

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIZ PEREIRA AMIKY

**PROPOSTA DE MELHORIA NA QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA NO PRÉDIO DO BIOAGRO**

VIÇOSA
2016

LUIZ PEREIRA AMIKY

**PROPOSTA DE MELHORIA NA QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA NO PRÉDIO DO BIOAGRO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos.

VIÇOSA
2016

LUIZ PEREIRA AMIKY

**PROPOSTA DE MELHORIA NA QUALIDADE DE ENERGIA
ELÉTRICA NO PRÉDIO DO BIOAGRO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 – Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 12 / 07 / 2016.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos - Orientador
Universidade Federal de Viçosa



Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa



Eng. Samuel Chaves da Silva - Membro
Universidade Federal de Viçosa

“Ninguém baterá tão forte quanto à vida. Porém, não se trata de quão forte ela pode bater, se trata de quão forte você pode aguentar apanhar e permanecer de pé. ”

(Rocky Balboa)

Dedico este trabalho, com muito carinho, aos meus pais, Durvalino e Maria, e às minhas irmãs Patrícia, Michelle e Giselle.

Agradecimentos

Agradeço profundamente aos meus pais e irmãs pelo incentivo e suporte, em especial ao meu pai que sempre me incentivou a ultrapassar os percalços que encontrei durante a graduação.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. José Carlos da Costa Campos, que esteve sempre disponível para direcionar-me na condução deste trabalho.

Agradeço à Aparecida, a nossa Cida da república, pela paciência em suportar a nossa bagunça por anos e também agradeço a todos os meus amigos do curso, em especial, Anacleto, Lucas Santana, Robert e Túlio; e amigos da república, pela ajuda, pelas conversas e brincadeiras e por todos os bons momentos, em especial meu amigo de república Rafael Rezende, por ter me ajudado nas medições do laboratório do Bioagro.

Agradeço a todos os parentes e amigos de São José dos Campos e de Cuiabá, que mesmo distantes, sempre me apoiaram e me ajudaram nos momentos em que precisei, em especial, meu grande amigo Rafael Terezo.

E por fim, o meu muito obrigado a todos os mestres da UFV que contribuíram para expandir os meus conhecimentos, e aos funcionários Expedito, Geraldo e Sebastião, que me ajudaram no levantamento de dados do prédio do Bioagro/UFV.

Resumo

A qualidade da energia elétrica (QEE) vem se tornando cada vez mais importante nos dias atuais. É um dos principais motivos de sua relevância é o crescimento do uso de equipamentos altamente sensíveis aos fenômenos referentes aos padrões do suprimento elétrico. Assim, torna-se necessário uma energia cada vez mais confiável e livre de distorções. O objetivo deste trabalho é propor a melhoria da rede de distribuição do prédio do Bioagro na UFV, em especial, o tratamento de distorções harmônicas e a correção do fator de potência. Neste trabalho, para realizar as medições foi utilizado o Analisador de Qualidade de Energia Trifásica *Fluke 435* e, a partir dos dados obtidos, foi possível verificar um baixo valor no fator de potência do sistema de distribuição, bem como a presença de harmônicos, o que caracteriza a presença das chamadas cargas não lineares. Portanto, com a análise dos dados juntamente com os métodos propostos de mitigação, foi possível verificar através dos estudos, um ganho na qualidade de energia elétrica, permitindo assim evitar os transtornos causados pela má qualidade de energia, a redução dos valores cobrados pelas concessionárias de energia sobre o baixo fator de potência, e por fim, a otimização da capacidade instalada.

Sumário

1	Introdução.....	15
1.1	Objetivos Gerais	16
1.2	Objetivos Específicos	16
2	Revisão Bibliográfica.....	17
2.1	Caracterização dos Distúrbios na Qualidade.....	17
2.1.1	Introdução.....	17
2.1.2	Descrições dos Principais Distúrbios Sustentados de QEE.....	18
2.1.2.1	<i>Sobretensão</i>	18
2.1.2.2	<i>Subtensão</i>	18
2.1.2.3	<i>Interrupção</i>	18
2.1.2.4	<i>Flutuação de Tensão</i>	18
2.1.2.5	<i>Desequilíbrio de Tensão</i>	19
2.1.2.6	<i>Harmônicos</i>	19
2.2	Distorção Harmônica.....	19
2.2.1	Introdução.....	19
2.2.2	Distorção Harmônica Total (DHT) e Individual (DHI).....	22
2.2.3	Normalização e Regulamentação de Harmônicos.....	23
2.2.3.1	<i>Guia IEEE Std 519-1992</i>	23
2.2.3.2	<i>Procedimento de Rede - Submódulo 2.8</i>	24
2.2.4	Consequências das Distorções Harmônicas	25
2.3	Fator de Potência	26
2.3.1	Introdução.....	26
2.3.2	Medição do Fator de Potência	27
2.3.5	Legislação Atual Sobre Fator de Potência.....	29
2.3.4	Vantagens da Correção do Fator de Potência.....	29
2.3.6	Banco de Capacitor Automatizado	30
3	Materiais e Métodos	34
3.1	Introdução.....	34
3.2	Descrição dos Materiais e Equipamentos Utilizados	35
3.2.1	Transformador Trifásico.....	35
3.2.2	Analisador de Qualidade de Energia <i>Fluke</i>	36
3.3	Parte Prática.....	36
3.3.1	Ponto de Medição Utilizando o Analisador de Qualidade <i>Fluke</i>	36

