



UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA

PAULO ANDRÉ MAGALHÃES PIMENTEL

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA: ESTUDO DE VIABILIDADE DA
IMPLANTAÇÃO DE UM BANCO CAPACITOR NA UNIVERSIDADE DO ESTADO
DO AMAZONAS – ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**

MANAUS – AM

2019

PAULO ANDRÉ MAGALHÃES PIMENTEL

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA: ESTUDO DE VIABILIDADE DA
IMPLANTAÇÃO DE UM BANCO CAPACITOR NA UNIVERSIDADE DO ESTADO
DO AMAZONAS – ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentado à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Professor Orientador: Raimundo Cláudio Souza Gomes

MANAUS – AM

2019

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia - EST

Reitor:

Prof. Cleinaldo de Almeida Costa

Vice-Reitor:

Prof. Cleto Cavalcante de Souza Leal

Diretora da Escola Superior de Tecnologia:

Prof. Ingrid Sammyne Gadelha Figueiredo

Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica:

Prof. Walfredo Da Costa Lucena Filho

Banca Avaliadora composta por:

Prof. Raimundo Cláudio Souza Gomes (Orientador)

Prof. Israel Gondres Torné (Avaliador 1)

Prof. Daniel Guzman Del Rio (Avaliador 2)

Data da defesa: 16/12/2019

CIP – Catalogação na Publicação

Pimentel, Paulo André M.

Correção do Fator de Potência: Estudo de Viabilidade da Implantação de um Banco Capacitor na Universidade do Estado do Amazonas – Escola Superior de Tecnologia / Paulo André Magalhães Pimentel; [orientado por] Raimundo Cláudio Souza Gomes – Manaus: 2019.

67 f. p.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica).
Universidade do Estado do Amazonas, 2019.

1. Bancos capacitores 2. Fator de potência 3. Eficiência energética
I. Gomes, Raimundo Cláudio Souza.

PAULO ANDRÉ MAGALHÃES PIMENTEL

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA: ESTUDO DE VIABILIDADE DA
IMPLANTAÇÃO DE UM BANCO CAPACITOR NA UNIVERSIDADE DO ESTADO
DO AMAZONAS – ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA**

Pesquisa desenvolvida durante a disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II e apresentado à banca avaliadora do Curso de Engenharia Elétrica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas, como pré-requisito para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Nota obtida: _____ (_____)

Área de concentração: Bancos Capacitores

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Prof. Raimundo Cláudio Souza Gomes

Avaliador 1: Prof. Israel Gondres Torné

Avaliador 2: Prof. Daniel Guzman Del Rio

MANAUS – AM

2019

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço imensamente a Deus, sem Quem eu nada seria, que me permitiu ingressar na Universidade e chegar a este ponto e me sustentou em toda esta caminhada, sempre me dando forças para continuar e persistir perante as dificuldades, e por todas as bênçãos dadas a mim por Ele que me conduziram até a execução deste projeto.

Agradeço também aos meus pais, Paulo César e Sônia, que sempre me deram forças e incentivos para que eu jamais desistisse de qualquer sonho, que sempre entenderam meu cansaço, correria e estresse causados pelo dia a dia universitário, e ainda assim jamais deixaram de me apoiar, e que me moldaram a pessoa que sou hoje em dia.

Não poderia deixar de agradecer também ao professor orientador Raimundo Cláudio, que esteve sempre dando-me suporte e auxiliando-me em todas as dúvidas que surgiram no decorrer do projeto.

E por fim, mas nada menos importante, antes e durante a jornada universitária e no meio tempo da elaboração deste projeto, surgiram pessoas especiais que sempre deram a mim grande apoio e força para que eu persistisse na jornada do trajeto acadêmico. E, assim, meu muito obrigado a: Lanna, Kennedy, Anne, Sabrina, Leandro, Andrei, Angelica, Anna, Antônio, Carol, Cassiana, Deis, Diorge, Eduardo, Enrique, Fernanda, Francisca, Gabriel, Gabriele Farias, Gabriele Furtado, Glauber, Hêndria, Isabelle, Jihane, João Ricardo, Khadija, Leonardo, Luís, Myriam, Paulo Felipe, Paulo Galdino, Priscila, Rayan, Rebeca, Sofia, Tamiris, Wesley e Lizzy.

RESUMO

Tornando-se um aspecto de grande importância nas instalações elétricas, o fator de potência hoje em dia é regido de leis e multas aos consumidores que não seguem tais regras. Não somente com o intuito da preservação da unidade geradora, mas também para a obtenção de uma energia mais “limpa” e para o fato de evitar curtos-circuitos ou sobretensões, criou-se regras que limitam alguns parâmetros que estão relacionados ao fator de potência, como, por exemplo, o excedente de energia reativa utilizada pela carga. Ademais, devido ao fato de muitas das instalações dos edifícios terem sido realizadas há uma quantidade de tempo significativa, o aumento de cargas reativas nos terminais destas, pode acabar acarretando multas como as supracitadas caso não haja devida correção de tal problema. Assim, escolhendo como local de estudo a Escola Superior de Tecnologia, onde constatou-se tal problema, esta pesquisa será elaborada de forma a dimensionar e estudar a viabilidade da implantação de uma solução para esta questão, utilizando um banco capacitor, na Instituição visando à supressão do problema.

Palavras-chave: banco capacitor, fator de potência, energia reativa excedente.

ABSTRACT

Becoming a very important aspect on electrical installations nowadays, the power factor is filled with laws and fees to the customers who do not follow such rules. Not only aiming to preserve the generator unity, but also aiming to have a “cleaner” energy and to avoid facts like curt circuits and over tensions, it was created rules that limit some parameters related to the power factor, such as the excess of reactive energy used by the charge. Moreover, given to the fact that a great part of the actual electrical installations of buildings were built a very significant amount of time ago, the increase of reactive loads on its terminals, may result in the fees established before in case that there is not a proper correction of such problem. Therefore, picking as a place of study the Superior School of Technology in Amazonas, where the problem here mentioned occurred, this research will be elaborated aiming to dimension and study the viability of the implantation of a solution to such issue, using a bank of capacitors, in the Institution aiming to solve the problem.

Keywords: bank of capacitors, power factor, excess of reactive energy.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BC	Banco Capacitor
C	Capacitância
CODI	Comitê de Distribuição de Energia Elétrica
DR	Demanda de reativos
ER	Energia Reativa
ERE	Energia Reativa Excedente
EST	Escola Superior de Tecnologia
F	Faraday
FP	Fator de Potência
kW	Quilowatt
kVA	Quilo-Volt-Ampère
kVAr	Quilo-Volt-Ampère reativo
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RP	Redução de Perdas
TRC	Tempo de Retorno de Capital
VPL	Valor Presente Líquido
UEA	Universidade do Estado do Amazonas

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Triângulo de Potências.....	16
Figura 2 – Perdas x Fator de Potência	17
Figura 3 – Bancos capacitores	19
Figura 4 – Sistema com compensação x sem compensação.....	20
Figura 5 – Redução percentual das perdas em função do FP.....	20
Figura 6 – Ligação de bancos capacitores automáticos.....	22
Figura 7 – Fluxograma de funcionamento de um banco capacitor automático.....	23
Figura 8 – Compensação individual	24
Figura 9 – Compensação por grupo de cargas.....	25
Figura 10 – Compensação geral.....	25
Figura 11 – Compensação no lado de alta tensão	26
Figura 12 – Representação de sinal harmônico	27
Figura 13 - Faixa permissível para o fator de potência pela atual legislação.....	29
Figura 14 – Histórico de consumo e demanda da Universidade (maio).....	40
Figura 15 – Histórico de consumo e demanda da Universidade (setembro)	40
Figura 16 – Variação do fator de potência em maio/2016.....	41
Figura 17 – Variação do fator de potência em junho/2016	41
Figura 18 – Variação do fator de potência em julho/2016	42
Figura 19 – Variação do fator de potência em agosto/2016	43
Figura 20 – Variação do fator de potência em setembro/2016	43
Figura 21 – Variação do FP no período total analisado	44
Figura 22 – Triângulo de potências da Instituição	45
Figura 23 – Variação do excedente de reativo no período analisado	46
Figura 24 – Tarifas de energia elétrica do grupo A	46
Figura 25 – Valor pago pelo consumo de excedentes.....	47
Figura 26 – Variação da energia reativa em maio/2016 por hora.....	49
Figura 27 – Variação da energia reativa em junho/2016 por hora	49
Figura 28 – Variação da energia reativa em julho/2016 por hora	50
Figura 29 – Variação da energia reativa em agosto/2016 por hora	50
Figura 30 – Variação da energia reativa em setembro/2016 por hora.....	51
Figura 31 – Triângulo de potências antes da compensação	52
Figura 32 – Triângulo de potências após compensação	53
Figura 33 – Dispositivos para o banco capacitor	56

Figura 34 – Exemplo de montagem sugerido	56
Figura 35 – Análise da ultrapassagem de demanda	60
Figura 36 – Análise do fluxo de caixa.....	61

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
1 REFERENCIAL TEÓRICO	15
1.1 POTÊNCIA E CONCEITOS CORRELACIONADOS	15
1.2 CAPACITORES.....	18
1.3 TIPOS DE BANCOS DE CAPACITORES E COMPENSAÇÕES	21
1.3.1 Bancos Capacitores Fixos	22
1.3.2 Bancos Capacitores Automáticos.....	22
1.3.3 Compensação Individual	23
1.3.4 Compensação por Grupo de Cargas.....	24
1.3.5 Compensação Geral	25
1.3.6 Compensação no Lado de Alta Tensão	26
1.4 HARMÔNICOS E SEUS EFEITOS EM BANCOS CAPACITORES	26
1.5 PRECAUÇÕES COM BANCOS CAPACITORES	28
1.6 LEGISLAÇÃO (RESOLUÇÃO DA ANEEL)	28
1.7 ESTRUTURA TARIFÁRIA	31
1.8 ANÁLISE PARA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	34
1.8.1 Valor Presente Líquido (VPL)	34
1.8.2 Tempo de Retorno de Capital (TRC)	35
2 METODOLOGIA	36
2.1 ANÁLISE DA FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA.....	36
2.2 ANÁLISE DO HISTÓRICO DE DEMANDA E CONSUMO	37
2.3 COLETA E UTILIZAÇÃO DE DADOS	37
2.4 ANÁLISE PARA VIABILIDADE ECONÔMICA.....	38
3 IMPLEMENTAÇÃO	39
3.1 TRATAMENTO E OBTENÇÃO DE DADOS	39
3.2 CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTOS.....	51
3.3 CUSTO PARA INSTALAÇÃO DO BANCO CAPACITOR	54
3.4 POSSÍVEIS CAUSAS DO BAIXO FP NA UNIVERSIDADE.....	59
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	60

CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A – PREENCHIMENTO DOS DADOS NO SITE WEG.....	68
APÊNDICE B – SITES UTILIZADOS PARA A BUSCA DOS PRODUTOS.....	69

INTRODUÇÃO

Na atualidade muito se fala sobre eficiência energética e os parâmetros que a mesma envolve, bem como o efeito desta para as instalações e construções onde está presente. Assim, sempre almejando alcançar o máximo de eficiência possível da energia utilizada em determinada rede elétrica, busca-se tratar e corrigir os problemas que causam a falta da mesma, além de propor soluções que venham a diminuir os obstáculos que levam à presença de uma energia elétrica fora dos padrões aceitáveis.

Um dos critérios para medir se a energia elétrica de residências, edifícios e outras construções está sendo utilizada de forma racional (sem causar danos físicos aos aparelhos dos locais e impor multas aos consumidores) é através do chamado fator de potência, o qual pode ser considerado como a medida de energia que está realmente sendo utilizada para realizar trabalho (energia ativa) em relação à energia total (aparente) que está sendo entregue ao local analisado.

Sabendo que a utilização indevida da energia elétrica recebida por determinado consumidor prejudica não somente aos seus dispositivos e acrescenta multas à fatura de energia mensal, mas pode prejudicar também a unidade fornecedora pelo fato de demandar mais energia (reativa) do que realmente necessita (podendo vir a complicar os sistemas de tal fornecedor), a agência regulamentadora em tal âmbito, Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estipula que haja um padrão do fator de potência a ser atingido por todo e qualquer consumidor de energia elétrica, que vem a ser um valor igual ou superior a 0,92.

Caso o valor citado acima não seja alcançado, o consumidor estará sujeito à cobrança de multas devido ao mesmo, as quais são impostas segundo a ANEEL e o fornecedor de energia elétrica responsável (no caso deste projeto: Amazonas Energia). Assim, uma boa utilização da energia elétrica por parte do consumidor não apenas poupa o mesmo em âmbitos financeiros, mas também preserva seus equipamentos e também possui uma imagem relacionada à preocupação com o meio ambiente por possuir uma “energia limpa”, fato muito valorizado nos dias de hoje.

Neste contexto, o presente trabalho visa apresentar um estudo do sistema elétrico da Universidade do Estado do Amazonas – Escola Superior de Tecnologia (EST), focando unicamente na análise do fator de potência, propondo melhorias para que ocorra o aumento da eficiência energética na instalação da Universidade, trazendo altos benefícios para a mesma.

Este trabalho tem como hipótese o aumento do fator de potência para os padrões aceitáveis pela agência reguladora e consequente diminuição das multas pagas pela Instituição

(por este motivo), estudando a viabilidade da implantação de um banco capacitor na Universidade. O mesmo tem como objetivo realizar o dimensionamento de tal banco capacitor com seus dispositivos e sistemas necessários, mostrando a economia a ser obtida com a implantação do sistema.

Acredita-se que este assunto seja relevante não somente para a formação do aluno e para a Escola Superior de Tecnologia (UEA), mas também para a sociedade, pois apresenta alternativas para a melhoria da qualidade de energia, além de cooperar com questões ambientais.

As disciplinas envolvidas no projeto são:

- a) Física;
- b) Circuitos Elétricos I e II;
- c) Máquinas Elétricas;
- d) Eficiência Energética;
- e) Instalações Elétricas;
- f) Conversão de Energia;
- g) Distribuição de Energia Elétrica.

Para melhor ordenação dos assuntos a serem abordados neste trabalho, os itens estão divididos da seguinte forma:

Capítulo 1 – Referencial Teórico: este capítulo possui a finalidade de abordar todos os itens teóricos necessários para o entendimento do trabalho a ser feito, apresentando as possibilidades existentes para o sistema que se deseja implantar e as normas a serem seguidas nos mesmos.

Capítulo 2 – Metodologia: este capítulo apresenta a abordagem selecionada para se obter os resultados neste trabalho, citando os materiais disponíveis necessários e disponíveis, estabelecendo a razão e finalidade de cada um dos mesmos.

Capítulo 3 – Implementação: este capítulo apresenta todo o cálculo presente neste trabalho, bem como as representações dos dados (retirados dos materiais disponíveis) a serem estudados por meio de gráficos para melhor entendimento. Será também neste capítulo que todos os resultados da pesquisa serão obtidos e as escolhas quanto aos diferentes sistemas serão feitas.

Capítulo 4 – Análise dos Resultados: este capítulo apresenta o estudo feito sobre os resultados encontrados no capítulo anterior, mostrando, por fim, se existe viabilidade na implantação da hipótese proposta por este trabalho.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, encontra-se toda a base teórica necessária para a compreensão do trabalho apresentado. O mesmo divide-se em quatro principais temas para melhor aprofundamento, as quais são:

- a) Potência e Conceitos Correlacionados;
- b) Capacitores;
- c) Tipos de Bancos de Capacitores e Compensações;
- d) Legislação (Resolução da ANEEL).

1.1 POTÊNCIA E CONCEITOS CORRELACIONADOS

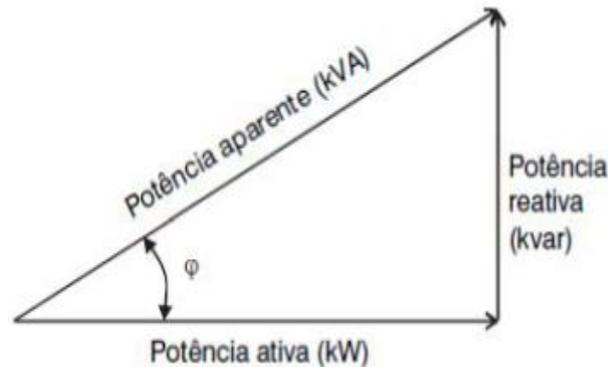
Segundo Boylestad (2012), pode-se subdividir a potência elétrica em circuitos de corrente alternada da seguinte maneira:

- a) Potência Ativa;
- b) Potência Reativa;
- c) Potência Aparente.

De acordo com Creder (2002), o conceito físico das potências mencionadas acima pode ser explicado da seguinte maneira: qualquer equipamento que transforme a energia elétrica em outra forma de energia útil (térmica, luminosa, cinética) é um consumidor de energia ativa. Qualquer equipamento que possua enrolamentos (transformadores, motores, reatores, etc.), e, portanto, necessite de energia magnetizante como intermediária na utilização de energia ativa, é um consumidor de energia reativa. Por fim, a potência aparente seria definida pela soma vetorial das potências ativa e reativa.

Segundo Fragoas (2008), as três potências podem ser representadas pelo sistema mostrado na Figura 1, conhecido como triângulo de potências. Baseando-se nesta mesma representação, Cotrim (2009) afirma sobre a existência do fator de potência, o qual se trata da razão entre potência ativa e potência aparente, indicando, assim, o quanto da energia total do sistema está sendo realmente utilizada para realização de trabalho, também definido como sendo o cosseno do ângulo mostrado no triângulo da Figura 1.

