

Diego Marchi

**PROJETO E ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E
FINANCEIRA DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA
EM INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO
BANCOS DE CAPACITORES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
submetido ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Mauricio Valencia
Ferreira da Luz.

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Marchi, Diego

Projeto e estudo de viabilidade técnica e financeira da correção do fator de potência em indústria têxtil utilizando bancos de capacitores / Diego Marchi ; orientador, Mauricio Valencia Ferreira da Luz, 2019.

146 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Fator de potência. 3. Banco de capacitores. 4. Setor industrial. 5. Viabilidade técnica e financeira. I. Luz, Mauricio Valencia Ferreira da. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Diego Marchi

**PROJETO E ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E
FINANCEIRA DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM
INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO BANCOS DE
CAPACITORES**

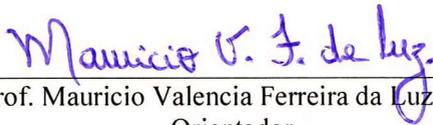
Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em
sua forma final, pela Banca Examinadora.

Florianópolis, 15 de julho de 2019.



Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, em
exercício

Banca Examinadora:



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Felipe Luis Probst.
Eletrosul Centrais Elétricas S.A.



Eng. Pedro Carvalho Silva Barcelos.
Mestrando PPGEEL - Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais, a base de tudo.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Joice e Lademir e à minha irmã, Larissa, pelo apoio e amor incondicionais. Em especial, aos meus pais, pela dedicação desmedida para me proporcionar esta conquista.

A esta instituição, Universidade Federal de Santa Catarina, e a todos os que com esta colaboram para a difusão de conhecimento e educação de qualidade.

Ao meu orientador, Professor Mauricio Valencia Ferreira da Luz, pelo apoio prestado no desenvolvimento deste trabalho.

À minha namorada, Daphine, que esteve sempre ao meu lado, me confortando nos momentos de incerteza e me incentivando a ser uma pessoa melhor.

Aos colegas de faculdade, com quem compartilhei os altos e baixos desta jornada.

Aos amigos da Los7, os quais, cada um à sua maneira, tornaram esta caminhada mais divertida.

Aos amigos de Gaspar, por todos os momentos de descontração no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os que tive o prazer de compartilhar pelo menos um momento desta jornada, meu muito obrigado.

*But you gotta stop and think about it...
to really get the pleasure about the complexity,
the inconceivable nature of Nature.*
(Richard Feynman)

RESUMO

O fator de potência é um índice que indica a eficiência na utilização da energia elétrica. Este índice é monitorado pelas concessionárias de energia elétrica e os consumidores industriais que apresentam um baixo fator de potência estão sujeitos a multas incidentes mensalmente nas faturas. O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia de projeto e um estudo de viabilidade técnica e financeira da correção de fator de potência utilizando bancos de capacitores. Para o desenvolvimento do estudo de caso, escolheu-se uma indústria do setor têxtil, onde foi projetado um sistema de correção do fator de potência fundamentado na caracterização da empresa, nos registros de consumo proveniente de faturas e relatórios de memória de massa, e em medições *in loco*. O sistema projetado, no entanto, não foi implementado devido a um sistema existente, similar àquele projetado. Foram coletados dados de consumo anteriores e posteriores à implementação do sistema existente, ocorrida em 11/2015. Também foram realizadas medições das grandezas elétricas com este sistema desligado e ligado, visando a análise das variáveis elétricas. No quesito financeiro, foi realizada a análise de viabilidade financeira da implementação do sistema projetado, considerando sua implementação em 11/2015. A instalação do sistema existente elevou o fator de potência durante todo o ciclo diário de operação da indústria, alterando a média mensal deste índice de 0,78 para 0,94. No âmbito financeiro, o investimento apresentou, em 10 anos, um VPL de R\$ 416.589,17, TIR de 1805% a.a. e um tempo de *Payback* Descontado de 5 meses. Portanto, a utilização de sistemas de correção de fator de potência por meio de bancos de capacitores, conforme metodologia de projeto exposta, é considerada tecnicamente e financeiramente viável.

Palavras-chave: Fator de potência. Banco de capacitores. Setor industrial. Viabilidade técnica e financeira.

ABSTRACT

Power factor is an index that indicates the efficiency in the use of electrical energy. This index is monitored by electricity utilities and industrial consumers presenting a low power factor are subject to monthly fines. The objective of this work is to present a design methodology and a technical and financial viability study of power factor correction using capacitor banks. For the development of the case study, a textile industry company was chosen, where a power factor correction system was designed based on the company characterization, consumption records from invoices and reports of mass memory, and on-site measurements. The designed system, however, was not implemented due to an existing system, similar to the one designed. Consumption data were collected from before and after the implementation of the existing system, which occurred on 11/2015. Measurements of the electrical parameters were also carried out with this system turned off and on, aiming the analysis of the electric variables. Regarding the financial matter, the financial viability analysis of the implementation of the designed system was carried out, considering its implementation in 11/2015. The installation of the existing system raised the power factor throughout industry's daily operating cycle, changing the monthly average of this index from 0.78 to 0.94. In the financial matter, the investment presented, in 10 years, an NPV of R\$ 416,589.17, IRR of 1805% pa. and a Discounted Payback time of 5 months. Therefore, the use of power factor correction systems by means of capacitor banks, according to the exposed design methodology, is considered technically and financially viable.

Keywords: Power factor. Capacitor banks. Industrial sector. Technical and financial viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tensão, corrente e potências instantâneas.....	33
Figura 2 - Triângulo das potências	34
Figura 3 - Tetraedro das potências	36
Figura 4 - Perdas percentuais em função do fator de potências..	40
Figura 5 - Queda de tensão em um circuito genérico	41
Figura 6 - Potência de transformação em função do fator de potências.....	42
Figura 7 - Períodos de medição e faturamento - Avaliação horária	49
Figura 8 - Períodos de medição e faturamento - Avaliação mensal	50
Figura 9 - Exemplo de fatura de energia elétrica - Celesc D.....	53
Figura 10 - Células capacitivas monofásicas (e) e trifásicas (d).	56
Figura 11 - Relação vetorial da potência ativa e potências reativas	57
Figura 12 - Níveis de tensão admissíveis em capacitores.....	60
Figura 13 - Símbolo para o limite superior da faixa de temperatura.....	61
Figura 14 – Locais de instalação de capacitores para correção do fator de potência.....	64
Figura 15 - Banco Automático de Capacitores.....	68
Figura 16 - Diagrama de ligação de um CAFP.....	69
Figura 17 - Curva do fator de potência de um motor em função do carregamento	73
Figura 18 – Potência reativa capacitiva para correção do fator de potência de transformadores classe 25 kV operando a vazio	75
Figura 19 – Circuito e impedância equivalente na ressonância série	78
Figura 20 - Circuito e impedância equivalente na ressonância paralela	79
Figura 21 - Disjuntores do tipo caixa moldada.....	82
Figura 22 - Contator para acionamento de capacitores.....	83
Figura 23 - Corrente transitória de energização de capacitores..	84
Figura 24 - Controlador Automático de Fator de Potência.....	85
Figura 25 - Diagrama trifilar de conexão dos reatores de dessintonia.....	86
Figura 26 - Catálogo para especificação de reatores de dessintonia.....	88
Figura 27 - Reator de dessintonia	88

Figura 28 - Diagrama unifilar geral da instalação	95
Figura 29 - Sistema existente - vista externa.....	97
Figura 30 - Sistema existente - vista interna	97
Figura 31 - Diagrama unifilar do sistema existente.....	98
Figura 32 - Potência aparente por fase	100
Figura 33 - Curva de carga da indústria em um dia típico de operação	105
Figura 34 - Diagrama unifilar do sistema proposto.....	116
Figura 35 - Faturamento de energia reativa excedente total - 11/2014-05/2019	117
Figura 36 - Faturamento de energia reativa total e fator e potência médio – 12/2014 - 11/2016	119
Figura 37 - Tarifa incidente sobre o consumo de energia reativa excedente	120
Figura 38 - Faturamento de energia reativa excedente anualizado	121
Figura 39 - Comparativo do fator de potência horário antes e depois da correção – 15 out 2015 / 15 dez 2015	124
Figura 40 - Fluxo de caixa descontado – 120 meses	131
Figura 41 - Fluxo de caixa acumulado – 120 meses	132
Figura 42 - Fluxo de caixa acumulado – 12 meses	133

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Resultados da análise de viabilidade financeira – 120	
meses	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de distorção harmônica de tensão.....	76
Tabela 2 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas de tensão nominal de 120 V a 69 kV	77
Tabela 3 – Valores comerciais para fatores de dessintonia	87
Tabela 4 - Tensão de linha no QGBT.....	101
Tabela 5 - Distorção harmônica de tensão.....	101
Tabela 6 - Distorção harmônica de corrente.....	102
Tabela 7 - Medições das variáveis elétricas - Caso 1	103
Tabela 8 - Medições das variáveis elétricas - Caso 2	103
Tabela 9 - Medições das variáveis elétricas - Caso 3	103
Tabela 10 - Medições das variáveis elétricas - Caso 4	104
Tabela 11 - Consumo reativo excedente total e fator de potência médio – 11/2014-10/2015	106
Tabela 12 – Máximas potências reativas capacitivas necessárias para adequação do fator de potência a 0,95.....	107
Tabela 13 - Potência reativa capacitiva necessária para adequação do fator de potência a 0,95	107
Tabela 14 – Valores estimados máximo, médio e mínimo de tensão de linha no barramento de baixa tensão	109
Tabela 15 – Possíveis valores de potência reativa do banco e respectivas ordens da frequência de ressonância.....	111
Tabela 16 - Faturamento de energia reativa total e fator e potência médio – 12/2014 - 11/2016	119
Tabela 17 - Custo de implementação do sistema proposto.....	122
Tabela 18 - Potência reativa do sistema existente e potência reativa projetada	123
Tabela 19 - Variação das grandezas elétricas com a correção do fator de potência – Caso 1	126
Tabela 20 - Variação das grandezas elétricas com a correção do fator de potência – Caso 2	126
Tabela 21 - Variação das grandezas elétricas com a correção do fator de potência – Caso 3	126
Tabela 22 - Variação das grandezas elétricas com a correção do fator de potência – Caso 4.....	126
Tabela 23 - Comparativo das variações medidas e teóricas dos parâmetros elétricos com a correção do fator de potência.....	128
Tabela 24 - Comparativo das variações medidas e teóricas da potência aparente com a correção do fator de potência considerando <i>Scorrigido</i>	129

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
BAC – Banco Automático de Capacitores
CAFP – Controlador Automático de Fator de Potência
Celesc D. – Celesc Distribuição S.A.
CODI – Comitê de Distribuição de Energia Elétrica
DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
Eq. – Equação
IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEEE – Institute of Electrical and Electronic Engineering
FER – Faturamento de Energia Reativa
FP – Fator de Potência
QGBT – Quadro Geral de Baixa Tensão
RMM – Relatório de Memória de Massa
TC – Transformador de Corrente
TIR – Taxa Interna de Retorno
TMA – Taxa Mínima de Atratividade
UC – Unidade Consumidora
UHE – Usina Hidroelétrica
VPL – Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
2	REFERENCIAL TEÓRICO	31
2.1	POTÊNCIA E FATOR DE POTÊNCIA	31
2.2	CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DE UM BAIXO FATOR DE POTÊNCIA	38
2.3	REGULAMENTAÇÃO E FATURAMENTO	42
2.3.1	Breve histórico	43
2.3.2	Grupos e modalidades tarifárias	44
2.3.3	Fator de potência e reativo excedente	47
2.3.3.1	Avaliação horária	48
2.3.3.2	Avaliação mensal	50
2.3.4	Apresentação da fatura	52
2.4	CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	54
2.4.1	O capacitor	55
2.4.1.1	Características elétricas nominais	57
2.4.1.2	Limites de operação	58
2.4.2	Benefícios da correção	61
2.4.3	Locais de instalação	63
2.4.4	Métodos de controle	66
2.5	BANCO AUTOMÁTICO DE CAPACITORES (BAC)	67
2.5.1	Metodologia de projeto	69
2.5.1.1	Levantamento do perfil de carga	70
2.5.1.1.1	<i>Empreendimentos em projeto</i>	70
2.5.1.1.2	<i>Empreendimentos em operação</i>	71
2.5.1.2	Dimensionamento do banco de capacitores	71
2.5.1.3	Aplicações específicas	73
2.5.1.4	Instalações com autogeração de energia	75
2.5.1.5	Harmônicas	76

2.5.2	Especificação de componentes	80
2.5.2.1	Células capacitivas.....	80
2.5.2.2	Proteção	81
2.5.2.3	Acionamento.....	82
2.5.2.4	Alimentação	84
2.5.2.5	Controle	84
2.5.2.6	Reatores de dessintonia.....	85
2.5.2.7	Sistema de controle de temperatura	89
2.6	CONCEITOS FINANCEIROS.....	90
3	ESTUDO DE CASO	93
3.1	OBJETO DE ESTUDO	94
3.1.1	Sistema existente	96
3.2	MÉTODOS DE LEVANTAMENTO DE DADOS.....	98
3.3	MEDIÇÕES <i>IN LOCO</i>	99
3.4	DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO.....	104
3.4.1	Banco Automático de Capacitores	107
3.4.2	Correção do transformador a vazio	112
3.4.3	Sistema proposto	113
3.5	CUSTOS.....	116
3.5.1	Histórico real.....	117
3.5.2	Projeto proposto.....	120
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	123
4.1	ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA.....	123
4.1.1	Dimensionamento.....	123
4.1.2	Consequências técnicas.....	125
4.2	ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA	130
4.2.1	Sistema existente	130
4.2.2	Sistema proposto	130
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
	REFERÊNCIAS.....	137

APÊNDICE A – LEVANTAMENTO DE CUSTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO	141
APÊNDICE B – LEVANTAMENTO DE CUSTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO – DEFLACIONDO PARA 10/2014.....	142
ANEXO A – TABELA DO FATOR MULTIPLICADOR PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	143
ANEXO B – POTÊNCIA MÁXIMA DOS CAPACITORES LIGADOS A MOTORES DE INDUÇÃO.....	144
ANEXO C – FICHA DE PROTEÇÃO DA UC	145
ANEXO D – CONTADORES CWM_C PARA MANOBRA DE	146
CAPACITORES (AC-6b).....	146

1 INTRODUÇÃO

A indústria brasileira em geral tem como um expressivo custo operacional a energia elétrica, podendo representar mais de 40% de seus custos de produção (FIRJAN, 2017). No entanto, a fatura de energia elétrica é composta por diversas parcelas, como o consumo de energia ativa, contratação de demanda, dentre outros. Uma destas parcelas diz respeito ao consumo de energia reativa excedente.

De acordo com Amorim (2008), devido à falta de instrução dos responsáveis pela análise financeira destas faturas e devido à ausência de clareza nos demonstrativos mensais por parte das concessionárias de energia elétrica, empresas que não contam com pessoal especializado em seu quadro ou com uma assessoria técnica estão sujeitas a pagar multas mensais decorrentes deste consumo, resultante de um baixo fator de potência da instalação.

O fator de potência é um valor que expressa a relação entre a energia útil, que realiza trabalho, e a energia total consumida; quanto mais próximo da unidade, mais eficientemente se dá o consumo de energia (SILVA, 2009). Além de acarretar em um custo extra desnecessário, ainda segundo Silva (2009), o baixo fator de potência tem consequências técnicas negativas, como a subutilização dos equipamentos e componentes elétricos da instalação, perdas na distribuição e queda no nível de tensão.

Entretanto, há diversos métodos possíveis para a correção do fator de potência de uma instalação, dentre eles a correção por meio da implementação de bancos de capacitores. Estes bancos suprem a energia reativa demandada pelas cargas, fazendo com que esta energia não seja mais fornecida e cobrada pela concessionária de energia elétrica. Além do benefício financeiro obtido, os problemas no rol técnico também são mitigados.

Dentre as técnicas disponíveis no mercado, a utilização de bancos de capacitores para a correção de fator de potência é a mais disseminada dentre os consumidores industriais e comerciais (MAMEDE FILHO, 2002). Ainda, segundo Silva (2009), esta técnica é, provavelmente, a mais atrativa em instalações de médio e grande porte.

Isto posto, o estudo e compreensão dos aspectos relacionados ao fator de potência, e sua correção, em instalações industriais é de grande importância para os gestores da indústria e para profissionais que desejam atuar na área de consultoria e assessoria no campo de instalações elétricas industriais.

Ademais, em um cenário global que demanda, cada vez mais, eficiência energética, a utilização maximizada da capacidade instalada, seja a nível de geração, transmissão, distribuição ou consumo, é essencial. O aperfeiçoamento no uso do sistema elétrico acarreta em benefícios para a sociedade como um todo.

Diante do exposto, apresenta-se relevante o estudo dos métodos de projeto e dos resultados obtidos com a correção de fator de potência em plantas industriais utilizando bancos de capacitores, tanto no âmbito técnico quanto no financeiro.

Portanto, procurou-se responder: como são elaborados os projetos e qual é a viabilidade técnica e financeira no emprego deste método de correção de fator de potência?

Desta maneira, o objetivo geral do presente trabalho é apresentar uma metodologia de projeto, assim como avaliar a viabilidade técnica e financeira na implementação desta solução.

Para tanto, foram delineados os seguintes objetivos específicos: expor a teoria e regulamentação acerca do fator de potência e da correção deste utilizando bancos de capacitores, incluindo as premissas para dimensionamento e especificação de sistemas de correção; realizar o estudo de caso de uma empresa do setor têxtil, dimensionando e especificando um sistema de correção de fator de potência por meio de bancos de capacitores e mensurando os resultados técnicos e financeiros obtidos; por fim, no tocante aos impactos técnicos, verificar a aptidão da utilização deste método de correção neste estudo de caso, enquanto no quesito de viabilidade financeira, realizar a análise do investimento, considerando os custos da implementação e as cobranças realizadas pela concessionária de energia elétrica.

A metodologia adotada é de finalidade básica estratégica, com objetivos descritivos e exploratórios, de abordagem qualitativa, utilizando o método hipotético dedutivo, via procedimentos de pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, estudo de caso, e pesquisa ação, no qual o pesquisador propõe ações e analisa o seu impacto sobre o objeto de estudo.

Parte-se da hipótese de que, no rol técnico, o método de correção de fator de potência adotado é adequado e os resultados técnicos expectáveis são verificados. Já no âmbito financeiro, o investimento deve apresentar viabilidade financeira, com retorno do investimento dentro de 12 meses.

O texto é dividido da seguinte maneira: no segundo capítulo é caracterizado o fator de potência e é explicitada a teoria básica acerca do assunto, ainda, são apresentadas as possíveis causas e consequências de

um baixo fator de potência. É também abordada a regulamentação pertinente e as premissas de medição e faturamento de energia reativa. Então, é exposta a solução que será proposta para o caso de estudo, a implementação de bancos de capacitores; são descritas suas fundamentações, características, resultados expectáveis, métodos de projeto e premissas de especificação de componentes. Por fim, são abordados os conceitos necessários à análise de viabilidade financeira de projetos.

O terceiro capítulo apresenta o estudo de caso de uma empresa do setor têxtil, no qual é elaborado um projeto de um sistema de correção de fator de potência utilizando o método de correção proposto no segundo capítulo. No entanto, devido à existência prévia de um sistema similar na instalação, o sistema projetado não é implementado. Primeiramente, são apresentados o objeto de estudo e os métodos de aquisição de dados, incluindo medições para dimensionamento e especificação do sistema e medições para verificação das consequências técnicas. Então, é realizado o levantamento das necessidades de projeto e é dimensionado e especificado um sistema de correção de fator de potência via bancos de capacitores. Ao final, são apresentados os resultados técnicos e financeiros da correção por meio do sistema existente e são projetados os resultados financeiros obtidos com a implementação do sistema projetado

No quarto capítulo, os dados e resultados levantados no capítulo anterior são condensados e é realizada uma análise dos mesmos. O dimensionamento do sistema existente é comparado com o dimensionamento ideal e as consequências técnicas deste sobre a instalação são confrontadas com o exposto em teoria. Por fim, é realizada a análise de viabilidade financeira da implementação do sistema existente e do projetado, levando-se em conta o custo de implementação e as cobranças aplicáveis por parte da concessionária de energia elétrica.

No capítulo cinco, os resultados técnicos prenunciados são verificados e comprova-se a viabilidade técnica e financeira da correção do fator de potência utilizando bancos de capacitores.

Portanto, este trabalho corrobora a aptidão da técnica apresentada como um método de correção de fator de potência e pode servir de embasamento aos empresários e profissionais da área que desejam adotar tal solução em seus projetos, interessados em uma utilização mais eficiente e menos onerosa da energia elétrica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 POTÊNCIA E FATOR DE POTÊNCIA

Objetivando um melhor entendimento do tema abordado neste trabalho, se justifica uma revisão da teoria referente à potência elétrica em circuitos de corrente alternada, assim como uma caracterização básica do fator de potência.

Um dos componentes dos sistemas elétricos são as cargas, juntamente com as fontes, linhas de transmissão, dentre outros; as cargas se caracterizam por demandar potência e absorver energia elétrica do sistema. Segundo Creder (2007), a energia elétrica absorvida por cargas alimentadas em corrente alternada pode ser decomposta em energia ativa e energia reativa.

De acordo com Creder (2007) e Monteiro (2009), a energia ativa, medida em kWh, é aquela convertida em energia útil, por exemplo energia térmica, luminosa ou cinética, e que realiza trabalho. Já a energia reativa, em kvarh, é empregada como energia magnetizante na manutenção de campos eletromagnéticos de equipamentos e não realiza trabalho, sendo intermediária na utilização de energia ativa.

A razão entre a energia ativa consumida (kWh) em um intervalo de tempo e este próprio intervalo resulta na demanda ativa média ou potência ativa, expressa em kW e representada pela letra P. Paralelamente, a razão entre a energia reativa (kvarh) absorvida em um intervalo e este próprio, resulta na demanda reativa média ou potência reativa, expressa em kvar e representada pela letra Q (COTRIM, 2008).

A composição da potência aparente pelas potências ativas e reativas pode ser entendida com base na abordagem senoidal das ondas de tensão e corrente de um circuito elétrico, conforme apresentado por Cotrim (2008). Em um circuito elétrico monofásico em corrente alternada a potência instantânea p , em Watts, se dá por:

$$p = u \times i \quad (1)$$

onde u é a tensão senoidal instantânea, em Volts, e i é a corrente senoidal instantânea, em Amperes. Estes valores instantâneos podem ser expressos pelas equações:

$$u = \sqrt{2} \times U \times \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

$$i = \sqrt{2} \times I \times \text{sen}(\omega t - \Phi) \quad (3)$$

onde, U e I são valores eficazes de tensão e corrente, respectivamente, ω é a frequência da rede em radianos por segundo e Φ é o ângulo de defasagem entre as ondas u e i , em radianos.

Substituindo as Eq. (2) e (3) na Eq. (1) e aplicando algumas identidades trigonométricas tem-se:

$$p = U \times I \times \cos(\Phi)(1 - \cos(2\omega t)) + U \times I \times \sin(\Phi)(\sin(2\omega t)) \quad (4)$$

Ou ainda, pode-se representar os termos fixos da Eq. (4) por:

$$P = U \times I \times \cos(\Phi) \quad (5)$$

$$Q = U \times I \times \sin(\Phi) \quad (6)$$

onde P é o valor eficaz da potência ativa (W), e Q é o valor eficaz da potência reativa (var).

Substituindo (5) e (6) na Eq. (4), tem-se:

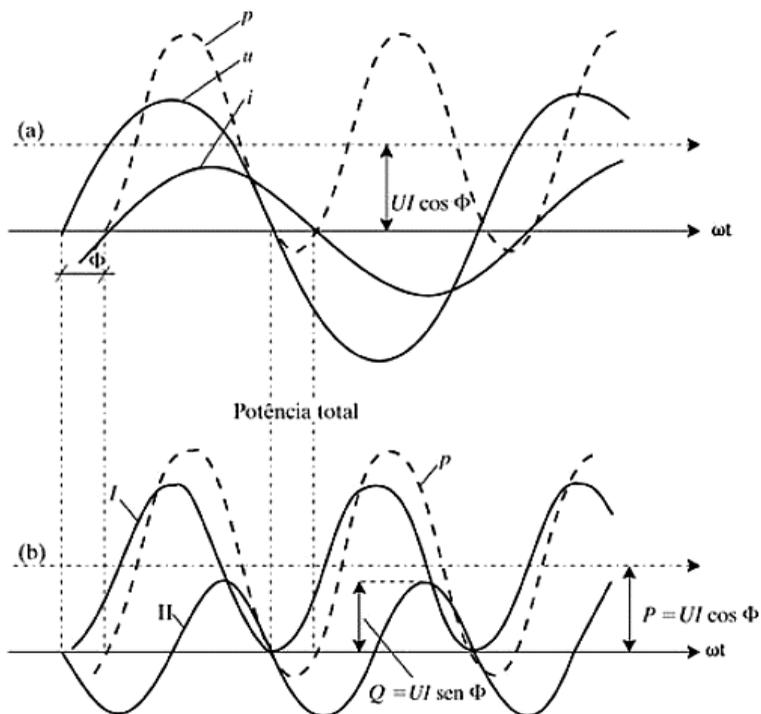
$$p = P \times (1 - \cos(2\omega t)) + Q \times (\sin(2\omega t)) \quad (7)$$

A Figura 1 apresenta dois gráficos distintos, porém, relacionados. O primeiro, (a), ilustra a relação entre a curva de potência aparente, dada pela Eq. (4), e as curvas de tensão e corrente, dadas pelas Eqs. (2) e (3), no eixo do tempo ωt . Já o gráfico (b) representa a decomposição da potência aparente – ou total – em seus componentes ativos e reativos, de acordo com a Eq. (7).

Nota-se na Figura 1, gráfico (a), que Φ representa o ângulo de defasagem entre as ondas de tensão e corrente, no caso, a corrente está atrasada em relação à tensão. Também, nota-se que o valor médio da potência aparente é igual a $U \times I \times \cos(\Phi)$.

Nota-se na Figura 1, gráfico (b), que Φ representa, também, o ângulo de defasagem entre a onda de potência aparente e a de potência ativa, já as componentes ativas e reativas da potência são defasadas em 90 graus. A potência ativa tem um valor médio igual ao valor médio da potência aparente, já a potência reativa tem o valor médio nulo.

Figura 1 – Tensão, corrente e potências instantâneas



Fonte: COTRIM, 2008

Assim, ainda segundo Cotrim (2008), a parcela de potência ativa é sempre fornecida da fonte para a carga, e absorvida por esta. Já a parcela de potência reativa é trocada entre a fonte e a carga, e circula no sistema elétrico, sem ser absorvida, apesar de ser comumente denominada potência reativa absorvida pela carga.

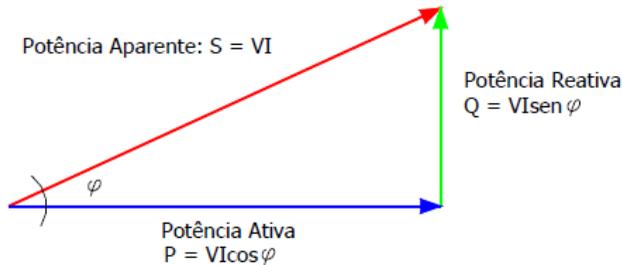
Monteiro (2009, p. 3) complementa:

Enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, “ocupando um espaço” no sistema elétrico, o qual poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa.

A relação entre as potências ativa, reativa e aparente em um sistema pode ser ilustrada pelo triângulo das potências, apresentado na

Figura 2, o qual utiliza a representação vetorial. A soma vetorial das potências ativa (P) e reativa (Q) resulta na potência total ou aparente (S) (CREDER, 2007).

Figura 2 - Triângulo das potências



Fonte: ISONI, 2004

De acordo com Cotrim (2008), a potência aparente, expressa em (kVA), é a potência utilizada na caracterização de equipamentos elétricos. Em sistemas trifásicos equilibrados, esta potência é definida de acordo com a Eq. (8) e são válidas as relações abaixo, sendo Φ o ângulo formado entre os vetores P e S , potência ativa e aparente, respectivamente:

$$S = \sqrt{3} \times U_L \times I_L \quad (8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

$$P = S \times \cos(\Phi) \quad (10)$$

$$Q = S \times \text{sen}(\Phi) \quad (11)$$

onde S é a potência aparente (VA), P é a potência ativa (W), Q é a potência reativa (var), U_L e I_L são a tensão (V) e corrente de linha (A).

Com base nestas definições, é possível então caracterizar o fator de potência. Segundo Mamede Filho (2002), o fator de potência, FP, é calculado pela equação:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{S \times \cos(\Phi)}{S} = \cos(\Phi) \quad (12)$$

Assim, fisicamente, o fator de potência é definido como o cosseno do ângulo de defasagem entre as ondas senoidais de tensão e de

corrente, $\cos(\Phi)$. Cotrim (2008) ressalta que o fator de potência deve ser acompanhado das palavras “indutivo”, no caso da corrente atrasada em relação a tensão ou “capacitivo”, caso a corrente esteja adiantada em relação a tensão, isto devido a $\cos(\Phi)$ resultar sempre positivo, independente do ângulo Φ .

Ou ainda, em termos de potência ativa e reativa, a Eq. (13) também é válida:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (13)$$

Analogamente, segundo ANEEL (2012) o fator de potência em um determinado intervalo de tempo pode ser calculado com base nas energias consumidas neste período, portanto:

$$FP = \frac{E_{ativa}}{\sqrt{E_{ativa}^2 + E_{reativa}^2}} \quad (14)$$

onde E_{ativa} e $E_{reativa}$ são as energias ativa (Wh) e reativa (varh) consumidas em um determinado intervalo.

