

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

MATHEUS LUIS FORTI

**ESTUDO DE CASO DA CORREÇÃO DE FATOR DE
POTÊNCIA INDUSTRIAL**

DOURADOS

2017

MATHEUS LUIS FORTI

**ESTUDO DE CASO DA CORREÇÃO DE FATOR DE
POTÊNCIA INDUSTRIAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de
graduação apresentado para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Energia
na Faculdade de Engenharia, Universidade
Federal da Grande Dourados. Orientador:
Prof. Dr. Aureo Cezar de Lima

**DOURADOS
2017**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

F741e Forti, Matheus Luis

Estudo de caso da correção de fator de potência industrial / Matheus Luis
Forti -- Dourados: UFGD, 2017.

73f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Aureo Cezar de Lima

TCC (Graduação em Engenharia de Energia) - Faculdade de Engenharia,
Universidade Federal da Grande Dourados.

Inclui bibliografia

1. Fator de Potência. 2. Correção. 3. Energia reativa. 4. Análise de
viabilidade econômica. I. Título.

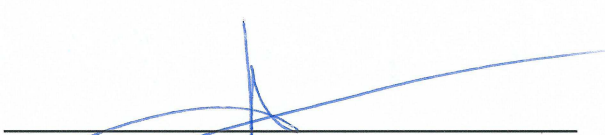
Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.


MATHEUS LUIS FORTI

**ESTUDO DE CASO DA CORREÇÃO DE FATOR DE
POTÊNCIA INDUSTRIAL**

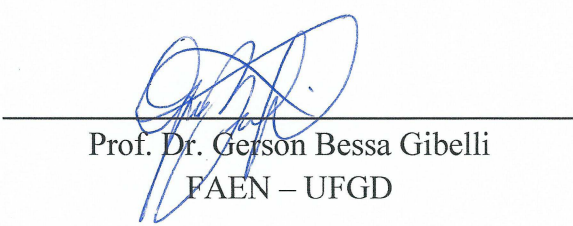
Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia na Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados pela comissão formada por:



Orientador: Prof. Dr. Aureo Cezar de Lima
FAEN – UFGD



Prof. Dr. Etienne Biasotto
FAEN – UFGD



Prof. Dr. Gerson Bessa Gibelli
FAEN – UFGD

Dourados, 13 de Abril de 2017

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Sérgio e Joceli que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aureo Cezar de Lima, pela dedicação e paciência empregada neste trabalho.

Aos meus colegas que fizeram com que essa trajetória valesse a pena.

Agradeço também a minha namorada Suzana, que de forma especial e carinhosa me deu força e coragem, me incentivando e apoiando nos momentos de dificuldades.

RESUMO

O aumento no consumo de energia elétrica exige cada vez mais o uso eficiente da mesma; neste contexto foi desenvolvido este trabalho com o objetivo de estudar dois casos de correção do fator de potência no setor industrial, uma vez que isto leva a diminuição da demanda por energia reativa fornecida pelas unidades geradoras e libera sua capacidade para o fornecimento de potência ativa. Serão discutidos e exemplificados dois métodos para a correção do fator de potência, um quando a indústria encontra-se em fase de projeto e, o outro, em operação. Através desses métodos, foram projetados os bancos de capacitores e avaliou-se suas viabilidades econômicas obtendo-se um retorno de capital de 2 anos para o primeiro caso e 7 meses, para o segundo.

Palavras-chave: Fator de Potência, correção, energia reativa, análise de viabilidade econômica.

ABSTRACT

Increasing the consumption of electric energy requires a more efficient use of it. In this context, the aim of this paper is to study two cases of power factor correction in the industrial sector, once this leads to a decreasing demand for reactive energy supplied by the generating units and releases its capacity to supply active power. Two methods will be discussed and exemplified for power factor correction, one of them when the industry is in the design phase and the other one is operating. Through these methods, the capacitor banks were designed and their economic feasibility was evaluated by obtaining a return of capital in 2 years for the first case and 7 months for the second one.

Keywords: Power factor, correction, reactive power, analysis of economic viability.

LISTA DE SIGLAS

| | |
|----------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| ANSI | <i>American National Standards Institute</i> |
| B | Fluxo Magnético (Weber) |
| BNDES | Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social |
| cv | Cavalo-Vapor |
| CONSERVE | Programa de Conservação de Energia no Setor Industrial |
| f | Frequência (Hertz) |
| h | Hora |
| H | Campo Magnético Indutor (Ampère por metro - A/m) |
| I | Corrente (Ampère - A) |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| J | <i>Joules</i> |
| m | Metros |
| m ² | Metros quadrados |
| MIC | Ministério da Indústria e do Comércio |
| MME | Ministério de Minas e Energia |
| NBR | Norma Brasileira da ABNT |
| P | Potência Ativa (Watt - W) |
| PROCEL | Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica |
| Q | Potência Reativa (Volt-Ampère reativo - VAR) |
| rpm | Rotações por minuto |
| s | segundos |
| S | Potência Aparente (Volt-Ampère - VA) |
| TRC | Tempo de Retorno de Capital |
| V | Tensão (Volt - V) |
| VPL | Valor Presente Líquido |
| W | Watt |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Simulação da fatura de energia com e sem energia reativa na empresa analisada no período entre outubro de 2014 e março de 2015. | 15 |
| Figura 2 – Medição do nível de reativo depois da instalação do banco de capacitores, na indústria analisada..... | 16 |
| Figura 3 – Gráfico da potência instantânea e potência média para um circuito puramente resistivo ao longo do tempo..... | 20 |
| Figura 4 – Gráfico da potência instantânea, potência média e potência reativa, para um circuito puramente indutivo ao longo do tempo. | 21 |
| Figura 5 – Gráfico da potência instantânea e potência média para um circuito puramente capacitivo ao longo do tempo. | 22 |
| Figura 6 – Figura representativa de um transformador elétrico. | 23 |
| Figura 7 – Gráfico da curva de magnetização do núcleo de ferro. | 24 |
| Figura 8 – Porcentagem de perda de energia em uma instalação elétrica em função do Fator de Potência. | 27 |
| Figura 9 – Formas de onda de tensão, corrente e parcelas de potência instantânea ao longo do tempo. | 31 |
| Figura 10 – Gráfico do triângulo de potências com a representação das potências aparente, ativa, reativa indutiva e reativa capacitiva. | 32 |
| Figura 11 – Gráfico do triângulo de potências, com a energia reativa capacitiva para correção e com o ângulo inicial e final do F.P.. | 39 |
| Figura 12 – Gráfico do retorno de investimento para o período analisado. | 52 |
| Figura 13 – Fluxograma do processo de produção do Incubatório de aves. | 53 |
| Figura 14 – Condições atuais da instalação do banco de capacitores..... | 54 |
| Figura 15 – Equipamentos de proteção do circuito das células capacitivas..... | 55 |
| Figura 16 – Quadro de comando elétrico, onde se encontram os equipamentos de acionamento e proteção das células capacitivas. | 55 |
| Figura 17 – Novo quadro de comando elétrico, onde se encontram os equipamentos de acionamento e proteção das células capacitivas. | 59 |
| Figura 18 – Gráfico do retorno de investimento para o período analisado. | 62 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Fator de potência em motores elétricos trifásicos de Alto Rendimento, da marca WEG. | 26 |
| Tabela 2 – Variação da potência do transformador em função do fator de potência. | 28 |
| Tabela 3 – Lista de motores e suas respectivas potências..... | 48 |
| Tabela 4 – Cálculo do capacitor individual por carga. | 48 |
| Tabela 5 – Valores para resolução da equação de ERE. | 50 |
| Tabela 6 – Valores para resolução da equação de DREp..... | 50 |
| Tabela 7 – Lista de componentes e seus custos..... | 51 |
| Tabela 8 – Valores presentes do investimento. | 51 |
| Tabela 9: Valores presentes do investimento. | 52 |
| Tabela 10 – Fragmento de memória de massa, do mês de Dezembro de 2016..... | 57 |
| Tabela 11 – Lista de componentes e seus custos..... | 61 |
| Tabela 12 – Valores presentes do investimento. | 61 |
| Tabela 13 – Valores presentes do investimento. | 62 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1. PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR INDUSTRIAL – CONSERVE..... | 12 |
| 1.2. PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - PROCEL..... | 13 |
| 1.3. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO..... | 13 |
| 1.4. CASO 1 - ESTUDO DE VIABILIDADE DA IMPLANTAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITOR EM UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO..... | 15 |
| 1.5. CASO 2 – CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA EM INDÚSTRIA... | 16 |
| 1.6. CASO 3 – CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS INDUSTRIAIS..... | 17 |
| 2. FATOR DE POTÊNCIA: FUNDAMENTO E REGULAMENTAÇÃO | 19 |
| 2.1. POTÊNCIA | 19 |
| 2.1.1. Potência em circuitos puramente resistivos..... | 19 |
| 2.1.2. Potência em circuitos puramente indutivos..... | 20 |
| 2.1.3. Potência em circuitos puramente capacitivos..... | 21 |
| 2.2. MÁQUINAS ELÉTRICAS DE INDUÇÃO | 22 |
| 2.3. CAUSAS DO BAIXO FATOR DE POTÊNCIA EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA | 25 |
| 2.4. CONSEQUÊNCIAS DO BAIXO FATOR DE POTÊNCIA..... | 27 |
| 2.5. PRINCÍPIOS FÍSICO-MATEMÁTICOS E MODELAGEM DO TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS | 29 |
| 2.6. FATURAMENTO DA DEMANDA E ENERGIA REATIVA EXCEDENTE | 33 |
| 2.7. AVALIAÇÃO E MÉTODO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA..... | 34 |
| 2.7.1. Metodologia para instalações em projeto..... | 35 |
| 2.7.2. Metodologia para instalações em operação..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 2.8. PROJETO E EXECUÇÃO DE SISTEMAS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA | 38 |
| 2.8.1. Instalação de bancos de capacitores em derivação | 39 |
| 2.9. LOCALIZAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES..... | 41 |
| 2.9.1. No sistema primário. | 41 |
| 2.9.2. No secundário do transformador de potência. | 41 |
| 2.9.3. Nos terminais de conexão de cargas específicas..... | 42 |
| 2.10. LEGISLAÇÃO PARA TRABALHO COM ELETRICIDADE. | 43 |
| 2.10.1. Norma regulamentadora 10 – NR10. | 43 |
| 2.10.2. Norma para instalação de banco de capacitores em baixa tensão..... | 44 |
| 2.11. ANÁLISE DE VIABILIDADE DO INVESTIMENTO | 45 |
| 3. AVALIAÇÃO E PROJETO PARA COREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA. | 47 |
| 3.1. FÁBRICA DE BIODIESEL..... | 47 |
| 3.1.1. Levantamento da potência reativa..... | 48 |
| 3.1.2. Correção escolhida. | 49 |
| 3.1.3. Análise financeira da implementação do banco de capacitores..... | 50 |
| 3.2. Incubatório de aves. | 52 |
| 3.2.1. Levantamento da energia reativa. | 56 |
| 3.2.2. Correção escolhida. | 57 |
| 3.2.3. Detalhamento do banco de capacitores. | 58 |
| 3.2.4. Análise financeira da implementação do banco de capacitores..... | 60 |
| 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS: | 63 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 65 |
| 6. ANEXOS | 71 |

1. INTRODUÇÃO

No Brasil existem várias instituições que trabalham regularmente com o tema eficiência energética. Na área de energia elétrica, pode-se citar o Ministério de Minas e Energia (MME), a ELETROBRÁS, responsável pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável pelo Programa de Eficiência Energética das Concessionárias Distribuidoras de Energia Elétrica, entre outras (VIANA *et al.*, 2012).

Como exemplo das primeiras medidas de eficiência energética adotadas no Brasil podemos citar, em 1931, e que se aplica inclusive até os dias atuais, a implementação do horário de verão. Essa medida tem por objetivo o melhor aproveitamento da luz natural ao final da tarde, retardando o acionamento dos equipamentos de iluminação pública e residenciais, de forma que deixem de consumir no horário de ponta (ANEEL, 2004).

O horário brasileiro de verão destaca-se por ser um dos primeiros instrumentos legais relacionados à eficiência energética, criado e regulamentado pelo Conselho Nacional de Águas e Energia Elétrica (CNAEE), que seria a instituição responsável da época (VIANA *et al.*, 2012).

De acordo com Oliveira (2013), na década de 1940, a economia brasileira encontrava-se em pleno desenvolvimento, com aumento dos parques industriais e expansão da população urbana. Tal situação acarretou na falta de energia elétrica para atender toda a demanda, tomaram-se, então, medidas de racionamento de energia, deixando de atender centros consumidores considerados na época de “menor importância”.

Outro período marcante para a evolução das ações de eficiência energética no Brasil ocorreu nos anos 70 e 80, quando a primeira crise do petróleo criou a necessidade de se buscar por alternativas ao uso dos combustíveis fósseis na geração de eletricidade que, pelo seu alto preço, tornou-se viável a geração por fontes alternativas, com o uso de energias renováveis. Neste período observa-se a criação de leis por parte dos parlamentares, de programas de governo, comissões e empresas para atuar na área de eficiência energética (OLIVEIRA, 2013).

Nos itens 1.1 a 1.6, dispostos a seguir, serão apresentados programas de eficiência energética nacional e, mais especificamente, um estudo de caso de correção do fator de potência (FP), segmento da eficiência que visa à diminuição do uso de energia reativa na indústria, promovendo a melhoria da qualidade de energia e a redução de custo.

1.1. PROGRAMA DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA NO SETOR INDUSTRIAL – CONSERVE

Seguindo o contexto apresentado anteriormente, a busca pela redução do uso de combustíveis fósseis no lado da demanda, evidenciou a viabilidade de “programas de conservação de energia” voltados também à redução do consumo de energia. Em vista disso, o Ministério da Indústria e do Comércio (MIC) desenvolveu o primeiro programa destinado a tal fim dedicado ao setor industrial, o CONSERVE (GODOI, 2008).

O autor ainda comenta que o MIC lançou o programa pela portaria nº 46 de 23/02/1981, com o intuito de atender às funções de:

- Coordenar as ações de transformação do parque industrial do país, no que se refere a diminuir a demanda de petróleo;
- Contribuir para a redução do consumo de energia e a substituição de combustíveis importados;
- Atuar sobre as metas acima, principalmente nas indústrias (setores) energointensivas de cimento, siderurgia, e do papel e celulose.

Souza, Guerra e Kruger (2011) apresentam que esse programa proporcionou uma redução aproximada de 18% no consumo de óleo combustível nas plantas industriais do país, já em seu primeiro ano de atuação. Porém, distorções ocorridas no próprio programa, e a recessão econômica nos anos 80, contribuíram para que o mesmo não atingisse a plena funcionalidade prevista no momento de criação.

1.2. PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - PROCEL

A criação do PROCEL, realizada em conjunto pelo Ministério de Minas e Energia com o Ministério da Indústria e do Comércio, em Março de 1986 foi realizada com o intuito de promover diversas iniciativas de uso racional de energia elétrica, maximizando os resultados em economia e eficiência (GODOI, 2008).

Na criação do PROCEL foram estabelecidas, como objetivo, a atuação nas áreas de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, realização de assistência tecnológica energética ao setor industrial, investimentos em pesquisas para definir os padrões de consumo do mercado, bem como suas estimativas futuras, e o desenvolvimento de normas, padronização e certificação de equipamentos empregados no uso final visando o uso eficiente da energia elétrica (SOUZA, GUERRA E KRUGER, 2011).

Nesse sentido, Oliveira (2013), efetua uma análise dos investimentos realizados e retornos obtidos. Apresenta que, em 22 anos de existência, o PROCEL foi responsável pelo investimento de cerca de R\$ 1.055,00 milhões, proporcionando uma economia total de 32 TWh, uma redução de 9.557 MW na demanda de eletricidade no horário de ponta (HP), evitando, assim, investimentos da ordem de R\$ 22,80 bilhões – equivalentes à construção de uma usina de capacidade aproximada ao mesmo montante economizado.