Figura 1 – Triângulo de Potências



Fonte: Fragoas, 2008

Pode-se considerar que, a rigor, as próprias linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica são fontes de energia reativa, devido à sua reatância, conforme afirma Mamede (2002). Esta energia compreende duas diferentes parcelas, estas são:

- a) energia reativa indutiva;
- b) energia reativa capacitiva.

Conforme Niskier (2000), a energia reativa indutiva é gerada por aparelhos consumidores normalmente dotados de bobinas, tais como motores de indução, reatores, transformadores, etc., ou que operam com formação de arco elétrico, como os fornos a arco. Este tipo de carga apresenta fator de potência dito reativo indutivo. Já a energia reativa capacitiva pode ser gerada por motores síncronos superexcitados (compensadores síncronos) ou por capacitores. Neste caso, estas cargas apresentam fator de potência dito reativo capacitivo.

Segundo Cotrim (2009), um baixo fator de potência em uma instalação significa baixa utilização em todo o sistema de alimentação, desde a rede da companhia concessionária até a parte interna da instalação, incluindo os equipamentos em uso. Tanto é assim que, uma vez constatado um fator de potência de valor inferior a um valor mínimo definido, as concessionárias se veem na contingência de, segundo a legislação em vigor, cobrar uma sobretaxa. Isso representa, para quem não está com suas instalações adequadas, substancial despesa extra, além de maiores perdas, quedas de tensão, menor rendimento e maior desgaste nas máquinas e equipamentos em geral.

Para Kikushi (2015) e Barreto (2017), as principais causas do baixo fator de potência são as seguintes:

- a) motores de indução e transformadores operando em vazio ou com pequenas cargas, pois a potência ativa em transformadores e neste tipo de motor varia de acordo com a necessidade da carga posta no eixo ou terminais dos mesmos, opostamente à

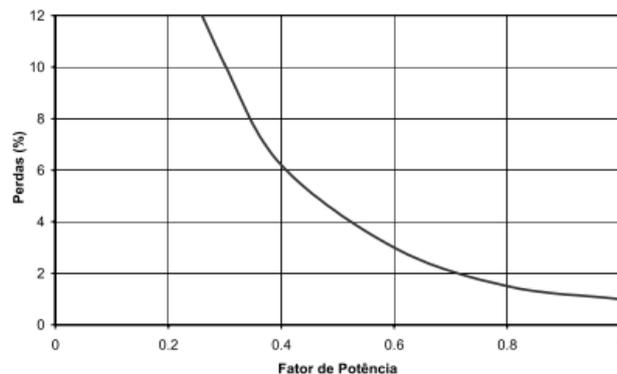
potência reativa, a qual será constante, visto que a mesma depende apenas do circuito magnetizante. Assim, possuindo conhecimento da relação do fator de potência abordado anteriormente, nota-se que a permanência da potência reativa e a variação da potência ativa, causam variação no fator de potência. Mais especificamente, cargas pequenas geram fator de potência baixo. O mesmo princípio aplica-se a motores de indução e transformadores superdimensionados;

- b) grande quantidade de motores de pequena potência, pois a dificuldade no dimensionamento das máquinas acopladas a eles pode provocar um baixo fator de potência, já que motores com pouca carga apresentam baixo FP;
- c) lâmpadas de descarga: fluorescentes, vapor de mercúrio, vapor de sódio – sem reatores de alto fator de potência, pois as mesmas possuem bobinas em seus reatores, demandando assim energia reativa, contribuindo para a redução do fator de potência;

Acima foram citados os motivos considerados principais para que ocorra um baixo fator de potência de forma geral. A seguir estão listadas algumas consequências que, segundo Barreto (2017), são causadas por este problema:

- a) perdas ôhmicas, as quais ocorrem em forma de calor e são proporcionais ao quadrado da corrente total, a qual aumenta conforme o fator de potência diminui. Assim, na Figura 2, está representada a variação das perdas em função do fator de potência.

Figura 2 – Perdas x Fator de Potência



Fonte: (Duailibe, 2000)

- b) queda ou aumento de tensão, o que pode causar interrupção no fornecimento de energia ou o desligamento de aparelhos sensíveis a essa variação. Da mesma forma, se o fator de potência ficar fortemente capacitivo, há o risco do aumento da tensão, o qual pode operar os dispositivos de proteção e desligar o sistema;

- c) subutilização de transformadores, pois, segundo Hofmann (2012), a capacidade dos transformadores de potência é expressa na potência aparente, porque corresponde à maior corrente (corrente nominal) em uma dada tensão (tensão nominal). A potência ativa a ser transferida pelo transformador é função do fator de potência da carga a ser suprida. Quanto maior o fator de potência, maior a potência ativa que pode ser suprida por ele.

Assim, sabendo que o excesso de energia reativa e o conseqüente baixo fator de potência acarretam em prejuízos técnicos e financeiros para os consumidores, torna-se necessária a instalação de algum sistema que realize a compensação correta de energia reativa para a rede, fazendo, assim, o fator de potência adentrar nos padrões impostos pela legislação.

Segundo Kikushi (2015), a primeira providência para corrigir o baixo fator de potência é a análise das causas que levam à utilização excessiva de energia reativa. A partir desta providência, uma forma de reduzir a circulação de energia reativa pelo sistema elétrico consiste em produzi-la o mais próximo possível da carga, utilizando um equipamento conhecido como banco capacitor, conforme afirma Bordim (2011).

1.2 CAPACITORES

É fácil concluir que, para evitar o transporte de energia reativa de terminais distantes da carga consumidora, faz-se necessário que se instalem nas proximidades destes terminais as referidas fontes de energia reativa, conforme afirma Mamede (2002). Desta forma, reduzem-se as perdas na transmissão referente a esse bloco de energia, resultando em um melhor rendimento do sistema elétrico.

Conforme afirmado por Niskier (2000) e observado anteriormente, é necessário atender às necessidades da Concessionária, conveniando-se assim à correção do fator de potência e alcançando economia nas despesas com energia elétrica. Seguindo tal afirmação, segundo Hoe (2016), o método mais difundido para a correção do fator de potência consiste na instalação de bancos capacitores em conexão com a rede elétrica, devido ao seu menor custo de implantação e devido ao fato de serem equipamentos estáticos de baixo custo de manutenção.

Reforçando a afirmação anterior, segundo Cotrim (2009), a elevação ou adequação do fator de potência é realizada com a instalação de sistemas de compensação de energia reativa compostos por capacitores, também chamados de bancos de capacitores (Figura 3), conectados ao mesmo ponto da carga ou por motores síncronos superexcitados. Segundo Attachie (2013),

a aplicação de tais capacitores shunt para correção de fator de potência é uma prática comum na indústria.

Figura 3 – Bancos capacitores



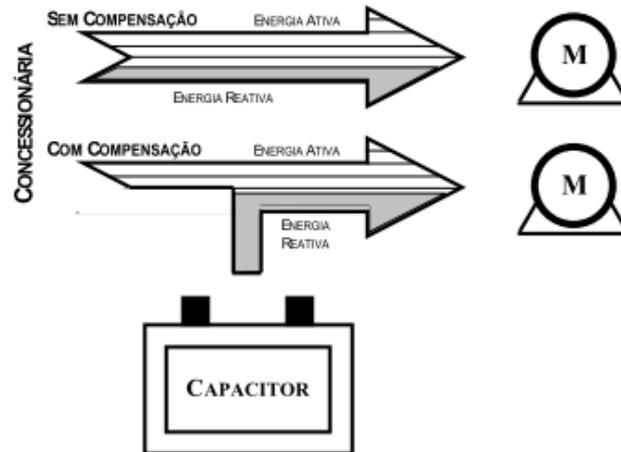
Fonte: WEG, 2009

Segundo Pahwa (1994), capacitores são fontes de energia reativa e os objetivos de sua aplicação em sistemas de potência é a compensação de tais energias produzidas por cargas indutivas ou reatâncias de linhas. A quantidade de compensação fornecida está relacionada à localização dos capacitores no sistema de distribuição, tamanho, quantidade e tipo de capacitor.

Em relação à ligação de tais bancos de capacitores, Barreto (2017) afirma que os mesmos podem ser instalados em sistemas de distribuição de duas principais formas: estando em paralelo com as cargas ou estando em série com as linhas. A instalação do banco capacitor em paralelo procura contornar o problema do baixo fator de potência atuando na aplicação de uma correta quantidade de reativos no sistema ao qual se deseja tal correção. Por outro lado, a instalação desses bancos em série reduz as quedas de tensão causadas por reatâncias indutivas. Contudo, nesse caso, os bancos não realizam a correção do baixo fator de potência na mesma proporção que quando conectados em paralelo, e as correntes nas linhas não são substancialmente reduzidas.

Os capacitores aplicados em sistemas de distribuição estão geralmente localizados ao longo dos alimentadores de distribuição ou nas subestações, conforme afirma Madruga (2011). A sua utilização está focada na correção do fator de potência local, destacando que os bancos podem ser fixos ou automáticos, dependendo das condições da carga. Assim, os capacitores realizam a chamada “compensação de energia reativa”, conforme representado na Figura 4.

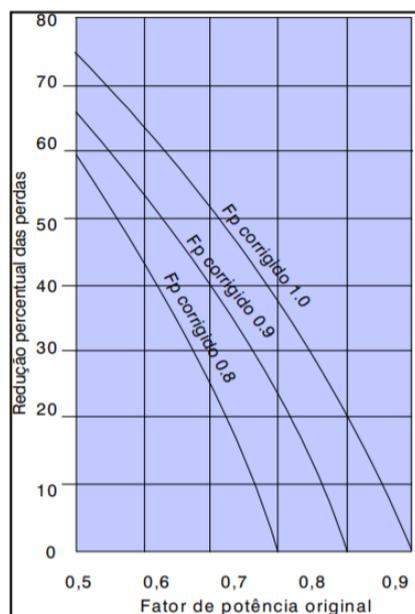
Figura 4 – Sistema com compensação x sem compensação



Fonte: CODI, 2004

Um benefício adicional proveniente da implantação de bancos capacitores em instalações elétricas, segundo Isoni (2009), é a liberação da capacidade de transformadores, devido à menor circulação de correntes de natureza reativa e, conseqüentemente, em decorrência da redução dos kVAs associados às parcelas adicionais de potência reativa suprida para as cargas. Assim, ocorre também a liberação da capacidade dos circuitos de distribuição geral e parcial, o que ocasiona diminuição de perdas nos condutores.

Figura 5 – Redução percentual das perdas em função do FP



Fonte: (WEG, 2009)

A Figura 5 representa a redução percentual das perdas em função do FP em determinada carga. Tal redução de perdas pode ser calculada da seguinte forma:

$$RP(\%) = \left(1 - \frac{FP_I^2}{FP_F^2}\right) \cdot 100$$

Em que:

RP: redução das perdas;

FP_I: fator de potência antes da correção;

FP_F: fator de potência após a correção.

Conforme Isoni (2009), outro benefício trazido pela implantação de bancos capacitores é a melhoria dos níveis de tensão no ponto de instalação do banco capacitor. Na prática, isso representa o percentual de elevação na tensão relativamente à tensão na origem, o qual é calculado utilizando a equação a seguir.

$$\Delta V\% = \frac{P_C \cdot X_L \cdot L}{10 \cdot V^2}$$

Em que:

$\Delta V\%$: elevação percentual da tensão no ponto de instalação do banco capacitor;

P_C: potência capacitiva em operação (kVAr);

X_L: reatância indutiva unitária dos circuitos entre a origem e o banco (ohms/km);

L: comprimento dos circuitos entre a origem e o banco (km); e

V: tensão fase-fase (kV) na origem.

1.3 TIPOS DE BANCOS DE CAPACITORES E COMPENSAÇÕES

Segundo Kikushi (2015), os bancos de capacitores são dimensionados de acordo com as características e necessidades das cargas conectadas a ele. Assim, existem dois tipos principais de bancos de capacitores, os quais estão explanados a seguir.

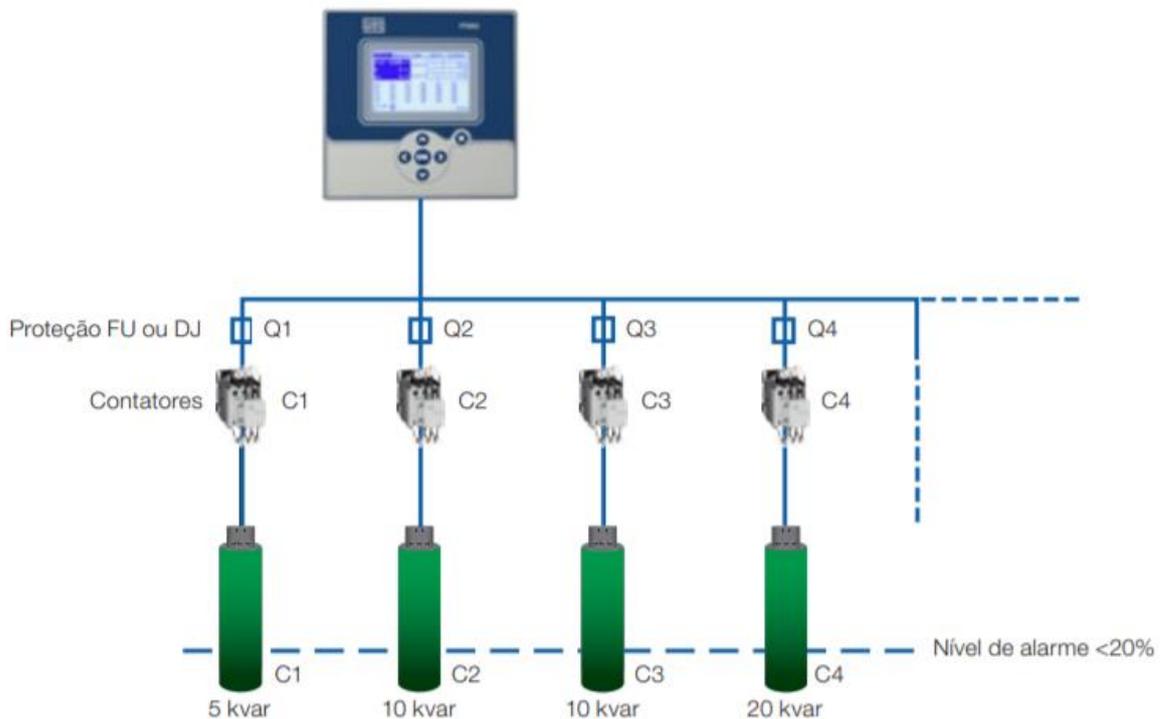
1.3.1 Bancos Capacitores Fixos

Os bancos deste tipo têm o valor de sua capacitância fixo e são normalmente dedicados a um circuito ou a um único equipamento, pois são dimensionados para a correção do fator de potência em uma condição singular. Segundo Barreto (2017), o uso de bancos fixos é o mais simples e econômico, e por isso é tão amplamente difundido na correção do fator de potência.

1.3.2 Bancos Capacitores Automáticos

Os bancos deste tipo recebem a instrução via software para atuar em determinado momento pré-estabelecido. Isoni (2009) afirma que os bancos automáticos são geralmente utilizados para correções globais por setores de acordo com a demanda instantânea de energia reativa da instalação, o que promove o controle dinâmico do fator de potência, visto a inviabilidade de operação manual. Dessa forma, através da lógica de um algoritmo interno, um controlador decide se deve haver inserção ou retirada de reativos capacitivos na rede. Um exemplo do esquemático de um banco capacitor automático está representado na Figura 6.

Figura 6 – Ligação de bancos capacitores automáticos

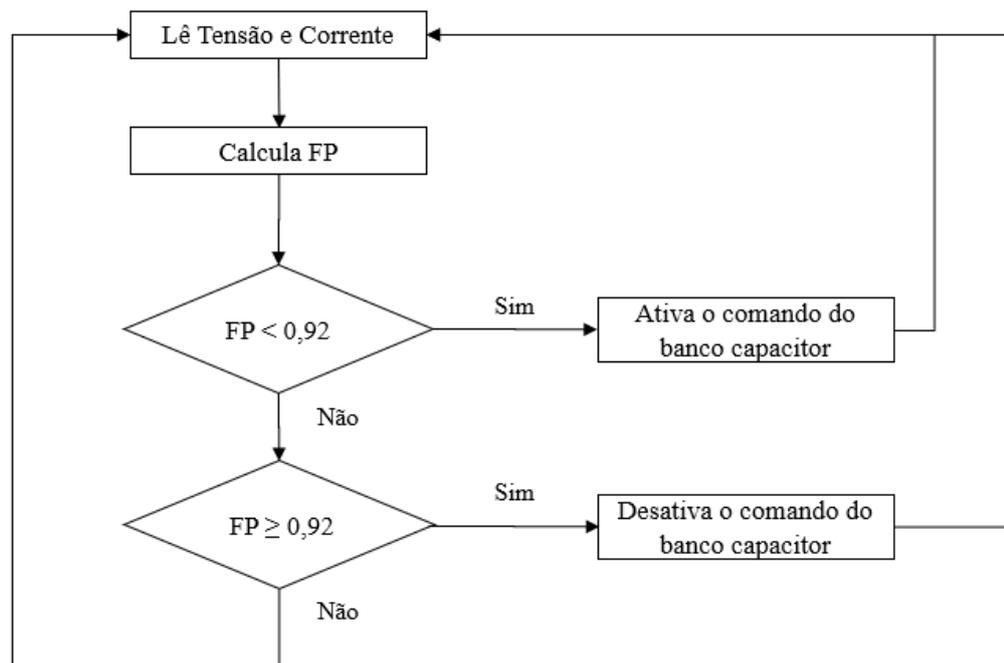


Fonte: WEG, 2019

Na Figura 6, existem diversas unidades capacitivas representando diversos estágios de um banco capacitor. A diferenciação e separação em estágios em um BC serve para os momentos em que a correção do FP necessita de um valor específico de energia reativa capacitiva a ser atingido, normalmente nem tão alto e nem tão baixo, visto que o excesso de energia reativa capacitiva também não é desejado pelo sistema. Com tal finalidade, algumas unidades capacitivas internas do banco capacitor possuem potências reativas de valores distintos.

