensão DC que de fato chegará ao bloco inversor) [25]. O bloco inversor recebe esta tensão e a transforma novamente para AC, com os valores de magnitude e frequência desejados. O último bloco se refere ao módulo de controle dos outros blocos, responsável pelo chaveamento correto e pela regulação da tensão de saída do filtro.

Figura 9 – Diagrama de blocos de um inversor de frequência. UNB, 2013.



Fonte: UNB, 2013. [25]

Figura 10 – Circuito simplificado de um inversor de frequência. UNB, 2013.



Fonte: UNB, 2013. [25]

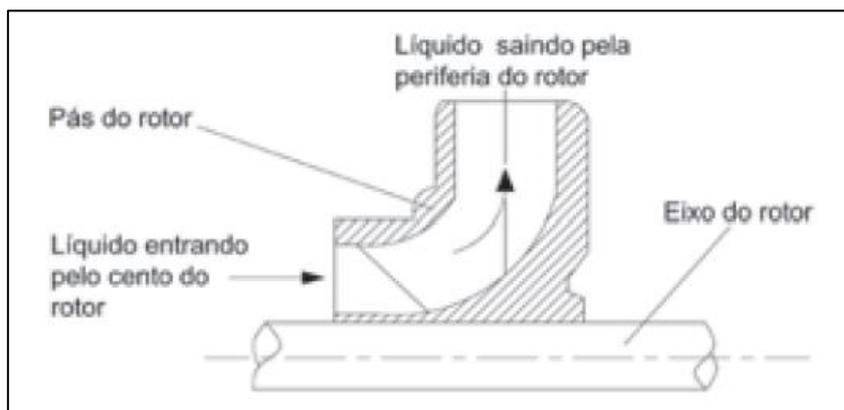
2.9. Sistemas de bombeamento

Especialmente em indústrias, sistemas para transporte de fluidos são muito importantes, principalmente para transportar água, recurso amplamente utilizado em processos industriais. Com o advento dos dispositivos para este fim, as bombas, foi possível desenvolver sistemas cada vez mais complexos em diversas aplicações industriais, como realizar o bombeamento de minérios, argamassa, concreto, plásticos e até mesmo produzir sistemas de esgoto próprios. Tais sistemas consomem energia e seu estudo possui papel fundamental na conservação e na eficiência energética [1].

Uma bomba hidráulica é uma máquina que recebe energia de uma fonte motriz (normalmente, um motor elétrico) e a transfere para o fluido que se deseja transportar em forma de pressão e movimento [10], podendo-se concluir que este dispositivo aumenta a pressão e velocidade daquele fluido. Neste estudo, será dado enfoque nas bombas centrífugas, as quais são utilizadas na indústria em análise.

As bombas centrífugas promovem o movimento do líquido por meio da rotação de um eixo, no qual está acoplado um rotor com pás, as quais recebem o fluido em seu centro e o movimentam para a periferia devido à atuação da força centrífuga. A bomba centrífuga radial, a qual será analisada neste estudo, atua neste mesmo padrão, conforme se pode observar na Figura 11 abaixo.

Figura 11 – Rotor de bomba centrífuga radial



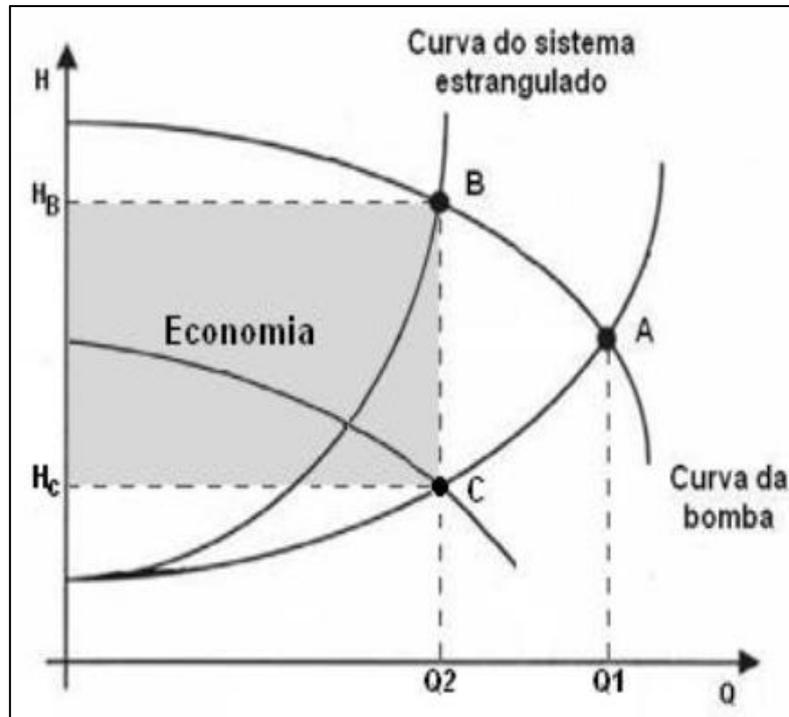
Fonte: PROCEL, Bombas – 2009. [10]

Assim como para motores elétricos, o dimensionamento adequado destes equipamentos é vital para um sistema industrial eficiente e uma economia maior de energia elétrica. Analisando as curvas de rendimento das bombas, é possível obter dados importantes para análise de eficiência energética.

Cada bomba possui curvas de rendimento e pressão para cada vazão, que são fornecidas pelo fabricante, das quais pode-se obter dados de operação como potência no eixo, rendimento e pressão. Nas imagens 16 e 17 pode-se observar exemplos das curvas.

A partir de tais características, será possível obter a quantidade de energia economizada pela alteração do sistema de acionamento, conforme Figura 12 abaixo. Suponha-se que o ponto de operação atual é o ponto B, com vazão Q_2 e pressão H_B . Com a variação de velocidade, será obtido um novo ponto de operação com a mesma vazão e H diferente, neste caso será o ponto C com vazão Q_2 e pressão H_C . O consumo no eixo está diretamente proporcional à multiplicação de H e Q , ou seja, à área do gráfico abaixo da curva demarcada. A economia de energia será a diferença entre a área anterior ($H_B \times Q_2$) e a nova área ($H_C \times Q_2$).

Figura 12 – Exemplo de determinação da economia energética por meio das curvas da bomba e do sistema.



Fonte: Anotações de Aula – Prof. Dr. Sérgio Ferreira de Paula Silva [18].

A curva do sistema é a curva que possui intersecções com as curvas da bomba, ou seja, as curvas ascendentes notáveis na Figura 12. Esta curva é determinada pelas características do sistema e pode ser estimada conforme os pontos de operação definidos.

3 ESTUDO DE CASO: 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 4 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 70% aberta e 12 horas com válvula 40% aberta. Assim, foram coletadas correntes para as duas condições de operação e, para fins visuais, a denominação “Motor 2” foi abreviada para “M2”. O motor 4 também possui 2 condições ao longo de um dia, sendo 12 horas com válvula 60% aberta e 12 horas com válvula 40% aberta e, da mesma forma que para o Motor 2,

foram coletadas correntes para as duas condições de operação e a denominação “Motor 4” foi abreviada para “M4”.

Tabela 1 – Dados dos motores elétricos em análise.

TAG	Potência (cv)	Polos	I operação (A)	Fabricante	Partida	Acoplamento	Ano
Motor 1	150	6	122,15	WEG	Soft Starter	Polias e Correias	1999
M2 – 70%	150	4	120,43	WEG	Soft Starter	Hidráulico	2001
M2 – 40%			98,76				
Motor 3	40	4	46,83	WEG	Soft Starter	Polias e Correias	1999
M4 – 60%	60	4	55,41	WEG	Soft Starter	Hidráulico	1980
M4 – 40%			41,32				

Fonte: Autora.

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

Nas imagens 11, 12, 13 e 14 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 150-315 com 332 mm de diâmetro e a bomba do motor 4 é do modelo KSB 80-315 com 328 mm de diâmetro. Nas figuras 15 e 16 é possível observar as curvas de rendimento das bombas.

Também foram coletadas informações sobre 2 sistemas de iluminação na fábrica, conforme se pode observar na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados dos sistemas de iluminação.

Área	Horas de Operação	Nº de lâmpadas	Potência por lâmpada (W)	Tipo de lâmpada
Recebimento	8400	60	400	Vapor de Mercúrio
Recebimento	8400	27	400	Vapor de Mercúrio

Fonte: Autora.

4 ANÁLISE DE OPORTUNIDADES

Nesta seção será desenvolvido o estudo sobre as oportunidades encontradas em campo, e serão feitos os cálculos de consumo nas condições de operação atuais e planejadas. Além disso, serão calculados os tempos de retorno dos investimentos e os efeitos das economias calculadas na emissão de gases do efeito estufa.

4.1. Definição das ações

Os motores 1 e 3 possuem mais de 20 anos de fabricação, logo, a primeira opção a ser considerada é a troca destes por modelos mais novos e eficientes. Porém, também serão feitos cálculos de viabilidade para troca do tipo de correias (de lisas para dentadas) e para alteração de seu acionamento de “soft starter” para inversor de frequência.

Para os motores 2 e 4 (aplicados em bombas), será considerado o acionamento via inversor de frequência, pois estes atualmente estão sendo acionados com Soft Starter com 70% e 60% de abertura da válvula, respectivamente.

Já para iluminação, as lâmpadas de vapor de mercúrio serão trocadas por lâmpadas LED e, além disso, será instalado sensor de presença para as 27 lâmpadas do segundo grupo levantado, pois estão localizadas em área de pouca circulação durante a noite e ficam ligadas o tempo todo.

4.2. Cálculo de 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 (2) abaixo [18]:

$$CM = \frac{P_M(cv) * 0,746 * Carregamento * Horas}{\eta_{motor}} \quad (2)$$

A energia consumida pelas bombas será de [18]:

$$CB = \frac{Q * H * 2,725 * Horas}{\eta_{bomba}} \quad (3)$$

Já a energia consumida anualmente pelos sistemas de iluminação será dada pela multiplicação entre o número de lâmpadas, a potência em kW de cada lâmpada e as horas de operação anuais, conforme equação (3) abaixo:

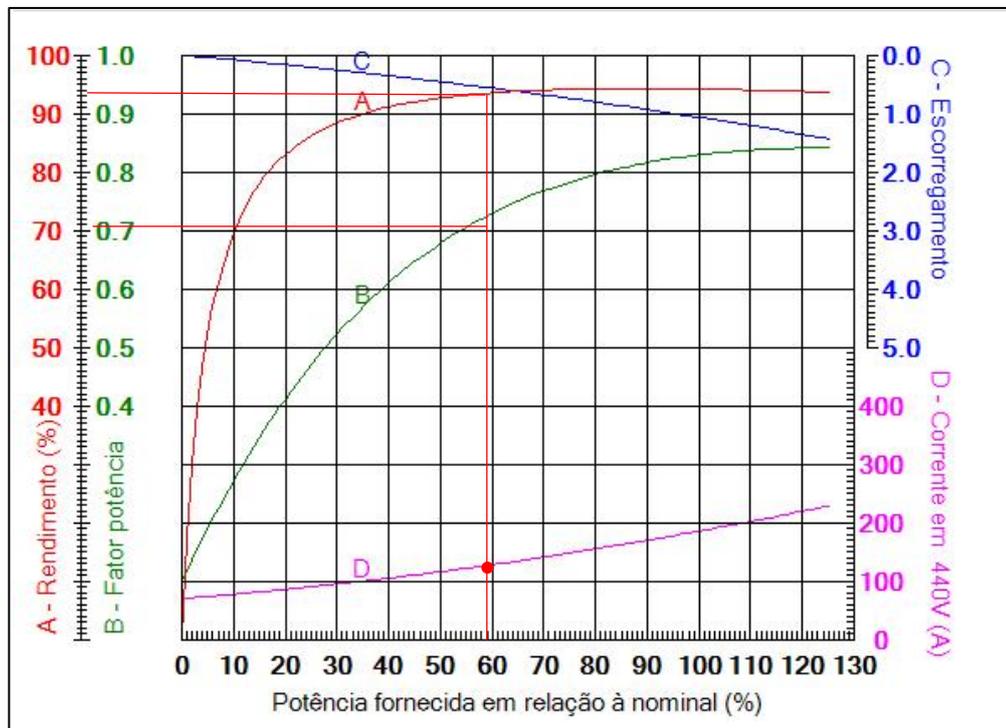
$$CI = N^{\circ}_{lamp} * P_{lamp}(kW) * Horas \quad (4)$$

4.2.1. Motor 1

Analisando a curva de rendimento do Motor 1 disponível na Figura 13, 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:

$$CM_1 = \frac{150 * 0,746 * 0,56 * 8400}{0,93} = 565.998 \text{ kWh/ano}$$

Figura 13 – Curva de Rendimento do motor 1.



Fonte: WEG – Seleção de Motores [26].