Monteiro (2009) explica que o fator de potência representa a fração da potência total fornecida que é convertida em potência útil. Desta maneira, o fator de potência é um índice de eficiência do uso do sistema ou instalação elétrica. Valores próximos a unidade simbolizam uso eficiente do sistema, enquanto valores próximos a zero demonstram mau aproveitamento deste.

As definições apresentadas previamente neste capítulo são válidas para um sistema puramente senoidal, no qual as ondas de tensão e corrente existem somente na frequência fundamental, 60 Hz, no caso do sistema elétrico brasileiro. No entanto, de acordo com Cotrim (2008), atualmente as instalações elétricas contam amplamente com cargas não lineares. As correntes drenadas por estas cargas possuem, além da componente fundamental, outras componentes em frequências múltiplas da fundamental, as denominadas harmônicas.

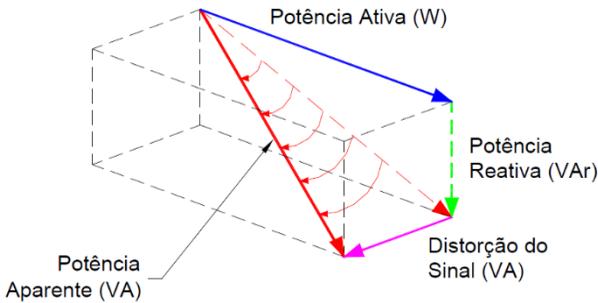
A corrente eficaz demandada neste caso, integrada pelas componentes fundamental e harmônicas, é definida pela Eq. (15) (COTRIM, 2008). Devido às contribuições das harmônicas, tanto a corrente como a potência aparente se tornam superiores aos valores calculados considerando-se somente a frequência fundamental.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{hi}^2} \quad (15)$$

onde I_{rms} é a corrente eficaz e I_{hi} é a componente de corrente harmônica de ordem i .

Portanto, na presença de cargas não lineares e da consequente distorção harmônica, as grandezas elétricas são acrescidas de um componente correspondente a esta distorção. Assim, segundo Isoni (2004), adiciona-se uma terceira dimensão ao triângulo das potências, resultando no tetraedro das potências, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Tetraedro das potências



Fonte: ISONI, 2004

Nestas condições, de acordo com Cotrim (2008), a relação entre as variáveis passa a ser conforme apresentado a seguir:

$$S' = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (16)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (17)$$

onde o componente D representa a potência de distorção demandada pela instalação. Sendo a relação $FP = P/S$ ainda válida, tem-se:

$$P = S' \times \cos(\Phi) \quad (18)$$

$$S = S' / \cos(\lambda) \quad (19)$$

$$FP = \frac{S' \times \cos(\varphi)}{S'/\cos(\lambda)} = \cos(\varphi) \times \cos(\lambda) \quad (20)$$

Portanto, sendo o fator $\cos(\lambda)$ invariavelmente inferior a 1, o fator de potência calculado levando em consideração a potência de distorção é inferior ao fator de potência calculado para sistemas considerados puramente senoidais.

Para Isoni (2004), na presença de potência de distorção, o fator de potência pode ser expresso por duas grandezas distintas: fator de potência real e fator de potência de deslocamento. O fator de potência real é a razão entre a potência ativa correspondente a todas as harmônicas presentes e a potência aparente total da instalação, conforme Eq. (20). Já o fator de potência de deslocamento considera apenas a defasagem das ondas de tensão e corrente na frequência fundamental, conforme Eq. (12). Não havendo distorção harmônica em determinado sistema, o fator de potência real e o fator de potência de deslocamento são equivalentes.

Ainda, segundo WEG (2009) a relação entre o fator de potência real e o fator de potência de deslocamento pode ser expressa Eq. (21), onde THD é a distorção harmônica total de corrente, calculada conforme a Eq. (22).

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \times \cos(\Phi) \quad (21)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum(I_{h,ef}^2)}}{I_{1,ef}} \quad (22)$$

onde $I_{h,ef}$ é o valor eficaz da corrente harmônica de ordem “h” e $I_{1,ef}$ é o valor eficaz da corrente na frequência fundamental.

Conclui-se que, em função do conteúdo harmônico de uma carga, a obtenção do fator de potência próximo da unidade requer um tratamento especial, não somente injetando energia reativa, mas também filtrando algumas harmônicas presentes (COTRIM, 2008, p. 424).

2.2 CAUSAS E CONSEQUÊNCIAS DE UM BAIXO FATOR DE POTÊNCIA

Conforme equacionado no capítulo anterior, um baixo fator de potência decorre de uma potência ativa de pequena magnitude perante determinada potência aparente; ainda, uma vez que a potência aparente é resultante da soma vetorial das potências ativa e reativa, pode-se analogamente afirmar que um baixo fator de potência decorre de uma alta demanda de potência reativa perante uma pequena demanda de potência ativa.

As demandas de potência de um sistema são dependentes das características das cargas presentes. Mamede Filho (2002) afirma que a potência reativa é demandada por aparelhos (cargas) normalmente providas de bobinas ou enrolamentos ou, então, que tenham como princípio de funcionamento a formação de arcos elétricos.

Os autores CODI (2004), Cotrim (2008), Creder (2007), Isoni (2004), Mamede Filho (2002) e Monteiro (2009) discorrem sobre as possíveis causas de um baixo fator de potência em uma instalação:

- **Motores de indução operando a vazio ou superdimensionados:** os motores de indução demandam uma potência reativa praticamente constante, independente da carga mecânica aplicada ao eixo, já a demanda de potência ativa é proporcional esta carga; assim, quanto menor é a carga mecânica, menor é a demanda de potência ativa e menor é o fator de potência.
- **Motores de indução superdimensionados:** similarmente ao caso anterior, um motor com potência nominal muito superior à carga mecânica acoplada demandará uma potência ativa pequena perante a demanda reativa, resultando em um baixo fator de potência.
- **Grande quantidade de motores de indução de pequeno porte:** tais equipamentos podem apresentar dificuldades para seu correto dimensionamento em função da carga acoplada; são, às vezes, superdimensionados para atender ao torque de partida elevado de determinadas cargas. Ainda, em alguns casos, devido as suas características de construção, estes não apresentam fator de potências satisfatório mesmo em condições de plena carga.

- **Transformadores operando a vazio ou com pequena carga:** do mesmo modo que os motores de indução, os transformadores demandam uma potência reativa relativamente constante para manutenção dos seus campos magnéticos; em situações de pequeno carregamento, nas quais a potência ativa no secundário é pequena, a potência reativa torna-se relativamente grande, ocasionando um fator de potência baixo.
- **Lâmpadas de descarga com reatores de baixo FP:** lâmpadas de descarga, como vapor de sódio, vapor mercúrio e fluorescentes, necessitam de reatores para seu funcionamento. Estes reatores (eletromagnéticos) são dotados de bobinas que demandam energia reativa, acarretando em um baixo fator de potência. Há reatores considerados de alto fator de potência, que contam com capacitores associados internamente para fornecimento local da energia reativa necessária.
- **Nível de tensão acima do normal:** a potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão aplicada à carga, já, como citado anteriormente, a potência ativa depende da carga mecânica solicitada. Assim, um aumento no nível de tensão acarreta no aumento da potência reativa, ocasionando um baixo fator de potência.
- **Máquinas de solda a arco:** tais máquinas são geradoras de distorções harmônicas, uma vez que a tensão e correntes dos arcos elétricos (que são o princípio de funcionamento destas máquinas) possuem características não lineares. Estas distorções harmônicas implicam em um baixo fator de potência real.
- **Fornos a arco e fornos de indução eletromagnética:** os fornos a arco apresentam as mesmas características das máquinas de solda a arco; já fornos de indução, evidentemente, possuem características indutivas e demandam tal energia reativa indutiva.
- **Equipamentos eletrônicos (eletrônica de potência):** equipamentos como retificadores, inversores e fontes chaveadas, devido aos seus princípios de operação são fonte de distorção harmônica, estas, causadores de um baixo fator de potência real.

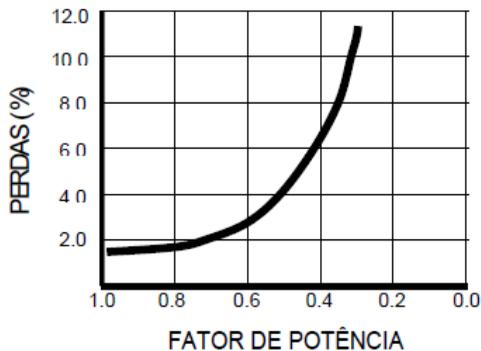
Ainda, o baixo fator de potência pode ser causado pelo incorreto dimensionamento ou mal funcionamento de sistemas previamente instalados visando a elevação do fator de potência (SILVA, 2009).

No tocante às consequências técnicas advindas do baixo fator de potência, Monteiro (2009) explica que a elevação na potência reativa acarreta na elevação da potência aparente que, por consequência, resulta na elevação da corrente total que circula na instalação elétrica; esta elevada corrente circulando pode levar a sobrecargas, prejudicar a estabilidade do sistema e trazer outros inconvenientes, conforme expõem CODI (2004), Monteiro (2009) e WEG (2009).

Perdas na rede: As perdas de energia elétrica nos condutores na forma de calor são regidas pela Lei de Joule, sendo iguais ao quadrado da corrente circulante multiplicado pela resistência do condutor. Assim, um baixo fator de potência resulta em uma maior corrente aparente, esta corrente gera perdas elevadas na rede e, conseqüentemente, provoca o aquecimento de condutores e equipamentos.

A Figura 4 ilustra o aumento nas perdas percentuais com a redução do fator de potência da instalação.

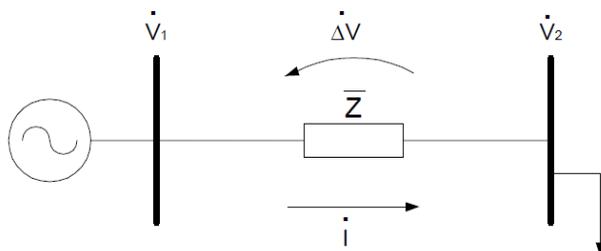
Figura 4 - Perdas percentuais em função do fator de potências



Fonte: CODI, 2004

Quedas de tensão: A corrente elétrica, majorada pelo baixo fator de potência, provoca quedas de tensão ao longo da instalação devido às impedâncias das linhas. Este efeito é agravado tanto quanto maior seja a corrente solicitada, podendo causar funcionamento indesejado das cargas ou até interrupção total do fornecimento. A Figura 5 ilustra a queda de tensão em um circuito genérico e as Eqs. (23) e (24) relacionam as variáveis apresentadas:

Figura 5 - Queda de tensão em um circuito genérico



Fonte: CODI, 2004

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - \Delta \dot{V} \quad (23)$$

$$\Delta \dot{V} = \bar{Z} \times \dot{I} \quad (24)$$

onde $\Delta \dot{V}$ é a queda de tensão, \dot{V}_1 e \dot{V}_2 são as tensões na fonte e na carga, respectivamente, \bar{Z} é a impedância da linha e \dot{I} a corrente no circuito.

Subutilização da capacidade instalada: Em uma instalação elétrica, a circulação de elevados níveis de energia reativa ocupa parte da capacidade da mesma, sem produzir trabalho útil. Esta parcela da capacidade, em uma instalação com alto fator de potência, poderia ser utilizada para transporte de energia ativa. Sendo assim, um baixo fator de potência implica em ineficiência na utilização da instalação.

Também, uma vez que equipamentos e componentes elétricos são dimensionados com base nas grandezas de potência e corrente aparentes, ao elevar a magnitude destas grandezas é necessário sobredimensionar os equipamentos, aumentando-se o custo de implementação dos sistemas. Por fim, uma instalação sobrecarregada devido ao baixo fator de potência pode demandar altos investimentos de expansão para a adição de cargas, fato que poderia ser evitado com um alto fator de potência.

A Figura 6 exemplifica a ineficiência advinda de um baixo fator de potência, relacionando as diferentes potências de transformação necessárias para atendimento a uma mesma carga ativa, em cenários com diferentes valores de fator de potência.

Figura 6 - Potência de transformação em função do fator de potências

POTÊNCIA ÚTIL ABSORVIDA (kW)	FATOR DE POTÊNCIA	POTÊNCIA DO TRANSFORMADOR (kVA)
800	0,50	1.600
	0,80	1.000
	1,00	800

Fonte: CODI, 2004

Ônus financeiro: Ademais, além dos problemas ocasionados no âmbito técnico, há consequências financeiras advindas de um baixo fator de potência devido à regulamentação aplicada. Consumidores que não atendam a determinado patamar mínimo de fator de potência estão sujeitos a cobranças por parte das concessionárias de energia elétrica, conforme detalhado na próxima seção.

2.3 REGULAMENTAÇÃO E FATURAMENTO

Os tópicos anteriores expuseram o assunto fator de potência, suas causas e consequências, ilustrando as características deste quando abordado na perspectiva de uma instalação elétrica, um parque fabril ou uma grande instalação industrial, por exemplo. No entanto, as implicações técnicas advindas de um baixo fator de potência estendem-se à toda a cadeia de fornecimento de energia elétrica, ou seja, geração, transmissão, distribuição e consumo.

Para os agentes do sistema elétrico, as vantagens obtidas com um alto fator de potência das cargas (consumidores) são consequências relativas à não necessidade de geração e transmissão de valores elevados de potência reativa. Dentre estas vantagens, pode-se citar: a redução das perdas no sistema, o aumento da capacidade de fornecimento de potência ativa para atendimento a novos consumidores e a diminuição no custo de geração (WEG, 2009).

Amorim (2008) exemplifica que, considerando a demanda do sistema elétrico brasileiro igual a 62.000 MW, a elevação do fator de potência de 0,92 para unitário acarretaria em uma liberação na geração de 5.391 MVA, equivalente a uma UHE de Belo Monte.

Portanto, visando mitigar os problemas técnicos ocasionados pelo baixo fator de potência, adotaram-se medidas públicas de maneira a normatizar o consumo de energia reativa. Com base em ANEEL (2012)

e Vieira (2012) é apresentado um breve histórico da regulamentação acerca do assunto.

2.3.1 Breve histórico

A regulamentação referente ao fornecimento de energia reativa no Brasil iniciou em 1966, com a publicação do Decreto nº 59.414, o qual estipulava o fator de potência indutivo médio em 0,90 para consumidores do serviço de transmissão e 0,85 para os demais consumidores. Caso o fator de potência médio verificado fosse constatado inferior ao limite, o faturamento se dava aplicando a respectiva tarifa sobre o produto do consumo total mensurado e do fator de potência referência, dividido pelo fator de potência médio verificado.

Com a publicação do Decreto nº 62.724 em 1968, com nova redação em 1975 pelo Decreto nº 75.887 em 1975, adotou-se o fator de potência referência de 0,85 para todas as unidades consumidoras.

Em 1992, por meio do Decreto nº 479, é novamente alterada a redação do Decreto nº 62.724. É transferida ao DNAEE – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, atual ANEEL – a competência de estabelecer os limites mínimos do fator de potência indutivo e capacitivo a serem adotados pelo sistema elétrico brasileiro, assim como determinar a forma de medição e os critérios de faturamento da energia reativa excedente.

Ainda em 1992, por meio da Portaria nº 85 o DNAEE determina em 0,92 o limite mínimo do fator de potência, estabelece a medição horária de reativos para consumidores com tarifa binômica e possibilita o faturamento da energia reativa capacitiva excedente durante a madrugada, para alguns consumidores.

Com a publicação da Resolução ANEEL nº 456/2000, a regulamentação existente relativa ao faturamento por baixo fator de potência passou a integrar as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Foram revogadas as portarias do DNAEE referentes ao assunto, no entanto, os critérios de faturamento permaneceram inalterados.

Em 2010 foi aprovada a Resolução ANEEL nº 414/2010, nesta, foi incorporada a regulamentação prevista na Resolução nº 456/2000, que foi revogada.

Em 2013 foi publicada a resolução normativa ANEEL nº 569, a qual dá nova redação à ANEEL nº 414 e estabelece que as cobranças referentes ao baixo fator de potência são aplicáveis somente a

consumidores pertencentes ao grupo A, fundamentalmente os consumidores atendidos em média tensão.

Por fim, a resolução ANEEL nº 414/2010 é a resolução atualmente em vigor que “estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada” (ANEEL, 2010, p. 1). Esta resolução abrange, além de diversos outros assuntos, as diretrizes para a medição e faturamento relativos ao fator de potência e ao reativo excedente.

No entanto, previamente à apresentação da regulamentação acerca do fator de potência propriamente dito, é conveniente que sejam expostas as definições dos grupos e subgrupos que caracterizam as unidades consumidoras, assim como as modalidades tarifárias aplicáveis a estas unidades.

Vale ressaltar que diversas outras resoluções foram publicadas alterando o conteúdo da Resolução nº 414/2010, portanto, o exposto adiante se baseia na última versão disponível da referida resolução.

2.3.2 Grupos e modalidades tarifárias

A Resolução nº 414 (ANEEL, 2010) define os grupos e subgrupos em que são enquadradas as unidades consumidoras conectadas ao sistema elétrico brasileiro, sendo a divisão feita em dois grandes grupos, Grupo A e Grupo B.

O Grupo A compreende as unidades consumidoras com fornecimento de energia elétrica em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou ainda, aquelas atendidas a partir de sistema de distribuição subterrâneo em baixa tensão. Este grupo é caracterizado pela aplicação da tarifa binômia e é subdividido em subgrupos, de acordo com o nível de tensão de fornecimento, a saber:

- a) subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV;
- b) subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV;
- c) subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV;
- d) subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV;
- e) subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV; e

f) subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição (ANEEL, 2010, p. 5).

O Grupo B é composto pelas unidades atendidas em tensão inferior a 2,3 kV. É caracterizado pela aplicação de tarifação monômnia e subdividido em subgrupos de acordo com a finalidade do fornecimento: residencial, rural, demais classes e iluminação pública.

A referida resolução também trata das modalidades tarifárias, definidas como o “conjunto de tarifas aplicáveis às componentes de consumo de energia elétrica e demanda de potência ativas” (ANEEL, 2010, p. 6). As modalidades definidas são: convencional monômnia e binômnia, horária branca, azul e verde.

- a) modalidade tarifária convencional monômnia: aplicada às unidades consumidoras do grupo B, caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica, independentemente das horas de utilização do dia;
- b) modalidade tarifária horária branca: aplicada às unidades consumidoras do grupo B, exceto para o subgrupo B4 e para as subclasses Baixa Renda do subgrupo B1, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia;
- c) modalidade tarifária convencional binômnia: aplicada às unidades consumidoras do grupo A caracterizada por tarifas de consumo de energia elétrica e demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia;
- d) modalidade tarifária horária verde: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia, assim como de uma única tarifa de demanda de potência; e
- e) modalidade tarifária horária azul: aplicada às unidades consumidoras do grupo A, caracterizada por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia (ANEEL, 2010, p. 6).

O enquadramento das unidades consumidores nas respectivas modalidades tarifárias se dá de acordo com o artigo 57 (ANEEL, 2010, p. 53):

§ 1º Pertencentes ao grupo A:

I – na modalidade tarifária horária azul, aquelas com tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV;

II – na modalidade tarifária horária azul ou verde, de acordo com a opção do consumidor, aquelas com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada igual ou superior a 300 kW; e
III – na modalidade tarifária convencional binômia, ou horária azul ou verde, de acordo com a opção do consumidor, aquelas com tensão de fornecimento inferior a 69 kV e demanda contratada inferior a 300 kW.

§ 2º Pertencentes ao grupo B:

I – na modalidade tarifária convencional monômia, de forma compulsória e automática para todas as unidades consumidoras; e

II – na modalidade tarifária horária branca, de acordo com a opção do consumidor.

Ainda, observando-se alguns critérios, como “a soma das potências nominais dos transformadores for igual ou inferior a 112,5 kVA” (ANEEL, 2010, p. 72), o artigo 100 prevê que unidades consumidoras pertencentes ao grupo A possam optar pela aplicação da tarifa do grupo B.

Vale ressaltar que a modalidade tarifária convencional binômia não é mais válida a partir do terceiro ciclo de revisão tarifária periódica (3CRTP), ocorrido entre janeiro de 2011 a dezembro de 2014 (ANEEL, 2011), os consumidores até então enquadrados nesta modalidade migraram para as modalidades horária verde ou horária azul.

A diferenciação das tarifas de acordo com as horas de utilização dos dias, para as tarifas horárias, implica em tarifas diferentes para os períodos de horário ponta, fora ponta e, para o grupo B, intermediário. No entanto esta diferenciação não é praticada nos finais de semanas e feriados nacionais, nestes dias as 24 horas são consideradas “fora ponta”.

O horário de ponta é definido como um período de 03 horas consecutivas, determinado pela distribuidora de acordo com a curva de

carga do seu sistema elétrico, sendo este o horário no qual o sistema apresenta maior carregamento. Já o horário intermediário é definido como uma hora imediatamente anterior e uma hora imediatamente posterior ao horário de ponta, aplicado para o grupo B. O horário fora ponta é o período complementar ao horário de ponta e, para o grupo B, horário intermediário.

2.3.3 Fator de potência e reativo excedente

Uma vez definidos os grupos e modalidades tarifárias, são apresentadas as premissas para medição e faturamento referentes ao fator de potência. Além de promover o uso racional da energia e liberação do sistema elétrico, a medição e faturamento de energia reativa excedente visa a “criação de condições para que os custos de expansão do sistema elétrico nacional sejam distribuídos para a sociedade de forma mais justa” (MAMEDE FILHO, 2002, p. 151).

A ANEEL 414/2010 define o fator de potência como: “razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período especificado” (ANEEL, 2010, p. 4). Os artigos desta resolução que abrangem o tema são: Art. 76, 95, 96 e 97.

O artigo 76 determina que, em unidades consumidoras pertencentes ao grupo A, a verificação do fator de potência para fins de faturamento é obrigatória e deve ser realizada por meio de medição permanente. Já unidades consumidoras pertencentes ao grupo B não devem ser oneradas pelo excedente de reativos resultante de um baixo fator de potência.

Já o artigo 95 estabelece o denominado “fator de potência de referência (f_R)”, indutivo ou capacitivo, no valor de 0,92. Este é o índice mínimo a ser verificado nas unidades consumidoras pertencentes ao grupo A a fim de evitar ônus referentes ao reativo excedente. Ainda, o artigo 95 ressalta que as cobranças referentes a reativos são aplicáveis também a consumidores do grupo A que optarem por faturamento do grupo B (tarifação convencional).

Considerando-se a definição de fator de potência e o respectivo limite mínimo estabelecido em 0,92, a legislação permite o consumo de 0,435 kvarh para cada kW consumido, sem acréscimo no faturamento (MAMEDE FILHO, 2002).

A avaliação para faturamento de reativo excedente pode ser realizada de duas maneiras distintas: avaliação horária e mensal. Na avaliação horária, o fator de potência é calculado com base nos valores

de consumo de energia ativa e reativa de cada intervalo de uma hora durante todo o ciclo de faturamento. Já a avaliação mensal é realizada com base no consumo de energia ativa e reativa total durante o ciclo completo de faturamento (MAMEDE FILHO, 2002).

Seja a avaliação mensal ou horária, o cálculo do fator de potência pode ser realizado pela equação apresentada abaixo (CREDER, 2007), em concordância com as definições em [2.1](#):

$$FP = \cos \left(\arctg \left(\frac{E_r}{E_a} \right) \right) \quad (25)$$

onde E_r e E_a são as energias reativa (varh) e ativa (wh) consumidas no intervalo de tempo considerado.

Os métodos de apuração e faturamento do consumo e demanda de reativo excedente em consumidores com tarifação horária e mensal são estabelecidos pelos artigos 96 e 97, respectivamente.

2.3.3.1 Avaliação horária

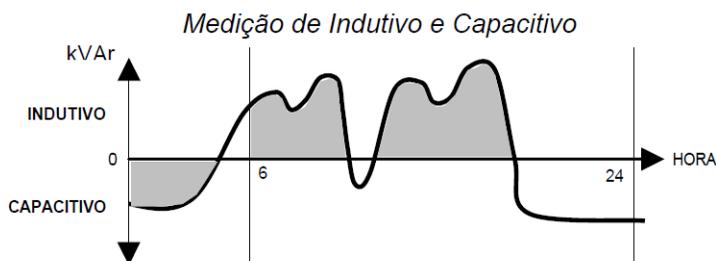
Nesta situação, são avaliados tanto o fator de potência indutivo quanto o capacitivo, de acordo com o período do dia, em intervalos de uma hora ao longo de todo o ciclo de faturamento.

O carregamento do sistema elétrico é variável ao longo do dia, fundamentalmente com baixo carregamento durante a madrugada e com predominância de cargas indutivas durante o restante do dia. Desta maneira, qualquer injeção de reativo capacitivo durante o período de alto carregamento é benéfica ao sistema, analogamente, o acréscimo de reativo indutivo na madrugada também é benéfico ao sistema (MONTEIRO, 2009).

Portanto, a Resolução nº 414/2010 define que no período de 06 horas consecutivas compreendido entre 23:30 e 06:30, definido a critério da distribuidora, a medição deve avaliar somente o fator de potência capacitivo, enquanto no período diário complementar deve ser avaliado o fator de potência indutivo.

A Figura 7 ilustra os períodos de medição e faturamento de reativos, considerando a avaliação horária e supondo o período de faturamento de reativo capacitivo das 00:00 às 06:00.

Figura 7 - Períodos de medição e faturamento - Avaliação horária



Fonte: CODI, 2004

Portanto, para consumidores que possuem equipamentos de medição apropriados para avaliação horária do fator de potência, o faturamento é definido pelas expressões (ANEEL, 2010):

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

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

onde:

E_{RE} = valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “fR”, 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 [...];

VR_{ERE} = valor de referência equivalente à tarifa de energia “TE” da bandeira verde 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 “fR” 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;

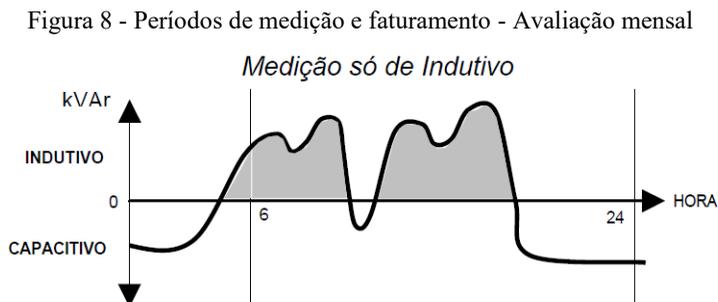
p = indica posto tarifário ponta ou fora de ponta para as modalidades tarifárias horárias ou período de faturamento para a modalidade tarifária convencional binômia;

$n1$ = 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.

2.3.3.2 Avaliação mensal

Caso a unidade consumidora não possua equipamento adequado para avaliação horária do fator de potência, o mesmo é realizado com base nas grandezas mensais, conforme Eqs. (28) e (29). Nesta situação, é avaliado somente o fator de potência indutivo, durante todo o período do ciclo de faturamento (ANEEL, 2010). A Figura 8 ilustra os períodos de medição e faturamento para esta situação.



Fonte: CODI, 2004

Para unidades consumidoras do grupo A optantes pela aplicação da fatura do grupo B, a avaliação do fator de potência também deve ser feita de maneira mensal (MAMEDE FILHO, 2002).

$$E_{RE} = EEAM \times \left(\frac{f_R}{f_M} - 1 \right) \times VR_{ERE} \quad (28)$$

$$D_{RE} = \left(PAM \times \frac{f_R}{f_M} - PAF \right) \times VR_{DRE} \quad (29)$$

onde:

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

$EEAM$ = montante de energia elétrica ativa medida durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh);

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

f_M = fator de potência indutivo médio da unidade consumidora, calculado para o período de faturamento;

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

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

PAM = demanda de potência ativa medida durante o período de faturamento, em quilowatt (kW);

PAF = demanda de potência ativa faturável no período de faturamento, em quilowatt (kW); e

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.

2.3.4 Apresentação da fatura

A compreensão da forma como é cobrada a energia elétrica e como são calculados os valores apresentados nas faturas de energia elétrica, emitidas mensalmente pelas concessionárias de energia elétrica, é fundamental para a tomada de decisão em relação a projetos de eficiência energética (ELETROBRÁS, 2011, p. 7).

Segundo Amorim (2008), os médios e grandes consumidores realizam a correção do fator de potência pois estas empresas dispõem de mão de obra especializada, própria ou terceirizada. No entanto, os consumidores de menor porte não executam a correção do fator de potência principalmente pela falta de clareza nas faturas de energia elétrica.

Os ônus referentes ao baixo fator de potência são apresentados sob diversos nomes técnicos que descaracterizam a sua condição de multa e disfarçam o fato de que este valor poderia não ser cobrado caso o fator de potência estivesse adequado.

Amorim (2008) lista alguns exemplos de nomenclaturas utilizadas pelas concessionárias para a cobrança relativas ao baixo fator de potência das unidades consumidoras:

- a) AES – Eletropaulo: Consumo Reativo Excedente e Demanda Reativa Excedente
- b) Light: Energia Reativa Excedente e Demanda Reativa Excedente
- c) CPFL Energia: FER e FDR
- d) COPEL: UFER e UFDR.

É possível observar que nenhuma destas nomenclaturas explicita a característica de multa da referida cobrança e também não relaciona as mesmas ao termo “fator de potência”, fazendo com que consumidores hipossuficientes não compreendam a natureza destas cobranças.

