

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
UNIVERSIDADE ABERTA DO BRASIL  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO À DISTÂNCIA  
ESPECIALIZAÇÃO EM EFICIÊNCIA ENERGÉTICA APLICADA AOS PROCESSOS  
PRODUTIVOS

Roberto Ermy Volkman

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA E DO  
CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS EM UMA INDÚSTRIA  
PETROQUÍMICA**

Novo Hamburgo, RS  
2017

**Roberto Ermy Volkmann**

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA E DO  
CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS EM UMA INDÚSTRIA  
PETROQUÍMICA**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada Aos Processos Produtivos (Ead), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.**

Orientador: Flávio Dias Mayer

Novo Hamburgo, RS  
2017

**Roberto Ermy Volkmann**

**ANÁLISE DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA E DO  
CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS EM UMA INDÚSTRIA  
PETROQUÍMICA**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada Aos Processos Produtivos (Ead), da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do título de **Especialista em Eficiência Energética Aplicada aos Processos Produtivos.**

**Aprovado em 5 de agosto de 2017:**

---

Prof. Ademar Michels, Dr. (UFSM)  
Presidente / Coorientador

---

Isis Portolan dos Santos, Dr<sup>a</sup>. (UFSM)

---

Cesar A. Valverde Salvador, Dr. (UFSM)

Novo Hamburgo, RS  
2017

## RESUMO

# ANÁLISE DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA E DO CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS EM UMA INDÚSTRIA PETROQUÍMICA

AUTOR: ROBERTO ERMY VOLKMANN

ORIENTADOR: Flávio Dias Mayer

Este trabalho analisou o Sistema de Gestão de Energia de uma planta petroquímica, a metodologia utilizada para controle contínuo do desempenho energético da planta, as LBE's e os planos de ação discutidos nas reuniões da CICE. Aliado a isto, foi avaliado o carregamento de 20 motores de indução trifásicos de média tensão através do método expedito de linearização da curva do conjugado. Com a verificação dos dados de placa e medição da rotação de trabalho desses motores, encontrou-se uma média de carregamento de 54% nos motores analisados, e o cálculo do rendimento médio resultou em 69%. Também foi proposto um *retrofit* para substituição de um motor de 775cv por outro de 500cv, a partir da análise da fatura de energia elétrica de uma subestação de bombeio de água bruta. Com isso, constatou-se uma possibilidade de economia anual de R\$ 565.650,74 na fatura de energia e *pay-back* de 7 meses. Percebeu-se, entretanto, através da avaliação da potência ativa fornecida a este motor e da vazão fornecida pela bomba centrífuga acionada, que o ponto de operação desta estava dentro da região de maior rendimento da bomba, conforme a curva característica fornecida pelo fabricante. Concluiu-se, portanto, que o método expedito apresenta precisão muito baixa para ser utilizado como método não intrusivo de avaliação de eficiência energética de motores elétricos na indústria.

**Palavras-chave:** Eficiência energética. Planta petroquímica. Carregamento de Motores de Indução. SGE.

## ***ABSTRACT***

# **ANALYSIS OF AN ENERGY MANAGEMENT SYSTEM AND THE LOADING OF ELECTRIC MOTORS IN AN PETROCHEMICAL INDUSTRY**

***AUTHOR:*** ROBERTO ERMY VOLKMANN

***ADVISOR:*** Flávio Dias Mayer

This final paper analyzed the Energy Management System of a petrochemical plant, the methodology used for continuous control of the energy performance of the plant, the energy baselines and the action plans discussed at the Internal Commission for Energy Conservation meetings. In addition, it was evaluated the loading of 20 three-phase medium voltage induction motors through the expedited linearization method of the conjugate curve. By checking the plate data and measuring the working speed of these motors, a mean load of 54% was found in the motors analyzed, and the calculation of the average efficiency resulted in 69%. It was also proposed a retrofit to replace a motor of 775cv by another of 500cv, from the analysis of the electricity bill of a substation of raw water pumping. With this, it was verified a possibility of annual savings of R\$ 565,650.74 in the energy and pay-back bill of 7 months. However, through the evaluation of the active power supplied to this engine and the flow provided by the driven centrifugal pump, the operating point of the pump was within the region of highest efficiency of the pump, according to the characteristic curve provided by the manufacturer. It was concluded, therefore, that the expedited method presents very low accuracy to be used as non-intrusive method of evaluating the energy efficiency of electric motors in the industry.

***Keywords:*** *Energy efficiency. Petrochemical plant. Induction motor load. SGE.*

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estratégias globais para redução na emissão de GEE.....	11
Figura 2 – Diagrama de sankey de um motor de indução.....	19
Figura 3 – Curva característica de motor de 100 cv .....	21
Figura 4 – Método de linearização da curva do conjugado .....	24
Figura 5 – Câmara estroboscópica Shimpo Instruments DT-725.....	26
Figura 6 – Termovisor Fluke Ti32.....	26
Figura 7 – Relés de proteção microprocessados.....	27
Figura 8 – Esquema de ligação e função de proteção do relé 339.....	28
Figura 9 – Esquema de ligação e funções de proteção do relé GE 750 .....	28
Figura 10 – Imagem térmica .....	40
Figura 11 – Curva da bomba KSB SNZ500-630.....	45
Figura 12 – Esquema simplificado da alimentação do motor .....	47
Figura 13 – Fluxo de potência do motor analisado.....	49
Figura 14 – Medição de rotação com Shimpo.....	51
Figura 15 – Medição de rotação com CSI.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de placa e medições em campo.....	41
Tabela 2 – Cálculo do carregamento dos motores.....	42
Tabela 3 - Propagação do erro de medição da câmara estroboscópica .....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Cronograma.....	23
Quadro 2 – Indicadores e metas acompanhados pela CICE .....	35
Quadro 3 – Características elétricas para <i>retrofit</i> de motor .....	44
Quadro 4 – Medições no campo .....	46



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
BEN	Balço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCM	Centro de Controle de Motores
CDC	Centro de Distribuição de Cargas
CEDEAP	Curso de Especialização em Eficiência Energética Aplicada à Processos Produtivos
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética
DE	Diagnóstico Energético
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IDE	Indicador de Desempenho Energético
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IEC 60034-30:2008	<i>Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE Code)</i>
IEC 60034-30-1:2014	<i>Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE Code)</i>
IEC TS 60034-30-2: 2016	<i>Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE Code)</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LBE	Linha de Base Energética
MIT	Motor de Indução Trifásico
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR ISO 50001:2011	Sistemas de Gestão da Energia – Requisitos com orientações para uso
NBR ISO 50002:2014	Diagnósticos Energéticos – Requisitos com orientação para uso
NBR ISO 50004:2016	Sistemas de Gestão da Energia – Guia para implementação, manutenção e melhoria de um sistema de gestão da energia
NBR 5383-1:2002	Máquinas elétricas girantes. Parte 1: Motores de indução trifásicos - Ensaio
NR13	Norma Regulamentadora 13 – Vasos e Caldeiras
NR20	Norma Regulamentadora 20 – Segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis
PDCA	Planejar-Fazer-Verificar-Agir ( <i>Plan-Do-Check-Act</i> )
PEE	Programa de Eficiência Energética
PIMVP	Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance
PNE	Plano Nacional de Energia
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROPEE	Procedimentos do Programa de Eficiência Energética
ROL	Receita Operacional Líquida
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SGE	Sistema de Gestão de Energia
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potência
UNFCCC	<i>United Nation Framework Convention on Climate Change</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	10
1.2	OBJETIVOS.....	12
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivos gerais.....</b>	<b>12</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>13</b>
1.2.2.1	SGE.....	13
1.2.2.2	Rendimento operacional de motores elétricos.....	13
1.2.2.3	Proposta de retrofit.....	13
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>14</b>
2.1	PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA A INDÚSTRIA.....	14
2.2	SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA.....	15
2.3	MOTORES ELÉTRICOS.....	16
<b>2.3.1</b>	<b>Motores elétricos de indução.....</b>	<b>17</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Regulamentação dos Índices de Eficiência para MIT.....</b>	<b>19</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Carregamento de motores.....</b>	<b>20</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>22</b>
3.1	PROCEDIMENTOS NA PESQUISA.....	22
3.2	ESTIMATIVA DE CUSTOS.....	22
3.3	CRONOGRAMA DE ATUAÇÃO.....	22
3.4	CÁLCULO DO RENDIMENTO PELO MÉTODO EXPEDITO.....	23
3.5	INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	25
3.6	RELÉS DE PROTEÇÃO.....	26
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>29</b>
4.1	SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA.....	29
<b>4.1.1</b>	<b>Requisitos gerais e responsabilidade da direção.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Política energética.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Ações rotineiras relacionadas ao desempenho energético.....</b>	<b>30</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Planejamento energético.....</b>	<b>32</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Implementação e operação.....</b>	<b>34</b>
<b>4.1.6</b>	<b>Verificação &amp; Medição.....</b>	<b>35</b>
4.2	CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS.....	39
<b>4.2.1</b>	<b>Medições realizadas.....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análise de carregamento de motor pelo método expedito da linearização.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Avaliação da medição de rotação.....</b>	<b>49</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Análise de faturamento de energia.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2.5</b>	<b>Análise econômica para retrofit de motor.....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>58</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a eficiência das máquinas elétricas e sistemas de fornecimento de energia elétrica torna-se um desafio a todos os ramos da indústria, inclusive aqueles que possuem sistemas próprios de geração, que é o caso de grande parte das indústrias petroquímicas. Os custos de operação destas instalações crescem junto com as restrições ambientais de emissões atmosféricas. O transporte brasileiro é caracterizado pelo modal rodoviário. Com o acréscimo do número de veículos automotivos nas estradas, o impacto dos contaminantes dos gases expelidos é maior e aumenta a incidência de doenças respiratórias na população. Neste contexto, a redução de compostos sulfúricos e contaminantes nos combustíveis torna-se necessária. Logo, o abastecimento do mercado brasileiro com combustíveis “limpos” deve ser prioritário. Entretanto, gerenciar o alto investimento de implantação, operação e manutenção de plantas petroquímicas, aliado à necessidade de manter o negócio sustentável e economicamente viável, ou seja, retornando lucro para o acionista, é uma decisão complexa. Isto sem contar que a operação dos equipamentos, tubulações e máquinas dentro de condições seguras é essencial para reduzir os riscos para a comunidade no entorno da indústria e para os trabalhadores que as operam, visto que manipulam produtos inflamáveis. Portanto, as definições relativas à gestão do negócio devem estar voltadas tanto para: i) a continuidade operacional das plantas, de forma a atender os clientes com a demanda e a qualidade requerida, ii) o atendimento à legislação ambiental e iii) a preocupação com a segurança ocupacional dos colaboradores e da comunidade no entorno da indústria, garantindo os fatores de SMS (Segurança, Meio Ambiente e Saúde), mas também, e não menos importante, iv) para a melhoria contínua do desempenho energético.

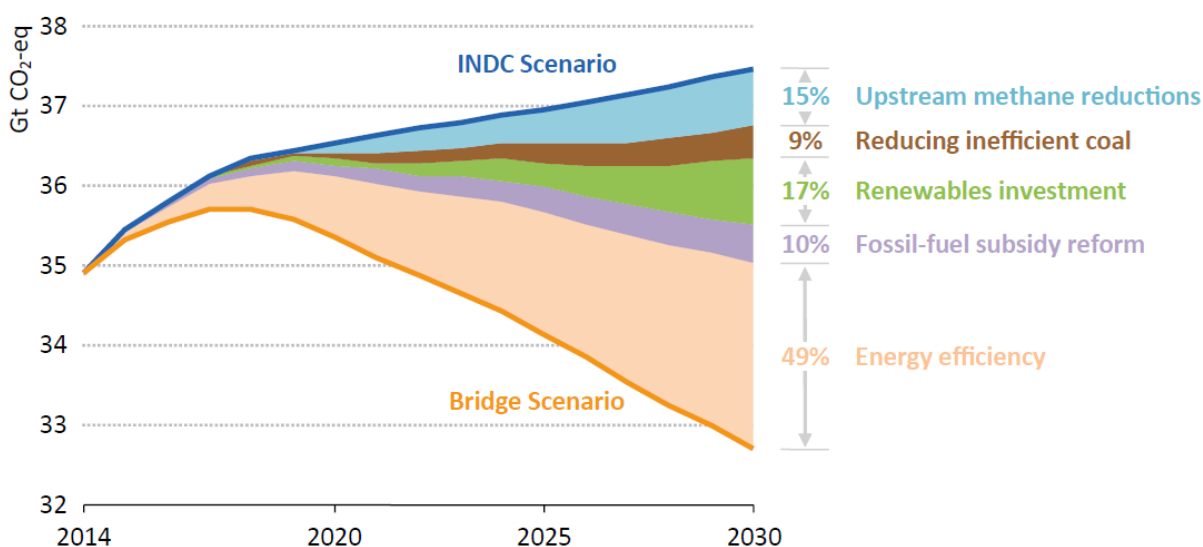
### 1.1 JUSTIFICATIVA

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, traduzido para português) propõe que os países membros descrevam ações climáticas pós 2020 conhecidas como sua pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada (*intended Nationally Determined Contribution* – iNDC) que determinam em grande parte se o mundo atingirá os objetivos de longo prazo do Acordo de Paris: manter o aumento da temperatura média global bem abaixo de 2°C até a segunda metade do século e, após, alcançar emissões zero líquidas. Os países desenvolvidos devem tomar a dianteira na implementação de metas ambiciosas de redução de gases de efeito estufa e os países em desenvolvimento devem

contribuir de forma compatível com o crescimento econômico e social. Conforme o site do Itamaraty (Brasil, 2017), o Brasil está adotando uma meta de redução de emissões de 37% em 2025, em relação aos níveis de 2005, e está indicando que as emissões poderão ser reduzidas em até 43%, em 2030.

Atualmente, em alguns cenários globais a eficiência energética é descrita como a principal estratégia para o abatimento de carbono através da redução na emissão dos gases de efeito estufa. A *International Energy Agency* (IEA) dividiu os diferentes tipos de ação, em um cenário até 2030, e a eficiência energética, conforme demonstrado na Figura 1, é a responsável por quase 50%, comparada a todas as outras alternativas, como investimento em energias renováveis, corte de subsídios para combustíveis fósseis, redução da produção de metano na cadeia de óleo e gás. Sgarbi (2017) lembra que cerca de 2/3 do potencial de eficiência energética no mundo estão represados, sendo a maior parcela nas edificações.

Figura 1 – Estratégias globais para redução na emissão de GEE



Fonte: IEA (2015)

Conforme dados do BEN 2016 (EPE/MME, 2017), a participação de renováveis na matriz elétrica brasileira, em 2015, foi de 75,5%. Comparado com 2014, houve avanço de 1,2%, segundo a EPE, devido à queda de geração térmica a derivados de petróleo e ao incremento das gerações à biomassa e eólica, apesar da redução de oferta hidráulica. O Brasil é privilegiado por sua vasta capacidade de geração de energia hidráulica e por isso a participação de energia renovável é muito maior que na geração mundial, que, com base em dados de 2013, está em 21,2%. A oferta interna de energia elétrica disponibilizada reduziu 1,3%, de 2014 a 2015,

devido ao desaquecimento do setor industrial e redução do PIB. A capacidade instalada do setor elétrico brasileiro aumentou 5,2%. O setor industrial consumiu 37,6% de todo o consumo de eletricidade brasileiro, em 2016.

Os principais usos finais são força motriz, calor de processo e aquecimento direto, sendo que a força motriz é o que possui menor rendimento, 47,1% no levantamento do Balanço de Energia Útil (BEU) de 2004 (BEN, 2016). A Associação Brasileira de Empresas de Serviços de Conservação de Energia (ABESCO) considerou em estudo de abril de 2017 (ABESCO, 2017) que o Brasil possui um percentual de economia de energia de 6,2% no setor industrial. Considerando que 55% do consumo de energia elétrica na indústria é destinado à alimentação de motores elétricos (Elektro, s.d.), os motores são responsáveis por mais de 20% do consumo de energia elétrica distribuída no Brasil.

Conforme descrito em Leonardo Energy (2017), a melhoria da eficiência dos equipamentos elétricos, sejam eles, geradores, transformadores de distribuição, motores e até eletrodomésticos, poderia contribuir para a redução do consumo de energia elétrica com um custo 70% menor do que investindo na ampliação do sistema de geração, não requer licenças ambientais e reduz a emissão de gases de efeito estufa. Ou seja, é mais vantajoso economicamente investir na eficiência, reduzindo o consumo no lado da demanda de energia do que aumentando a geração no lado da oferta de energia.