A Figura 7 representa um fluxograma mostrando os processos principais de funcionamento de um banco capacitor automático.

Figura 7 – Fluxograma de funcionamento de um banco capacitor automático



Fonte: Próprio Autor

Kikuchi (2015) também define as modalidades de compensação de energia reativa. Estas estão descritas nos itens a seguir.

1.3.3 Compensação Individual

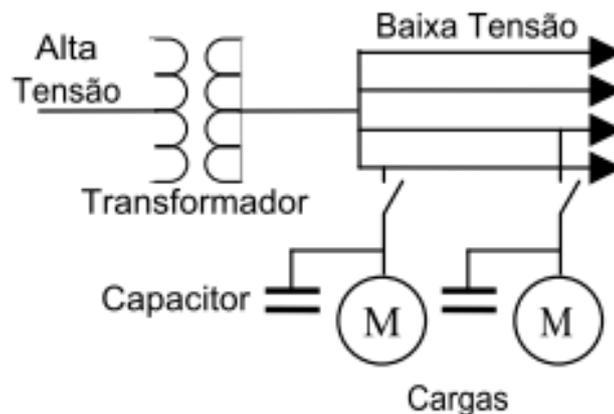
Na compensação individual, capacitores são instalados junto ao equipamento cujo fator de potência deseja-se melhorar. Este modo de compensação, representado na Figura 8, apresenta as seguintes vantagens:

- a) redução de perdas energéticas em toda instalação;
- b) diminuição de carga nos circuitos de alimentação dos equipamentos compensados;
- c) melhoria nos níveis de tensão de toda a instalação;
- d) possibilidade de utilização de um sistema único de acionamento para a carga e o capacitor, gerando economia em relação aos equipamentos de manobra;
- e) geração de reativos somente onde há realmente necessidade;

Todavia, esta modalidade de compensação também apresenta certas desvantagens, como, por exemplo:

- a) Muitos capacitores de pequena potência têm custo maior que capacitores concentrados de maior potência;
- b) Pouca utilização dos capacitores para o caso de o equipamento ao qual o sistema estiver aplicado não possuir uso frequente;
- c) No caso de motores, deve-se compensar no máximo 90% da energia reativa desnecessária.

Figura 8 – Compensação individual

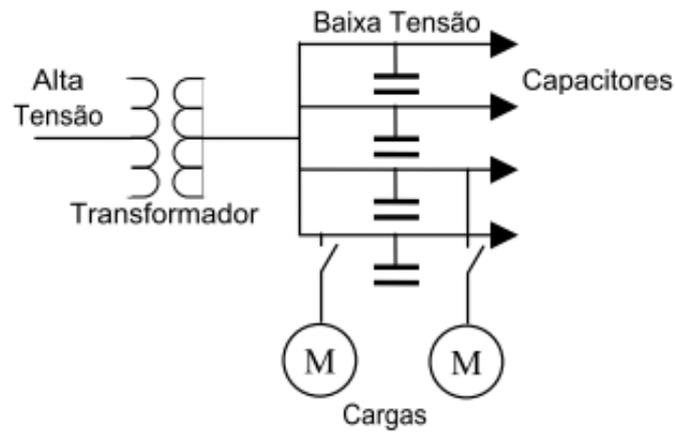


Fonte: CODI, 2004

1.3.4 Compensação por Grupo de Cargas

Para o caso da compensação por grupo de cargas, Kikuchi (2015) afirma que o banco capacitor é instalado de forma a compensar não somente uma carga específica, mas um grupo de equipamentos. Além disso, o mesmo é posicionado junto ao quadro de distribuição responsável pela alimentação desse conjunto de cargas.

Figura 9 – Compensação por grupo de cargas



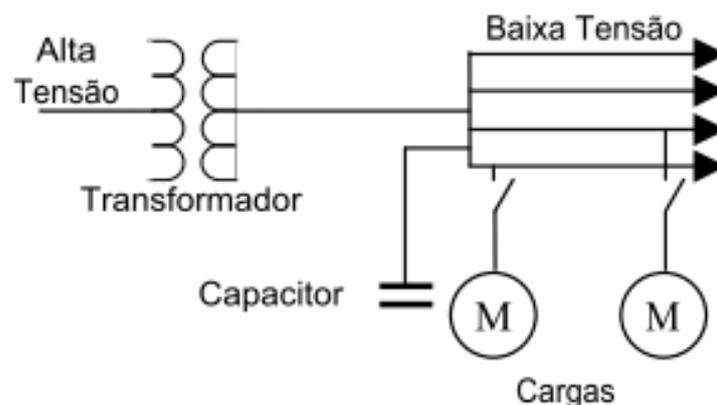
Fonte: CODI, 2004

Neste caso, o qual está representado na Figura 9, a potência necessária será menor que no caso da compensação individual, tornando assim este tipo de instalação mais econômica. A principal desvantagem deste tipo de compensação deve-se ao fato de não haver diminuição de corrente nos alimentadores de cada equipamento compensado.

1.3.5 Compensação Geral

Neste tipo de compensação, apresentado na Figura 10, o banco capacitor é instalado na saída do transformador ou do quadro de distribuição geral, se a instalação for alimentada em baixa tensão. Utiliza-se em instalações elétricas com número elevado de cargas com potências diferentes e regimes de utilização pouco uniformes.

Figura 10 – Compensação geral



Fonte: CODI, 2004

Este tipo de compensação apresenta as seguintes vantagens:

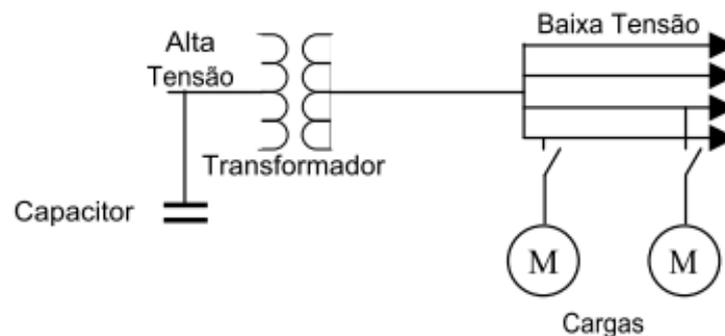
- a) Fácil supervisão;
- b) Possibilidade de controle automático;
- c) Melhora no nível de tensão;
- d) Caso necessitem de instalações suplementares, estas serão relativamente simples.

Todavia, a desvantagem principal deste tipo de compensação consiste no fato de não existir alívio sensível dos alimentadores de cada equipamento.

1.3.6 Compensação no Lado de Alta Tensão

Segundo o Codi (2004), existe também a possibilidade de compensação se instalando bancos capacitores no lado de alta potência dos transformadores, conforme representado na Figura 11. Este tipo de instalação é mais comumente encontrado em unidades consumidoras que recebem tensão relativamente alta e dispõem de unidades de subestação.

Figura 11 – Compensação no lado de alta tensão

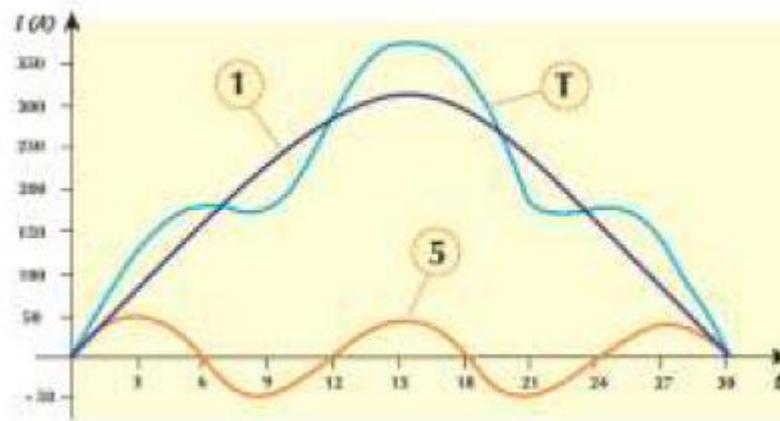


Fonte: CODI, 2004

1.4 HARMÔNICOS E SEUS EFEITOS EM BANCOS CAPACITORES

Segundo Nunes (2017), uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal cuja frequência é um valor múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação. A forma de onda de um harmônico pode seguir a que está representada na Figura 12 por T. Visto que haverá uma soma ponto a ponto dos outros dois sinais representados. Logo, através da figura, é possível concluir que um sinal é harmônico quando o mesmo não segue o padrão senoidal.

Figura 12 – Representação de sinal harmônico



Fonte: Nunes, 2017

As principais fontes de harmônicos, de acordo com Nunes (2017), são:

- Circuitos magnéticos saturados (transformadores, reatores, motores);
- Equipamentos alimentados por fontes retificadoras ou inversoras (televisores, microcomputadores);
- Fornos a arco, máquinas de solda;
- Fontes chaveadas;
- Conversores estáticos (inversor de frequência, retificadores).

Há um conceito errado bastante difundido de que bancos capacitores são responsáveis pela geração de harmônicas, segundo Isoni (2009). Apesar disso, os BCs podem ser bastante afetados pelos sinais harmônicos, visto que tais sinais possuem frequência normalmente maior que a frequência da rede utilizada. Assim, através da equação a seguir, com o aumento da frequência, ocorre a diminuição da impedância (resistência) do banco capacitor, liberando um caminho para que correntes de valor superiores às consideradas circulem pelo mesmo, podendo vir a causar danos irreparáveis.

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

Em que:

X_C: impedância capacitiva;

f: frequência da rede;

C: capacitância.

De acordo com Buratti (2016), são diversos os efeitos de harmônicos que podem ser verificados em bancos capacitores, tais como: aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, ressonância, vibrações de acoplamentos, aumento da queda de tensão e redução do fator de potência da instalação, etc.

Para que os eventos citados acima não ocorram, Garcia (2001) recomenda a utilização de: filtros de dissintonia, que visam apenas evitar a ocorrência de ressonâncias harmônicas em frequências geradas pelo sistema elétrico em estudo, ou filtro de harmônicas, que visam, além de evitar a ocorrência de ressonâncias harmônicas, reduzir a injeção do conteúdo harmônico gerado pelas cargas no sistema elétrico interno e na concessionária de energia elétrica.

1.5 PRECAUÇÕES COM BANCOS CAPACITORES

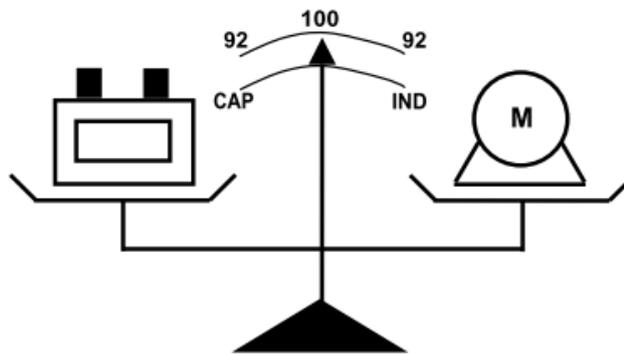
Segundo Fragoas (2008), é necessário se ter algumas atenções ao se instalar bancos capacitores, como a seguir:

- A instalação deve ser feita em local com boa ventilação e com espaçamento adequado entre as unidades;
- Após desligar, esperar um tempo para realizar o aterramento do capacitor, pois o mesmo pode ainda reter uma parte de sua carga, tornando-se perigoso caso manuseado incorretamente;
- As operações de ligar e desligar devem ser feitas pelo disjuntos principal do sistema do banco.

1.6 LEGISLAÇÃO (RESOLUÇÃO DA ANEEL)

Como citado anteriormente, a potência reativa não realiza trabalho, contudo, a mesma é necessária para o correto funcionamento de determinados sistemas, devendo, assim, ser transportada desde a geração para a unidade consumidora e para que as empresas concessionárias não transformem tal energia em receita, a Resolução N° 414 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), de Setembro de 2010, estabeleceu como 0,92 o valor mínimo para o fator de potência de referência, seja este indutivo ou capacitivo, das instalações elétricas das unidades consumidoras, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Faixa permissível para o fator de potência pela atual legislação



Fonte: (CODI, 2004)

Segundo Fragoas (2008), esta legislação em específico reforça os seguintes fundamentos:

- necessidade de liberação da capacidade do sistema elétrico nacional;
- a importância do uso racional da energia elétrica;
- redução no consumo de energia reativa indutiva, a qual pode vir a provocar sobrecarga nos sistemas das empresas fornecedoras e concessionárias de energia elétrica;
- redução no consumo de energia reativa capacitiva, a qual pode vir a provocar elevação da tensão no sistema de suprimento, havendo necessidade de investimento na aplicação de equipamentos corretivos e realização de procedimentos operacionais nem sempre de fácil execução;
- criação de condições para que os custos de expansão do sistema elétrico nacional sejam distribuídos para a sociedade de forma justa.

Segundo afirmado através do artigo 96 de tal legislação, para uma unidade consumidora que possua equipamento de medição apropriado, os valores correspondentes à energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes são apurados conforme as seguintes equações:

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

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

Os itens presentes nas equações acima estão definidos a seguir:

ERE: valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “ f_R ”, no período de faturamento, em Reais (R\$);

EEAM_T: montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo “ T ” de 01 (uma) hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh);

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

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

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

DRE(p): valor, por posto tarifário “ p ”, correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência “ f_R ” no período de faturamento, em Reais (R\$);

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

PAF(p): demanda de potência ativa faturável, em cada posto tarifário “ p ” no período de faturamento, em quilowatt (kW);

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

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

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

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

n₁: número de intervalos de integralização “ T ” do período de faturamento para os postos tarifários ponta e fora de ponta;

n₂: número de intervalos de integralização “ T ”, por posto tarifário “ p ”, no período de faturamento.

Para uma unidade consumidora que não possua equipamento de medição que permita a aplicação da equação definida acima, os valores correspondentes à energia elétrica e demanda de potência reativas excedentes são apurados conforme as seguintes equações:

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

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

Os itens presentes nas equações acima estão definidos a seguir:

ERE: 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);

DRE: 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).

1.7 ESTRUTURA TARIFÁRIA

Segundo Mamede (2002), é de suma importância o conhecimento do modelo tarifário para estudos que envolvem compensação de energia reativa em uma instalação, destacando assim os conceitos apresentados abaixo.

- a) horário de ponta: correspondente ao intervalo de três horas consecutivas, situado no período compreendido entre 17h30 e 22h de cada dia, com exceção de sábados e domingos, definidos de acordo com as características da carga do sistema elétrico da concessionária;
- b) horário fora de ponta: é formado pelas 21 horas restantes de cada dia definido no item anterior, assim como pelas 24 horas dos sábados e domingos;

- c) período úmido: período que abrange as leituras de consumo e demanda extraídas entre o primeiro dia do mês de dezembro e o último dia do mês de abril, totalizando cinco meses do ano;
- d) período seco: período que abrange as leituras de consumo e demanda extraídas entre o primeiro dia do mês de maio até o último dia do mês de novembro, totalizando sete meses do ano;

De acordo com o Manual de Tarifação de Energia Elétrica do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), para a correta tarificação é necessário a compreensão de certos conceitos, como os definidos abaixo:

- a) demanda: média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado;
- b) demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatoriamente e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW);
- c) demanda de ultrapassagem: parcela da demanda medida que excede o valor da demanda contratada, expressa em quilowatts (kW);
- d) demanda faturável: valor da demanda de potência ativa, identificada de acordo com os critérios estabelecidos e considerada para fins de faturamento, com aplicação da respectiva tarifa, expressa em quilowatts;
- e) demanda registrada: a máxima demanda medida pela concessionária, dentro de um intervalo de 15 (quinze) minutos, durante o período de leitura considerado;
- f) tarifa: preço da unidade de energia elétrica (R\$/MWh) e/ou da demanda de potência ativa (R\$/kW);
- g) tarifa monômnia: tarifa de fornecimento de energia elétrica, constituída por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa (kWh);
- h) tarifa binômnia: conjunto de tarifas de fornecimento, constituído por preços aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa (kWh) e à demanda faturável (kW).

A ANEEL também define que, no Brasil, existem duas possíveis classificações para as unidades consumidoras de energia elétrica: Grupo A, o qual possui tarifa binômnia, e grupo B, o qual possui tarifa monômnia. O agrupamento é definido, principalmente, em função do nível

de tensão em que são atendidos e também, como consequência, em função da demanda (kW) a ser contratada.