4.2.2. Motor 2

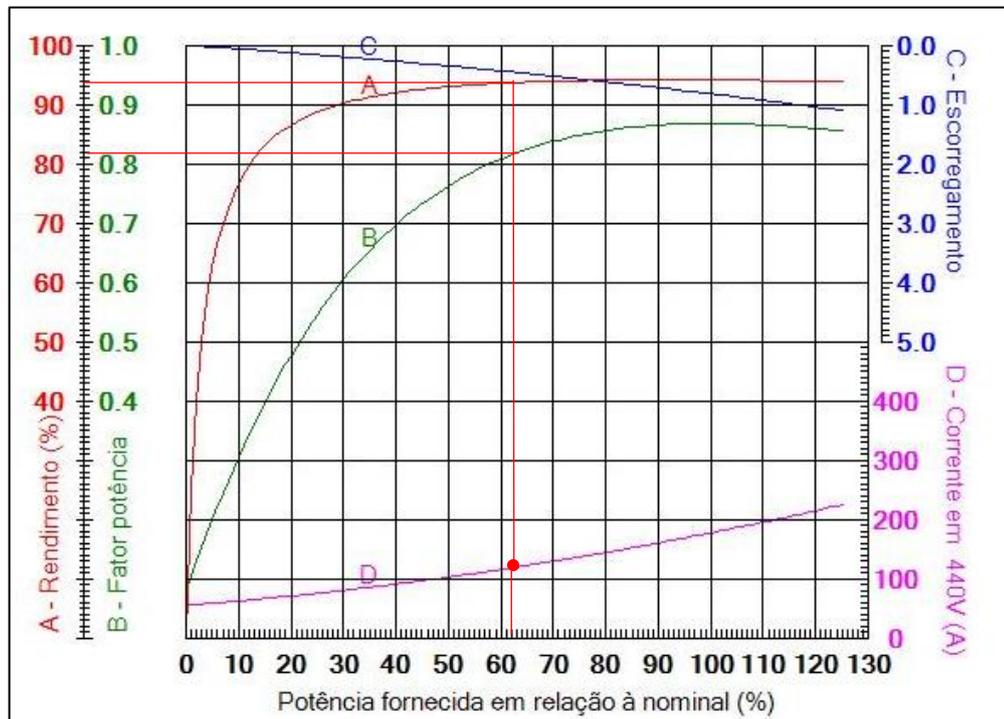
Primeiramente, será analisado o primeiro caso (abertura de 70% da válvula). Conforme as curvas do Motor 2 disponível na Figura 14, com uma corrente de, aproximadamente, 120A, obtém-se um carregamento de 62% (93cv). Utilizando-se tal potência no eixo, pela Figura 16 (contendo as curvas da bomba), obtém-se uma pressão de, aproximadamente, 48mca e uma vazão de 430m³/h. Assim, o rendimento observado na bomba é de 84%. Logo, a primeira metade do consumo anual no eixo do Motor 2 será dado por:

$$CB_{2\ 70} = \frac{430 * 48 * 2,725 * 4200}{0,84} = 281.220 \text{ kWh/ano}$$

De acordo com a Figura 14, o rendimento do motor 2 para esta condição de operação é de cerca de 94%. Logo, o consumo de energia elétrica será de:

$$CM_{2\ 70} = \frac{281.220}{0,94} = 299.170 \text{ kWh/ano}$$

Figura 14 - Curva de Rendimento do motor 2 com marcações para operação em 70% de válvula aberta.



Fonte: WEG – Seleção de Motores [26].

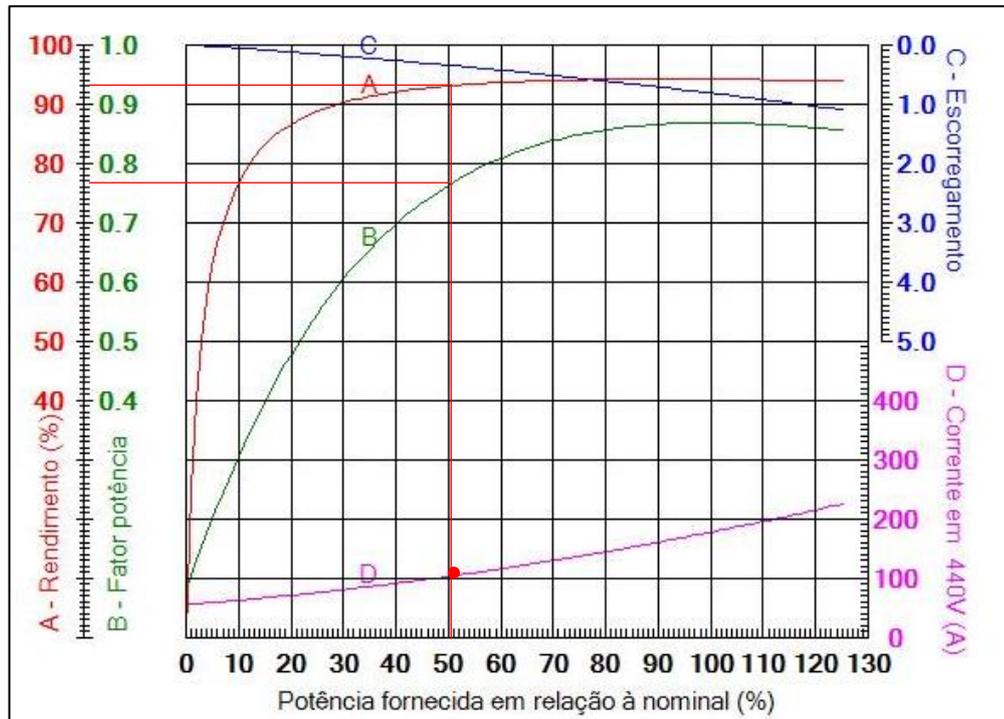
Em seguida, será analisado o segundo caso (abertura de 40% da válvula). Conforme as curvas do Motor 2 disponível na Figura 15, com uma corrente de, aproximadamente, 100A, obtém-se um carregamento próximo de 50% (75hp). Utilizando-se tal potência no eixo, pela Figura 16, obtém-se uma pressão de, aproximadamente, 51,5mca e uma vazão de 295m³/h. Assim, o rendimento observado na bomba é próximo de 74%. Logo, o consumo anual no eixo do Motor 2 será dado por:

$$CB_{2\ 40} = \frac{295 * 51,5 * 2,725 * 4200}{0,74} = 234.970 \text{ kWh/ano}$$

De acordo com a Figura 15, o rendimento do motor 2 para esta condição de operação é de cerca de 93%. Logo, o consumo de energia elétrica será de:

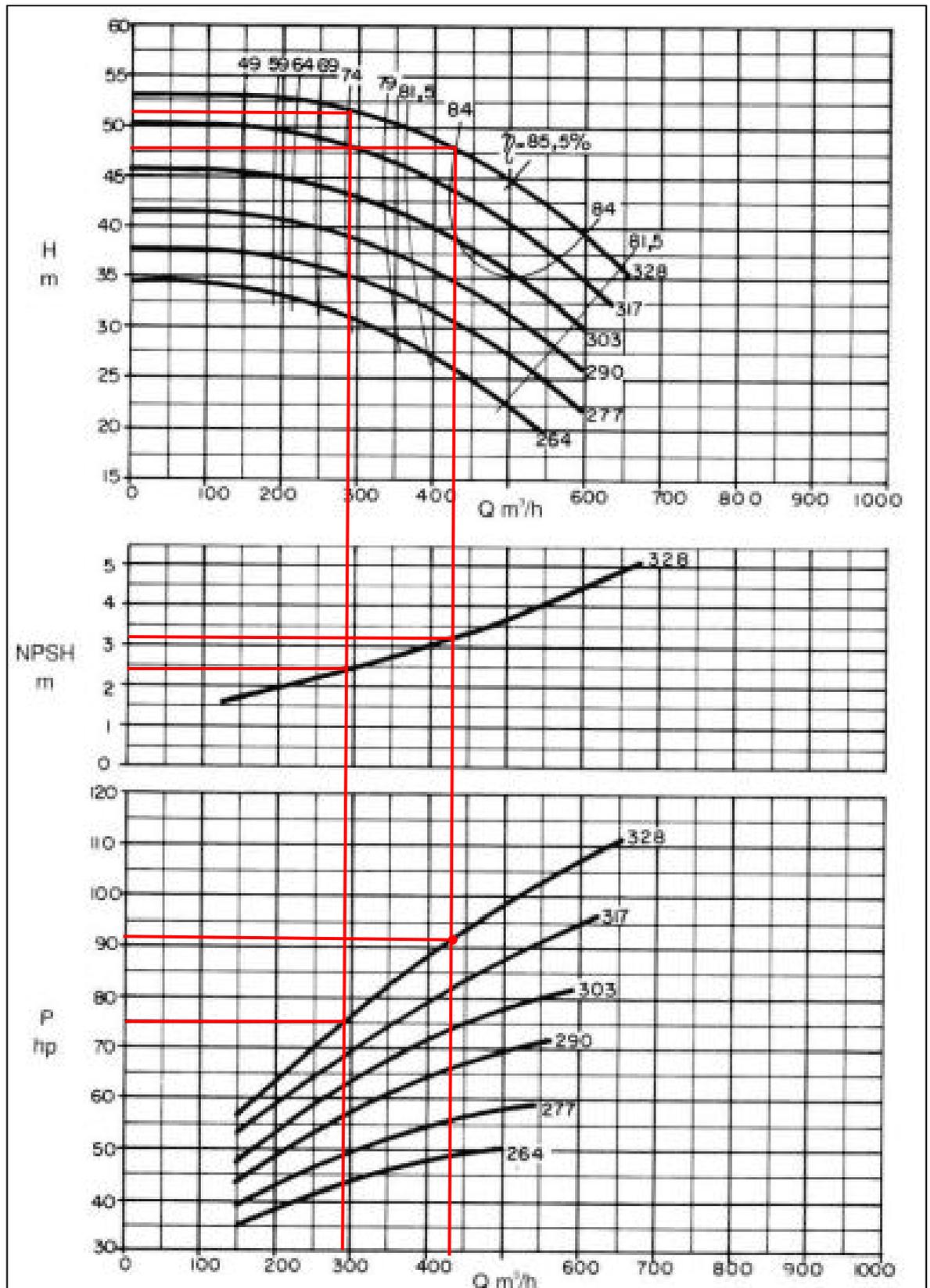
$$CM_{2\ 40} = \frac{234.970}{0,93} = 252.656 \text{ kWh/ano}$$

Figura 15 - Curva de Rendimento do motor 2 com marcações para operação em 40% de válvula aberta.



Fonte: WEG – Seleção de Motores [26].

Figura 16 – Curvas de rendimento para a bomba do motor 2 (80-315 1750rpm).



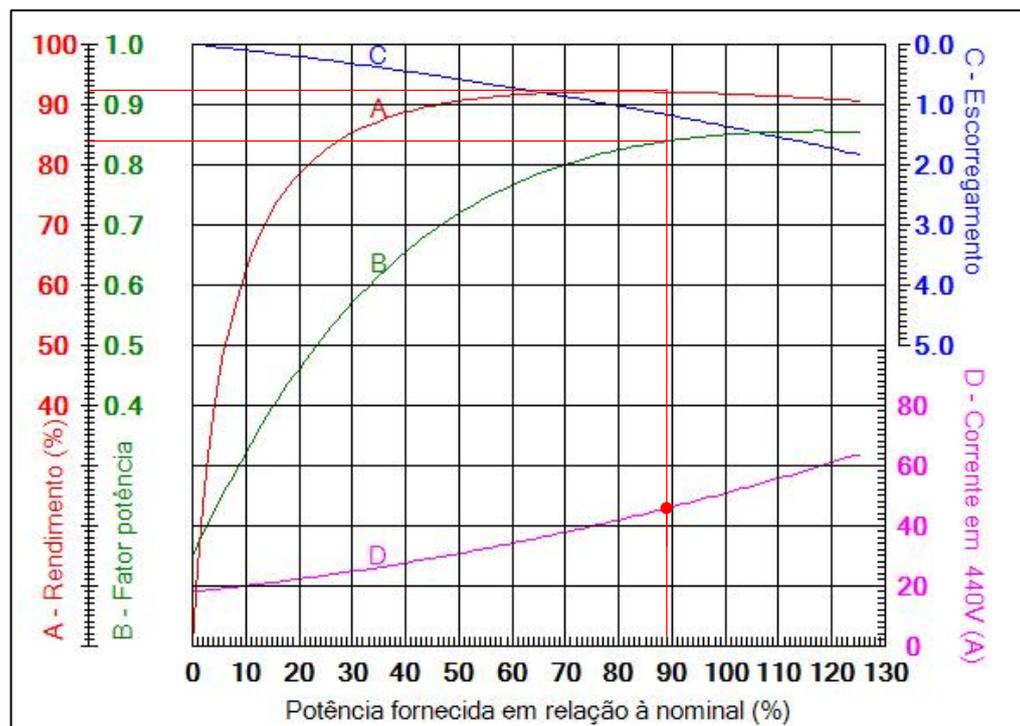
Fonte: Catálogo de Bombas KSB [27].

4.2.3. Motor 3

Analisando a curva de rendimento do Motor 2 disponível na Figura 17, com a corrente de operação de 46,8A, obtemos que ele está operando com um rendimento de 92%, um fator de potência de 0,84 e um carregamento de 89%. Logo, o consumo anual do Motor 3 será dado por:

$$CM_3 = \frac{40 * 0,746 * 0,89 * 8400}{0,92} = 242.482 \text{ kWh/ano}$$

Figura 17 – Curva de Rendimento do motor 3.