Um sistema de gestão de energia em uma planta petroquímica alcança a sua importância somente pelo acréscimo financeiro na redução das perdas de energia dos processos de conversão térmica. Aliado a isto, agrega valor ao negócio, altera a cultura comportamental em todas as nuances relativas ao consumo de energia, mitiga-se o impacto ambiental causado pelas emissões atmosféricas nas tochas e nas chaminés dos fornos e caldeiras, aumenta a disponibilidade para venda de energia elétrica e incrementa a vida útil dos equipamentos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivos gerais

Analisar as características organizacionais e estruturais do Sistema de Gestão Energética de uma empresa do ramo petroquímico, avaliar 20 motores elétricos de média tensão e propor um *retrofit* de um motor, visando reduzir o consumo de energia elétrica da planta.

## 1.2.2 Objetivos específicos

### 1.2.2.1 SGE

- a) analisar as características organizacionais e estruturais;
- b) verificar se os requisitos da NBR ISO 50004 estão em conformidade com os procedimentos internos e se são atendidos de uma forma geral;
- c) entender como é realizada a gestão dos insumos energéticos, o seu controle de produção, distribuição e consumo;
- d) verificar o funcionamento da Comissão Interna de Conservação de Energia (CICE);
- e) verificar os principais Índices de Desempenho Energéticos (IDE's) e ações implementadas para melhorar a eficiência energética da planta;
- f) analisar as auditorias energéticas já realizadas.

### 1.2.2.2 *Rendimento operacional de motores elétricos*

- a) inspecionar variáveis elétricas (corrente, potência ativa e fator de potência) em relés de proteção nas subestações;
- b) coletar dados de placa de motores de média tensão, tanto no sistema de arquivamento de documentação técnica da empresa como no campo;
- c) medir em campo a rotação de trabalho dos motores;
- d) medir a temperatura do estator através de inspeção termográfica;
- e) calcular o carregamento através do método expedito de linearização da curva do conjugado;
- f) calcular o rendimento operacional dos motores.

### 1.2.2.3 *Proposta de retrofit*

- a) analisar a fatura de energia elétrica de uma subestação;
- b) propor um *retrofit* de motor com baixo carregamento;
- c) através de análise econômica, calcular o prazo de retorno do investimento mediante redução do consumo de energia elétrica.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 PROGRAMAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA A INDÚSTRIA

O setor industrial é o maior consumidor de energia do país. O BEN 2016 registrou que, em 2015, a indústria foi responsável por consumir 32,5% do total de energia, seguida pelo setor de transportes que corresponde com 32,2% (EPE/MME, 2017, p. 30). De 1970 a 2007, a participação da indústria teve poucas variações (MME, 2011, p. 29). Diante deste cenário, como a prática da eficiência energética não vem sendo adotada pelos agentes setoriais na intensidade desejada, ações foram promovidas de forma que ela se torne um instrumento de competitividade. Destes, pode-se destacar 4 ações específicas (MME, 2011, p. 31):

- PROCEL Indústria – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica,
- PROESCO – apoios a projetos de eficiência energética com linha de financiamento do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES),
- PEE – Programas de Eficiência Energética, conduzido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL),
- CONPET – Programa Nacional de Racionalização de Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural, conduzido pela Petrobras.

A ANEEL, autarquia especial vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME), responsável por regular o setor elétrico brasileiro, promove através do PEE, o uso eficiente e racional de energia elétrica em todos os setores da economia por meio de projetos que têm o objetivo de demonstrar a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício de energia e de melhoria da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia (LUCA, 2017). Através desta iniciativa, o PEE busca maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada, promovendo a transformação do mercado de eficiência energética, estimulando o desenvolvimento de novas tecnologias e a criação de hábitos e práticas racionais de uso da energia elétrica (ANEEL, PEE).

De acordo com Brasil (2007, p. 163), de 1998 a 2005, o PEE impeliu as concessionárias do serviço público de distribuição de energia elétrica a investirem aproximadamente um bilhão e 400 milhões de reais, alcançando uma economia média estimada de 4.000 GWh/ano, e retirando uma carga da ponta de consumo da ordem de 1.140 MW. A aplicação de recursos foi concentrada em três tipos de projetos, segundo o BEN 2030:

- efficientização de prédios e indústrias com 30% dos investimentos,

- projetos de iluminação pública com 28% do investimento total,
- projetos residenciais, principalmente doação de lâmpadas eficientes, com 16% do total de aplicação de recursos.

A lei 9.991/2000 disciplinou que as distribuidoras de energia elétrica deveriam destinar 0,5% da Receita Operacional Líquida (ROL) para fomento de ações de eficiência energética, sendo 0,4% para o PEE e 0,1% para o PROCEL. Atualmente, o PEE é a maior fonte de recursos no país para este fim, já que em torno de meio bilhão de reais por ano são gastos por 101 distribuidoras de energia elétrica (POMPERMAYER, 2015). Entretanto, para que estes recursos sejam bem aplicados, os Procedimentos dos Programas de Eficiência Energética (PROPEE) exigem que os projetos tenham uma Relação Custo Benefício (RCB) menor ou igual a 0,8 (LUCA, 2017), ou seja, os benefícios com economia de energia têm que ser sempre maiores que os custos. Medidos com base em um Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP), os resultados dos programas trazem segurança de que a forma que é executada sua medição seja padrão, visando dar maior confiabilidade, transparência e estimativa ao processo. O mecanismo legal para apresentação destes projetos é via Chamada Pública de Projetos (CPP), onde a ANEEL define os critérios para tornar o processo decisório de escolha dos projetos e consumidores beneficiados pelo PEE mais transparente e democrático, promovendo maior participação da sociedade (ANEEL, PEE, 2017).

As políticas públicas consideradas de grande relevância ou abrangência são chamadas de Projetos Prioritários pela ANEEL. O Projeto Prioritário n° 002/2015 incentiva a substituição de motores elétricos promovendo a eficiência energética no segmento de força motriz. Deve-se destacar a importância da elevação dos índices de eficiência energética dos motores elétricos, na medida em que estes equipamentos representam cerca de 60% do consumo da energia elétrica no setor industrial, além de representar quase 100% dos atuais acionamentos industriais. É sabido que a maior eficiência de motores de indução se dá a plena carga, mas que, devido às condições operacionais e especificações de projeto os motores operam em faixas de carga variáveis. Quando estes não são acionados por conversores de frequência, o rendimento cai acentuadamente com a redução do carregamento.

## 2.2 SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA

A norma *NBR ISO 50004:2016 Sistemas de Gestão da Energia – Guia para implementação, manutenção e melhoria de um sistema de gestão da energia* fornece informações de cunho prático para estabelecer, implementar, manter e aperfeiçoar um sistema



de gestão de energia, independentemente do tamanho da organização, pública ou privada, visto que a NBR ISO 50001 estabelece a aplicação de métodos sistêmicos para acompanhar o *desempenho* energético de uma organização. Este conceito de desempenho é uma evolução, pois envolve não apenas a eficiência, mas também o consumo e o uso final de energia, ou seja, se o consumo de energia não está acima do necessário e se está sendo utilizado o melhor tipo de energia para determinada aplicação (SGARBI, 2017). Com exemplos de aplicação, estudos de caso e caixas de ajuda, ela serve como um guia prático, trazendo um olhar para melhoria *permanente* e continuada sobre os processos que consomem energia na organização, diferente de um projeto de eficiência energética que foca somente um elemento.

Conforme apresentado em Rotas Energéticas (2011), o então secretário-geral da ISO, Rob Steele, na época da divulgação da norma no Brasil, comentou que este processo é responsabilidade dos consumidores. Ele argumenta que “organizações não podem controlar o preço da energia, as políticas públicas ou a economia global, mas podem melhorar a maneira com que usam a energia”.

### 2.3 MOTORES ELÉTRICOS

Além do motor elétrico ser o grande responsável pelo consumo e das preocupações ambientais relacionadas a um melhor aproveitamento energético dos equipamentos em geral, diversas justificativas a mais podem ser elencadas para substituir motores por novos equipamentos com maior eficiência e potência mais adequada à solicitação da carga:

- o momento é propício para maior dinamismo nas ações de eficiência energética no setor industrial (CNI, 2015),
- a indústria necessita de maior competitividade e o uso eficiente de energia é um dos caminhos (CNI, 2015),
- os motores em operação têm vida útil média de 15 anos (CNI, 2015),
- modernização do parque de motores trifásicos, de modo a atender os níveis mínimos de eficiência estipulados pela Portaria Interministerial MME/MCT/MDIC nº 553, de 8 de dezembro de 2005 (POMPERMAYER, 2015),
- têm sua eficiência reduzida em média entre 1 a 3% por repetidos rebobinamentos (ao longo da vida útil são rebobinados em média 4 vezes (CNI, 2015)),
- durante o ciclo de vida do motor o custo em aquisição e manutenção representa 5%, mas o custo em consumo de energia elétrica 95% (CNI, 2015),

- aumento do fator de potência da planta com redução nas taxas por ultrapassagem e redução nos custos com implementação de métodos para redução do fator de potência.

A CNI indica que as indústrias podem selecionar os motores a serem substituídos considerando (CNI, 2015):

- custo de energia elétrica,
- idade do motor,
- histórico de manutenção,
- tempo de operação,
- complexidade da substituição,
- existência de motor reserva.

### **2.3.1 Motores elétricos de indução**

Pode-se dizer que os motores elétricos são onipresentes na indústria. O motor elétrico de indução gaiola de esquilo, um dos mais utilizados, é um motor de indução cujo enrolamento primário, geralmente alojado no estator, é ligado à fonte de alimentação, enquanto que o enrolamento secundário, de gaiola e geralmente alojado no rotor, é percorrido pela corrente induzida. Utilizados em diversas aplicações, são equipamentos que, dentro de certos limites técnicos, fornecem a quantidade de energia mecânica demandada pela carga (CAMPANA, 2000 apud FITZGERALD, 1977; DORF 1993). Além disso, suas características de robustez, baixo custo de aquisição e alta eficiência disseminaram a sua utilização na indústria. Entretanto, a determinação da sua eficiência é a que apresenta um maior grau de dificuldade de mensurar, já que depende de características de fabricação, de operação da máquina e ainda do tipo de carga acionada (ANDRADE, s.d.).

Para a avaliação da adequação de força motriz, deve-se medir ou estimar o rendimento do motor elétrico na condição de carga. Campana (2000) comenta que a medida direta do rendimento de motores necessita de equipamentos caros e sofisticados, como células de carga e bancadas de teste específicas, e, portanto, geralmente a avaliação do rendimento é feita de forma indireta. Para avaliação de máquinas em operação existem também as limitações de coleta de dados, pois normalmente testes de performance do motor impactam no processo, exceto se o motor for desacoplado da carga, o que também limita a medição de parâmetros, pois não se tem, neste caso, uma medição do comportamento real do motor.

Com a variação do conjugado da carga o rendimento do motor poderá ser insatisfatório.

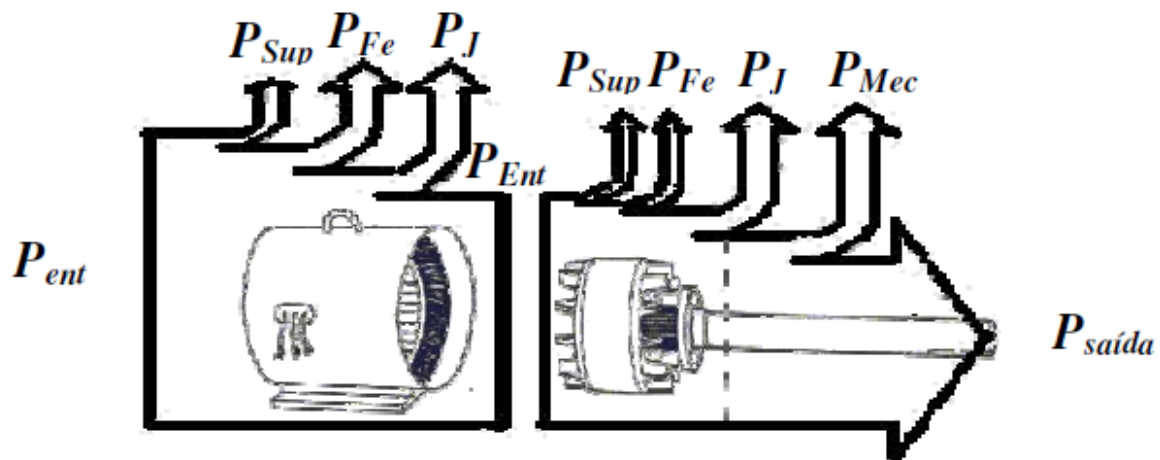
Dentre os fatores que afetam o desempenho dos motores elétricos citam-se o dimensionamento de motores elétricos, a variação da tensão de alimentação em relação à nominal, além do desequilíbrio de tensão entre fases (CAMPANA, 2000).

Conforme a NBR 5383-1:2002 (Máquinas elétricas girantes – Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaio) e Andrade (s.d.), as perdas totais de um motor é a diferença em um dado instante entre a potência ativa total de entrada e a potência ativa total de saída. As perdas totais são representadas por:

- $P_j$  – perdas  $I^2R$  no enrolamento do estator e do rotor, incluindo as perdas por contato com as escovas para motores com rotor bobinado. Causadas por efeito Joule, elas são associadas às correntes que circulam nas partes condutoras da máquina, variam com o quadrado das correntes e são diretamente proporcionais à resistência (seção transversal do fio de cobre do estator e da barra do rotor);
- $P_{Fe}$  – perdas no núcleo, que é a soma das perdas por histerese e das perdas causadas por correntes parasitas no ferro. Dependem da magnitude do campo magnético, que basicamente depende da tensão e do número de voltas do enrolamento de cada fase no estator, portanto, se mantém praticamente constante com a variação de carga e são influenciadas basicamente pelas laminações do núcleo;
- $P_{mec}$  – perdas mecânicas causada por atrito dos mancais e ventilação. Associadas às partes inativas da máquina, como o ventilador montado no eixo e os rolamentos que provocam atritos na junção da parte móvel com a fixa da máquina.
- $P_{sup}$  – perdas suplementares.

Andrade (s.d.) menciona que estas últimas são as mais complexas de serem mensuradas, por estarem associadas às imperfeições construtivas da máquina. Causadas pelas discontinuidades nos componentes dos campos magnéticos nas ranhuras do rotor e na inclinação transversal dos barramentos do rotor (*skew*), as perdas suplementares são perdas adicionais no ferro e em outras partes metálicas (exceto os condutores) introduzidas pela carga e as perdas nos condutores do enrolamento do estator e do rotor. Também são causadas por correntes parasitas dependentes da pulsação do fluxo e da forma de onda nas conexões dos enrolamentos. Na medição indireta, estas perdas são consideradas proporcionais ao quadrado do conjugado. As perdas  $P_j$  e  $P_{sup}$  são proporcionais ao quadrado da corrente. Tanto as perdas  $P_j$  no estator quanto no rotor são influenciadas pela temperatura, área da seção e material do condutor. Andrade (s.d.) ilustra as perdas do motor de indução no diagrama de sankey demonstrado na Figura 2

Figura 2 – Diagrama de sankey de um motor de indução



Fonte: Andrade (s.d.)

A vida útil dos motores elétricos depende quase exclusivamente da vida útil do sistema de isolamento dos enrolamentos. Conforme WEG (2016), este é afetado por muitos fatores, como umidade, vibrações, ambientes corrosivos e outros. Dentre todos os fatores, o mais importante é, sem dúvida, a temperatura de trabalho dos materiais isolantes empregados. Um aumento de 8 a 10 graus acima do limite da classe térmica na temperatura do sistema de isolamento pode reduzir a vida útil do enrolamento pela metade.

A aquisição de equipamentos não pode ser uma escolha baseada apenas no menor preço. A orientação do Procobre – Instituto Brasileiro do Cobre é considerar também o custo total durante a vida útil do bem, o consumo de energia e a manutenção (LEONARDO ENERGY, 2017).

### 2.3.2 Regulamentação dos Índices de Eficiência para MIT

A substituição dos motores elétricos por motores de alta eficiência, com maior presença de cobre, pode ser uma alternativa de economia e aumento da produtividade (LEONARDO ENERGY, 2017). Os Estados Unidos da América adotaram o nível de rendimento “NEMA Premium” como mínimo a ser atendido pelos motores elétricos em 2010. O Canadá instituiu o mesmo em 2012. A União Europeia, o Japão e a Coreia do Sul vieram em seguida, com o nível mínimo IE3 em 2015, assim como a Arábia Saudita e a Turquia adotaram a partir de 2017. Enquanto isso, o Brasil já se encontra com 7 anos de atraso a essa tendência regulatória mundial

(MME, 2017).

Em 30 de janeiro de 2017, foi publicado pelo MME, para fins de Consulta Pública nacional, a proposta de Regulamentação Específica do Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos. Nesta Regulamentação foram revisados os Índices de Eficiência (IE) mínimos para motores elétricos de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola de esquilo, para fabricação no país ou importação de motores.