Dentre as atividades desenvolvidas pelo PROCEL para melhoria da eficiência energética, existe a concessão do Selo PROCEL de Economia de Energia. Este selo tem por objetivo classificar eletrodomésticos em níveis globais de energia elétrica, orientando o consumidor a adquirir produtos mais eficientes. O FP é um fator prioritariamente considerado nessa classificação.

1.3. DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO

O diagnóstico energético se baseia em um levantamento de todos os sistemas que utilizam energia em uma planta, sejam eles providos por fonte térmica ou elétrica. Esse trabalho é realizado por um profissional especializado em eficiência energética ou até mesmo por empresas que atuam na área. Uma vez levantados os sistemas, é realizada uma avaliação minuciosa dos pontos de consumo, como exemplo, pode-se

citar motores elétricos, sistemas de conforto térmico (ar condicionados), transformadores, iluminação entre outros (OLIVEIRA, 2014).

Ainda segundo a mesma autora, o diagnóstico energético visa identificar pontos de desperdício de energia, com base nas condições de operação desses equipamentos e nas características construtivas dos mesmos. Outra fonte de informação muito importante para tal avaliação são as faturas de energia, onde se podem encontrar os dados gerais de consumo, avaliar a existência de multas e também o melhor enquadramento tarifário para a unidade consumidora.

De maneira geral, o diagnóstico energético analisa o consumo de energia e propõe soluções para o uso mais eficiente possível, reduzindo desperdícios e também adequando as instalações em caso de dimensionamentos e projetos fora dos padrões previstos nas normas regulamentadoras, como é o caso da iluminação de ambientes específicos de trabalho.

Dentre a análise da energia elétrica consumida, o FP é considerado por mensurar a quantidade de energia reativa utilizada. O limite mínimo do FP de uma instalação, de acordo com a resolução vigente é de 0,92. Para valores inferiores a esse índice as concessionárias são autorizadas a cobrar multas, tanto pelo consumo quanto pela demanda da energia reativa utilizada (ANEEL 2000).

O FP é definido como um dos índices da utilização de energia elétrica em sua forma alternada, seu acompanhamento e controle mostra-se imprescindível devido à sua nocividade, tanto do ponto de vista da eficiência das instalações, quanto do ponto de vista financeiro. O FP, sendo monitorado pelos sistemas de medição das concessionárias, quando apresentado em baixas proporções, resulta em sanções onerosas ao consumidor previstas nas normas regulamentadoras. (SILVA, 2009).

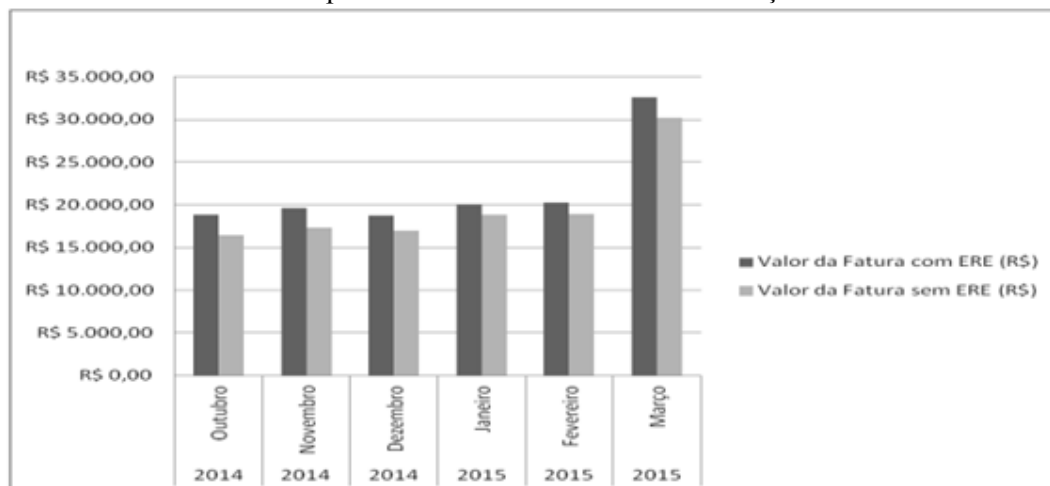
Serão abordados a seguir três estudos de caso referentes à implementação da correção do FP. Esses casos avaliam a melhoria da qualidade de energia da instalação, bem como a economia gerada pela projeção dos gastos com multa por excesso de consumo e demanda de energia reativa.

1.4. CASO 1 - ESTUDO DE VIABILIDADE DA IMPLANTAÇÃO DE UM BANCO DE CAPACITOR EM UMA EMPRESA DE MINERAÇÃO

Para o caso do trabalho apresentado por Pereira *et al.* (2015) a coleta de dados se realizou a partir da amostragem de seis meses da fatura de energia elétrica, e da coleta de informações das características técnicas das instalações. A empresa avaliada possui uma demanda contratada de 470 kW de potência.

Feita a análise de dados, o autor propõe a instalação de um banco de capacitores de 70 kVAr para que se possa manter o FP acima de 0,92. No trabalho é apresentada a simulação das faturas no período analisado sem a multa por uso excedente de reativo indutivo, bem como o levantamento dos custos da compra de materiais e instalação do banco.

Figura 1 – Simulação da fatura de energia com e sem energia reativa na empresa analisada no período entre outubro de 2014 e março de 2015.



Obs.: ERE: Energia Reativa Excedente. Fonte: (PEREIRA *et al.*, 2015).

De acordo com o gráfico apresentado pelo autor, com a implementação do sistema de correção do FP a fatura de energia reduz em 8,94 %, obtendo assim economias de até R\$ 2.400,00 mensais e um total de R\$ 11.400,00 no período estudado. Em contrapartida o valor orçado para a instalação do banco de capacitores foi de R\$ 7.000,00.

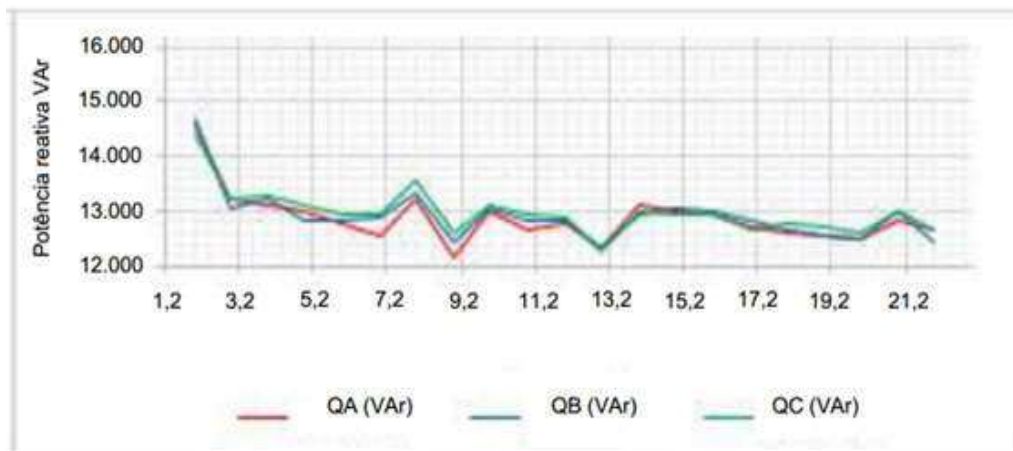
Feita a verificação da viabilidade financeira do investimento para os valores apresentados, o *Payback* calculado garante o retorno do investimento após um período de apenas 3 meses e 19 dias.

1.5. CASO 2 – CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA EM INDÚSTRIA

Semelhante ao caso anterior, para a determinação da energia reativa indutiva, e seus custos em uma indústria, utilizaram-se as faturas de energia elétrica de um período de seis meses. Para o levantamento das condições reais do consumo de energia da instalação utilizou-se um analisador de energia conectado às três fases do circuito secundário do transformador (REIS; KIKUCHI, 2015).

O analisador de energia esteve conectado pelo período de uma semana, com isso o autor obteve o horário que apresentou a maior necessidade de energia reativa capacitiva para desenvolvimento de seus cálculos. Dessa forma Reis e Kikuchi (2015), chegaram ao valor de um banco de 60 kVAr. Feita a instalação do banco de capacitores, uma nova série de dados foi coletada, gerando assim as informações disponíveis na Figura 2.

Figura 2 – Medição do nível de reativo depois da instalação do banco de capacitores, na indústria analisada.



Obs.: QA: Energia reativa medida na fase A; QB: Energia reativa medida na fase B; QC: Energia reativa medida na fase C. Fonte: (REIS; KIKUCHI, 2015).

Durante a análise econômica, os autores consideraram todos os custos referentes à instalação do banco, incluindo o aluguel do analisador de energia e a mão de obra técnica necessária para operá-lo, bem como o custo do projeto. O custo para implementação do projeto foi de R\$ 10.600,00, sendo as despesas médias mensais com o baixo FP de R\$ 1.120,00, o tempo de retorno de investimento simples calculado foi de 9,4 meses.

1.6. CASO 3 – CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA DE CARGAS INDUSTRIAIS

Lucas (2013) realizou o estudo para correção do FP em uma indústria produtora de motosserras, roçadeiras, sopradores e cortadores de grama. Neste caso, o autor também utiliza um medidor de energia particular para a avaliação do sistema.

O autor constatou que a demanda por energia reativa na instalação variava entre 10 e 80 kVAr e, analisando as possibilidades de projetos, optou pela instalação dos capacitores no secundário do transformador utilizando-se de um controlador automático de FP.

Com a instalação do sistema proposto previa-se a economia mensal de R\$ 4.400,00 que, a partir de um investimento de R\$ 17.000,00, estabeleceu-se o *Payback* de 4 meses.

Conforme apresentado pelos casos discutidos, o FP é um item de fundamental importância a ser controlado no ambiente industrial. Devido ao elevado custo da demanda e energia reativa excedente, comparado ao investimento necessário nos estudos e na aquisição de bancos de capacitores, os projetos se mostraram viáveis, com retorno em períodos menores que um ano.

2. FATOR DE POTÊNCIA: FUNDAMENTO E REGULAMENTAÇÃO

2.1. POTÊNCIA

De acordo com Boylestad (2004), a potência é uma grandeza responsável por mensurar quanto trabalho (conversão de uma forma de energia em outra) pode ser realizado em determinado período de tempo, isto é, a intensidade com que um trabalho é executado. Como exemplo, um motor elétrico de grande dimensão tem mais potência que um de pequeno porte, isso porque é capaz de converter uma quantidade maior de energia elétrica em energia mecânica no mesmo intervalo de tempo.

Sendo a energia convertida medida em *Joules* (J), e o tempo em segundos (s), a potência é expressa pela expressão (J/s). A unidade utilizada em eletricidade para medida de potência é o Watt (W).

2.1.1. Potência em circuitos puramente resistivos

Para Nilsson (2009), em um circuito puramente resistivo, a corrente e tensão em seus terminais estarão sempre em fase, isso significa que $\theta_v = \theta_i$, onde, θ_v é o ângulo de fase da tensão e θ_i é o ângulo de fase da corrente;

Logo a equação da potência pode ser expressa como:

$$p = P + P \cos 2\omega t \quad (1)$$

Sendo:

p : Potência ativa instantânea;

P : Potência média;

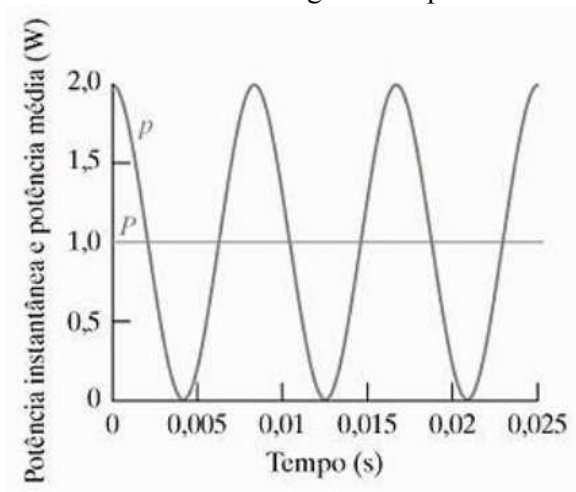
ω : Velocidade angular (rad/s)

t : Tempo (s)

A potência instantânea expressa pela equação anterior recebe o nome de potência ativa instantânea. A Figura 3 representa o gráfico da Equação 1, para um circuito puramente resistivo, admitindo-se que $\omega = 377$ rad/s. Por definição, têm-se que a potência média P é a média de p em um período. Assim sendo, para esse circuito, se observa que $P = 1$.

A Equação 1 também exprime que a potência ativa instantânea, nunca pode ser negativa, observação igualmente representada pela Figura 4.

Figura 3 – Gráfico da potência instantânea e potência média para um circuito puramente resistivo ao longo do tempo.



Fonte: (NILSSON, 2009).

Dessa forma, pode-se dizer que, um resistor sempre dissipa a mesma potência elétrica em um circuito onde tensão e corrente variam no tempo. Ainda mais, toda a energia elétrica é dissipada sob a forma de energia térmica.

2.1.2. Potência em circuitos puramente indutivos

Para o caso de um circuito puramente indutivo, corrente e tensão estarão defasadas em exatamente 90° em seus terminais. Nesse caso a corrente permanece 90° atrasada em relação à tensão, isso significa que $\theta_i = \theta_v - 90^\circ$. Logo a equação da potência instantânea pode ser expressa como:

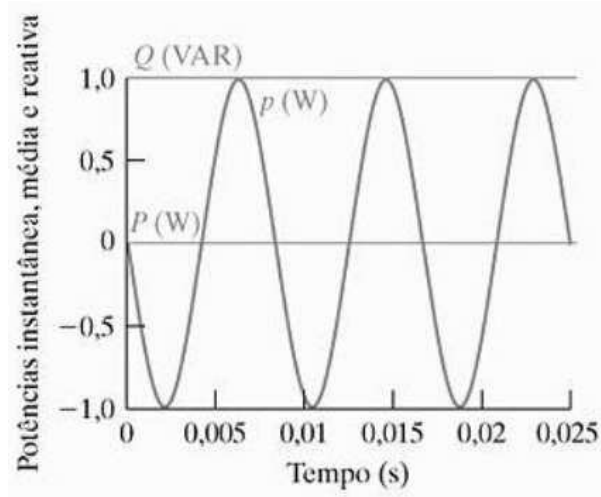
$$p = Q \sin 2\omega t \quad (2)$$

Nesse circuito a potência média é zero, sendo assim, nenhuma transformação de energia elétrica é realizada. Neste circuito, enquanto p é positiva, a energia está sendo armazenada em campos magnéticos, referentes aos elementos indutivos e, no semiciclo em que p é negativa, a energia está sendo extraída dos campos magnéticos.

A medida elétrica associada aos circuitos puramente indutivos é a potência reativa Q e recebe a unidade de Volt-Ampère reativo (VAr). A Figura 4 representa o

comportamento oscilatório da potência reativa ao longo do tempo, para um circuito puramente indutivo.

Figura 4 – Gráfico da potência instantânea, potência média e potência reativa, para um circuito puramente indutivo ao longo do tempo.



Fonte: (NILSSON, 2009).

A Figura 4 representa o gráfico típico de um circuito puramente indutivo, admitindo-se que $\omega = 377 \text{ rad/s}$ e $Q = 1 \text{ VAR}$.

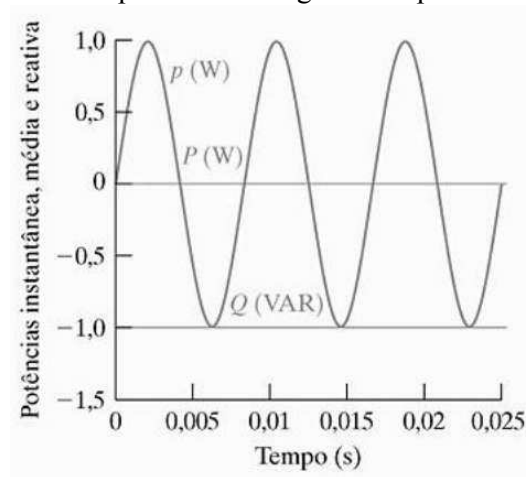
2.1.3. Potência em circuitos puramente capacitivos

O autor ainda comenta que para um circuito puramente capacitivo, corrente e tensão estarão defasadas em exatamente 90° em seus terminais. Porém a corrente permanece 90° adiantada em relação à tensão, isso significa que $\theta_i = \theta_v + 90^\circ$. Logo a equação da potência instantânea pode ser expressa como:

$$p = -Q \text{ sen } 2\omega t \quad (3)$$

Da mesma forma que no circuito indutivo, a potência média é zero. Sendo assim, nenhuma transformação de energia elétrica é realizada. Neste circuito a potência é continuamente permutada entre a fonte que alimenta o circuito e o campo elétrico referente aos elementos capacitivos. A figura 5 representa o comportamento oscilatório da potência reativa ao longo do tempo, para um circuito puramente capacitivo.