A Figura 9 apresenta um exemplo de fatura de energia elétrica da concessionária Celesc Distribuição.

Figura 9 - Exemplo de fatura de energia elétrica - Celesc D.

NOTA FISCAL/CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA - SÉRIE ÚNICA			
COD FISCAL OP: 5.257 5.949		GRUPO A4	10/2015 - 000.002.788.967
EMISSION: 20/10/2015		FAT-01-20151762566440-50	
APRESENTAÇÃO: 23/10/2015		REFERÊNCIA: 10/2015	
Nº DA UNIDADE CONSUMIDORA 25612957		VENCIMENTO 01/11/2015	
ATENDIMENTO AO CLIENTE LIGUE 0800 480120		CONSUMO TOTAL FATURADO 54.721 kWh	
		VALOR ATÉ O VENCIMENTO R\$ 40.954,31	
Dados do Faturamento	Faturado	Tarifa (R\$)	Valor (R\$)
Consumo Ponta	1,963	1,551905	3,046,39
Consumo Fora Ponta	52,758	0,461019	24,322,46
Energia Reat Exc P ¹	1,509 ²	0,371915 ³	⁴ 561,22
Energia Reat Exc Fp	12,251	0,371930	4,556,52
Demanda F.Pta	340	13,045941	4,435,62
Adicional Band. Vermelha			3,526,33
Subtotal (R\$)			40,448,54

Fonte: faturas da energia elétrica do objeto de estudo

O índice 1 aponta a nomenclatura utilizada para os ônus advindos do baixo fator de potência da instalação. Os índices 2, 3 e 4 indicam, respectivamente, os montantes de consumos, as tarifas e os faturamentos relativos à energia reativa excedente ponta e fora ponta. Neste exemplo a multa advinda do baixo fator de potência totaliza R\$ 5.117,73, representando 12,50% do montante total da fatura.

2.4 CAPACITORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Silva (2009, p. 30) resume de forma concisa a relevância do fator de potência e seu controle:

O Fator de Potência é um índice de utilização de energia cujo controle adequado em instalações consumidoras é extremamente importante, não apenas sob o ponto de vista eletro energético, mas também, e fundamentalmente, pelo fato de ser monitorado pelos sistemas de medição das concessionárias, podendo incorrer em ônus (muitas vezes significativos) nas contas de energia elétrica.

Portanto, procurando a redução dos custos e a utilização mais eficiente da instalação elétrica, os consumidores industriais e comerciais buscam a correção do fator de potência, também denominada compensação de energia reativa ou de reativos, geralmente acima do limite estabelecido pela legislação vigente. Cotrim (2008) cita três métodos possíveis para a elevação do fator de potência: o aumento do consumo de energia ativa, a utilização de máquinas síncronas (superexcitadas) e a utilização de capacitores.

O primeiro método citado consiste na adição de novas cargas com fator de potência elevado, ou seja, que aumentam o consumo de energia ativa sem afetar demasiadamente o consumo de energia reativa. Apesar de válido, este método tem pouca aplicação prática (COTRIM, 2008).

Já as máquinas síncronas podem ser operadas como geradores de potência reativa ao serem superexcitadas. Caso sejam empregadas exclusivamente na geração de reativos, são denominadas “compensadores síncronos” ou podem também ser simultaneamente acopladas a cargas mecânicas da produção (COTRIM, 2008). Segundo Mamede Filho (2002) esta solução não é comumente adotada devido ao alto custo e às dificuldades operacionais. Creder (2007) complementa que máquinas síncronas podem competir com a utilização de capacitores em instalações operando em tensões elevadas.

Por fim, a utilização de capacitores é a metodologia abordada e pormenorizada neste trabalho. É a abordagem mais econômica e que permite maior flexibilidade na aplicação, portanto é o método de correção de fator de potência mais adotado na indústria (COTRIM, 2008). Na prática, é o único método utilizado com objetivo principal de

correção do fator de potência; capacitores são equipamentos relativamente acessíveis e de fácil instalação, estes

Operam permutando a energia reativa, por eles acumulada, com as cargas indutivas presentes; parte da energia reativa (ou toda ela) originalmente fornecida pela concessionária, passa a ser fornecida pelos bancos de capacitores (SILVA, 2009, p. 35).

Vale ressaltar que, até certa extensão, o fator de potência pode ser melhorado corrigindo-se as causas (conforme descritas em [2.2](#)), acarretando numa necessidade de injeção de potência reativa menor, ou seja, capacitores de menor potência (CREDER, 2007). A modificação da rotina operacional, alterando o regime de funcionamento de motores e transformadores, é um exemplo de medida a ser tomada (MAMEDE FILHO, 2002).

Também, é imprescindível atentar que cada caso possui suas particularidades e não há solução padronizada, portanto o estudo e dimensionamento da correção do fator de potência devem ser realizados por profissionais capacitados.

2.4.1 O capacitor

Um “elemento capacitivo” é um “dispositivo que consiste em dois eletrodos separados por um dielétrico” (ABNT, 2009, p. 3). Já Mamede Filho (2002) refere-se a tais “elementos capacitivos” como “capacitores” e complementa, definindo-os como dispositivos com capacidade de acumular energia elétrica, constituídos por, basicamente, duas placas metálicas condutoras (eletrodos) dispostas paralelamente e separadas por um meio isolante (dielétrico); ao se aplicar uma diferença de potencial sobre as faces externas destas placas é gerado um campo eletrostático entre elas, ou seja, ocorre o armazenamento de energia elétrica (carga) na forma de campo elétrico.

A montagem de um ou mais destes “elementos capacitivos” em um mesmo invólucro, com terminais elétricos externos é denominada “unidade capacitiva” (ABNT, 2009), referida também por “célula capacitiva” ou, usualmente, por “capacitor”. Estas podem ser monofásicas ou trifásicas.

A Figura 10 apresenta exemplos de células capacitivas monofásicas (esquerda) e trifásicas (direita).

Figura 10 - Células capacitivas monofásicas (e) e trifásicas (d)



Fonte: WEG, 2017b

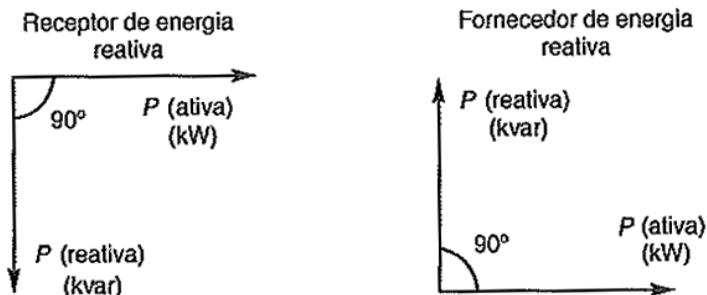
Ainda, o agrupamento destas “unidades capacitivas” operando em um mesmo conjunto, constitui um “banco de capacitores” (ABNT, 2009). Na maioria das aplicações são empregados bancos trifásicos, montados a partir de unidades monofásicas ou trifásicas, viabilizando a obtenção de potências elevadas, assim como maior flexibilidade de instalação e manutenção (COTRIM, 2008).

O princípio de funcionamento do capacitor, na sua aplicação visando a compensação de reativos, se dá pela característica de defasamento da corrente em relação à tensão aplicada. Um indutor, ou uma carga indutiva, absorve potência reativa positiva, assim o indutor consome energia reativa. Já um capacitor, ou uma carga capacitiva, absorve potência reativa negativa, assim o capacitor fornece energia reativa (COTRIM, 2008). Portanto, segundo Monteiro (2009, p. 7) “a função de um capacitor é suprir potência reativa (kvar) ao sistema, ou parte do sistema ao qual está ligado”.

Sendo o sinal da potência absorvida por um capacitor o oposto de um indutor, pode-se afirmar que as potência e correntes absorvidas por estes dispositivos são defasadas em 180° . Ainda, como a potência reativa indutiva é 90° atrasada em relação à tensão, a potência reativa capacitiva é 90° adiantada da tensão.

A Figura 11 ilustra vetorialmente a relação entre cargas ativas, reativa capacitiva e reativa indutiva.

Figura 11 - Relação vetorial da potência ativa e potências reativas



Fonte: CREDER, 2007

2.4.1.1 Características elétricas nominais

Os capacitores são designados por sua potência nominal (COTRIM, 2008), definida como “a potência reativa resultante dos valores nominais de capacitância, tensão e frequência” (ABNT, 2009, p. 4). Isto posto, outras características relevantes dos capacitores são estas citadas.

A potência nominal reativa, em kvar, é a característica utilizada no dimensionamento dos capacitores, ao contrário de outros equipamentos elétricos, comumente dimensionados com base em sua potência aparente. A potência nominal, para capacitores de baixa tensão, normalmente limita-se a 30 kvar para unidade monofásicas e 50 kvar para as trifásicas; já os empregados em tensão primária podem fornecer potências tão elevadas quanto 200 kvar (MAMEDE FILHO, 2002).

A potência reativa de um capacitor é dada pela expressão:

$$P_c = 2\pi \times f \times C \times V^2 \quad (30)$$

onde f é a frequência da rede (Hertz), C a capacitância do capacitor (Farad) e V a tensão de alimentação (Volts).

A capacitância nominal é a única característica intrínseca ao capacitor devido a sua construção. Já a tensão e frequência nominais são aquelas para qual o capacitor é projetado, mas que podem divergir das condições de operação, alterando conseqüentemente a potência reativa

fornecida pelo dispositivo. Este fato deve ser observado no projeto e operação de sistemas de correção de fator de potência.

A capacitância de um capacitor representa a quantidade de carga elétrica que este é capaz de armazenar na forma de campo eletrostático (MAMEDE FILHO, 2002). Esta característica é definida na construção dos elementos capacitivos, variando-se os parâmetros e propriedades dos componentes construtivos, como dimensões das placas condutoras e espessura do elemento dielétrico.

A unidade de medida da capacitância é o Farad. Na prática, tal unidade é demasiadamente grande, sendo empregados comercialmente submúltiplos desta unidade, como o microfarad (μF) (MAMEDE FILHO, 2002).

Quanto à tensão nominal, os capacitores podem ter alimentação trifásica ou monofásica, sendo fabricados nas tensões nominais padrões de sistemas elétricos, como 220, 380, 440 e 480 V (MAMEDE FILHO, 2002). Os capacitores podem operar em tensões de rede inferiores à nominal, observando-se a redução da potência fornecida por este, em relação à nominal.

Em termos de frequência nominal, os capacitores são projetados para operação na frequência industrial de 60 Hz. Para utilização em outras frequências, como 50 Hz, é necessário atentar ao fato de que a potência de operação é diretamente proporcional a este parâmetro (MAMEDE FILHO, 2002).

Ainda, derivada das demais características, há a corrente nominal. Um capacitor operando à tensão senoidal nominal e em frequência nominal demanda uma determinada corrente, denominada corrente nominal (ABNT, 2009).

2.4.1.2 Limites de operação

A maioria dos equipamentos elétricos operam com potência inferior à nominal, dependendo dos intervalos de funcionamento ou da intensidade com o qual são solicitados. Os capacitores, por suas características, uma vez energizados, operam continuamente a plena carga (ABNT, 2009). Portanto, excetuando-se situações em que são instalados em tensão e/ou frequência inferiores à nominal, estes operam na potência nominal ininterruptamente.

Segundo WEG (2017b), sob condições adequadas de operação, a expectativa de vida útil de capacitores para correção de fator de potência é de 100.000 horas.

Elevações excessivas e constantes dos parâmetros de temperatura, corrente e tensão de operação, para além dos níveis e tolerâncias estabelecidos, causam a diminuição da vida útil do capacitor (ABNT, 2009). A queima precoce destas unidades acarreta em maior custo de manutenção, assim como possíveis custos resultantes da não correção do fator de potência, tanto advindos do faturamento de energia reativa excedente quanto das perdas nos processos industriais.

Portanto, é fundamental a consideração destas condições de operação no projeto de um sistema de correção de fator de potência. Os limites a serem observados nos quesitos tensão, corrente e temperatura são apresentados com base em ABNT (2009) e Creder (2007):

Tensão: Os limites máximos de tensão podem ser subdivididos em tensão de regime permanente e sobretensões causadas por manobras (acionamentos).

A Figura 12 especifica os limites de tensão eficaz de operação para os quais os capacitores de baixa tensão são construídos, relacionados com a duração máxima do evento. Estes valores são determinados supondo que sobretensões superiores a $1,15 \times U_n$ ocorram no máximo 200 vezes durante a vida útil de um capacitor.

Sendo o capacitor uma carga de impedância constante, o aumento da tensão resulta em um aumento diretamente proporcional da corrente. Portanto, a tensão aplicada deve ser tal que não ocasione a elevação excessiva na corrente de operação, conforme limites de corrente definidos adiante. Os valores de tensões harmônicas também devem ser levados em consideração, de maneira a não causarem sobrecorrentes.

Já as sobretensões causadas por manobras assumem valores de até $\sqrt{2}$ vezes a tensão eficaz de alimentação e ocorrem no primeiro meio ciclo após a energização do capacitor, ocasionando o surgimento de sobrecorrentes transitórias de até $100 \times I_n$. Os capacitores são projetados para suportar até 5.000 chaveamentos por ano, em condições normais de tensão e temperatura.

Além dos limites de tensão relativos à operação, há a definição do limite de tensão residual na energização, no valor de 10% da tensão nominal. A tensão residual é a tensão nos terminais do capacitor em determinado momento após a sua desconexão, devido à carga acumulada. Assim, os capacitores necessitam de um dispositivo de descarga a fim de reduzir a tensão residual aos níveis aceitáveis antes de uma manobra de reconexão ao sistema.

Figura 12 - Níveis de tensão admissíveis em capacitores

Tipo	Fator de tensão $\times U_N$ eficaz	Duração máxima	Observações
Frequência fundamental	1,00	Contínua	Maior valor médio durante qualquer período de energização do capacitor. Para períodos de energização inferiores a 24 h, exceções são aplicadas conforme indicado abaixo (ver seção 29)
Frequência fundamental	1,10	8 h a cada 24 h	Flutuações da tensão da rede
Frequência fundamental	1,15	30 min a cada 24 h	Flutuações da tensão da rede
Frequência fundamental	1,20	5 min	Aumento na tensão em condições de baixa carga (ver seção 29)
Frequência fundamental	1,30	1 min	
Frequência fundamental mais harmônicas	A corrente não excede o valor dado na seção 21 (ver também seções 33 e 34)		

Fonte: ABNT, 2009

Corrente: Levando em conta os efeitos sobrepostos das tensões harmônicas e das sobretensões na frequência fundamental, os capacitores devem suportar uma sobrecorrente em regime permanente de até 1,3 vezes a corrente nominal.

No entanto, considerando-se ainda o efeito da tolerância do valor da capacitância, limitado em 15% para capacitores até 100 kvar, a corrente máxima de operação pode alcançar 1,5 vezes a corrente nominal. Este limite é utilizado para o dimensionamento dos condutores de alimentação e dispositivos de proteção e manobra.

Estes limites são definidos para o funcionamento permanente, desconsiderando-se os regimes transitórios. Na ocasião das manobras, a corrente pode alcançar o valor de $100 \times I_n$.

Temperatura: Temperaturas de operação superiores ao limite para qual o capacitor foi projetado aceleram a degradação do dielétrico, tendo grande influência na vida útil da unidade. Orienta-se especial atenção a este parâmetro, tanto durante o projeto quanto a operação dos sistemas de correção de fator de potência. É importante salientar que os demais limites operacionais, de tensão e corrente, são baseados em condições normais de serviços, conforme especificação de temperatura.

Os capacitores são categorizados conforme suas temperaturas mínimas e máximas de serviço. As categorias são especificadas por um código formado por um número, referente à temperatura mínima, acompanhado de uma letra, referente à temperatura máxima.

As temperaturas mínimas padrões são: +5, -5, -25, -40 e -50 °C. Já as classes de temperatura máxima são dadas conforme Figura 13.

Figura 13 - Símbolo para o limite superior da faixa de temperatura

Símbolo	Temperatura ambiente °C		
	Máximo	Média mais alta em um período de	
		24 h	1 ano
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35

Fonte: ABNT, 2009

Os valores máximos apresentados são referentes à temperatura ambiente no local de instalação. Caso o capacitor influencie em tal temperatura, devido ao aquecimento proveniente das perdas, deve-se adotar medidas a fim de manter a temperatura dentro do limite indicado. Ainda, a temperatura circulante, definida como a temperatura do ar circulante no ponto mais quente do banco de capacitores, não deve exceder em 5 °C os valores da Figura 13.

2.4.2 Benefícios da correção

Segundo Mamede Filho (2002), a correção do fator de potência em instalações industriais é comumente efetuada visando a adequação perante à legislação vigente, com a finalidade de evitar o faturamento da energia reativa excedente. No entanto, um elevado fator de potência acarreta em outros benefícios, estes podem ser considerados benefícios adicionais, ou, em alguns casos, estes podem ser os objetivos principais da correção.

Dentre os resultados obtidos com a correção do fator de potência, pode-se citar a liberação da potência instalada e da capacidade de carga dos circuitos, a melhora no nível de tensão e a redução das perdas nos circuitos (MAMEDE FILHO, 2002).

Liberação de potência instalada e capacidade de carga: Um baixo fator de potência decorre do excesso de energia reativa no sistema; esta energia reativa circulante ocupa parte da capacidade dos equipamentos e impede a plena utilização da instalação elétrica no atendimento às cargas úteis. A correção do fator de potência, ao injetar energia reativa localmente, libera o “espaço” antes ocupado para o fornecimento de reativos, permitindo o atendimento a novas cargas (MONTEIRO, 2009).

Segundo Cotrim (2008) a redução da potência aparente de uma instalação, em termos percentuais da potência aparente antes da correção é dada por:

$$\Delta S(\%) = \left(1 - \frac{\cos(\Phi_1)}{\cos(\Phi_2)} \right) \times 100 \quad (31)$$

onde Φ_1 e Φ_2 são os ângulos dos fatores de potência antes e depois da correção, respectivamente.

Esta liberação de capacidade é observada em todos os equipamentos a montante do ponto de conexão da compensação de reativos, sendo os de maior interesse os transformadores (liberação da potência de transformação) e os condutores (liberação da capacidade de carga dos circuitos) e estendendo-se aos equipamentos de comando, proteção e controle (MONTEIRO, 2009).

Por exemplo, em situações em que o sistema opera a capacidade plena a determinado fator de potência e deseja-se instalar novas cargas, pode-se evitar o alto custo de uma ampliação da subestação ao elevar o fator de potência, reduzindo, assim, a potência aparente fornecida pelos transformadores e possibilitando a adição de novas cargas sem que haja sobrecarga do sistema (MAMEDE FILHO, 2002).

Redução das perdas: As perdas em um circuito são proporcionais ao quadrado da corrente aparente, esta corrente, mantendo-se uma mesma potência ativa, é reduzida com o aumento do fator de potência. Portanto, a redução das perdas devido ao efeito Joule é inversamente proporcional ao quadrado do fator de potência, conforme a equação a seguir (WEG, 2009):

$$\Delta P(\%) = \left(1 - \frac{\cos^2(\Phi_1)}{\cos^2(\Phi_2)} \right) \times 100 \quad (32)$$

onde Φ_1 e Φ_2 são os ângulos dos fatores de potência antes e depois da correção, respectivamente.

Melhora no nível de tensão: Segundo WEG (2009), a queda de tensão em um circuito elétrico qualquer é dada por:

$$\Delta V = R \times I \times \cos(\Phi) \mp X \times I \times \text{sen}(\Phi) \quad (33)$$

onde R e X são a resistência e a reatância do circuito (Ω), I a corrente total (A), Φ o ângulo do fator de potência (rad) e (+) para cargas indutivas e (-) para cargas capacitivas.

Mantendo-se a potência ativa da instalação constante, e consequentemente a corrente ativa $I \times \cos(\Phi)$ constante, a queda de tensão é proporcional à corrente reativa suprida pelo circuito.

Uma vez que a compensação local de reativos injeta corrente reativa no ponto de conexão, o aumento no nível de tensão é proporcional a esta injeção de corrente. Mais precisamente, é proporcional à corrente injetada pelo banco multiplicada pela reatância do circuito a montante, conforme Eq. (34) (MAMEDE FILHO, 2002):

$$\Delta V(\%) = \frac{P_c \times X_{circ}}{V^2} \times 100 \quad (34)$$

onde P_c é a potência do banco de capacitores (em var), X_{circ} a reatância indutiva do circuito entre a origem e o ponto de conexão (em ohms) e V a tensão nominal na origem (em volts).

É importante frisar que esta deve ser tratada como uma consequência natural da instalação de capacitores, não sendo economicamente favorável a utilização dos dispositivos exclusivamente para este fim. Para obtenção da alteração no nível de tensão, é mais eficaz e financeiramente viável a alteração do *tap* do transformador (MAMEDE FILHO, 2002).

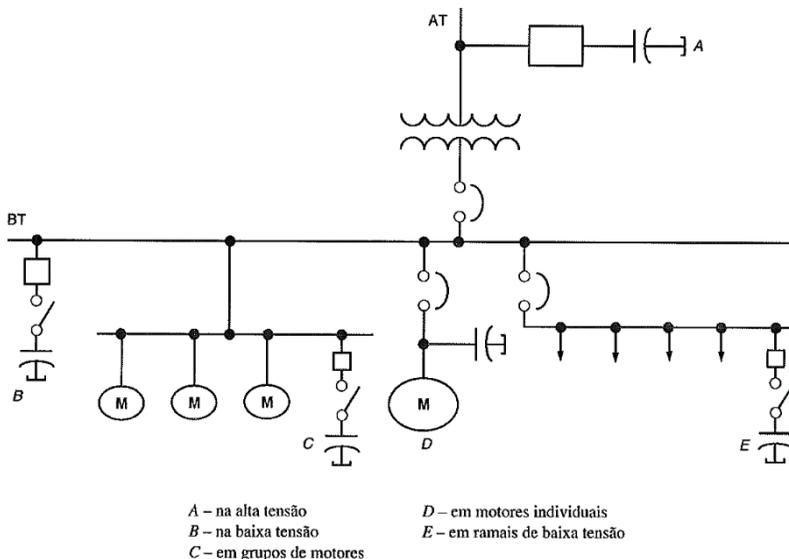
2.4.3 Locais de instalação

Na prática, há quatro possíveis pontos de instalação para a compensação de reativos em uma instalação industrial, caracterizados por serem do tipo centralizado, distribuído ou individual (CREDER, 2007):

- No primário/alta tensão dos transformadores (centralizado);
- No barramento secundário/baixa tensão do transformador (centralizado);
- Nos barramentos secundários de distribuição onde exista agrupamento de cargas indutivas (distribuído);
- Junto a grandes cargas indutivas (individual).

A Figura 14 apresenta um diagrama unifilar genérico de um sistema elétrico industrial e ilustra as possibilidades de instalação. As configurações A e B são do tipo centralizado, C e E distribuído e D individual.

Figura 14 – Locais de instalação de capacitores para correção do fator de potência



Fonte: CREDER, 2007

Sabendo das diferentes localizações possíveis para a implementação da correção, é imprescindível atentar ao fato de que os benefícios obtidos são aplicáveis somente à parte da instalação a montante do ponto de conexão, ou seja, da fonte geradora ao ponto de conexão (COTRIM, 2008). Isto se deve ao fato de que, no circuito a jusante, a mesma potência reativa será transportada para atendimento à carga. Uma exceção à regra é a melhoria do nível de tensão para além do ponto de conexão, porém, apenas como consequência da redução da queda de tensão no circuito a montante (MAMEDE FILHO, 2002).

Assim, da perspectiva de eficiência energética, sem considerar os custos de implementação, os capacitores devem ser ligados o mais próximo possível das cargas indutivas, a fim de que os benefícios sejam maximizados e refletidos em todo o sistema elétrico (CREDER, 2007). As particularidades da correção em cada ponto da instalação são descritas por Cotrim (2008), Creder (2007) e Mamede Filho (2002).

No primário do transformador: neste caso, os dispositivos são instalados após a medição e antes do transformador, no sentido fonte-carga, tendo como única função a correção do fator de potência medido do ponto de vista da concessionária. Secundariamente, resultam na

liberação de carga na rede de distribuição da concessionária. Este método, em geral, tem o custo mais elevado em comparação com a correção em baixa tensão, além de apresentar desafios de implementação e operação devido à proteção, controle e acionamento em tensão primária. Geralmente, esta solução é empregada em instalações de grande porte contendo diversas subestações transformadoras internas.

No secundário do transformador: neste cenário, a conexão geralmente ocorre junto ao quadro geral de baixa tensão (QGBT), por meio de dispositivos de proteção e manobra dedicados. Tem como resultado a correção do fator de potência global monitorado pela concessionária, além da liberação da capacidade de transformação instalada. No entanto, os ramais de distribuição e circuitos terminais não são beneficiados pela correção, pois ainda transportam a corrente reativa (geradas localmente) às cargas. Esta configuração normalmente resulta em menores custos finais, uma vez que leva em consideração o fator de demanda para o dimensionamento da compensação reativa.

Em agrupamento de cargas: é uma solução intermediária entre a correção global e a correção individual junto às cargas, é justificada quando um quadro de distribuição parcial ou centro de comando de motores (CCM) contém diversas cargas menores, as quais não justificam correção individual. Com esta configuração, além da correção do fator de potência medido pela concessionária e da liberação da capacidade do transformador, tem-se uma redução do carregamento e das perdas no ramal alimentador do circuito corrigido. Esta opção também leva em consideração o fator de demanda das cargas alimentadas, diminuindo o custo se comparado à correção individual, no entanto, a economia é menor do que no caso anterior.

Em cargas individuais: consiste na aplicação da correção localizada, diretamente sobre as cargas indutivas, um exemplo desta correção é a instalação de capacitores junto a motores de indução de grande potência. É a correção mais vantajosa do ponto de vista elétrico, pois os benefícios de um alto fator de potência incidem sobre todo o sistema elétrico a montante, da fonte geradora ao circuito terminal. Apesar de demandar um maior investimento em capacitores, pois não há o compartilhamento destes entre as diversas cargas, há a vantagem da utilização dos mesmos equipamentos de manobra e proteção utilizados pelas cargas, reduzindo os custos de implementação relativo a estes.

2.4.4 Métodos de controle

O modo como a injeção de energia reativa será realizada é dada pela forma de ligação dos capacitores nos diversos pontos da instalação. As células capacitivas ou bancos de capacitores podem ser conectados de maneira fixa, ou então de maneira controlada utilizando-se controladores e dispositivos de manobra, tanto em configuração automática ou semiautomática (COTRIM, 2008). Adiante são expostas as particularidades de cada método de controle, conforme Cotrim (2008).

Banco fixo: Nesta configuração, os capacitores são conectados diretamente à alimentação, sem a utilização de dispositivos de manobra, o que impossibilita o controle de injeção de reativos em função da carga. Pode ser utilizado diretamente sobre as cargas indutivas, ou ainda em barramentos gerais de tensão primária ou secundária. É o método mais simples e de menor custo, no entanto pode proporcionar problemas em situações de baixa carga devido ao excesso de energia reativa capacitiva, como sobretensões elevadas e faturamento de energia reativa excedente capacitiva na madrugada.

Banco semiautomático: Neste caso, os capacitores são instalados juntos das cargas indutivas e acionados simultaneamente a estas, normalmente utilizando os mesmos dispositivos de manobra destas. Esta configuração permite um certo grau de controle, injetando reativos na rede somente quando na presença de cargas solicitantes. Tem como característica um custo alto relativo à associação de um capacitor ou banco para cada carga; quanto maior a diversidade de cargas, maior este custo.

Banco automático: Este sistema visa o fornecimento centralizado e variável de energia reativa conforme a variação da carga, sendo normalmente instalado no barramento geral de baixa tensão do sistema. Consiste em um agrupamento de capacitores distintos, denominado estágios, acionados por contatores individuais; estes contatores, por sua vez, são controlados por um dispositivo eletrônico que monitora parâmetros da rede elétrica e aciona determinados estágios visando a manutenção do fator de potência em uma faixa pré-determinada.

Compensação estática: Esta configuração é um caso especial da correção automática, sendo utilizada em situações nas quais as cargas apresentam dinâmica rápida, como máquinas de solda a ponto, prensas, injetoras, dentre outras. Nesta, o acionamento dos capacitores se dá por meio de dispositivos estáticos (utilizando eletrônica de potência) em

substituição aos tradicionais contadores. O uso de dispositivos estáticos permite a manobra dos capacitores em tempos na ordem de 1 ciclo da rede (16,7 milissegundos), pois utilizam a técnica *zero-crossing*, inserindo o capacitor na rede no momento que a tensão é nula. Esta característica dispensa a necessidade de descarga do capacitor e isenta os equipamentos dos transientes de manobra. A compensação estática é comumente referida como compensação em “tempo real”.

Ainda, Monteiro (2009) ressalta que em alguns casos é viável a adoção destas técnicas em conjunto. Por exemplo, quando uma instalação apresenta determinadas cargas de grande porte e uma variedade de cargas de pequeno porte com ciclo de operação diversificado; neste caso, pode-se adotar a correção fixa ou semiautomática para as cargas maiores e a correção automática para o complemento da correção, referente às pequenas cargas.

2.5 BANCO AUTOMÁTICO DE CAPACITORES (BAC)

Um banco automático de capacitores é um equipamento constituído por diversas unidades capacitivas (denominadas estágios) que podem ser manobradas em função do fator de potência instantâneo da instalação, fornecendo uma quantidade variável de potência reativa em função da carga, de maneira a manter o fator de potência nos limites desejados preestabelecidos (COTRIM, 2008).