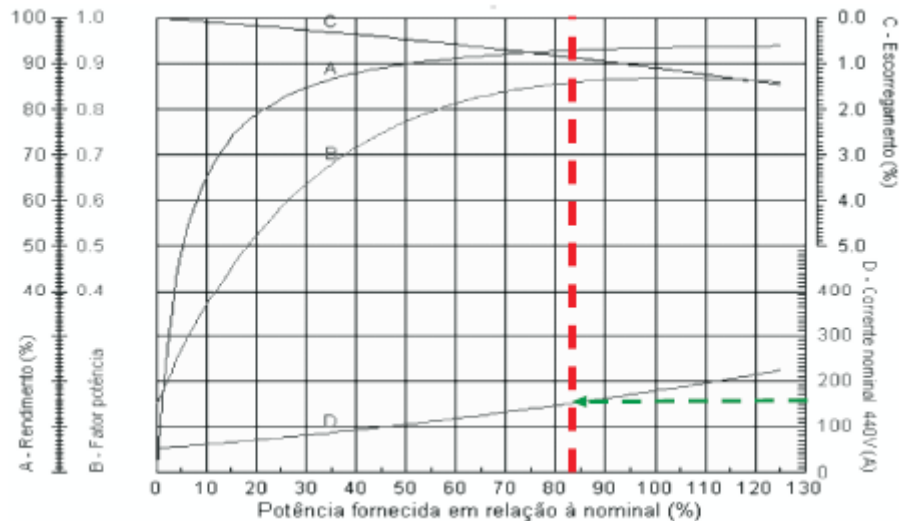
Com base na decisão do Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética (CGIEE) do MME sobre as contribuições recebidas, os índices de eficiência mínimos são aplicáveis a motores com potência nominal igual ou superior a 0,12 kW (0,16 cv) e até 370 kW (500 cv) com dois, quatro, seis e oito polos, com partida direta na rede. A data limite para fabricação ou importação dos motores é de 2 anos a contar da data de publicação da portaria.

Pode ser verificado que os índices indicados neste Regulamento estão alinhados com o Índice de Eficiência IE3, definido inicialmente em 2008 na norma internacional IEC 60034-30 - *Rotating electrical machines – Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE Code)*. A IEC 60034-30 foi posteriormente cancelada e substituída, em 2014, pela IEC 60034-30-1 - *Rotating electrical machines – Part 30-1: Efficiency classes of line operated AC motors (IE Code)* onde, além de incluir o estabelecimento dos Índices de Energia mínimos para o nível IE4, abriu também a perspectiva da definição do nível IE5, a ser introduzido na próxima edição. Em 2016 foi também publicada, de forma complementar, a IEC TS 60034-30-2: *Rotating electrical machines – Part 30-2: Efficiency classes of variable speed AC motors (IE Code)*.

### **2.3.3 Carregamento de motores**

A operação de motores de indução trifásicos com baixo carregamento reduz o fator de potência e o rendimento do motor, podendo chegar a 20% menos o rendimento para um carregamento de 20%. A Figura 3 ilustra uma curva padrão de um motor de 100cv, 4 polos, 440V.

Figura 3 – Curva característica de motor de 100 cv



Fonte: (ELEKTRO, 2012)

A substituição de motores sobredimensionados por motores com potência menor, adequado ao conjugado de partida e sobreaquecimento do motor traz diversos benefícios: melhora o rendimento e o fator de potência, reduz a corrente de operação reduzindo as perdas por efeito Joule nos circuitos alimentadores, e libera capacidade disponível dos barramentos e transformadores dos circuitos alimentadores.

Considera-se que o carregamento de um motor bem dimensionado deve se situar acima de 75% da potência nominal (ELEKTRO, 2012). Entretanto a análise do carregamento não deve ser feita apenas analisando o valor eficaz da corrente pois, conforme demonstra a Figura 3 – Curva característica de motor de 100 cv, a corrente à vazio é diferente de zero. Quando não se possui a curva característica do motor, o método expedito é o mais apropriado para analisar o carregamento dos motores já instalados, pois permite que a análise seja feita com o motor em operação medindo-se a potência ativa, o fator de potência, a rotação de trabalho e verificando nos dados de placa do motor a potência nominal, a rotação nominal e o número de polos.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 PROCEDIMENTOS NA PESQUISA

Os trabalhos foram realizados com dedicação própria para os estudos e pesquisa no campo durante o horário administrativo, conforme disponibilidade, e após este, das 17h às 19h, 5 vezes por semana, e pesquisa teórica no sábado de manhã com duração de 4 (quatro) horas. A pesquisa se desenvolveu em 3 meses, iniciando em abril e concluindo em junho de 2017.

#### 3.2 ESTIMATIVA DE CUSTOS

O principal custo, analisado inicialmente, seria a aquisição de um analisador de energia ou PQM (*Power Quality Meter*). Entretanto, após feito levantamento no mercado foi constatado que o valor de um modelo que conseguisse efetuar diversas medições e com uma precisão boa, como por exemplo, o analisador da marca Fluke modelo 435-II, estava em torno de R\$ 40 mil. Em virtude deste valor ser elevado para um projeto de pesquisa, foi realizado a aquisição de um alicate wattímetro da Minipa modelo ET-4055, no valor R\$ 2.100,00, que permitisse a medição da potência ativa dos motores. Conseguiu-se, por empréstimo, a câmara estroboscópica e o termovisor. Também preferiu-se utilizar os relés de proteção microprocessados já instalados para leitura das grandezas elétricas devido o enfoque ser os motores de média tensão, que possuem maior potência e, portanto, seriam mais representativos no consumo de energia elétrica para força motriz da planta industrial.

#### 3.3 CRONOGRAMA DE ATUAÇÃO

O cronograma de atuação foi desenvolvido com início em abril de 2017 e término ao final de julho de 2017. A ideia inicial era realizar uma análise mais abrangente, mas na execução dos trabalhos ocorreram obstáculos como chuvas, indisponibilidade de equipamentos, dificuldades de medições, que exigiram uma delimitação maior do escopo. De fato, foi nesse contexto que se verificou que somente a análise de alguns motores de média tensão seria viável. Em virtude disto, o cronograma do estudo foi ajustado diversas vezes e a versão final está apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Cronograma

ETAPA	ATIVIDADE	Abril			Maio			Junho		
1	Pré-projeto	X								
2	Revisão bibliográfica	X								
3	Estudo das auditorias já realizadas, dos indicadores e ações em andamento	X								
4	Consulta técnica a engenheiros		X							
5	Análise das reuniões da CICE			X						
6	Estudo dos fluxogramas de processo, balanço termoelétrico			X						
7	Revisão bibliográfica				X					
8	Inspeção em campo nos relés de proteção, avaliar por amostragem carregamento de motores conforme disponibilidade					X				
9	Análise da especificação e consumo de motores						X			
10	Estudo de consumo de energia elétrica e análise da fatura da casa de bombas							X		
11	Análise econômica								X	
12	Estimativa de custo de aquisição de equipamentos									X
13	Proposta de <i>retrofit</i>									X
14	Elaboração de relatório com os resultados alcançados									X

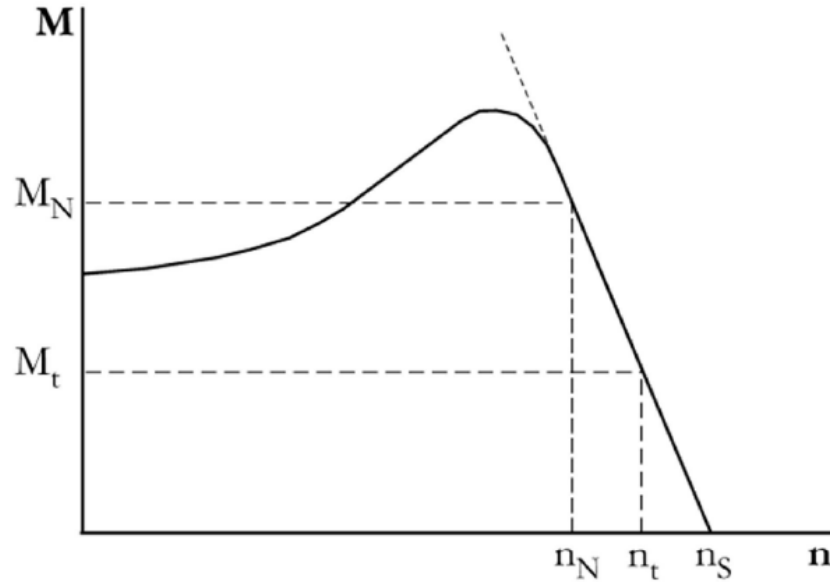
Fonte: Elaboração própria

### 3.4 CÁLCULO DO RENDIMENTO PELO MÉTODO EXPEDITO

Conforme Elektro (2012), o método de linearização baseia-se no fato de que a curva de conjugado versus rotação, dentro da região de operação do motor, pode ser aproximada por uma reta, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4 – Método de linearização da curva do conjugado



Fonte: (MARTINS, 2015, P. 47)

Através da semelhança de triângulos, pode-se obter a relação da Eq. 1.

$$\frac{M_t}{M_N} = \frac{(n_S - n_t)}{(n_S - n_N)} \quad \text{Eq. 1}$$

O conjugado nominal pode ser expresso pela Eq. 2.

$$M_N = \frac{P_N}{n_N} \quad \text{Eq. 2}$$

A potência de trabalho pode ser expressa pela Eq. 3.

$$P_t = M_t * n_t \quad \text{Eq. 3}$$

Substituindo a Eq. 1 e Eq. 2 na Eq. 3 encontra-se a potência de trabalho descrito na Eq.

4.

$$P_t = \frac{P_N}{n_N} * \frac{(n_S - n_t)}{(n_S - n_N)} * n_t \quad \text{Eq. 4}$$

O carregamento do motor pode ser obtido da razão entre a potência de trabalho e a

potência nominal, conforme Eq. 5.

$$F_C = \frac{P_t}{P_N} \quad \text{Eq. 5}$$

Substituindo a Eq. 4 na Eq. 5 encontra-se a equação do fator de carregamento descrito na Eq. 6.

$$F_C = \frac{n_t}{n_N} * \frac{(n_S - n_t)}{(n_S - n_N)} \quad \text{Eq. 6}$$

A rotação síncrona ( $n_S$ ) e a rotação nominal ( $n_N$ ) podem ser obtidos dos dados de placa e a rotação de trabalho deve ser medida com um tacômetro ou câmara estroboscópica, quando não há monitoramento da rotação.

O rendimento de trabalho do motor é uma relação entre a potência mecânica fornecida ao eixo ou potência de trabalho e a potência elétrica que o motor está consumindo, conforme a Eq. 7.

$$R = \frac{P_t}{P_{el}} \quad \text{Eq. 7}$$

### 3.5 INSTRUMENTOS UTILIZADOS

A medição da rotação de trabalho foi realizada com uma câmera estroboscópica, disponibilizada pela gerência de manutenção de equipamentos dinâmicos, da marca *Shimpo Instruments* modelo DT-725, demonstrado na Figura 5. Ajustando a frequência de disparo do *flash*, percebe-se a rotação do motor quando a frequência for tal que o rotor aparenta estar parado. Ele é um instrumento para ser utilizado na indústria para medições de rotação de rotores sem contato com o eixo, assim como para inspeção e observação das partes móveis através de “congelamento” da imagem. Conforme descrição das características no site do fabricante (Shimpo, 2016), este modelo apresenta faixa de medição de 40 a 12500 rpm, precisão de 0,02% da leitura, resolução de 0,1 rpm para a faixa de medição utilizada de 40 a 4999,9 rpm, autonomia da bateria de 1h.

Figura 5 – Câmara estroboscópica Shimpo Instruments DT-725



Fonte: Shimpo (2017)

A análise térmica dos motores foi realizada com um termovisor Fluke modelo Ti32, também disponibilizado pela gerência de equipamentos dinâmicos. Este medidor de imagem térmica por infravermelho, demonstrado na Figura 6, permite capturar imagens com resolução de 320 x 240 e se mostrou adequado às medições realizadas pois sua exatidão de medição de temperatura é de 2°C ou 2% e a faixa de medição vai de -20°C a 600°C.

Figura 6 – Termovisor Fluke Ti32



Fonte: Fluke (2017)

### 3.6 RELÉS DE PROTEÇÃO

Os relés de proteção monitoram, supervisionam e protegem as cargas conectadas nos painéis Centro de Distribuição de Cargas (CDC) e Centro de Controle de Motores (CCM), onde

estão instalados os demarradores das cargas alimentadas. As variáveis elétricas foram mensuradas através da inspeção visual nestes relés. Os relés de proteção mais verificados foram o Multilin SR GE 750 (proteção do CCM), no relé Multilin GE 339 (proteção dos motores) e no relé GE MIFII (proteção do banco de capacitores). A Figura 7 ilustra imagens destes relés.

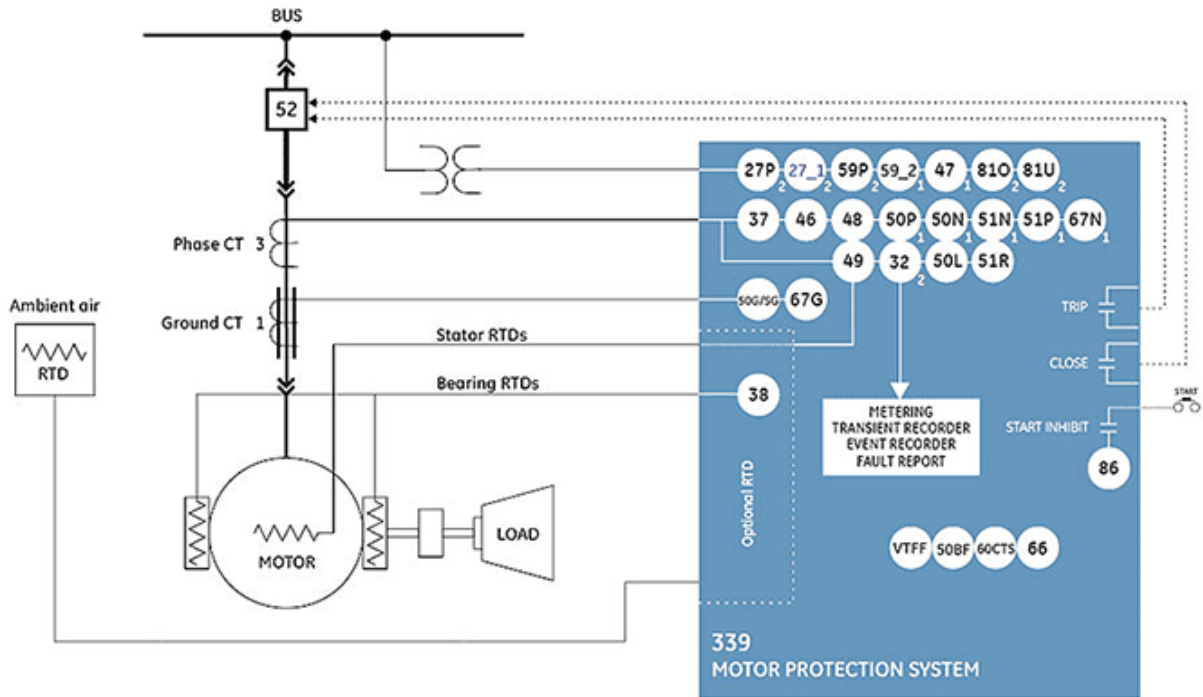
Figura 7 – Relés de proteção microprocessados



Fonte: GE (2017)

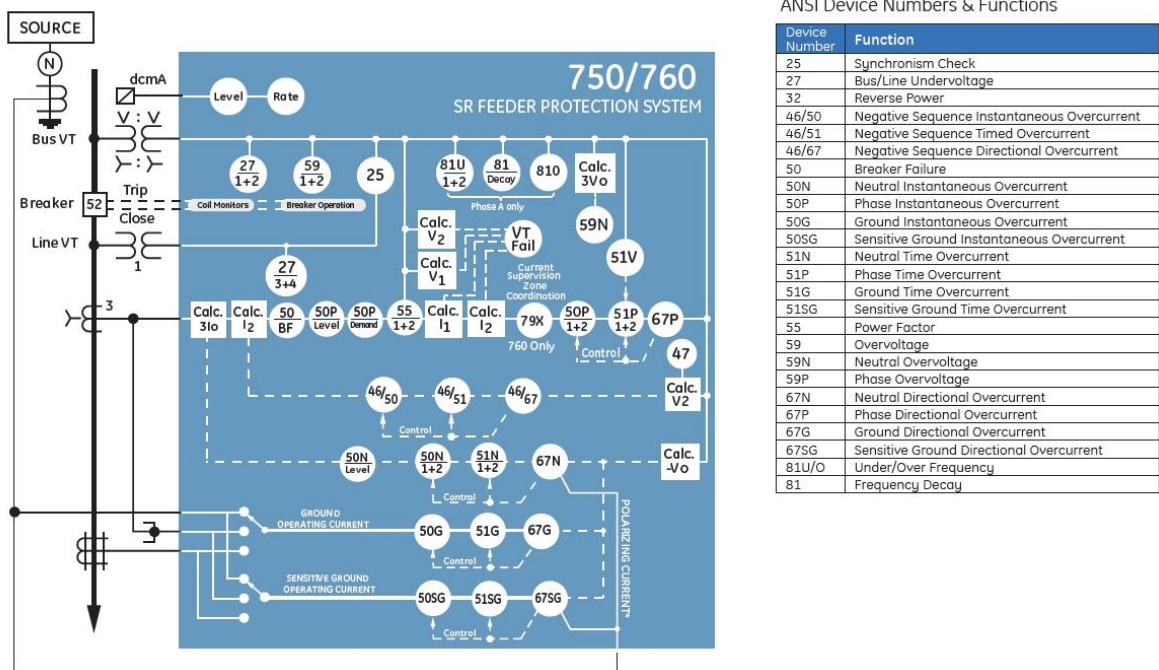
Na Figura 8 e Figura 9 são apresentadas imagens ilustrativas do esquema de ligação dos relés fornecidas pelo fabricante mostrando as funções de proteção disponíveis.