Fonte: WEG – Seleção de Motores [26].

4.2.4. Motor 4

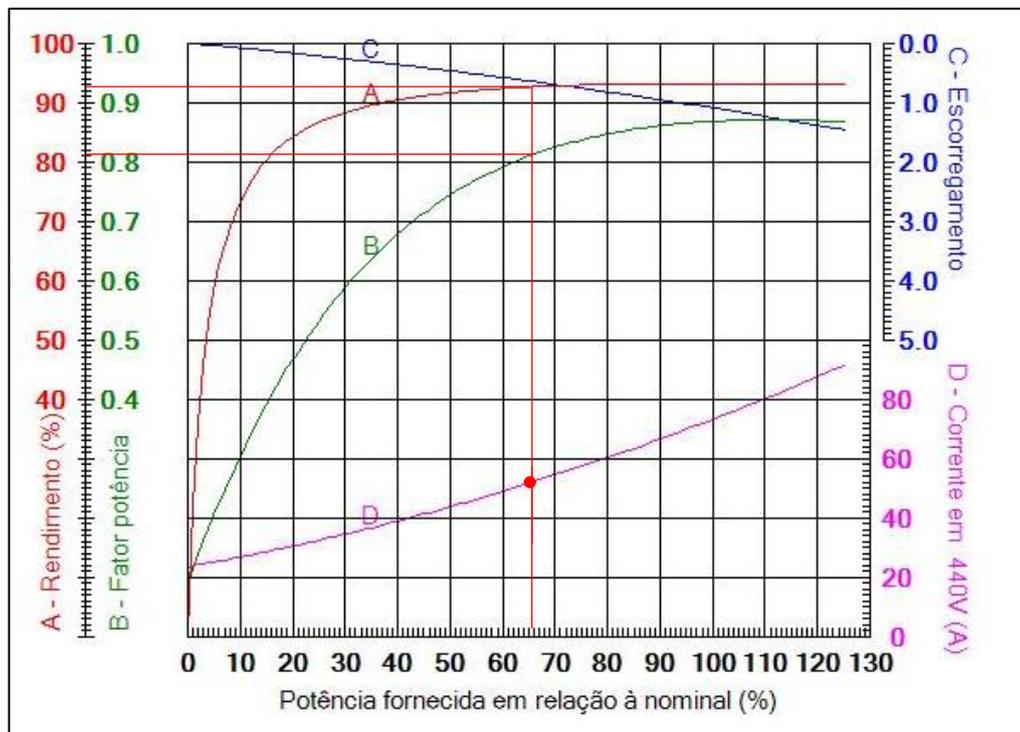
Primeiramente, será analisado o primeiro caso (abertura de 60% da válvula). Conforme as curvas do Motor 4 disponíveis na Figura 18, com uma corrente de, aproximadamente, 55A, obtém-se um carregamento de 66% (40hp). Utilizando-se tal potência no eixo, pela Figura 20 (contendo as curvas da bomba), obtém-se uma pressão de, aproximadamente, 54mca e uma vazão de 150m³/h. Assim, o rendimento observado na bomba é de aproximadamente 74%. Logo, a primeira metade do consumo anual no eixo do Motor 2 será dado por:

$$CB_{460} = \frac{150 * 54 * 2,725 * 4200}{0,74} = 125.276 \text{ kWh/ano}$$

De acordo com a Figura 18, o rendimento do motor 4 para esta condição de operação é de cerca de 93%. Logo, o consumo de energia elétrica será de:

$$CM_{460} = \frac{125.276}{0,93} = 134.705 \text{ kWh/ano}$$

Figura 18 – Curva de Rendimento do motor 4 com marcações para operação em 60% de válvula aberta.



Fonte: WEG – Seleção de Motores [26].

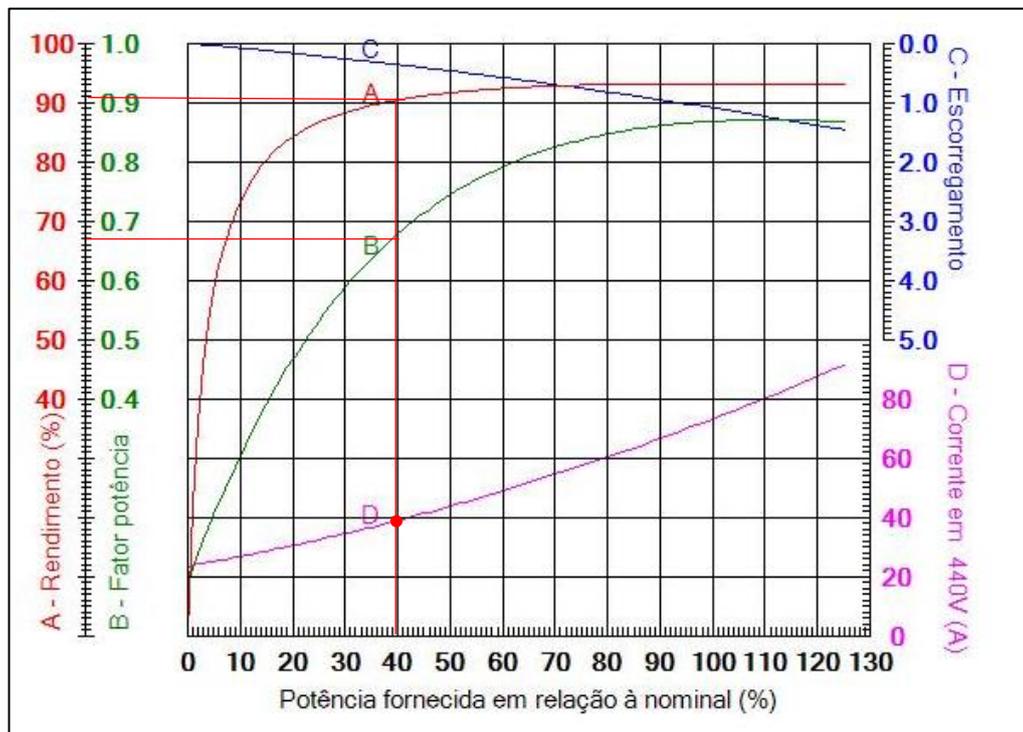
Em seguida, será analisado o segundo caso (abertura de 40% da válvula). Conforme as curvas do Motor 4 disponíveis na Figura 19, com uma corrente de, aproximadamente, 41A, obtém-se um carregamento próximo de 40% (25hp). Utilizando-se tal potência no eixo, pela Figura 20, obtém-se uma pressão de, aproximadamente, 58mca e uma vazão de 70m³/h. Assim, o rendimento observado na bomba é próximo de 60%. Logo, a segunda metade do consumo anual no eixo do Motor 4 será dado por:

$$CB_{40} = \frac{70 * 58 * 2,725 * 4200}{0,6} = 77.444 \text{ kWh/ano}$$

De acordo com a Figura 19, o rendimento do motor 4 para esta condição de operação é de cerca de 91%. Logo, o consumo de energia elétrica será de:

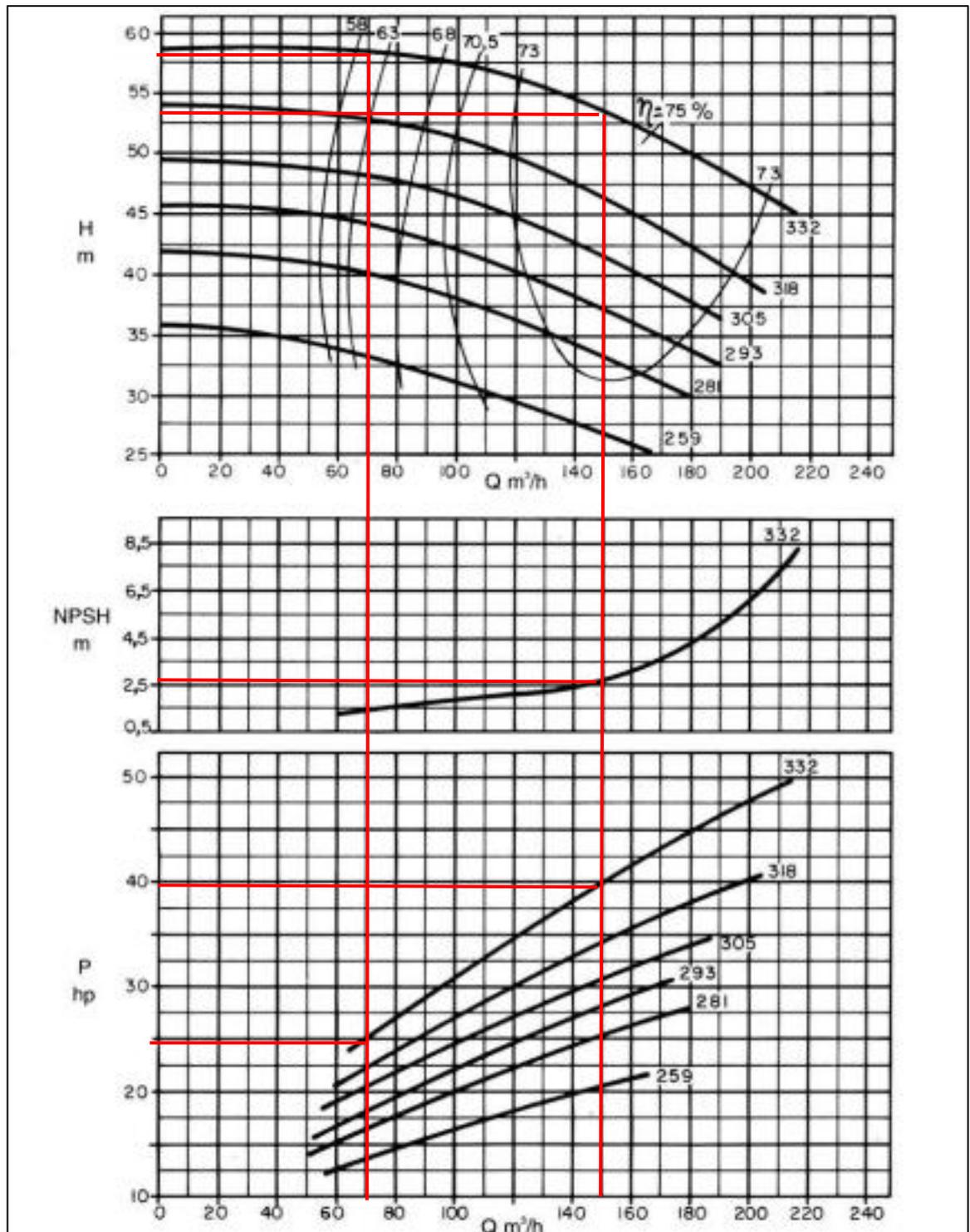
$$CM_{40} = \frac{77.444}{0,91} = 85.104 \text{ kWh/ano}$$

Figura 19 – Curva de Rendimento do motor 4 com marcações para operação em 40% de válvula aberta.



Fonte: WEG – Seleção de Motores [26].

Figura 20 - Curvas de rendimento para a bomba do motor 4 (150-315 1750rpm).



Fonte: Catálogo de Bombas KSB [27].

4.2.5. Sistema de Iluminação 1

Tomando por base os dados presentes na Tabela 2 e utilizando a equação (3), temos que o consumo anual em kWh do sistema de iluminação 1 será, considerando um rendimento do reator de 90%::

$$CI_1 = 60 * 0,4 * \frac{8400}{0,9} = 224.000kWh/ano$$

4.2.6. Sistema de Iluminação 2

Tomando por base os dados presentes na Tabela 2 e utilizando a equação (3), temos que o consumo anual em kWh do sistema de iluminação 1 será, considerando um rendimento do reator de 90%:

$$CI_2 = 27 * 0,4 * \frac{8400}{0,9} = 100.800kWh/ano$$

4.3. Cálculo de consumo planejado

Nesta seção serão feitos os cálculos de consumo para as novas condições de operação a serem definidas.

As mudanças a serem implementadas nos casos analisados foram apresentadas no tópico 4.1, onde foi definido que, para os motores 1 e 3 seria considerada a possibilidade de troca dos motores inteiros e a troca dos sistemas de acoplamento de correias lisas para correias dentadas.

Já para os motores 2 e 4 será considerada a possibilidade da aplicação do inversor de frequência em substituição ao “soft starter”, enquanto para os sistemas de iluminação será estudada a troca das lâmpadas de vapor de mercúrio para LED.

4.3.1. Motores 1 e 3

Para a troca dos motores por modelos mais modernos, temos que seria necessário adquirir um motor de 100cv (para o motor 1, visto que seu carregamento está em 56% = 84cv) e para o motor 3 já se pode concluir que não será necessária a troca, visto que seu carregamento está em 89%. A Figura 21 contém a curva de rendimento do novo motor de 100cv, 6 polos, WEG W22 Super Premium.