Figura 5 – Gráfico da potência instantânea e potência média para um circuito puramente capacitivo ao longo do tempo.



Fonte: (NILSSON, 2009).

A Figura 5 representa o gráfico típico de um circuito puramente capacitivo, admitindo-se que $\omega = 377 \text{ rad/s}$ e $Q = 1 \text{ VAR}$.

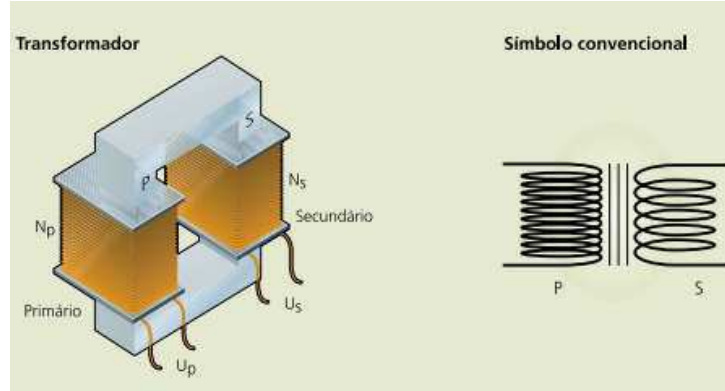
2.2. MÁQUINAS ELÉTRICAS DE INDUÇÃO

Existem equipamentos que, independentemente da aplicação, possuem seu princípio de funcionamento baseados na indução eletromagnética, e por sua vez, são responsáveis pela demanda de potência reativa no circuito. Outros equipamentos, por sua vez, acabam por necessitar energia reativa apenas quando mal utilizados, ou mal dimensionados, ou ainda, devido aplicações específicas. Esses equipamentos, denominados máquinas elétricas serão apresentados a seguir.

As máquinas elétricas podem ser classificadas como estacionárias, que alteram os parâmetros tensão e corrente, mantendo-se a grandeza energia elétrica, e as rotativas, que convertem energia elétrica em mecânica ou o contrário (MATTEDE, 2017).

Neste trabalho será tomado como referência o transformador para explicar a necessidade e o comportamento da energia reativa em máquinas elétricas. Nos transformadores o fenômeno da indução eletromagnética é responsável pela alteração dos valores da tensão e corrente elétrica alternada, enquanto se transfere energia do primário para o secundário da máquina (GOZZI, 2011), Figura 6.

Figura 6 – Figura representativa de um transformador elétrico.



Fonte: (GOZZI, 2011).

Nos motores elétricos, o seu princípio de funcionamento tem como base a utilização da força magnética. Eles são constituídos basicamente de um circuito indutor, produzindo um campo magnético que, concatenado com o circuito induzido, induzem uma corrente, esta produz força magnética e, por meio desta, há movimento. (GOZZI, 2011).

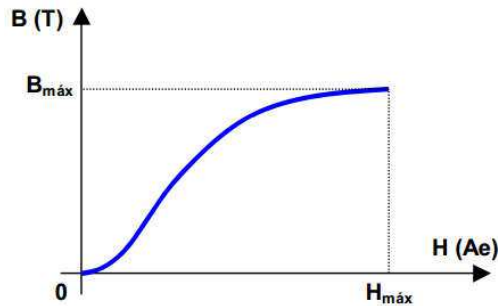
Analisando seu princípio de funcionamento, ao se aplicar uma tensão elétrica alternada no enrolamento indutor, é gerada uma corrente elétrica induzida, denominada força eletromotriz. A Lei de Faraday relaciona a força eletromotriz ε induzida na espira da bobina, com a taxa de variação do fluxo magnético através dessa espira. (GOZZI, 2011; SILVA, 2017).

Ainda de acordo com Silva (2017), a força eletromotriz em uma espira de área A , é igual à taxa de variação do fluxo magnético através dessa espira. Em termos de equação, a lei de Faraday pode ser escrita como:

$$\varepsilon = \frac{-\Delta\phi}{\Delta t} \quad (\text{Volts}) \quad (4)$$

Para Mussoi (2015), o núcleo de ferro é submetido a um campo magnético indutor (H) que concentra as linhas de campo para uma dada densidade de fluxo magnético (B). Uma vez que o campo magnético indutor H é acrescido pelo aumento da corrente nas bobinas, surgirá uma maior orientação dos ímãs elementares do ferro e, como resultado, maior será a densidade de fluxo magnético B . Todavia a relação entre os valores de B e H não são constantes para todo valor de H , Figura 7.

Figura 7 – Gráfico da curva de magnetização do núcleo de ferro.



Fonte: (MUSSOI, 2005).

Do exposto, destaca-se a necessidade e o comportamento da energia reativa em máquinas elétricas:

- A corrente absorvida da rede por uma máquina elétrica, devido ao fenômeno da indução eletromagnética, está atrasada em 90° em relação à tensão elétrica do circuito;
- Essa corrente está associada à energia reativa que não produz trabalho, todavia é responsável pelo campo magnético da máquina;
- Essa energia não é dissipada, uma vez que se move da fonte para a carga, e desta para aquela, em cada ciclo da tensão;
- Para um projeto de uma máquina, de acordo com a curva de magnetização, haverá necessidade de mais ou menos energia reativa;
- Para uma máquina, variando-se a tensão, também variará o fluxo magnético e, desta forma, a energia reativa, de acordo com a curva de magnetização;
- As máquinas em vazio absorvem em maior quantidade a energia reativa, enquanto que uma pequena parte é a energia ativa necessária para as perdas nos circuitos elétricos, magnéticos e para sua movimentação, quando é o caso;
- As máquinas em carga, ao contrário, absorvem em maior quantidade de energia ativa para a sua finalidade prática de alteração nos níveis de tensão e corrente ou movimentação de carga, enquanto que uma pequena parte é a energia reativa devido ao seu campo magnético;

2.3. CAUSAS DO BAIXO FATOR DE POTÊNCIA EM UMA INSTALAÇÃO ELÉTRICA

Os equipamentos do ambiente industrial são, em sua maioria, motores elétricos de indução, transformadores, entre outros. Tais equipamentos demandam, como exposto anteriormente, energia reativa indutiva.

O primeiro equipamento a ser analisado é o transformador que, ao ser superdimensionado, ou operar em vazio provoca o baixo FP. Uma vez que, para garantir seu funcionamento, o transformador necessita de energia reativa para circulação do fluxo magnético em seu núcleo e, como há pouco ou nenhum consumo de potência ativa em seu secundário, esta proporcionalidade provoca um baixo FP (SILVA, 2009).

O motor elétrico, de forma semelhante, ao trabalhar em vazio ou com pequena carga no eixo, também tem reduzida a proporção entre a potência ativa a reativa, ocasionando, assim, baixo FP (CELESC, 2014; SILVA, 2009). Há situações em que o sobre dimensionamento do motor é necessário, é o caso em que se necessita de um alto torque de partida para romper a inércia da máquina e, solicitando pouca carga no funcionamento (WANDER *et al.*, 2007).

Segundo Silva (2009), outro fator que está associado ao baixo FP é a elevação da tensão na máquina. Independente da máquina elétrica, quando há campo magnético, o crescimento da potência reativa indutiva é dependente do comportamento eletromagnético do circuito, caracterizado pela dependência entre a curva de magnetização e a tensão submetida. Este fato torna-se mais pronunciado conforme a tensão imposta na máquina provoca o deslocamento na curva de magnetização acima do ponto de saturação do material.

Os autores Silva (2009) e Celesc (2014), ainda apresentam os reatores que alimentam lâmpadas de descarga (vapor metálico, vapor de mercúrio, vapor de sódio ou fluorescentes), Esses reatores, assim como os motores e transformadores, possuem bobinas, e provocam baixo FP. Silva (2013), por sua vez, cita os reatores eletrônicos que, sendo de boa procedência e com a correta especificação, apresentam altos níveis de FP, podendo chegar a 100%.

A utilização de motores elétricos de pequena potência em grandes quantidades acarreta baixo FP nas instalações. Isso devido ao sobre dimensionamento normalmente utilizado para a obtenção de maior torque na partida e devido a sua própria construção, uma vez que suas características construtivas adotadas pelos fabricantes provocam um menor FP. A necessidade do aumento do número de polos para a redução da velocidade dos motores, o que resulta em uma maior quantidade de bobinas, coloca estas máquinas também em evidência quando se analisa o baixo FP, Tabela 1.

Tabela 1 – Fator de potência em motores elétricos trifásicos de Alto Rendimento, da marca WEG.

| Potência | | Fator de potência | | | |
|----------|------|-------------------|----------|----------|------------|
| kW | cv | II Polos | IV Polos | VI Polos | VIII Polos |
| 0,75 | 1 | 0,83 | 0,8 | 0,7 | 0,63 |
| 1,1 | 1,5 | 0,87 | 0,82 | 0,74 | 0,6 |
| 1,5 | 2 | 0,84 | 0,76 | 0,7 | 0,61 |
| 2,2 | 3 | 0,85 | 0,82 | 0,71 | 0,75 |
| 3 | 4 | 0,85 | 0,82 | 0,73 | 0,75 |
| 3,7 | 5 | 0,85 | 0,8 | 0,75 | 0,74 |
| 4,5 | 6 | 0,89 | 0,81 | 0,74 | 0,69 |
| 5,5 | 7,5 | 0,86 | 0,8 | 0,73 | 0,68 |
| 7,5 | 10 | 0,88 | 0,82 | 0,77 | 0,7 |
| 9 | 12,5 | 0,88 | 0,83 | 0,81 | 0,78 |
| 11 | 15 | 0,9 | 0,84 | 0,79 | 0,78 |
| 15 | 20 | 0,86 | 0,8 | 0,79 | 0,8 |
| 18,5 | 25 | 0,85 | 0,81 | 0,88 | 0,75 |
| 22 | 30 | 0,87 | 0,84 | 0,82 | 0,83 |
| 30 | 40 | 0,86 | 0,83 | 0,82 | 0,81 |
| 37 | 50 | 0,86 | 0,85 | 0,83 | 0,81 |
| 45 | 60 | 0,89 | 0,86 | 0,82 | 0,81 |
| 55 | 75 | 0,9 | 0,88 | 0,82 | 0,78 |
| 75 | 100 | 0,92 | 0,85 | 0,84 | 0,78 |
| 90 | 125 | 0,89 | 0,85 | 0,84 | 0,79 |
| 110 | 150 | 0,89 | 0,86 | 0,84 | 0,78 |
| 130 | 175 | 0,89 | 0,87 | 0,83 | |
| 150 | 200 | 0,87 | 0,87 | 0,83 | |
| 185 | 250 | 0,89 | 0,86 | | |

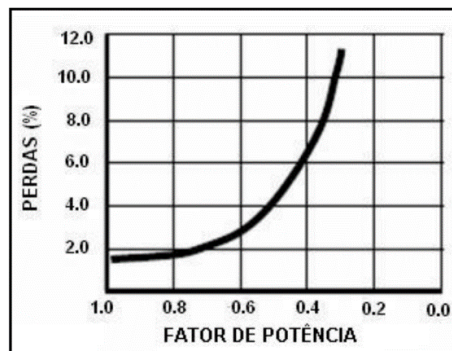
Fonte: Adaptado de INMETRO, 2002.

2.4. CONSEQUÊNCIAS DO BAIXO FATOR DE POTÊNCIA

De acordo com Silva (2013), a potência reativa indutiva necessária para a geração de campo magnético de equipamentos, quando transmitida a partir de uma unidade geradora distante do ponto de consumo, sobrecarrega o sistema e provoca perdas nos sistemas de transmissão e distribuição.

Para Hércules (2014), um dos malefícios causados é a perda de energia em condutores por efeito joule, devido ao aumento da intensidade de corrente reativa, sendo possível ainda, quantificar essas perdas pelo fato de as mesmas serem proporcionais ao quadrado da corrente total. Nesse sentido, Silva (2009) apresenta essa proporcionalidade em forma do gráfico apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Porcentagem de perda de energia em uma instalação elétrica em função do Fator de Potência.



Fonte: (SILVA, 2009).

Pode-se observar na Figura 8 que a porcentagem de perdas calculadas varia exponencialmente com o FP, dessa forma, é mais eficiente que a potência reativa indutiva fornecida pela unidade geradora seja fornecida por uma fonte local, de forma a reduzir a transmissão dessa energia através do sistema elétrico de potência. Por consequência, o sistema pode distribuir mais energia que efetivamente resulte em trabalho útil, denominada energia ativa (SILVA, 2013).

Outro problema originado pelo baixo FP é a queda nos níveis de tensão, sobretudo em pontos mais periféricos da instalação. Este problema está associado às sobrecargas dos circuitos, principalmente em momentos de pico de demanda, quando podem acarretar o acionamento dos elementos de proteção dos circuitos, interrompendo o fornecimento de energia elétrica ou, ainda, interferindo no funcionamento de certos

equipamentos, como a diminuição da intensidade luminosa das luminárias e a elevação do consumo de corrente em motores (HÉRCULES, 2014; SILVA, 2009).

Considerando que a potência reativa presente em uma instalação não realiza trabalho útil e, apesar disso, é suprida pelo transformador e pelos circuitos de alimentação, quanto menor sua quantidade, maior será a capacidade do sistema suprir cargas novas. Para entender melhor o comprometimento do carregamento do transformador, Hércules (2014) apresenta a Tabela 2 que relaciona a potência útil absorvida como a potência do equipamento.

Tabela 2 – Variação da potência do transformador em função do fator de potência.

| Potência útil absorvida (kW) | Fator de potência | Potência do transformador (kVA) |
|------------------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1.000,00 | 0,50 | 2.000,00 |
| | 0,80 | 1.250,00 |
| | 1,00 | 1.000,00 |

Fonte: (HÉRCULES, 2014).

Na Tabela 2, pode-se observar que para o FP unitário toda a potência útil solicitada pela rede pode ser atendida com um transformador de mesma potência aparente; diferentemente, com o FP igual a 50%, o transformador necessário para atender a mesma carga terá o dobro de potência aparente.

Para CODI (2004), ao se corrigir o consumo excessivo de energia reativa haverá a liberação de carga no transformador e no circuito elétrico do local, proporcionando disponibilidade para a instalação de novas cargas sem a necessidade de modificação nas instalações. O autor ainda exemplifica esse fato numericamente – o aumento do FP de 0,8 para 0,92 em uma instalação com potência ativa disponível inicialmente de 252 kW apresenta uma nova disponibilização de potência ativa igual a 38 kW.

Silva (2009), por sua vez, destaca a redução das perdas de energia nas instalações por efeito joule com a melhora do FP. Ele apresenta a Equação 6 que calcula a redução percentual das perdas conforme disposto a seguir.

$$\text{Redução das perdas(\%)} = \left(1 - \frac{FP_i^2}{FP_f^2}\right) \cdot 100 \quad (5)$$

Sendo:

FP_i : FP inicial (antes da correção);

FP_f : FP final (após a correção).

2.5. PRINCÍPIOS FÍSICO-MATEMÁTICOS E MODELAGEM DO TRIÂNGULO DAS POTÊNCIAS

De acordo com Júnior e Lyra (2006), os equipamentos elétricos presentes nos sistemas de consumo de energia são compostos, em sua maioria, por resistências, indutâncias e capacitâncias e, desta forma, a tensão e a corrente geralmente não estão em fase.

Matematicamente, é possível escrever a onda da tensão e da corrente conforme Boylestad (2004):

$$v = V_m \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (6)$$

$$i = I_m \cdot \text{sen}(\omega t + \gamma) \quad (7)$$

$$V = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \quad (8)$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (9)$$

Sendo:

V_m e I_m : valores máximos de pico;

V e I : valores eficazes em rms.