Devido aos intervalos de integralização de 1 hora para o monitoramento e faturamento de potência e energia reativa, conforme resolução pertinente, e devido à variação das cargas em uma instalação ao longo da operação, torna-se praticamente obrigatória a utilização de BACs para a maioria dos consumidores industriais (CREDER, 2007). Esta solução pode ser aplicada globalmente ou a setores da instalação (COTRIM, 2008).

Um BAC é constituído por diversos equipamentos e acessórios instalados em um mesmo painel. Os principais elementos de um BAC são: capacitores, dispositivos de manobra (contadores ou módulos de potência tiristorizado), dispositivos de proteção individuais e geral (disjuntores ou fusíveis), dispositivo de controle (CAFP – controlador automático de fator de potência), barramento alimentador, condutores de potência e circuito de comando (CREDER, 2007).

A Figura 15 apresenta um exemplo de um BAC. O CAFP é instalado na porta, de maneira a possibilitar o acesso do usuário a sua interface.

Figura 15 - Banco Automático de Capacitores



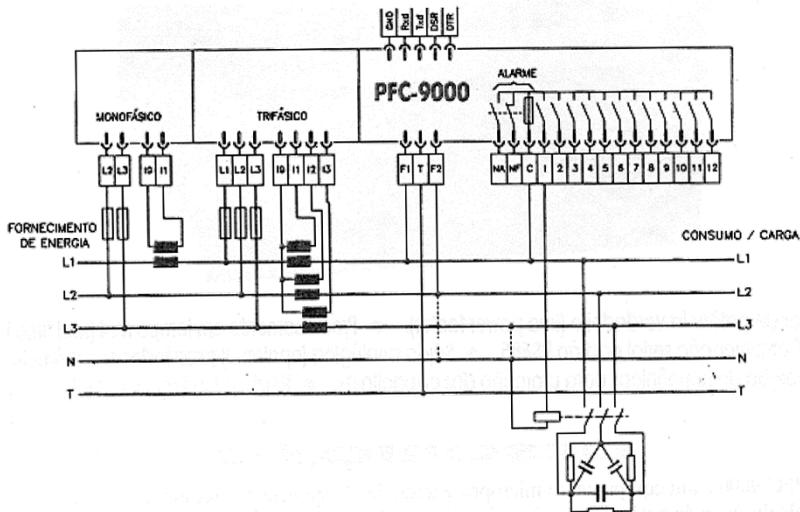
Fonte: acervo pessoal

O CAFP é um dispositivo eletrônico microcontrolado que monitora o fator de potência continuamente, por meio de sinais de tensão e corrente obtidos do circuito principal. Para obtenção do sinal de corrente são utilizados transformadores de corrente (SILVA, 2009). Este monitoramento pode ser monofásico (utilizado em redes trifásicas balanceadas) ou trifásico (utilizado em redes desbalanceadas) (CREDER, 2007).

Com base nos sinais de tensão e corrente obtidos, o CAFP calcula o fator de potência instantâneo (ou de um curto intervalo) e analisa a necessidade de inserção ou retirada de estágios para a manutenção do fator de potência em uma faixa configurada pelo operador. O controlador, então, ativa ou desativa determinadas saídas, cada uma

correspondente a um estágio, de maneira a energizar ou desenergizar os dispositivos de manobra e, assim, realizar a inserção ou retirada de um capacitor do circuito (SILVA, 2009). A Figura 16 apresenta um diagrama de ligação de um CAFP.

Figura 16 - Diagrama de ligação de um CAFP



Fonte: MONTEIRO, 2009

2.5.1 Metodologia de projeto

Creder (2007, p. 273) sintetiza o intuito de um projeto de correção de fator de potência:

A correção do fator de potência tem por objetivo a especificação da potência reativa necessária para a elevação do fator de potência, de forma a evitar a ocorrência de cobranças pela concessionária dos valores referentes aos excedentes de demanda reativa e de consumo reativo e a obter os benefícios adicionais em termos de redução de perdas e de melhoria do perfil de tensão da rede elétrica.

Isto posto, primeiramente deve ser executado o estudo das condições da instalação sem a correção de fator de potência, realizando

o levantamento do perfil de carga e determinando o fator de potência corrente, para que, então, seja realizada a especificação da potência reativa necessária para elevação do fator de potência a patamares desejados.

2.5.1.1 Levantamento do perfil de carga

Visando a correta escolha da metodologia e do projeto de compensação reativa, o perfil da carga da instalação deve ser observado cuidadosamente, uma vez que a análise pontual ou média do fator de potência induzirá, geralmente, a soluções inadequadas ou insuficientes (COTRIM, 2008).

Ainda, segundo Mamede Filho (2002) o levantamento do perfil da carga visando o projeto de um sistema de correção de fator de potência pode ser dividido em dois grupos, os empreendimentos em projeto e os empreendimentos em operação. As metodologias são apresentadas conforme o autor.

2.5.1.1.1 *Empreendimentos em projeto*

Neste caso, a projeção do perfil de carga é realizada com base nos dados de projeto. São levantadas as características elétricas das cargas previstas, como potências nominal e operacional, fator de potência, número de fases, dentre outros. Também, são observados os ciclos operacionais previstos da instalação – diário, semanal, mensal e anual – levando em conta as diversas cargas individuais e seus respectivos carregamentos.

A partir dos dados projetados, são determinadas as potências ativas e reativas para cada período de funcionamento da instalação e então, são traçadas as curvas de demanda ativa e reativa em função do tempo. Com base nestes dados e gráficos, é possível prever os consumos e as demandas da indústria em qualquer horizonte de tempo, seja horário, mensal, ou outro horizonte de tempo desejado, dependendo da finalidade do projeto.

Por fim, embasado no perfil de carga e nas respectivas demandas ativas e reativas, é possível estimar o fator de potência da instalação para as diferentes condições de operação utilizando os conceitos apresentados em [2.1](#) e, assim, verificar a necessidade de compensação reativa para adequar a instalação à legislação vigente.

2.5.1.1.2 Empreendimentos em operação

Nesta condição, há três possíveis métodos de levantamento do perfil de carga da instalação, com a consequente determinação do fator de potência, a saber, método dos consumos mensais, método analítico e método das potências medidas.

O primeiro, aplicável somente a consumidores enquadrados na avaliação mensal do fator de potência, consiste na verificação dos consumos mensais registrados nas faturas de energia elétrica; a partir destes consumos é possível definir o fator de potência médio da instalação. Recomenda-se a computação de valores por um período de seis meses ou mais, principalmente em casos que apresentam sazonalidade na operação.

O segundo método consiste no levantamento do perfil de carga com base nas cargas instaladas e no ciclo de operação, similar ao processo utilizado para empreendimentos em projeto.

O último método baseia-se na mensuração dos valores efetivos de potências ativa, reativa e fator de potência presentes na instalação elétrica. Estes valores podem ser obtidos por meio de medições utilizando aparelhos registradores adequados, ou então, por meio de relatórios obtidos juntos às concessionárias de energia elétrica. Esta análise deve englobar todas as condições típicas de carga – mínima, máxima, média, etc. (COTRIM, 2008).

Independentemente do método utilizado, a finalidade deste estudo é a definição dos consumos, das demandas e do fator de potência da instalação, a fim de definir a necessidade ou não de uma intervenção para adequação do fator de potência; e, em caso positivo, fornecer dados para possibilitar o correto dimensionamento dos equipamentos de compensação reativa.

2.5.1.2 Dimensionamento do banco de capacitores

Uma vez realizado o levantamento do perfil de carga da instalação, “a resposta ao problema é definir o quanto de potência reativa (Q) injetar, de modo a compensar a potência reativa consumida pela carga” (COTRIM, 2008, p. 422).

Além da questão principal da quantidade de reativos que deve ser injetada, Creder (2007) cita outros fatores que devem ser levados em consideração para elaboração do projeto, como: identificação de medidas operacionais corretivas possíveis de serem adotadas; diagrama unifilar da instalação; verificação da existência de cargas não lineares

(harmônicas); previsão de adição ou remoção de cargas; planos de expansão; verificação do funcionamento de possíveis capacitores previamente instalados e levantamento do local físico adequado para a instalação do sistema de correção.

Sabendo-se a potência ativa demandada e o fator de potência original da instalação, a aplicação da Eq. (35) resulta na potência reativa capacitiva necessária para elevação do fator de potência ao valor desejado (MAMEDE FILHO, 2002):

$$P_c = P_{at} \times (tg(\Phi_1) - tg(\Phi_2)) \quad (35)$$

Ou ainda, substituindo Φ_1 e Φ_2 conforme Eq. (12):

$$P_c = P_{at} \times (tg(\cos(FP_1)) - tg(\cos(FP_2))) \quad (36)$$

onde P_c é a potência do banco de capacitores a ser empregado, P_{at} é a potência ativa da instalação, Φ_1 e Φ_2 são os ângulos do fator de potência original e desejado, respectivamente, e FP_1 e FP_2 são os fatores de potência original e desejado, respectivamente.

Ainda, é possível a utilização do método tabular, derivado da Eq. (36), porém, apresentado na forma de tabela, conforme Anexo A (adaptado de WEG, 2009, p. 22). A tabela fornece fatores de multiplicação conforme os fatores de potência original e desejado; este fator, representado por Δtg na Eq. (37), deve ser aplicado à potência ativa da instalação de sorte a se obter a potência reativa capacitiva necessária para adequação do fator de potência.

$$P_c = P_{at} \times \Delta tg \quad (37)$$

Sendo o limite mínimo do fator de potência estipulado pela legislação igual a 0,92, é recomendada a adoção do fator de potência desejado na ordem de 0,95, de forma ter-se uma margem de segurança referente à penalização por consumo de reativos (COTRIM, 2008). Este valor acima do limite também proporciona um melhor aproveitamento da energia e da instalação (MONTEIRO, 2009).

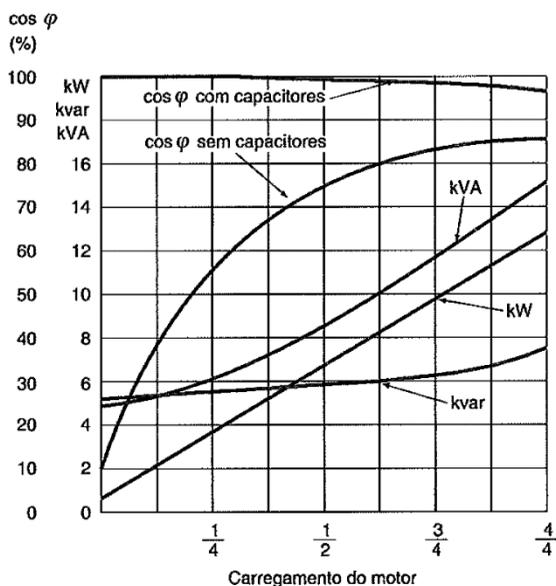
Também, levando em consideração a cobrança sobre o excesso de energia reativa capacitiva injetada na rede durante a madrugada, a solução escolhida deve ser adequada também neste período, eventualmente desligando os capacitores (COTRIM, 2008).

2.5.1.3 Aplicações específicas

Os métodos de levantamento e dimensionamento apresentados anteriormente são direcionados ao projeto de sistemas de compensação reativa global ou parcial. No entanto, há situações específicas em que os capacitores podem ser dimensionados de maneira simplificada, como na utilização junto a motores individuais ou junto a transformadores.

Motores de indução: é prática comum a correção local do fator de potência de motores de indução, conectando capacitores diretamente aos terminais elétricos de tais cargas. Esta aplicação torna a curva do fator de potência dos motores praticamente plana, independentemente do carregamento do mesmo (CREDER, 2007), conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17 - Curva do fator de potência de um motor em função do carregamento



Fonte: CREDER, 2007

No entanto, há algumas precauções a serem adotadas quando da utilização de capacitores junto a motores de indução, de maneira a evitar sobretensões destrutivas.

Ao se desconectar a alimentação dos terminais do conjunto motor-capacitor, o rotor continua em movimento devido à inércia e o capacitor mantém certa carga armazenada na forma de campo elétrico,

mantendo um potencial elétrico nos terminais. Nesta condição, o estator do motor fica submetido à tensão dos terminais do capacitor e o motor opera como um gerador. Como agravante, pode ocorrer o efeito de ferro-ressonância, no qual a impedância do circuito se limitaria a resistência do bobinado e dos condutores de ligação ao capacitor, causando sobretensões destrutivas (MAMEDE FILHO, 2002).

Portanto, a fim de evitar estes fenômenos, via de regra, o capacitor acoplado diretamente aos terminais de motores de indução deve ter sua potência limitada a 90% da potência absorvida pelo motor a vazio (CREDER, 2007).

A potência do banco (Q_{banco} , em vars) para essa aplicação, portanto, pode ser calculada por (MONTEIRO, 2009):

$$Q_{banco} = 0,9 \times \sqrt{3} \times V_{n,motor} \times I_{mag,motor} \quad (38)$$

onde $V_{n,motor}$ é a tensão nominal do motor (em volts) e $I_{mag,motor}$ é a corrente de magnetização do motor (em amperes).

Alternativamente, em situações em que os dados do motor não estejam disponíveis, o dimensionamento pode ser realizado de acordo com tabelas fornecidas por fabricantes, conforme exemplificado no Anexo B (MAMEDE FILHO, 2002, p. 167).

Caso a potência reativa necessária para a correção do fator de potência seja superior ao valor obtido com a Eq. (38), pode-se utilizar um dispositivo de manobra independente para o acionamento do capacitor, de maneira a desconectar eletricamente o capacitor dos terminais do motor após a desenergização da carga (MONTEIRO, 2009).

Transformadores: a compensação de energia reativa junto a transformadores é fundamentalmente importante em períodos que o mesmo opera a vazio, pois o transformador consome energia reativa indutiva sem que haja consumo de potência ativa no seu secundário, causando um baixo fator de potência. O valor da potência reativa capacitiva necessária para elevação do fator de potência para a unidade é dado por (WEG, 2009):

$$Q_0 = \sqrt{\left(\frac{i_0 \times S_n}{100}\right)^2 - P_0^2} \quad (39)$$

onde Q_0 é a potência do banco (em kvar) i_0 é a corrente a vazio (em p.u. e em %), S_n é a potência nominal do transformador (em kVA) e P_0 é potência de perdas a vazio (em kW).

Estes dados são normalmente fornecidos pelo fabricante. Alternativamente, caso os dados necessários ao cálculo não estejam disponíveis, pode-se utilizar para o dimensionamento os valores tabelados conforme Figura 18.

Figura 18 – Potência reativa capacitiva para correção do fator de potência de transformadores classe 25 kV operando a vazio

TRANSFORMADOR kVA	CORRENTE DE EXCITAÇÃO $I_0\%$	kvAr	
		CALCULADO	NOMINAL
15	5,7	0,81	0,75
30	4,8	1,37	1,25
45	4,3	1,84	1,75
75	3,6	2,57	2,5
112,5	3,2	3,42	3,5
150	3,0	4,28	4,0
225	2,7	5,77	5,0
300	2,5	7,13	7,5
500	1,5	7,13	7,5
750	1,4	9,98	10,0
1000	1,3	12,35	12,5
1500	1,0	14,25	15,0

Nota: o valor calculado é para $F.P.=0,95i$

Fonte: WEG, 2009

2.5.1.4 Instalações com autogeração de energia

Segundo Cotrim (2008), são necessárias considerações extras quando da aplicação de bancos de capacitores em instalações que contam com autogeração de energia por meio de grupo-geradores, pois estes equipamentos possuem restrições na alimentação de cargas capacitivas. Em determinados momentos, devido a variações na operação da indústria, a carga pode se tornar capacitiva, causando alteração na excitação do gerador e, por fim, acionando seus dispositivos de proteção, com eventual desligamento completo da alimentação.

Sistemas de compensação estática (em “tempo real”) podem prevenir estes problemas, uma vez que acompanham a variação da carga indutiva de maneira ágil. No entanto, ao utilizar sistemas convencionais (com contadores), recomenda-se desligar o sistema de compensação ao

alternar para alimentação via gerador, evitando os fenômenos mencionados.

Ademais, deve-se observar a alteração na impedância da fonte quando da utilização de geradores, uma vez que esta impedância pode afetar os valores de sobretensão e corrente nos transientes de manobra, assim como influenciar no comportamento do banco de capacitores na presença de harmônicas, conforme descrito na próxima seção.

2.5.1.5 Harmônicas

Primeiramente, é pertinente comentar sobre o conceito errôneo de que os capacitores para correção de fator de potência são causadores de distorção harmônica. Estes dispositivos não geram conteúdo harmônico, no entanto, podem vir a interagir com o conteúdo harmônico presente na instalação e agravar os potenciais problemas ocasionados por este (ISONI, 2004), conforme apresentado adiante.

As cargas não lineares, cada vez mais presentes nas instalações elétricas, geram um certo conteúdo harmônico em decorrência das suas características de controle e acionamento; ou seja, estas cargas injetam na rede correntes em frequências múltiplas da frequência fundamental, por exemplo, 180 Hz, 300 Hz, 420 Hz e assim por diante (COTRIM, 2008).

As Tabelas 1 e 2 expõem os limites recomendados para a distorção harmônica de tensão e corrente, respectivamente, conforme IEEE (2014). A tabela referente à distorção harmônica de corrente diz respeito a sistemas de 120 V a 69 kV.

Tabela 1 - Limites de distorção harmônica de tensão

Tensão do barramento	Harmônica individual (%)	THD (%)
$V \leq 1 \text{ kV}$	5,00	8,00
$1\text{kV} < V \leq 69\text{kV}$	3,00	5,00
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,50	2,50
$161\text{kV} < V$	1,00	1,50

Fonte: Adaptado de IEEE, 2014

Os níveis máximos de distorção harmônica de corrente são apresentados em porcentagem de I_L , corrente de demanda máxima. O valor de I_L é definido pela média das correntes correspondentes às demandas máximas registradas nos últimos 12 ciclos de faturamento.

Também, os limites recomendados estão em função da razão I_{SC}/I_L , onde I_{SC} é a corrente de curto circuito no ponto de conexão (IEEE, 2014).

Tabela 2 - Limites de distorção harmônica de corrente para sistemas de tensão nominal de 120 V a 69 kV

I_{SC}/I_L	Ordem harmônica individual (ímpares)					TDD
	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: Adaptado de IEEE, 2014

Por definição, uma reatância capacitiva tem valor inversamente proporcional à frequência, ou seja, um capacitor representa um caminho de pequena impedância para correntes harmônicas de frequência elevada. Portanto, em instalações com alto conteúdo harmônico, os capacitores estão suscetíveis à circulação de uma corrente elevada, sendo submetidos a esforços térmicos destrutíveis. A corrente excessiva eleva suas perdas ôhmicas, causando aquecimento, o que reduz a vida útil das unidades ou, em alguns casos, causa a explosão destas unidades (ISONI, 2004).

Além disto, pode ocorrer o efeito de ressonância. Uma instalação elétrica pode ser modelada por um circuito LC com uma determinada frequência de ressonância. A frequência de ressonância é a frequência na qual a reatância indutiva e a reatância capacitiva do circuito se igualam (em módulo) e é calculada conforme a expressão (CREDER, 2007):

$$fr = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{LC}} \quad (40)$$

onde, fr (em Hertz) é a frequência de ressonância, L (em Henry) representa a indutância da rede e C (em Farad) representa os elementos capacitivos conectados à rede.

Em uma instalação sem a presença de capacitores, a frequência de ressonância natural se situa na ordem de kHz, muito acima das frequências operacionais das cargas industriais, portanto não constitui problema. No entanto, ao se conectar uma elevada carga capacitiva

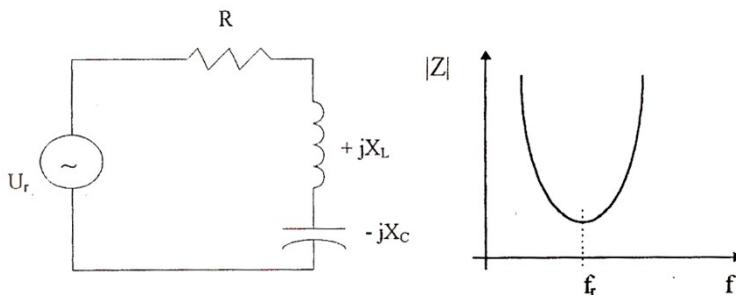
(conseqüentemente uma elevada capacitância) à rede, a frequência de ressonância do conjunto é reduzida para algumas centenas de Hz, podendo ocasionar problemas devido à presença de cargas geradoras de conteúdo harmônico nestas frequências (CREDER, 2007).

Nesta situação, dois tipos de fenômeno podem ocorrer, a ressonância série, na qual a corrente “enxerga” os elementos indutivos e capacitivos em série, e a ressonância paralela, na qual a corrente “enxerga” estes elementos em paralelo. Ou então, pode ocorrer uma combinação dos dois fenômenos (ISONI, 2004).

A ressonância série normalmente ocorre quando a associação do transformador e do banco de capacitores resulta em um circuito sintonizado próximo à alguma frequência harmônica de tensão presente na rede elétrica externa. Nesta situação, as reatâncias indutivas e capacitivas são similares, porém com sinais opostos, e a soma destas (em série) resulta em uma baixa impedância. Como $I = V/Z$, uma impedância harmônica reduzida pode resultar em elevada corrente, mesmo quando excitada por uma tensão harmônica não muito alta (CREDER, 2007).

A Figura 19 apresenta o circuito equivalente na condição de ressonância série, assim como o gráfico da impedância equivalente em função da frequência. Nessa situação, a impedância do circuito limita-se fundamentalmente à resistência dos condutores, normalmente de pequeno valor.

Figura 19 – Circuito e impedância equivalente na ressonância série



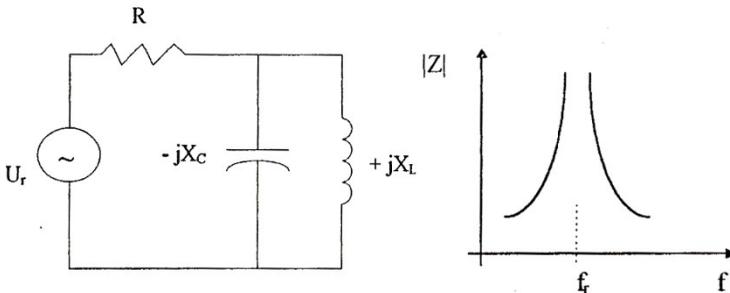
Fonte: DIAS, 2002

Já a ressonância paralela ocorre quando a indutância equivalente do sistema supridor e do banco de capacitores da instalação consumidora entram em ressonância. Nesta situação, a impedância torna-se extremamente elevada na frequência de alguma harmônica de

corrente geradas por cargas não lineares presente na instalação. Como $V = Z \times I$, mesmo uma pequena injeção de corrente harmônica pode dar origem a uma sobretensão significativa na frequência ressonante (CREDER, 2007).

A Figura 20 apresenta o circuito equivalente na condição de ressonância paralela, assim como o gráfico da impedância equivalente em função da frequência. Nessa situação, a impedância do circuito torna-se extremamente elevada.

Figura 20 - Circuito e impedância equivalente na ressonância paralela



Fonte: DIAS, 2002

A ordem da frequência de ressonância pode ser calculada por (COTRIM, 2008):

$$hr = \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q_{cap}}} \quad (41)$$

onde hr é a ordem da frequência ressonante, P_{cc} é a potência de curto-circuito trifásica (em kVA) na barra a qual o banco está conectado e Q_{cap} é a potência (em kvar) dos capacitores em operação. A frequência de ressonância é definida multiplicando-se a frequência fundamental pelo termo “ hr ”.

É necessário atentar ao fato de que os bancos automáticos alteram a potência reativa fornecida à instalação por meio do chaveamento dos estágios, alterando também a frequência de ressonância conforme Eq. (41), desta maneira, a ressonância poderá ocorrer para diversas frequências. Sendo assim, se faz necessário o estudo pormenorizado das possíveis frequências de ressonância, de acordo com a atuação do banco automático de capacitores (ISONI, 2004).

Caso seja constatada a ocorrência do fenômeno de ressonância entre o circuito LC e as harmônicas presentes na instalação, adota-se como solução a instalação de reatores anti-ressonantes em série com cada estágio do BAC, de maneira a elevar a impedância dos ramos de ligação dos capacitores (COTRIM, 2008). Esta técnica desloca a frequência de ressonância para um valor abaixo da menor harmônica presente no circuito (CREDER, 2007).

O dimensionamento e especificação destes reatores anti-ressonantes – também denominados de reatores de dessintonia, indutores de bloqueio, entre outros – será abordado no item [2.5.2.6](#).

Outra abordagem possível para instalações com elevado conteúdo harmônico seria a implementação de filtros sintonizados em determinadas frequências. Nesta solução também são utilizados reatores em série com os capacitores, porém, contrário à solução anterior que bloqueia a circulação de correntes harmônicas, o filtro sintonizado permite a circulação de parte destas harmônicas pelo conjunto, filtrando o conteúdo harmônico da instalação. Sendo assim, a utilização de filtros sintonizados tem dupla função: a injeção de reativos e a filtragem do conteúdo harmônico (COTRIM, 2008). No entanto, essa abordagem não será discutida no presente trabalho.

2.5.2 Especificação de componentes

Uma vez definido o valor da potência reativa capacitiva necessária à adequação do fator de potência, e observados os casos especiais apresentados previamente, se faz necessária a especificação dos componentes que serão utilizados na implementação do sistema proposto.

2.5.2.1 Células capacitivas

Os capacitores, conforme mencionado anteriormente, são específicos de acordo com sua potência nominal (COTRIM, 2008), de maneira a fornecer a potência reativa total necessária definida em projeto. No entanto, é imprescindível atentar às demais características operacionais, mantendo-as dentro dos limites estabelecidos, a fim de proporcionar o correto funcionamento do sistema como um todo.

As unidades capacitivas são fornecidas nas versões trifásicas ou monofásicas, estas últimas podem ser associadas de maneira a constituir um banco trifásico (SILVA, 2009); então, diversas destas unidades trifásicas, ou destes bancos de unidades monofásicas, são agrupados

para formar um banco de capacitores. Em instalações de baixa tensão são normalmente empregadas unidades trifásicas (MAMEDE FILHO, 2002).

Quanto ao nível de tensão, na prática, podem ser especificados capacitores de tensão nominal superior a tensão da rede a qual serão inseridos, visando obter uma segurança extra na operação e um prolongamento da vida útil dos mesmos (SILVA, 2009), porém, deve-se observar a redução da potência fornecida nestes casos em relação à nominal.

Ao instalar-se um capacitor em uma rede com tensão e/ou frequência diferentes das nominais, a potência fornecida por este é dada pela Eq. (42) (SILVA, 2009). Vale ressaltar que estes valores de tensão e frequência da rede podem ser inferiores aos nominais, no entanto, não podem ser superiores.

$$Q_{corrigida} = \left(\frac{V_{efetiva}}{V_n} \right)^2 \times \frac{f_{efetiva}}{f_n} \times Q_n \quad (42)$$

onde $Q_{corrigida}$ é a potência efetiva fornecida pelo capacitor, $V_{efetiva}$ e V_n são as tensões da rede e nominal do capacitor, $f_{efetiva}$ e f_n são as frequências da rede e nominal do capacitor e Q_n é a potência reativa nominal do capacitor.

Para a especificação do parâmetro de tensão nominal, deve-se também atentar para a influência do próprio capacitor no sistema, elevando a tensão de operação. Segundo Creder (2007), para capacitores conectados ao secundário do transformador, o aumento no nível de tensão pode ser estimado por:

$$\Delta V\% = \frac{Q_{cap}}{S_{trafo}} \times Z_{trafo} \quad (43)$$

onde $\Delta V\%$ é a elevação percentual da tensão (%), Q_{cap} é a potência reativa do capacitor (kvar), S_{trafo} é a potência nominal do transformador (kVA) e Z_{trafo} é a impedância percentual do transformador (%).

2.5.2.2 Proteção

Conforme mencionado em [2.4.1.2](#), a corrente de operação de um capacitor, em regime permanente, pode atingir 150% do valor da corrente nominal de projeto do mesmo. Portanto, os dispositivos de proteção devem ser dimensionados de maneira a permitir o

funcionamento contínuo com esta corrente, atuando nos casos de curto-circuito ou de sobrecarga superior a este valor (CREDER, 2007).

Segundo WEG (2017a), a proteção individual dos capacitores deve ser realizada preferencialmente com disjuntores do tipo caixa moldada, observando a característica de capacidade de interrupção com relação ao nível de curto circuito no ponto de aplicação.

Ainda, é possível a utilização de fusíveis para a proteção, sendo que estes devem ser do tipo NH de característica de atuação retardada. Neste caso, o dimensionamento dos fusíveis deve ser feito com um fator de 165% sobre a corrente nominal do capacitor.

A Figura 21 apresenta exemplos do disjuntor do tipo caixa moldada.

Figura 21 - Disjuntores do tipo caixa moldada



Fonte: WEG, 2019

2.5.2.3 Acionamento

Os dispositivos de acionamento – no escopo deste trabalho resumido a contadores – exigem especial atenção devido aos esforços envolvidos na energização de capacitores. Nesta situação, podem surgir elevados níveis de corrente transitória que podem causar a queima ou até a soldagem das peças de contato (SILVA, 2009).

Visando mitigar os problemas causados pelas elevadas correntes de *inrush* foram desenvolvidos contadores específicos para aplicação junto a capacitores. Estes contadores possuem contatos auxiliares NA (normalmente aberto) em paralelo, adiantados em relação aos contatos principais e equipados com resistores de pré-carga, de maneira a inserir uma impedância no circuito no momento da energização do capacitor, atenuando as correntes de *inrush* (WEG, 2017a).