O Grupo A é composto pelas unidades consumidoras que são atendidas com tensão superior a 2300 volts e o mesmo é dividido em subgrupos levando em conta também o valor da tensão que é recebida, conforme abaixo:

- a) subgrupo A1: nível de tensão de 230 kV ou mais;
- b) subgrupo A2: nível de tensão de 88 a 138 kV;
- c) subgrupo A3: nível de tensão de 69 kV;
- d) subgrupo A3a: nível de tensão de 30 a 44 kV;
- e) subgrupo A4: nível de tensão de 2,3 a 25 kV;
- f) subgrupo AS para sistema subterrâneo.

Por sua vez, o Grupo B é composto pelas unidades consumidoras consideradas de baixa tensão, ou seja, aquelas que recebem tensão abaixo de 2300 volts. Tal grupo subdivide-se da seguinte maneira:

- a) subgrupo B1: residencial e residencial baixa renda;
- b) subgrupo B2: rural e cooperativa de eletrificação rural;
- c) subgrupo B3: demais classes;
- d) subgrupo B4: iluminação pública.

Com relação à estrutura tarifária vigente no Brasil, existem quatro diferentes segmentos, segundo a ANEEL:

- a) tarifa 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. Segundo o PROCEL, essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária, no qual se pactua tanto o valor da demanda pretendida pelo consumidor no horário de ponta (Demanda Contratada na Ponta) quanto o valor pretendido nas horas fora de ponta (Demanda Contratada fora de Ponta)
- b) tarifa 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. Segundo o PROCEL, essa modalidade tarifária exige um contrato específico com a concessionária, no qual se pactua a demanda pretendida pelo consumidor (Demanda Contratada), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta).

- c) tarifa convencional: é a modalidade estruturada para aplicação de preços diferenciados para a demanda e para o consumo, de acordo com a tensão de fornecimento e demais características do consumidor, como residencial, rural, etc. A depender da classificação do consumidor, somente é aplicada a tarifa de consumo. Segundo o PROCEL, o enquadramento na estrutura tarifária convencional exige um contrato específico com a concessionária, no qual se pactua um único valor da demanda pretendida pelo consumidor (Demanda Contratada), independentemente da hora do dia (ponta ou fora de ponta) ou período do ano (seco ou úmido);
- d) tarifa de ultrapassagem: é a tarifa diferenciada a ser aplicada à parcela de demanda que superar as respectivas demandas contratadas em cada segmento hora-sazonal para a tarifa azul, ou a demanda única contratada para a tarifa verde.

1.8 ANÁLISE PARA VIABILIDADE ECONÔMICA

Após a verificação da fatura de energia elétrica de uma instalação e a coleta de dados através do histórico de consumo e demanda, é possível realizar os cálculos para dimensionamento do banco capacitor necessário para tal instalação, descobrindo, assim, a potência reativa necessária no mesmo. Com esse dado, é possível realizar um orçamento dos dispositivos que seriam necessários para a implantação do sistema completo, e, a partir de tais dados, é possível utilizar alguns métodos econômicos que permitem a análise da viabilidade da implantação de um projeto. Tais como: o Valor Presente Líquido (VPL) e Tempo de Retorno de Capital (TRC).

1.8.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Segundo Mamede (2002), o método de cálculo denominado Valor Presente Líquido é de fácil execução e deve ser calculado em todo projeto de eficiência energética. O VPL é a soma algébrica de todos os fluxos de caixa descontados para o instante $T = 0$ e determinado pela equação abaixo:

$$VPL = -k + \sum_{i=1}^N \frac{F_C}{(1 + TD)^i}$$

Os itens presentes nas equações acima estão definidos a seguir:

VPL: Valor Presente Líquido;

k: investimento inicial;

F_c: fluxo de caixa descontado que corresponde à diferença entre as receitas e despesas realizadas a cada período considerado, em R\$;

TD: taxa de desconto;

i: tempo em anos;

N: número de períodos.

1.8.2 Tempo de Retorno de Capital (TRC)

O método que utiliza o cálculo do tempo de retorno de capital, também conhecido como *payback*, é o mais utilizado no âmbito técnico devido à sua facilidade de aplicação e interpretação. Este caso trata-se do chamado *payback* não descontado, o qual é um procedimento de cálculo em que não se leva em consideração a taxa de juros. Esta análise é feita apenas dividindo-se o custo da implantação do empreendimento da implantação do empreendimento pelo benefício obtido. Ou seja, este método mostra quanto tempo é necessário para que os benefícios se igualem ao investimento.

O *payback* pode ser calculado da seguinte maneira:

$$TRC = \frac{k}{RM}$$

Em que:

TRC: tempo de retorno de capital;

k: investimento inicial;

RM: retorno mensal (valore economizado por mês).

2 METODOLOGIA

O Trabalho apresentado será uma Pesquisa Aplicada, e terá como objetivo a realização de Pesquisa Exploratória sobre o material bibliográfico adquirido sobre o assunto. Os procedimentos técnicos a serem utilizados serão os de pesquisa bibliográfica. O método de abordagem utilizado será o hipotético-dedutivo e o método de procedimento de elaboração será o monográfico. Para coleta de dados será utilizada documentação indireta, com auxílio de documentos primários e secundários, e a análise e interpretação de seus dados será quantitativa.

No primeiro momento, serão feitas pesquisas bibliográficas na área de eficiência energética, instalações elétricas e a respeito de diferentes sistemas de bancos capacitores. Após a pesquisa necessária ter sido realizada, o consumo e custo de energia elétrica da Universidade do Estado do Amazonas – Escola Superior de Tecnologia serão analisados. Obtendo-se tais valores, será possível o início dos cálculos necessários para a descoberta dos procedimentos a serem realizados na Universidade para que o fator de potência da mesma seja corrigido, visando a diminuição do valor da tarifa com energia elétrica paga pela mesma. Serão feitos também os cálculos dos investimentos e tempo de retorno (*payback*) para verificar a viabilidade de implantação da melhoria.

2.1 ANÁLISE DA FATURA DE ENERGIA ELÉTRICA

A análise da fatura de energia elétrica é imprescindível para a obtenção de determinados dados, pois a partir da mesma é possível identificar a demanda de potência da Instituição, o que será necessário para a realização do dimensionamento do banco capacitor a ser implantado na Escola.

Tendo conhecimento da potência demandada e tarifada (itens explanados anteriormente neste trabalho), será possível determinar o que e como deverá ser modificado para que os itens incorretos ajustem-se aos padrões estipulados pelo órgão responsável por elaborar as leis relacionadas ao consumo de energia elétrica e semelhantes, que, para este caso, vem a ser a ANEEL.

Além disso, também será possível descobrir em qual subgrupo de consumidores de energia elétrica a Instituição está enquadrada, a tarifa presente na mesma e sua tensão de fornecimento.

2.2 ANÁLISE DO HISTÓRICO DE DEMANDA E CONSUMO

Mais importante que a análise da fatura de energia elétrica da Instituição, encontra-se a análise do histórico de consumo e demanda da mesma, o qual foi obtido em arquivo Excel, contendo valores referentes a 05 meses que serão analisados para identificação do problema e proposta de solução. O arquivo possui os seguintes dados:

- Data e hora do registro;
- Consumo de potência ativa (kWh);
- Consumo de potência reativa (kVAr);
- Potência ativa faturada (kWh);
- Potência reativa faturada (kVAr);
- Fator de potência;
- Posto horário (indicando se está em horário de ponta ou fora de ponta).

Cada um dos itens acima é registrado no arquivo de 15 em 15 minutos, então, para alguns cálculos, encontrou-se a necessidade de realizar a soma de quatro registros (montante para obter o valor equivalente a uma hora).

A partir dos itens listados, e tendo conhecimento dos valores limites (obtidos através da análise da fatura de energia) para as potências ativa e reativa, é possível verificar quando houve excesso de energia reativa e, conseqüentemente, quando houve registro de um fator de potência abaixo dos limites permitidos pela ANEEL (base fundamental para a realização deste trabalho).

Também utilizando alguns dos dados acima, serão elaborados determinados gráficos, representando a verificação feita nos meses analisados e a variação dos itens analisados para o período de tempo.

2.3 COLETA E UTILIZAÇÃO DE DADOS

Nesta etapa serão elaborados os cálculos, as análises e considerações necessárias para o dimensionamento do banco capacitor, a partir dos valores e limites encontrados na etapa de análise do histórico de consumo e demanda, descobrindo, assim, qual a melhor forma de implementar o mesmo ao sistema da Instituição.

2.4 ANÁLISE PARA VIABILIDADE ECONÔMICA

Após as etapas citadas anteriormente e a finalização do dimensionamento completo do sistema do banco capacitor, será realizada a análise financeira para verificação da viabilidade ou não da implantação do banco capacitor na Instituição, levando em consideração todos os sistemas acoplados ao mesmo e não apenas os capacitores em si. A análise será focada em demonstrar dois itens principais relacionados à viabilidade da implantação de projetos, como citado anteriormente, os quais são: VPL (valor presente líquido) e TRC (tempo de retorno de capital).

3 IMPLEMENTAÇÃO

3.1 TRATAMENTO E OBTENÇÃO DE DADOS

Segundo Lima (2016), analisando-se as faturas de energia elétrica, a Instituição enquadra-se no subgrupo A4 de classificação de consumidor, classe 5 – poder público, subclasse 02 – poder estadual, modalidade tarifária horo-sazonal verde e tensão de fornecimento de 13,8 kV. Com essa análise, identificou-se também a demanda contratada da Instituição como sendo de 540 kW. Para melhor representação, os dados principais estão dispostos na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 – Classificação tarifária da Escola Superior de Tecnologia
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA - EST

DEMANDA CONTRATADA	540 kW
SUBGRUPO	A4 (2,3 a 25 kV)
CLASSE	Poder Público
MODALIDADE TARIFÁRIA	Verde

Fonte: Próprio Autor

Nas Figuras 14 e 15, estão mostradas algumas partes do arquivo em Excel de consumo e demanda da Universidade para melhor representação da disposição dos dados. Nota-se que os dados citados anteriormente (na Seção 2.2) estão todos presentes no mesmo. Optou-se por representar apenas os trinta primeiros registros do mês de maio e setembro por serem o primeiro e o último meses analisados, e os outros seguem o mesmo formato.

Nota-se que a coluna “Posto Tarifário” alternar-se-á, de acordo com o horário, entre Fora Ponta e Ponta, e, para cada posto tarifário, na utilização dos cálculos da multa por baixo fator de potência, haverá um valor de tarifa diferente, visto que Universidade está enquadrada no sistema tarifário verde, o qual possui essa diferenciação de tarifa para o consumo registrado em horário de ponta e horário fora de ponta, conforme citado anteriormente. Todavia, possui apenas uma tarifa para a demanda, independente de horário.

Salienta-se que nenhum dos dados presentes nas Figuras 14 e 15 foi preenchido pelo Autor. Os mesmos foram obtidos da Concessionária da mesma forma como estão apresentados na imagem e, a partir destes que se deu início aos cálculos mostrados mais à frente nesta Seção.

Figura 14 – Histórico de consumo e demanda da EST-UEA (maio)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Id	Data do registro	kWh	kVARh	P (kW)	Q (kVAR)	FP	Posto horário
2	1	01/05/2016 - 00:15	19,920	18,240	79,680	72,960	0,737	Fora Ponta
3	2	01/05/2016 - 00:30	18,960	18,000	75,840	72,000	0,725	Fora Ponta
4	3	01/05/2016 - 00:45	19,200	18,240	76,800	72,960	0,724	Fora Ponta
5	4	01/05/2016 - 01:00	18,480	17,760	73,920	71,040	0,721	Fora Ponta
6	5	01/05/2016 - 01:15	18,720	18,000	74,880	72,000	0,72	Fora Ponta
7	6	01/05/2016 - 01:30	18,240	18,240	72,960	72,960	0,707	Fora Ponta
8	7	01/05/2016 - 01:45	18,000	17,280	72,000	69,120	0,721	Fora Ponta
9	8	01/05/2016 - 02:00	19,440	18,960	77,760	75,840	0,715	Fora Ponta
10	9	01/05/2016 - 02:15	18,960	18,480	75,840	73,920	0,716	Fora Ponta
11	10	01/05/2016 - 02:30	19,200	18,480	76,800	73,920	0,72	Fora Ponta
12	11	01/05/2016 - 02:45	18,960	19,200	75,840	76,800	0,702	Fora Ponta
13	12	01/05/2016 - 03:00	18,960	18,720	75,840	74,880	0,711	Fora Ponta
14	13	01/05/2016 - 03:15	18,720	18,960	74,880	75,840	0,702	Fora Ponta
15	14	01/05/2016 - 03:30	18,000	18,720	72,000	74,880	0,693	Fora Ponta
16	15	01/05/2016 - 03:45	17,280	18,480	69,120	73,920	0,682	Fora Ponta
17	16	01/05/2016 - 04:00	18,000	18,960	72,000	75,840	0,688	Fora Ponta
18	17	01/05/2016 - 04:15	17,760	18,480	71,040	73,920	0,692	Fora Ponta
19	18	01/05/2016 - 04:30	18,240	19,680	72,960	78,720	0,679	Fora Ponta
20	19	01/05/2016 - 04:45	17,280	19,680	69,120	78,720	0,659	Fora Ponta
21	20	01/05/2016 - 05:00	16,080	17,520	64,320	70,080	0,676	Fora Ponta
22	21	01/05/2016 - 05:15	15,840	15,120	63,360	60,480	0,723	Fora Ponta
23	22	01/05/2016 - 05:30	13,200	13,440	52,800	53,760	0,7	Fora Ponta
24	23	01/05/2016 - 05:45	14,160	14,400	56,640	57,600	0,701	Fora Ponta
25	24	01/05/2016 - 06:00	14,640	14,400	58,560	57,600	0,712	Fora Ponta
26	25	01/05/2016 - 06:15	13,920	14,640	55,680	58,560	0,689	Fora Ponta
27	26	01/05/2016 - 06:30	14,160	15,120	56,640	60,480	0,683	Fora Ponta
28	27	01/05/2016 - 06:45	14,160	14,400	56,640	57,600	0,701	Fora Ponta
29	28	01/05/2016 - 07:00	14,640	14,640	58,560	58,560	0,707	Fora Ponta
30	29	01/05/2016 - 07:15	14,400	14,160	57,600	56,640	0,713	Fora Ponta

Fonte: (Lima, 2016)

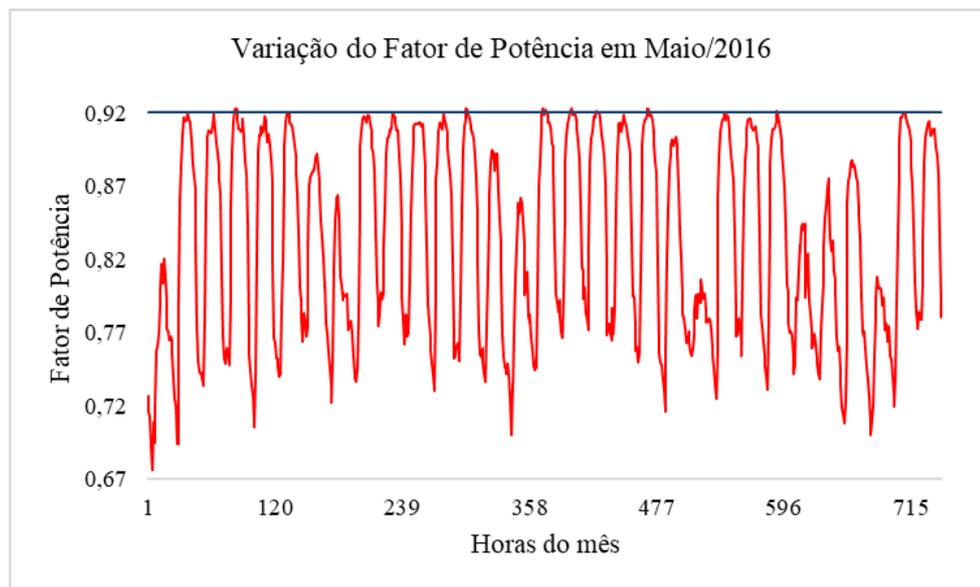
Figura 15 – Histórico de consumo e demanda da EST-UEA (setembro)