Figura 8 – Esquema de ligação e função de proteção do relé 339



Fonte: GE (2017)

Figura 9 – Esquema de ligação e funções de proteção do relé GE 750



Fonte: GE (2017)

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA**

#### **4.1.1 Requisitos gerais e responsabilidade da direção**

A planta petroquímica analisada possui carga nominal de processamento da sua matéria prima de 35 mil m<sup>3</sup>/dia. Esta indústria possui uma capacidade de geração de energia elétrica de 67MW, através de cinco geradores síncronos, três acionados por turbogeradores a vapor de alta pressão, um acionado através de uma turbina a gás e outro por uma turbina movida por gases do exausto de uma unidade de processamento.

A geração de energia é feita em 13,8 kV, e nesta tensão ocorre a distribuição através de 42 subestações e mais de 20 CCL's (Casa de Controle Local). O consumo atual de energia elétrica da planta está em torno de 39MW e 20MVAR, oscilando conforme o balanço termoelétrico. Portanto, a planta é autossuficiente em energia elétrica e o excesso de energia é fornecido ao Sistema Interligado Nacional (SIN) através de conexão em uma linha de 69kV. O regime contratual de energia elétrica permite tanto a compra como a venda de energia, sendo o limite de 11MW para importação e 27MW para exportação.

O método de gestão da energia da empresa analisada é padronizado, está definido em procedimento corporativo interno da companhia e todas as unidades operacionais devem estar em conformidade com os seus requisitos, assim como com os dados das variáveis de processo e cálculo dos índices atualizados. A responsabilidade de cada cargo e a sua competência também estão definidos. Esta padronização e sistematização é importante para permitir a comparação pelos gestores do desempenho energético das diferentes unidades industriais da empresa.

O escopo macro do SGE e da CICE abrange todos os processos energéticos de todas as instalações de processo. Os principais energéticos analisados são gás combustível, gás natural, óleo combustível, ar de processo, petróleo, energia elétrica, água de resfriamento e água desmineralizada. O consumo de água e energia elétrica das instalações prediais não é analisado, exceto em campanhas internas de conscientização para conservação de energia, promovidas pela gerência de comunicação a pedido da CICE. Para instalações administrativas, o conceito de eficiência energética se relaciona diretamente com o consumo mínimo possível de energia das mesmas.

### **4.1.2 Política energética**

A política energética da empresa incorpora os conceitos de eficiência energética em todas as suas instalações e em todas as fases de seus projetos. Diferentes procedimentos de operação e manutenção refletem esta ideia. Os técnicos, por exemplo, controlam a operação dos turbo-geradores e caldeiras conforme definições dos engenheiros, de forma a otimizar o balanço energético da planta, reduzindo a perda de gás das unidades para tocha e o descarte de vapor de baixa pressão para atmosfera. Normalmente, opera-se os turbo-geradores alimentados por vapor de alta pressão com extração máxima e condensação mínima.

### **4.1.3 Ações rotineiras relacionadas ao desempenho energético**

A avaliação constante feita pelos técnicos e engenheiros da empresa buscam o equilíbrio na relação entre confiabilidade operacional e consumo energético. Ela envolve o conhecimento do processo, dos custos dos combustíveis, dos custos envolvidos na manutenção dos equipamentos, das características técnicas das instalações, instrumentos, controles, etc. Analisando o balanço termoelétrico diariamente e as eventuais restrições do sistema elétrico, como, por exemplo, geradores em manutenção, define-se entre operar com motor elétrico ou turbina para acionamento de bombas centrífugas, nas situações em que há opção de operar independente com um ou outro acionamento. Efetivamente, o acionamento de cargas através de motores elétricos é muito mais eficiente que comparado às turbinas à vapor. As turbinas à vapor de contrapressão, largamente utilizadas na indústria, possuem uma eficiência de no máximo 20%, conforme Brasil (2015, p. 186). Os motores de indução trifásicos de projeto padronizado possuem rendimento nominal de, no mínimo, 70% (ELEKTRO, 2012, p. 213). Entretanto, a maioria das vezes, o critério prioritário é a confiabilidade da planta, em detrimento a eficiência energética dos acionadores.

Em situações específicas, a capacidade de geração própria se torna insuficiente e ocorre a necessidade de compra de energia elétrica da concessionária. Neste caso, a confiabilidade do sistema diminui devido à instabilidade da linha de transmissão, o que deixa mais vulnerável o equilíbrio das unidades industriais, podendo onerar os custos de produção, caso ocorra paradas não programadas por falta de Utilidades. De fato, paradas não programadas das unidades de processo causadas por falta de energia elétrica ou vapor oneram demasiadamente os custos de produção, os hidrocarbonetos do processo são queimados na tocha, as unidades deixam de produzir, além de aumentar o risco de acidentes ocupacionais pois “estressam” mais os

equipamentos durante o TRIP das unidades.

A gestão de manutenção dos equipamentos é padronizada por procedimentos corporativos. Rotinas de manutenção preventiva são realizadas em equipamentos dinâmicos, por exemplo. Semanalmente, uma equipe especializada verifica a lubrificação de partes mecânicas que sofrem atrito, o nível de óleo lubrificante e, quando necessário, faz a reposição do óleo. Quando há suspeita de desgastes ou ruído anormal no acoplamento do conjunto rotativo, realiza-se termografia. Para inspeção visual do acoplamento sem parar o eixo e, conseqüentemente, sem retirar o equipamento de operação, utiliza-se lâmpada estroboscópica.

As grandes máquinas rotativas (motores, turbinas, compressores, ventiladores, bombas) possuem sensores conectados a transdutores interligados ao Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) que permitem o monitoramento remoto de grandezas físicas como temperatura de mancal, vibração, deslocamento axial, etc. Assim, os técnicos de operação, em conjunto com a engenharia de manutenção, diagnosticam o melhor momento para realizar manutenção preventiva de forma a evitar desgastes mecânicos e perdas por aquecimento que reduzem a vida útil e a eficiência mecânica do conjunto rotativo. Quando há uma necessidade de confirmação mais precisa dos dados de deslocamento axial, radial, vibração e aquecimento de mancais dos equipamentos, uma equipe de manutenção preditiva faz medições no local e coleta os dados para análise posterior.

As bombas de água de resfriamento devem operar dentro dos parâmetros de pressão de projeto de forma que a velocidade do fluxo de água em permutadores e conseqüente troca térmica seja eficiente. A qualidade da água é controlada por empresa contratada. Através de análises químicas, ela define a dosagem de produtos nas torres de resfriamento para reduzir a corrosão interna dos permutadores.

Uma indústria petroquímica possui um risco inerente do processo muito maior que outras indústrias. A necessidade de manutenção de vasos e caldeiras exigem paradas de manutenção programadas, conforme a Norma Regulamentadora 13 (NR 13). A Norma Regulamentadora 20 (NR 20) também deve ser atendida. Ela estabelece diversos critérios para a gestão da segurança e saúde no trabalho contra os fatores de risco de acidentes provenientes das atividades de extração, produção, armazenamento, transferência, manuseio e manipulação de inflamáveis e líquidos combustíveis.

As indústrias petroquímicas necessitam de geração de vapor superaquecido para os processos de aquecimento, acionamento de turbogeradores, turbinas e nos processos em geral. Na planta analisada, existem 5 caldeiras de 80 ton/h que geram vapor de alta pressão a 60kgf/cm<sup>2</sup> e 440°C. O controle operacional destas caldeiras visa, principalmente, o atendimento



à planta, possuindo diversas malhas de controle do SDCD que ajustam automaticamente variáveis de controle como abertura do damper de entrada de ar, vazão de combustível (óleo combustível e gás combustível), abertura da válvula de vapor de média pressão para o pré-aquecedor de ar, controle do nível do tubulão, controle de vazão e pressão da caldeira, etc. A eficiência das caldeiras se resume em reduzir o consumo de combustível e energia elétrica produzindo a quantidade de vapor desejada nas características pré-definidas. A qualidade da queima é importante para evitar o apagamento da chama, além de reduzir o excesso de oxigênio que resultará em energia em forma de calor descartada para a atmosfera na chaminé da caldeira, sendo que esta energia poderia ser utilizada para aquecimento do vapor.

O controle da mistura estequiométrica de oxigênio/combustível é essencial em caldeiras para reduzir o excesso de oxigênio na chaminé, aumentando a eficiência da caldeira, além do controle de vazão de vapor para os economizadores de calor, reduzindo a temperatura dos gases nas chaminés.

A unidade operacional possui uma unidade de cogeração composta por uma turbina à gás de 27MW e uma caldeira recuperadora de calor de 80 ton/h. A turbina pode operar com gás natural ou gás combustível, sendo que a escolha do combustível preferencial para queima é o gás combustível pois ele é resíduo do processo e não é armazenado, ou seja, quando a produção de gás é maior do que a demanda, a pressão do anel de gás da planta sobe acima de um set point e uma malha de controle aciona a abertura de uma válvula que envia estes gases para queima na tocha, descartando esta energia para atmosfera. Também procura-se minimizar o  $\text{NO}_x$  no exausto da turbina à gás.

#### **4.1.4 Planejamento energético**

Nas unidades operacionais, a utilização de energia térmica na forma de vapor predomina sobre a elétrica, pois permite um controle da geração em tempo real dos técnicos de operação e engenheiros já que os distúrbios apresentam uma constante de tempo de atuação maior, além de possibilitar mais facilmente a conversão em outras formas de energia. Os eventos nos sistemas elétricos são instantâneos e em poucos casos permitem o controle manual pela operação. Por exemplo uma falha de isolamento em cabos de alimentação de uma subestação se reflete em uma elevação brusca da corrente em mili-segundos, sendo necessária a atuação de proteção de relés que são sensibilizados por esta corrente. Eles são responsáveis por comunicar a console operacional esta falha, mas previamente já atuam coordenadamente com os demais relés de proteção do sistema, no sentido de isolar a falha de forma seletiva, buscando a menor

restrição de corte de alimentação elétrica para as cargas. Entretanto, quando esta falha afeta a oferta de energia, seja pelo desligamento de geradores do sistema ou da interligação com a concessionária, em situação de fluxo de potência ativa ou reativa da concessionária para a indústria, o sistema gerenciador de cargas analisa a topologia de distribuição de energia elétrica no sistema e, conforme a oferta máxima disponível, ajusta a demanda, enviando remotamente sinais de abertura dos disjuntores e retirando as cargas menos prioritárias do sistema. Esta ação computacional atua na geração, distribuição e consumo das cargas, evitando a ultrapassagem da tensão, corrente e frequência do sistema de valores críticos, que poderiam causar parada de toda a planta, danos aos equipamentos ou até incêndio de motores, cabos, transformadores, painéis, etc. A atuação no controle da estabilidade elétrica das plantas deve compreender as perturbações da rede básica de transmissão de energia elétrica. Portanto, esta geração e distribuição interna deve ser contínua e robusta.

O controle de geração de vapor possui malhas de controle com uma dinâmica mais lenta. O controle de carga das caldeiras, por exemplo, “enxerga” diversos sinais do campo e atua em válvulas de controle, dispositivos mecânicos que levam mais tempo para ajuste de abertura de forma a alterar a variável de controle. Já os sistemas eletrônicos de controle de geração de energia reativa AVR – *Automatic Voltage Regulator*, por exemplo, leem a tensão do estator e ajustam diretamente a corrente de excitação, com um controle muito mais rápido pois depende apenas da capacidade de processamento do controlador e do acionamento dos tiristores que retificarão a senóide AC de alimentação gerando um sinal de corrente contínua para injeção no campo do rotor.

O SGE, através dos engenheiros de otimização, calcula se é rentável ou não a operação dos turbo-geradores e da turbina à gás em sua capacidade máxima. O ajuste da geração à demanda mínima da indústria é prioritário. O excesso de capacidade disponível é ajustado com base nos preços do Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) semanal do MWh, comparado com o custo dos combustíveis dos geradores disponíveis para operar, das limitações destas máquinas e, se o resultado for rentável, ou seja, se o custo de operação dos geradores é menor que o custo de venda de energia, aumenta-se a geração até a capacidade máxima ou limite da linha de transmissão. O turbo-expansor recebe gases diretamente do processo tornando sua eficiência máxima, pois não é necessária injeção de combustível adicional para operação. Quando ele não está em operação, boa parte da energia térmica destes gases é descartada para a atmosfera na chaminé. Portanto, sua operação será sempre na capacidade máxima disponível limitada apenas pelas especificações dos equipamentos e do processo.

A carga dos circuitos de iluminação não é contemplada nos controles do SGE e CICE.

Conforme análise do comportamento da geração e consumo de energia elétrica no período entre às 18h30 e às 19h, durante o horário de inverno, as fotocélulas são sensibilizadas e acionam os circuitos de iluminação viária, da área industrial e áreas administrativas externas às edificações, aumentando o consumo em torno de 1MW.

A empresa, atualmente, consome 30% aproximadamente de energia a mais do que ela precisaria, conforme avaliação da gerência de otimização na última reunião da CICE. A meta de todas as unidades operacionais da companhia é estar em torno de 10%. A equação para o cálculo do Índice de Eficiência Energética (IIE) e do custo energético médio não pode ser divulgada pois é considerada informação restrita, de caráter confidencial. Isto porque ele é resultado de uma consultoria da empresa *Solomon Associates*, que analisa o consumo energético de plantas petroquímicas em diversos países. A ideia central do cálculo do IIE é transformar dados através da combinação de diversas variáveis de processo coletadas de plantas petroquímicas com finalidades, características de instalações e equipamentos, carga nominal, etc. completamente diferentes em uma única base comum, de forma que seja possível a comparação destas plantas com dados de *benchmarking* internacional. Segundo NYBOER (2012), a restrição das grandes companhias de energia do mundo em divulgar estes dados é inadequada para alocação das emissões de gases de efeito estufa ou das metas energéticas das indústrias petroquímicas.

#### **4.1.5 Implementação e operação**

Foi verificado que a companhia realiza auditorias internas do SGE para analisar as não conformidades, ações corretivas e ações preventivas, conforme define o item 4.6.4 da ABNT NBR ISO 50004:2016. Em uma das auditorias, o diagnóstico energético foi realizado por equipe multidisciplinar de consultores da companhia, partindo de uma análise preliminar dos dados da unidade para identificação de oportunidades de otimização. Analisando o histórico da ampliação da planta e a evolução do consumo energético ocorrido durante o processo, percebeu-se que houve alteração do IIE e demonstrou que a gestão, os investimentos e as ações prontamente implementadas, visando a otimização energética, resultaram na evolução e na excelente classificação da unidade operacional nos estudos de *Benchmarking* realizados a cada dois anos pela *Solomon Associates*. A planta analisada na época da auditoria, na área energética, não apenas aparece como a melhor unidade operacional da companhia, mas como uma das melhores das Américas, na sua área. Esta auditoria além de identificar oportunidades de ganhos energéticos e de redução de custo, também determinou uma nova linha de base de desempenho,

considerando as novas unidades após a ampliação da planta. O trabalho foi desenvolvido seguindo a sistemática de uma Auditoria Energética no formato padronizado por um procedimento interno da companhia.

#### 4.1.6 Verificação & Medição

Percebe-se que a empresa atende procedimento interno corporativo e o item 4.4.5 da NBR ISO 50004:2016, pois verifica continuamente os dados dos indicadores de desempenho energético (IDE), quantifica-os para comparação em uma base comum, traça metas anuais para melhoria dos índices através de planos de ação. A partir destas informações, os gerentes das áreas operacionais, de otimização e de manutenção verificam o andamento dos índices e dos planos de ação, facilitando a tomada de decisão dos investimentos.