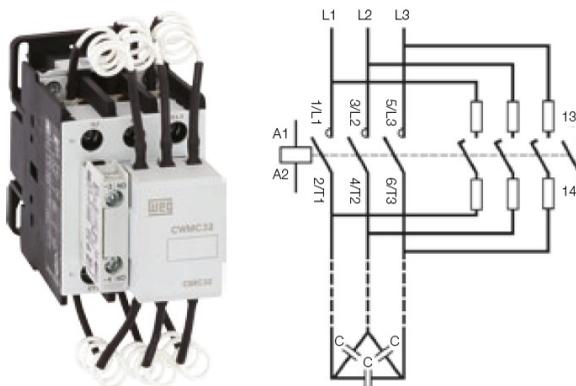
A categoria de utilização destes contadores é denominada AC-6b – Manobra de Capacitores Estáticos (SILVA, 2009). A utilização dos dispositivos de manobra adequados aumenta a vida útil dos próprios dispositivos, assim como a vida útil dos capacitores, devido à redução das sobrecorrentes transitórias.

Ainda, segundo WEG (2009) caso a potência dos capacitores a serem acionados seja superior à potência abrangida pelos capacitores especiais disponíveis no mercado, é possível a utilização de contadores comuns, desde que instalados em série com indutores anti-surto. Estes indutores têm alta impedância em frequências elevadas, atenuando assim as correntes transitória do chaveamento.

Já em relação à operação em regime permanente, os contadores devem ser dimensionados para operar sob 150% da corrente nominal do capacitor, de maneira similar aos dispositivos de proteção (CREDER, 2007). No entanto, é comum que os fabricantes informem em seus catálogos a potência reativa máxima suportada pelos contadores, em função da tensão de operação.

A Figura 22 apresenta um contador para manobra de capacitores juntamente com o diagrama elétrico do mesmo, neste, é possível observar os contatos NA adiantados em série com os resistores de pré-carga.

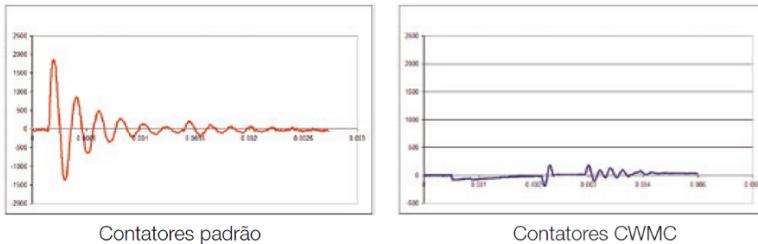
Figura 22 - Contador para acionamento de capacitores



Fonte: WEG, 2017a

Já a Figura 23 demonstra um comparativo entre a corrente transitória na energização de um capacitor utilizando um contador padrão e utilizando um contador adequado para a finalidade.

Figura 23 - Corrente transitória de energização de capacitores



Fonte: WEG, 2017^a

2.5.2.4 Alimentação

Tal qual os dispositivos de proteção e manobra, o dimensionamento dos condutores de potência deve levar em consideração a corrente máxima de operação igual a 1,5 vezes a corrente nominal; além disto, devem ser observados o método de instalação, conforme normas pertinentes (CREDER, 2007).

2.5.2.5 Controle

Conforme exposto em [2.5](#), o dispositivo de controle utilizado em um BAC é o Controlador Automático de Fator de Potência – CAFP. Este dispositivo monitora as grandezas da instalação elétrica em tempo real, calcula internamente o fator de potência instantâneo e a potência reativa necessária para a adequação do FP aos patamares pré-estabelecidos pelo usuário. Com base nos valores calculados, o controlador comuta suas saídas, energizando ou desenergizando os contatores que, por fim, conectam ou desconectam os capacitores da rede.

Estes dispositivos podem ser encontrados em versões com 4, 6, 8, 12 e 14 saídas (estágios de controle), no entanto, a maioria dos modelos encontrados no mercado são de 6 ou 12 estágios. Ainda, estas saídas podem ser acionadas por meio de relés ou transistores; a primeira opção é a mais comum e utiliza comando em corrente alternada para acionamento dos contatores, já a segunda opção utiliza o circuito de controle em corrente contínua e é utilizada no acionamento de módulos de potência para correção “em tempo real” (SILVA, 2009).

Além de atuarem como dispositivos de controle, os CAFP podem ter funções de monitoramento da instalação elétrica. Apresentando as

principais grandezas elétricas da rede, como corrente, tensão, potência ativa e reativa, fator de potência e até distorção harmônica; dispositivos mais simples apresentam somente o fator de potência e os estágios ativos. O custo dos dispositivos será diretamente proporcional às funcionalidades apresentadas (SILVA, 2009).

A Figura 24 apresenta um controlador automático de fator de potência.

Figura 24 - Controlador Automático de Fator de Potência

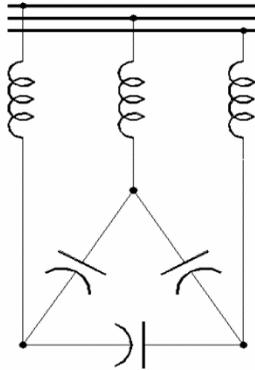


Fonte: WEG, 2018

2.5.2.6 Reatores de dessintonia

Em instalações com alto conteúdo harmônico, de acordo com o exposto no item [2.5.1.5](#), pode se fazer necessária a utilização de reatores (indutores) de dessintonia – também denominados reatores anti-ressonantes – em série com as unidades capacitivas, conforme ilustrado na Figura 25. Este procedimento visa elevar a impedância do ramo capacitivo, de maneira a deslocar a frequência de ressonância do circuito para uma frequência inferior às frequências harmônicas presentes no ponto de conexão (CREDER, 2007).

Figura 25 - Diagrama trifilar de conexão dos reatores de dessintonia



Fonte: SILVA, 2009

Uma vez que as cargas industriais não lineares possuem um espectro harmônico típico, a especificação deste dispositivo pode ser realizada de acordo com valores padrões estabelecidos pelos fabricantes em função do capacitor ao qual o reator será acoplado, sem que seja necessário o dimensionamento específico para cada situação (COTRIM, 2008).

O padrão adotado para o dimensionamento dos reatores é com base na razão entre a impedância do reator e do capacitor (na frequência fundamental). Esta relação, denominada Fator de Dessintonia, é expressa pelo termo p (em p.u.) ou $p\%$ (em %) e é calculada por (COTRIM, 2008):

$$p = \frac{Z_L}{Z_C} \quad (44)$$

onde Z_L e Z_C são as impedâncias (Ω) do reator e do capacitor, respectivamente.

A frequência de sintonia do conjunto é função de “ p ” e é dada pela expressão (SILVA, 2009):

$$f_R = \frac{f_1}{\sqrt{p}} \quad (45)$$

onde f_R e f_1 são a frequência de sintonia e a frequência fundamental do sistema, em Hertz.

Os fabricantes fornecem os reatores de dessintonia com fatores de dessintonia (expressos em $p\%$) tabelados e, conseqüentemente,

frequências de dessintonia tabeladas. Alguns valores padrões são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores comerciais para fatores de dessintonia

p (%)	60 Hz		50 Hz	
	f_R (Hz)	f_R/f_1	f_R (Hz)	f_R/f_1
5,67	252	4,2	210	4,2
7	227	3,8	189	3,8
12,5	170	2,8	141	2,8
14	160	2,7	134	2,7

Fonte: SILVA, 2009

É necessária cautela no projeto de bancos dessintonizados pois a utilização dos reatores resulta em uma sobretensão aplicada aos terminais dos capacitores conectados em série, portanto, estes capacitores devem ser sobredimensionados em tensão, conforme a expressão a seguir (COTRIM, 2008):

$$U_{cap} \geq \frac{U_{rede}}{1 - p} \quad (46)$$

onde U_{cap} e U_{rede} são, respectivamente, a tensão efetiva no capacitor e tensão efetiva na rede.

Como, nesta situação, a tensão aplicada sobre o capacitor será diferente da tensão nominal, se faz necessário o cálculo da potência reativa efetiva fornecida por este conforme Eq. (42), de maneira a possibilitar o correto dimensionamento do banco de capacitores como um todo, fornecendo a potência reativa total especificada em projeto.

A Figura 26 apresenta um exemplo de catálogo de reatores de dessintonia, para aplicação em rede 380 V / 60 Hz. Neste, os reatores são agrupados conforme o fator de dessintonia $p\%$ e as respectivas ordens harmônicas de dessintonia e são especificados juntamente com o capacitor ao qual devem ser acoplados. O fator de dimensionamento, neste caso, é a potência efetiva (em kvar) do conjunto.

A Figura 27 apresenta um exemplo de reator de dessintonia.

Figura 26 - Catálogo para especificação de reatores de dessintonia

380VAC - 60Hz							
Fator de Dessintonia = 14% (3th,5th,7th)				Fator de Dessintonia = 7% (5th, 7th)			
Potência Efetiva kVAr	Código	Utilizar Capacitor	Tam.	Potência Efetiva kVAr	Código	Utilizar Capacitor	Tam.
1,82	4DB1,8-380P14	2,5kVAr / 480VAC	1	2,00	4DB2,0-380P7	2,5kVAr / 440VAC	1
3,64	4DB3,6-380P14	5,0kVAr / 480VAC	1	4,00	4DB4,0-380P7	5,0kVAr / 440VAC	1
5,47	4DB5,5-380P14	7,5kVAr / 480VAC	1	6,00	4DB6,0-380P7	7,5kVAr / 440VAC	1
7,29	4DB7,3-380P14	10,0kVAr / 480VAC	1	8,00	4DB8,0-380P7	10,0kVAr / 440VAC	1
9,11	4DB9,1-380P14	12,5kVAr / 480VAC	1	10,03	4DB10,0-380P7	12,5kVAr / 440VAC	2
10,93	4DB10,9-380P14	15,0kVAr / 480VAC	2	12,00	4DB12,0-380P7	15,0kVAr / 440VAC	2
12,75	4DB12,8-380P14	17,5kVAr / 480VAC	2	14,00	4DB14,0-380P7	17,5kVAr / 440VAC	3
14,58	4DB14,6-380P14	20,0kVAr / 480VAC	3	16,04	4DB16,0-380P7	20,0kVAr / 440VAC	3
16,40	4DB16,4-380P14	22,5kVAr / 480VAC	3	18,04	4DB18,0-380P7	22,5kVAr / 440VAC	3R
18,22	4DB18,2-380P14	25,0kVAr / 480VAC	3R	20,05	4DB20,0-380P7	25,0kVAr / 440VAC	3R
20,04	4DB20,0-380P14	27,5kVAr / 480VAC	3R	22,06	4DB22,0-380P7	27,5kVAr / 440VAC	3R
21,86	4DB21,9-380P14	30,0kVAr / 480VAC	3R	24,06	4DB24,0-380P7	30,0kVAr / 440VAC	3R
23,68	4DB23,7-380P14	32,5kVAr / 480VAC	3R	26,07	4DB26,0-380P7	32,5kVAr / 440VAC	2x3
25,51	4DB25,5-380P14	35,0kVAr / 480VAC	3R	28,07	4DB28,0-380P7	35,0kVAr / 440VAC	2x3
27,33	4DB27,3-380P14	37,5kVAr / 480VAC	2x3	30,08	4DB30,1-380P7	37,5kVAr / 440VAC	2x3
29,15	4DB29,1-380P14	40,0kVAr / 480VAC	2x3	32,08	4DB32,1-380P7	40,0kVAr / 440VAC	2x3
32,79	4DB32,8-380P14	45,0kVAr / 480VAC	2x3	36,09	4DB36,1-380P7	45,0kVAr / 440VAC	2x3R
36,44	4DB36,4-380P14	50,0kVAr / 480VAC	2x3R	40,10	4DB40,1-380P7	50,0kVAr / 440VAC	2x3R
40,08	4DB40,1-380P14	55,0kVAr / 480VAC	2x3R	44,11	4DB44,1-380P7	55,0kVAr / 440VAC	2x3R
43,72	4DB43,7-380P14	60,0kVAr / 480VAC	2x3R	48,12	4DB48,1-380P7	60,0kVAr / 440VAC	2x3R
47,37	4DB47,4-380P14	65,0kVAr / 480VAC	2x3R				
51,01	4DB51,0-380P14	70,0kVAr / 480VAC	2x3R				

Fonte: SIEMENS, [20--]

Figura 27 - Reator de dessintonia



Fonte: WEG, 2017b

2.5.2.7 Sistema de controle de temperatura

A temperatura de operação é um fator crítico na determinação da vida útil dos capacitores, portanto, é essencial a manutenção deste parâmetro dentro dos limites, conforme especificação técnica.

Siemens (2014) apresenta uma metodologia de cálculo para a verificação da elevação de temperatura em um painel elétrico, de acordo com as perdas em forma de calor. As Eqs. (47) e (48) são aplicadas em situações distintas, sendo a primeira para painéis totalmente fechados e a segunda para painéis equipados com dispositivos de ventilação.

$$T_{rise} = \frac{P_{perdas}}{5,5 \times S} \quad (47)$$

$$T_{rise} = \frac{P_{perdas} \times 0,053}{F} \quad (48)$$

onde T_{rise} é a elevação de temperatura em relação à ambiente ($^{\circ}\text{C}$), P_{perdas} são as perdas (W), S é a superfície exposta do painel (m^2) e F é o fluxo de ar provido pelo sistema de ventilação (m^3/min).

O valor das perdas utilizado na avaliação da elevação de temperatura pode ser calculado conforme especificações dos componentes e características do sistema, ou então, pode-se adotar um valor estimativo de 2,5 W/kvar para sistemas sem reatores de dessintonia e 9 W/kvar para sistemas dessintonizados (SCHNEIDER, 2018).

As perdas, portanto, são estimadas de acordo com a equação:

$$P_{perdas} = P_{kvar} \times Q_{banco} \quad (49)$$

onde P_{perdas} é a perda total em Watts, P_{kvar} é a perda por kvar, em Watts/kvar, e Q_{banco} é a potência do banco de capacitores, em kvar.

A elevação de temperatura calculada deve ser somada à temperatura ambiente. Caso esta soma seja superior à temperatura máxima de operação dos dispositivos internos, devem ser tomadas medidas adicionais de controle de temperatura, como por exemplo a instalação de sistemas de ventilação.

2.6 CONCEITOS FINANCEIROS

Segundo Bordeaux-Rêgo (2013) os investimentos podem ser classificados nas categorias expansão, substituição, modernização ou intangíveis. O projeto analisado neste trabalho trata-se de um projeto de investimento em modernização, pois consiste na “reconstrução, recondiçãoamento ou adaptação de uma máquina ou das instalações para maior eficiência” (BORDEAUX-RÊGO, 2013, p. 18).

A tomada de decisão quanto à execução de um projeto demanda critérios técnicos, confrontando-se os fluxos de caixa esperados com o investimento inicial necessário. Os métodos mais utilizados para a tomada de decisão são o *payback* simples, o valor presente líquido (VPL) e a taxa interna de retorno (TIR) (BORDEAUX-RÊGO, 2013); estes métodos apresentam algumas limitações e particularidades, no entanto, não faz parte do escopo deste trabalho abordá-las.

A seguir são apresentados os métodos e conceitos utilizados na análise financeira de projetos, de acordo com Bordeaux-Rêgo (2013) e Eletrobrás (2008).

Fluxo de caixa: representação da movimentação financeira relativa a um projeto, representada em períodos (meses, anos etc.), ao longo da vida útil do projeto. O fluxo de caixa convencional consiste em uma saída (gasto) inicial, seguido de diversas entradas. O fluxo de caixa não convencional consiste na saída inicial, seguido de diversas entradas e/ou saídas.

TMA: não é um método de análise, mas sim um parâmetro relevante na tomada de decisões em investimentos. A taxa mínima de atratividade, também denominada custo de capital ou custo de oportunidade, é o custo do dinheiro no tempo e é a taxa utilizada para descontar os fluxos de caixa futuros para o tempo presente. Pode ser definida com base nas taxas de juros para financiamento de capital (custo de capital) ou com base nas taxas de rendimento de outros possíveis investimentos com característica de risco similar (custo de oportunidade). Para taxas livres de risco, a adoção da Selic é uma alternativa.

***Payback* simples:** é o tempo de retorno do capital, sem considerar o valor do dinheiro no tempo. Seu valor é definido por:

$$n = \frac{I}{A} \quad (50)$$

onde n é o tempo de retorno (meses, anos etc.), I é o investimento realizado e A é o retorno financeiro proporcionado, na mesma base temporal de n .

Payback descontado: este método, assim como o *payback* simples, apresenta o tempo de retorno do capital investido. No entanto, ao contrário da sua variante simples, o *payback* descontado leva em consideração o valor do dinheiro no tempo. Os fluxos de caixa futuros (positivos) são descontados no tempo a uma determinada taxa e adicionados, período a período, ao valor do investimento inicial (negativo). O retorno acontece no momento em que o somatório dos fluxos de caixas futuros é igual ao investimento inicial.

VPL: este método também leva em consideração o valor do dinheiro no tempo, descontando os fluxos de caixa futuros para o tempo presente a uma taxa predeterminada. Neste, no entanto, são considerados todos os fluxos de caixa futuros, até o final da vida útil do projeto. O resultado da projeção é o VPL, que representa o montante total de riqueza gerada ($VPL > 0$) ou riqueza destruída ($VPL < 0$), caso o VPL seja igual a 0, não há geração nem perda de riqueza.

O cálculo do VPL é dado pela expressão:

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^n} \quad (51)$$

onde I é o investimento inicial, FC_t é o fluxo de caixa líquido no período t , r é o custo de capital definido pela empresa e VR é o valor residual do projeto no final do período de análise (n -ésimo período).

TIR: é um método de análise que tem como resultado a TIR, que é a taxa que quando utilizada para descontar os fluxos de caixa futuros no cálculo do VPL resulta em um VPL nulo. A TIR do projeto é então comparada com a TMA da empresa; o projeto é vantajoso se $TIR > TMA$, é indiferente se $TIR = TMA$ e é recusado se $TIR < TMA$.

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} + \frac{VR}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (52)$$

3 ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso será elaborado com base em uma indústria do setor têxtil, a qual, em 2015, apresentava ônus financeiros expressivos decorrentes do baixo fator de potência de sua instalação elétrica. O autor teve acesso ao caso pois atua em uma empresa que presta serviços de consultoria na área de instalações elétricas industriais.

Conforme será descrito em [3.1](#), na ocasião, em 11/2015, foi instalado um sistema de correção de fator de potência visando a adequação à legislação vigente. Desta maneira, o projeto elaborado no presente estudo será embasado no cenário existente previamente à implementação do referido sistema.

Devido à existência deste sistema já instalado, o sistema projetado neste estudo de caso não será implementado. Portanto, o sistema atual será comparado com o sistema projetado e alterações, se necessárias, serão propostas. Visando a aplicação do conteúdo apresentado em teoria, serão realizadas medições das grandezas elétricas para verificação das consequências técnicas da implementação de bancos de capacitores, com base no sistema existente.

Já o estudo de viabilidade financeira levará em consideração dois casos, a implementação do sistema existente e a implementação do sistema projetado neste estudo, considerando a adequação ideal do fator de potência, portanto, terá como premissa a extinção de qualquer cobrança relativa ao baixo fator de potência.

Primeiramente, será apresentado o objeto de estudo, expondo suas características gerais e suas características relevantes para a abordagem realizada, incluindo a descrição pormenorizada do sistema de correção de fator de potência existente.

Então, serão apresentados os métodos de levantamento de dados utilizados e os resultados das medições realizadas em campo. As medições incluem as variáveis elétricas relevantes para o projeto do sistema proposto, assim como as variáveis de interesse para análise de viabilidade técnica do método proposto.

Com base na caracterização da empresa e nos dados levantados, será dimensionado e especificado um sistema para a correção do fator de potência por meio de um banco automático de capacitores e de um estágio para compensação do transformador a vazio.

Por fim, serão apresentados os custos pertinentes aos cenários com e sem adequação do fator de potência. Estes dados serão utilizados para análise de viabilidade financeira do projeto.

3.1 OBJETO DE ESTUDO

O alvo deste estudo de caso é uma empresa, localizada em Blumenau/SC, que atua no setor têxtil produzindo peças para o segmento infante-juvenil. Esta empresa possui sede própria, composta por dois galpões, sendo um relativo à produção e administrativo e outro ao estoque, além de um espaço para eventos e a portaria. O horário de funcionamento é de segunda a sexta-feira, das 07:30 às 17:18, com intervalo entre 12:00 e 13:00.

O fornecimento de energia elétrica é realizado pela concessionária Celesc Distribuição SA, em tensão nominal de 23,1 kV. Portanto, a unidade consumidora é enquadrada no Grupo A, Subgrupo A4. A modalidade tarifária contratada é a Horária Verde, com uma demanda contratada atual de 300 kW.

Em 2015, na ocasião da primeira visita ao cliente, foi detectada a existência de um BAC. No entanto, o mesmo encontrava-se instalado em local não ideal, desenergizado e subdimensionado.

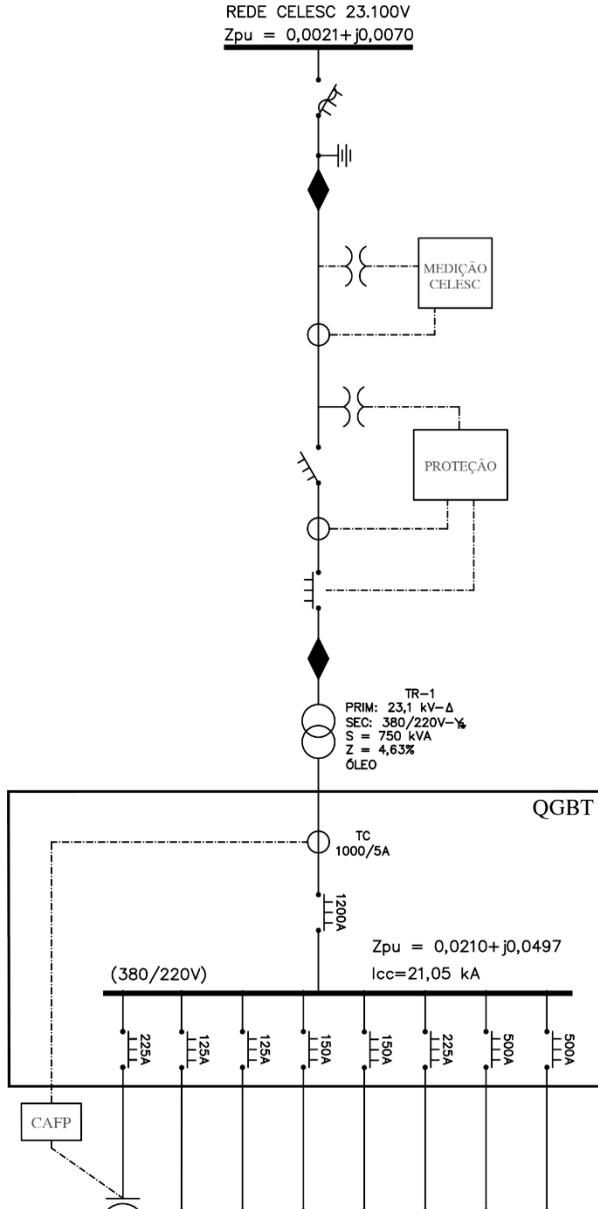
O BAC previamente implementado estava localizado na cabine que anteriormente fora a subestação transformadora de energia elétrica, porém, já em 2015, a cabine era utilizada somente para a medição e proteção em média tensão, uma vez que a subestação transformadora fora transferida para próximo ao novo galpão, onde fora alocada a produção e administrativo.

O ramal alimentador do BAC era derivado do que fora o QGBT da instalação, porém, desde a transferência da subestação para o novo local, o quadro passou a ser um quadro de distribuição parcial, alimentando somente o galpão referente ao estoque, o local de eventos e a portaria. Desta maneira, mesmo que o BAC estivesse corretamente dimensionado e devidamente energizado, este estaria corrigindo o fator de potência parcial da instalação, não fornecendo energia reativa ao setor mais importante, a produção.

Então, em 2015, foram refeitos o dimensionamento e a implementação do BAC, além da instalação de capacitores para compensação reativa do transformador a vazio. O equipamento foi transferido para a subestação transformadora, sendo alimentado a partir do QGBT, e a potência reativa total do sistema foi elevada de 65 kvar para 115 kvar, com base em levantamentos realizados na época.

A Figura 28 apresenta o diagrama unifilar geral simplificado da instalação.

Figura 28 - Diagrama unifilar geral da instalação



Fonte: o autor

3.1.1 Sistema existente

O sistema de correção de fator de potência existente é um sistema misto, constituído por um BAC de 06 estágios com potência nominal de 65 kvar e por um banco semiautomático de 50 kvar para correção do fator de potência do transformador a vazio, totalizando 115 kvar de potência instalada.

O banco semiautomático é controlado por um controlador horário programado para ativar a correção no período em que há cobrança de reativos indutivos, todos os dias das 05:30 às 23:30. Desta maneira, este banco, além de compensar o transformador a vazio nos horários de baixa carga (após as 17:18 e nos finais de semana), também fornece reativos para a instalação durante os períodos normais de funcionamento da empresa.

Assim, apesar de ser considerado um banco para compensação do fator de potência do transformador a vazio, este também é um banco semiautomático, instalado de maneira centralizada, para compensação global de reativos.

Vale ressaltar que um dos estágios de 25 kvar do banco semiautomático está desativado, uma vez que o respectivo dispositivo de acionamento está danificado, portanto a potência máxima fornecida atualmente pelo sistema como um todo é de 90 kvar.

O sistema, localizado no interior da subestação abrigada, é alimentado a partir do QGBT da instalação por meio de um disjuntor termomagnético. O transformador de corrente para monitoramento do fator de potência é instalado no barramento alimentador do QGBT, de maneira a monitorar o fator de potência global da instalação.

Os circuitos de proteção, controle e acionamento do sistema de correção são instalados em um quadro de comando metálico, deste quadro derivam os alimentadores dos estágios. Os estágios são implementados utilizando células capacitivas monofásicas ligadas em delta, constituindo bancos trifásicos. Estes bancos são montados em caixas metálicas próprias para esta finalidade e instalados externamente ao painel de comando, em suportes fixados à parede.

As Figuras 29 e 30 apresentam o sistema atualmente instalado. A Figura 31 apresenta o diagrama unifilar do sistema existente.

Figura 29 - Sistema existente - vista externa



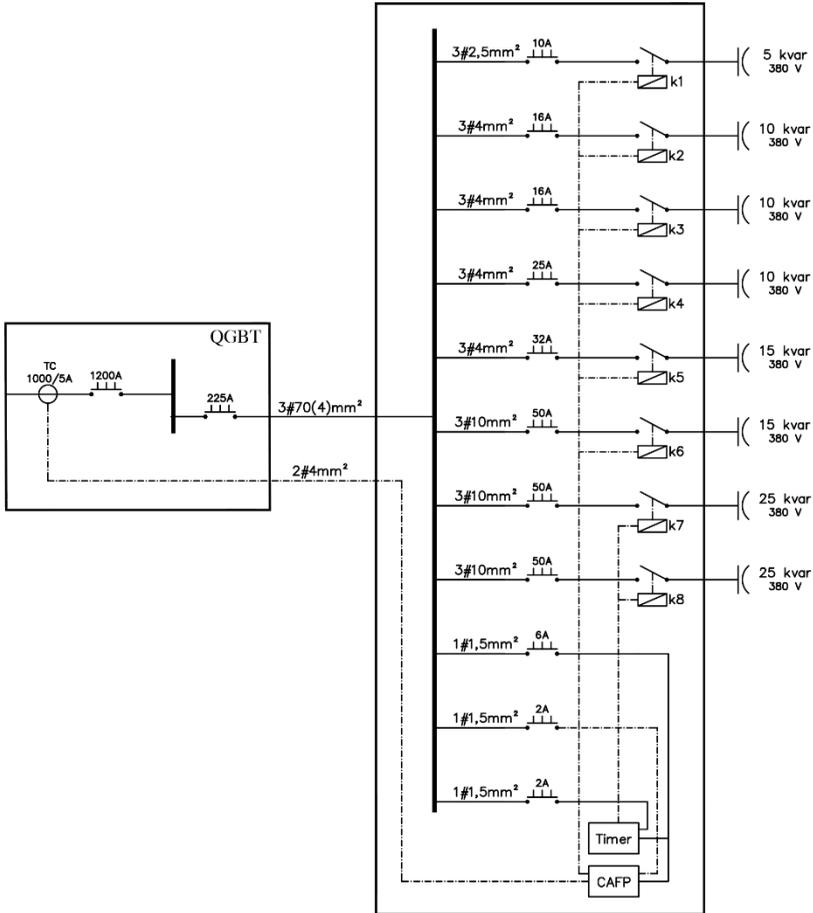
Fonte: acervo pessoal

Figura 30 - Sistema existente - vista interna



Fonte: acervo pessoal

Figura 31 - Diagrama unifilar do sistema existente



Fonte: o autor

3.2 MÉTODOS DE LEVANTAMENTO DE DADOS

Para realização do estudo foram coletadas informações a partir de faturas de energia elétrica, relatório de memória de massa, ficha de proteção da UC e medições *in loco*.

As faturas de energia elétrica utilizadas abrangem os ciclos de faturamento de referência 10/2014 a 05/2019. Estes documentos são de

primordial importância no levantamento dos consumos e dos custos, pois apresentam os valores e as tarifas efetivamente cobrados a cada mês pela concessionária.