Potência instantânea, resultado do produto da onda de tensão pela onda de corrente instantânea, absorvida pela carga pode ser representada de acordo com Deckmann e Pomilio (2009) pela Eq. 11:

$$p(t) = V_m \cdot \text{sen} \omega t \cdot I_m \cdot \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (10)$$

Desenvolvendo o produto, resulta:

$$p(t) = \frac{1}{2} [V_m \cdot I_m \cdot \cos \varphi - V_m \cdot I_m \cdot \cos(2\omega t - \varphi)] \quad (11)$$

Ou em termos de valores eficazes:

$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos \varphi - V \cdot I \cdot \cos(2\omega t - \varphi) \quad (12)$$

Aplicando-se as identidades trigonométricas, o resultado para expressão da potência será:

$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos(1 - \cos 2\omega t) - V \cdot I \cdot \text{sen} \varphi \text{sen} 2\omega t \quad (13)$$

Pode-se observar das equações 11 e 12 que a potência instantânea contém uma parte constante e uma parte oscilatória (2ω) das ondas de tensão e corrente.

A parte constante corresponde ao valor médio por período T:

$$\tilde{p} = V.I.\cos\varphi = P = \frac{1}{T} \int_0^T V.I dt \quad (14)$$

E a parte oscilatória é expressa por:

$$\tilde{p} = V.I.\cos(2\omega t - \varphi) \quad (15)$$

E essa parte oscilatória ainda pode ser desenvolvida na seguinte forma:

$$\tilde{p} = -V.I.\cos\varphi.\cos 2\omega t - V.I.\sen 2\omega t \quad (16)$$

Dessa forma, o autor acrescenta que a parte oscilatória é composta de duas parcelas em quadratura, a primeira delas oscila com $\cos 2\omega t$ e vale $P=V.I.\cos\varphi$ e a outra parte oscila com $\sen 2\omega t$ e vale $P=V.I.\sen\varphi$. Sendo que a segunda parcela que oscila em quadratura com a potência ativa P, é chamada de potência reativa (Q), dada por:

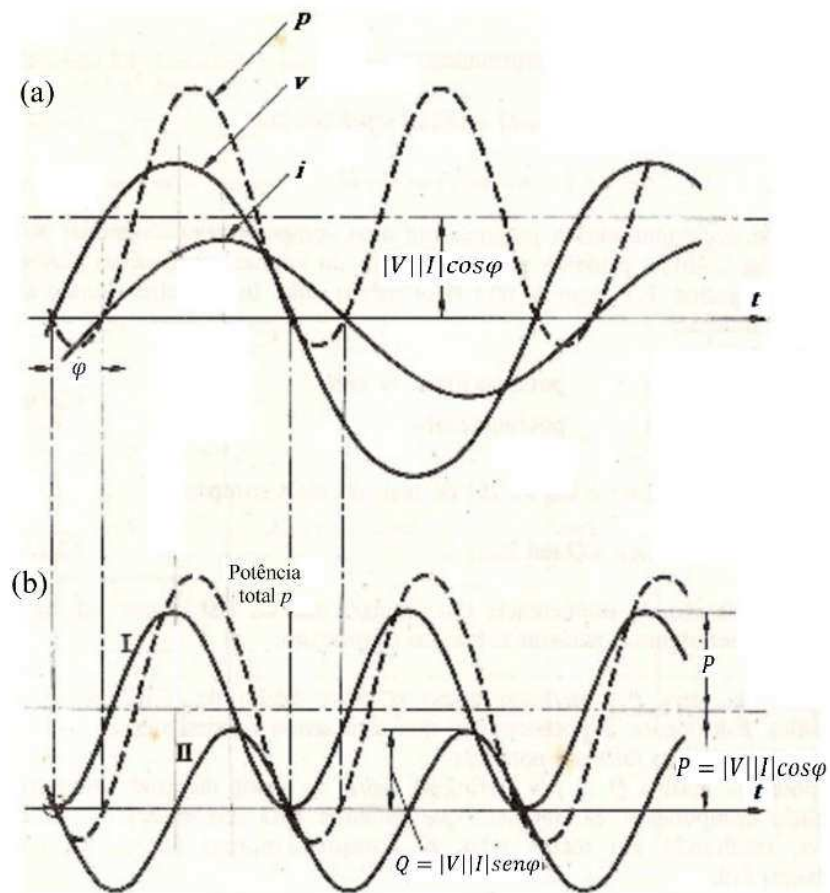
$$Q = V.I.\sen\varphi \quad (17)$$

Portanto, tratando-se das potências média (ativa) e reativa, a potência instantânea (14) pode ser expressa como sendo:

$$p(t) = P(1 - \cos 2\omega t) - Q.\sen 2\omega t \quad (18)$$

Conforme apresentado pelo gráfico da figura 9, a corrente pode ser decomposta em uma parcela senoidal em fase com a tensão e um segundo termo em quadratura com o primeiro. A parcela I da potência é devida exclusivamente à parte da corrente em fase com a tensão, enquanto a parcela II se deve ao termo em quadratura.

Figura 9 – Formas de onda de tensão, corrente e parcelas de potência instantânea ao longo do tempo.

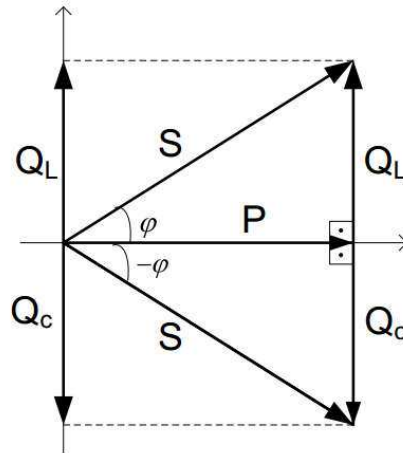


Fonte: (DECKMANN E POMILIO, 2009).

A análise instantânea apresentada, sob a decomposição em quadratura das correntes, pode ainda ser apresentada na forma de fasores, ou ainda, considerando o triângulo das potências.

Na forma trigonométrica, a potência resultante, ou ainda total, na Eq. 11 é denominada potência aparente (S) e tem como unidade o Volt-Ampère (VA); essa, por sua vez decompõe-se em duas: potência ativa e potência reativa. A potência ativa (P) é convertida em trabalho no equipamento; também denominada potência real, tem como unidade de medida o Watts (W). A potência reativa (Q), associada aos campos elétricos e magnéticos das cargas indutivas e capacitivas tem sua unidade estabelecida como o Volt-Ampère reativo (VAr) (MARTINS; GABIATTI; BONAN, 2017), Figura 10.

Figura 10 – Gráfico do triângulo de potências com a representação das potências aparente, ativa, reativa indutiva e reativa capacitiva.



Fonte: (SILVA, 2013).

A Figura 10 representa a relação trigonométrica entre as potências ativa, reativa e aparente, de forma que:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (19)$$

$$\cos(\varphi) = \frac{P}{S} \quad (20)$$

$$\sin(\varphi) = \frac{Q}{S} \quad (21)$$

$$\tan(\varphi) = \frac{Q}{P} \quad (22)$$

Sendo:

φ : defasagem angular entre tensão e corrente.

Para Silva (2013), em um sistema trifásico, ligação Δ ou Y, as potências são expressas por:

$$S_{3\Phi} = 3V_f \cdot I_f = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \quad (23)$$

$$P_{3\Phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos(\varphi) \quad (24)$$

$$Q_{3\Phi} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \sin(\varphi) \quad (25)$$

De acordo com Boylestad (2004), pelas expressões 2 e 3, uma vez o ângulo da corrente seja igual a 0° , se a carga for totalmente resistiva $\varphi = 0^\circ$. Por outro lado, se a

carga for puramente indutiva ou capacitiva o ângulo $\varphi = 90^\circ$ ou $\varphi = -90^\circ$ respectivamente.

Para circuitos indutivos, φ é positivo e a corrente está atrasada em relação à tensão em um valor entre 0° e 90° ; por outro lado, circuitos capacitivos, φ é negativo e a corrente está adiantada em relação à tensão em um valor entre 0° e -90° .

2.6. FATURAMENTO DA DEMANDA E ENERGIA REATIVA EXCEDENTE

A legislação que regulamenta a cobrança da energia e demanda reativa excedente é a Resolução 414 de 2010. Esta Resolução estabelece o limite mínimo de FP de referência com valor de 0,92, indutivo ou capacitivo, dependendo do horário (ANEEL, 2016).

Os capacitores instalados para correção do FP podem elevar a tensão, prejudicando o sistema elétrico enquanto encontra-se em pequena carga. Neste período o sistema não possui excesso de energia reativa indutiva, mas sim de energia reativa capacitiva (SILVA, 2009; COPEL, 2014). Assim, durante um período de seis horas consecutivas, definidos a critério da distribuidora, no período que compreende desde as 23h30 até as 6h30, verifica-se apenas os fatores de potência inferiores a 0,92 capacitivo, em intervalos de uma hora (ANEEL, 2016).

Com base no Artigo nº 96 da mesma Resolução, tem-se que para as unidades consumidoras que possuam equipamento de medição apropriado, os valores referentes ao consumo e demanda de potência reativa excedente são calculados com base nas Equações 26 e 27:

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^{n1} \left[EEAM_T \cdot \left(\frac{f_R}{f_T} - 1 \right) \right] \cdot VR_{ERE} \quad (26)$$

$$D_{RE}(p) = \left[MAX_{T=1}^{n2} \left(PAM_T \cdot \frac{f_R}{f_T} \right) - PAF(p) \right] \cdot VR_{DRE} \quad (27)$$

Sendo:

" E_{RE} = Valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência " f_R ", no período de faturamento, em Reais (R\$);

$EEAM_T$ = montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo " T " de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh);

f_R = fator de potência de referência igual a 0,92;

f_T = fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo " T " de 1 (uma) hora, durante o período de faturamento, observadas as definições dispostas nos incisos I e II do § 1o deste artigo;

VR_{ERE} = valor de referência equivalente à tarifa de energia "TE" aplicável ao subgrupo B1, em Reais por megawatt-hora (R\$/MWh);"

$D_{RE}(p)$ = valor, por posto tarifário " p ", correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência " f_R " no período de faturamento, em Reais (R\$);

PAM_T = demanda de potência ativa medida no intervalo de integralização de 1 (uma) hora " T ", durante o período de faturamento, em quilowatt (kW);

$PAF(p)$ = demanda de potência ativa faturável, em cada posto tarifário " p " no período de faturamento, em quilowatt (kW);

VR_{DRE} = valor de referência, em Reais por quilowatt (R\$/kW), equivalente às tarifas de demanda de potência - para o posto tarifário fora de ponta - das tarifas de fornecimento aplicáveis aos subgrupos do grupo A para a modalidade tarifária horária azul;

MAX = função que identifica o valor máximo da equação, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto tarifário " p ";

T = indica intervalo de 1 (uma) hora, no período de faturamento;

p = indica posto tarifário ponta ou fora de ponta para as modalidades tarifárias horárias ou período de faturamento para a modalidade tarifária convencional binômia;

$n1$ = número de intervalos de integralização " T " do período de faturamento para os postos tarifários ponta e fora de ponta; e

$n2$ = número de intervalos de integralização " T ", por posto tarifário " p ", no período de faturamento." (ANEEL, 2016).

2.7. AVALIAÇÃO E MÉTODO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

De acordo com Mamede Filho (2013), o estudo para aplicação de banco de capacitores pode se dar enquanto a indústria está em fase de projeto ou tratam-se em sistemas já existentes, plantas industriais em operação.

2.7.1. Metodologia para instalações em projeto.

Mamede Filho (2013) apresenta que, na prática, durante a elaboração de projetos elétricos de pequenas indústrias há uma grande dificuldade em se saber, com razoável confiança, detalhes técnicos e o comportamento de operação da planta, tais como:

- Ciclo de operação diário, semanal, mensal e até mesmo anual;
- Taxa de carga dos motores;
- Características técnicas de motores;
- Cronograma de expansão das atividades produtivas.

Tais dados são utilizados para determinar o FP médio presumido da instalação e, sendo necessário, prever os meios necessários para sua correção. Diferentemente em plantas maiores, o projeto consegue definir com razoáveis detalhes todos os itens citados anteriormente e detalhados a seguir:

2.7.1.1. Levantamento de carga do projeto.

- Motores:
 - Tipo (indução, rotor bobinado, síncrono);
 - Potência em cv;
 - Fator de potência;
 - Número de fases;
 - Número de polos;
 - Frequência.
- Transformadores:
 - Potência nominal;
 - Tensão primária e secundária;
 - Impedância percentual;
 - Corrente de magnetização.
- Cargas resistivas:
 - Potência nominal em kW;
 - Potência de operação em kW;
 - Número de fases.
- Fornos:
 - Tipo (indução eletromagnética, arco, entre outros);

- Número de fases;
- Fator de potência.
- Máquinas de solda:
 - Tipo (transformadora, motogeradora, transformadora retificadora);
 - Número de fases;
 - Fator de potência determinado em teste de bancada.
- Iluminação:
 - Tipo (incandescente, fluorescente, vapor de mercúrio, vapor de sódio);
 - Reator (alto ou baixo fator de potência).

2.7.1.2. Ciclo de operação diário, semanal, mensal e anual.

De maneira geral, nas indústrias as máquinas operam em grupos definidos, assim sendo, pode-se determinar o ciclo de operação para cada conjunto homogêneo de carga e, posteriormente, compor os vários conjuntos, gerando a curva de carga correspondente ao funcionamento da instalação no período considerado.

O levantamento de carga deve se levar em consideração o ciclo de operação diário, considerando um dia típico provável de produção normal. Para as indústrias com regime de operação sazonais, é importante que se determine o seu comportamento durante um ciclo completo de atividade.

2.7.1.3. Determinação das demandas ativas e reativas para o ciclo de carga considerado.

Esta etapa consiste na elaboração de tabelas, levando-se em consideração o horário de utilização dos equipamentos divididos em seus respectivos grupos, realizando o cálculo para o FP horário.

2.7.1.4. Traçado das curvas de demanda ativa e reativa.

Tendo-se como base os dados finais obtidos pelos passos mencionados anteriormente, elaboram-se gráficos de demanda de energia ativa e reativa, através dos quais se pode visualizar o ciclo diário de operação da instalação.

A formatação empregada para o traçado das curvas de demanda ativa e reativa, e consequente FP, citado por Mamede Filho (2013), é o método analítico. Neste método considera-se a análise individual de cada carga para cálculos do triângulo de potências, determinando-se sua demanda ativa e reativa com base em seu FP nominal. Realiza-se então a soma de todas as cargas para obtenção de um FP médio. Emprega-se este método de maneira geral, quando se deseja obter um FP em um ponto determinado do ciclo de carga ou quando for apresentado um alto fator de carga, para curva de cargas bem comportadas.

2.7.2. Metodologia para instalações em operação.

Para Mamede Filho (2013), as grandezas somente devem ser obtidas quando a indústria estiver em pleno funcionamento. De maneira geral, não se deve realizar a medição de FP para indústrias recém-inauguradas, pelo motivo do qual nem sempre todas as máquinas estão em operação de regime normal.

Definido por Mamede Filho (2013), o método escolhido para avaliação da indústria em funcionamento é a metodologia das potências medidas. Este método baseia-se em medidas de potência que são obtidas de medidores digitais de parâmetros elétricos, instalados temporariamente, ou fornecidos pela concessionária, caso o medidor registre esses dados.

Com este método é possível realizar o levantamento do FP instantâneo por um período representativo do funcionamento da indústria, quando se instala o medidor, ou de período equivalente ao mês de faturamento junto à concessionária, denominado memória de massa. Com base nas medições pode-se determinar a potência capacitiva necessária para corrigir o FP horário para o valor desejado.

Neste método, quando seja necessária a instalação de medidores temporários, deve-se inserir o custo do aluguel ou da amortização da compra do aparelho, bem como da mão de obra especializada para operar o mesmo.