A CICE é composta por no mínimo 6 integrantes de diferentes áreas que são designados formalmente pelo gerente geral por um período de 2 anos. Reunindo-se a cada dois meses e com atribuições previamente definidas para cargo de presidente e secretário executivo, ela acompanha os IDE's, analisa o andamento das ações, propõe estratégias nas diversas formas de manter a planta operando de forma eficiente, reduzindo os desperdícios de energia, atendendo os requisitos de custo, segurança e emissões atmosféricas. Um relatório dos dados da CICE é divulgado em página na intranet da empresa e apresentado aos gerentes após a reunião da CICE. Os principais tópicos, as suas metas e os IDE's associados acompanhados pela CICE estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Indicadores e metas acompanhados pela CICE

Tópico	Metas	Indicador
Operação de Pré-aquecedores de ar e eficiência de fornos	Fator Operacional Médio Ponderado de PAFs	FOMPP
	Eficiência Média Ponderada de Fornos	EMPF
Recuperação de condensado	Retorno de Condensado	RET_COND
	Índice de Recuperação de Condensado e Vapor	IRCV
Envios de gases para a tocha	Massa de Gás para Tocha	MGT
Otimização do balanço termoeletrico	Índice de Gestão do Balanço Termoeletrico	IGBT
Consumo total de energia	Consumo Total de Energia	CTE
	Índice de Intensidade de Energia	IIE
	Plano de limpeza de Baterias de pré-aquecimento	EBat

Fonte: *site* da CICE na intranet

Cada ano a CICE prioriza tópicos, conforme as maiores perdas detectadas nos processos. O sistema de recuperação de condensado é prejudicado por diversos vazamentos nas tubulações nas tubovias. O IRCV analisa o retorno de condensado sobre o vapor fornecido menos o condensado sem retorno. O condensado sem retorno é uma soma de vazão de vapor que se sabe previamente que não retornará para o coletor de condensado, devido a questões técnicas como, por exemplo, utilização em torres de destilação. Como não se pode alterar este valor, ele é descontado do vapor fornecido, medido pela geração total de vapor da planta. Medido em percentual, a tendência do IRCV é analisada em 2 gráficos: um com o valor realizado e outro com o valor acumulado onde são demonstrados a Linha de Base Energética (LBE), a meta anual e o valor do índice mensal possibilitando a sua comparação e se a meta foi atingida ou não.

O furo de tubos de permutadores acaba em algumas vezes contaminando o condensado. Neste caso é necessário o seu descarte e manutenção do permutador. A totalidade do IRCV, medida em toneladas/h, é separada por áreas da indústria, através de uma estimativa dos principais consumidores. Na reunião da CICE são traçadas ações e elencados os eventos que contribuíram mais para o índice no período analisado. Um desses planos envolveu a necessidade de redução da quantidade de purgadores classificados como com problemas (atualmente em torno de 1800 purgadores) e a redução de vazamentos, cujas perdas ficam estimadas entre 25 e 30 t/h. A adequação do tratamento de condensado para redução do teor de  $CO_2$  também poderia propiciar aumento do retorno em torno de 6%, pois reduziria a corrosão interna dos tubos de aço. Tanto para purgadores como para vazamentos, a meta era se obter um controle estatístico do número de purgadores ou vazamentos, com a quantidade mantida a cada período e o número de novos problemas identificados. Por isso a CICE avalia a adequação dos testes e a manutenção dos purgadores com o objetivo final de alcançar um percentual de purgadores com problemas menor que 15% e uma quantidade de vazamentos que leve a um retorno de condensado dentro da meta, além de ser o melhor de todas as unidades operacionais da companhia. Uma análise da quantidade de notas de manutenção de vazamentos de vapor sanados no mês, dos vazamentos novos e do total da planta são analisadas para verificar a tendência e a capacidade que a empresa tem em reduzir o número de vazamentos.

A maior perda de energia nas indústrias petroquímicas é nas tochas. O SGE acompanha diariamente os resultados das emissões atmosféricas que afetam o índice MGT, atuando na

otimização contínua da geração elétrica em função do gás combustível produzido em excesso, queimando este gás nas caldeiras que geram vapor e utilizando o VAP nos turbo-geradores. De forma semelhante ao IRCV, o MGT é analisado em 4 gráficos, um com os valores absolutos realizados a cada mês, com histórico desde o início da contagem deste índice. O segundo possui os valores absolutos acumulados. O terceiro separa o total absoluto nos principais contribuintes e o quarto gráfico é igual ao terceiro, mas com valores monetários. Os dois primeiros gráficos possuem a sua LBE e meta. Neste contexto, a CICE também estuda uma solução para o gás ácido das unidades de hidrotreatamento. Uma das formas seria a utilização deste gás no anel de gás geral, como matéria-prima de uma unidade, ou ainda utilizá-lo como combustível em fornos. Verificou-se que a instalação de novas unidades operacionais promoveu a redução da oferta e queima de óleo combustível, o aumento da oferta e queima de gás combustível, a recuperação do enxofre de forma extremamente eficiente, reduzindo mais da metade, em média, as emissões de  $SO_x$ . A manutenção de compressores de gás também é acompanhada pela CICE pois, com a parada dos compressores, envia-se mais gás combustível presente no anel de gás para tocha, sendo que este poderia ser utilizado na turbina à gás.

O fechamento do balanço termoelétrico é importante para reduzir o alívio de vapor de baixa pressão (VBP) para atmosfera. Portanto, a relação das turbinas à vapor em manutenção é analisada periodicamente, com a intenção de sensibilizar as gerências para o retorno dos equipamentos, de forma a reduzir a perda de energia na forma de VBP, pois quanto mais turbinas à vapor de alta pressão operando na planta, maior o volume de VBP liberado para o coletor. Este vapor é controlado em  $3,5 \text{ kgf/cm}^2$  e  $185^\circ\text{C}$  e não é armazenado. Devido à baixa entalpia, sua demanda é pequena, servindo para aquecimento de tanques através de serpentinas, tubulações através de traços de vapor, permutadores e em algumas torres. Portanto, a sua energia é descartada para atmosfera quando a geração nas turbinas do processo é maior que a demanda. Existem estudos para avaliar alternativas para substituição de consumo de vapor de média pressão (VMP), que possui entalpia maior, controlado à  $13,8 \text{ kgf/cm}^2$  e  $290^\circ\text{C}$ , por vapor de baixa em torres e permutadores. Isto porque o VMP possui maior demanda e o controle de geração é mais fácil, sendo realizado por válvulas redutoras e extração dos turbo-geradores. Outra proposta de melhoria de eficiência energética é concluir a adequação das válvulas termostáticas que controlam a quantidade de vapor para as serpentinas para aquecimento dos óleos presentes nos tanques de estocagem de produtos.

O IGBT é uma razão percentual entre o custo operacional mínimo com energia, medido em  $\$/h$ , sobre o custo real, na mesma unidade. A cada semana é calculado o IGBT e na CICE se avalia a sua tendência para verificar o resultado mensal está próximo da meta anual, sendo

que diversas variáveis de processo afetam este indicador. Na CICE se analisa as principais causas, como por exemplo, a parada de um compressor de gás que permite consumir gás combustível na turbina a gás ao invés de enviar este gás para a tocha e reduzindo o consumo de gás natural.

O balanço termoelétrico de utilidades é verificado em tempo real por um programa computacional que calcula a demanda e oferta dos energéticos lendo informações do processo. A CICE avalia maiores oportunidades de utilização operacional deste programa, que é utilizado em todas unidades operacionais da companhia. A avaliação da eficiência dos fornos e caldeiras é feita por método indireto com base em uma média ponderada da eficiência individual de cada forno ou caldeira. Esta eficiência individual é calculada através da multiplicação da eficiência do combustível pela eficiência da caldeira ou forno. A eficiência do combustível é a multiplicação do Poder Calorífico (PCI) e da Massa Específica do combustível, seja ele gás combustível, óleo combustível ou CO, de acordo com a NBR 15213 na condição de 20°C de medição e 25°C de referência para combustão, em tempo real. A eficiência da caldeira ou forno é calculada através de um aplicativo que analisa o percentual de excesso de oxigênio e temperatura na chaminé, lendo diretamente o valor da leitura no SDGD, e de um percentual pré-selecionado da fração molar do gás combustível, onde o metano é o componente em maior quantidade (84,5%). A partir destes valores é realizado o cálculo por um método indireto supondo perdas por volume de gás combustível das paredes em torno de 2% e das frações molares do gás de combustão supondo combustão completa. A calibração dos analisadores de  $O_2$  e sensores de temperatura da chaminé são feitos rotineiramente pela manutenção industrial de instrumentação e garantem a exatidão das leituras do campo. O bom fator operacional dos analisadores de  $O_2$  se deve à operação das caldeiras em malha fechada. Uma alternativa vista pela CICE no sentido de expandir e melhorar o controle de combustão em malha fechada com análise dos gases do exausto, foi avaliar a utilização de analisador combinado CO/ $O_2$ . Outra ação foi a implantação dos visores de chama padronizados pela N-2780, com vidro nas fornalhas, que permitiu a eliminação da entrada de ar falso e exposição ao risco do observador.

A otimização energética alcançada após o projeto de ampliação da planta, que quase triplicou a Capacidade Equivalente de Destilação (EDC), foi obtida em grande parte pela implantação de projetos como o de cogeração, turbo-expansor e medição das correntes de utilidades. Outro fator determinante foi a elevação em 10% do uso das instalações da unidade operacional.

Uma boa prática implementada na empresa e replicada para outras unidades operacionais da companhia foi o acompanhamento e divulgação do IIE diário para os

supervisores, coordenadores e gerentes com os resultados em tempo real, a média das últimas 24 horas e a situação das diferentes áreas do processo ou conjunto de equipamentos que impactam o IIE, na forma de indicativo positivo, intermediário ou negativo, em reunião diária dando publicidade aos pontos críticos que afetam negativamente o índice. A análise crítica tanto do SGE como das definições da CICE são realizadas, portanto, continuamente para a melhoria do sistema.

## 4.2 CARREGAMENTO DE MOTORES ELÉTRICOS

É sabido que a maior eficiência de motores de indução se dá a plena carga, mas que, devido às condições operacionais e especificações de projeto, os motores operam em faixas de carga menores que a nominal. Quando estes não são acionados por conversores de frequência, o rendimento cai acentuadamente com a redução do carregamento. A inspeção dos dados de placas de motores de indução e a medição da rotação de trabalho possibilita avaliar o carregamento do motor em conjunto com uma análise econômica e pesquisa de preço de mercado, estimar os ganhos financeiros pela redução no consumo de energia elétrica do motor através da substituição por motores com potência menor adequada à carga.

Verificou-se que o CICE e o SGE não enfocam especificamente o consumo de energia elétrica. O consumo é analisado em uma visão macro da unidade operacional, considerando apenas a potência nominal dos grandes motores e o seu status de operação, ou seja, se o motor está ligado, a sua potência nominal entra na soma, se está desligado é desconsiderado a sua potência ativa no somatório. Portanto, não são analisados o fator de potência, rendimento e consumo real. Apenas alguns motores de alta potência possuem monitoramento remoto do consumo em tempo real de potência ativa e reativa. Geralmente estas máquinas são acionadas por motores de alto rendimento (rendimento acima de 94%) ou motores síncronos, onde mantém-se o controle do fator de potência unitário. Estes últimos ajudam na geração de reativo para o sistema elétrico. O fator de potência de consumo geral de todas as cargas elétricas está em torno de 0,88, mas o fluxo de energia reativa no disjuntor de interligação com a concessionária é mantido próximo de zero, conforme o controle de excitação dos geradores e TAP dos transformadores de potência.

A companhia, objeto do estudo, possui norma interna para motores elétricos trifásicos de indução ou síncronos, inicialmente publicada em 2011, que especifica motores com índices mínimos de eficiência IE3, baseada nas normas da série IEC 60034. A edição de 2015 desta norma incluiu o requisito de Índice de Eficiência IE4 para motores com rotor com ímãs

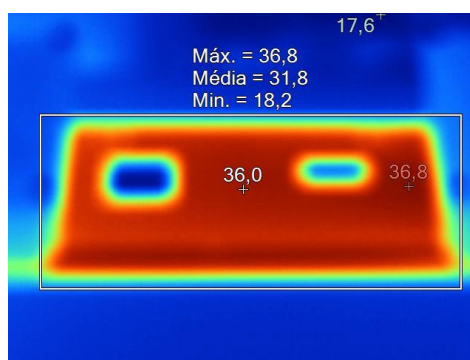


permanentes.

#### 4.2.1 Medições realizadas

As imagens da câmera foram analisadas no software chamado Smartview, que possui diversas funcionalidades, como por exemplo, alterar parâmetros como emissividade do material, alterar o nível de infravermelho, mostrar marcadores com os pontos mais quentes e mais frios da imagem ou selecionar uma área para verificar a temperatura mais alta, mais baixa e a média. A Figura 10 demonstra a imagem de um dos motores onde foi colhida uma imagem termográfica. Nela pode-se verificar que a temperatura mais alta da carcaça do estator é  $36,8^{\circ}\text{C}$  e a menor  $17,6^{\circ}\text{C}$ . Na área destacada pelo retângulo a temperatura média é  $31,8^{\circ}\text{C}$ . Os motores analisados são todos de classe de isolamento F com elevação de temperatura de  $80^{\circ}\text{C}$ . A classe de isolamento F admite uma temperatura de  $155^{\circ}\text{C}$  no ponto mais quente. Logo, este motor operando nesta condição, está utilizando 23% da sua capacidade térmica. Esta análise é feita supondo que o motor já tenha atingido a sua estabilidade térmica já tendo ocorrido a transferência interna de calor do estator para a carcaça. Uma análise mais apurada seria medindo diretamente a temperatura do enrolamento do estator, como é feito em alguns motores.

Figura 10 – Imagem térmica



Fonte: Elaboração própria

Foi realizado um levantamento baseado na lista de cargas dos demarradores na subestação, sem verificar a instalação dos motores individualmente no campo, devido ao número elevado de motores, e, portanto, sem analisar os motores que foram removidos ou que estão inoperantes. Este levantamento compreendeu os painéis CDC e CCM com tensão nominal de 13,8 kV, 4,16 kV e 480V e demonstrou que existem instalados 1558 motores, sendo 5 motores síncronos e os demais são motores trifásicos de indução. Do total de motores

instalados, 4 são alimentados em 13,8 kV e 105 em 4,16 kV, sendo que destes 105, foi feito análise de carregamento em 20 motores e contemplando, portanto, um total de 18% dos motores de média tensão.

A pequena parcela de medição foi devida à indisponibilidade dos equipamentos durante os períodos de medição, à falta de indicação de potência ativa nos relés de proteção dos motores. Como os motores analisados são de média tensão, a medição de tensão para análise da potência ativa e do fator de potência é feita através de transformadores de potência (TP's), não sendo possível a sua medição através de analisadores de energia sem a transformação. A maioria dos relés de proteção de motores instalados não possui a leitura de tensão habilitada, apenas a leitura de corrente para função de proteção. As funções de proteção, normalmente referenciadas pela tabela ANSI, mais comumente utilizadas para proteção de motores são 50GS - falha à terra, 50 – sobrecorrente instantâneo, 51 – sobrecorrente temporizado, 49 – sobrecarga, 48 – rotor bloqueado, 46 – desbalanceamento de fases e 66 – limitador do número de partidas para proteção térmica. Alguns motores também possuem sinais de sensores de medição da temperatura dos enrolamentos para proteção térmica.

Percebeu-se que as unidades operacionais antigas possuíam motores com ano de fabricação de 1974 e na unidade instalada mais recente a data de fabricação ficava na média em 2012. Portanto, o parque fabril possui motores com uma diferença de quase 40 anos de operação.

A inspeção dos dados de placa dos motores, das grandezas elétricas nos relés de proteção, da abertura das válvulas de descarga das bombas e válvulas de alívio dos compressores, medição da temperatura máxima da carcaça do estator e medição da rotação de trabalho foram condensados e estão discriminados na Tabela 1. Os motores são apresentados com TAG's simbólicos.