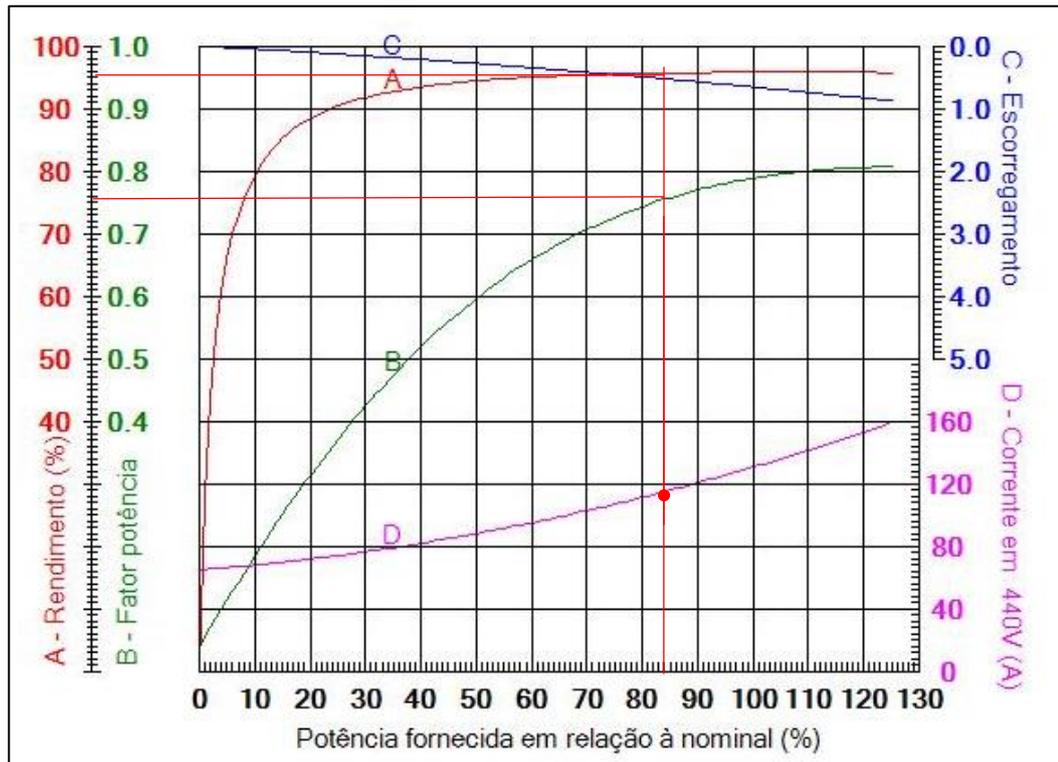
Nota-se que o novo ponto a ser marcado na Figura 21, corresponderá a um carregamento de:

$$C_1 = 0,56 * \frac{150}{100} = 0,84 = 84\%$$

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. Assim, temos um consumo anual de:

$$CM_{100cv} = \frac{100 * 0,746 * 0,84 * 8400}{0,95} = 554.084/ano$$

Figura 21 – Curva de rendimento do novo motor de 100cv escolhido.



Fonte: WEG – Seleção de Motores [26].

Assim, teria-se uma economia anual de:

$$\Delta CM_{11} = 565.998 - 554.083 = 11.915kWh/ano$$

Analisando a troca das correias para dentadas, será obtido um total de 98% a 99% de eficiência, enquanto as lisas apresentam de 90% a 96%. Logo, teremos de 2% a 3% de acréscimo em rendimento do sistema. Assim, para os motores 1 e 3, os novos consumos anuais serão de (considerando um acréscimo de 2%):

$$CM_{1cd} = \frac{CM_1}{1,02} = \frac{565,99}{1,02} = 554.890kWh/ano$$

$$CM_{3\ cd} = \frac{CM_3}{1,02} = \frac{242,5}{1,02} = 237.752kWh/ano$$

Assim, teria-se uma economia anual de:

$$\Delta CM_{12} = 565.998 - 554.890 = 11.108kWh/ano$$

$$\Delta CM_{31} = 242.482 - 237.752 = 4.730kWh/ano$$

A característica das cargas acionadas por estes dois motores é de torque aproximadamente constante, logo não será necessária a implementação do inversor de frequência.

Há ainda uma terceira situação que pode ser implementada, que é a troca do motor 1 e a troca do tipo de correias. Assim, teríamos, considerando 2% de ganho em eficiência:

$$CM_{1\ 100cv\ 2} = \frac{554.084}{1,02} = 543.219kWh/ano$$

Logo, a economia em energia consumida anualmente será de:

$$\Delta CM_{13} = 565.998 - 543.219 = 22.779kWh/ano$$

4.3.2. Motores 2 e 4

Para os motores 2 e 4, 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 de cada bomba das figuras 16 e 20. 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 [18]:

$$\frac{Q}{Q_1} = \frac{N}{N_1} \quad (4)$$

$$\frac{H}{H_1} = \frac{N^2}{N_1^2} \quad (5)$$

$$\frac{P}{P_1} = \frac{N^3}{N_1^3} \quad (6)$$

Para definição das curvas de rendimento para variação de velocidade, serão utilizados pontos homólogos, ou seja, pontos que possuem a mesma relação da equação (5), porém, aplicada para a vazão Q, visto que, a partir da equação (4), a vazão Q e a rotação N são diretamente proporcionais. Assim, temos que, para os pontos homólogos:

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

A partir das imagens 14 e 17, foram identificados os pontos de H/Q para cada valor de rendimento, conforme se pode observar nas tabelas 3 e 4. O valor de α foi obtido para cada rendimento por meio da equação (7).

Tabela 3 – 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.

Tabela 4 - Pontos H/Q para bomba do motor 4.

Rendimento	Q	H	α
58	150	45	0,013846
63	190	45	0,009533
68	210	45	0,006371
70,5	248	44,8	0,004887
73	290	43	0,003889
75	349	41,5	0,00191

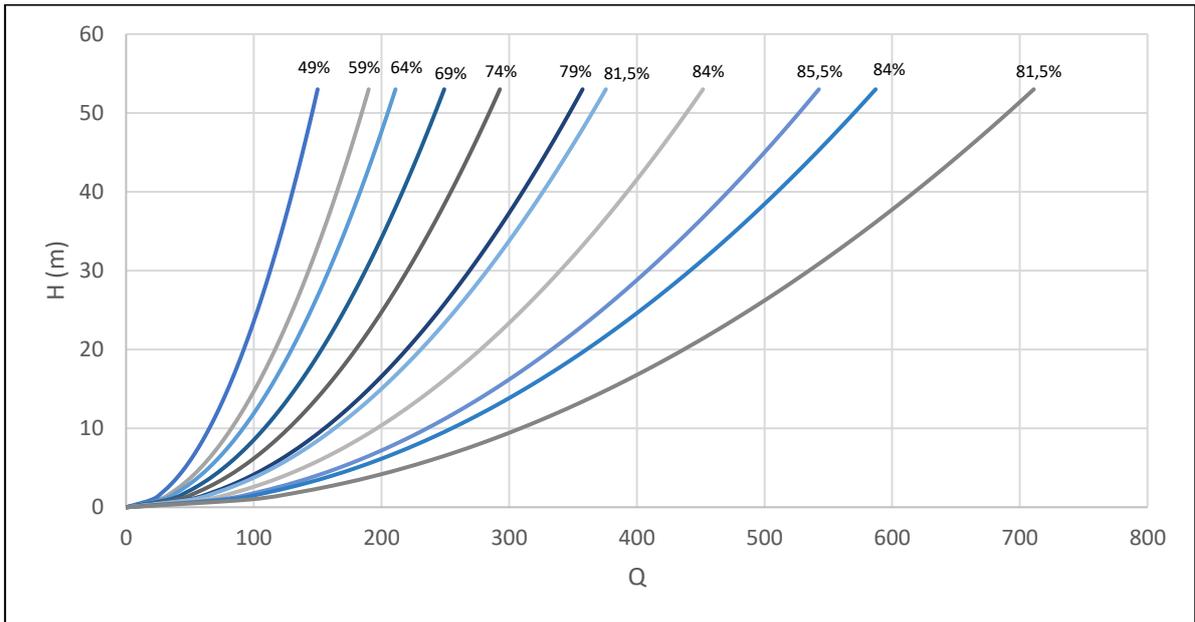
73 365 41 0,001095

Fonte: Autora.

A partir destes pontos e dos valores de α , pôde-se obter as curvas de isorrendimento, aplicando a equação (7).

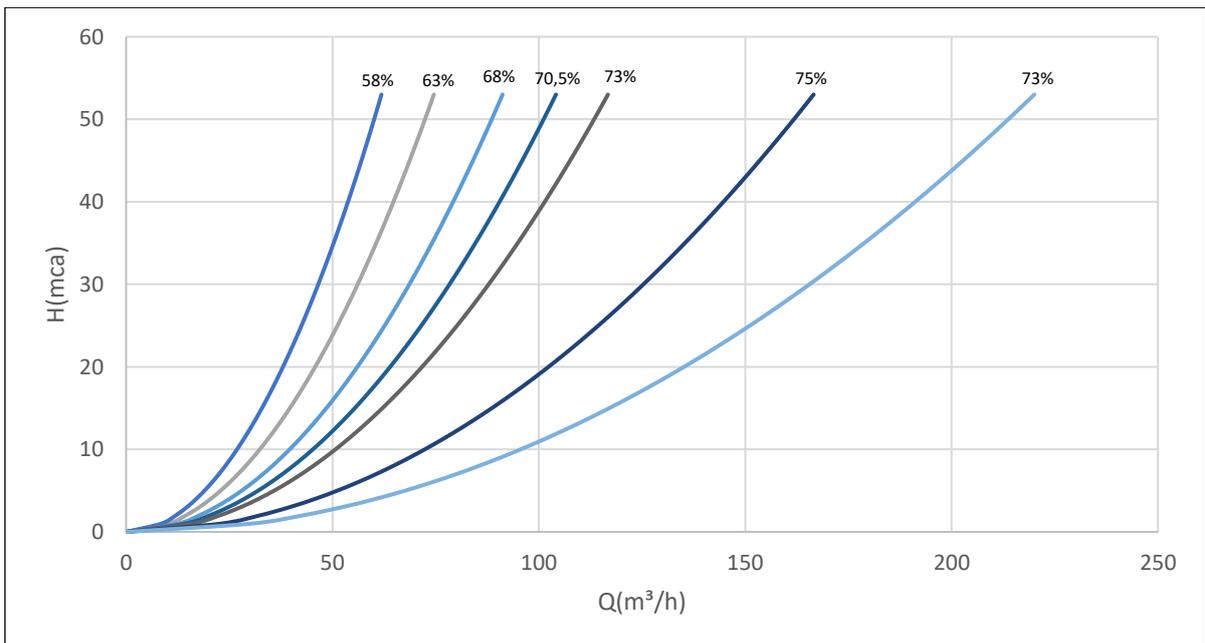
Assim, com tais pontos em mãos, pode-se desenhar computacionalmente as curvas de isorrendimento para variação de velocidade dos dois motores, a saber:

Figura 22 – Curva de rendimento para variação de velocidade para o Motor 2.



Fonte: Autora.

Figura 23 – Curva de rendimento para variação de velocidade para o Motor 4.



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, conforme exemplificado na Figura 12. 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 70% aberta (para o Motor 2) e válvula 60% aberta (para o Motor 4). Logo, as curvas estimadas do sistema cruzarão a curva das bombas nestes pontos de operação.

A curva do sistema seguirá a equação (7), porém possuirá um ponto de partida H_0 onde a vazão Q é nula. Assim, teremos como equação base a equação (8) [18]:

$$H = H_0 + \alpha Q^2 \quad (8)$$

Serão estimados três valores para H_0 : 5m, 10m e 20m. Para cada um destes valores será traçada uma curva do sistema. A fim de encontrar o valor de α , consideraremos os pontos de operação para 70% (M2 – 430m³/h; 48mca) e 60% de abertura de válvula (M4 – 150m³/h; 54mca) como pontos que pertencem às curvas. Assim, temos, para a bomba do motor 2:

$$48 = 5 + \alpha_{2\ 5}(430)^2 \rightarrow \alpha_{2\ 5} = 0,000232558$$

$$48 = 10 + \alpha_{2\ 10}(430)^2 \rightarrow \alpha_{2\ 10} = 0,000205516$$

$$48 = 20 + \alpha_{2\ 20}(430)^2 \rightarrow \alpha_{2\ 20} = 0,000151433$$

Para a bomba do motor 4, temos:

$$54 = 5 + \alpha_{4\ 5}(150)^2 \rightarrow \alpha_{4\ 5} = 0,002177778$$

$$54 = 10 + \alpha_{4\ 10}(150)^2 \rightarrow \alpha_{4\ 10} = 0,001955556$$

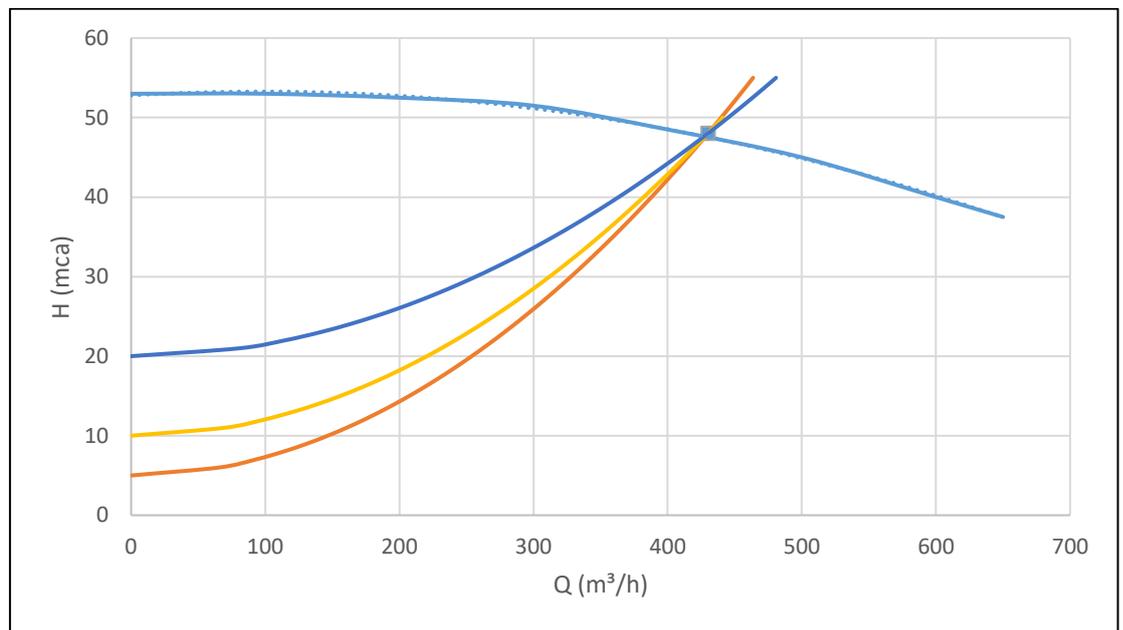
$$54 = 20 + \alpha_{4\ 20}(150)^2 \rightarrow \alpha_{4\ 20} = 0,001511111$$

Para reconstrução das curvas das bombas foram observados os pontos das curvas das imagens 16 e 20.