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Id	Data do registro	kWh	kVARh	P (kW)	Q (kVAR)	FP	Posto horário
2	2976	01/09/2016 - 00:00	31,92	24,24	127,68	96,96	0,796	Fora Ponta
3	2977	01/09/2016 - 00:15	31,92	24,72	127,68	98,88	0,79	Fora Ponta
4	2978	01/09/2016 - 00:30	31,44	24,24	125,76	96,96	0,791	Fora Ponta
5	2979	01/09/2016 - 00:45	31,44	24,48	125,76	97,92	0,789	Fora Ponta
6	2980	01/09/2016 - 01:00	30,48	24,24	121,92	96,96	0,782	Fora Ponta
7	2981	01/09/2016 - 01:15	30,48	24,96	121,92	99,84	0,773	Fora Ponta
8	2982	01/09/2016 - 01:30	30,00	24,24	120,00	96,96	0,777	Fora Ponta
9	2983	01/09/2016 - 01:45	30,24	24,96	120,96	99,84	0,771	Fora Ponta
10	2984	01/09/2016 - 02:00	30,72	26,16	122,88	104,64	0,761	Fora Ponta
11	2985	01/09/2016 - 02:15	30,24	24,72	120,96	98,88	0,774	Fora Ponta
12	2986	01/09/2016 - 02:30	30,24	22,32	120,96	89,28	0,804	Fora Ponta
13	2987	01/09/2016 - 02:45	29,28	21,84	117,12	87,36	0,801	Fora Ponta
14	2988	01/09/2016 - 03:00	30,24	22,56	120,96	90,24	0,801	Fora Ponta
15	2989	01/09/2016 - 03:15	29,04	21,84	116,16	87,36	0,799	Fora Ponta
16	2990	01/09/2016 - 03:30	29,04	22,32	116,16	89,28	0,792	Fora Ponta
17	2991	01/09/2016 - 03:45	29,28	22,32	117,12	89,28	0,795	Fora Ponta
18	2992	01/09/2016 - 04:00	29,04	22,80	116,16	91,20	0,786	Fora Ponta
19	2993	01/09/2016 - 04:15	29,76	23,28	119,04	93,12	0,787	Fora Ponta
20	2994	01/09/2016 - 04:30	29,52	22,80	118,08	91,20	0,791	Fora Ponta
21	2995	01/09/2016 - 04:45	29,76	23,28	119,04	93,12	0,787	Fora Ponta
22	2996	01/09/2016 - 05:00	27,12	20,88	108,48	83,52	0,792	Fora Ponta
23	2997	01/09/2016 - 05:15	29,04	22,08	116,16	88,32	0,796	Fora Ponta
24	2998	01/09/2016 - 05:30	32,40	23,76	129,60	95,04	0,806	Fora Ponta
25	2999	01/09/2016 - 05:45	39,12	22,08	156,48	88,32	0,87	Fora Ponta
26	3000	01/09/2016 - 06:00	38,16	21,84	152,64	87,36	0,867	Fora Ponta
27	3001	01/09/2016 - 06:15	39,36	23,04	157,44	92,16	0,863	Fora Ponta
28	3002	01/09/2016 - 06:30	40,56	23,04	162,24	92,16	0,869	Fora Ponta
29	3003	01/09/2016 - 06:45	48,00	24,72	192,00	98,88	0,889	Fora Ponta
30	3004	01/09/2016 - 07:00	56,40	26,64	225,60	106,56	0,904	Fora Ponta

Fonte: (Lima, 2016)

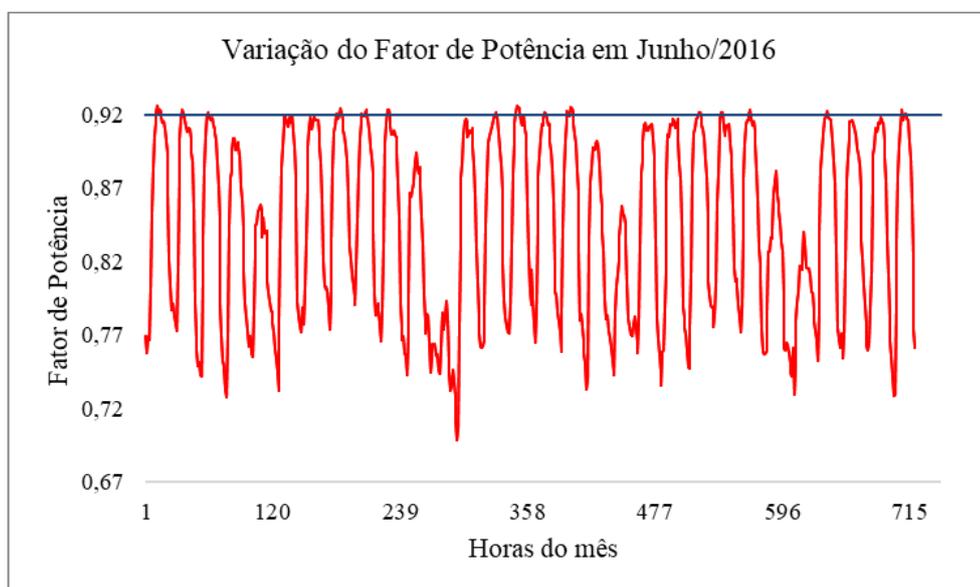
Em seguida, utilizando o arquivo do histórico de consumo e demanda da EST-UEA, foi possível obter a variação do fator de potência médio por cada hora dos meses analisados. Optou-se por realizar tal representação para possibilitar uma melhor visualização da proporção em que o fator de potência atende (ou não) aos padrões exigidos. As mesmas estão representadas nas Figuras 16 a 20. Possuindo como alvo (representado pela linha azul) o valor de referência adotado de 0,92, de acordo com as normas da ANEEL.

Figura 16 – Variação do fator de potência em maio/2016



Fonte: Próprio Autor

Figura 17 – Variação do fator de potência em junho/2016

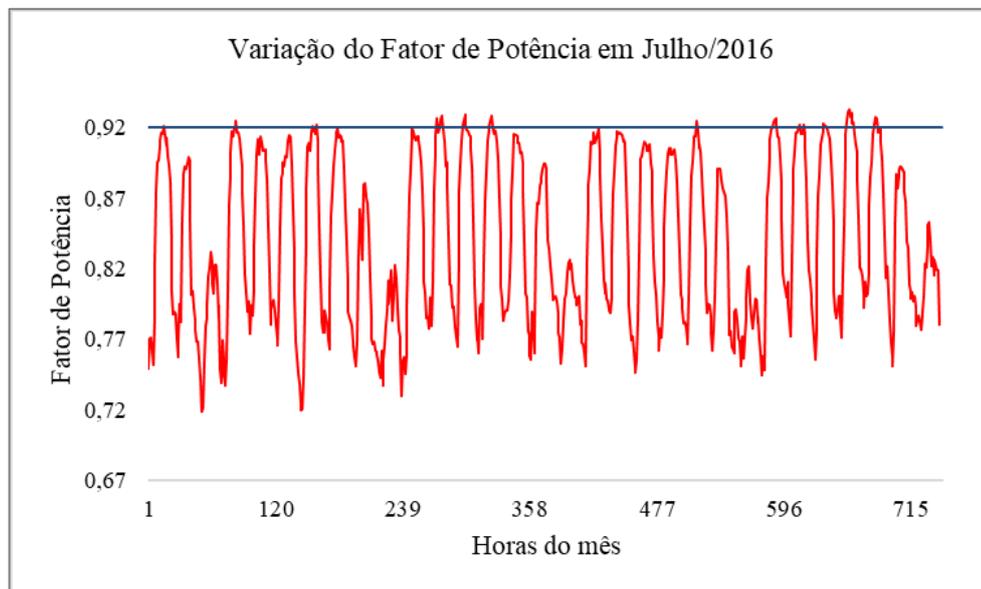


Fonte: Próprio Autor

Observa-se, na Figura 16, que o mês de maio, dentre os analisados, foi o que obteve o menor registro de fator de potência, sendo igual a 0,676 (analisando os FPs médios diários). Maio também obteve como fator de potência médio e máximo, respectivamente, 0,834 e 0,926, analisando-se todos os registros.

Através da Figura 17, no mês de junho, é possível verificar que em diversos períodos registrados o fator de potência esteve acima de 0,92, tendo como valor máximo registrado; 0,929. Todavia, uma significativa parte do mês também possuiu registros de fator de potência abaixo de 0,92, tendo como o valor mínimo registrado: 0,690. Tal mês possuiu um fator de potência médio de 0,845.

Figura 18 – Variação do fator de potência em julho/2016



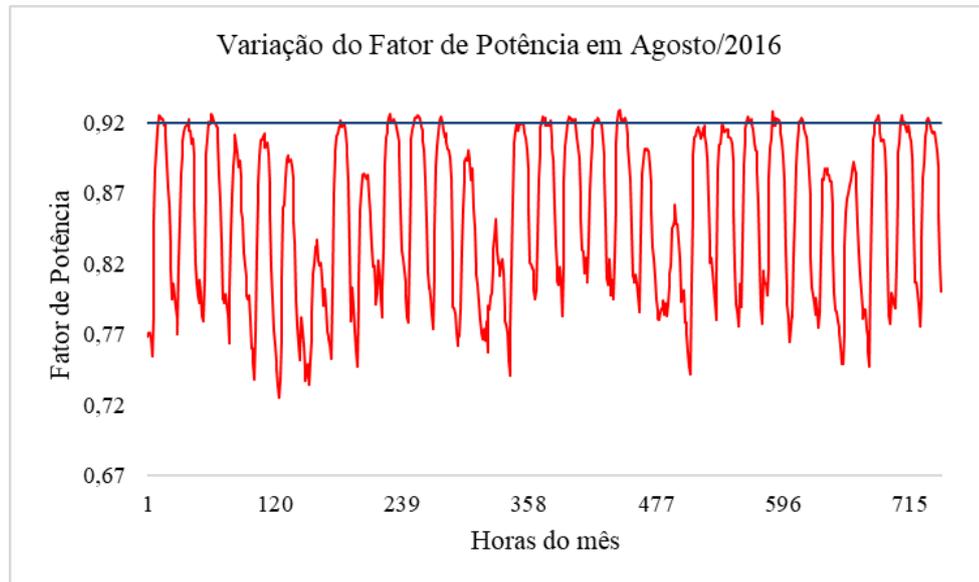
Fonte: Próprio Autor

No mês de julho, apresentado na Figura 18, o registro dos fatores de potência volta a decair em comparação com o mês de junho, apresentando como fator de potência médio: 0,840. A diferença em números não é tão grande, porém, visto à quantidade de horas que está sendo analisada, tal diferença vem a ser significativa para o valor pago no fim do mês pela Universidade. Assim, tal mês obteve como fator de potência mínimo e máximo, respectivamente, 0,707 e 0,934.

O mês de agosto, mostrado na Figura 19, voltou a apresentar um crescimento no fator de potência médio registrado em comparação a julho, com o valor de 0,853, o qual foi o valor médio máximo registrado entre os meses analisados. Além disso, agosto também foi o mês analisado o qual possuiu o maior registro de fator de potência mínimo: 0,711. Além disso,

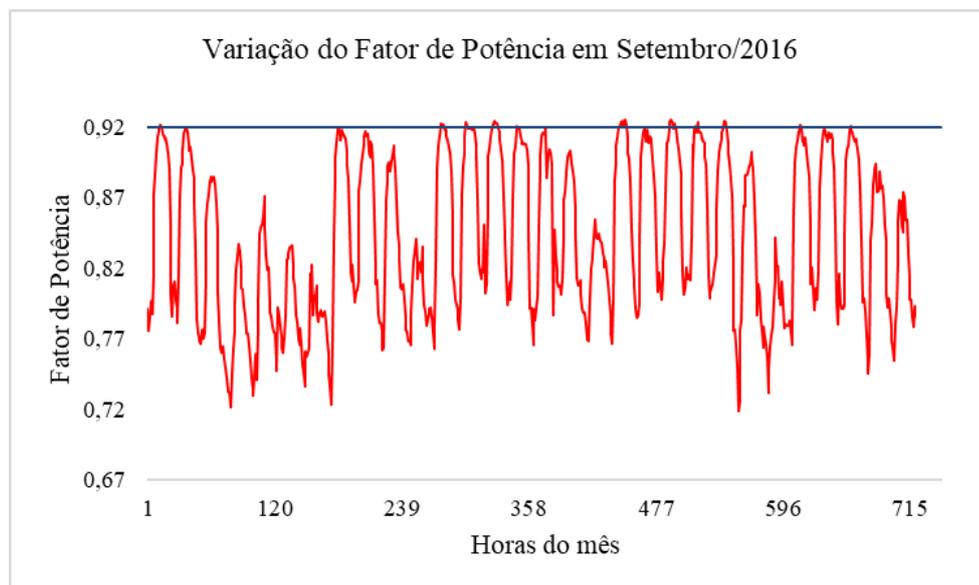
conforme será visto mais à frente nesta Seção do trabalho, agosto foi um dos meses onde a multa possuiu menor valor pago pela Universidade.

Figura 19 – Variação do fator de potência em agosto/2016



Fonte: Próprio Autor

Figura 20 – Variação do fator de potência em setembro/2016

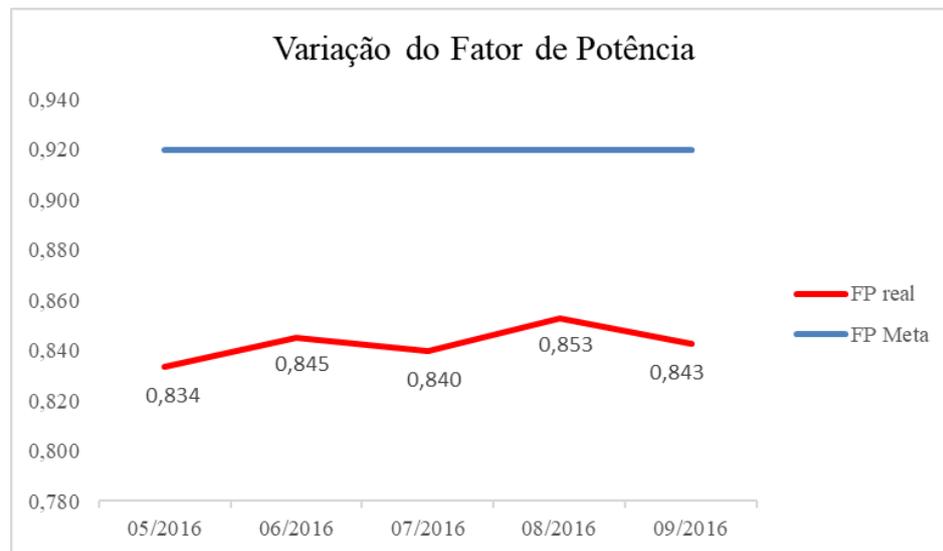


Fonte: Próprio Autor

Em setembro, apresentado na Figura 20, o fator de potência retornou a diminuir se comparado a agosto, possuindo como valor médio para o mês: 0,843, e apresentando como valor mínimo e máximo registrados, respectivamente, 0,695 e 0,929.

Para uma visão mais geral de todo o período analisado, decidiu-se representar a variação do fator de potência médio total de cada mês (mostrado na Figura 21). Assim, comprova-se, mais uma vez, o problema que se deseja solucionar com a execução deste trabalho, visto que o fator de potência médio da Escola Superior de Tecnologia está fora dos padrões exigidos pela ANEEL, ou seja, não está com o valor dentro dos limites de 0,92 sendo indutivo ou capacitivo.

Figura 21 – Variação do FP no período total analisado



Fonte: Próprio Autor

Na Tabela 2 mostrada a seguir, pode-se constatar os valores mínimo, médio e máximo presentes nas aferições do fator de potência em cada um dos meses analisados. Na mesma, é possível verificar que, embora na maior parte do tempo analisado tenha existido um baixo fator de potência, também houve registros de fator de potência dentro dos padrões (acima ou igual a 0,92) em todos os meses (o que também pôde ser constatado através da análise das Figuras 16 a 20). Assim, durante tais períodos em que o fator de potência esteve dentro do intervalo aceitável, a Universidade não foi penalizada com multas.

Tabela 2 – Valor do Fator de Potência segundo histórico analisado

MES	FP MEDIO	FP MAXIMO	FP MINIMO
05/2016	0,834	0,926	0,659
06/2016	0,845	0,929	0,690
07/2016	0,840	0,934	0,707
08/2016	0,853	0,931	0,711
09/2016	0,843	0,929	0,695

Fonte: Próprio Autor

Em seguida, já possuindo os dados em relação à variação do fator de potência em cada mês, inicia-se a verificação do conseqüente excesso de reativos devido à tal variação.

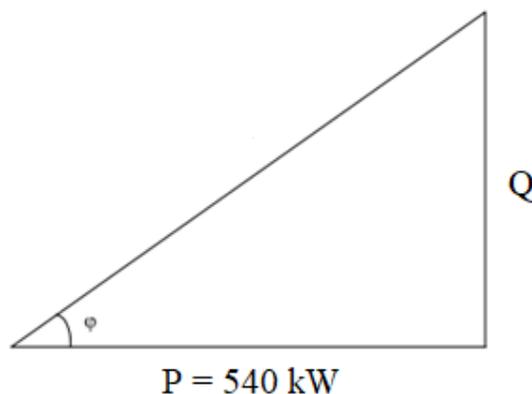
Para obter o valor da energia reativa que seria considerada dentro dos padrões da ANEEL, utilizou-se da relação entre potências ativa e reativa levando-se em consideração o fator de potência referência da ANEEL de 0,92. Assim, primeiramente calculou-se o ângulo que deve existir entre a tensão e corrente de uma determinada fase para obter-se o valor de 0,92:

$$\begin{aligned} \text{FP} = \cos(\varphi) \rightarrow 0,92 = \cos(\varphi) \\ \varphi = 23,07^\circ \end{aligned}$$

Encontrando-se tal ângulo e aplicando-o ao triângulo de potências presente na Figura 22, obtém-se o que seria o valor dentro dos padrões ideais para a energia reativa da Instituição.

$$\tan(\varphi) = \frac{Q}{P} \rightarrow \tan(23,07^\circ) = \frac{Q}{540\text{k}} \rightarrow Q = 230 \text{ kVAr}$$

Figura 22 – Triângulo de potências da Instituição



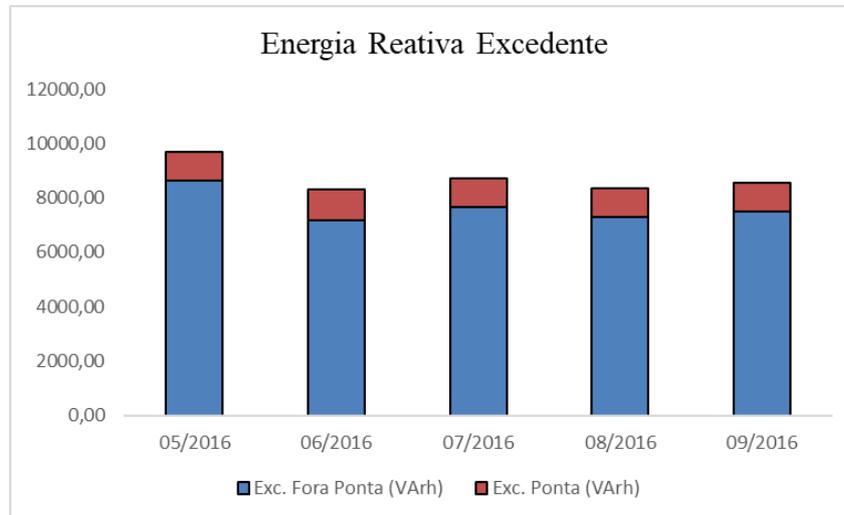
Fonte: Adaptado a partir de Duailibe (2000)

Descobriu-se, assim, que o valor dentro dos padrões para a energia reativa da Instituição estaria abaixo de 230 kVAr (tal valor seria atingido apenas quando o uso de potência ativa da EST estivesse igual ao valor da potência instalada de 540 kW).