Tabela 1 – Dados de placa e medições em campo

(continua)

Motor	Dados de placa			Medições no campo						
	$n_s$ (rpm)	$n_N$ (rpm)	$P_N$ (cv)	$I$ (A)	$V$ (kV)	$\cos(\varphi)$	$P_{el}$ (kW)	% válv.	$T_{MÁX}$ (°C)	$n_T$ (rpm)
Motor 1	3600	3587	2039	55,9	13800	0,92	1228,3	65	72	3589,7
Motor 2	900	892	1600	201	4,16	0,85	1220	100	66	894,2
Motor 3	900	894	2000	223	4,14	0,79	1270	100	52	895,4
Motor 4	3600	3573	1000	92	4,1	0,91	600	100	78,5	3583,6
Motor 5	3600	3568	300	24	4,16	0,82	152	100	62	3585,1

Tabela 1 – Dados de placa e medições em campo

(conclusão)										
Motor 6	3600	3570	550	52	4,1	0,9	334	9	72	3587
Motor 7	3600	3580	400	39,7	4,09	0,82	285	100	-	3586
Motor 8	400	393	505	56	4,09	0,61	236	-	44,7	397,1
Motor 9	1800	1780	350	27	4,16	0,85	166	-	61	1790
Motor 10	1200	1185	775	99	4,25	0,86	629	100	81	1190,7
Motor 11	1800	1787	750	64,2	4,11	0,81	374	100	20,4	1795,7
Motor 12	1800	1787	750	62,5	4,13	0,8	363	100	20	1795,4
Motor 13	1800	1781	476	39	4,71	0,87	245	100	56	1790,1
Motor 14	3600	3578	1074	108	4,16	0,88	690	54	40	3586,6
Motor 15	3600	3577	816	77	4,1	0,91	535	33,5	-	3586
Motor 16	1200	1187	286	29	4,19	0,88	190	100	46,9	1193,3
Motor 17	3600	3574	367	25	4,16	0,82	147	20	59	3589,6
Motor 18	3600	3580	1903	148	4,14	0,91	965	25	56	3590,9
Motor 19	3600	3572	400	30,2	4,2	0,89	196	50	67	3585,4
Motor 20	1800	1782	300	24	4,2	0,8	143	100	72	1792,7

Fonte: Elaboração própria

A potência elétrica foi convertida de kW para cv para o cálculo do carregamento. A potência de trabalho foi calculada conforme a Eq. 04, o fator de carregamento conforme a Eq. 06 e o rendimento do motor conforme a Eq. 07. Os valores finais do fator de carregamento e rendimento dos motores analisados estão descritos na Tabela 2 – Cálculo do carregamento dos motores.

Tabela 2 – Cálculo do carregamento dos motores

(continua)				
<b>Motor</b>	<b><math>P_{el}</math> (cv)</b>	<b><math>P_t</math> (cv)</b>	<b>FC (%)</b>	<b>R (%)</b>
Motor 1	1670,02	1616,73	79%	97%
Motor 2	1658,74	1162,86	73%	70%
Motor 3	1726,72	1535,73	77%	89%
Motor 4	815,77	609,21	61%	75%
Motor 5	206,66	140,36	47%	68%
Motor 6	454,11	239,47	44%	53%
Motor 7	387,49	280,47	70%	72%
Motor 8	320,87	211,4	42%	66%
Motor 9	225,70	175,98	50%	78%
Motor 10	855,20	482,80	62%	56%
Motor 11	508,50	249,28	33%	49%

Tabela 2 – Cálculo do carregamento dos motores

			(conclusão)	
Motor 12	493,54	266,63	36%	54%
Motor 13	333,11	249,22	52%	75%
Motor 14	938,14	655,80	61%	70%
Motor 15	727,40	497,81	61%	68%
Motor 16	258,33	147,93	52%	57%
Motor 17	199,86	147,48	40%	74%
Motor 18	1312,03	868,71	46%	66%
Motor 19	266,49	209,35	52%	79%
Motor 20	194,43	123,23	41%	63%

Fonte: Elaboração própria

A média do fator de carregamento dos motores analisados resultou em 54%, caracterizando que, nas condições de processo analisadas, os motores estavam com carregamento abaixo do ideal que é acima de 75%. O rendimento médio calculado foi 69% e, portanto, muito abaixo do rendimento ótimo de motores de elevada potência operando próximo da carga nominal. Este valor gerou dúvidas com relação à fidelidade do método de linearização utilizado, pois a curva característica dos motores apresenta usualmente um rendimento acima de 90% para operação de motores com 50% da carga. Por exemplo, os dados de placa do motor 3 analisado indicam que o rendimento do motor com 50% da carga deveria ser 95,8% ao invés de 89%. Portanto, uma análise individual de cada motor torna-se necessária para verificar junto ao fabricante o motivo de o motor não estar operando conforme o ensaio realizado na fábrica. De qualquer forma, a análise do carregamento demonstrou que há diversas oportunidades de melhorias na efficientização destes motores.

#### 4.2.2 Análise de carregamento de motor pelo método expedito da linearização

De todos os motores de média tensão analisados, foi selecionado para análise individual do método expedito um motor que estava operando com a carga nominal e, portanto, com a válvula de descarga da bomba totalmente aberta, localizado na estação de bombeamento de água bruta para a indústria. Este motor está identificado na Tabela 2 como motor 10.

O motor 10 opera normalmente em um ciclo permanecendo ligado durante 3h15min e desligado durante 2h40 aproximadamente. O tempo de operação do motor varia conforme a

demanda da estação de tratamento de água, mas usualmente mantém-se nestes patamares. As principais características elétricas do motor de indução trifásico com rotor de gaiola de esquilo analisado estão descritas na Tabela 4.

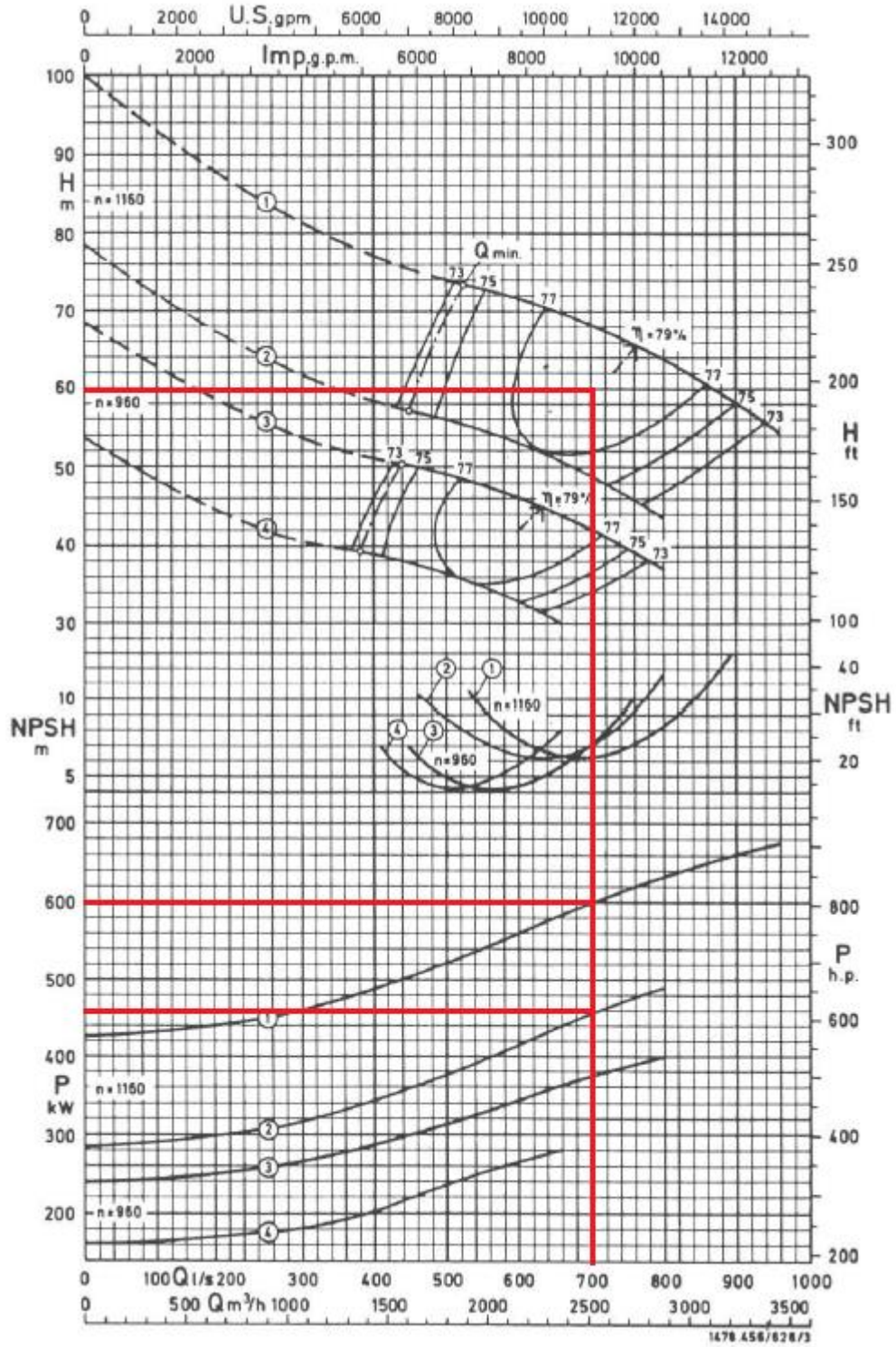
Quadro 3 – Características elétricas para *retrofit* de motor

Marca	GEVISA
Potência	570 kW (775 cv)
Tensão nominal	4000 V
Corrente nominal com carga plena	103,5 A
Corrente nominal à vazio	32,6 A
Corrente de partida	621 A
Fator de potência com carga plena	0,86
Rendimento com carga plena	94,0 %
Polos	VI
Rotação síncrona	1200 rpm
Rotação nominal	1185 rpm
Relé de proteção	GE Multilin 339

Fonte: elaboração própria

A bomba de captação de água é uma bomba vertical centrífuga tubular da marca KSB modelo SNZ500-630, onde 500 refere-se ao diâmetro nominal do flange de descarga em mm e 630 refere-se ao diâmetro nominal do rotor em mm. A vazão nominal de projeto é 2500m<sup>3</sup>/h, a pressão de sucção é 0,18 kgf/cm<sup>2</sup> e a pressão de descarga 5,18 kgf/cm<sup>2</sup>. A curva HxQ de operação da bomba indica uma altura manométrica de 60m para 2500m<sup>3</sup>/h de vazão, conforme destacado em vermelho na Figura 11.

Figura 11 – Curva da bomba KSB SNZ500-630



Fonte: KSB (1979) com destaque em vermelho pelo autor

Conforme descreve o Manual Técnico de bombas SNZ da KSB (KSB, 2007), a Eq. 8

deve ser utilizada para seleção da potência do motor.

$$P_M = \frac{(Q * H_{st} * g * \rho)}{\eta_{st}} * 1,1 \quad \text{Eq. 8}$$

Na Eq. 8, conforme manual do fabricante (KSB, 2007), a densidade  $\rho$  da água bruta contendo 200mg/l de areia é 0,983 kgf/cm<sup>3</sup>. Convertendo para l/s, a vazão Q bombeada é 649,4 l/s. A Figura 11 demonstra que a eficiência da bomba no ponto de operação da bomba destacado em vermelho é 79%, logo  $\eta_{st}$  é 0,79. A aceleração da gravidade é considerada como 9,81m/s<sup>2</sup>. Com a altura manométrica  $H_{st}$  de 60m prevista no projeto e o acréscimo de 10% na potência, conforme o comportamento da potência em função da vazão, a potência mecânica solicitada ao motor resulta 552,4 kW. Na curva complementar do fabricante, a potência pode variar de 460kW a 600kW, conforme o diâmetro. Para alcançar um valor mais fidedigno da potência requerida poderia se calcular a altura manométrica total da elevação (Brasil, 2006). Entretanto, seria necessário medir a altura referente a pressão manométrica no nível do líquido do reservatório de recalque e no de sucção assim como a velocidade do líquido em ambos.

As variáveis elétricas verificadas no relé de proteção Multilin SR GE 750 de proteção do CCM, no relé de proteção do motor Multilin GE 339 e no relé de proteção do banco de capacitores GE MIFII estão descritas na Quadro 4 , assim como a medição de rotação com a câmera estroboscópica Shimpo Instruments DT-725 e a temperatura da carcaça do estator medida com o termovisor Fluke Ti32.

Quadro 4 – Medições no campo

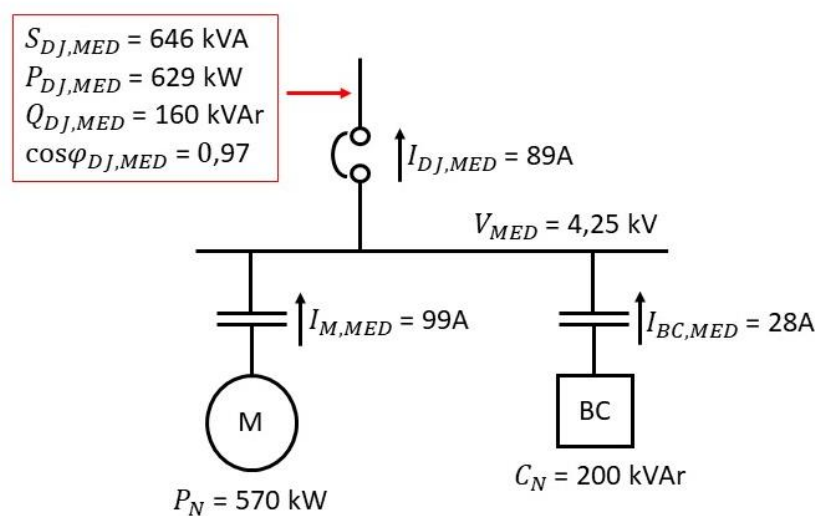
Corrente do motor	99 A
Corrente do banco de capacitores	28 A
Tensão do painel	4,25 kV
Corrente no disjuntor	89 A
Potência ativa no disjuntor	629 kW
Potência reativa no disjuntor	160 kVAr
Potência aparente no disjuntor	646 kVA
Fator de potência no disjuntor	0,97
Rotação de trabalho	1190,7 rpm
Temperatura da carcaça	81°C

Fonte: Elaboração própria

Como o relé de proteção do motor e do banco de capacitores não possuía TP's conectado nos terminais de entrada de tensão, a potência elétrica ativa foi verificada no relé de proteção

da entrada do CCM pois a única carga consumidora de potência ativa era o motor. No barramento deste CCM, além da contatora de alimentação do motor há uma contatora para alimentação de um banco de capacitores de 200kVAr, que serve para correção do fator de potência. Um contato auxiliar do contator principal aciona também o contator do banco de capacitores conectando este em paralelo com o motor, conforme demonstra o esboço simplificado na Figura 12.

Figura 12 – Esquema simplificado da alimentação do motor



Fonte: Elaboração própria

A energia reativa do banco de capacitores foi calculada conforme a corrente eficaz visualizada no relé e a tensão do barramento, que foi constatado estar acima do nominal de 4,16kV. Como a tensão nominal do motor é de 4kV, verificou-se que a tensão de 4,25kV estava 6,25% acima da nominal. Realmente, é definição de projeto de engenharia nas plantas petroquímicas da companhia que os motores sempre são comprados para uma tensão menor que a nominal. Isto é efetuado para reduzir o impacto da queda de tensão nos cabos de alimentação do demarrador até a os terminais do motor, causada principalmente pela corrente de partida, a qual fica em torno de 6 vezes a nominal nos motores de indução. Entretanto, conforme descreve Brasil (2007, p. 428), para um aumento da variação da tensão nominal o torque de partida, máximo e de operação, aumenta a rotação diminuindo o escorregamento, o rendimento aumenta de 0,5 a 1 ponto percentual a plena carga mas reduz de 1 a 2% com 50% de carregamento, e o fator de potência diminui. Em virtude da impossibilidade de se verificar no relé do motor a medição da potência ativa e, portanto, do fator de potência, foi calculado a



potência aparente trifásica no motor com o valor da corrente (Eq. 9). Como a potência ativa do disjuntor é igual à do motor (Eq. 10) visto que o banco de capacitores somente fornece reativo para o sistema, foi calculado o fator de potência do motor (Eq. 11) conforme descrito abaixo.