Utilizando os valores de α encontrados, pôde-se obter as curvas estimadas do sistema para cada valor de H_0 . Os cálculos foram feitos utilizando a equação (8), calculando diferentes valores de vazão para diferentes valores de H . Os resultados estão apresentados nas tabelas 9 e 10.

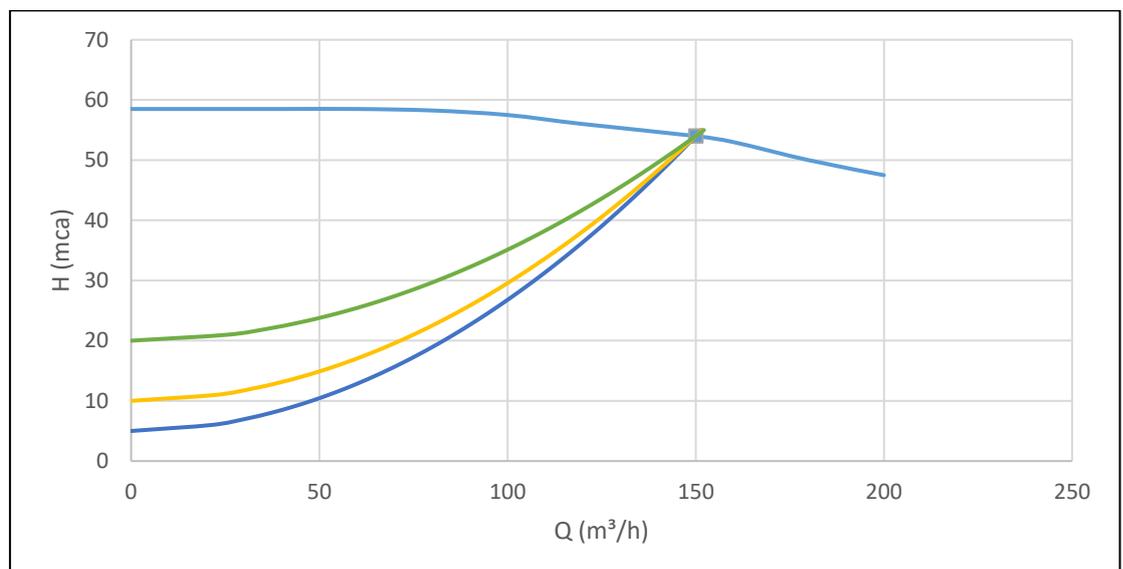
Foram plotadas, então, as curvas com os pontos apresentados nas tabelas 7, 8, 9 e 10. Os gráficos foram construídos via ferramenta computacional e podem ser observados nas figuras 24 e 25.

Figura 24 – Curvas do sistema e curva da bomba para o Motor 2.



Fonte: Autora.

Figura 25 – Curvas do sistema e curva da bomba para o Motor 4.



Fonte: Autora.

O próximo passo é adicionar os pontos da segunda condição de operação, ou seja, com válvula 40% aberta. Os pontos encontrados foram: (295m³/h, 51,5mca) para o motor 2 e (70m³/h, 58mca) para o motor 4.

É necessário encontrar a altura na qual as curvas do sistema passam por estes valores de vazão. Assim, será utilizada a equação (8) com os diferentes valores de H₀ e α para encontrar as incógnitas referentes às diferentes curvas do sistema. Para o motor 2, temos:

$$\begin{aligned}H_{2\ 5} &= 5 + (0,000232558)(295)^2 \rightarrow H_{2\ 5} = 25,238mca \\H_{2\ 10} &= 10 + (0,000205516)(295)^2 \rightarrow H_{2\ 10} = 27,885mca \\H_{2\ 20} &= 20 + (0,000151433)(295)^2 \rightarrow H_{2\ 20} = 33,178mca\end{aligned}$$

Para o motor 4, temos:

$$\begin{aligned}H_{4\ 5} &= 5 + (0,002177778)(70)^2 \rightarrow H_{4\ 5} = 15,671mca \\H_{4\ 10} &= 10 + (0,001955556)(70)^2 \rightarrow H_{4\ 10} = 19,582mca \\H_{4\ 20} &= 20 + (0,001511111)(70)^2 \rightarrow H_{4\ 20} = 27,404mca\end{aligned}$$

Com estes pontos em mãos, deve-se traçar as novas curvas das bombas, com mesma características das anteriores, porém deslocadas para baixo no eixo Y. Para encontrar o desnível, basta subtrair a nova altura encontrada da altura original dos pontos de operação. Os desníveis serão, para a bomba do motor 2:

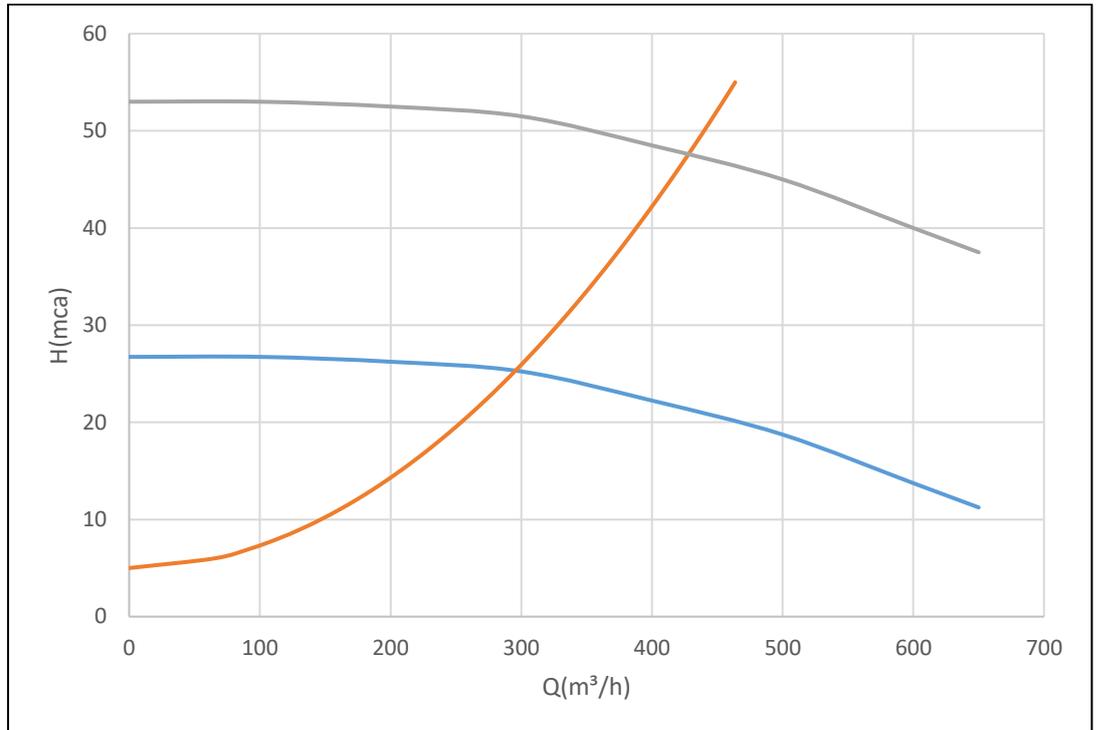
$$\begin{aligned}D_{2\ 5} &= 51,5 - H_{2\ 5} = 51,5 - 25,238 = 26,262mca \\D_{2\ 10} &= 51,5 - H_{2\ 10} = 51,5 - 27,885 = 23,615mca \\D_{2\ 20} &= 51,5 - H_{2\ 20} = 51,5 - 33,178 = 18,322mca\end{aligned}$$

Para o motor 4, os desníveis serão de:

$$\begin{aligned}D_{4\ 5} &= 58 - H_{4\ 5} = 58 - 15,671 = 42,329mca \\D_{4\ 10} &= 58 - H_{4\ 10} = 58 - 19,582 = 38,418mca \\D_{4\ 20} &= 58 - H_{4\ 20} = 58 - 27,404 = 30,596mca\end{aligned}$$

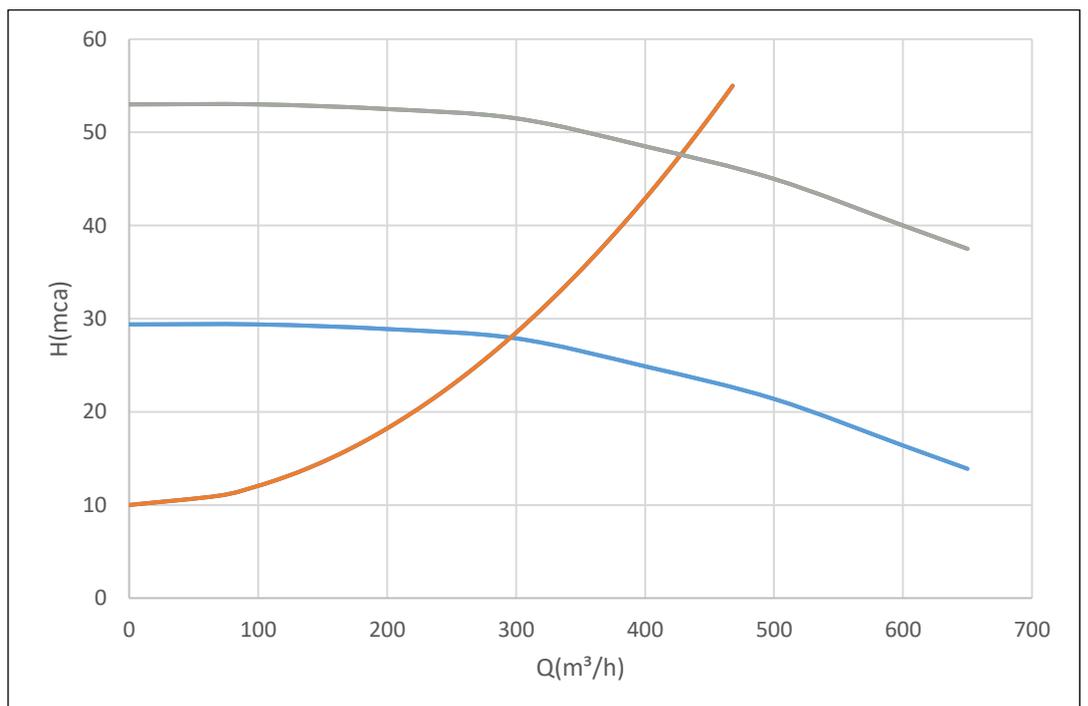
Assim, foram plotadas as mesmas curvas das bombas, porém com os desníveis calculados para cada curva do sistema. Tais curvas podem ser observadas nas imagens 26, 27, 28, 29, 30 e 31.

Figura 26 – Curvas da bomba e do sistema para $H_0 = 5\text{mca}$. Motor 2.