2.8. PROJETO E EXECUÇÃO DE SISTEMAS PARA A CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Para Mamede Filho (2013), podem-se indicar algumas soluções que devem ser adotadas, dependendo das características particulares de cada instalação. Vale ressaltar que a correção do FP a ser evidenciada não somente visa à questão do faturamento de energia reativa excedente, mas também aspectos operacionais internos à instalação da unidade consumidora, como por exemplo, a liberação da capacidade de cabos e transformadores, redução de perdas, entre outros.

Antes da intervenção instalando-se os equipamentos de correção, é importante que se verifique a possibilidade da realização de alterações na rotina operacional de forma a melhorar o FP. Isso deve ser feito identificando e desligando motores elétricos operando em vazio e buscando manter os equipamentos funcionando em plena carga. Essas alterações também incluem a otimização de sistema de iluminação, com a utilização de equipamentos de alto rendimento.

Os equipamentos utilizados para a correção do FP são os motores síncronos, os compensadores de energia reativa em tempo real e os bancos de capacitores.

O motor síncrono com corrente de excitação superior à necessária para o seu funcionamento gera um excedente de energia reativa capacitiva que corrige o FP (SILVA, 2013). Mamede Filho (2013) dispõe, sobre isso que os motores síncronos podem ser utilizados com a função exclusiva para fins de correção de FP ou também para acionar cargas, de forma a substituir o motor elétrico de indução. Conclui que, na prática, dificilmente essas soluções são adotadas devido ao seu alto custo e as dificuldades operacionais.

De acordo com Sá (2010), os compensadores de energia reativa em tempo real são sistemas mais dispendiosos, por utilizar tiristores em alternativa aos contadores. Por outro lado, por atuar em tempo real esse compensador permite atenuar, e até mesmo

anular, problemas de qualidade da tensão de curta duração, tais como, transitórios, subtensões, flutuações, distorção da forma de onda, entre outros.

2.8.1. Instalação de bancos de capacitores em derivação

A instalação de capacitores para correção de FP é o método mais utilizado em sistemas industriais, principalmente devido ao seu menor custo, comparado aos demais, e da facilidade de instalação. A definição da potência do banco de capacitores é obtida pela resolução do triângulo de potências, e pode ser feita com base na Equação 28.

$$P_c = P_{at} \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \quad 28$$

Sendo:

P_c : Potência dos capacitores em kVAr;

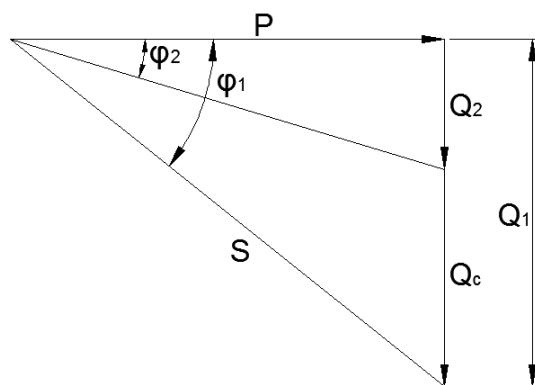
P_{at} : Potência ativa em kW;

φ_1 : Ângulo do FP original;

φ_2 : Ângulo do FP desejado.

A figura 11 exemplifica os componentes gráficos da equação 28.

Figura 11 – Gráfico do triângulo de potências, com a energia reativa capacitiva para correção e com o ângulo inicial e final do FP.



Fonte: Adaptado de (MAMEDE FILHO, 2013).

Pode-se observar pela Figura 11 que a potência ativa mantém-se constante para os ângulos definidos para o FP desejado e original, todavia a potência aparente reduz-se enquanto que se desloca em direção ao eixo X.

Os bancos de capacitores podem ser fixos, com carga reativa constantes, ou automáticos, que possibilitam o chaveamento de grupos de capacitores de acordo com a necessidade momentânea da instalação.

Os bancos de capacitores fixos são utilizados em indústrias que possuam uma carga constante ao longo do dia. São empregados, também, como uma potência capacitiva de base correspondente à demanda mínima da instalação.

A utilização dos bancos automáticos é realizada em instalações que possuem uma razoável variação da curva de carga reativa ao longo do dia, ou até mesmo apresente a necessidade de manutenção do FP em uma estreita faixa de variação.

De acordo com o Mamede Filho (2013), o método de cálculo para os capacitores fixos é o mesmo utilizado para bancos automáticos, todavia, devem-se definir as frações das potências inseridas durante o ciclo de carga da instalação.

Silva (2013) acrescenta que esse tipo de bancos de capacitores são acionados por um equipamento chamado controlador automático de FP. Esses equipamentos são responsáveis por controlar a potência reativa inserida no circuito, mediante o chaveamento com a colocação ou retirada dos bancos. Eles são fabricados com placas eletrônicas que possuem como características operacionais básicas:

- A programação para ajuste rápido e fino do FP;
- O rodízio de operação dos capacitores do banco, aumentando a vida útil dos mesmos;
- A multimedidação das grandezas, tais como, tensão, corrente, frequência, potência ativa, aparente, reativa, FP e conteúdo harmônico.

Controladores que realizem a varredura das unidades chaveadas permitem um ajuste mais fino do FP quando se utiliza um módulo com a metade da potência, uma vez que permite a combinação dos elementos acionados.

2.9. LOCALIZAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES.

De acordo com Mamede Filho (2013), em uma análise puramente técnica, os bancos de capacitores devem ser instalados juntos aos terminais das cargas que demandem energia reativa indutiva. Entretanto, levando-se em consideração o ponto de vista prático e econômico, os bancos de capacitores também são localizados na rede primária, no secundário do transformador, em outros pontos da instalação.

2.9.1. No sistema primário.

Para esta instalação, os capacitores se localizam após a medição da concessionária, no sentido da fonte para a carga. Os custos relacionados a esse método são, de forma geral, mais elevado que a correção em baixa tensão, principalmente em subestações abrigadas, devido à necessidade da instalação de equipamentos de proteção e manobra em média tensão.

Outro ponto negativo relacionado à correção primária é que não libera carga do transformador, ou dos circuitos secundários da instalação, servindo apenas para corrigir o FP no ponto onde está instalada a medição.

2.9.2. No secundário do transformador de potência.

Para esta instalação, os capacitores são usualmente instalados no barramento do quadro geral de força e comando, de maneira a realizar uma compensação global da instalação. Possui como vantagens a liberação de carga do transformador, simplicidade de instalação e operação, resultam em geral, em menores custos finais, porém não reduz as perdas nos circuitos à jusante.

Para Sá (2010) a compensação no secundário do transformador possui as seguintes vantagens e desvantagens:

- Com um banco de capacitores centralizados, seu comando pode ser gerenciado de maneira mais simples;
- Ampliações futuras podem ser realizadas mais facilmente;
- A potência dos capacitores pode ser adaptada constantemente, em acompanhamento ao aumento das cargas na instalação.
- Considerando-se o fator de simultaneidade, geralmente a potência reativa necessária é menor que na correção local.
- Como desvantagem, esse sistema pode gerar quedas de tensão no momento do acionamento de grupos de capacitores de alta potência, causando dano aos equipamentos susceptíveis a essas quedas.

De acordo com o mesmo autor, utiliza-se esse método de correção nos casos de grandes instalações elétricas, com um grande número de equipamentos de potências diferentes e regime de utilização pouco uniforme.

2.9.3. Nos terminais de conexão de cargas específicas.

Para cargas específicas, tais como os motores elétricos, máquinas de solda, entre outros que apresentem baixo FP, pode-se realizar a correção do FP instalando-se banco de capacitores nos seus terminais.

Para o caso específico dos motores elétricos de indução, equipamentos com uso disseminado nas instalações industriais, o banco de capacitores deve ter sua potência limitada a aproximadamente 90% da potência absorvida pelo motor em operação a vazio. Esta limitação tem por objetivo evitar que a impedância indutiva do motor se iguale à reatância capacitiva do capacitor, ocasionando assim, o fenômeno de ferro-ressonância, onde a impedância à corrente seria a resistência do próprio bobinado do motor e do circuito de ligação entre motor e capacitor, provocando a queima dos equipamentos.

Sá (2010), também comenta como vantagens e desvantagens desse método de correção:

- A redução das perdas energéticas e a melhoria dos níveis de tensão em toda a instalação;
- O alívio de carga nos transformadores e cabeamento;
- Custos mais elevados para instalação, quando comparados a outros métodos;
- Problemas para ajuste das potências necessárias com os equipamentos disponíveis no mercado.

Albuquerque (2009), ainda cita um aspecto prático para a instalação dos capacitores, relacionado a NBR 5410 da ABNT. Esta norma estabelece que as células capacitivas devem ser equipadas com dispositivos que permitam o desligamento do circuito, para períodos de manutenção ou até mesmo de baixa carga.

2.10. LEGISLAÇÃO PARA TRABALHO COM ELETRICIDADE.

2.10.1. Norma Regulamentadora 10 – NR10.

Como o âmbito desse trabalho visa intervenções em circuitos elétricos industriais, vale revisar as normas para trabalhos e projetos com instalações elétricas, para isso é citada a NR10, conforme apresenta Berzoini (2004).

10.3.1 É obrigatório que os projetos de instalações elétricas especifiquem dispositivos de desligamento de circuitos que possuam recursos para impedimento de reenergização, para sinalização de advertência com indicação da condição operativa. 10.4.1 As instalações elétricas devem ser construídas, montadas, operadas, reformadas, ampliadas, reparadas e inspecionadas de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores e dos usuários, e serem supervisionadas por profissional autorizado, conforme dispõe esta NR. 10.4.2 Nos trabalhos e nas atividades referidas devem ser adotadas

medidas preventivas destinadas ao controle dos riscos adicionais, especialmente quanto à altura, confinamento, campos elétricos e magnéticos, explosividade, umidade, poeira, fauna e flora e outros agravantes, adotando-se a sinalização de segurança. 10.4.3.1 Os equipamentos, dispositivos e ferramentas que possuam isolamento elétrico devem estar adequados às tensões envolvidas, e serem inspecionados e testados de acordo com as regulamentações existentes ou recomendações dos fabricantes. 10.4.4 As instalações elétricas devem ser mantidas em condições seguras de funcionamento e seus sistemas de proteção devem ser inspecionados e controlados periodicamente, de acordo com as regulamentações existentes e definições de projetos. (BERZOINI, 2004).

2.10.2. Norma para instalação de banco de capacitores em baixa tensão.

Existem atualmente algumas normas nacionais e internacionais em vigência tratando especificamente da confecção e instalação de bancos de capacitores, dentre elas pode-se citar a NBR 5060, ANSI/IEEE *Standard* 18 - 1992, nesse sentido, Valente (2004) realiza uma análise dessas normas e as apresenta de forma concisa, será mencionado a seguir um trecho de seu trabalho:

4.8 Não é permitida a instalação de banco de capacitores ligados em estrela com neutro aterrado. 4.9 Devem ser evitadas instalações de banco de capacitores nas seguintes situações: a) Paredes ou locais expostos diretamente ao sol; b) Proximidade de equipamentos que trabalham com temperaturas superiores ao limite definido pelo fabricante; c) Locais sem ventilação ou próximos ao teto. 4.10 Todas as partes metálicas não vivas devem ser aterradas. 4.11 A proteção através de fusíveis ou disjuntores devem ser dimensionada para não operar com correntes de até 165% da corrente nominal do banco de

capacitores em regime contínuo. 4.12 Os condutores devem ser dimensionados para suportar 150% da corrente nominal do banco de capacitores. 4.13 Os capacitores não devem ser energizados com tensão residual superior a 10%, portanto após o desligamento do banco de capacitores deve-se esperar no mínimo 5 (cinco) minutos antes de qualquer reenergização. 4.14 Mesmo após o desligamento do banco, este deve ser considerado energizado por questões de segurança até que seja devidamente descarregado (aterrado). 4.15 Bancos de capacitores não devem ser instalados em circuitos comuns a motores nem a cargas não lineares. 4.16 Os bancos de capacitores devem possuir chaveamento e proteção exclusivos. 4.17 Os capacitores possuem maior vida útil se estiverem operando nas seguintes condições: a) Potência de operação inferior a 135% do seu valor nominal; b) Tensão eficaz, (incluindo a componente provocada pelas harmônicas), inferior a 110% do valor nominal; c) Corrente eficaz (incluindo a componente provocada pelas harmônicas), inferior a 180% do seu valor nominal; d) Tensão de pico (incluindo a componente provocada pelas harmônicas), inferior a 120% do seu valor nominal. 4.18 Deve-se limitar a corrente de surto (valor de pico) ao valor menor ou igual a 100 (cem) vezes a corrente nominal do banco de capacitores. (VALENTE, 2004).

2.11. ANÁLISE DE VIABILIDADE DO INVESTIMENTO

De acordo com Lima (2017), dentre os critérios de tomada de decisão baseados na análise econômica estão o Valor Presente Líquido (VPL) e o Tempo de Retorno de Capital (TRC), também conhecido como *Payback*.

Na análise pelo VPL, todos os benefícios e custos desde o início ao final do projeto devem ser trazidos para o presente, resultados negativos para VPL não são

atraentes, quanto maior o resultado melhor será o investimento. As equações 24 e 25 representam os cálculos para VPL.

$$VPL = \sum Benefícios - \sum Custos \quad (29)$$

$$VPL = Econ \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} - I + VF_R \cdot \frac{1}{(1+i)^n} \quad (30)$$

Sendo:

Econ: Economia anual (R\$);
n : Vida útil do investimento;
i : Taxa de desconto anual (%);
I : Investimento inicial (R\$);
VF_R : Valor do resgate (R\$).

No Tempo de retorno de capital, ou *Payback*, é realizado um cálculo mais direto do investimento, retratando o tempo necessário para o retorno do capital investido – quanto menor o tempo de retorno do capital, mais atraente será o investimento. O TRC não descontado leva em consideração um cálculo mais simples, envolvendo os custos e benefícios diretos, já o TRC descontado leva também em consideração a taxa de juros ao qual o investimento é submetido. As Equações 26 e 27 representam os cálculos para TRC não descontado e descontado respectivamente.

$$TRC_{ND} = \frac{\sum Custos}{\sum Beneficio Mensal} \quad (31)$$

$$TRC_{ND} = - \frac{\ln(1 - \frac{VPi}{VAb} \cdot i)}{\ln(1+i)} \quad (32)$$

Sendo:

TRC_{ND}: Tempo de Retorno de Capital Não Descontado (Anos);
TRC_D: Tempo de Retorno de Capital Descontado (Anos);
ln : Logaritmo Neperiano;
VPi: Valor Presente do Investimento (R\$);
VAb: Valor Anual do Benefício (*Econ* - R\$);
i : Taxa de desconto anual (%).

3. AVALIAÇÃO E PROJETO PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

3.1. FÁBRICA DE BIODIESEL

A primeira instalação industrial a ser considerada é uma fábrica de biodiesel em fase de projeto. Com o auxílio da empresa terceirizada que fará as instalações elétricas dos equipamentos de parte da indústria, foi possível levantar os dados das potências e modelos dos motores a serem utilizados no setor da prensa.

O processo produtivo à partir da extração do óleo de soja se inicia no setor do recebimento de grãos, passando pela pré-limpeza para remoção de cascas e outras impurezas, logo a matéria prima é enviada ao secador onde a umidade é ajustada para os valores de 13 a 14% e enviada para um silo de armazenagem (DUARTE, 2010).

Antes de se iniciar o processo de extração o grão passa novamente por um secador, onde sua umidade é diminuída para 9,8%, logo o grão passa por um condicionador que, sob a ação de calor, prepara-o para a próxima fase, onde é removida a casca e ele é dividido em seis partes pelo equipamento denominado quebrador. Após quebrado, o grão passa por um sistema de rolos do laminador gerando flocos com poucos milímetros de espessura.

Feito o processo de quebra do grão, é iniciada a extração do óleo, que pode ser por simples prensagem, ou prensagem combinada com extração química, onde o restante do óleo presente no grão é dissolvido pelo hexano. O produto gerado nessa segunda etapa passa por um evaporador, onde o hexano é evaporado e pode ser reaproveitado.

Após a extração, o óleo passa por processos de limpeza e filtragem e está pronto para a etapa da transesterificação, onde é misturado sob condições controladas de temperatura, com álcoois metílico ou etílico, mais uma pequena proporção de catalisador – hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) – como resultado da reação química obtêm-se uma mistura de biodiesel e glicerina. Após a filtragem da glicerina, o biodiesel está pronto para uso.