Utilizando-se do arquivo de consumo e demanda, foi possível obter também um gráfico para representação do excedente de energia reativa que estava ocorrendo no período analisado, o qual é representado na Figura 23 a seguir, onde as barras em azul representam a energia reativa excedente fora de ponta e as barras em vermelho representam a energia reativa excedente em

ponta. Fez-se a diferenciação entre os dois pontos tarifários, pois, como citado anteriormente, cada um tem uma tarifa específica a ser aplicada.

Figura 23 – Variação do excedente de reativo no período analisado



Fonte: Próprio Autor

Ainda analisando a Figura 21 em comparação à Figura 23, pode-se verificar a afirmação matemática de que os fatores de potência e os excessos de energia reativa são inversamente proporcionais. Assim, observando a Figura 23, pode-se verificar que a tendência de crescimento da variação do fator de potência é contrária à variação do excesso de energia reativa, ou seja, quanto menor for o fator de potência médio registrado, maior será o excesso de energia reativa na rede.

Para o início da análise financeira, aplicou-se os valores presentes na Figura 24, segundo regulamentação da ANEEL, visando descobrir o quanto havia sido pago pelo excesso de reativos em cada mês. Como citado anteriormente, a Instituição enquadra-se no subgrupo A4 de classificação de consumidor, classe 5 - poder público, subclasse 02 – poder estadual, modalidade tarifária horo-sazonal verde e tensão de fornecimento de 13,8 kV. Assim, as tarifas a serem consideradas são as destacadas pelo retângulo vermelho na Figura 24.

Figura 24 – Tarifas de energia elétrica do grupo A

Modalidade Tarifária	Faturado	Ponta	Fora de ponta
Horo-sazonal Azul	Consumo (kW/h)	R\$ 0,408373	R\$ 0,268253
	Demanda (kW)	R\$ 18,520000	R\$ 7,546660
Horo-sazonal Verde	Consumo (kW/h)	R\$ 0,804820	R\$ 0,299650
	Demanda (kW)	R\$ 6,390000	

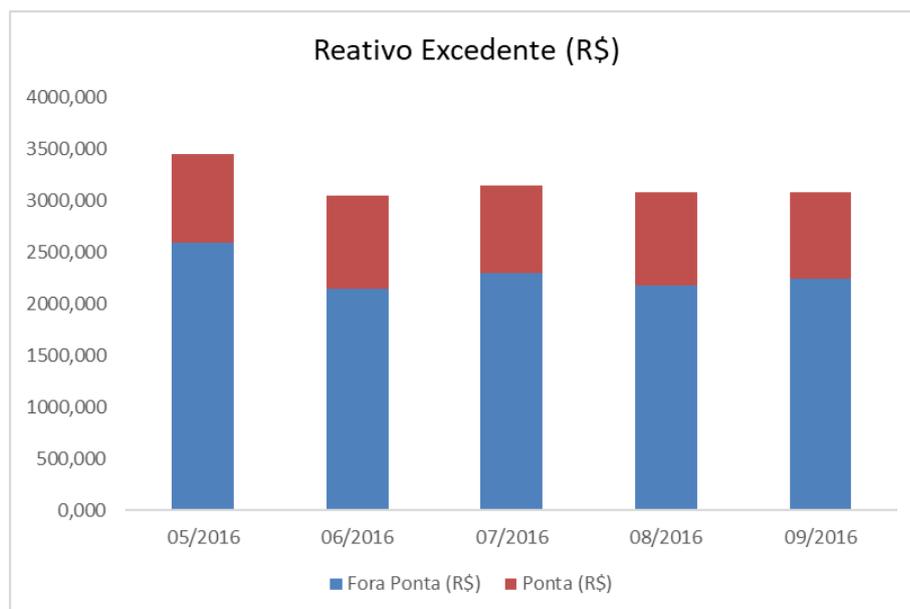
Fonte: Lima (2016)

Após a aplicação das faturas na equação disposta na Seção 1.6 deste trabalho, obteve-se o gráfico presente na Figura 25. Assim, realizando novamente uma comparação com a Figura 23, é possível verificar que, quanto maior o nível de excesso de energia reativa na rede, maior será a multa a ser paga pela Universidade.

Em relação à tal afirmação, é importante realizar uma comparação entre os meses de agosto e setembro, pois, analisando-se a Figura 23, tem-se a impressão de que o mês de setembro possui uma quantidade maior de reativos excedentes em relação a agosto, porém, ao analisar-se a Figura 25, verifica-se que o maior valor pago foi, entre esses dois meses, no mês de agosto, o que invalidaria a afirmação feita anteriormente de que, quanto maior o nível de excesso de energia reativa na rede, maior será a multa a ser paga pela Universidade. Todavia, isso é explicado devido ao fato de o mês de agosto possuir uma maior quantidade de reativos excedentes em seu horário de ponta (que possui um valor de tarifa maior, como visto anteriormente). Assim, o valor pago no mesmo é maior.

Dessa forma, sabe-se que, dentre os meses analisados, os que tiveram maior e menor índices de excesso de reativos (e, conseqüentemente, maior e menor multa) são, respectivamente, o mês de maio e junho.

Figura 25 – Valor pago pelo consumo de excedentes



Fonte: Próprio Autor

Segundo Lima (2016), o valor da fatura de energia elétrica para o mês de maio foi referente a R\$ 68.326,62. Assim, analisando o gráfico na Figura 25, conclui-se que o valor pago devido ao baixo fator de potência na rede para este mês é equivalente a aproximadamente 5,0%

do valor total. Em termos de porcentagem, tal valor pode não parecer tão significativo, porém, somando o valor em reais por ano de todos os meses, o resultado será um valor muito maior, o qual poderia ser utilizado pela Instituição de outra forma.

Além do cálculo do valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência, segundo a Resolução 414 da ANEEL, também é necessário o cálculo do valor, por posto tarifário (ponta e fora ponta), correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência. Todavia, visto que a EST-UEA se enquadra no subgrupo A4, o valor da demanda a ser pago será o mesmo para os dois pontos tarifários, a análise é feita observando todos os dois pontos tarifários e selecionando a demanda máxima que resultar, independentemente de estar em horário de ponta ou fora de ponta. Assim, para cada mês obteve-se:

Tabela 3 – Demandas máximas nos postos tarifários

Mês	Demanda Máxima (kW)	FP	DR (R\$)
05/2016	751,68	0,920	N/A
06/2016	682,56	0,916	19,05
07/2016	518,40	0,922	N/A
08/2016	792,00	0,919	5,51
09/2016	761,28	0,924	N/A

Fonte: Próprio Autor

Analisando a Tabela 3, é possível analisar que os meses de maio e setembro, apesar de possuírem a demanda máxima bem acima da demanda contratada (540 kW), possuíam fator de potência (no momento registrado da demanda máxima) acima de 0,92. Assim, não será necessário o pagamento de multa por baixo fator de potência neste momento de registro, mas sim por excesso de demanda, porém essa multa não é o foco deste trabalho.

O mês de julho não apresentou excesso de demanda em sua demanda máxima, então este mês fica isento do pagamento dessa multa em específico. Lembrando que este é o mês de recesso acadêmico, o que pode ter tido grande peso neste caso e levado a demanda faturada a não ultrapassar a demanda contratada.

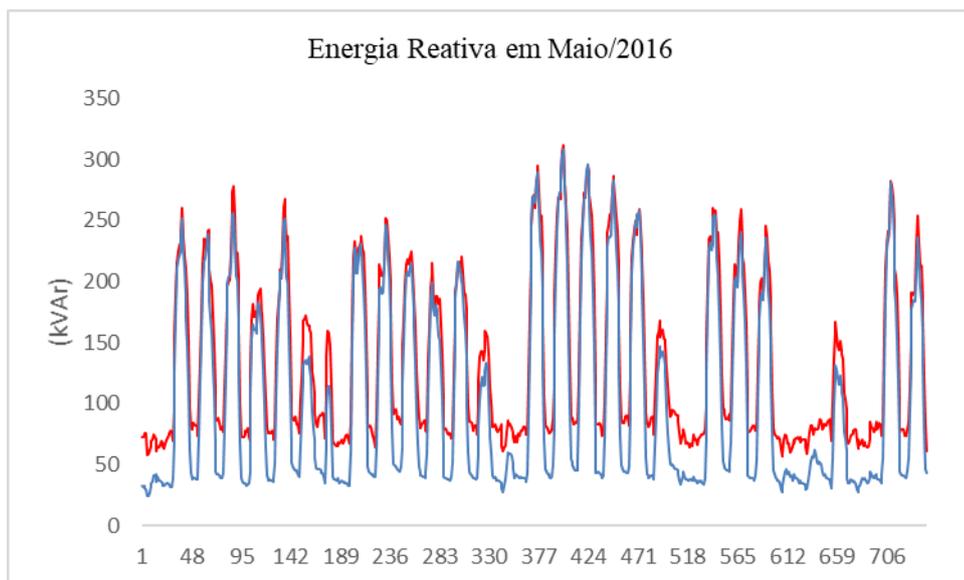
Por fim, os meses de junho e agosto, além de possuírem a ultrapassagem da demanda contratada, também possuíam fatores de potência abaixo e 0,92 para o horário em que essa máxima demanda foi registrada. Sendo assim, tais meses foram sujeitos ao pagamento da multa com as tarifas presentes na Figura 24.

Nota-se que os valores são baixos se comparados aos valores pagos devido ao baixo fator de potência, mas isso é devido ao fato de que este valor é pago uma única vez, enquanto

a multa relacionada ao baixo fator de potência é acrescentada na fatura de energia a cada hora que o mesmo está abaixo de 0,92.

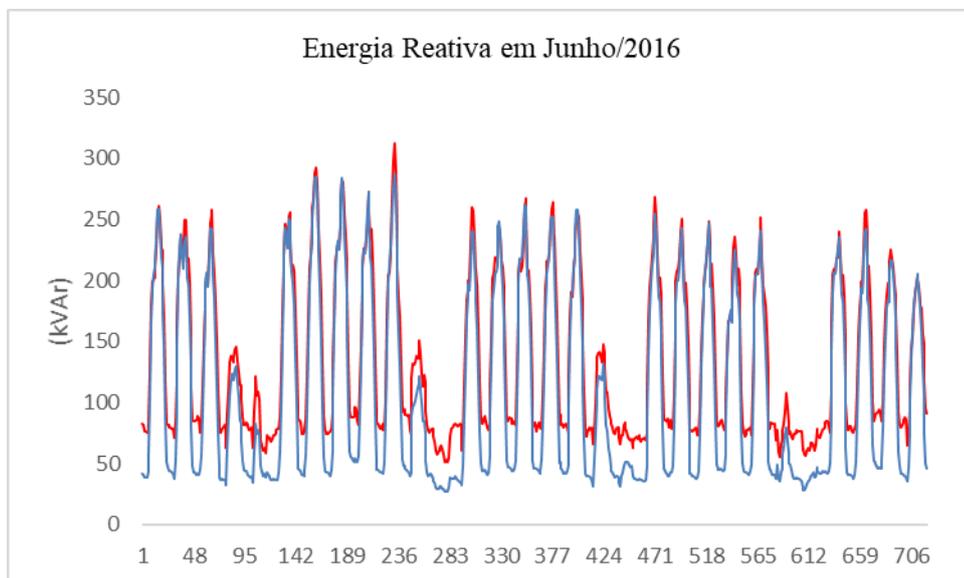
Os gráficos presentes nas Figuras 26 a 30 representam a variação da energia reativa nos meses analisados. Para que fossem gerados, no arquivo do consumo e demanda da EST, acrescentou-se uma nova coluna com a equação que multiplicaria o valor da potência ativa pela tangente do ângulo $23,07^\circ$, para assim obter o valor da potência reativa ideal (representada em azul) e realizar-se a comparação com a potência reativa real, indicando o excesso desta.

Figura 26 – Variação da energia reativa em maio/2016 por hora



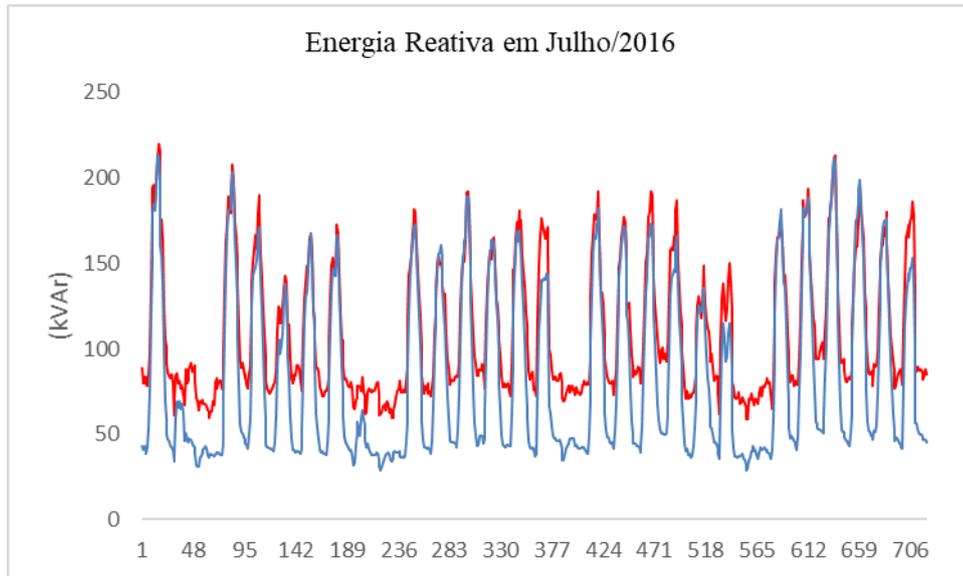
Fonte: Próprio Autor

Figura 27 – Variação da energia reativa em junho/2016 por hora



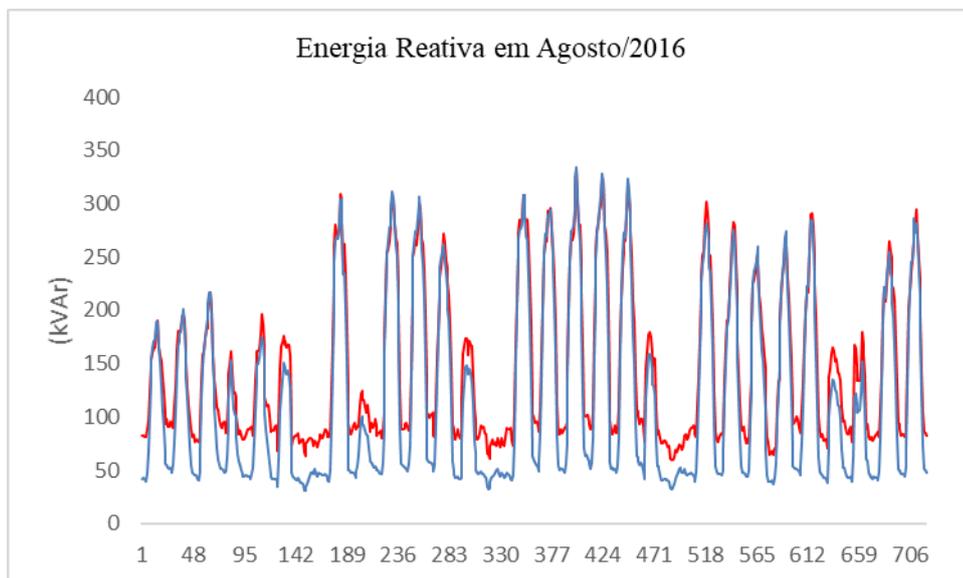
Fonte: Próprio Autor

Figura 28 – Variação da energia reativa em julho/2016 por hora



Fonte: Próprio Autor

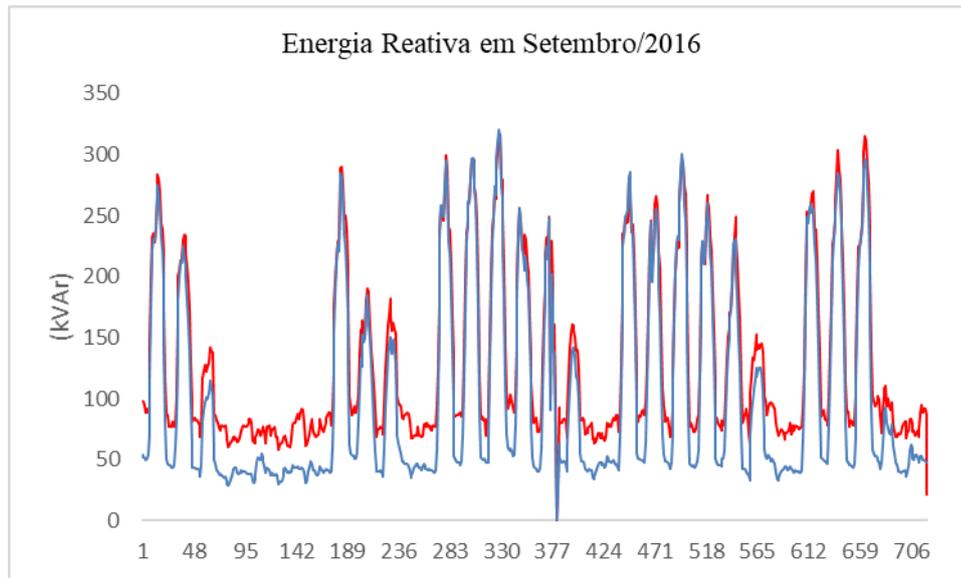
Figura 29 – Variação da energia reativa em agosto/2016 por hora



Fonte: Próprio Autor

Na Figura 30, para o mês de setembro, é possível notar que há um intervalo que leva a energia reativa a zero. Tal fato ocorreu no dia 16/09/2019, quando houve falta de eletricidade na Escola Superior de Tecnologia por um período de uma hora aproximadamente.