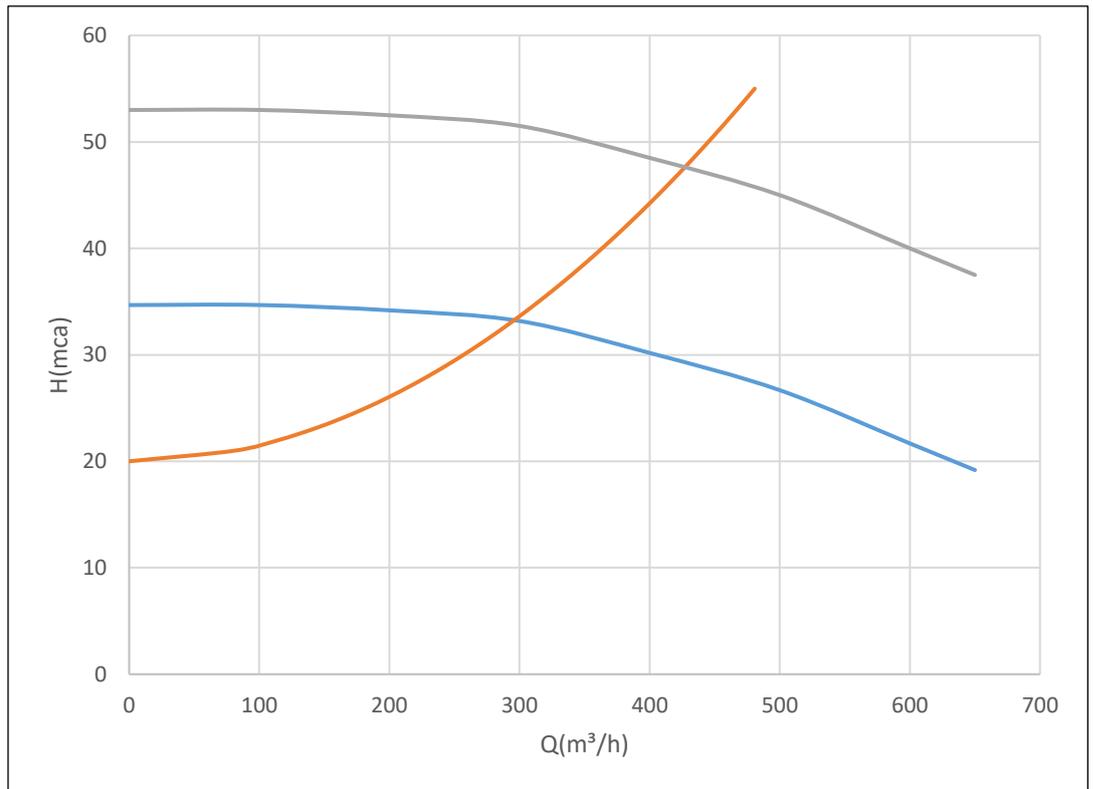
Fonte: Autora.

Figura 27 – Curvas da bomba e do sistema para $H_0 = 10\text{mca}$. Motor 2.



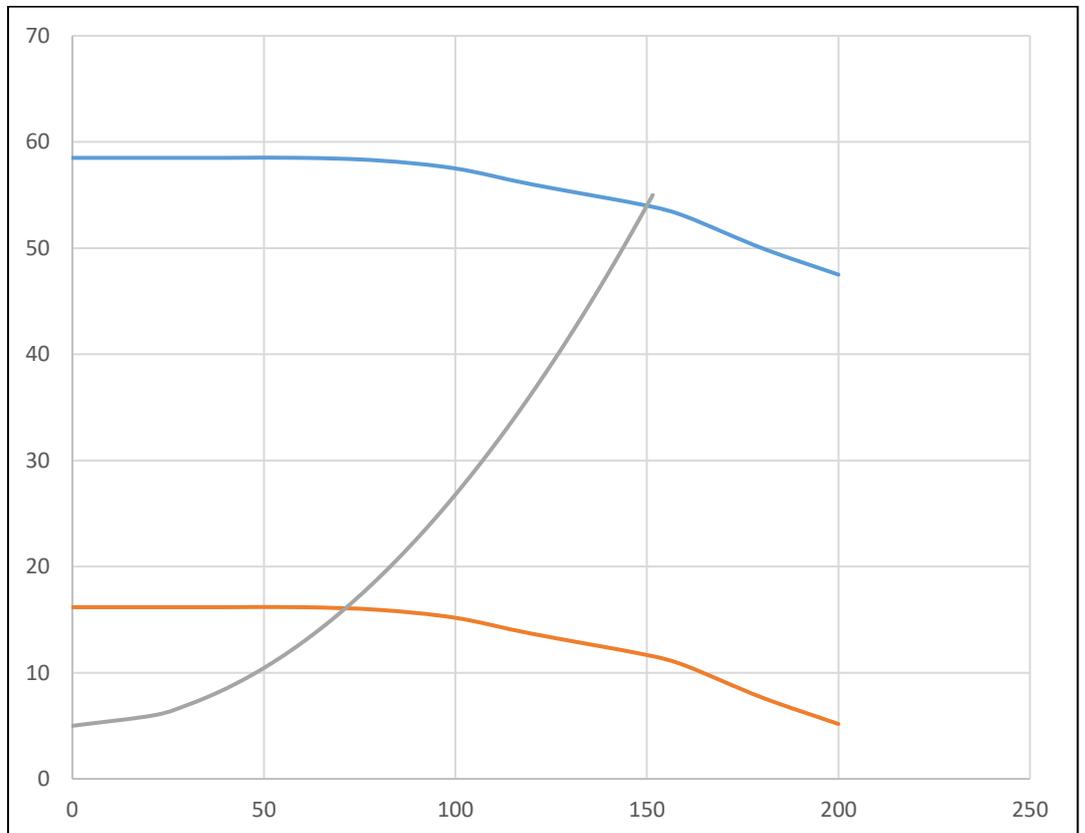
Fonte: Autora.

Figura 28 - Curvas da bomba e do sistema para $H_0 = 20\text{mca}$. Motor 2.



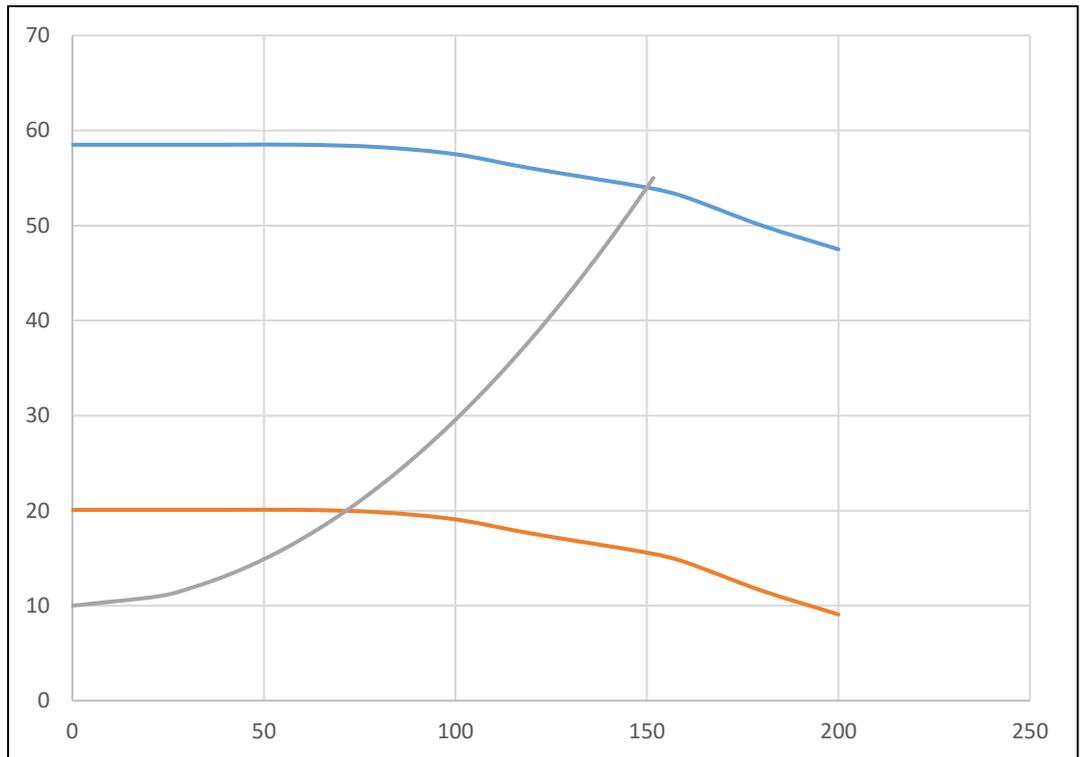
Fonte: Autora.

Figura 29 - Curvas da bomba e do sistema para $H_0 = 5\text{mca}$. Motor 4.



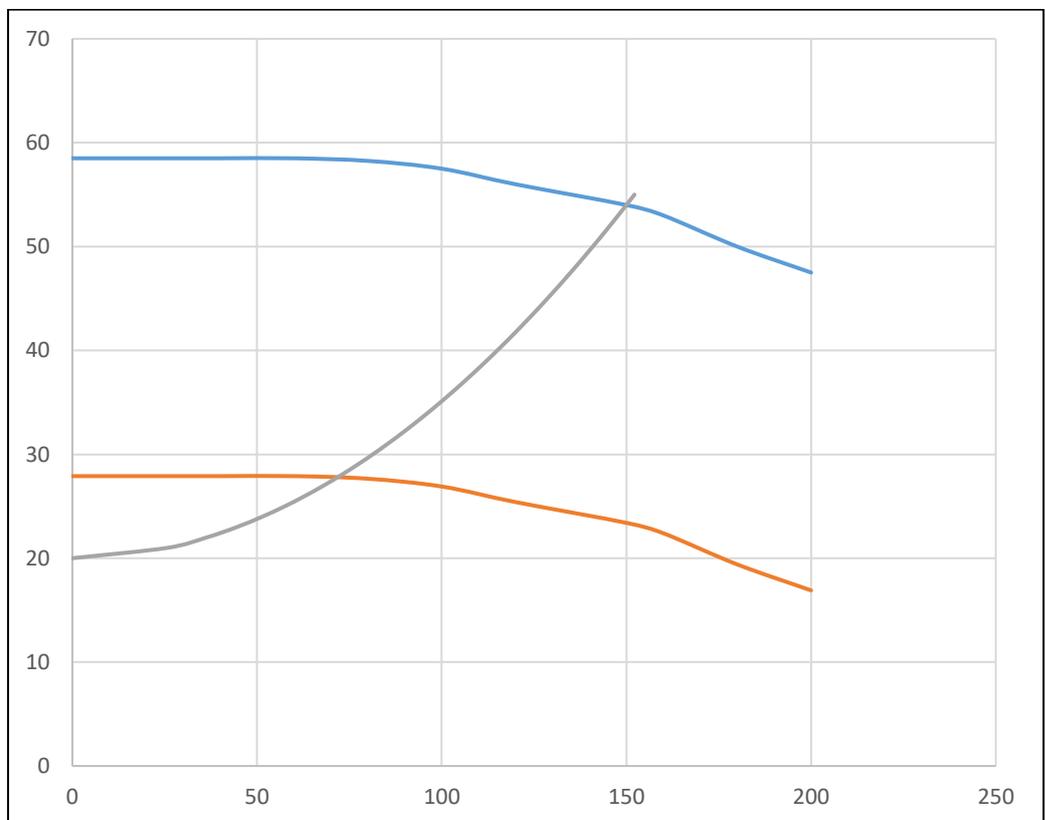
Fonte: Autora.

Figura 30 - Curvas da bomba e do sistema para $H_0 = 10\text{mca}$. Motor 4.



Fonte: Autora.

Figura 31 - Curvas da bomba e do sistema para $H_0 = 20\text{mca}$. Motor 4.



Fonte: Autora.

Com estes novos pontos que cruzam a curva do sistema, pode-se calcular o novo consumo esperado para as diferentes situações estimadas. O próximo passo é encontrar o rendimento da bomba nas curvas de isorrendimento plotadas nas imagens 20 e 21, utilizando os novos valores de H para as mesmas vazões Q anteriores.

Analisando os pontos para o motor 2, obtemos 84% de rendimento para a curva do sistema com $H_0 = 5\text{mca}$ ($295\text{m}^3/\text{h}$; $25,24\text{mca}$); 81,5% de rendimento para a curva do sistema com $H_0 = 10\text{mca}$ ($295\text{m}^3/\text{h}$; $27,89\text{mca}$); e 81,5% de rendimento para a curva do sistema com $H_0 = 20\text{mca}$ ($295\text{m}^3/\text{h}$; $33,18\text{mca}$). Analisando os pontos para o motor 4, obtemos 75% de rendimento para a curva do sistema com $H_0 = 5\text{mca}$ ($70\text{m}^3/\text{h}$; $15,67\text{mca}$); 73% de rendimento para a curva do sistema com $H_0 = 10\text{mca}$ ($70\text{m}^3/\text{h}$; $19,58\text{mca}$); e 70,5% de rendimento para a curva do sistema com $H_0 = 20\text{mca}$ ($70\text{m}^3/\text{h}$; $27,4\text{mca}$).

É possível, então, calcular os novos consumos para as configurações de 40% de válvula aberta, aplicando os novos dados encontrados na equação (3).