$$S_M = V_{MED} * P_{MED.M} * \sqrt{3} \quad \text{Eq. 9}$$

$$S_M = 4,25kV * 99A * \sqrt{3}$$

$$S_M = 728 kVA$$

$$P_{DJ} = P_M = 629kW \quad \text{Eq. 10}$$

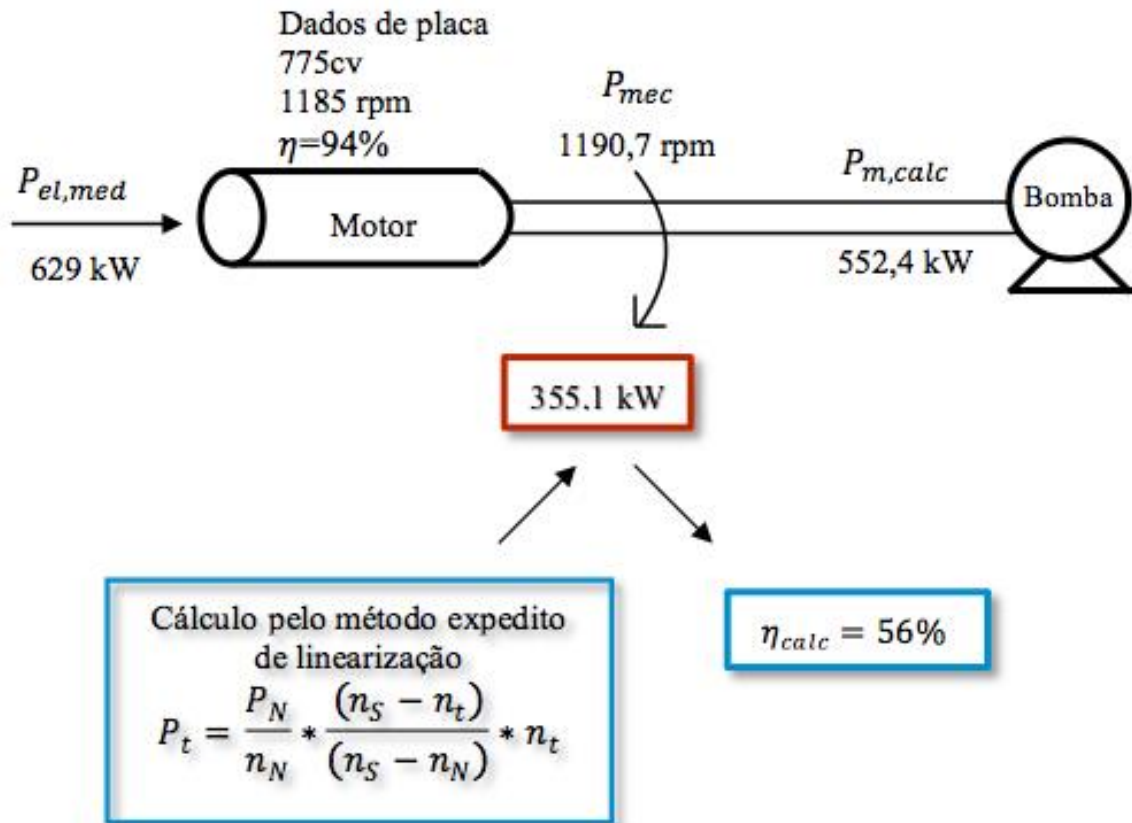
$$\cos\varphi_M = \frac{P_M}{S_M} \quad \text{Eq. 11}$$

$$\cos\varphi_M = \frac{629}{728}$$

$$\cos\varphi_M = 0,86$$

A folha de dados do motor M10 apresenta a curva de performance do motor, sem discriminar o rendimento para 50% e 75% da carga. Na placa do motor consta que seu rendimento é 94% em carga plena. Pela curva do fabricante, o motor teria um rendimento levemente inferior aos 94% com 60% de carga. Entretanto, pelo método expedito, o rendimento ficou em 56%, muito abaixo do indicado pelo fabricante. A potência mecânica no eixo calculada pelo método expedito foi 482,8 cv e, portanto, nesta situação, o motor utiliza 62% da potência nominal de 775 cv disponível. A Figura 13 ilustra o fluxo de potência medido e calculado com o método expedito de linearização da curva do conjugado.

Figura 13 – Fluxo de potência do motor analisado



Fonte: Elaboração própria

#### 4.2.3 Avaliação da medição de rotação

Foi verificado que embora a precisão da câmara estroboscópica seja elevada (0,02% da rotação medida), a variação da rotação na região de operação onde é estimada a linearidade da curva M x n do motor é elevada e, portanto, o erro de medição se propaga para o cálculo da potência de trabalho. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** verifica-se o percentual de variação da potência de trabalho com acréscimo de 0,02% na medição da rotação e com decréscimo de 0,02%. Curiosamente, o menor erro é no motor M10, o qual foi escolhido para o estudo de *retrofit*. Verifica-se que a maior propagação do erro é no Motor 11, sendo que este percentual se propagava igualmente tanto para o cálculo do carregamento quanto para o cálculo do rendimento operacional.

Tabela 3 - Propagação do erro de medição da câmara estroboscópica

Motor	$P_t$ (cv)	$P_t + \varepsilon$ (cv)	%	$P_t - \varepsilon$ (cv)	%
Motor 1	1617,1	1504,7	-7,5%	1729,4	6,5%
Motor 2	1162,9	1127,2	-3,2%	1198,5	3,0%
Motor 3	1535,7	1476,2	-4,0%	1595,2	3,7%
Motor 4	487,4	466,2	-4,5%	508,6	4,2%
Motor 5	140,4	133,6	-5,0%	147,1	4,6%
Motor 6	239,5	226,3	-5,8%	252,6	5,2%
Motor 7	280,5	266,2	-5,4%	294,8	4,9%
Motor 8	197,6	192,2	-2,8%	202,9	2,6%
Motor 9	176,0	169,7	-3,7%	182,2	3,4%
Motor 10	482,8	470,5	-2,6%	495,1	2,5%
Motor 11	249,3	228,5	-9,1%	270,1	7,7%
Motor 12	266,6	245,9	-8,4%	287,4	7,2%
Motor 13	249,2	240,3	-3,7%	258,2	3,5%
Motor 14	655,8	620,8	-5,6%	690,8	5,1%
Motor 15	497,8	472,4	-5,4%	523,2	4,9%
Motor 16	147,9	142,7	-3,7%	153,2	3,4%
Motor 17	147,5	137,3	-7,4%	157,6	6,4%
Motor 18	868,7	800,3	-8,5%	937,1	7,3%
Motor 19	209,4	199,1	-5,1%	219,6	4,7%
Motor 20	123,2	117,2	-5,1%	129,2	4,6%

Fonte: Elaboração do autor

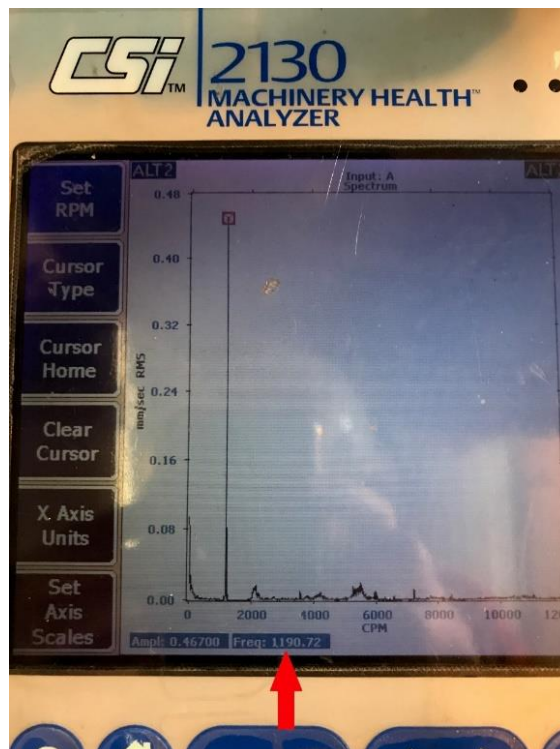
Após consulta a engenheiros da empresa Weg, empresa reconhecida atualmente como uma das maiores fabricantes de motores do mundo, e consulta a engenheiros da área elétrica e mecânica da empresa analisada, questionou-se um possível erro de medição causado por falta de calibração do instrumento utilizado. Para garantir a eficácia na medição, foi realizada outra medição com outro instrumento. Desta vez, foi utilizado um analisador de vibração portátil CSI 2130, onde através da função de análise espectral consegue-se verificar em qual vibração ocorre o pico da frequência fundamental, e, assim verificar a rotação do rotor. Esta medição confirmou que a primeira medição estava adequada, pois registrou uma frequência de 1190,72 ciclos por minuto. A Figura 14 demonstra a medição feita com a câmara estroboscópica Shimpo e a Figura 15 com o analisador de vibração, onde está sinalizado o valor da medição da frequência.

Figura 14 – Medição de rotação com Shimpo



Fonte: elaboração própria

Figura 15 – Medição de rotação com CSI



Fonte: elaboração própria

#### 4.2.4 Análise de faturamento de energia

Uma das subestações da indústria analisada está localizada a cerca de 4km da área industrial e alimenta os motores que acionam bombas de recalque de água bruta para a estação de tratamento de água da empresa. O monitoramento e comando das cargas é feito remotamente através de um link de comunicação com antena de rádio transmissão. Esta subestação é alimentada em 23kV pela concessionária, possui 2 transformadores de 2,5 MVA que rebaixam para 4160V para alimentar os motores e um transformador para alimentação dos sistemas auxiliares e demais equipamentos da casa de bombas.

O subgrupo tarifário é o A4 modalidade horo-sazonal verde e, portanto, há uma única demanda contratada independente da hora do dia (na ponta ou fora de ponta). A casa de bombas possui uma bomba alternativa acionada por um motor diesel para operar em caso de indisponibilidade das bombas acionadas pelos motores elétricos, falta de energia da concessionária ou caso seja necessário operar durante o horário de ponta.

A demanda atual contratada da concessionária para esta subestação era 600 kW. Analisando o histórico da fatura de energia desta subestação, verificou-se que em todos os últimos 12 meses houve ultrapassagem da demanda contratada. Conforme PROCEL (2011, p. 11), para o subgrupo tarifário A4, a parcela da demanda ultrapassada é cobrada somente quando a demanda medida ultrapassa mais de 10% a demanda contratada. Entretanto, conforme descrito em Conserv Eficiência Energética (2010), a ANEEL alterou o disposto na resolução normativa 456 (ANEEL, REN 456, 2000) na resolução normativa 414 (ANEEL, REN 414, 2010) o limite de tolerância para 5% da demanda contratada e o valor da tarifa passou de três para duas vezes o valor normal da tarifa de fornecimento. Retificada pela ANEEL (REN 418, 2010), o art. 93 descreve que deve ser adicionado ao faturamento regular a cobrança por esta ultrapassagem conforme a Eq. 12 abaixo.

$$D_{ULTRAPASSAGEM}(p) = [PAM(p) - PAC(p)]. 2. VR_{DULT}(p) \quad \text{Eq. 12}$$

Na Eq. 08 a  $D_{ULTRAPASSAGEM}(p)$  é o valor de demanda de potência ativa ultrapassada,  $PAM(p)$  é a demanda de potência ativa medida,  $PAC(p)$  é a demanda de potência ativa contratada e  $VR_{DULT}$  é o valor referência da tarifa de demanda da concessionária. Percebe-se no histórico de consumos que a média da demanda era em torno de 635 kW, sendo o valor

menor 625 kW e o valor maior 671 kW. Portanto, todos os meses onde a demanda excedia 630 kW, era cobrada uma tarifa adicional pelo excedente com o dobro da tarifa normal. No último mês analisado houve um consumo pequeno no horário de ponta correspondendo a menos de 1% do consumo total de energia em kWh. Isto se deve principalmente ao fato da possibilidade de comando remoto dos motores e da console de operação do SDCD informar através de um alarme 10 minutos antes o início do horário de ponta e 10 minutos após o término do horário de ponta, possibilitando aos operadores o acionamento dos motores somente no horário fora de ponta.

#### 4.2.5 Análise econômica para *retrofit* de motor

O projeto de *retrofit* considerou que o método expedito estava adequado e que o motor operava realmente com 62% da potência nominal. Ele objetivou analisar os ganhos com redução da fatura de energia através da substituição deste motor por outro de 500 cv, com as demais características iguais, exceto o rendimento, que seria o equivalente à de um motor IE3 com 95,8% a plena carga, conforme Tab. 01 da portaria n° 29 de 26/01/17 do MME (MME, jan 2017). Como o carregamento ficaria em 97%, o rendimento seria próximo de 95%. A potência elétrica que este motor consumiria é 386,8 kW, conforme descrito na Eq. 13.

$$P_{el,NOVO} = \frac{P_{N,NOVO}}{R_{NOVO}} * \frac{735}{1000} \quad \text{Eq. 13}$$

$$P_{el,NOVO} = \frac{500}{0,95} * \frac{735}{1000}$$

$$P_{el,NOVO} = 386,8 \text{ kW}$$

Considerando que o fator de potência nominal continuará no mesmo patamar que o motor atual, a potência reativa consumida pode ser calculada pela Eq. 14. Portanto, o banco de capacitores de 200kVAr, que está instalado atualmente, está adequado, fornecendo energia a mais até do que o necessário para correção do fator de potência.

$$Q_{el,NOVO} = P_{el,NOVO} * \sqrt{\frac{1 - \cos\varphi_M}{\cos\varphi_M}} \quad \text{Eq. 14}$$

$$Q_{el,NOVO} = 386,8 * \sqrt{\frac{1 - 0,86}{0,86}}$$

$$Q_{el,NOVO} = 156 \text{ kVAr}$$

Com a potência de 386,8 kW, a demanda da concessionária poderia ser reduzida para 400 kW. Isto geraria uma economia anual de R\$ 43.305,39, conforme demonstrado na Eq. 15. O valor da tarifa utilizada é o mesmo da fatura atual analisada e está isento de ICMS.

$$E_{DEM} = (D_{atual} - D_{nova}) * T_{fora\ pont a} * n^{\circ} \text{ meses} \quad \text{Eq. 15}$$

$$E_{DEM} = (635 - 400) * 15,35652 * 12$$

$$E_{DEM} = \text{R\$ } 43.305,39$$

O tempo de operação foi baseado na fatura de energia, dividindo o consumo mensal pela potência ativa consumida pelo motor multiplicado por 12 meses, chegando a 4388h por ano. Na fatura analisada, houve tarifação do consumo com bandeira amarela e verde. Para o cálculo da economia anual utilizou-se a bandeira amarela por estar entre a verde e a vermelha. A economia gerada no consumo descrita na Eq. 16 considera a redução da potência elétrica consumida pelo motor multiplicado pelo número de horas de operação e pela tarifa atual.

$$E_{CONS} = (C_{atual} - C_{novo}) * h_{oper,anual} * T_{AMAR,fora\ pont a} \quad \text{Eq. 16}$$

$$E_{CONS} = (629 - 386,8) * 4388h * 0,368739$$

$$E_{CONS} = \text{R\$ } 391.810,57$$

O ICMS atualmente representa 30% da soma do consumo e da demanda, desconsiderando as taxas de FER e outros itens da fatura que representam menos que 1% do valor total. Neste caso, a economia com ICMS anual resultaria no valor de R\$ 130.534,79, conforme descrito na Eq. 17.

$$E_{ICMS} = (E_{DEM} + E_{CONS}) * ALÍQUOTA_{ICMS} \quad \text{Eq. 17}$$

$$E_{ICMS} = (\text{R\$ } 43.305,39 + \text{R\$ } 391.810,57) * 30\%$$

$$E_{ICMS} = \text{R\$ } 130.534,79$$

O valor de economia total na fatura de energia gerado seria a soma de  $E_{DEM}$ ,  $E_{CONS}$  e  $E_{ICMS}$  resultando em R\$ 565.650,74 por ano.

O *retrofit* proposto não analisou os custos de instalação nem a redução nos custos de manutenção. Também não foi analisado a vida útil do motor, o conjugado de partida e sobre-elevação de temperatura.

Com base em consulta ao site de fabricante de motores Weg, o preço padrão de um motor de 500 cv para 480V estava em torno de R\$115.000,00. Considerou-se, portanto, o custo

de aquisição de R\$150.000,00 para um motor de 500 cv, 6 pólos, 4kV. Como é necessário a substituição de dois motores, pois um sempre está na reserva do outro motor, o custo total do investimento estimado seria R\$ 300.000,00.

Conforme Eq. 18, o *payback* simples resultaria em aproximadamente 7 meses demonstrando um excelente investimento, pois o prazo é menor que 2 anos.

$$PB = \frac{I}{A} \quad \text{Eq. 18}$$

$$PB = \frac{\text{R\$ } 300.000,00}{\text{R\$ } 565.650,74}$$

$$PB = 7 \text{ meses}$$



## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho proporcionou verificar, na planta industrial analisada, o carregamento de alguns motores de indução trifásicos de média tensão com rotor gaiola de esquilo. A quantidade de motores analisados não é significativa e, portanto, não representa a totalidade dos motores instalados. Devido à disponibilidade de tempo para realização deste estudo, às restrições operacionais de análise dos motores com carga plena e às limitações de informações na folha de dados dos motores, este estudo não pode demonstrar que a indústria opera com a maioria dos motores de média tensão com carregamento reduzido. Entretanto, o método expedito demonstrou que, na pequena parcela dos motores analisados, o seu carregamento estava abaixo do mínimo recomendável de 75%.

O rendimento operacional calculado de 69%, no entanto, trouxe à tona a vulnerabilidade do método expedito, pois apresentou valores muito abaixo do definido pelos fabricantes dos motores para o carregamento encontrado. A análise da potência requerida pela bomba no estudo do *retrofit* mostrou que, embora o rendimento do motor calculado pelo método expedito refletisse 56%, a potência elétrica fornecida ao motor estava compatível com a vazão de água bombeada, indicando que há alguma falha no método ou na medição da rotação. Cogitou-se, neste momento, confirmar a calibração do instrumento em laboratório externo acreditado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), mas o cálculo de propagação da incerteza da medição de rotação, com a câmera estroboscópica, demonstrou que o erro associado era pequeno, com variação máxima de 2,6% do rendimento, inferindo não ser esta a causa principal. Aliado a isto, com a leitura da rotação pelo analisador de vibração portátil, confirmou-se que a medição de rotação estava adequada.