Figura 30 – Variação da energia reativa em setembro/2016 por hora



Fonte: Próprio Autor

3.2 CÁLCULOS E DIMENSIONAMENTOS

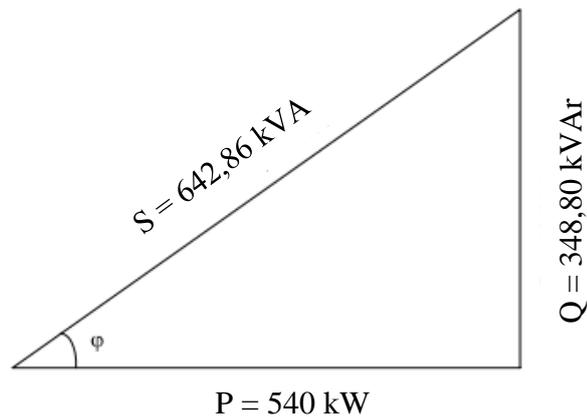
Segundo Duailibe (2000), a instalação de bancos capacitores é a ferramenta mais viável financeiramente e também tecnicamente para se corrigir o fator de potência de um local. Assim, utilizou-se desta afirmação, dentre as outras diversas citadas anteriormente, para o início da execução dos cálculos, focando-os exatamente na implantação de bancos capacitores para compensação da energia reativa.

A Escola possui potência instalada de 540kW (considerando-a o mesmo valor da potência demandada) e um fator de potência médio de 0,84, conforme definido através da amostragem estudada. Assim, a potência reativa média consumida pela Escola é de aproximadamente 349 kVAr. Obteve-se também o triângulo de potências representado na Figura 31. Além disso, observa-se que a energia reativa Q está bem acima do limite calculado anteriormente de 230 kVAr.

$$S = \frac{P}{\cos \phi} = \frac{540k}{0.84} \rightarrow S = 642,86 \text{ kVA}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(642,86k)^2 - (540k)^2} \rightarrow Q = 348,80 \text{ kVAr}$$

Figura 31 – Triângulo de potências antes da compensação



Fonte: Adaptado a partir de Duailibe (2000)

Visando o correto dimensionamento do banco capacitor para a Escola Superior de Tecnologia, é necessário conhecimento da potência máxima consumida pela mesma, considerando-se um fator de potência dentro das normas da ANEEL, como citado anteriormente, de 0,92. Assim, conforme representado abaixo, obtém-se um valor de energia reativa de aproximadamente 230 kVAr.

$$S = \frac{P}{\cos \phi} = \frac{540\text{k}}{0.92} \rightarrow S = 586,96 \text{ kVA}$$

$$Q' = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{(586,96\text{k})^2 - (540\text{k})^2} \rightarrow Q' = 230,04 \text{ kVAr}$$

Considerando para os cálculos elaborados acima:

P = Potência ativa;

Q = Potência reativa;

S = Potência aparente.

Realizando os dois cálculos apresentados, torna-se possível descobrir o valor do banco capacitor a ser instalado. Assim, pode-se concluir que a EST necessita de uma compensação de aproximadamente 120 kVAr, visto que este valor é exatamente o ultrapassado pelo consumo da mesma segundo as normas vigentes.

$$Q_{BC} = Q - Q' = 348,80\text{k} - 230,04\text{k} \rightarrow Q_{BC} \cong 120\text{kVAr}$$

Em que:

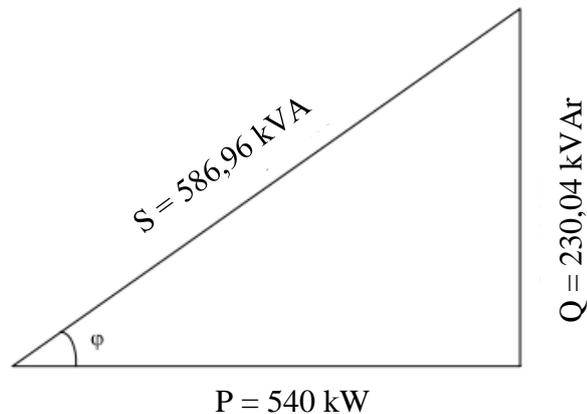
Q_{BC} : Potência reativa do banco capacitor;

Q : Potência reativa com FP igual a 0,84;

Q' : Potência reativa com FP igual a 0,92.

Obtém-se também o novo triângulo de potências devido à compensação de energia reativo representado na Figura 32.

Figura 32 – Triângulo de potências após compensação



Fonte: Adaptado a partir de Duailibe (2000)

Agora, tendo conhecimento da quantidade de energia reativa que precisa ser cedida pelo banco capacitor para que haja a compensação de energia reativa capacitiva, e possuindo também os valores da frequência da rede e da tensão da instituição, calcula-se o valor da capacitância para o banco capacitor.

$$C = \frac{Q}{2\pi f \cdot (V_{FF})^2}$$

$$C = \frac{Q}{2\pi f \cdot (V_{FF})^2} \rightarrow C = \frac{120k}{2\pi \cdot 60 \cdot (220)^2} \rightarrow C = 6576 \mu F$$

Como pôde ser verificado através das variações de energia reativa ao longo dos dias, e ao longo dos meses, percebe-se que nem sempre o sistema da Universidade está fora do padrão de energia reativa aceitável. Sendo assim, a aplicação de um banco capacitor fixo com as potência e capacitância calculadas acima, dependendo da hora aplicada, talvez injetasse muita energia reativa capacitiva na rede, tornando o fator de potência majoritariamente capacitivo, fazendo com que o fator de potência saísse do padrão de valores acima de 0,92.

Para contornar o problema citado acima, decidiu-se utilizar como primeira medida o estudo da aplicação de um banco capacitor automático, levando-se em conta todos os sistemas apresentados neste.

Conforme citado na Seção 1.2, a melhoria no fator de potência de determinada instalação acarreta diretamente na redução das perdas nos condutores da mesma. Assim, ao ser realizada a correção do fator de potência para 0,92 (valor mínimo) e considerando o fator de potência anterior como sendo o FP médio registrado nos meses de 0,84, calcula-se a redução de perdas que seria alcançada para o caso:

$$RP(\%) = \left(1 - \frac{FP_I^2}{FP_F^2}\right) \cdot 100 = \left(1 - \frac{(0,84)^2}{(0,92)^2}\right) \cdot 100$$

$$RP = 16,6 \%$$

Assim, com a correção do fator de potência ocorreria a redução de, aproximadamente, 16% das perdas nos condutores presentes na rede elétrica da Universidade.

Na Seção 1.2 deste trabalho, foi possível verificar as vantagens e desvantagens de cada uma das configurações de montagens de bancos capacitores em instalações elétricas existentes. Assim, tenho conhecimento de que a Universidade possui instalada em sua rede elétrica cargas de diferentes potências, desde dispositivos de iluminação, aparelhos de climatização, dispositivos específicos nos laboratórios das Engenharias (como Elétrica, Química, Civil, etc.), a compensação por grupo de cargas não seria viável. Assim, o mais recomendado seria a compensação geral, posicionando o banco capacitor logo ao lado do transformador principal da subestação da Escola Superior de Tecnologia.

Com a compensação de energia reativa sendo feita de forma geral haveria uma mais fácil supervisão do sistema (facilitando a implantação do controle automático), pois o banco capacitor estaria apenas em uma localização. Além disso, estudos também afirmam que esse tipo de compensação ocasiona melhor no nível de tensão e, caso necessitem instalações complementares, estas serão relativamente simples de serem implementadas.

3.3 CUSTO PARA INSTALAÇÃO DO BANCO CAPACITOR

Como calculado anteriormente, o banco capacitor ideal para a Universidade deve possuir energia reativa de 120 kVAr aproximadamente. Tendo conhecimento deste valor, é possível determinar a quantidade de estágios presentes no banco capacitor e quais os valores de

energia reativa dos mesmos. Na Seção 1.3.2, citou-se a vantagem da existência de diversos estágios no BC visto que, às vezes, para que ocorra a correção do FP, é necessária apenas a inserção de uma baixa quantidade de energia reativa capacitiva na rede, então, possuindo unidades capacitivas de diferentes valores de energia reativa, seria possível ter um controle mais preciso.

Para fins de exemplo, caso se optasse pela utilização de 04 bancos capacitores de 30 kVAr cada, atingir-se-ia o valor necessário de 120 kVAr, porém, em determinados momentos, a Universidade atinge valores de FP como 0,90 e 0,91, os quais não estão distantes do valor desejado de 0,92. Assim, possuindo apenas capacitores de 30 kVAr, o controlador inseriria apenas uma carga capacitiva de 30 kVAr para a correção neste caso, porém, haveria risco da energia reativa capacitiva ser relativamente alta e transformar o FP em um baixo capacitivo, não permitindo que o mesmo entre no intervalo desejado.

O site da empresa WEG (www.weg.net) permite o dimensionamento em estágios de bancos capacitores caso o usuário possua certas informações como a tensão de alimentação do local e o valor necessário de energia reativa do banco capacitor (a interface desta seção do site está representada no Apêndice A deste trabalho, bem como os valores inseridos para obtenção do resultado. Assim, para diferenciação dos valores dos estágios, os seguintes valores foram selecionados, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Valores dos estágios do BC

ESTÁGIO DO BANCO CAPACITOR	POTÊNCIA REATIVA (KVAR)
1	25
2	25
3	20
4	15
5	15
6	10
7	5
8	5

Fonte: Próprio Autor

A partir do preenchimento dos dados, como citado anteriormente, o site retornou os equipamentos presentes na Figura 33 para comporem o banco capacitor. Além das unidades capacitivas, ele também retornou dispositivos de proteção (para o caso de sobretensão ou

descargas elétricas) e manobra (modo de atuação – ativação ou desativação com a rede) para cada uma.

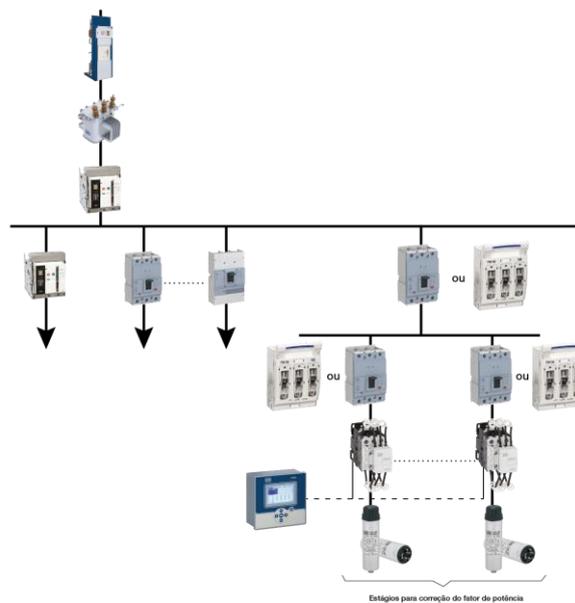
Figura 33 – Dispositivos para o banco capacitor

Estágio	Proteção		Manobra		Capacitor	
	Código	Descrição	Código	Descrição	Código	Descrição
1	11631365	DISJUNTOR DWB160N63-3DF	11471896	CONTATOR CWMC32-10-30X26	11916924	UNIDADE CAPACITIVA UCWT25V40 S26 HD
2	11631365	DISJUNTOR DWB160N63-3DF	11471896	CONTATOR CWMC32-10-30X26	11916924	UNIDADE CAPACITIVA UCWT25V40 S26 HD
3	11631363	DISJUNTOR DWB160N50-3DF	11471896	CONTATOR CWMC32-10-30X26	11916901	UNIDADE CAPACITIVA UCWT20V40 Q26 HD
4	11631362	DISJUNTOR DWB160N40-3DF	11471428	CONTATOR CWMC25-10-30X26	11313821	UNIDADE CAPACITIVA UCWT15V40 N22
5	11631362	DISJUNTOR DWB160N40-3DF	11471428	CONTATOR CWMC25-10-30X26	11313821	UNIDADE CAPACITIVA UCWT15V40 N22
6	11339665	DISJUNTOR DWB160N25-3DX	12713060	CONTATOR CWMC9-10-30X26	11313787	UNIDADE CAPACITIVA UCWT10V40 N20
7	10409882	FUSIVEL NH gL/gG FNH00-20U	12713060	CONTATOR CWMC9-10-30X26	10046012	UNIDADE CAPACITIVA UCWT5V40 L16
8	10409882	FUSIVEL NH gL/gG FNH00-20U	12713060	CONTATOR CWMC9-10-30X26	10046012	UNIDADE CAPACITIVA UCWT5V40 L16

Fonte: WEG, 2019

Além disso, o site também mostrou a possível forma de conexão desse sistema, conforme representado na Figura 34.

Figura 34 – Exemplo de montagem sugerido



Fonte: WEG, 2019

Realizando uma pesquisa de cada um dos equipamentos acima, através dos sites presentes no Apêndice B, obteve-se o orçamento apresenta na Tabela 5 para o banco capacitor.

A partir do conhecimento do valor total a ser utilizado para a compra do banco capacitor, é possível dar-se início aos cálculos dos modelos matemáticos que comprovarão a viabilidade (ou não) da implantação do banco capacitor na Universidade.

Primeiramente, realizou-se a média dos cinco meses analisados para obter-se o valor médio pago por mês devido ao baixo fator de potência. Assim, obteve-se para este valor: R\$ 3.165,730 por mês a ser pago pelo baixo fator de potência. Então, considerando que cada mês do ano tenha em média esse valor pago devido ao baixo FP, isso significa que em um ano o valor total gasto com baixo FP seria de:

$$3.165,730 \cdot 12 \text{ meses} = \mathbf{R\$ 37.988,76 \text{ por ano}}$$

Tabela 5 – Preço dos dispositivos para o BC

Dispositivo	Quantidade	Preço (R\$)	Preço Final (R\$)
Unidade capacitiva 25kVAr	2	609,30	1218,60
Unidade capacitiva 20kVAr	1	631,00	631,00
Unidade capacitiva 15kVAr	2	300,00	600,00
Unidade capacitiva 10kVAr	1	214,00	214,00
Unidade capacitiva 5kVAr	2	123,30	246,60
Contator CWMC32	3	81,00	243,00
Contator CWMC25	2	171,00	342,00
Contator CWMC9	3	137,70	413,10
Disjuntor DWB160N63	2	355,17	710,34
Disjuntor DWB160N50	1	355,17	355,17
Disjuntor DWB160N40	1	355,17	355,17
Disjuntor DWB160N25	1	308,85	308,85
Disjuntor DWB400N320	1	1227,68	1227,68
Fusíveis	2	20,04	40,08
Controlador de Fator de Potência	1	2799,00	2799,00
Mão de obra	10 hr	25,00	250,00
TOTAL			9.954,59

Fonte: Próprio Autor

Sabendo-se também que o tempo de vida útil médio dos bancos capacitores é de 5 anos, é possível calcular a depreciação (ou seja, o custo da obsolescência dos bancos capacitores) para este caso:

$$\text{Dep} = \frac{k}{n} = \frac{9.954,59}{5} \rightarrow \text{Dep} = \text{R\$ 1.990,92}$$

Em que:

Dep: depreciação;

k: investimento inicial;

n: vida útil média em anos.