Considerando a curva estimada do sistema com $H_0 = 5\text{mca}$, teria-se as seguintes potências $P_{B_{2\ 5}}$ e $P_{B_{4\ 5}}$ consumidas para as bombas dos motores 2 e 4, respectivamente:

$$P_{B_{2\ 5}} = \frac{295 * 25,24 * 2,725}{0,84} = 24,154 \text{ kW}$$

$$P_{B_{4\ 5}} = \frac{70 * 15,67 * 2,725}{0,75} = 3,985 \text{ kW}$$

Nota-se que os carregamentos $C\%_{M_{2\ 5}}$ e $C\%_{M_{4\ 5}}$ dos motores 2 e 4 neste caso seriam de, respectivamente:

$$C\%_{M_{2\ 5}} = \frac{24,154}{150 * 0,746} = 21,6\%$$

$$C\%_{M_{4\ 5}} = \frac{3,985}{60 * 0,746} = 8,9\%$$

Assim, de acordo com as imagens 14 e 17, com tais carregamentos os motores possuirão um rendimento de 87% e 77%, respectivamente. O inversor possui rendimento igual a 97%. Assim, os consumos de energia elétrica final $CM_{2\ 5}$ e $CM_{4\ 5}$, para os motores 2 e 4, respectivamente, será de:

$$CM_{25} = \frac{24,154 * 4200}{0,87 * 0,97} = 120.212 kWh/ano$$

$$CM_{45} = \frac{3,985 * 4200}{0,77 * 0,97} = 22.408 kWh/ano$$

Considerando a curva estimada do sistema com $H_0 = 10$ mca, teria-se as seguintes potências consumidas PB_{210} e PB_{410} para as bombas dos motores 2 e 4, respectivamente:

$$PB_{210} = \frac{295 * 27,89 * 2,725}{0,815} = 27,51 kW$$

$$PB_{410} = \frac{70 * 19,58 * 2,725}{0,73} = 5,11 kW$$

Nota-se que os carregamentos $C\%_{M210}$ e $C\%_{M410}$ dos motores 2 e 4 neste caso seriam de, respectivamente:

$$C\%_{M210} = \frac{27,51}{150 * 0,746} = 24,58\%$$

$$C\%_{M410} = \frac{5,11}{60 * 0,746} = 11,42\%$$

Assim, de acordo com as imagens 14 e 17, com tais carregamentos os motores possuirão um rendimento de 89% e 79%, respectivamente. O inversor possui rendimento igual a 97%. Assim, os consumos de energia elétrica finais CM_{210} e CM_{410} para os motores 2 e 4, respectivamente, serão de:

$$CM_{210} = \frac{27,51 * 4200}{0,89 * 0,97} = 133.838 kWh/ano$$

$$CM_{410} = \frac{5,11 * 4200}{0,79 * 0,97} = 28.007 kWh/ano$$

Considerando a curva estimada do sistema com $H_0 = 20$ mca, teria-se as seguintes potências consumidas PB_{220} e PB_{420} para as bombas dos motores 2 e 4:

$$PB_{2\ 20} = \frac{295 * 33,18 * 2,725}{0,815} = 32,73kW$$

$$PB_{4\ 20} = \frac{70 * 27,4 * 2,725}{0,705} = 7,41 kW$$

Nota-se que os carregamentos $C\%_{M2\ 20}$ e $C\%_{M4\ 20}$ dos motores 2 e 4 neste caso seriam de, respectivamente:

$$C\%_{M2\ 20} = \frac{32,73}{150 * 0.746} = 29,25\%$$

$$C\%_{M4\ 20} = \frac{7,41}{60 * 0.746} = 16,55\%$$

Assim, de acordo com as imagens 14 e 17, com tais carregamentos os motores possuirão um rendimento de 90% e 84%, respectivamente. O inversor possui rendimento igual a 97%. Assim, os consumos de energia elétrica finais $CM_{2\ 20}$ e $CM_{4\ 20}$ para os motores 2 e 4, respectivamente, serão de:

$$CM_{2\ 20} = \frac{32,73 * 4200}{0,9 * 0,97} = 157.464 kWh/ano$$

$$CM_{4\ 20} = \frac{7,41 * 4200}{0,84 * 0,97} = 38.196 kWh/ano$$

A economia final para estes motores será na diferença de consumo das frações de tempo em que opera com 40% de válvula aberta. Assim, temos, para o motor 2, $\Delta CM_{2\ 5}$ para o sistema com $H_0=5mca$, $\Delta CM_{2\ 10}$ para o sistema com $H_0=10mca$ e $\Delta CM_{2\ 20}$ para o sistema com $H_0=20mca$:

$$\Delta CM_{2\ 5} = CM_{2\ 40} - CM_{2\ 5} = 252.656 - 120.212 = 132.444 kWh/ano$$

$$\Delta CM_{2\ 10} = CM_{2\ 40} - CM_{2\ 10} = 252.656 - 133.838 = 118.818 kWh/ano$$

$$\Delta CM_{2\ 20} = CM_{2\ 40} - CM_{2\ 20} = 252.656 - 157.464 = 95.192 kWh/ano$$

Para o motor 4, temos $\Delta CM_{4\ 5}$ para o sistema com $H_0=5mca$, $\Delta CM_{4\ 10}$ para o sistema com $H_0=10mca$ e $\Delta CM_{4\ 20}$ para o sistema com $H_0=20mca$:

$$\Delta CM_{4\ 5} = CM_{4\ 40} - CM_{4\ 5} = 85.104 - 22.408 = 62.696 kWh/ano$$

$$\Delta CM_{4\ 10} = CM_{4\ 40} - CM_{4\ 10} = 85.104 - 28.007 = 57.097 kWh/ano$$

$$\Delta CM_{4\ 20} = CM_{4\ 40} - CM_{4\ 20} = 85.104 - 38.196 = 46.908 kWh/ano$$

4.3.3. Sistemas de Iluminação

As lâmpadas de vapor de mercúrio de 400W encontradas em campo possuem iluminância média de 22.000 lumens por lâmpada [17]. As lâmpadas LED que correspondem à mesma iluminância são as de 200W. Assim, obteríamos um novo consumo total anual CI_{12} e CI_{22} para os circuitos de iluminação 1 e 2, respectivamente, de:

$$CI_{12} = 60 * 0,2 * 8400 = 100.800kWh/ano$$

$$CI_{22} = 27 * 0,2 * 8400 = 45.360kWh/ano$$

Assim, comparando os resultados obtidos em 3.3.4, obteria-se uma economia anual de ΔCI_1 e ΔCI_2 para os circuitos de iluminação 1 e 2, respectivamente, de:

$$\Delta CI_1 = 224.000 - 100.800 = 123.200kWh/ano$$

$$\Delta CI_2 = 100.800 - 45.360 = 55.440kWh/ano$$

5 ANÁLISE ECONÔMICA

Nesta seção serão apresentados os resultados de economia em energia para as iniciativas identificadas, além dos ganhos financeiros que elas representam, cálculos de tempo de retorno dos investimentos e redução de emissões de gases do efeito estufa.

5.1. Total de economia em energia

Conforme calculado na seção 4, foi possível calcular um valor expressivo em economia de energia elétrica.

Para o motor 1, será considerada a economia calculada para o caso em que o motor é trocado por outro melhor dimensionado (100cv; modelo mais eficiente) e o tipo de correias também é trocado. A economia Ec_{M1} para o motor 1 será de:

$$Ec_{M1} = 22.779kWh/ano$$

Para os motores 2 e 4, a economia calculada será referente à implementação do inversor de frequência para a fração de tempo em que estes trabalham com 40% de

abertura de válvula. A economia $E_{CM\ 2\ 5}$ para o motor 2 considerando a curva do sistema com $H_0 = 5mca$ será de:

$$E_{CM\ 2\ 5} = 132.044kWh/ano$$

A economia $E_{CM\ 2\ 10}$ para o motor 2 considerando a curva do sistema com $H_0 = 10mca$ será de:

$$E_{CM\ 2\ 10} = 118.818kWh/ano$$

A economia $E_{CM\ 2\ 20}$ para o motor 2 considerando a curva do sistema com $H_0 = 20mca$ será de:

$$E_{CM\ 2\ 20} = 95.192kWh/ano$$

A economia $E_{CM\ 4\ 5}$ para o motor 4 considerando a curva do sistema com $H_0 = 5mca$ será de:

$$E_{CM\ 4\ 5} = 62.696kWh/ano$$

A economia $E_{CM\ 4\ 10}$ para o motor 4 considerando a curva do sistema com $H_0 = 10mca$ será de:

$$E_{CM\ 4\ 10} = 57.097kWh/ano$$

A economia $E_{CM\ 4\ 20}$ para o motor 4 considerando a curva do sistema com $H_0 = 20mca$ será de:

$$E_{CM\ 4\ 20} = 46.908kWh/ano$$

Para o motor 3, não será feita a troca do motor pois este apresenta carregamento próximo de 90% e rendimento próximo de 92%. Assim, a economia $E_{CM\ 3}$ para este motor será calculada apenas para a troca do tipo de correias (de lisas para dentadas). Logo, temos:

$$E_{CM\ 3} = 4.730kWh/ano$$

Para os circuitos de iluminação, tem-se as economias calculadas para troca das lâmpadas de vapor de mercúrio para lâmpadas LED, com iluminação equivalente. Assim, as economias para os circuitos 1 e 2 de iluminação, E_{CI1} e E_{CI2} , respectivamente, serão:

$$E_{CI1} = 123.200kWh/ano$$

$$E_{CI2} = 55.440kWh/ano$$

Somando todas as economias anuais encontradas, temos um total de 206.149kWh/ano, excluindo os motores 2 e 4. Considerando a curva do sistema com $H_0 = 5mca$, temos um total de 400.889kWh/ano. Considerando a curva do sistema com $H_0 = 10mca$, temos um total de 382.064kWh/ano. Considerando a curva do sistema com $H_0 = 20mca$, temos um total de 348.249kWh/ano.

5.2. Tempo de retorno do investimento

O motor para substituição do motor 1 foi cotado com a empresa WEG[19]. O preço para sua aquisição é de R\$47.700,00 e sua ficha técnica encontra-se no anexo 1 deste documento. O custo para a correia em V dentada será de cerca de R\$1.000,00 [21].

Os inversores para os motores 2 e 4 também foram cotados com o fabricante ABB, e o preço para aquisição do inversor para o motor 2 é cerca de R\$73.201,16, enquanto para o motor 4 é de R\$33.277,77. A ficha técnica dos inversores pode ser encontrada no site do fabricante [20] e [28].

Para o motor 3, o investimento será próximo de R\$1.000,00 para a compra de três correias de acoplamento em V dentada, conforme descrição técnica [21].

Para os circuitos de iluminação, será necessária a compra de 87 lâmpadas LED com potência de 200W, conforme descrição técnica [22]. O custo para cada uma será cerca de R\$300,00. Assim, o investimento total para estas iniciativas será de R\$26.100,00.

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.

Dessa forma, multiplicando esta taxa pela economia em kWh obtida para cada iniciativa, temos que a economia em reais (R\$) será de:

$$E_{CM1} = \frac{22.779kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 10.250,55R\$/ano$$

$$E_{CM25} = \frac{132.044kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 59.419,80R\$/ano$$

$$E_{CM210} = \frac{118.818kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 53.468,10R\$/ano$$

$$E_{CM220} = \frac{95.192kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 42.836,40R\$/ano$$

$$E_{CM45} = \frac{62.696kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 28.213,20R\$/ano$$

$$E_{CM410} = \frac{57.097kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 25.693,65R\$/ano$$

$$E_{CM420} = \frac{46.908kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 21.108,60R\$/ano$$

$$E_{CM3} = \frac{4.730kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 2.128,50R\$/ano$$

$$E_{CI1} = \frac{123.200kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 55.440,00R\$/ano$$

$$E_{CI2} = \frac{55.440kWh}{ano} * \frac{0,45R\$}{kWh} = 24.948,00R\$/ano$$

Sendo E_{CM1} a economia anual calculada para o motor 1; E_{CM25} e E_{CM45} a economia anual para os motores 2 e 4 considerando o sistema com $H_0 = 5mca$; E_{CM210} e E_{CM410} a economia anual para os motores 2 e 4 considerando o sistema com $H_0 = 10mca$; E_{CM220} e E_{CM420} a economia anual para os motores 2 e 4 considerando o

sistema com $H_0 = 20mca$; E_{CM3} a economia anual calculada para o motor 3; E_{CI1} a economia anual calculada para o circuito de iluminação 1 e E_{CI2} a economia anual calculada para o circuito de iluminação 2.

Com as economias financeiras anuais, é possível calcular o tempo de retorno dos investimentos citados anteriormente. Será utilizada a seguinte equação para este cálculo [17]:

$$t_R = \frac{\log\left(\frac{ECO_{R\$}}{ECO_{R\$} - \Delta C * i}\right)}{\log(1 + i)} \quad (9)$$

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 6%.