Com a posse das plantas baixas da instalação em estudo, foi possível o cálculo da área total de instalação da indústria, incluindo os setores de escritório, alojamento, refeitório, casa de máquinas, beneficiamento e usina de biodiesel, apresentando um total de 1.469,12 m² de área construída. O setor específico escolhido para estudo possui uma área de 150 m².

3.1.1. Levantamento da potência reativa.

Os motores utilizados serão da marca WEG, modelo de alto rendimento, a ser instalados nos equipamentos denominados quebrador, laminador e roscas/esteiras transportadores. As características elétricas desses equipamentos são detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Lista de motores e suas respectivas potências.

| Quantidade | Potência (cv) |
|-------------------|----------------------|
| 1 | 60 |
| 2 | 15 |
| 2 | 5 |
| 2 | 3 |
| 1 | 2 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 3 expõe os valores das potências em cv para os motores do setor da prensa. Com base nos valores do FP apresentados pela Tabela 1, buscando uma correção para 0,96 e, utilizando as equações do triângulo de potências 19, 20 e 21, puderam-se calcular os dados apresentados pela Tabela 4.

Tabela 4 – Cálculo do capacitor individual por carga

| Qde | FP (Plena carga) | Potência ativa (kW) | Potência reativa (kVAr) | Potência ativa total (kW) | Potência reativa total (kVAr) | Potência Capacitor (kVAr) |
|--------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 0,86 | 44,16 | 26,20 | 44,16 | 26,20 | 13,31 |
| 2 | 0,84 | 11,04 | 7,13 | 22,08 | 14,26 | 7,81 |
| 2 | 0,80 | 3,68 | 2,76 | 7,36 | 5,52 | 3,37 |
| 2 | 0,82 | 2,21 | 1,54 | 4,42 | 3,08 | 1,79 |
| 1 | 0,76 | 1,47 | 1,26 | 1,47 | 1,26 | 0,83 |
| Total | | | | 79,49 | 50,33 | 27,12 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar na Tabela 4 que seria necessário um banco de capacitores de 27,12 kVAr para se manter o FP desse setor em 0,96. Com base nos valores totais de potência ativa e reativa representada, pode-se afirmar que o FP médio do setor com a instalação em pleno funcionamento é de 0,84.

Considerando que haja modificações na instalação elétrica projetada com expansão das cargas instaladas de 25%, mantendo-se o FP médio em 0,84, é possível prever a necessidade de um banco de capacitores com 35,17 kVAr. Uma vez que esse valor deve ser arredondado para se enquadrar com os capacitores trifásicos comercializados para esse tipo de aplicação, será trabalhada a correção com um banco de 37 kVAr.

Com base nos dados fornecidos pela empresa, sabe-se que o transformador geral da indústria possui a potência de 150 kVA, conforme apresentado no Anexo 2, com a posse desse valor, pode-se também adicionar o capacitor necessário para a correção fixa do transformador que, de acordo com a tabela do Anexo 1, é de 3,5 kVAr.

3.1.2. Correção escolhida.

Com base nas vantagens e dificuldades para instalação de bancos de capacitores apresentados no item 2.9, a localização dos capacitores na média tensão foi desconsiderada pela dificuldade e custo elevado de se trabalhar com equipamentos em média tensão, bem como devido a não diminuir a corrente do transformador, que se encontra sobrecarregado com o fornecimento de energia reativa.

A correção localizada na carga também foi rejeitada pela dificuldade técnica em montar-se os capacitores junto à máquina. A instalação no quadro de acionamentos também é desaconselhada pelas normas apresentadas no Capítulo 2, Item 10.

Dessa forma, a correção escolhida para esse projeto é a correção geral em baixa tensão. Para esse caso será necessário um banco de capacitores com uma célula de 3,5 kVAr fixa e um banco modulado por um controlador automático de FP com 37 kVAr. Assim sendo, o banco escolhido para o projeto terá uma potência reativa total de 40,5 kVAr, contando com três células de 3,5 kVAr e seis de 5 kVAr.

3.1.3. Análise financeira da implementação do banco de capacitores.

Considerando que a indústria em questão é uma empresa de pequeno porte e que seu período de funcionamento é de 8 horas por dia, este será o período considerado para os cálculos do faturamento dos excedentes reativos, conforme as Equações 29 e 30.

Com os valores totais de potência ativa e FP geral obtido a partir dos cálculos mencionados anteriormente e, de acordo com a resolução homologatória da ANEEL retratada por Rufino (2016), foi possível a elaboração das Tabelas 9 e 10, para resolução das Equações 29 e 30.

Tabela 5 – Valores para resolução da equação de E_{RE} .

| E_{RE} | Variável |
|------------|---------------|
| $EEAM_T$ | 0,09936 MW |
| f_R | 0,92 |
| f_T | 0,845 |
| VR_{ERE} | 240,14 R\$/MW |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 – Valores para resolução da equação de $D_{RE}(p)$.

| $D_{RE}(p)$ | Variável |
|-------------|--------------|
| PAM_T | 99,36 kW |
| f_R | 0,92 |
| f_T | 0,845 |
| $PAF(p)$ | 100 kW |
| VR_{DRE} | 14,68 R\$/kW |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a resolução das Equações 29 e 30 por meio dos valores apresentados nas Tabelas 5 e 6, chega-se aos valores de consumo horário $E_{RE} = 2,12$ R\$/h, e $D_{RE}(p) = 120,07$ R\$/mês. Conforme considerado anteriormente, a indústria opera 8 horas por dia, considerando que um mês tenha em média 22 dias úteis, obtêm-se um total de 176 horas por mês.

Com a multiplicação dos valores obtidos pelo horário estimado, obtêm-se o valor mensal de gastos com consumo de energia reativa excedente de R\$ 493,19, sem impostos. Considerando como referência o mês de Agosto de 2016, a somatória dos encargos de PIS/PASEP, COFINS e ICMS é de 25,55%, obtendo o valor total com impostos de R\$ 662,44. Esse valor será utilizado para a análise financeira do investimento.

Uma vez conhecidos os componentes principais do banco de capacitores a ser instalado, foi possível realizar o levantamento do preço de cada material, cotados em fornecedores da região onde se localiza a empresa. A Tabela 7 representa o valor total para confecção do banco de capacitores, este valor foi considerado como custo inicial para as análises econômicas.

Tabela 7 – Lista de componentes e seus custos.

| Item | Descrição | Qde | Unid. | Valor Unitário (R\$) | Valor Total (R\$) |
|--------------------|--|-----|---------|----------------------|-------------------|
| 1 | Painel modular 2100x800x800 | 1 | Peças | 3.081,40 | 3.081,40 |
| 2 | Disjuntor caixa moldada 100A | 1 | Peças | 480,20 | 480,20 |
| 3 | Minidisjuntor DIN monopolar 10A | 3 | Peças | 9,60 | 28,80 |
| 4 | Disjuntor caixa moldada 20A | 9 | Peças | 171,33 | 1.541,97 |
| 5 | Contator 220V - 25A | 9 | Peças | 205,70 | 1.851,30 |
| 6 | Capacitor trifásico 5kVAr | 6 | Peças | 148,56 | 891,36 |
| 7 | Capacitor trifásico 3,5kVAr | 3 | Peças | 70,13 | 210,39 |
| 8 | Controlador automático FP | 1 | Peças | 2.253,64 | 2.253,64 |
| 9 | Barramento de cobre p/ 100A | 6 | m | 52,70 | 316,20 |
| 10 | Canaleta PVC aberto 50x80x2000mm | 3 | Peças | 48,20 | 144,60 |
| 11 | Canaleta PVC aberto 30x30x2000mm | 2 | Peças | 31,14 | 62,28 |
| 12 | Trilho DIN | 6 | m | 7,20 | 43,20 |
| 13 | Cabo 0,6/1kV preto 2,5mm ² | 50 | m | 1,12 | 56,00 |
| 14 | Diversos (cabearamento de comando, terminais ilhós, marcadores de cabos, espiral PVC, abraçadeiras de nylon) | 1 | Unidade | 400,00 | 400,00 |
| 15 | Mão de obra para montagem do painel | 1 | Unidade | 3.000,00 | 3.000,00 |
| 16 | Projeto elétrico | 1 | Unidade | 1.000,00 | 1.000,00 |
| Valor Total | | | | | 15.361,34 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a vida útil do banco de capacitores de 10 anos, e uma taxa de juros anual do BNDES para investimentos em empresas de 13,5%, puderam-se avaliar indicadores de VPL e TRC do investimento. A Tabela 8 representa os resultados gerais para o VPL no período mencionado.

Tabela 8 – Valores presentes do investimento.

| Valor Presente Líquido - VPL | |
|-------------------------------------|----------------------|
| Valor presente Investimento - VPi: | R\$ 15.361,34 |
| Valor Presente benefícios - VPb: | R\$ 42.286,33 |
| Valor Presente Líquido - VPL: | R\$ 26.924,99 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 8 mostra que com um investimento de R\$ 15.361,34, ao longo de 10 anos será gerada uma economia bruta de R\$ 42.286,33, com o VPL do investimento em R\$ 26.924,99. Será representado na Tabela 9 o tempo de retorno do capital.

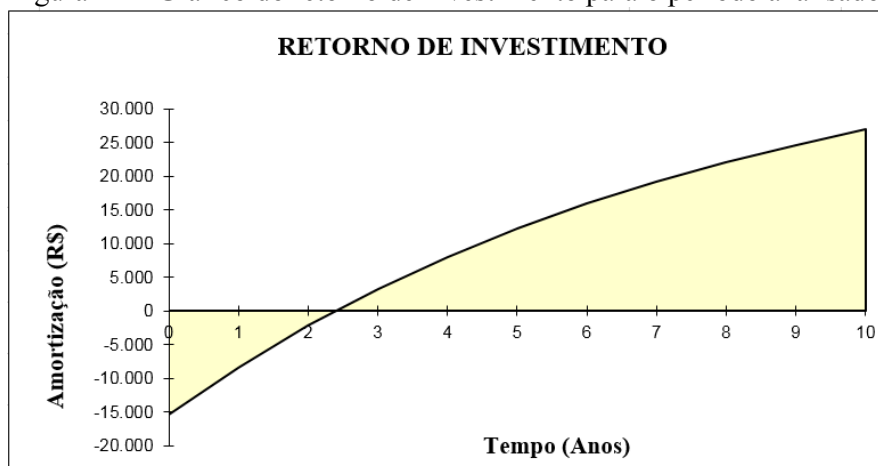
Tabela 9: Valores presentes do investimento.

| Tempo de retorno de capital - TRC | Meses |
|--|--------------|
| Tempo de retorno não descontado - TRCnd: | 23,19 |
| Tempo de retorno de capital descontado - TRCd: | 28,65 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 9 mostra que, mesmo com o cálculo do retorno de capital descontado, o tempo para esse retorno é de cerca de dois anos e meio, conforme retratado na Figura 12.

Figura 12 – Gráfico do retorno de investimento para o período analisado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar pela Figura 12 um grande crescimento dos valores amortizados ao longo dos 10 anos considerados, retratando assim um alto ganho para o investimento analisado, garantindo a viabilidade da correção do FP.

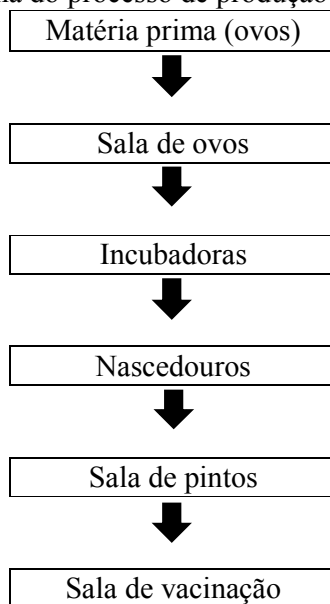
3.2. Incubatório de aves.

A indústria avaliada localiza-se no estado de Mato Grosso do Sul, cidade de Dourados e desenvolve, como atividade principal, a incubação de pintinhos. Esta empresa opera de forma ininterrupta sete dias por semana ao longo dos doze meses do ano.

A área construída da indústria analisada é de 6.646,7 m² e possui uma capacidade de chocar 140 mil ovos por dia. O fornecimento de energia elétrica é realizado pela concessionária brasileira Energisa, por uma rede de distribuição de média tensão (13,8 kV). Internamente as suas instalações, possui uma subestação de transformação abrigada de 1.000 kVA, composta por dois transformadores de potência nominal 500 kVA, a tensão secundária de 380/220V, conforme representado pelo Anexo 3. Possui também um grupo gerador a diesel, para utilização somente em casos de falta de energia elétrica. A empresa está classificada na modalidade tarifária horosazonal verde, subgrupo A4.

O processo de produção é representado pela figura 13, inicia-se no setor do recebimento de matéria prima com a fumeção dos ovos, armazenagem (pré-climatização), incubação, nascimento, sexagem, vacinação e expedição.

Figura 13 – Fluxograma do processo de produção do Incubatório de aves.



Fonte: (Elaboração própria).

Uma particularidade da indústria em questão é a grande quantidade de incubadoras (chocadeiras) e nascedouros, esses equipamentos possuem pequenos motores internos para realização seja de ventilação forçada de ar quente, ou mesmo para rolagem de ovos, também resistências elétricas responsáveis por manter a temperatura constante de 37,5°C, esses últimos elementos são responsáveis pela maior parcela de consumo de energia dos equipamentos mencionados.

A instalação atual de banco de capacitores para correção do FP consiste no método de correção geral, com um banco de capacitores instalado junto ao disjuntor de entrada de baixa tensão, com o controle manual ou automático para chaveamento de cada célula capacitiva individualmente.

Contudo, por se tratar de equipamentos obsoletos e pela falta de manutenção ao longo dos anos de utilização, algumas das células encontram-se avariadas, também o controlador automático encontra-se com defeito e já não realiza o chaveamento automático dos bancos. Dessa forma a empresa optou pela substituição completa desses equipamentos.

Como se pode observar na Figura 14, os equipamentos atualmente instalados não apresentam sinais de manutenção, pelas Figuras 15 e 16, observa-se que a proteção do circuito dos capacitores é feita por fusíveis do tipo Diazed, tais equipamentos não são mais utilizados para proteção de circuitos no ambiente industrial.

Figura 14 – Condições atuais da instalação do banco de capacitores.



Fonte: Produzida pelo autor em 14/12/2016.

Figura 15 – Equipamentos de proteção do circuito das células capacitivas.



Fonte: Produzida pelo autor em 14/12/2016.

A Figura 15 representa os portas-fusíveis e fusíveis do tipo Diazed, utilizados para a proteção dos circuitos dos capacitores.

Figura 16 – Quadro de comando elétrico, onde se encontram os equipamentos de acionamento e proteção das células capacitivas.



Fonte: Produzida pelo autor em 14/12/2016.

Na figura 16 pode se observar as condições atuais dos dispositivos de proteção do circuito de força do banco de capacitores atual, demonstrando que alguns dos conjuntos de fusíveis foram substituídos por disjuntores termomagnéticos comuns, modelo 5SX da marca Siemens.

Esse modelo é inadequado para esse tipo de aplicação, pois, apresenta uma capacidade de interrupção de curto circuito de 3 kA, enquanto que as recomendações discutidas no item 2.10.2 deste trabalho indicam que o valor da corrente de surto a ser considerada é de 100 vezes a corrente nominal, visto que as células existentes são de 30 kVAr, com uma corrente nominal de 45A a capacidade de interrupção desses disjuntores deve ser de no mínimo 4,5 kA.

3.2.1. Levantamento da energia reativa.

Os cálculos para levantamento do banco de capacitores necessário, a correção geral, conforme comentado no item 2.7.2, baseia-se na análise do consumo de cargas da instalação em regime de operação. Devido à falta de equipamentos para medição, fez-se necessário a utilização de memória de massa fornecida pelo medidor da concessionária, para levantamento de dados.

Uma vez que há custo para emissão da memória de massa de cada período de um mês, foi obtido, como cortesia do setor de engenharia da empresa em estudo, apenas o período de um mês para análise dos consumos de energia ativa e reativa da instalação.