Obtendo a depreciação, é possível calcular o fluxo de caixa da seguinte maneira;

$$\begin{aligned} F_C &= (\text{Economia anual na fatura} - \text{Dep}) \cdot (1 - \text{IR}) + \text{Dep} \\ F_C &= (37.988,76 - 1.990,92) \cdot (1 - \text{IR}) + 1.990,92 \end{aligned}$$

Sendo IR o imposto de renda igual a 27%:

$$\begin{aligned} F_C &= (37.988,76 - 1.990,92) \cdot (1 - 0,27) + 1.990,92 \\ \mathbf{F_C} &= \mathbf{\text{R\$ 28.269,34}} \end{aligned}$$

Assim, todos os valores necessários para o cálculo do VPL (valor presente líquido) foram obtidos:

$$\text{VPL} = -k + \sum_{i=1}^N \frac{F_C}{(1 + \text{TD})^i}$$

Em que:

i: tempo em anos (05 para este caso);

TD: taxa de desconto (14% da tabela SELIC).

$$\begin{aligned} \text{VPL} &= -9.954,59 + \left[\frac{28.269,34}{(1 + 0,14)^1} + \frac{28.269,34}{(1 + 0,14)^2} + \frac{28.269,34}{(1 + 0,14)^3} + \dots + \frac{28.269,34}{(1 + 0,14)^5} \right] \\ \text{VPL} &= -9.954,59 + [24.797,67 + 21.752,34 + 19.081,00 + \dots + 14.682,21] \\ \mathbf{VPL} &= \mathbf{\text{R\$ 87.096,36}} \end{aligned}$$

E para o cálculo do TRC (tempo de retorno de capital):

$$\text{TRC} = \frac{k}{\text{RM}} = \frac{9.954,59}{3.165,730}$$

TRC = 3,14 meses

3.4 POSSÍVEIS CAUSAS DO BAIXO FP NA UNIVERSIDADE

Além da correção de todo e qualquer problema, é sempre importante procurar a causa do mesmo. Dessa forma, analisando os aspectos citados na Seção 1.1 deste trabalho como possíveis causas do baixo fator de potência e aplicando-os às possibilidades da Universidade, constata-se que um dos principais problemas que podem estar acontecendo trata-se do mal dimensionamento de transformadores.

Deduz-se tal fato devido aos registros feitos no mês de julho, em que foi possível verificar que, mesmo com a maioria dos equipamentos não funcionando com a mesma rotina por ser mês de recesso, ainda houve baixo fator de potência. E, assim, constatou-se que os registros de energia ativa eram baixos comparados aos outros meses, isso implica em um funcionamento de motores ou transformadores mal dimensionados, visto que a potência reativa nestes permanece constante e a potência ativa é variada de acordo com a carga requerida dos mesmos.

Como citado na Seção 1.1, um dos causadores do baixo fator de potência são os reatores, que estão comumente presentes em dispositivos como lâmpadas fluorescentes. Assim, segundo Lima (2016), 94% (equivalente a 2.819 aproximadamente) da EST possui seu sistema de iluminação composto por esse tipo de lâmpada. Tal fato também pode ser um agravante para o baixo fator de potência.

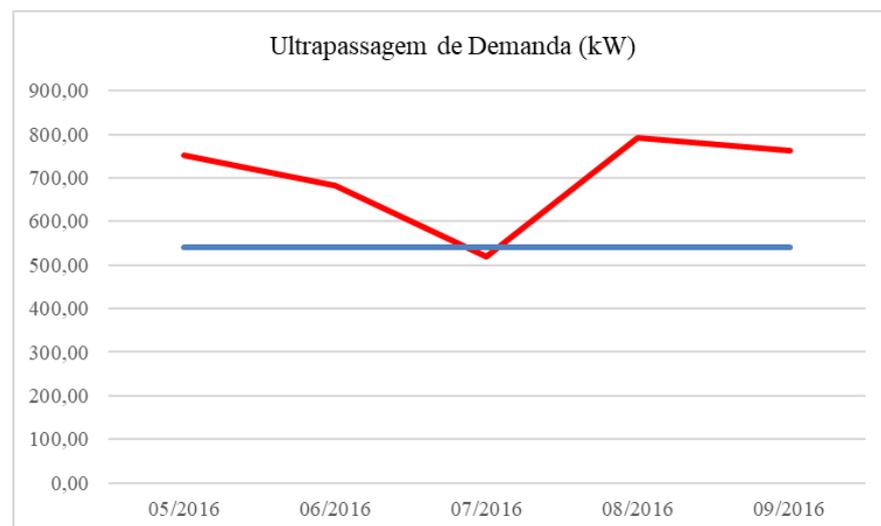
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O levantamento dos dados a partir do arquivo de demanda e histórico de consumo da Universidade foi imprescindível para a determinação efetiva de que o fator de potência da Universidade está fora dos padrões impostos pela agência regulamentadora ANEEL e também tornou possível descobrir o quanto foi pago devido ao baixo fator de potência em cada um dos meses analisados.

Infelizmente, não foi possível obter o histórico para todos os meses, logo, o levantamento foi feito com base nos cinco meses analisados e projetou-se a média de determinados critérios para os restantes dos meses do ano para uma avaliação mais ampla. Assim, pôde-se analisar em quais meses houve maior incidência de reativos e foi vantajoso possuir, entre os meses analisados, um mês de recesso da Universidade, para que fosse observado o diferente comportamento e uso da rede elétrica no mesmo.

Através da análise de DRE (demanda de reativos excedentes), foi possível notar que quatro dos cinco meses analisados (com exceção de julho) possuíram ultrapassagem de demanda ativa (Figura 35), e, assim, a Universidade teve que arcar financeiramente com multas devido a isso. Porém, o foco do estudo neste trabalho não é focado nas demandas, mas sim nos baixos fatores de potência registrados.

Figura 35 – Análise da ultrapassagem de demanda



Fonte: Próprio Autor

Seguindo os cálculos dos principais métodos econômicos de tomada de decisão em projetos para a proposta da implantação do banco capacitor (os quais definirão se será viável

ou não caso se decida realizar a implantação do mesmo), obteve-se os resultados apresentados na Tabela 6.

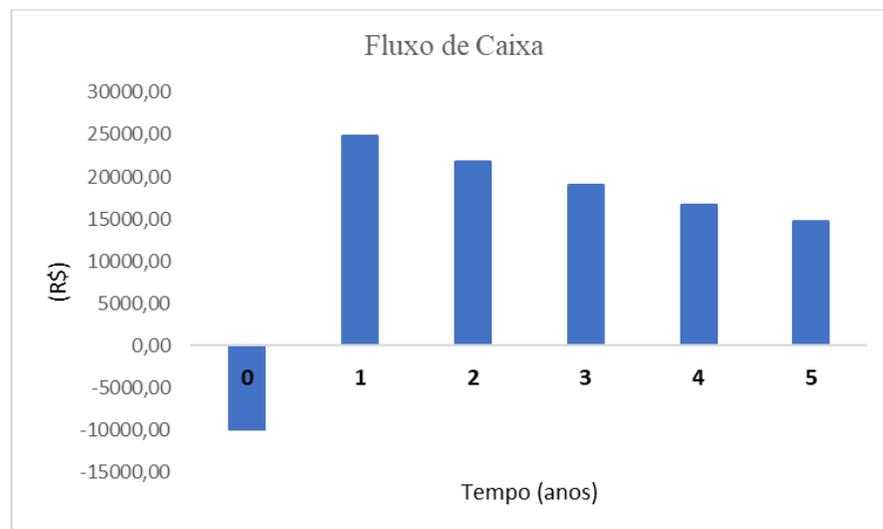
Tabela 6 – Resultados obtidos

Investimento inicial	R\$ 9.954,59
Economia mensal	R\$ 3.165,730
Economia anual	R\$ 37.988,76
TRC	3,14 meses
VPL	R\$ 87.096,36
Vida útil	60 meses (05 anos)

Fonte: Próprio Autor

É possível notar que o tempo de retorno de capital TRC ou (*payback*) é significativamente baixo (sendo igual a, aproximadamente, 03 meses e meio), visto que os valores pagos de multa anualmente pela Universidade são bem elevados. Assim, o valor investido seria relativamente alto, porém traria lucro logo no segundo mês de uso, pois a Universidade passaria a ser isenta das multas causadas pelo baixo fator de potência.

Figura 36 – Análise do fluxo de caixa



Fonte: Próprio Autor

Através do resultado do VPL, também é possível notar a viabilidade da implantação do banco capacitor na Instituição, lembrando-se que, caso o resultado fosse um valor positivo, a viabilidade seria confirmada e o retorno do investimento seria gerado. Para este caso, o resultado gerado durante a vida útil do banco capacitor seria de R\$ 87.096,36. Ao analisar-se a

Figura 36, também fica claro que logo no primeiro ano após o investimento, a EST-UEA já teria um retorno em cima da implementação.

Visto que o tempo de retorno de capital é baixo (5% do tempo se comparado ao tempo de vida útil do banco capacitor) e o valor presente líquido é positivo, conclui-se que o investimento é definitivamente atrativo.

Além das perdas, foi possível também obter conhecimento da proporção das perdas (em torno de 16%) a serem diminuídas nos condutores da rede elétrica da instituição, o que implica em menos necessidade de manutenção nos mesmos, porém não elimina a necessidade de uma rotina de monitoramento.

CONCLUSÃO

Com a execução deste trabalho fica claro que existe a necessidade da correção do fator de potência na Universidade devido os prejuízos materiais, financeiros e ambientais que o mesmo pode acarretar. De forma geral, o trabalho realizou o seu propósito, demonstrando que existe viabilidade econômica na implantação do banco capacitor para a Escola Superior de Tecnologia, além de realizar o estudo do dimensionamento e posicionamento do mesmo, utilizando os arquivos citados no desenvolvimento do trabalho, mostrando que o estudo foi feito levando-se em conta dados reais e precisos das potências e dos outros critérios necessários do local estudado.

Durante a elaboração do trabalho, foi possível a visualização do valor de multas pagas pela Universidade devido ao baixo fator de potência, o qual, em nenhum dos meses analisados, esteve dentro dos padrões aceitáveis ditados pela ANEEL. Porém, observa-se que também existem multas pagas pela mesma devido à ultrapassagem da demanda contratada. Todavia, tal fato não foi estudado neste projeto, visto que o foco do mesmo eram os problemas causados pelo baixo fator de potência, o qual possui multa específica, conforme citado anteriormente.

A proposta mostrou-se bastante interessante pelo significativamente baixo tempo de retorno de capital (*payback*) que o projeto traria. Este sendo de, aproximadamente, três meses e meio. Além disso, o valor presente líquido (VPL) obtido também foi significativamente atraente, visto que o valor que seria lucrado, levando em consideração os 5 anos de vida útil do sistema proposto, seria de R\$ 87.096,36. Lembrando também que a economia anual para a Universidade, caso houvesse a correção do fator de potência em sua rede elétrica, seria em torno de R\$ 37.988,76.

Salienta-se que a proposta do trabalho era focada na diminuição dos gastos com energia elétrica na Universidade, porém os benefícios a serem trazidos, caso haja a implantação do projeto, vão além deste fato, como, por exemplo, a Universidade passaria a ter uma energia mais “limpa”, haveria maior proveito de energia ativa, o que é benéfico para o meio ambiente, seus dispositivos ficariam mais seguros devido ao nível certo de energia reativa na rede, etc.

Para futuros trabalhos, sugere-se que haja uma análise da rede elétrica da Universidade almejando descobrir se há registro de harmônicos ou não, para que, assim, um filtro de dessintonia possa ser melhor dimensionado e impedir que as harmônicas venham a causar danos na rede elétrica da Universidade, além de proteger o banco capacitor caso o mesmo seja implantado. Outro ponto importante seria o levantamento de todas as cargas presentes na

Universidade para que se afinilasse a pesquisa e fosse chegado aos pontos que estão levando o fator de potência efetivamente a ser baixo.

Além disso, sugere-se também um estudo nas outras unidades da Universidade do Estado do Amazonas na capital e também no interior, como as unidades ESA (Escola Superior de Ciências da Saúde), ESAT (Escola Superior de Artes e Turismo), ENS (Escola Normal Superior) e ESO (Escola Superior de Ciências Sociais), bem como na unidade da Reitoria. Pois, conhecendo-se o benefício que seria obtido pela Escola Superior de Tecnologia, certamente ao aumentar-se o raio de estudo neste trabalho para as outras unidades, traria um benefício ainda maior e mais significativo englobando todas as unidades da Universidade do Estado do Amazonas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica**. Resolução ANEEL N° 414, Brasil: 2010.

ATTACHIE, J. C and AMUZUVI, C. K. **Using a Fixed and Switched-Capacitor Bank to Investigate Harmonic Resonance and Capacitor Bank Switching in a Distribution Network**. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013.

BARRETO, Túlio Zambaldi Oliveira. **Análise da Correção do Fator de Potência do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (BIOAGRO) da Universidade Federal de Viçosa**. Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, 2017.

BORDIM, João Ricardo Graminha. **Instalação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição Elétrica para Correção de Fator de Potência e Regulação de Tensão: Projeto e Simulação Computacional**. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

BOYLESTAD, Robert L. **Introdução à Análise de Circuitos**. 12ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2012.

BURATTI, Rafael Pereira. **Reguladores de Tensão em Redes Elétricas com Alta Penetração de Cargas Não Lineares**. Universidade Estadual Paulista, 2016.

CREDER, Hélio. **Instalações Elétricas**. 15ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002.

CODI – Comitê de Distribuição de Energia Elétrica. **Manual de Orientação aos Consumidores – Energia Reativa Excedente**. 2004. Disponível em: <<https://ecoenergias.wordpress.com/2013/02/11/manual-de-orientacao-aos-consumidores-energia-reativa-excedente/>>. Acesso em 01 de Maio de 2018.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5ª Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

DUAILIBE, Paulo. **Consultoria para Uso Eficiente de Energia**. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow de Fonseca, 2000. Disponível em: <www.uff.br/ev/downloads/apostilas/Capacitores.pdf>. Acesso em 01 de Maio de 2018.

FRAGOAS, A. G. **Estudo de Caso do Uso de Bancos de Capacitores em uma Rede de Distribuição Primária – Indicativos da Sua Viabilidade Econômica**. Curso de Engenharia Elétrica. Universidade de São Paulo – São Carlos, 2008.

GARCIA, Flávio R. **Aplicação de Capacitores na Conservação de Energia de Sistemas Industriais**. Inepar S/A Indústria e Construções, 2001.

HOE, Ong Kam; AGILESWARI, Ramasamy; MARSADEK, Marayati Bte. **Switching Control for Capacitor Banks in Distribution System**. Indian Journal of Science and Technology, 2016.

HOFMANN, W.; SCHLABBACH, J.; JUST, W. **Reactive Power Compensation**. Wiley, 2012.

ISONI, Marcos Cesar Silva. **Correção do Fator de Potência de Cargas Industriais com Dinâmica Rápida**. Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

KIKUSHI, George Tsuruji e REIS, Júlio César Silva. **Banco de Capacitores para Correção de Fator de Potência em Indústria**. Universidade do Vale do Paraíba, 2015.

LIMA, Paulo Ricardo Barroso Brito. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica para Aumento de Eficiência Energética da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas**. Universidade do Estado do Amazonas, 2016.

MADRUGA, Ederson Pereira. **Otimização de Níveis de Tensão nas Redes de Distribuição Considerando a Alocação de Bancos de Capacitores e Reguladores de Tensão**. Universidade Federal de Santa Maria, 2011.

MAMEDE, João F. **Instalações Elétricas Industriais**. 6ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2002.

NISKIER, Júlio. **Instalações Elétricas**. 4ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2000.

NUNES, Júlio Augusto Aguiar. **Efeitos de Harmônicos em Bancos de Capacitores de Potência**. 2017.

PAHWA, A and SUNDHARARAJAN, S. **Optimal Selection of Capacitors for Radial Distribution Systems Using a Genetic Algorithm**. IEEE Transactions on Power Systems, 1994.

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Manual de Tarifação da Energia Elétrica**. Disponível em: <www.eletrabras.com/procel>. Acesso em 12 de Maio de 2018.

WEG. **Manual para Correção de Fator de Potência**. 2009. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>>. Acesso em 01 de Maio de 2018.

WEG. **Manual de Multimetro de Grandezas Elétricas e Controlador Automático do Fator de Potência**. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf4/h45/WEG-multimetro-MMW03-e-controlador-PFW03-50084748-pt.pdf>>. Acesso em 26 de Outubro de 2019.

APÊNDICE A – PREENCHIMENTO DOS DADOS NO SITE WEG

VENDA GUIADA - CORREÇÃO AUTOMÁTICA ×

-  Dados do Sistema Elétrico
-  Tipos de Correção
-  Correção do Fator de Potência
-  Dados Complementares
-  Detalhamento dos Estágios

 Conversor - kvar x tensão

Conhece a potência reativa necessária?

Adotar tensão Reforçada

Potência (kvar)

120.0

✕LIMPAR

✓APLICAR

CONTINUAR

VENDA GUIADA - CORREÇÃO AUTOMÁTICA ×

-  Dados do Sistema Elétrico
-  Tipos de Correção
-  Correção do Fator de Potência
-  Dados Complementares
-  Detalhamento dos Estágios

 Conversor - kvar x tensão

Proteção Geral: DISJUNTOR DWB400N320-3DA
Controlador: CONTROLADOR FATOR POTENCIA PFW03-T12

Estágio	Potência (kvar)	Tensão Rede	Tensão do Capacitor	Corrente Capacitor		
1	25.0	380	380	38.0		
2	25.0	380	380	38.0		
3	20.0	380	380	30.4		
4	15.0	380	380	22.8		
5	15.0	380	380	22.8		
6	10.0	380	380	15.2		
7	5.0	380	380	7.6		
8	5.0	380	380	7.6		

PERSONALIZAR TODOS OS ESTÁGIOS

ADICIONAR ESTÁGIO

APÊNDICE B – SITES UTILIZADOS PARA A BUSCA DOS PRODUTOS

1. www.weg.net
2. www.eletoalles.com
3. <https://www.viewtech.ind.br>