Assim, para a troca do motor 1, o tempo de retorno t_{RM1} será de:

$$t_{RM1} = \frac{\log\left(\frac{10.250,55}{10.250,55 - 48.700 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 5,76 \text{ anos}$$

Para o motor 2 considerando a curva do sistema com $H_0=5mca$, o tempo de retorno t_{RM25} será de:

$$t_{RM25} = \frac{\log\left(\frac{59.419,80}{59.419,80 - 73.201,16 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,32 \text{ anos}$$

Para o motor 2 considerando a curva do sistema com $H_0=10mca$, o tempo de retorno t_{RM210} será de:

$$t_{RM210} = \frac{\log\left(\frac{53.468,10}{53.468,10 - 73.201,16 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,47 \text{ anos}$$

Para o motor 2 considerando a curva do sistema com $H_0=20mca$, o tempo de retorno t_{RM220} será de:

$$t_{RM220} = \frac{\log\left(\frac{42.836,40}{42.836,40 - 73.201,16 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,86 \text{ anos}$$

Para o motor 4 considerando a curva do sistema com $H_0=5mca$, o tempo de retorno t_{RM45} será de:

$$t_{RM45} = \frac{\log\left(\frac{28.213,20}{28.213,20 - 33.277,77 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,26 \text{ anos}$$

Para o motor 4 considerando a curva do sistema com $H_0=10mca$, o tempo de retorno t_{RM410} será de:

$$t_{RM410} = \frac{\log\left(\frac{25.693,65}{25.639,65 - 33.277,77 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,39 \text{ anos}$$

Para o motor 4 considerando a curva do sistema com $H_0=20mca$, o tempo de retorno t_{RM420} será de:

$$t_{RM420} = \frac{\log\left(\frac{21.108,60}{21.108,60 - 33.277,77 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,71 \text{ anos}$$

Para o motor 3, o tempo de retorno t_{RM3} será de:

$$t_{RM3} = \frac{\log\left(\frac{2.128,50}{2.128,50 - 1.000 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 0,49 \text{ anos} = 5,88 \text{ meses}$$

Para os circuitos de iluminação, o tempo de retorno t_{RCI} será de:

$$t_{RCI} = \frac{\log\left(\frac{55.440 + 24.948}{55.440 + 24.948 - 26.100 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 0,338 \text{ anos} = 4,05 \text{ meses}$$

O tempo de retorno dos investimentos geral poderá ser calculado utilizando o total de economias para cada tipo de sistema estimado e o total de investimento

necessário. O montante total para implementação das iniciativas será de, aproximadamente, R\$183.278,93.

Para o sistema com $H_0 = 5\text{mca}$, a economia energética foi de 400.889kWh, resultando em 180.400,05R\$ anuais. Logo, o tempo de retorno geral t_{R_5} para este sistema será de:

$$t_{R_5} = \frac{\log\left(\frac{180.400,05}{180.400,05 - 183.278,93 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,08 \text{ anos}$$

Para o sistema com $H_0 = 10\text{mca}$, a economia energética foi de 382.064kWh, resultando em 171.928,80R\$ anuais. Logo, o tempo de retorno geral $t_{R_{10}}$ para este sistema será de:

$$t_{R_{10}} = \frac{\log\left(\frac{171.928,80}{171.928,80 - 183.278,93 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,13 \text{ anos}$$

Para o sistema com $H_0 = 20\text{mca}$, a economia energética foi de 348.049kWh, resultando em 156.622,05R\$ anuais. Logo, o tempo de retorno geral $t_{R_{20}}$ para este sistema será de:

$$t_{R_{20}} = \frac{\log\left(\frac{156.622,05}{156.622,05 - 183.278,93 * 0,06}\right)}{\log(1 + 0,06)} = 1,25 \text{ anos}$$

5.3. Redução em emissões de gases do efeito estufa

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 [23]. A média dos últimos 5 anos informada foi de 0,09 kg.CO2/kWh.

No item 5.1, foram obtidas as reduções de consumo energético conforme tabela 5. 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.

Tabela 5 – Dados de economia energética e redução de emissões de CO₂.

Sistema	Economia [kWh]	Redução kg CO₂	Redução ton CO₂
H0 = 5mca	400.889	36.080,01	36,08
H0 = 10mca	382.064	34.385,76	34,39
H0 = 20mca	348.049	31.324,41	31,32

Fonte: Autora.

5.4. Consolidação de resultados

Consolidando os dados obtidos nesta seção, temos:

Tabela 6 – Resultados consolidados do trabalho.

Sistema	Economia [R\$]	Economia [kWh]	Tempo de retorno [anos]	Redução kg CO₂	Redução ton CO₂
H0 = 5mca	180.400,05	400.889	1,08	36.080,01	36,08
H0 = 10mca	171.928,80	382.064	1,13	34.385,76	34,39
H0 = 20mca	156.622,05	348.049	1,25	31.324,41	31,32

Fonte: Autora.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas seções 4 e 5 foi possível calcular o potencial de economia em cada um 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.

Considerando o caso estimado que gera menos ganhos (pior caso: sistema com H0=20mca), o total de energia que seria economizado corresponde a cerca de 348MWh/ano. De acordo com os cálculos realizados no item 4.2, o total de consumo atual por estes equipamentos é de cerca de 1.872 MWh. Logo, a economia calculada em sua pior situação corresponderia a, aproximadamente, 18,6% da quantidade de energia consumida atualmente, o que representa uma parcela significativa de seu consumo e, também, dos custos da empresa com sua operação.

Ainda referente ao pior caso considerado, as economias calculadas possibilitariam uma redução de cerca de 30 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 4 motores elétricos e 2 circuitos de iluminação. 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 das iniciativas referentes aos motores 2 e 4, foram feitas estimativas para as curvas do sistema, visto que não foi possível obter os dados exatos necessários para sua construção. Os desníveis foram estimados em 5m, 10m e 20m, e então foi realizado o estudo para estas 3 possibilidades. Percebe-se, no entanto, que a terceira situação é a mais provável, visto que os motores 2 e 4 operariam com 30% e 17% de seu carregamento, respectivamente. Estas situações não são adequadas 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 destes motores, visto que em condições nominais (70% e 60% de abertura de válvula) eles se encontram com cerca de 65% de carregamento.

O tempo de retorno encontrado para os investimentos foi relativamente baixo, sendo o maior deles igual a aproximadamente 5,76 anos, para a troca do motor 1. Porém, quando calculado o tempo de retorno geral para as iniciativas, nota-se que o maior tempo de retorno é igual a 1 ano e 3 meses.

.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.

Também, foi notado que a análise de eficiência energética é um estudo que se faz cada vez mais necessário em todas as divisões de consumidores, podendo ser industriais, comerciais ou até mesmo residenciais. Com a aquisição de equipamentos eletrodomésticos mais eficientes e que possuem o selo PROCEL, bem como uma utilização consciente da energia elétrica evitando desperdícios, os consumidores residenciais e comerciais podem gerar ganhos expressivos e redução na conta de energia de suas instalações.

Principalmente, consumidores industriais possuem maiores potenciais de economia, visto que utilizam-se de muitos sistemas motrizes e são uma parcela expressiva do consumo energético brasileiro. Uma prática comum nas grandes indústrias deve ser o estudo e

diagnóstico energético de suas instalações e equipamentos, promovendo projetos de implementação das iniciativas de eficiência energética e focando nos benefícios econômicos e ambientais que estes podem gerar.

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/ELETROBRÁS. **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/ELETROBRÁS. **Correias transportadoras: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BE0C1F51E-75B3-4B3D-9BBB-D4368368B5BD%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun, 2022.
- [3] PROCEL/ELETROBRÁS. **Acoplamento motor carga: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B09A931F5-4035-4E20-B91C-3C7BA218C064%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun. 2022.
- [4] PROCEL/ELETROBRÁS. **Metodologia de realização de diagnóstico energético: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BF4FB5E1B-C77B-4A61-9215-105DD907D896%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun, 2022.
- [5] PROCEL/ELETROBRÁS. **Compressores: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B91B25A62-6B4D-4584-984B-0D04053DF824%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun, 2022.
- [6] PROCEL/ELETROBRÁS. **Ventiladores e exaustores: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B1111A529-EF13-404B-87E5-F40E45401F27%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun, 2022.
- [7] PROCEL/ELETROBRÁS. **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-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7BDA6A7397-67A7-4BCA-893F-F6F433A41E02%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun, 2022.

- [8] PROCEL/ELETROBRÁS. **Energia elétrica: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B222052C6-D362-40E3-82AB-6DDA3E962E14%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun. 2022
- [9] PROCEL/ELETROBRÁS. **Acionamento eletrônico: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B86B7E985-B64E-4B7D-8403-8358A3E389E4%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun. 2022.
- [10] PROCEL/ELETROBRÁS. **Bombas: guia básico**. 1ªed. Confederação Nacional da Indústria, Instituto Euvaldo Lodi, 2009. Disponível em: <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B5A08CAF0-06D1-4FFE-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B6695B593-D4E9-4C48-B173-D868E7743F13%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun. 2022
- [11] PROCEL/ELETROBRÁS. **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-B335-95D83F8DFB98%7D&Team=¶ms=itemID=%7B8AFBBF99-CEB0-4DA1-9135-2779A59473D9%7D;&UIPartUID=%7B05734935-6950-4E3F-A182-629352E9EB18%7D>. Acesso em 09 jun. 2022.
- [12] Conservação de Energia - **Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. 3ªed. Universidade Federal de Itajubá, FUPAI, 2006. ISBN 856.036.900-7
- [13] FUPAI, **Eficiência Energética – Teoria e prática**. 1ªed. Universidade Federal de Itajubá, 2007. ISBN 978-85-60369-01-0.
- [14] **Atlas da Eficiência Energética**, Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2021. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-651/Atlas2021_PT_2022_02_04.pdf
- [15] **Balanco Energético Nacional - Relatório Síntese 2022**, Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>
- [16] **Usos Finais de Energia Elétrica no Setor Residencial Brasileiro**, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, 2021. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/node/480>
- [17] FILHO, João Mamede. **Instalações Elétricas Industriais**. 9. ed. LTC, 2017
- [18] SILVA, Sérgio Ferreira de Paula. **Anotações de Aula – Eficiência Energética**. Universidade Federal de Uberlândia.

- [19] WEG – Website. Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>
- [20] Inversor ABB 150cv – Disponível em: <https://loja.br.abb.com/inversor-de-frequencia-trifasico-150cv-110kw-380-440v-206a-acs580-01-206a-4-b056.html#>
- [21] Lâmpada LED industrial – 200W. Disponível em: <https://bit.ly/3AjdBuG>
- [22] Correia dentada industrial para motor 3. Disponível em: <https://bit.ly/3bNFhi3>
- [23] BRASIL, Ministério da Ciência e Tecnologia. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/dados-e-ferramentas/fatores-de-emissao>
- [24] UNESP, Departamento de Engenharia Elétrica, **Soft Starter**. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/softstarter.pdf>
- [25] UNB, **Uma análise sobre inversores de frequência e distorções harmônicas e inter-harmônicas**, 2013. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/8247/1/2013_WesleyRodriguesdeOliveira.pdf
- [26] WEG – Seleção de Motores. Disponível em: https://ecatalog.weg.net/TEC_CAT/tech_motor_dat_web.asp
- [27] **CATÁLOGO DE BOMBAS KSB**. Disponível em: http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/daniel/downloads/material/graduacao/it%20503/mc_a27_40_42_44_4p_e_s_5%5b1%5d.pdf
- [28] Inversor ABB 60cv. Disponível em: <https://loja.br.abb.com/inversor-de-frequencia-trifasico-60cv-45kw-380-440v-88a-acs580-01-088a-4.html>

APÊNDICE A – FICHA TÉCNICA DO MOTOR 1: SUBSTITUIÇÃO

Neste Apêndice consta a ficha técnica do motor escolhido para substituir o motor 1 em análise neste estudo. Tal ficha foi fornecida pelo fornecedor WEG.

FOLHA DE DADOS					
Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola					
Cliente : _____					
Linha do produto : Super Premium Trifásico			Código do produto : 13029862		
Carcaça	: 250S/M			Tempo de rotor bloqueado	: 21s (frio) 12s (quente)
Potência	: 75 kW (100 HP-cv)			Elevação de temperatura	: 80 K
Número de polos	: 4			Regime de serviço	: S1
Frequência	: 60 Hz			Temperatura ambiente	: -20°C a +40°C
Tensão nominal	: 220/380/440 V			Altitude	: 1000 m
Corrente nominal	: 250/145/125 A			Grau de proteção	: IPW55
Corrente de partida	: 2325/1346/1163 A			Método de refrigeração	: IC411 - TFVE
Ip/In	: 9.3			Forma construtiva	: B14D
Corrente a vazio	: 110/63.7/55.0 A			Sentido de rotação ¹	: Ambos
Rotação nominal	: 1785 rpm			Nível de ruído ²	: 68.0 dB(A)
Escorregamento	: 0.83 %			Método de partida	: Partida direta
Conjugado nominal	: 40.9 kgfm			Massa aproximada ³	: 590 kg
Conjugado de partida	: 380 %				
Conjugado máximo	: 390 %				
Classe de isolamento	: F				
Fator de serviço	: 1.25				
Momento de inércia (J)	: 1.21 kgm ²				
Categoria	: N				
Potência	50%	75%	100%	Esforços na fundação	
Rendimento (%)	95.4	95.8	96.2	Tração máxima : 1277 kgf	
Cos Φ	0.65	0.76	0.82	Compressão máxima : 1867 kgf	
		<u>Dianteiro</u>		<u>Traseiro</u>	
Tipo de mancal	:	6314 C3		6314 C3	
Vedação	:	WSeal		WSeal	
Intervalo de lubrificação	:	12000 h		12000 h	
Quantidade de lubrificante	:	27 g		27 g	
Tipo de lubrificante	:	Mobil Polyrex EM			