O intervalo de tempo ideal para esse tipo de análise é de um ano, pois evidencia as oscilações de consumo de acordo com as estações do ano, uma vez que a indústria consta com vários aparelhos para refrigeração do ambiente interno, e seu uso varia diretamente de acordo com a temperatura externa.

Como vantagem, a memória de massa obtida trata-se do mês de dezembro, dessa forma, pode-se afirmar que é o mês do ano com maior consumo de energia, pois, devido às altas temperaturas externas, os equipamentos de refrigeração trabalham com carga máxima e em regime contínuo.

Na planilha fornecida da memória de massa, o valor de energia reativa indutiva e capacitiva aferida em intervalos de 15 minutos já está representado, dessa forma,

identifica-se o período de maior potência reativa indutiva e, então, realiza-se o cálculo do quanto de potência reativa capacitiva seria necessária para manter o FP no valor desejado.

Por decisão do departamento de engenharia, o FP desejado foi fixado em 0,97, tendo-se, assim, uma margem para possíveis erros de leitura, variações repentinas de cargas e também para um melhor aproveitamento da carga fornecida pelo transformador. A Tabela 3 expressa os valores medidos em intervalos de quinze minutos da hora de maior demanda reativa.

Tabela 10 – Fragmento de memória de massa, do mês de Dezembro de 2016.

| Data | Dia | Postos horários | kW fornecido | kVAr indutivo | kVAr capacitivo |
|------------------|------------|------------------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| 14/12/2016 14:15 | Quarta | Fora Ponta | 572,57 | 426,32 | 0 |
| 14/12/2016 14:30 | Quarta | Fora Ponta | 549,52 | 411,74 | 0 |
| 14/12/2016 14:45 | Quarta | Fora Ponta | 555,21 | 417,96 | 0 |
| 14/12/2016 15:00 | Quarta | Fora Ponta | 567,90 | 418,50 | 0 |
| Média | | | 561,30 | 418,63 | 0 |

Fonte: Energisa e adaptado pelo autor.

A Tabela 10 extraída da memória de massa fornece os 4 dados registrados no período de uma hora, fez-se então uma média desses dados para se calcular qual a potência reativa capacitiva seria necessária para a correção do FP e mantê-lo ao nível de 0,97 em uma hora. De acordo com as Equações 13, 14 e 16, chegou-se a necessidade de 277,85kVAr para corrigir o FP para 0,97.

3.2.2. Correção escolhida.

Por tratar-se de uma indústria em operação, possuir uma única sala de painéis de onde é distribuída a força para todos os circuitos existentes, também pela simplicidade e baixo custo de instalação, o método de correção escolhido em substituição ao existente, foi o de correção geral em baixa tensão.

A empresa contratada para fornecimento do novo banco de capacitores optou pelo fornecimento de um painel elétrico exclusivo para comando/chaveamento das células capacitivas, bem como o seu armazenamento, de forma que os capacitores não estejam expostos às intempéries climáticas, e que sejam atendidas às exigências da

NR10, explicadas anteriormente no item 2.10, no que diz respeito à proteção de circuitos energizados, contra a interação de pessoas sem treinamento específico.

O banco é constituído de 11 células de 25,0 kVAr e uma célula de 12,5 kVAr, somando-se um total de 287,5 kVAr, valor obtido com base nos capacitores existentes no mercado para esse tipo de aplicação.

3.2.3. Detalhamento do banco de capacitores.

O quadro possui um disjuntor geral, um controlador automático de FP, disjuntores monofásicos para proteção do circuito de comando, cada célula capacitiva possui um disjuntor para proteção do circuito e de carga, e um contator para acionamento individual, como mostra a Figura 17.

Figura 17 – Novo quadro de comando elétrico, onde se encontram os equipamentos de acionamento e proteção das células capacitivas.



Fonte: Produzida pelo autor em 14/12/2016.

Conforme apresentado pela Figura 16, para montagem do painel modular, com equipamentos para correção do FP, foram utilizados todos os equipamentos da marca Siemens. As células capacitivas trifásicas utilizadas, com potência de 25,0 kVAr, possuem corrente nominal de 38A, e código de fábrica B32344-E3251-Z080, já a de 12,5 kVAr apresenta uma corrente nominal de 19 A e código de fábrica B32344-E3121-Z580.

Os contadores utilizados possuem contatos principais trifásicos, e bobina de acionamento com tensão em 220 V, corrente nominal de 50 A, modelo 3RT10 36-1AN10. Os disjuntores para proteção das células capacitivas são do tipo trifásicos em caixa moldada, corrente nominal de 80 A, corrente máxima de interrupção em 415 V de 25 kA, sem ajuste e código de fábrica 3VT1708-2DA36-0AA0.

Para proteção geral do painel, utilizou-se um disjuntor trifásico em caixa moldada, corrente nominal de 630A, corrente máxima de interrupção em 415 V de 36 kA, código de fábrica 3VT3763-2AA36-0AA0.

O controlador automático do banco possui 12 estágios de operação, alimentação em 220VCA, display para configuração e exibição de parâmetros (V, I, F, Q, P, S), leitura de transformador de corrente instalado em uma fase da instalação, código B44066-R6012 S221.

3.2.4. Análise financeira da implementação do banco de capacitores.

Para análise dos valores de investimento e retorno dessa aplicação, foi considerado como valores de economia mensal o faturamento da demanda e energia reativa excedente nos horários de ponta e fora de ponta. Esses valores foram extraídos da fatura de energia fornecida pela empresa em estudo do mês de dezembro de 2016, e somam R\$ 3.799,92.

Com os valores obtidos foi realizada uma projeção para os custos anuais ocasionados pelo consumo excedente de energia e demanda reativa, o que resultou em R\$ 45.599,04. Idealmente para uma análise mais completa seria necessário o levantamento das últimas doze faturas, porém, infelizmente, não se teve acesso a esses dados.

Uma vez detalhados os componentes do banco de capacitores a ser instalado, foi possível realizar o levantamento do preço de cada material, cotados em fornecedores da região onde se localiza a empresa. A Tabela 4 representa o valor total para confecção do banco de capacitores, este valor foi considerado como custo inicial para as análises econômicas.

Tabela 11 – Lista de componentes e seus custos.

| Item | Descrição | Qde | Unid. | Valor Unitário (R\$) | Valor Total (R\$) |
|--------------------|--|-----|---------|----------------------|-------------------|
| 1 | Painel modular 2100x800x800 | 1 | Peças | 3.081,40 | 3.081,40 |
| 2 | Disjuntor caixa moldada 630A | 1 | Peças | 3.181,25 | 3.181,25 |
| 3 | Minidisjuntor DIN monopolar 10A | 3 | Peças | 9,60 | 28,80 |
| 4 | Disjuntor caixa moldada 80A | 12 | Peças | 286,20 | 3.434,40 |
| 5 | Contator 220V - 50A | 12 | Peças | 310,20 | 3.722,40 |
| 6 | Capacitor trifásico 25kVAr | 11 | Peças | 346,00 | 3.806,00 |
| 7 | Capacitor trifásico 12,5kVAr | 1 | Peças | 215,83 | 215,83 |
| 8 | Controlador automático FP | 1 | Peças | 2.253,64 | 2.253,64 |
| 9 | Barramento de cobre p/ 630A | 6 | m | 184,30 | 1.105,80 |
| 10 | Canaleta PVC aberto 50x80x2000mm | 3 | Peças | 48,20 | 144,60 |
| 11 | Canaleta PVC aberto 30x30x2000mm | 2 | Peças | 31,14 | 62,28 |
| 12 | Trilho DIN | 6 | m | 7,20 | 43,20 |
| 13 | Cabo 0,6/1kV preto 25mm ² | 50 | m | 10,69 | 534,50 |
| 14 | Diversos (cabearamento de comando, terminais ilhós, marcadores de cabos, borracha para chapa de montagem, espiral PVC, abraçadeiras de nylon...) | 1 | Unidade | 400,00 | 400,00 |
| 15 | Mão de obra para montagem do painel | 1 | Unidade | 3.000,00 | 3.000,00 |
| 16 | Projeto elétrico | 1 | Unidade | 1.000,00 | 1.000,00 |
| Valor Total | | | | | 26.014,10 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando a vida útil do banco de capacitores de 10 anos, e uma taxa de juros anual do BNDES para investimentos em empresas de 13,5%, puderam-se avaliar indicadores de VPL e TRC do investimento. A Tabela 5 representa os resultados gerais para o VPL no período mencionado.

Tabela 12 – Valores presentes do investimento.

| Valor Presente Líquido - VPL | |
|-------------------------------------|-----------------------|
| Valor presente Investimento - VPi: | R\$ 26.014,10 |
| Valor Presente benefícios - VPb: | R\$ 242.564,89 |
| Valor Presente Líquido - VPL: | R\$ 216.550,79 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 12 mostra que com um investimento de R\$ 26.014,10, ao longo de 10 anos será gerada uma economia bruta de R\$ 242.564,89, com o VPL do investimento em R\$ 216.550,79. Será representado na Tabela 6 o tempo de retorno do capital.

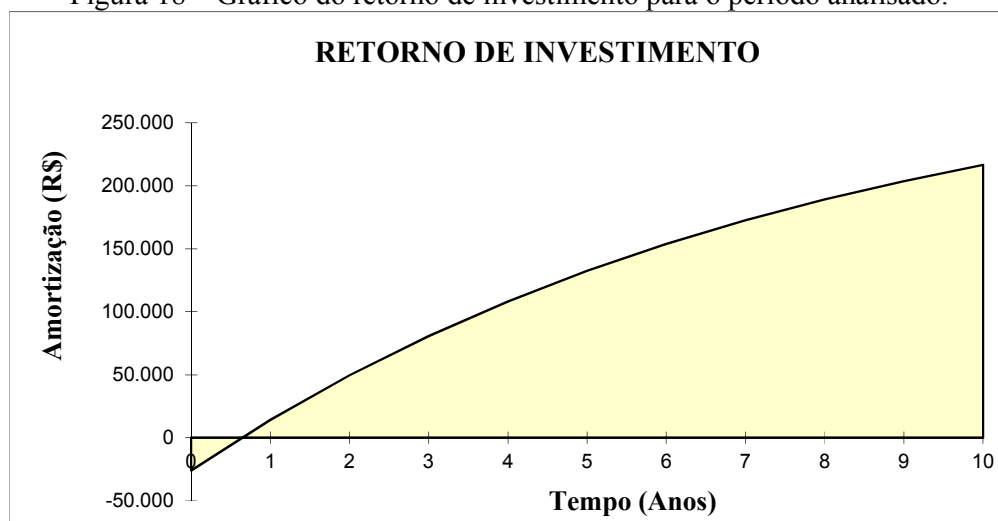
Tabela 13 – Valores presentes do investimento.

| Tempo de retorno de capital - TRC | Meses |
|--|--------------|
| Tempo de retorno não descontado - TRCnd: | 6,85 |
| Tempo de retorno de capital descontado - TRCd: | 7,59 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 6 mostra que, mesmo com o cálculo do retorno de capital descontado, o tempo para esse retorno não chega a um ano, como também pode ser observado na Figura 17.

Figura 18 – Gráfico do retorno de investimento para o período analisado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar pela Figura 17 um alto valor positivo de amortização do investimento, retratando, assim, a viabilidade do investimento em correção do FP.

4. Considerações finais:

A maioria dos equipamentos industriais que produzem trabalho utiliza energia proveniente de motores elétricos que, por sua vez, são alimentados por transformadores que adequam a tensão aos níveis apropriados para consumo. Estes equipamentos possuem, como característica principal, a utilização de enrolamentos, de bobinas, responsáveis pela utilização de energia reativa.

A energia reativa, por sua vez, é utilizada exclusivamente para a produção de campos eletromagnéticos e não gera trabalho útil, tornando, ainda, a instalação pouco eficiente, pois, não permite aproveitar adequadamente a potência do transformador e ainda provoca perdas e queda de tensão nos circuitos e equipamentos da instalação. Por fim, a regulamentação do setor elétrico ainda define o limite mínimo do FP, cobrando os excessos de demanda e energia reativa. Neste trabalho foi analisada e projetada a correção do FP em duas indústrias, uma fábrica de biodiesel em fase de projeto e um incubatório de aves em operação.

O estudo da fábrica de biodiesel foi realizado para o setor de prensagem de grãos, onde as máquinas somam 79,49 kW, e possuem um FP médio de 0,84. Considerado ainda a ampliação futura de 25% na carga instalada, mantendo-se o FP médio, projetou-se um banco automático de capacitores de 37 kVAr, acrescido de 3,5 kVAr para a correção do transformador.

Uma vez discutida as dificuldades e vantagens da localização da correção de FP em média tensão, em quadro de comando geral de baixa tensão e, aplicada junto à carga, concluiu-se que a melhor alternativa é em baixa tensão, agrupada e automática, no qual se obteve o custo de R\$ 15.361,34. Com custo mensal do baixo FP de R\$ 662,44, a partir da análise de viabilidade do investimento, verificou-se o Valor Presente Líquido e o Tempo de Retorno de Capital descontado de R\$ 26.924,99 e 28,65 meses – concluindo viável o empreendimento.

No Incubatório de aves, por sua vez, com um banco de capacitores já instalado, todavia avariado e em desacordo com as normas atuais, pagava-se demanda e energia reativa excedente. Devido à dificuldade ao acesso às instalações para o levantamento de carga, foi utilizada a memória de massa registrada pelo medidor da concessionária,

onde, projetou-se a necessidade de 287,5 kVAr para se elevar o FP para 0,97, mantendo-se a correção geral em baixa tensão já empregada.

Como o custo para correção do FP projetado de R\$ 26.014,10, e despesas anuais com demanda e energia reativa excedente anual de R\$ 45.599,92, chegou-se ao Valor Presente Líquido de R\$ 216.550,79 e Tempo de Retorno de Capital descontado de 7,59 meses, concluindo a viabilidade da correção do FP.

Por fim, considera-se que a correção do FP é um procedimento importante para a melhoria da qualidade da energia, para o aumento da eficiência das instalações, bem como para a redução das despesas com a fatura de energia. Verifica-se, ainda, que a instalação de bancos automáticos de capacitores considerando indústrias em fase de projeto quanto em operação são investimentos viáveis, com retorno rápido do capital empregado. Sugerem-se, como trabalhos futuros, avaliações quantitativas dos benefícios da melhoria da qualidade da energia e da eficiência nas instalações a partir da instalação de bancos de capacitores junto à carga e, centralizados no quadro em baixa tensão.

5. Referências bibliográficas

ALBUQUERQUE, Cláudio F. de (São Paulo). Engenheiro Eletricista. **Energia ativa e reativa**: Livreto explicativo. Itajaí: Ceripa, 2009. 12 p. Disponível em: <<http://www.ceripa.com.br/Manual Reativo.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2017.

ANEEL. **Informações Adicionais Sobre o Horário Brasileiro de Verão**. Brasília: Aneel, 2004.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 414/2010**: Direitos e Deveres dos Consumidores e Distribuidoras. Brasília, 2016. 80 p. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/REN_414-Texto_Compacto-725-2016.pdf/3cc31bf8-4833-4d03-95d9-d93e902bef8c>. Acesso em: 28 jan. 2017.

BERZOINI, Ricardo (Ministério do Trabalho e emprego). Diário Oficial da União nº 235, de 7 de dezembro de 2004. **Portaria Nº 598, de 7 de Dezembro de 2004**. Dourados, MS, 8 dez. 2004. Seção 1, p. 74-77. Disponível em: <http://www.trabalhoseguro.com/Portarias/Portaria_598_NR_10_DOU_08_12_2004.pdf>. Acesso em: 31 mar. 2017.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à análise de circuitos**. 10ª Edição, tradução José Lucimar do Nascimento; revisão técnica Antônio Pertence Júnior – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.

BURIAN JÚNIOR, Yaro; LYRA, Ana Cristina Cavalcanti. **Circuitos Elétricos**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

CELESC (Santa Catarina). **Fator de Potência e Fator de Carga**. Disponível em: <http://portal.celesc.com.br/portal/grandesclientes/index.php?option=com_content&task=view&id=128&Itemid=220>. Acesso em: 01 nov. 2014.