O relatório de memória de massa contém as grandezas registradas pelo medidor eletrônico utilizado pela concessionária para medição e faturamento. Neste relatório, as grandezas são apresentadas em intervalos de integralização de 15 minutos. As grandezas presentes no RMM disponibilizado são: tensão, demanda ativa e reativa, consumo ativo e reativo, fator de potência e reativos excedentes. O relatório de memória de massa utilizado neste trabalho, fornecido pela concessionária de energia elétrica, abrange as medições de 01/10/2015 a 16/10/2015.

Vale ressaltar que no período da madrugada (das 23:30 às 05:30, para a concessionária Celesc D.) o medidor monitora a demanda de potência reativa negativa, ou seja, o fornecimento de potência reativa capacitiva para a concessionária. Caso não haja injeção de potência reativa por parte do cliente, o valor de demanda reativa registrado é nulo e o fator de potência é unitário.

A ficha de proteção da unidade consumidora, Anexo C, fornecida pela Celesc D., possui os parâmetros de proteção do ramal alimentador em média tensão da distribuidora, assim como correntes de curto circuito no ponto de conexão do consumidor e a impedância acumulada da rede neste ponto.

As medições *in loco* foram realizadas por meio do aparelho analisador IMS PowerNET P-600. O equipamento realiza leituras dos parâmetros da rede por meio dos sinais de tensão e corrente trifásicos, sendo que, para medição de corrente, são utilizados transformadores de corrente. As grandezas a serem mensuradas, assim como a taxa de amostragem e o intervalo de integração são configuráveis pelo usuário via interface do aparelho ou *software* próprio.

Vale ressaltar que o manual do aparelho analisador informa que a frequência elétrica de alimentação e medição varia de 45 a 70 Hz, portanto os valores apurados são referentes à frequência fundamental.

3.3 MEDIÇÕES *IN LOCO*

As medições apresentadas neste item podem ser distinguidas em duas categorias: medições para dimensionamento e especificação e medições para estudo das consequências técnicas advindas da correção do fator de potência. Os registros foram realizados por meio do aparelho

analisador instalado no barramento alimentador do QGBT, mensurando as grandezas elétricas em baixa tensão de maneira global.

Para o dimensionamento do sistema e especificação dos componentes foram realizadas as medições da potência aparente por fase, nível de tensão e distorção harmônica de tensão e corrente, total e individual.

Estas medições englobam um período de 24 horas com o sistema de correção existente desenergizado, de maneira a registrar o estado natural da instalação elétrica, abrangendo um ciclo diário típico de operação da indústria. Os registros foram realizados das 13:38 de 11/06/2019 às 16:25 de 13/06/2019, com um período de amostragem de 1 segundo e intervalo de registro de 1 minuto.

A Figura 32 apresenta a demanda de potência aparente por fase. Devido à grande quantidade de registros realizados, foi calculada a média para cada intervalo de 15 minutos. Observa-se que a demanda de potência apresenta comportamento similar entre as fases, no entanto, em alguns momentos há discrepância entre estas.

Por exemplo, as 09:15 a fase A registrou 85,1 kVA de demanda, enquanto a Fase B registrou 73,0 kVA, uma diferença de -12,1 kVA, ou -14,0%.

Figura 32 - Potência aparente por fase



Fonte: o autor

A Tabela 4 apresenta os valores mínimo, médio e máximo da tensão de linha registrada no QGBT.

Tabela 4 - Tensão de linha no QGBT

	Mínima	Média	Máxima
Tensão (V)	379,0	385,5	392,3

Fonte: o autor

A Tabela 5 apresenta os valores p95% da distorção harmônica de tensão, por fase.

Tabela 5 - Distorção harmônica de tensão

Ordem harmônica	Fase		
	A	B	C
2	2,20	1,56	1,40
3	1,10	1,10	0,90
4	0,96	0,50	0,50
5	1,16	1,70	1,56
6	0,40	0,30	0,20
7	1,31	1,31	1,20
8	0,40	0,30	0,30
9	0,40	0,30	0,26
10	0,30	0,20	0,20
11	0,86	0,66	0,46
12	0,40	0,26	0,20
13	0,30	0,30	0,40
14	0,20	0,10	0,10
15	0,16	0,20	0,20
16	0,10	0,10	0,10
17	0,40	0,36	0,40
18	0,10	0,16	0,20
19	0,50	0,30	0,36
THDv	3,70	3,96	3,96

Fonte: o autor

A Tabela 6 apresenta os valores p95% da distorção harmônica de corrente, por fase. As medições registraram a distorção em relação à corrente instantânea, portanto, os valores foram recalculados em função de I_L , no caso $I_L = 404 A$, de acordo com o mencionado em [2.5.1.5](#).

Tabela 6 - Distorção harmônica de corrente

Ordem harmônica	Fase		
	A	B	C
3	4,77	3,94	3,48
5	9,28	8,84	11,32
7	6,35	6,35	7,43
9	0,68	0,84	1,00
11	2,76	2,91	2,66
13	1,84	2,34	2,52
15	0,87	0,46	0,93
17	0,93	1,43	1,38
19	1,12	0,68	0,99
TDDi	12,88	12,16	14,83

Fonte: o autor

Conforme já citado, o sistema proposto não será implementado, no entanto, de maneira a possibilitar a verificação dos efeitos expectáveis da correção do fator de potência sobre os parâmetros elétricos da instalação, foram realizadas medições destes parâmetros na condição da correção do fator de potência por meio do sistema existente. Para tal, foram mensuradas as variáveis de tensão, corrente, potência ativa, reativa e aparente e fator de potência.

Neste caso, a fim de detectar as alterações pontuais causadas pelo sistema de correção, os registros foram realizados com um período de amostragem de 200 milissegundos e intervalo de registro de 250 milissegundos.

Visando minimizar o efeito de variações advindas de outros agentes, como variação da demanda ativa ou variação da tensão primária de alimentação, foi adotado o seguinte procedimento: o sistema de correção foi ativado manualmente, conectando determinados estágios, então, o sistema foi subitamente desconectado por meio do disjuntor geral. Foram realizadas quatro medições com diferentes patamares de potência reativa fornecida pelo banco de capacitores.

As Tabelas 7 a 10 apresentam as medições realizadas, do Caso 1 ao Caso 4, cada qual compreendendo três registros anteriores e três registros posteriores à desconexão do sistema. Estes valores serão analisados em [4.1.2](#) e comparados com o proposto em teoria.

Vale ressaltar que estas medições foram realizadas em situações com o patamar de carga variando entre 218 e 240 kVA. A demanda

máxima registrada nas medições dos dois ciclos diários completos de operação foi 279 kVA.

Também, nestas medições o valor do fator de potência natural varia de 0,89 a 0,92 e o corrigido de 0,97 a 0,99.

Tabela 7 - Medições das variáveis elétricas - Caso 1

Hora	FP	P (W)	Q (var)	S (VA)	I (A)	V (V)
15:27:18,50	0,97	194.666	48.484	200.623	299,60	386,37
15:27:18,75	0,97	193.922	48.553	199.915	298,50	386,42
15:27:19,00	0,97	194.825	48.599	200.802	299,83	386,47
15:27:19,25	0,89	192.992	100.385	217.549	326,77	384,22
15:27:19,50	0,89	193.579	99.697	217.751	327,00	384,22
15:27:19,75	0,89	194.227	100.015	218.471	327,93	384,39

Fonte: o autor

Tabela 8 - Medições das variáveis elétricas - Caso 2

Hora	FP	P (W)	Q (var)	S (VA)	I (A)	V (V)
15:29:59,00	0,99	207.081	27.302	208.907	311,33	387,23
15:29:59,25	0,99	206.752	26.879	208.524	310,80	387,11
15:29:59,50	0,99	206.920	26.982	208.707	311,17	387,06
15:29:59,75	0,90	202.573	95.899	224.128	335,67	385,38
15:30:00,00	0,91	205.337	95.322	226.390	338,93	385,43
15:30:00,25	0,91	204.746	95.216	225.809	338,17	385,38

Fonte: o autor

Tabela 9 - Medições das variáveis elétricas - Caso 3

Hora	FP	P (W)	Q (var)	S (VA)	I (A)	V (V)
15:33:29,00	0,99	216.805	18.630	218.004	324,67	387,26
15:33:29,25	0,99	216.805	18.630	218.004	324,67	387,26
15:33:29,50	0,99	216.550	18.271	217.706	324,30	387,21
15:33:29,75	0,91	214.594	94.695	234.578	351,17	385,50
15:33:30,00	0,92	213.817	93.519	233.382	349,67	385,21
15:33:30,25	0,92	213.817	93.519	233.382	349,67	385,21

Fonte: o autor

Tabela 10 - Medições das variáveis elétricas - Caso 4

Hora	FP	P (W)	Q (var)	S (VA)	I (A)	V (V)
15:35:02,75	0,99	222.059	3.852	223.990	333,37	387,68
15:35:03,00	0,99	222.699	4.007	224.685	334,63	387,51
15:35:03,25	0,99	222.752	3.694	224.759	334,50	387,68
15:35:03,50	0,92	218.421	93.658	237.672	355,90	385,38
15:35:03,75	0,92	222.118	93.970	241.199	361,20	385,33
15:35:04,00	0,92	222.118	93.970	241.199	361,20	385,33

Fonte: o autor

3.4 DIMENSIONAMENTO E ESPECIFICAÇÃO

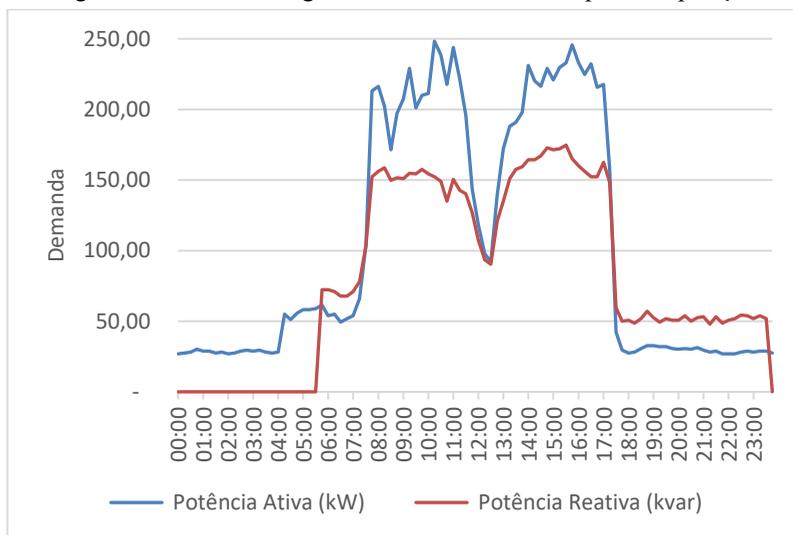
O projeto desenvolvido neste trabalho abrange o dimensionamento do sistema, ou seja, a definição da potência total necessária para adequação do fator de potência, assim como a especificação dos componentes a serem utilizados na execução do projeto.

É imprescindível considerar a modalidade tarifária contratada pela unidade consumidora – tarifa horária verde, uma vez que esta modalidade implica na medição e faturamento de reativos com base horária. Portanto, o sistema deve ser projetado para manter o fator de potência acima do limite mínimo em todos os períodos do dia, inclusive, evitando a injeção de reativos capacitivos na rede no período da madrugada, com a eventual desconexão dos capacitores.

A Figura 33 apresenta a demanda de potência ativa e reativa do dia 09/10/2015, obtida a partir do RMM, representando a curva de carga da instalação ao longo de um ciclo diário típico de operação.

Com base nesta, nota-se que a demanda de potência reativa indutiva é variável ao longo do dia, portanto justifica-se a realização da correção por meio de um BAC, uma vez que este chaveia as saídas de maneira a fornecer a quantidade exata de potência reativa necessária à adequação do fator de potência.

Figura 33 - Curva de carga da indústria em um dia típico de operação



Fonte: o autor

Quanto ao local de instalação, sendo o objetivo principal do projeto a extinção das cobranças relativas ao baixo fator de potência e sendo as cargas variáveis, tanto em relação à potência quanto ao regime de operação, justifica-se a instalação centralizada junto ao QGBT de maneira a realizar a compensação global de reativos.

No entanto, uma vez que a medição para faturamento é realizada em média tensão, o transformador de potência é visto como uma carga pelo sistema de medição da concessionária, já o CAF, instalado no lado de baixa tensão, não considera as potências drenadas pelo transformador. Desta maneira, além do BAC, se faz necessária a adoção da correção do fator de potência do transformador a vazio.

Devido à não existência de cargas indutivas de grande porte, não se justifica a correção individual do fator de potência. Também, a instalação não conta com autogeração de energia, portanto, não são necessárias medidas preventivas relativas a esta situação.

Potência total: A partir dos registros de consumo de energia reativa excedente total (ponta e fora ponta) e fator de potência médio apresentados nas faturas dos ciclos 11/2014 a 10/2015, expostos na Tabela 11, verificou-se que a empresa apresenta um comportamento relativamente constante quanto ao consumo de energia reativa excedente ao longo do ano, não apresentando característica de sazonalidade.

Tabela 11 - Consumo reativo excedente total e fator de potência médio – 11/2014-10/2015

Ref.	UFER TOTAL	FP médio
11/2014	13.940	0,80
12/2014	12.548	0,82
01/2015	12.142	0,81
02/2015	12.246	0,81
03/2015	12.391	0,80
04/2015	14.812	0,78
05/2015	14.695	0,75
06/2015	14.820	0,76
07/2015	14.651	0,76
08/2015	15.767	0,76
09/2015	13.469	0,77
10/2015	13.760	0,75
Média	13.770	0,78

Fonte: o autor

Ademais, o ciclo 10/2015 registrou um consumo de energia reativa excedente próximo à média anual e um fator de potência médio inferior à média anual. Portanto, foi considerado viável o dimensionamento do sistema com base nas grandezas registradas no ciclo 10/2015, neste caso, as grandezas apresentadas pelo RMM do referido ciclo.

Com base nos dados de demanda de potência ativa e reativa constantes no RMM foi calculado o fator de potência para todos os intervalos de 15 minutos compreendidos por este. Então, definiu-se o fator de potência desejado em 0,95 e, utilizando a Eq. (36), calculou-se a necessidade de injeção de potência reativa capacitiva para adequação do fator de potência em cada intervalo.

Conforme apresentado em teoria, o sistema deve ser dimensionado de maneira a manter o fator de potência dentro dos limites estabelecidos ao longo de toda a curva de operação da instalação. Portanto, a fim de atender a este requisito, a potência total deve ser especificada de maneira a suprir, inclusive, o intervalo que demanda o maior montante de potência reativa capacitiva para adequação do fator de potência. Para os demais intervalos, o CAFR comuta os estágios de maneira a fornecer somente a potência reativa capacitiva necessária.

Os cinco intervalos que demandaram a maior injeção de reativo capacitivo são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Máximas potências reativas capacitivas necessárias para adequação do fator de potência a 0,95

Data	Hora	Demanda	Demanda	FP	Potência
		Ativa (kW)	Reativa (kvar)		Banco (kvar)
15/10/2015	15:15	230,40	186,88	0,777	111,15
15/10/2015	15:30	238,72	181,12	0,797	102,66
13/10/2015	15:15	184,96	162,56	0,751	101,77
13/10/2015	15:30	210,56	169,60	0,779	100,39
02/10/2015	15:30	193,92	163,20	0,765	99,46

Fonte: o autor

Dentre estes valores, definiu-se então a máxima potência reativa capacitiva calculada como a especificação da potência mínima a ser fornecida pelo sistema de compensação de reativos, 111,15 kvar.

Para fins de comparação e observação da variabilidade da necessidade de compensação, a Tabela 13 apresenta os valores mínimo, médio e máximo de potência reativa capacitiva calculados para adequação do fator de potência a 0,95.

Tabela 13 - Potência reativa capacitiva necessária para adequação do fator de potência a 0,95

	Mínima	Média	Máxima
Potência Banco (kvar)	28,68	56,42	111,15

Fonte: o autor

3.4.1 Banco Automático de Capacitores

Nesta seção serão especificados os componentes a serem utilizados na implementação do banco de capacitores, seguindo as recomendações e parâmetros de especificação apresentados em teoria.

Uma vez que o sistema elétrico brasileiro opera em frequência nominal de 60 Hz, todos os componentes do sistema são especificados nesta frequência.

Controle: O controle do banco automático de capacitores será realizado por meio de um controlador automático de fator de potência (CAFP) trifásico de 06 estágios, comutados via relés.

Optou-se pela utilização de controlador com monitoramento trifásico devido à característica de rede trifásica não equilibrada observada nas medições realizadas, apresentadas na Figura 32, garantindo uma correção mais efetiva. Além disto, o controlador pode também ser utilizado para monitoramento geral da rede elétrica.

A opção por 06 estágios, em vez de 12, se fez devido à potência total do sistema ser moderada. A distribuição da potência total pelos 06 estágios resulta na potência média de 18,52 kvar por estágio, dentro do limite de potência recomendado para cada estágio.

Já a característica de saídas comutadas por relés foi escolhida uma vez que o projeto utilizará contadores para o acionamento dos estágios, e não módulos tiristorizados.

Além do CAFP, o sistema de controle trifásico necessita de três TCs para obtenção dos sinais de corrente. Estes devem ser especificados de acordo com a corrente nominal do transformador, de maneira a realizar a leitura livre de erros em todos os patamares de carga. Assim, estes componentes são especificados na relação de transformação 1.200/5A.

Células capacitivas: As células utilizadas neste projeto serão do tipo trifásica, tensão nominal de 440 V, frequência de 60 Hz, potências nominais de 15 e 30 kvar e classe de temperatura -5/C.

A opção por células trifásicas baseia-se na facilidade de instalação e manutenção, assim como no tamanho reduzido, se comparado a bancos formados por células monofásicas. Desta maneira, é possível implementar o sistema em um único painel contendo todos os componentes.

A tensão de linha nominal do barramento de baixa tensão é de 380 V, já a tensão medida apresentou valores mínimo, médio e máximo de 379,0, 385,5, e 392,3 V, respectivamente. Sobre estes valores, é estimada a influência do sistema, aplicando a Eq. (34)

$$\Delta V(\%) = \frac{111.150 \times 0,00957}{385,5^2} \times 100$$

$$\Delta V(\%) = 0,72$$

Considerando o fornecimento da potência reativa conforme dimensionamento, 111,15 kvar, estima-se que os valores mínimo, médio

e máximo de tensão de linha no barramento de baixa tensão possam atingir os valores apresentados na Tabela 14. Desta maneira, as células são especificadas na tensão nominal de 440 V.

Tabela 14 – Valores estimados máximo, médio e mínimo de tensão de linha no barramento de baixa tensão

	Mínimo	Médio	Máximo
Tensão (V)	381,7	388,3	395,1

Fonte: o autor

Apesar da sobretensão máxima estimada sobre o valor nominal ser de pequena magnitude ($395,1\text{ V}/380\text{ V} = 1,040\text{ p.u.}$), a especificação da tensão do capacitor acima da tensão nominal da rede acarreta em uma maior suportabilidade contra sobrecargas, conseqüentemente um menor custo de manutenção e menor custo advindo de possíveis falhas no sistema.

A potência das células é definida de maneira a suprir a potência total previamente dimensionada, utilizando-se valores comerciais para cada célula. Porém, devido à alimentação em tensão inferior à tensão nominal das células, se faz necessário o cálculo da redução da potência fornecida, conforme Eq. (42).

$$111,15 = \left(\frac{380}{440}\right)^2 \times \frac{60}{60} \times Q_n$$

$$111,15 = 0,746 \times Q_n$$

$$Q_n = 149,02\text{ kvar}$$

A alimentação de capacitores de tensão nominal de 440 V em redes de 380 V acarreta em uma redução a 74,6% da potência nominal. Sendo a potência efetiva total necessária igual a 111,15 kvar, tem-se que a potência nominal das células (em 440 V) deve somar, no mínimo, 149,02 kvar.

Sendo o banco formado por 06 estágios, serão instalados 04 estágios de 30 kvar e 02 estágios de 15 kvar, de maneira a possibilitar o ajuste fino da potência fornecida. Assim, a potência nominal do BAC é de 150 kvar em 440 V, ou 112 kvar em 380 V.

Os capacitores de potência nominal 30 e 15 kvar em 440V fornecerão, em 380 V, 22,4 e 11,2 kvar, respectivamente. Estes valores serão utilizados para o dimensionamento dos demais componentes do

sistema, uma vez que são os valores efetivos de operação dos capacitores nesta situação.

Foi utilizado o valor nominal da tensão de linha, ao invés dos valores de sobretensão apresentados na Tabela 14, pois assim tem-se um cenário mais conservador para o dimensionamento. Caso fossem utilizados os valores de sobretensão, poder-se-ia subdimensionar o sistema em situações de tensão nominal.

Os capacitores são especificados com a categoria de temperatura “-5/C”, podendo ainda ser utilizados capacitores com limites de temperatura mais abrangentes. Segundo ABNT (2009), a classificação de temperatura máxima “C” (50° C) é conveniente para a maioria das aplicações em condições tropicais. Ademais, as temperaturas mínima e máxima informadas em dados climatológicos para a cidade de Blumenau são de 12 e 29 °C, respectivamente (WEATHERSPARK.COM, 2019).

Reatores de dessintonia: o presente projeto não exige a utilização de reatores de dessintonia, uma vez que a instalação não apresenta harmônicas de elevada magnitude próximas às frequências de ressonância calculadas.

A partir da definição da potência reativa dos estágios do sistema, pode-se proceder ao cálculo da frequência de ressonância para cada possível combinação de estágios conectados, ou seja, para cada possível valor de potência reativa fornecida pelo BAC, conforme a Eq. (41).

A Tabela 15 apresenta a ordem da frequência de ressonância, em p.u. da frequência fundamental, para os respectivos valores de potência reativa fornecida pelo BAC.

Observa-se que há situações em que a frequência de ressonância se aproxima da 13^a e da 11^a harmônica, no entanto, conforme apresentado nas Tabelas 5 e 6, a taxa de distorção registrada nestas frequências não é de elevada magnitude, situando-se abaixo dos limites recomendados apresentados em [2.5.1.5](#).

Para o comparativo dos valores da distorção de corrente em relação aos limites recomendados foram utilizados os valores da linha “50 < I_{SC}/I_L < 100”, uma vez que a corrente de curto circuito no ponto de conexão (I_{SC}) é igual a 21,05 kA e a corrente de demanda máxima (I_L) é igual a 404 A e, portanto, $I_{SC}/I_L = 52,1$.

Tabela 15 – Possíveis valores de potência reativa do banco e respectivas ordens da frequência de ressonância

Potência Reativa (kvar)	Ordem de ressonância
11,20	35,17
22,40	24,87
33,60	20,31
44,80	17,58
56,00	15,73
67,20	14,36
78,40	13,29
89,60	12,43
100,80	11,72
112,00	11,12

Fonte: o autor

Proteção: Serão utilizados disjuntores termomagnéticos, tipo DIN, com corrente nominal de 63 e 32 A, para os estágios de 22,4 e 11,2 kvar, respectivamente, e capacidade de interrupção de 10 kA em 380 V.

O dispositivo de proteção de cada estágio é especificado conforme a corrente efetiva do estágio, aplicado um fator de sobrecorrente de 150%. A corrente nominal de cada disjuntor é calculada conforme a Eq. (53), adaptada a partir da Eq. (8), considerando que a potência do capacitor é puramente reativa.

$$I_{Disj} = 1,5 \times \frac{Q}{\sqrt{3} \times U_L} \quad (53)$$

$$I_{Disj(22,4)} = 1,5 \times \frac{22,4 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380}$$

$$I_{Disj(22,4)} = 51,0 \text{ A}$$

$$I_{Disj(11,2)} = 1,5 \times \frac{11,2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380}$$

$$I_{Disj(11,2)} = 25,5 \text{ A}$$

Dos valores calculados, especifica-se os valores de corrente nominal imediatamente superiores disponíveis no mercado.

Quanto à capacidade de interrupção, esta é especificada considerando-se o cascadeamento dos disjuntores parciais com o disjuntor geral de alimentação do sistema. Cascadeamento é “associação de dois disjuntores em série para proteção contra curto-circuito e sobrecargas” (WEG, 2019, p. 54).

Portanto, a capacidade de interrupção do disjuntor a jusante (parcial) pode ser inferior à corrente de curto circuito no ponto de conexão, assumindo que o disjuntor a montante (geral) possua capacidade de interrupção adequada, neste caso, superior a 21,05 kA.

Acionamento: O acionamento dos estágios será feito por contatores específicos para manobra de capacitores, categoria AC-6b, dotados de resistores de pré-carga para atenuação das correntes transitórias de manobra. Estes serão do tipo trifásico e terão capacidade de acionamento de 25 e 15 kvar em 380 V, para os estágios de 22,4 e 11,2 kvar, respectivamente.

Os contatores foram dimensionados de acordo com o catálogo do fabricante, Anexo D (WEG, 2009, p. 25), com base na potência nominal de manobra em função da tensão e temperatura de operação.

Alimentação: Serão utilizados condutores tipo unipolar de cobre, isolado em PVC, com seção de 16 e 6 mm², para os estágios de 22,4 e 11,2 kvar, respectivamente. Os condutores serão instalados em trifólio, derivando do barramento de alimentação do BAC, passando pelos dispositivos de proteção e acionamento e alimentando os estágios.

Os condutores de alimentação também foram especificados com o fator de 150% da corrente efetiva, ainda, a capacidade de condução deve ser superior à corrente nominal do dispositivo de proteção, de maneira que este dispositivo proteja os condutores contra sobrecargas. A especificação é baseada na NBR 5410 (ABNT, 2004), considerando o método de instalação “5” da Tabela 33 da referida norma.

3.4.2 Correção do transformador a vazio

O controle do estágio destinado à compensação de reativos do transformador a vazio será realizado por meio de um programador horário digital (timer). Este dispositivo será programado de maneira a energizar o estágio nos períodos em que ocorre o faturamento de energia reativa indutiva, e desenergizar nos períodos em que é faturada a injeção de corrente reativa capacitiva no sistema. Portanto, será programado para acionamento todos os dias, das 05:30 às 23:30.

Assim, além de realizar a compensação de reativos do transformador nos horários de baixo carregamento, este também fornecerá reativos à instalação para compensação global nos períodos de funcionamento normal da empresa.

A adição deste estágio adicionará potência reativa ao sistema (o qual já foi dimensionado para adequar o fator de potência durante toda a curva de operação), no entanto, esta adição de potência acarreta em uma margem de garantia no dimensionamento e uma margem de expansão para a carga da empresa, sem que seja necessária a adição de capacitores.

A placa do transformador que atende a fábrica não apresenta os dados necessários para o cálculo do capacitor dedicado à correção do fator de potência a vazio (perdas a vazio e corrente de excitação). Portanto, este capacitor foi dimensionado conforme Figura 18. Sendo o transformador de 750 kVA, a potência reativa necessária para correção do fator de potência a vazio foi definida em 10 kvar.

De maneira análoga ao procedimento de especificação dos componentes do BAC, são realizadas as especificações para este estágio.

Células capacitivas: Será utilizada uma célula do tipo trifásica, tensão nominal de 440 V, frequência de 60 Hz, potência nominal de 15 kvar e classe de temperatura -5/C. Esta célula, conectada em rede de 380 V fornecerá 11,2 kvar, atendendo ao dimensionamento realizado.

Proteção: Será utilizado um disjuntor termomagnético, tipo DIN, com corrente nominal de 32 A e capacidade de interrupção de 10 kA em 380 V.

Acionamento: O acionamento será realizado por um contator trifásico, AC-6b, com capacidade de acionamento de 15 kvar em 380 V

Alimentação: Serão utilizados condutores tipo unipolar de cobre, isolado em PVC, com seção de 6 mm².

3.4.3 Sistema proposto

O sistema proposto, portanto, é constituído pelo BAC e pelo estágio para compensação do transformador a vazio, totalizando uma potência instalada nominal de 165 kvar em 440 V, ou então, 123,2 kvar em 380 V.

De maneira a centralizar o sistema e simplificar a instalação, o sistema foi projetado para instalação em um painel de comando único, contendo todos os componentes relativos ao sistema, com exceção dos TCs e do disjuntor de proteção geral, instalados no QGBT.

Proteção: A proteção do sistema será feita por um disjuntor termomagnético, tipo caixa moldada, com corrente nominal de 300 A e capacidade de interrupção de 35 kA em 380 V, este será alimentado a partir do barramento geral do QGBT.

$$I_{Disj(123,2)} = 1,5 \times \frac{123,2 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 380}$$

$$I_{Disj(123,2)} = 280,8 \text{ A}$$

Já a proteção dos circuitos de controle e comando será realizada por meio de disjuntores termomagnético, tipo DIN, com corrente nominal de 6 A e capacidade de interrupção de 10 kA em 380 V.

Condutor: O condutor para alimentação do sistema será do tipo cabo unipolar de cobre, isolação EPR, seção 120 mm². Este será instalado em canaleta aberta no solo, derivando do disjuntor de proteção geral no QGBT e alimentando o barramento interno do sistema proposto. A especificação é baseada na NBR 5410 (ABNT, 2004), considerando o método de instalação “42” da Tabela 33 da referida norma.

Já os condutores dos circuitos de sinalização e controle são especificados conforme Tabela 47 da NBR 5410, sendo estes condutores unipolares isolados de cobre, isolamento PVC, com seção mínima igual a 0,50 mm².

Quadro de comando: O quadro de comando utilizado para comportar o sistema terá as dimensões 120 x 80 x 35 cm. Este item foi dimensionado por meio de simulação da montagem do sistema em um programa computacional.

Controle de temperatura: O quadro será refrigerado por meio de um sistema de circulação de ar com fluxo mínimo de 65,40 m³/h. Serão instaladas duas aberturas para ventilação na porta do quadro, uma na parte inferior e uma na parte superior, de maneira a proporcionar o fluxo de ar em todos os componentes internos.