Portanto, com base nestas informações, verificou-se que a utilização do método expedito por linearização da curva de conjugado não garante uma avaliação adequada do rendimento operacional do motor. O erro associado ao cálculo do rendimento pode ter sido causado por diferença da rotação nominal descrita na placa de motor. De fato, Andrade (s.d.) descreve, no item 3.3.1 do seu artigo, que este dado pode apresentar erros permitidos por norma de até 20%. Provavelmente a rotação nominal não era 1185rpm como o fabricante informou, mas sim algo em torno de 1190 rpm. Banan (2005), no item 2.3 do seu artigo, também relata que diversos estudos mostram que o erro médio deste método é de 15 a 20%.

Embora diversos autores como Martins (2015), Elektro (2012), Brasil (2006), sugerem como método expedito a utilização da linearização da inclinação da curva característica na região de trabalho, Andrade (s.d) propõe o método neozelandês ECNZ, do tipo perdas

segregadas, que apesar de um pouco invasivo, apresenta elevada precisão de 1% no cálculo do rendimento. O artigo do referido autor também destaca o método BdMotor, desenvolvido pela Eletrobrás, que, utilizando os dados de corrente de entrada para calcular a carga do motor, faz uma interpolação dos dados de eficiência do fabricante para o ponto de operação calculado, apresentando uma precisão de 4%. Realmente, durante o processo de definição da escolha para o *retrofit*, cogitou-se utilizar o método BdMotor, mas a base de dados dos fabricantes utilizada não abrangia o motor de 775cv – 4kV deste projeto. Banan (2005) indica um algoritmo genético para estimar a eficiência em três condições, sendo que quanto mais intrusivo maior a acurácia. Na segunda condição, ele utiliza como dados de entrada do algoritmo os parâmetros elétricos de entrada do motor em 7 pontos de carregamento diferentes para estimar o rendimento com boa precisão. Wiedenbürg (s.d.) compara 4 métodos não intrusivos – *nameplate*, limite superior com resistência, *ORMEL 96* e o método de corrente instantânea – com o IEEE 112A, método referência para análise de rendimento de motores, mas que envolve elevada instrumentação.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas observações para solucionar este impasse de maneira a validar o baixo carregamento do motor foram levantadas e são propostas para um projeto futuro:

i) efetuar outras análises não intrusivas para avaliar o rendimento, como o método expedito da medição da potência de entrada, proposta por Campana (2000, apud Shindo & Soares), ou o método do algoritmo genético proposto por Banan (2005), ou ainda o método de corrente instantânea proposto por Wiedenbrüg (s.d.);

ii) avaliar a possibilidade de a bomba operar com altura manométrica diferente dos 60m previstos no projeto. De fato, foi verificado na placa da bomba Ksb que altura manométrica era 50m. Também foi verificado que foi removido uma parte dos eixos do rotor, trazendo o bocal de sucção para um nível 1,5m mais alto e evitando o atolamento da bomba pelo excesso de lodo das partes mais baixas do poço de sucção;

iii) contatar o fabricante do motor para avaliação mais precisa da curva característica específica do modelo de motor analisado.

Portanto, recomenda-se que seja realizado estudo mais amplo que contemple uma análise mais aprofundada no rendimento das máquinas elétricas motrizes de forma a expandir as possibilidades de análise de rendimento de motores na indústria por métodos não intrusivos. Este estudo deverá ser realizado com o acompanhamento do carregamento dos motores em situações de processo nas quais o motor esteja operando em plena carga com a válvula de descarga totalmente aberta, no caso de acionamento de bombas centrífugas, ou com as válvulas de alívio de compressores totalmente fechadas, no caso de compressores, e aplicando restrições graduais na carga. No planejamento de paradas de manutenção, pode-se propor a gerência de manutenção industrial, a inclusão de ensaios com o motor desacoplado e com o motor acoplado, medindo o diferencial no consumo de potência ativa do motor, de forma a verificar oportunidades que embasem estudos de *retrofit* para melhoria do carregamento dos motores. Outro ensaio no campo poderia ser feito conectando um medidor de rotação em um registrador e amostrando os dados de rotação durante o desligamento do motor acoplado a carga, de forma a calcular o momento de inércia da carga e subsidiar o cálculo do conjugado mecânico necessário.

Uma oportunidade de melhoria que será proposta à CICE será monitorar um IDE de consumo de energia elétrica em kWh por trabalho produzido nos motores, em CV, restrito ao consumo das grandes máquinas. Este indicador refletirá quanto de energia será necessário para acionar um 1CV no eixo dos motores. Outra proposta será a análise do índice do consumo de

energia elétrica de toda a planta.

A aplicação constante de sucessivos fatores de segurança, nas várias etapas de um projeto de dimensionamento de motores elétricos e das cargas acionadas, resulta em uma perda considerável, na prática, da eficiência das máquinas motrizes. Relatos de técnicos e engenheiros da empresa demonstram que ideia principal em dimensionar uma máquina com potência maior do que a necessária evita problemas posteriores de falta de capacidade de fornecimento de potência elétrica, ou mecânica, à carga em virtude de perdas maiores de energia do que o especificado nos projetos, causadas por atrito, problemas na lubrificação, falhas mecânicas ou alteração da viscosidade do líquido. Este sobredimensionamento também é fruto da expectativa de possível aumento de carga no futuro, permitindo que seja ampliado o volume de líquido bombeado, no caso de bombas centrífugas, aumentando o diâmetro do impelidor. Entretanto, esta “filosofia” de projeto onera os custos de aquisição da máquina motriz, dos cabos de alimentação do motor, do barramento do painel, do transformador de potência e dos cabos de alimentação da subestação, além de, como já demonstrado, reduzir a eficiência dos motores e consumir mais energia elétrica do que o necessário.

## REFERÊNCIAS

- ABESCO. **Potencial de Eficiência Energética no Brasil 2008 – 2016**. Mai 2017. Disponível em < <http://www.abesco.com.br/pt/novidade/potencial-de-eficiencia-energetica-no-brasil-2008-2016/> >. Acesso em 10 jun 2017.
- ANDRADE, C. T. C; MOREIRA, A. B; PONTES, R. S. T. **Análise comparativa de métodos para cálculo de eficiência de motores de indução em operação**. Lamotriz. UFC. S.d. Disponível em < [http://www.lamotriz.ufc.br/Artigos/artigo\[16\].pdf](http://www.lamotriz.ufc.br/Artigos/artigo[16].pdf) >. Acesso em 27 jun 2017.
- ANEEL. Resolução Normativa N° 410, de 29 de novembro de 2000. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf> >. Acesso em 2 jun. 2017.
- ANEEL. Resolução Normativa N° 414, de 9 de setembro de 2010. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Disponível em < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf> >. Acesso em 2 jun. 2017.
- ANEEL. Resolução Normativa N° 418, de 23 de novembro de 2010. Retifica a Resolução Normativa ANEEL n° 414, de 2010. Disponível em < <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010418.pdf> >. Acesso em 2 jun. 2017.
- ANEEL. **Programa de Eficiência Energética**. Disponível em < <http://www.aneel.gov.br/pt/programa-eficiencia-energetica> >. Acesso em 25 mai 2017.
- BANAN, K; SHARIFIAN, M; MOHAMMADI, J. *Induction Motor Efficiency Estimation using Genetic Algorithm. Proceedings of world academy of science, engineering and technology*. V. 3 Jan 2005.
- Brasil. Itamaraty. **Mudança do clima**. Disponível em < <http://www.itamaraty.gov.br/pt-BR/politica-externa/desenvolvimento-sustentavel-e-meio-ambiente/712-mudanca-no-clima> >. Acesso em 2 jun 2017.
- Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Conservação de Energia**. Eficiência energética de Equipamentos e Instalações. 3 ed. Eletrobrás / PROCEL EDUCAÇÃO. FUPAI. 2006.
- Brasil. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Energia 2030** / Ministério de Minas e Energia; colaboração Empresa de Pesquisa Energética. Brasília : MME : EPE, 2007. v. 11. Eficiência energética.
- CAMPANA, S. et al. **Estudo comparativo de métodos para estimativa do carregamento e rendimento de motores elétricos para auditoria energética**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.4, n.2, p.241-246, 2000.
- CNI. **Incentivo à substituição de motores elétricos: promovendo a eficiência energética no segmento de força motriz**. Brasília, 10 set 2015. Disponível em <

[http://www.aneel.gov.br/pt/programaeficienciaenergetica//asset\\_publisher/94kK2bHDL Pmo/content/chamadasdeprojetosprioritarios/656831?inheritRedirect=false&redirect=ht tp%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fpt%2Fprogramaeficienciaenergetica%3Fp\\_p\\_id %3D101\\_INSTANCE\\_94kK2bHDL Pmo%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dno rmal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn2%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26 p\\_p\\_col\\_count%3D2](http://www.aneel.gov.br/pt/programaeficienciaenergetica//asset_publisher/94kK2bHDL Pmo/content/chamadasdeprojetosprioritarios/656831?inheritRedirect=false&redirect=ht tp%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fpt%2Fprogramaeficienciaenergetica%3Fp_p_id %3D101_INSTANCE_94kK2bHDL Pmo%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dno rmal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn2%26p_p_col_pos%3D1%26 p_p_col_count%3D2) >. Acesso em 28 jun 2017.

Conserv Eficiência Energética. **Resolução 414 da ANEEL altera limites de tolerância para ultrapassagem de demanda de potência ativa**. 27 out. 2010. Disponível em: < <http://conservenergia.com.br/site/node/22>>. Acesso em 2 jun. 2017.

Copel, **Manual de eficiência energética**. Novembro, 2015. Curitiba, PR.

ELEKTRO. **Eficiência energética: fundamentos e aplicações**. UNIFEI. EXCEN. FUPAI. 1 ed. 2012.

ELEKTRO. Manuais Elektro de Eficiência Energética. **Segmento Industrial – Sistemas Motrizes**. s.d.

EPE/MME. **BEN 2016**. Relatório Síntese – ano base 2015. Rio de Janeiro, RJ. Jun 2016. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese.aspx?anoColeta=2016&anoFimColeta=2015> >. Acesso em 1 jun 2017.

Fluke. **Termovisor Fluke Ti32**. Disponível em < <http://www.fluke.com/fluke/BRPT/Termovisores/Fluke-Ti32.htm?PID=56184> >. Acesso em 5 jun 2017.

GE. **GE Grid Solutions. Protection and Control**. Disponível em < [https://www.gegridsolutions.com/Protection\\_Control.htm](https://www.gegridsolutions.com/Protection_Control.htm) >. Acesso em 15 mai 2017.

IEA. *Energy and Climate Change. World energy outlook special report*. 2015.

KSB. Catálogo de produtos. SNZ. **Manual de curvas complementares**. 1 jul 1979. p. 24. Disponível em < <http://www.ksb.com.br/ksb-br-pt/pesquisa.php?q=snz> >. Acesso em 25 jun 2017.

KSB. Catálogo de produtos. SNZ. **Manual técnico**. 19 jan 2007. P. 15. Disponível em < <http://www.ksb.com.br/ksb-br-pt/pesquisa.php?q=snz> >. Acesso em 25 jun 2017.

Leonardo Energy. **Troca de Motores Elétricos Oferece Ganho de Eficiência Energética**. Disponível em < <http://leonardo-energy.org.br/noticias/troca-de-motores-eletricos-oferece-ganho-de-eficiencia-energetica/> >. Acesso em 15 jun 2016.

LUCA, H. P. Webinar: **“Bônus para substituição de motores elétricos Projeto Prioritário ANEEL”**. Leonardo Energy. Apresentado em 18 Mai 2017. Disponível em < <http://leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/download-manager-files/Webinar%20Projeto%20Prioritario.pdf> >. Acesso em 11 jun 2017.

MARTINS, G. M. **Eficientização de instalações de motores elétricos**. UFSM. Centro

de Tecnologia. Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência. 2015.

MME. **Consultas públicas.** Regulamentação específica do Programa de Metas para Motores Elétricos Trifásicos. Disponível em < [http://www.mme.gov.br/web/guest/consultaspublicas;jsessionid=CE66E7B528D397FF77F3FF14C1E17C8A.srv154?p\\_p\\_id=consultapublicaexterna\\_WAR\\_consultapublicaportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column-1&p\\_p\\_col\\_count=1&\\_consultapublicaexterna\\_WAR\\_consultapublicaportlet\\_consultaId=25&\\_consultapublicaexterna\\_WAR\\_consultapublicaportlet\\_mvcPath=%2Fhtml%2Fpublico%2FdadosConsultaPublica.jsp](http://www.mme.gov.br/web/guest/consultaspublicas;jsessionid=CE66E7B528D397FF77F3FF14C1E17C8A.srv154?p_p_id=consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&_consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet_consultaId=25&_consultapublicaexterna_WAR_consultapublicaportlet_mvcPath=%2Fhtml%2Fpublico%2FdadosConsultaPublica.jsp) >. Acesso em 20 jun 2017.

MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética.** Premissas e Diretrizes Básicas. 18 out 2011.

MME. **Portaria N° 29,** de 26 de janeiro de 2017. Disponível em < [http://www.mme.gov.br/documents/10584/4401929/Portaria\\_n\\_29-2017/649df5e0-8b38-4a50-85ab-489c5c42d816](http://www.mme.gov.br/documents/10584/4401929/Portaria_n_29-2017/649df5e0-8b38-4a50-85ab-489c5c42d816) >. Acesso em 18 jun 2017.

NR20. Norma regulamentadora 20. **Segurança e saúde no trabalho com inflamáveis e combustíveis.** Disponível em < <http://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr20.htm> >. Acesso em 20 mai 2017.

SGARBI, F. Webinar: “**Guia para Aplicação da Norma ABNT NBR ISO 50001 – Gestão de energia.**” Leonardo Energy. Apresentado em 08 Mai 2017. Disponível em < <http://leonardo-energy.org.br/wpdm-package/guia-para-aplicacao-da-norma-abnt-nbr-iso-50001-gestao-de-energia/> >. Acesso em 11 jun 2017.

PROCEL. Eficiência energética nos prédios públicos. **Manual de Tarifação da Energia Elétrica.** 2011.

NYBOER, J.; RIVERS, N. *Energy Consumption Benchmark Guide - Conventional Petroleum Refining in Canada.* Canadian Industry Program for Energy Conservation - CIPEC. Dez 2002.

POMPERMAYER, M. L. **Workshop sobre Proposta de Projeto Prioritário de Eficiência Energética.** Brasília, 9 set 2015. Disponível em < [http://www.aneel.gov.br/pt/programaeficienciaenergetica//asset\\_publisher/94kK2bHDLPmo/content/chamadasdeprojetosprioritarios/656831?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fpt%2Fprogramaeficienciaenergetica%3Fp\\_p\\_id%3D101\\_INSTANCE\\_94kK2bHDLPmo%26p\\_p\\_lifecycle%3D0%26p\\_p\\_state%3Dnormal%26p\\_p\\_mode%3Dview%26p\\_p\\_col\\_id%3Dcolumn2%26p\\_p\\_col\\_pos%3D1%26p\\_p\\_col\\_count%3D2](http://www.aneel.gov.br/pt/programaeficienciaenergetica//asset_publisher/94kK2bHDLPmo/content/chamadasdeprojetosprioritarios/656831?inheritRedirect=false&redirect=http%3A%2F%2Fwww.aneel.gov.br%2Fpt%2Fprogramaeficienciaenergetica%3Fp_p_id%3D101_INSTANCE_94kK2bHDLPmo%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview%26p_p_col_id%3Dcolumn2%26p_p_col_pos%3D1%26p_p_col_count%3D2) >. Acesso em 28 jun 2017.

Shimpo. **DT-725 Stroboscope.** Disponível em < <http://shimpoinstruments.com/product/DT-725> >. Acesso em 15 mai 2017.

Rotas Estratégicas - SETOR ENERGIA. “**Publicada a tão aguardada norma ISO 50001 para gestão energética**” Disponível em < <https://rotaenergia.wordpress.com/2011/06/16/publicada-a-tao-aguardada-norma-iso-50001-para-gestao-energetica/> >. Acesso em 10 jun 2017. Publicado em 26 jun 2011.

WEG. Motores elétricos. **Guia de especificação**. Nov 2016. Disponível em <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-especificacao-de-motores-eletricos-50032749-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em 2 jun 2017.

WIEDENBRÜG, E. J; WALLACE, A. K. *In service testing of three phase induction machines*. S.d.