CODI - Comitê de Distribuição de Energia Elétrica. **Manual de Orientação aos Consumidores**. Curitiba: CODI, 2004. 13 p.

COPEL (Paraná). **Fator De Potência: Como Transformá-lo em um Fator De Economia**. Curitiba: Copel, 2014. 4 p. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/\\$FILE/fator_potencia.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/$FILE/fator_potencia.pdf)>. Acesso em: 01 nov. 2014.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. TEORIAS DE POTÊNCIA ELÉTRICA. In: LCEE DSCE FEEC (São Paulo). Universidade Estadual de Campinas. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. Campinas: Unicamp, 2009. p. 1-64. (Capítulo 6).

DUARTE, Alice. **Por dentro de uma usina de biodiesel: equipamentos**. 2010. Disponível em: <<https://www.biodieselbr.com/revista/017/por-dentro-de-uma-usina-1.htm>>. Acesso em: 09 abr. 2017.

FERRAZ, Gerson. **Fator de Potência: Principais Causas do Baixo Fator de Potência**. 2015. Disponível em: <<http://www.acats.com.br/pee/fator-de-potencia/>>. Acesso em: 29 mar. 2017.

GODOI, J. M. A. **Metodologia para gestão da eficiência energética de sistemas industriais sob condicionantes socioambientais sustentáveis**. 2008. 146 p. Monografia de especialização em Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético – Programa Interunidades do Instituto de Eletrotécnica e Energia, IEE. Universidade de São Paulo.

GOZZI, Giuseppe G. M. *Eletrônica: máquinas e instalações elétricas* / Giuseppe Giovanni Massimo Gozzi, Tera Miho Shiozaki Parede (autores); Edson Horta (coautor); Jitsunori Tsuha (revisor); Jun Suzuki (coordenador). Manual técnico Centro Paula Souza. – São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Eletrônica, v. 3).

HÉRCULES (Cascavel - PR). **Fator de Potência**. Disponível em: <http://herculescomponentes.com.br/FATOR_DE_POTENCIA.htm>. Acesso em: 02 nov. 2014.

IFSC (São Paulo). Instituto de Física de São Carlos. **Circuitos de Corrente Alternada I**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2010. 23 p. Disponível em: <http://www.ifsc.usp.br/~strontium/Teaching/Material2010-2_FFI0106_LabFisicaIII/12-CircuitosdeCorrenteAlternada-I.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2017.

INMETRO. **Tabelas de consumo/eficiência energética – Tabela 11: MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS - RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA**. Brasília: Inmetro, 2002. Edição 01, Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/pbetab11.asp>>.

LIMA, Aureo Cezar de. **Gestão energética e ambiental: Geração própria na ponta (apostila de aula)**. UFGD, 2017, Dourados, p. 1 - 13.

LUCAS, Felipe Richter. **Correção do fator de potência de cargas industriais**. 2013. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2013. 666 p.

MARTINS, Alexandre Saccol; GABIATTI, Gerson; BONAN, Guilherme. **ENTENDENDO O FATOR DE POTÊNCIA**. Porto Alegre: Cp

Eletrônica S.a, 2017. 13 p. Disponível em: <http://www.ppgel.net.br/rabelo/ensino/circuitos_III/fator_de_potencia.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2017.

MATTEDE, Henrique. **O que são máquinas elétricas?** 2017. Mundo da Elétrica. Disponível em: <<https://www.mundodaeletrica.com.br/o-que-sao-maquinas-eletricas/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. **Fundamentos de Eletromagnetismo**. 3.2 Florianópolis. 2005. 127 p. Centro Federal de Educação Tecnológica. Disponível em: <<http://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Apostilas/Eletromagnetismo.pdf>>. Acesso em: 09 mar. 2017.

NILSSON, James W. **Circuitos elétricos**. 8ª Edição, revisão técnica Antônio Emílio Angueth de Araújo, Ivan José da Silva Lopes; tradução Arlete Simille Marques – São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

OLIVEIRA, Lilian Silva de. **Gestão Energética de Edificações Públicas no Brasil**. 263 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

OLIVEIRA, Vanessa Martins de. **Avaliação da gestão energética em uma indústria de embalagens plásticas: estudo de caso**. 2014. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados MS, 2014.

PEREIRA, Ricardo Fazonato et al. Correção do fator de potência: estudo de viabilidade da implantação de um banco capacitor em uma empresa de mineração localizada em Cataguases - MG. In: Encontro nacional de engenharia de produção, 35., 2015, Fortaleza. **Perspectivas Globais para a Engenharia de Produção**. Fortaleza: Enegep, 2015. p. 1 - 14. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STP_214_267_27339.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2017.

REIS, Júlio César Silva dos; KIKUCHI, George Tsuruji. **Banco de capacitores para correção de fator de potência em indústria**. 2015. 44 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica / Eletrônica, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo (feau), Universidade do Vale do Paraíba (univap), São José dos Campos, 2015. Disponível em: <<http://biblioteca.univap.br/dados/000015/00001531.pdf>>. Acesso em: 06 mar. 2017.

RUFINO Romeu Donizete. ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica: **Resolução Homologatória N° 2.054, de 5 e Abril de 2016**. Brasília, 2016. 10 p.

SÁ, André Fernando Ribeiro de. **Guia de aplicações de gestão de energia e eficiência energética**. 2. ed. Porto: Publindústria, 2010. 461 p.

SILVA, Alexandre César Rodrigues da. **Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais**. 2013. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/capitulo-4-2013-2s.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2016.

SILVA, Marcos César Isoni. **Correção Do Fator De Potência De Cargas Industriais Com Dinâmica Rápida**. 2009. 241 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2009.

SILVA, Domiciano Correa Marques da. **Lei de Faraday**. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/lei-faraday.htm>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

SOUZA, Andréa de; GUERRA, Jorge Carlos Correa; KRUGER, Eduardo Leite. **Os programas brasileiros em eficiência energética como agentes de reposicionamento do setor elétrico**. *Revista Tecnologia e Sociedade*, Versão Online, p.1-7, jan. 2011. Disponível em: <http://files.dirppg.ct.utfpr.edu.br/ppgte/revistatecnologiaesociedade/rev12/r12_a7.pdf>. Acesso em: 24 jan. 2015.

VALENTE, Ricardo José Barros. Departamento de Planejamento de Investimentos. **NORMA PARA INSTALAÇÃO DE BANCO DE CAPACITORES EM BAIXA TENSÃO: PROCESSO DE PROJETO E CONSTRUÇÃO**. Bahia: Coelba, 2004. 8 p.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. Campinas: Pee - Aneel, 2012. 315 p. Disponível em: <https://www.elektro.com.br/Media/Default/DocGalleries/EficientizaçãoEnergética/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2017.

WANDER, Paulo Roberto et al. **Eficiência Energética - Um Estudo De Caso Na Indústria Moveleira**. In: Encontro Nacional De Engenharia De Produção, 27., 2007, Artigo. Foz do Iguaçu: ENEGEP, 2007. p. 1 - 9. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2007_TR650480_0355.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2014.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. (Jaraguá do Sul - SC). **Capacitores - Correção do Fator de Potência**. Jaraguá do Sul: WEG, 2009. 40 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2014. (1)

WEG AUTOMAÇÃO S.A. (Jaraguá do Sul - SC). **Manual para Correção do Fator de Potência**. Jaraguá do Sul: WEG, 2009. 40 p. Disponível em:

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2017. (2)

6. ANEXOS

ANEXO 1

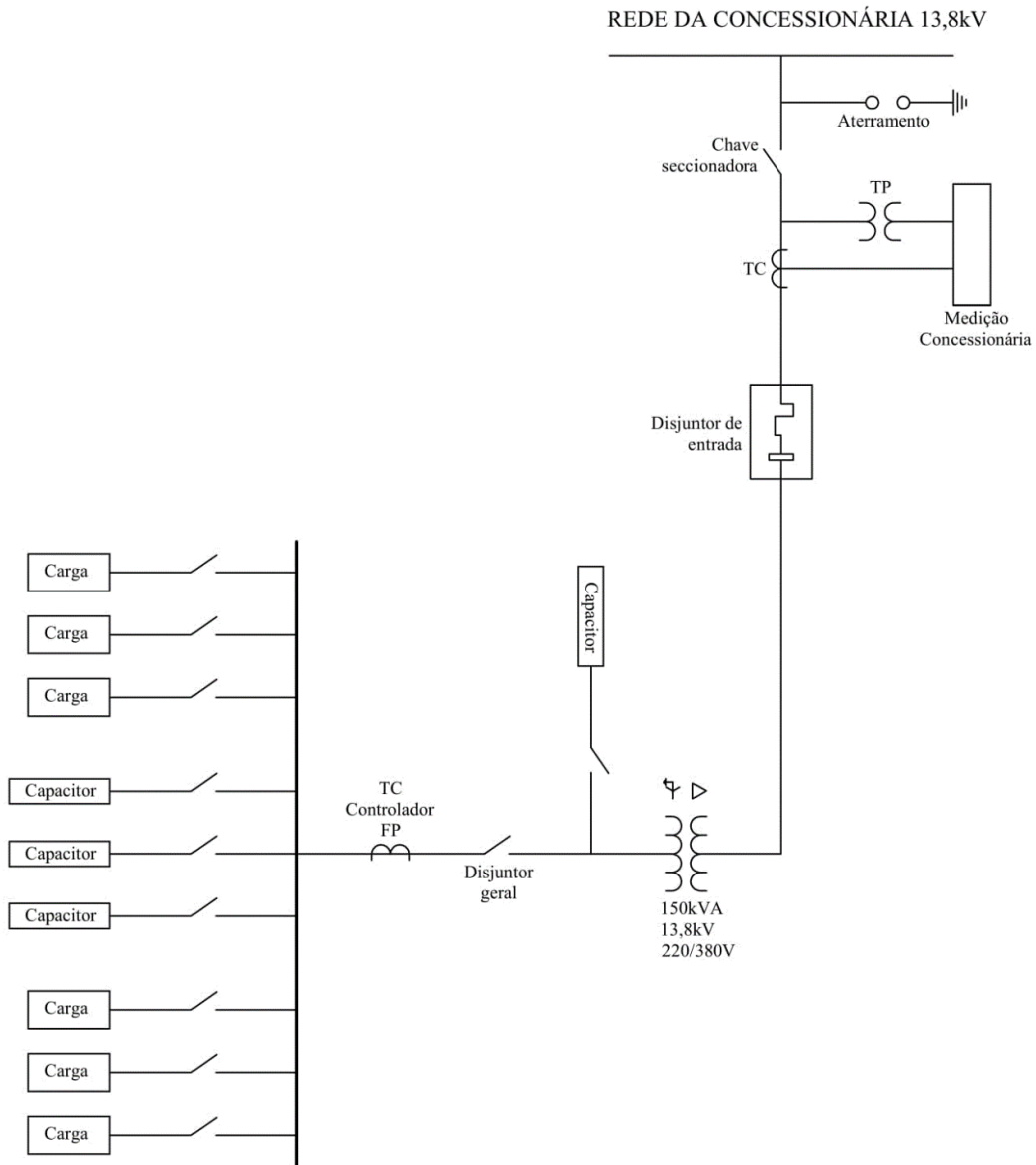
Correção em transformadores operando em vazio – Classe 15kV

| Transformador (kVA) | Corrente de excitação (I _o %) | kVAr | |
|------------------------|---|-----------|---------|
| | | Calculado | Nominal |
| 15 | 4,8 | 0,68 | 0,75 |
| 30 | 4,1 | 1,17 | 1 |
| 45 | 3,7 | 1,58 | 1,5 |
| 75 | 3,1 | 2,21 | 2 |
| 112,5 | 2,8 | 2,99 | 3 |
| 150 | 2,6 | 3,71 | 3,5 |
| 225 | 2,3 | 4,95 | 5 |
| 300 | 2,2 | 6,27 | 6 |
| 500 | 1,5 | 7,13 | 7,5 |
| 750 | 1,3 | 9,26 | 10 |
| 1000 | 1,2 | 11,4 | 10 |
| 1500 | 1 | 14,25 | 12,5 |

Obs.: Correção calculada para FP de 0,95. Fonte: WEG (2009) (2).

ANEXO 2

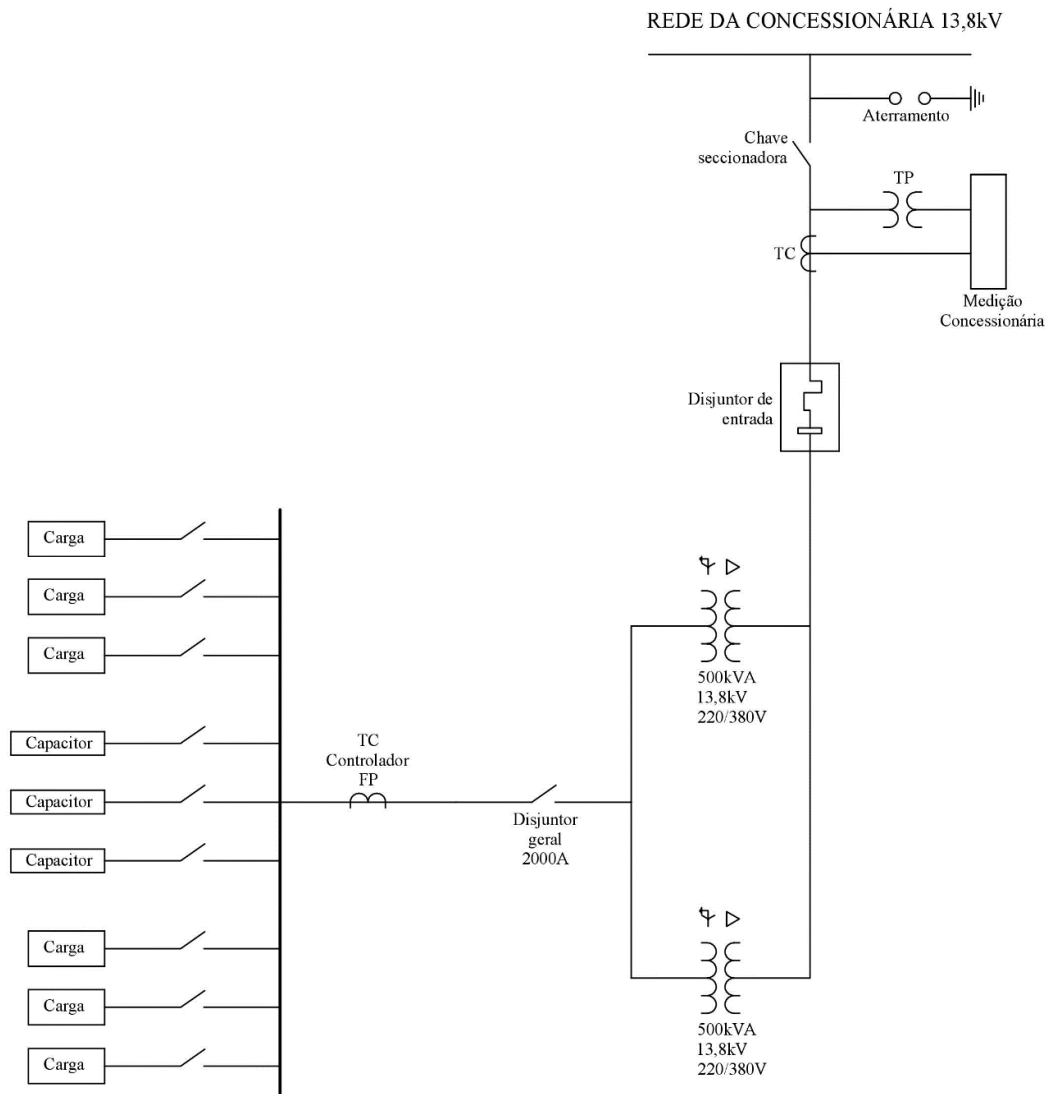
Diagrama unifilar da entrada de energia na fábrica até as cargas da indústria de Biodiesel.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nas instalações da indústria.

ANEXO 3

Diagrama unifilar da entrada de energia na fábrica até as cargas do Incubatório de frangos.



Fonte: Elaborado pelo autor com base nas instalações da indústria.