O controle deste sistema será realizado por meio de um termostato, ajustado para ativar a ventilação quando a temperatura interna atingir 40 °C.

Devido à montagem dos estágios de maneira interna ao quadro de comando, se fez necessária a verificação da temperatura de operação interna do quadro.

As perdas internas são estimadas conforme Eq. (49).

$$P_{perdas} = 2,5 \times 123,2$$

$$P_{perdas} = 308 \text{ W}$$

A superfície exposta do quadro, considerando sua fixação na parede é dada pela Eq. (54), onde L , A e P são as dimensões de largura, altura e profundidade do quadro, em metros.

$$S = (L \times A) + (2 \times L \times P) + (2 \times P \times A) \quad (54)$$

$$S = (0,8 \times 1,2) + (2 \times 0,8 \times 0,35) + (2 \times 0,35 \times 1,2)$$

$$S = 2,36 \text{ m}^2$$

A elevação de temperatura em um painel totalmente fechado é dada pela Eq. (47). Assim, a elevação de temperatura é igual a:

$$T_{rise} = \frac{308}{5,5 \times 2,36}$$

$$T_{rise} = 23,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

Considerado a temperatura ambiente máxima de $35,0 \text{ }^\circ\text{C}$, tem-se a temperatura final dentro do painel igual a $58,7 \text{ }^\circ\text{C}$, acima do limite máximo de operação das células capacitivas.

Assim, é necessária a utilização de um método de controle de temperatura. O fluxo de ar mínimo necessário pode ser calculado limitando a elevação de temperatura em $15 \text{ }^\circ\text{C}$, ou seja, limitando a temperatura final no painel a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, e igualando a Eq. (48) a este valor.

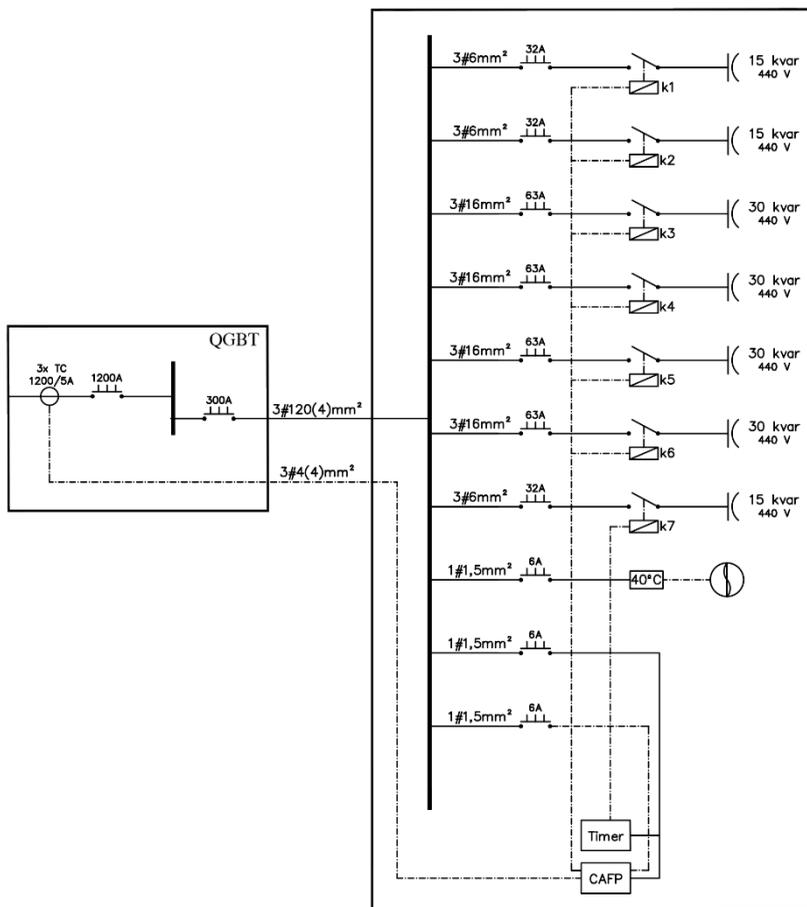
$$T_{rise} = \frac{308 \times 0,053}{F} = 15$$

$$F = 1,09 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$F = 65,40 \text{ m}^3/\text{h}$$

A Figura 34 apresenta o diagrama unifilar do sistema proposto.

Figura 34 - Diagrama unifilar do sistema proposto



Fonte: o autor

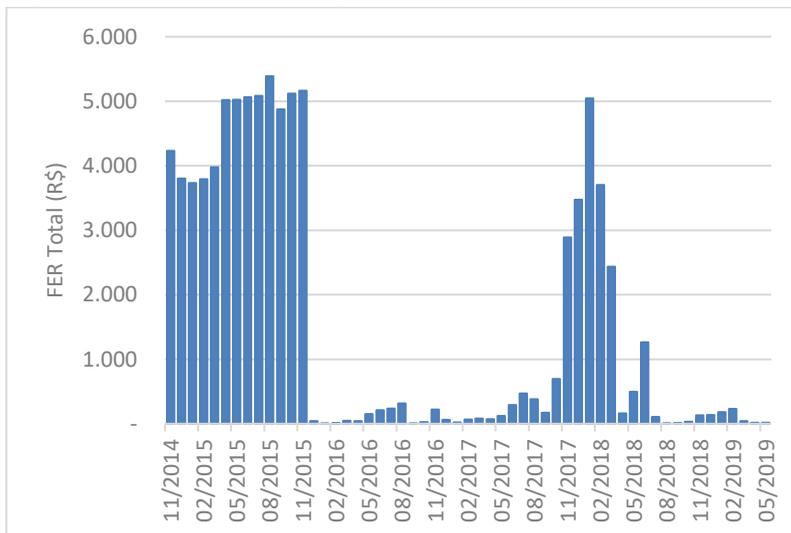
3.5 CUSTOS

Esta seção será apresentada em duas subseções. A primeira demonstrará o histórico real de cobranças incidentes nas faturas de 11/2014 a 05/2019, provenientes do faturamento de energia reativa excedente, uma vez que o sistema existente não extinguiu tais cobranças. A segunda subseção apresentará os custos e considerações referentes ao projeto proposto que embasarão o estudo de viabilidade financeira a ser desenvolvido no capítulo seguinte.

3.5.1 Histórico real

A Figura 35 apresenta os valores referentes ao faturamento de energia reativa excedente (FER) total registrados nas faturas de 11/2014 a 05/2019.

Figura 35 - Faturamento de energia reativa excedente total - 11/2014-05/2019



Fonte: o autor

Os valores registrados de 11/2014 a 11/2015, período no qual o fator de potência não estava sendo corrigido, totalizam R\$ 60.250,60, representando uma média mensal de R\$ 4.635,42.

Ao final do ciclo de faturamento 11/2015 foi implementado o sistema de correção de fator de potência atual, a um custo total de R\$ 11.900,00. No ciclo de faturamento seguinte, de referência 12/2015, o FER total somou R\$ 42,66.

Do mês 12/2015 a 04/2016 o departamento responsável da empresa encaminhou as faturas para acompanhamento técnico da empresa na qual o autor trabalha. Nesse período, houve um consumo residual de energia reativa excedente, resultando em um FER total de R\$ 143,41, uma média mensal de R\$ 28,68.

Do ciclo 05/2016 ao ciclo 02/2018 as faturas deixaram de ser encaminhadas para acompanhamento. Neste período houve o faturamento de energia reativa excedente em diversos meses, inteirando R\$ 18.695,93.

Em 02/2018, após solicitação, a empresa em estudo encaminhou novamente a fatura para análise. Nesta, detectou-se um ônus de R\$ 3.701,29. Em visita técnica, constatou-se que o disjuntor de alimentação do sistema encontrava-se desarmado, portanto, o sistema estava completamente desenergizado. Além disto, um dos capacitores apresentava características de curto circuito interno, sendo a provável causa do desligamento do disjuntor geral. A manutenção foi realizada e, a partir de então, a empresa passou a enviar as faturas mensalmente para acompanhamento.

De 04/2018 a 06/2018, o FER total somou R\$ 1.921,29, R\$ 640,43 mensais. Em inspeção realizada foram detectados dois bancos de capacitores danificados, não fornecendo a potência nominal. Também foi analisado o nível de tensão, que apresentava sobretensões de 1,076 p.u. (409 V), este elevado nível de tensão foi considerado a provável causa dos defeitos detectados. Em 07/2018 foi executada a alteração do *tap* do transformador, de maneira a adequar o nível de tensão a valores aceitáveis.

No período de 11/2018 a 02/2019, houve a cobrança total de R\$ 671,39 referente a reativos. Após visita técnica, verificou-se que o dispositivo de acionamento (contator) de um dos bancos do estágio semiautomático apresentava os contatos colados, ou seja, este banco estava energizado ininterruptamente. Este fornecimento ininterrupto de energia reativa resultava na injeção de capacitivos à rede da concessionária no período da madrugada, incorrendo nos respectivos ônus.

O contator defeituoso foi removido do sistema e, a partir de então, o FER mensal médio foi de R\$ 24,31.

De maneira a apresentar mais sucintamente os resultados financeiros, desconsiderando os maus funcionamentos descritos acima, a Tabela 16 e a Figura 36 apresentam os valores de faturamento de energia reativa total e de fator de potência médio registrados nas 12 faturas precedentes e nas 12 faturas subsequentes à instalação do sistema existente.

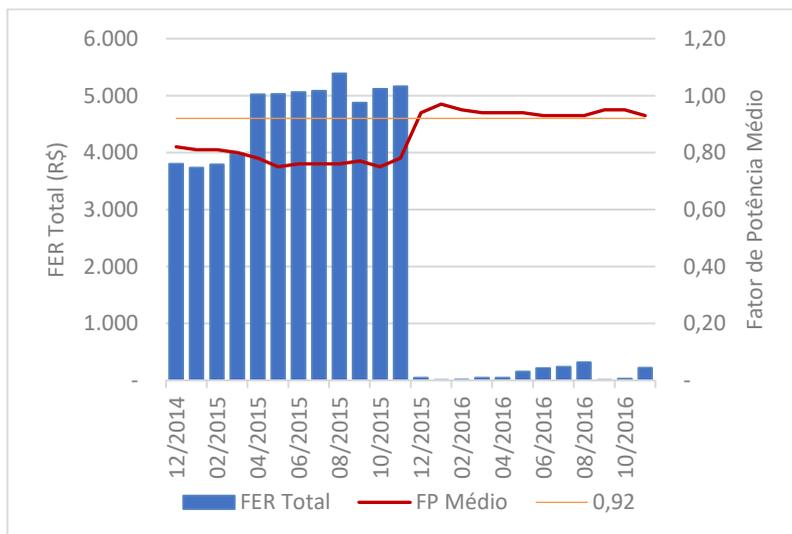
O valor médio mensal de FER total antes da implementação da correção era R\$ 4.669,25, após a correção, este valor foi reduzido a R\$ 109,07, representando uma redução de 97,7%. O fator de potência médio apresentava uma média mensal de 0,78, após a correção este índice foi elevado a 0,94.

Tabela 16 - Faturamento de energia reativa total e fator e potência médio – 12/2014 - 11/2016

Mês	FER Total (R\$)	FP Médio	Mês	FER Total (R\$)	FP Médio
12/2014	3.800,87	0,82	12/2015	42,66	0,94
01/2015	3.731,89	0,81	01/2016	2,15	0,97
02/2015	3.792,49	0,81	02/2016	11,33	0,95
03/2015	3.974,53	0,80	03/2016	44,51	0,94
04/2015	5.018,46	0,78	04/2016	42,76	0,94
05/2015	5.024,95	0,75	05/2016	151,49	0,94
06/2015	5.061,31	0,76	06/2016	212,41	0,93
07/2015	5.085,56	0,76	07/2016	235,37	0,93
08/2015	5.385,49	0,76	08/2016	315,48	0,93
09/2015	4.872,75	0,77	09/2016	2,54	0,95
10/2015	5.117,73	0,75	10/2016	27,34	0,95
11/2015	5.164,96	0,78	11/2016	220,81	0,93
Média	4.669,25	0,78	Média	109,07	0,94

Fonte: o autor

Figura 36 - Faturamento de energia reativa total e fator e potência médio – 12/2014 - 11/2016



Fonte: o autor

3.5.2 Projeto proposto

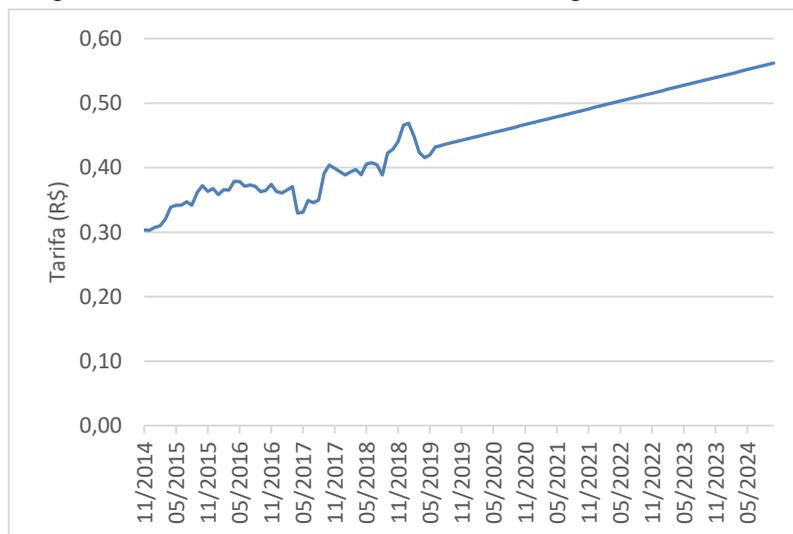
A vida útil do projeto foi definida em 10 anos, de 11/2014 a 10/2024. Para este período, foram projetados os custos relativos a dois cenários distintos, o primeiro considerando a não implementação do sistema proposto e o segundo considerando a implementação.

Para a projeção do cenário futuro considerando a não implementação da correção, foram utilizados os consumos de reativos excedentes totais (ponta e fora ponta) registrados nas faturas de referência 11/2014 a 10/2015, período de um ano no qual a instalação não contava com qualquer compensação de reativos. Estes consumos, apresentados na Tabela 11, foram projetados para o horizonte de tempo do projeto, assumindo a não alteração do comportamento da carga.

Sobre estes consumos projetados foram aplicadas as respectivas tarifas. Até o mês 05/2019 foram utilizadas as tarifas constantes nas faturas disponíveis, de 06/2019 ao final da vida útil do projeto foram aplicadas tarifas projetadas com base no histórico de tarifas. Os valores utilizados são ilustrados na Figura 37.

Para a determinação das tarifas futuras foi realizada a regressão linear sobre o histórico disponível e, a partir da equação obtida, foram calculadas as tarifas até o final da vida útil do projeto.

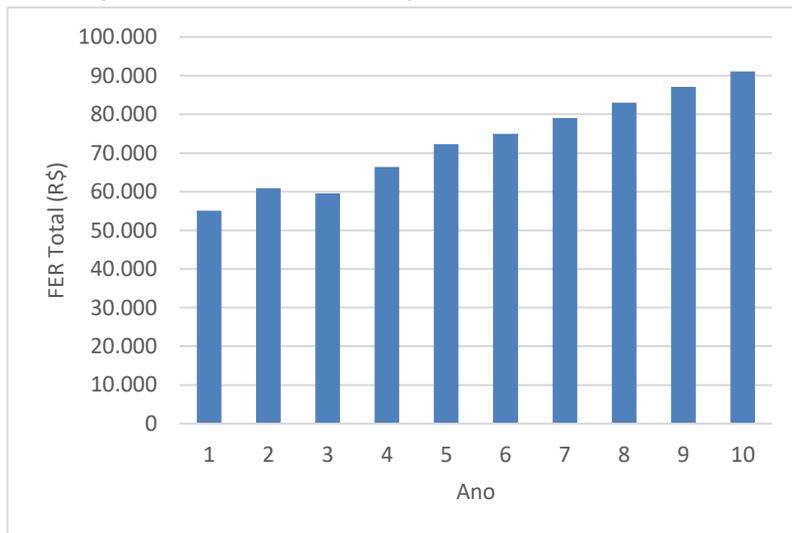
Figura 37 - Tarifa incidente sobre o consumo de energia reativa excedente



Fonte: o autor

A Figura 38 apresenta o montante de faturamento de energia reativa excedente total (FER total, em Reais) anualizado, para o horizonte de tempo do projeto.

Figura 38 - Faturamento de energia reativa excedente anualizado



Fonte: o autor

Já no cenário considerando a implementação do sistema proposto, supõem-se que a correção do fator de potência é ideal, ou seja, não há cobranças referentes ao consumo de reativos excedentes. Neste cenário, os custos são advindos do custo de implementação – projeto, material e mão de obra – e custo de manutenção.

O custo da implementação foi levantado junto à empresa na qual o autor trabalha, conforme Apêndice A. Os valores englobam a elaboração de projeto, fornecimento de todo o material necessário, montagem, instalação e *start up* do sistema.

Considerando a execução do projeto em 10/2014, os custos de implementação foram deflacionados pelo índice IPCA para a referida data, conforme Apêndice B. Estes serão os valores de investimento inicial utilizados para a análise de viabilidade financeira.

A Tabela 17 apresenta os custos de implementação, discriminados em material e mão de obra, tanto no tempo presente quanto deflacionados para 10/2014 (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2019a).

Tabela 17 - Custo de implementação do sistema proposto

	Presente		10/2014 ¹	
Material	R\$	17.136,94	R\$	13.118,62
Mão de obra	R\$	2.800,00	R\$	2.143,45
Total	R\$	19.936,94	R\$	15.262,07

¹ Valores deflacionados pelo IPCA 05/2019-10/2014

Fonte: o autor

O custo de manutenção foi estimado em 5% a.a. sobre o valor de aquisição do equipamento, desconsiderando a mão de obra, em parcelas anuais. Assim, tem-se um custo de manutenção de R\$ 655,93 incidente a cada 12 meses.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA

Conforme descrito anteriormente, o sistema projetado neste trabalho não será implementado, portanto, a análise de viabilidade técnica será realizada sobre o sistema existente.

4.1.1 Dimensionamento

Será realizada a análise do dimensionamento do sistema existente, comparando-o com o dimensionamento projetado apresentado em na seção [3.4](#), em relação à potência reativa total e potência reativa para compensação do transformador a vazio.

Também, será realizado um comparativo entre valores de fator de potência registrados anteriormente e posteriormente à instalação do sistema existente, de maneira a verificar a adequação do fator de potência proporcionada por este.

A verificação das especificações técnicas dos componentes utilizados no sistema existente foge do escopo deste trabalho, no entanto, recomenda-se a verificação conforme premissas de especificação apresentadas em [2.5.2](#).

Tabela 18 - Potência reativa do sistema existente e potência reativa projetada

	Potência reativa (kvar)	
	Existente	Projetado
Total	115,00	111,15
Semiautomático	50,00	10,00

Fonte: o autor

Na Tabela 18, observa-se que o dimensionamento da potência total e da potência do estágio para compensação do transformador a vazio atendem aos valores estipulados em projeto.

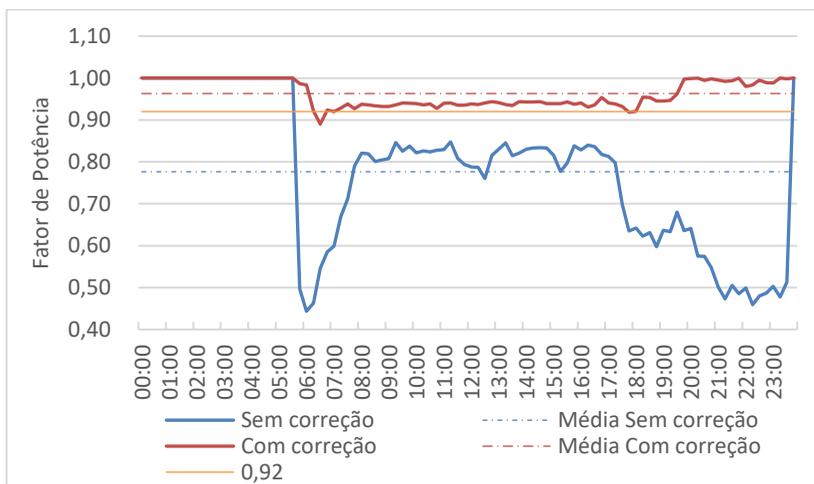
Apesar da potência do estágio semiautomático existente ser muito superior ao projetado, isto não deve ocasionar adversidades no funcionamento do sistema e na correção do fator de potência como um todo. Porém, deve-se assegurar que este estágio seja devidamente controlado por meio do controlador horário, de maneira a não injetar reativos na rede da concessionária no período da madrugada.

Conclui-se, portanto, que o sistema atualmente instalado atende aos requisitos de projeto, este deve realizar a correção do fator de

potência de maneira adequada e não são necessárias alterações no seu dimensionamento e configuração básica.

A Figura 39 apresenta um comparativo entre os fatores de potência registrados nos RMM nos dias 15/10/2015 e 15/12/2015, respectivamente antes e depois da implementação do sistema existente.

Figura 39 - Comparativo do fator de potência horário antes e depois da correção – 15 out 2015 / 15 dez 2015



Fonte: o autor

É verificada a elevação do fator de potência durante todo o ciclo diário operacional da empresa, inclusive, este é mantido acima do limite estabelecido em regulamentação em quase todo o intervalo analisado, exceto por uma medição que registra 0,89, às 06:30 do dia 15/12/2019.

Os valores médios diários apresentados nas situações antes e depois da instalação do sistema são, respectivamente, 0,78 e 0,96.

Por fim, conforme exposto na Tabela 16, os fatores de potência médios mensais registrados nos 12 meses anteriores à implementação do sistema variam de 0,75 a 0,82, enquanto nos 12 meses posteriores, estes índices variam de 0,93 a 0,97.

Portanto, os resultados apresentados na Figura 39 e na Tabela 16 corroboram a adequação do dimensionamento do sistema existente, atendendo ao objetivo do projeto.

No entanto, apesar do dimensionamento adequado do sistema, a empresa apresenta um histórico de cobranças relativas ao baixo fator de potência, conforme apresentado em [3.5.1](#). A existência destas cobranças

reitera a importância do acompanhamento das faturas e da manutenção do sistema de correção.

Por exemplo, as multas incidentes durante o período em que as faturas não foram encaminhadas para acompanhamento somaram R\$ 18.695,93, excedendo o valor de implementação do sistema. Caso o acompanhamento estivesse sendo realizado, as alterações no consumo de reativos excedentes seriam detectadas no primeiro ciclo de faturamento anormal e medidas corretivas seriam adotadas, minimizando o prejuízo.

Já os defeitos atribuídos ao elevado nível de tensão poderiam ser evitados com a manutenção do nível de tensão em patamares adequados. Ou, então, com a especificação preventiva da tensão nominal das células superior à tensão nominal do barramento, garantindo maior suportabilidade

Por fim, o defeito ocorrido no contator referente a um dos bancos do estágio semiautomático ilustra a necessidade de desconexão dos capacitores no período da madrugada, a fim de evitar a injeção de reativos na rede da concessionária.

4.1.2 Consequências técnicas

A análise das consequências técnicas advindas da correção do fator de potência sobre as grandezas elétricas será realizada com base nas medições apresentadas na seção [3.3](#), Tabelas 7 a 10.

As Tabelas 19 a 22 apresentam os valores médios destas medições, discriminando entre as situações do sistema de correção desligado e ligado, assim como a variação absoluta (Δ) e a variação relativa percentual ($\Delta\%$) das medidas.

As grandezas apresentadas são: fator de potência (FP), potência ativa (P), potência reativa (Q), potência aparente (S), corrente ao quadrado (I^2) e tensão de linha (V).

Optou-se pela representação do valor da corrente ao quadrado I^2 , ao invés da corrente, I, pois as perdas por efeito Joule são proporcionais a I^2 . Assim, torna-se possível a comparação entre a redução das perdas estimada a partir das medições e a redução estimada conforme teoria.

Tabela 19 - Variação das grandezas elétricas com a correção do fator de potência – Caso 1

	FP	P (W)	Q (var)	S (VA)	I ² (A ²)	V (V)
Desligado	0,890	193.599	100.032	217.924	107.082	384,28
Ligado	0,970	194.471	48.545	200.447	89.586	386,42
Δ	n/a	0.872	-51.487	-17.477	-17.495	2,14
Δ%	n/a	0,45%	-51,47%	-8,02%	-16,34%	0,56%

Fonte: o autor

Tabela 20 - Variação das grandezas elétricas com a correção do fator de potência – Caso 2

	FP	P (W)	Q (var)	S (VA)	I ² (A ²)	V (V)
Desligado	0,907	204.219	95.479	225.442	113.967	385,40
Ligado	0,990	206.917	27.054	208.712	96.783	387,14
Δ	n/a	2.699	-68.425	-16.730	-17.184	1,74
Δ%	n/a	1,32%	-71,66%	-7,42%	-15,08%	0,45%

Fonte: o autor

Tabela 21 - Variação das grandezas elétricas com a correção do fator de potência – Caso 3

	FP	P (W)	Q (var)	S (VA)	I ² (A ²)	V (V)
Desligado	0,917	214.076	93.911	233.780	122.619	385,31
Ligado	0,990	216.720	18.510	217.905	105.331	387,24
Δ	n/a	2.644	-75.401	-15.876	-17.288	1,94
Δ%	n/a	1,23%	-80,29%	-6,79%	-14,10%	0,50%

Fonte: o autor

Tabela 22 - Variação das grandezas elétricas com a correção do fator de potência – Caso 4

	FP	P (W)	Q (var)	S (VA)	I ² (A ²)	V (V)
Desligado	0,920	220.885	93.866	240.023	129.192	385,35
Ligado	0,990	222.503	3.851	224.478	111.667	387,63
Δ	n/a	1.618	-90.015	-15.545	-17.525	2,28
Δ%	n/a	0,73%	-95,90%	-6,48%	-13,57%	0,59%

Fonte: o autor

A Tabela 23 exibe o comparativo entre as variações medidas das grandezas elétricas e as variações estimadas conforme teoria apresentada em 2.4.2, Eqs. (31), (32) e (34). Nesta tabela, a variação da potência aparente, referindo-se à liberação da capacidade da instalação, é representada por ΔS ; a variação das perdas, referente a P^2 , é representada por ΔP_{perdas} ; e a variação no nível de tensão é representada por ΔV .

As Eqs. (31) e (32) referem-se à redução da potência aparente e redução das perdas por efeito Joule, portanto, os valores teóricos calculados são apresentados na Tabela 23 com sinal negativo.

Além dos valores medidos e teóricos das variações, é apresentado o erro relativo das medidas, conforme equação:

$$Erro\ relativo\ (\%) = \left(\frac{\Delta_{teórico} - \Delta_{medido}}{\Delta_{teórico}} \right) \times 100 \quad (55)$$

onde $\Delta_{teórico}$ e Δ_{medido} são, respectivamente, as variações estimadas conforme teoria e as variações observadas a partir das medições.

Para cada caso, o valor da potência reativa capacitiva fornecida pelo sistema de correção será considerado igual ao módulo da variação da demanda de potência reativa. Portanto, os casos de 1 a 4 apresentam a potência fornecida pelo banco de capacitores igual a 51.487, 68.425, 75.401 e 90.015 var, respectivamente. A reatância acumulada no ponto de conexão é igual a 9,571 m Ω . Estes parâmetros são utilizados para o cálculo da variação teórica do nível de tensão, conforme Eq. (34).

As variações da potência aparente, ΔS , obtidas a partir dos registros apresentaram resultados de magnitude semelhante, porém, inferiores aos valores teóricos. Isto pode ser explicado pelo fato de que a Eq. (31) é baseada na variação do fator de potência e considera os demais parâmetros constantes.

Porém, nas Tabelas 19 a 22 nota-se que a potência ativa para cada caso não é constante entre as situações do sistema de correção desligado e ligado. Como a potência aparente é função da potência ativa, a variação de P acarreta em uma variação em S .

Tabela 23 - Comparativo das variações medidas e teóricas dos parâmetros elétricos com a correção do fator de potência

	Caso	Medido (%)	Teórico (%)	Erro Relativo (%)
ΔS	1	-8,02	-8,25	-2,76
	2	-7,42	-8,42	-11,84
	3	-6,79	-7,41	-8,32
	4	-6,48	-7,07	-8,40
ΔP_{perdas}	1	-16,34	-15,81	3,31
	2	-15,08	-16,13	-6,50
	3	-14,10	-14,27	-1,17
	4	-13,57	-13,64	-0,56
ΔV	1	0,56	0,34	63,34
	2	0,45	0,45	-0,57
	3	0,50	0,50	0,55
	4	0,59	0,60	-0,80

Fonte: o autor

Portanto, de maneira a amenizar a discrepâncias entre os valores de ΔS medidos e teóricos, adotou-se um fator de correção para a potência aparente, mitigando a influência da variação de P sobre a variação de S . Definido conforme:

$$f_{c_S} = \frac{\sqrt{(1 + \Delta P_{pu}) + 1}}{\sqrt{2}} \quad (56)$$

onde f_{c_S} é o fator de correção, adimensional, e ΔP_{pu} é a variação da potência ativa, em p.u.

Então, estes fatores, calculados para cada caso, foram aplicados à potência aparente na situação do fator de potência corrigido. De maneira similar ao realizado anteriormente, foi calculada a variação da potência aparente, ΔS , considerando, no entanto, o $S_{corrigido}$.

$$S_{corrigido} = \frac{S_{medido}}{f_{c_S}} \quad (57)$$

onde S_{medido} é a potência aparente medida na situação do fator de potência corrigido e f_{c_S} é o fator de correção.

A Tabela 24 apresenta os resultados para a variável ΔS , considerando o $S_{\text{corrigido}}$. Observa-se que os valores de erro relativo foram reduzidos drasticamente.

Tabela 24 - Comparativo das variações medidas e teóricas da potência aparente com a correção do fator de potência considerando $S_{\text{corrigido}}$

	Caso	Medido (%)	Teórico (%)	Erro Relativo (%)
ΔS	1	-8,23	-8,25	-0,25
	2	-8,03	-8,42	-4,60
	3	-7,36	-7,41	-0,58
	4	-6,82	-7,07	-3,57

Fonte: o autor

A redução da demanda de potência aparente da instalação, e consequente liberação na capacidade de atendimento à carga, não é de primordial interesse por parte do objeto de estudo.

A máxima demanda de potência aparente registrada em um ciclo diário típico de operação da empresa, 279 kVA, representa 37,2% da capacidade nominal do transformador, 750 kVA. Portanto, pode-se adicionar à instalação uma potência aparente igual a 1,7 vezes a carga máxima registrada, sem que o transformador seja sobrecarregado.

No entanto, caso a instalação estivesse operando na capacidade nominal do transformador, uma redução de 8,23% na capacidade nominal seria equivalente a 61,7 kVA.

Esta redução na demanda de potência aparente, possibilitaria, então, uma margem de expansão para a empresa, sem que fossem necessários investimentos de repotencialização da subestação, mais custosos do que investimentos na correção do fator de potência.

Em relação à redução das perdas, ΔP_{perdas} , os resultados são qualitativamente similares aos observados em relação a ΔS . No entanto, apresentam erros relativos de menor magnitude.

Em média, observou-se uma redução de 14,77% nas perdas nos casos analisados. Tecnicamente, este resultado representa uma redução no aquecimento dos condutores e equipamentos a montante do ponto de instalação do sistema, neste caso, o transformador e os condutores de alimentação do QGBT.

Por fim, em relação à variação no nível de tensão, ΔV , 3 dos 4 casos apresentaram resultados muito próximos ao estimado,

com erros quase nulos. Porém, os valores medidos no Caso 1 apresentaram um erro relativo de 63,34%.

Uma possível causa para esta variação discrepante em relação à teoria pode ser a flutuação temporária na tensão de alimentação da concessionária.

Portanto, com base nos resultados apresentados nesta seção, pode-se afirmar que os resultados técnicos expectáveis da correção do fator de potência, conforme teoria apresentada, foram observados nas medições realizadas.

4.2 ANÁLISE DE VIABILIDADE FINANCEIRA

4.2.1 Sistema existente

Primeiramente será realizada a análise de viabilidade financeira do sistema existente, utilizando o método de *payback* simples, com base nos custos apresentados em [3.5.1](#).

O investimento inicial será o custo de implantação do sistema, R\$ 11.900,00, e o retorno financeiro mensal será suposto igual a média do faturamento de energia reativa excedente nos 12 meses anteriormente à correção do fator de potência, R\$ 4.669,25. Os custos residuais apresentados logo após a implementação serão desconsiderados.

O tempo de *payback* simples é calculado conforme Eq. (50):

$$n = \frac{11.900,00}{4.669,25}$$

$$n = 2,55 \text{ meses}$$

O sistema existente, portanto, apresentou retorno do investimento em 2 meses e 17 dias.

4.2.2 Sistema proposto

A análise de viabilidade financeira da correção do fator de potência por meio do projeto proposto será realizada com base nos custos levantados em [3.5.2](#), e nos métodos de análise de viabilidade VPL, TIR e *payback* descontado, apresentados em [2.6](#).

Para a aplicação destes métodos de análise de viabilidade financeira, se faz necessária a elaboração de um fluxo de caixa

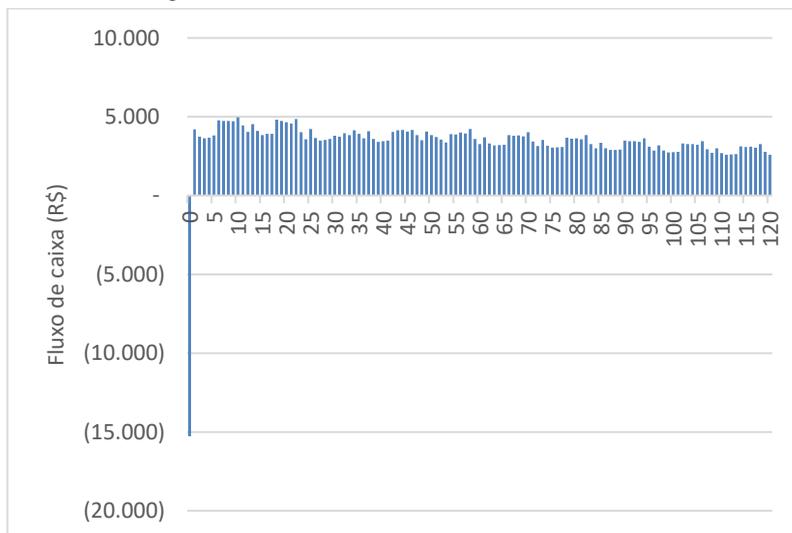
descontado, levando em consideração o investimento inicial, os fluxos de caixa negativos e positivos e uma determinada taxa de desconto.

No projeto em questão, o investimento inicial é o custo de implementação, no instante 0. Os fluxos de caixa negativos são referentes aos custos de manutenção, incidentes a cada 12 meses. Os fluxos de caixa positivos representam o retorno financeiro do projeto, neste caso, são os valores projetados de faturamento de energia reativa excedente que incidiriam caso a correção não fosse realizada. Estes são considerados fluxos positivos pois são custos à empresa que deixam de existir caso o projeto seja executado.

A TMA adotada é de 10,631% a.a., ou 0,845% a.m. Este valor representa o custo de oportunidade e foi calculado realizando-se a média ponderada da taxa Selic, de 30/10/2014 a 28/06/2019, de acordo com seu período de vigência (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2019b).

A Figura 40 apresenta o fluxo de caixa descontado para todo o horizonte de tempo do projeto. Observa-se que, após o investimento inicial, não há mais fluxos de caixa negativos. Isto se deve ao fato de os custos de manutenção incidentes serem inferiores à economia gerada pela correção do fator de potência.

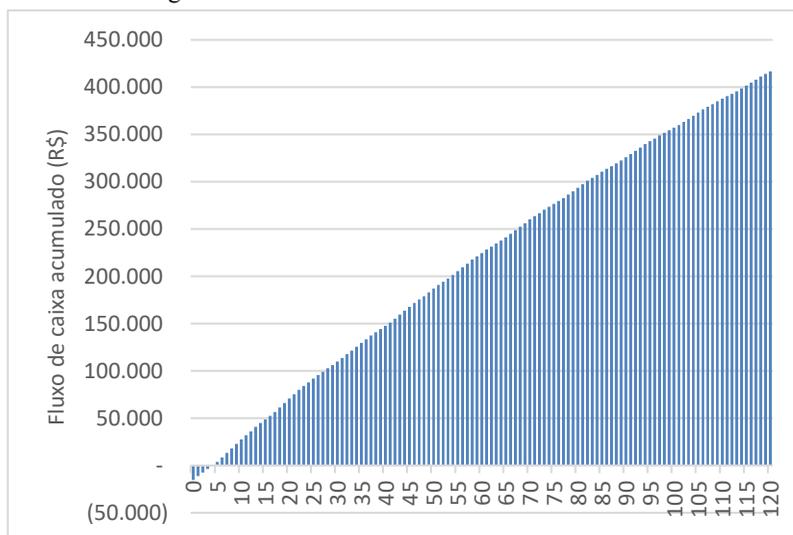
Figura 40 - Fluxo de caixa descontado – 120 meses



Fonte: o autor

A Figura 41 apresenta o fluxo de caixa acumulado para todo o horizonte do projeto. O fluxo de caixa acumulado para cada mês é o VPL do projeto para o referido mês, calculado conforme Eq. (51). Na Figura 41 é possível verificar que o fluxo de caixa acumulado apresenta valores positivos logo nos primeiros meses após a implementação do sistema. Ainda, nota-se que ao final da vida útil do projeto, tem-se um fluxo de caixa acumulado superior a R\$ 400.000,00, este montante é o VPL do projeto, precisamente R\$ 416.589,17.

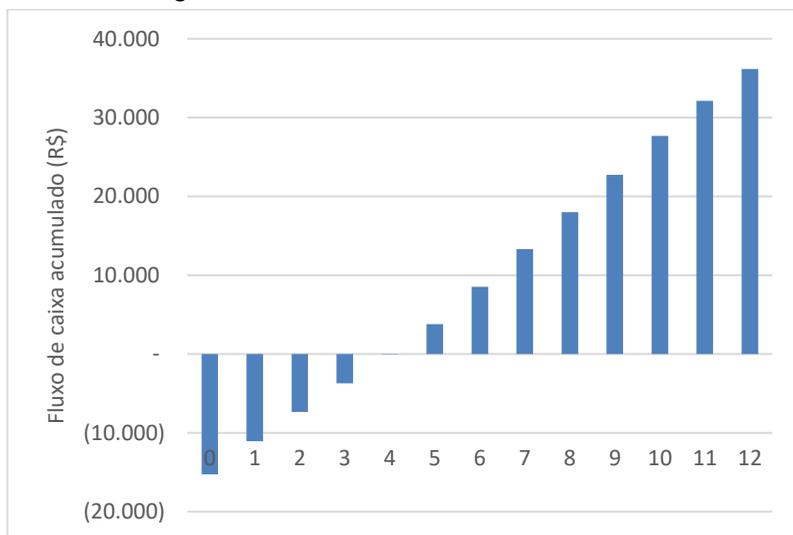
Figura 41 - Fluxo de caixa acumulado – 120 meses



Fonte: o autor

De maneira a possibilitar uma melhor visualização do fluxo de caixa acumulado no início do horizonte de tempo do projeto, a Figura 42 apresenta este fluxo para os primeiros 12 meses após a implementação. A partir deste, verifica-se que o VPL é positivo a partir do 5º mês. Portanto, o retorno do investimento (payback) se dá em 5 meses, neste período a economia proporcionada *pelo* projeto supera o valor do investimento inicial.

Figura 42 - Fluxo de caixa acumulado – 12 meses



Fonte: o autor

O Quadro 1 apresenta os resultados obtidos na análise de viabilidade financeira.

Quadro 1 - Resultados da análise de viabilidade financeira – 120 meses

Indicador	Resultado
VPL	R\$ 416.589,17
TIR	1805% a.a.
<i>Payback</i> descontado	5 meses

Fonte: o autor

O VPL é superior a 0, representando que o projeto analisado gera riqueza, ou seja, traz retorno financeiro à empresa. Ainda, o valor calculado indica que o retorno financeiro gerado, referido à 10/2015, é de R\$ 416.589,17.

A TIR satisfaz a condição de superioridade em relação à TMA adotada, portanto, corrobora o resultado obtido com o VPL, de que o projeto analisado é financeiramente vantajoso.

Já o *Payback* Descontado estabelece que o retorno do investimento se dá no 5º mês. Mais especificamente, no 5º mês o projeto apresenta um resultado financeiro positivo de R\$ 3.785,84.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando se iniciou o trabalho de pesquisa constatou-se que havia uma necessidade de maior conhecimento, por parte das empresas e dos agentes atuantes neste mercado, em relação às consequências de um baixo fator de potência nas instalações elétricas. Inclusive, em relação às possibilidades de correção deste baixo fator de potência, em especial a utilização de bancos de capacitores.

Também, notou-se ao decorrer do desenvolvimento que apesar das informações sobre o assunto serem amplamente disponíveis, estas informações estão dispersas e fracionadas em diversas fontes, principalmente no que diz respeito ao projeto de sistemas de correção.

Diante disto, delineou-se os objetivos específicos e geral de maneira a responder à pergunta: como são elaborados os projetos e qual é a viabilidade técnica e financeira da utilização de bancos de capacitores como método de correção do fator de potência?

O primeiro objetivo específico diz respeito à apresentação do embasamento teórico sobre o assunto, assim como à exposição de uma metodologia de projeto para sistemas de correção por meio de bancos de capacitores.

O segundo objetivo específico visa complementar o primeiro, aplicando a metodologia de projeto apresentada em um caso real.

Já o terceiro objetivo específico consiste na verificação da aptidão técnica do método de correção proposto e verificação da viabilidade financeira da aplicação deste.

Por fim, o objetivo geral compreende expor detalhadamente uma metodologia para projetos de sistemas de correção de fator de potência via bancos de capacitores, assim como avaliar os resultados técnicos e financeiros obtidos com a aplicação deste método de correção.

Partiu-se da hipótese de que o método proposto seria adequado à correção do fator de potência, apresentando os resultados técnicos conforme enunciado em teoria, e que a aplicação deste apresentaria retorno financeiro dentro de 12 meses.

Para possibilitar a exposição do método de projeto, primeiramente foi realizada uma apresentação da fundamentação teórica do assunto fator de potência, tanto nos quesitos técnicos quanto financeiros. Então, discutiu-se as possíveis soluções de um baixo fator de potência, destacando-se a utilização de bancos de capacitores.

Os capacitores e as consequências da utilização destes foram, então, amplamente discutidos e detalhados. E, com base no conteúdo apresentado, expôs-se uma metodologia de projeto para implementação

de bancos de capacitores automáticos. Isto posto, considera-se atendido o primeiro objetivo específico.

A metodologia de projeto exposta foi aplicada ao objeto do estudo de caso, e, apesar do sistema projetado não ser implementado, fez-se uma observação dos resultados obtidos a partir de um sistema de correção existente similar àquele projetado. Assim, considera-se atendido o segundo objetivo específico.

Os resultados apresentados no [Capítulo 4](#) demonstram que o sistema de correção existente, devidamente dimensionado, apresenta os benefícios técnicos presumidos, tanto no quesito de adequação do fator de potência, elevando a média mensal de 0,78 para 0,94, como no quesito de proporcionar demais benefícios técnicos, decorrentes desta elevação do fator de potência. Em relação aos resultados financeiros, o estudo de viabilidade financeira da implementação dos sistemas existente e projetado apresentaram resultados que confirmam a viabilidade do investimento, com o tempo de retorno igual a 2,55 e 5 meses, respectivamente. Esta análise contempla o terceiro objetivo específico.

Portanto, é confirmada a hipótese e considerada adequada tecnicamente e viável financeiramente a correção de fator de potência por meio de bancos de capacitores, apresentando os resultados técnicos desejáveis e um tempo de retorno de investimento inferior a 12 meses.

E, com o atendimento dos objetivos específicos propostos, tem-se o atendimento do objetivo geral e considera-se respondida a pergunta.

A metodologia adotada baseou-se em pesquisas bibliográfica e documental para apresentação do embasamento teórico e do método de projeto proposto. O método então, foi aplicado a um estudo de caso, por meio de pesquisa ação, no qual os impactos da implementação do sistema de correção foram mensurados e projetados.

Vale ressaltar que a pesquisa realizada tem característica qualitativa, uma vez que aborda um único estudo de caso e não faz uso de análises estatísticas dos dados e resultados obtidos.

Uma das limitações apresentadas no desenvolvimento deste trabalho foi a pequena janela de análise para verificação dos resultados técnicos obtidos, devido à impossibilidade de acesso à instalação da empresa para realizar medições em diferentes momentos.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação do método de correção de fator de potência discutido, por meio da metodologia de projeto apresentada, a outras indústrias, de maneira a testar a viabilidade técnica e financeira do método proposto neste trabalho em diferentes cenários.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 209 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60831-1**: Capacitores de potência auto-regenerativos para sistemas CA, com tensão máxima de 1.000 V Parte 1. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AMORIM, Edson. **Efeitos da correção do FP na BT sob o ponto de vista da eficiência energética**. [S. l.], 2008. Disponível em: http://www.tec.abinee.org.br/2008/arquivos/20a2_1.pdf. Acesso em: 4 jul. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 013/2011-SRE/ANEEL**. Brasília, 24 jan. 2011. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2011/005/documento/nota_tecnica_n%C2%BA_013-2011.pdf. Acesso em: 4 jul. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica nº 0083/2012-SRD/ANEEL**. Brasília, 12 jun. 2012. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/documento/nota_tecnica_0083_daniel_dir.pdf. Acesso em: 4 jul. 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 414**. Brasília, 9 set. 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414comp.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Calculadora do cidadão**: Correção de valores. Brasília, 2019a. Disponível em: <https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAO/publico/corrigirPorIndice.do?method=corrigirPorIndice>. Acesso em: 4 jul. 2019.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de juros básicas**: Histórico. Brasília, 2019b. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 4 jul. 2019.

BORDEAUX-RÊGO, Ricardo *et al.* **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. 4. ed. Rio de Janeiro: FGV, 2013.

COMITÊ DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de orientação aos consumidores: energia reativa excedente**. [S. l.: s. n.], 2004.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2008.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. 15. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

DIAS, Guilherme Alfredo Dentzien. **Harmônicas em sistemas industriais**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002.

ELETROBRÁS. **Análise econômica de investimento: guia básico**. Brasília: IEL/NC, 2008. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/cni/canais/eficiencia-energetica/>. Acesso em: 4 jul. 2019.

ELETROBRÁS. **Manual de tarifação da energia elétrica**. [S. l.: s. n.], 2011. Disponível em: http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20E1%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf. Acesso em: 4 jul. 2019.

FIRJAN. **Quanto custa a energia elétrica para a pequena e média indústria no Brasil?**. [S. l.], fevereiro 2017. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-economia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm>. Acesso em: 4 jul. 2019.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 519-2014: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power System**. [S. l.], 2014.

ISONI, Marcos. A efficientização energética e seus possíveis efeitos sobre equipamentos e instalações (Parte 2). **Eletricidade Moderna**, [S. l.], n. 364, p. 92-118, jun. 2004.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MONTEIRO, Paulo Roberto Duailibe. **Eficiência dos sistemas elétricos industriais com aplicação de capacitores**. [S. l.], 2009.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/308689791_EFICIENCIA_D OS_SISTEMAS_ELETRICOS_INDUSTRIAIS_COM_APLICACAO_DE_CAPACITORES. Acesso em: 4 jul. 2019.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Guide for the design and production of LV power factor correction cubicles**. [S. l.]: Schneider Electric, 2018.

Disponível em: [https://www.schneider-](https://www.schneider-electric.com/en/download/document/PFCED111008EN/)

[electric.com/en/download/document/PFCED111008EN/](https://www.schneider-electric.com/en/download/document/PFCED111008EN/). Acesso em: 4 jul. 2019.

SIEMENS. **Conversores de frequência: Instruções para instalação de conversores de frequência**. [S. l.]: Siemens, 2014. Disponível em:

[https://w3.siemens.com.br/drives/br/pt/cf/conversores-](https://w3.siemens.com.br/drives/br/pt/cf/conversores-bt/sinamicsv/sinamics-)

[bt/sinamicsv/sinamics-v20/documentacao/faqs/Documents/SINAMICS%20-%20Instru%C3%A7%C3%B5es%20de%20instala%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://w3.siemens.com.br/drives/br/pt/cf/conversores-bt/sinamicsv/sinamics-v20/documentacao/faqs/Documents/SINAMICS%20-%20Instru%C3%A7%C3%B5es%20de%20instala%C3%A7%C3%A3o.pdf). Acesso em: 4 jul. 2019.

SIEMENS. **Indutor de bloqueio trifásico para banco de capacitores**.

[S. l.]: Siemens, [20--]. Disponível em:

<https://w3.siemens.com.br/topics/br/pt/EM/produtos-baixa->

[tenhao/gerenciamento-de-energia/correcao-fator-potencia/bloqueadores-de-harmonica/Pages/bloqueadores-de-harmonica.aspx](https://w3.siemens.com.br/topics/br/pt/EM/produtos-baixa-tenhao/gerenciamento-de-energia/correcao-fator-potencia/bloqueadores-de-harmonica/Pages/bloqueadores-de-harmonica.aspx). Acesso em: 4 jul. 2019.

SILVA, Marcos César Isoni. **Correção do fator de potência de cargas industriais com dinâmica rápida**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFMG, Belo Horizonte, 2009. Disponível em:

<https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/129M.PDF>. Acesso em: 4 jul. 2019.

VIEIRA, Daniel. **Comparação de técnicas de medição de potência reativa sob condições não-senoidais com ênfase na transformada Wavelet**. 2012. xi, 99 f., il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

WEATHERSPARK.COM. **Condições meteorológicas médias de Blumenau.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/29902/Clima-caracter%C3%ADstico-em-Blumenau-Brasil-durante-o-ano>. Acesso em: 4 jul. 2019.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **Capacitores em corrente alternada: manual de segurança e aplicação.** Jaraguá do Sul: Weg Automação S.A., 2017a. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h5d/h0f/WEG-capacitores-em-corrente-alternada-manual-de-seguranca-e-aplicacao-pt.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **Capacitores para correção do fator de potência.** Jaraguá do Sul: Weg Automação S.A., 2017b. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h2f/h31/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **DWB e DWA: Disjuntores em caixa moldada.** Jaraguá do Sul: Weg Automação S.A., 2019. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h41/hf2/WEG-disjuntores-em-caixa-moldada-dw-50009825-catalogo-portugues-br-dc.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **Manual para correção do fator de potência.** Jaraguá do Sul: Weg Automação S.A., 2009. Disponível em: <http://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h8b/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **MMW e PFW: Multimetro de grandezas elétricas e controlador automático do fator de potência.** Jaraguá do Sul: Weg Automação S.A., 2018. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h01/hb6/WEG-multimetro-mmw-e-controlador-pfw-50025399-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2019.

APÊNDICE A – LEVANTAMENTO DE CUSTOS PARA IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

Qtde.	Un.	Descrição	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
1,00	pç	Quadro metálico 1200 x 800 x 350 mm	756,00	756,00
1,00	pç	Controlador FP 3f. 06 estágios - PFW01-T06	2.891,66	2.891,66
3,00	pç	Transformador de corrente 1200/5 A	375,00	1.125,00
1,00	pç	Disjuntor ex. moldada 3f. 300 A - DWP400L-300-3	1.963,05	1.963,05
4,00	pç	Disjuntor DIN 3f. 63 A - MDWH-C63-3	183,15	732,60
2,00	pç	Disjuntor DIN 3f. 32 A - MDWH-C32-3	174,34	348,68
3,00	pç	Disjuntor DIN 1f. 6 A - MDW-C6	28,46	85,39
3,00	pç	Contator AC6-b 15 kvar / 380 V - CWMC25	255,64	766,91
4,00	pç	Contator AC6-b 25 kvar / 380 V - CWMC32	332,56	1.330,25
3,00	pç	Capacitor 3f. 15 kvar / 440 V - UC WT15V49 N22	379,35	1.138,05
4,00	pç	Capacitor 3f. 30 kvar / 440 V - UC WT30V49 S28	758,72	3.034,86
0,30	ct	Cabo Flex. EPR 90° 0,6/1KV 120,0 mm²	5.602,81	1.680,84
1,00	cjt	Outros (barramento, cabos, terminais, acessórios)	1.283,64	1.283,64
Subtotal - Material				17.136,94
1,00	cjt	Projeto, montagem, instalação e <i>start-up</i>		2.800,00
Subtotal - Mão de obra				2.800,00
TOTAL				19.936,94

**APÊNDICE B – LEVANTAMENTO DE CUSTOS PARA
IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO –
DEFLACIONDO PARA 10/2014**

Qtde.	Un.	Descrição	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
1,00	pç	Quadro metálico 1200 x 800 x 350 mm	578,73	578,73
1,00	pç	Controlador FP 3f. 06 estágios - PFW01-T06	2.213,61	2.213,61
3,00	pç	Transformador de corrente 1200/5 A	287,07	861,21
1,00	pç	Disjuntor ex. moldada 3f. 300 A - DWP400L-300-3	1.502,75	1.502,75
4,00	pç	Disjuntor DIN 3f. 63 A - MDWH-C63-3	140,20	560,82
2,00	pç	Disjuntor DIN 3f. 32 A - MDWH-C32-3	133,46	266,92
3,00	pç	Disjuntor DIN 1f. 6 A - MDW-C6	21,79	65,37
3,00	pç	Contator AC6-b 15 kvar / 380 V - CWMC25	195,70	587,09
4,00	pç	Contator AC6-b 25 kvar / 380 V - CWMC32	254,58	1.018,33
3,00	pç	Capacitor 3f. 15 kvar / 440 V - UC WT15V49 N22	290,40	871,20
4,00	pç	Capacitor 3f. 30 kvar / 440 V - UC WT30V49 S28	580,81	2.323,24
0,30	ct	Cabo Flex. EPR 90° 0,6/1KV 120,0 mm ²	4.289,05	1.286,71
1,00	cjt	Outros (barramento, cabos, terminais, acessórios)	982,65	982,65
		Subtotal - Material		13.118,62
1,00	cjt	Montagem, instalação e <i>start-up</i>		2.143,45
		Subtotal - Mão de obra		2.143,45
		TOTAL		15.262,07

ANEXO B – POTÊNCIA MÁXIMA DOS CAPACITORES LIGADOS A MOTORES DE INDUÇÃO

Potência do motor de indução (cv)	Velocidade síncrona do motor em rpm					
	3.600	1.800	1.200	900	720	600
	kvar					
5	2,0	2,0	2,0	3,0	4,0	4,5
7,5	2,5	2,5	3,0	4,0	5,5	6,0
10	3,0	3,0	3,5	5,0	6,5	7,5
15	4,0	4,0	5,0	6,5	8,0	9,5
20	5,0	5,0	6,5	7,5	9,0	12,0
25	6,0	6,0	7,5	9,0	11,0	14,0
30	7,0	7,0	9,0	10,0	12,0	16,0
40	9,0	9,0	11,0	12,0	15,0	20,0
50	12,0	11,0	13,0	15,0	19,0	24,0
60	14,0	14,0	15,0	18,0	22,0	27,0
75	17,0	16,0	18,0	21,0	26,0	32,5
100	22,0	21,0	25,0	27,0	32,5	40,0
125	27,0	26,0	30,0	32,5	40,0	47,5
150	32,5	30,0	35,0	37,5	47,5	52,5
200	40,0	37,5	42,5	47,5	60,0	65,0
250	50,0	45,0	52,5	57,5	70,0	77,5
300	57,5	52,5	60,0	65,0	80,0	87,5
400	70,0	65,0	75,0	85,0	95,0	105,0
500	77,5	72,5	82,5	97,5	107,5	115,0

AANEXO C – FICHA DE PROTEÇÃO DA UC

 Celesc Distribuição S.A.		DADOS PARA CÁLCULO DE AJUSTES DE RELÉ SECUNDÁRIO		
CONSUMIDOR: ██████████				
ENDEREÇO: ██████████				
SUBESTAÇÃO: BFA-B2				
LOCAL PROTEÇÃO CELESC: RL-86516				
EQUIPAMENTO DE PROTEÇÃO DA CELESC				
EQUIPAMENTO: RELIGADOR				
MODELO: FASE: TAVRIDA NEUTRO: TAVRIDA				
TIPO: DIGITAL				
TENSÃO: 23 kV				
		NEUTRO	FASE	
CORRENTE DE DISPARO:		40[A]	300[A]	
NÚMERO DE OPERAÇÕES RÁPIDAS:		-	-	
CURVA DE OPERAÇÃO RÁPIDA:		-	-	
NÚMERO DE OPERAÇÕES LENTAS:		3	3	
CURVA DE OPERAÇÃO LENTA:		IEC MI (0,15)	IEC NI (0,07)	
CORRENTES DE CURTO NO PONTO DE CONEXÃO DO CONSUMIDOR				
FASE TERRA	FASE TERRA MÍNIMO	FASE TERRA ASSIMÉTRICA	TRIFÁSICA	TRIFÁSICA ASSIMÉTRICA
1732 A	312 A	2029 A	2315 A	2634 A
IMPEDÂNCIA ACUMULADA NO PONTO DE CONEXÃO				
R0	X0	R1	X1	
0,4900 p.u.	2,1277 p.u.	0,3165 p.u.	1,0369 p.u.	
IMPEDÂNCIA DE FALTA				40 ohms
OBSERVAÇÕES:				
CURVA DE "TEMPO X CORRENTE" DA PROTEÇÃO DA CELESC EM ANEXO				
MVA base = 100 MVA				
kV base = 23,000 kV				
I base = 2510 A				
Z base = 5,2900 ohms				
FORNECIDO POR:		MATRÍCULA:	DATA:	FONE:
			15/05/2019	-

ANEXO D – CONTADORES CWM_C PARA MANOBRA DE CAPACITORES (AC-6b)

			CWM25C	CWM32C	CWM50C	CWM65C
Potência reativa para bancos de capacitores AC-6b ($T_{amb}=55^{\circ}\text{C}$)	220 V	(kVar)	10	15	25	30
	380 V	(kVar)	15	25	40	50
	440 V	(kVar)	20	30	45	60
	480 V	(kVar)	22	32	50	65
	660 V	(kVar)	25	40	65	87
Corrente nominal Térmica (Ith) (55°C) (A)			45	60	90	110
Potência reativa para bancos de capacitores AC-6b- ($T_{amb}=70^{\circ}\text{C}$)	220 V	(kVar)	5	10	17	20
	380 V	(kVar)	10	17	30	36
	440 V	(kVar)	10	21	35	42
	480 V	(kVar)	12	23	38	45
	660/690 V	(kVar)	16	30	50	62
Fusível Máximo (g/L/gG) (A)			50	63	100	125