3.3.2	Considerações de Caso	37
4	Resultados e Discussões	38
4.1	Análise das Tensões Harmônicas	38
4.2	Análise das Correntes Harmônicas.....	39
4.3	Análise do Fator de Potência	42
4.4	Análise da Potência Ativa e Reativa.....	43
4.4	Discussões Finais.....	44
5	Conclusões.....	50
	Referências Bibliográficas	51
	Apêndice A – Outros Dados Estatísticos Obtidos pelo Fluke	53
A.1	Estatísticas do THD _v das Fases L1N, L2N e L3N.....	53
A.2	Estatísticas do THD _i das Fases L1N, L2N e L3N.....	54

Lista de Figuras

Figura 1 - Onda fundamental com sua harmônica de ordem 5.....	19
Figura 2 – Soma da onda fundamental com sua harmônica de ordem 5.....	20
Figura 3 – Modelo de Espectro Harmônico de um Analisador de Energia.....	20
Figura 4 – Diagrama simplificado de suprimento à carga linear e não linear. Fonte: Adaptada de Ferraci (2001).....	21
Figura 5 – Triângulo de Potência.....	26
Figura 6 – Tetraedro de Potência.....	28
Figura 7 – Banco de Capacitor da WEG.....	31
Figura 8 – Conexão delta e estrela dos capacitores.....	32
Figura 9 – Esquema de ligação utilizando o controlador de energia reativa - BR6000 (SIEMENS).....	33
Figura 10 – Prédio Bioagro situado na Universidade Federal de Viçosa.....	34
Figura 11 – Equipamentos mais utilizados: autoclave, ultra freezer e geladeiras (da esquerda para a direita).	35
Figura 12 – Transformador trifásico do prédio principal do Bioagro.....	35
Figura 13 – Analisador de Qualidade de Energia Trifásica <i>Fluke</i> 435.....	36
Figura 14 – Painel geral do prédio principal do Bioagro.....	37
Figura 15 – Distorção harmônica total da tensão (THDv).....	38
Figura 16 – Distorção harmônica total de corrente (THDi) medida no período de monitoramento.....	39
Figura 17 – Distorção harmônica individual de corrente da fase 1 (DHIi – L1N).....	40
Figura 18 – Distorção harmônica individual de corrente da fase 2 (DHIi – L2N).....	40
Figura 19 – Distorção harmônica individual de corrente da fase 3 (DHIi – L3N).....	41
Figura 20 – Fator de potência real medido no período de monitoramento.....	42
Figura 21 – Energia ativa consumida no período de monitoramento do prédio do Bioagro....	43
Figura 22 – Energia reativa consumida no período de monitoramento do prédio do Bioagro.	44

Figura 23 – Tetraedro de potência representando a potência ativa, reativa e a aparente real da fase 1.....	45
Figura 24 – Tetraedro de potência representando a potência ativa, reativa e a aparente real da fase 2.....	45
Figura 25 – Tetraedro de potência representando a potência ativa, reativa e a aparente real da fase 3.....	46
Figura 26 – Fator de potência das 3 fases em equilíbrio (curva escura) após a redistribuição das cargas.....	47
Figura 27 – Energia Reativa necessária para ser adicionada à rede e obter um fator de potência de 0,92.....	48
Figura 28 – Utilização do banco de capacitor automatizado em três configurações.....	49

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Tabela 10.3 da IEEE 519-2, Limites de Distorção de Corrente para Sistemas de Distribuição em Geral (120V até 69000 V).....	23
Tabela 2 – Limites de distorção harmônica da tensão em % da componente da tensão.	24
Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).....	24
Tabela 4 – Menores valores de fator de potência total, entre o período noturno até o amanhecer.	42
Tabela 5 – Maiores valores de fator de potência total, entre o período do amanhecer até o anoitecer.....	43
Tabela 6 – Dados coletados pelo <i>Fluke</i> no dia 12 de maio de 2016 as 00h e 10 min.	44
Tabela 7 – Potências calculadas na fase L1.....	45
Tabela 8 – Potências calculadas na fase L2.....	45
Tabela 9 – Potências calculadas na fase L3.....	46
Tabela 10 – Medidas de DHIi dos equipamentos mais utilizados no prédio do Bioagro.	46

1 *Introdução*

Concessionárias de energia elétrica e usuários finais estão se tornando cada vez mais preocupados com a qualidade de energia elétrica (QEE). O termo qualidade de energia tornou-se um dos termos mais difundidos e discutido na indústria de energia desde o final dos anos 1980 e uma das principais razões é o surgimento de equipamentos mais modernos, baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos mais sensíveis à qualidade de energia [1].

A QEE é a condição do sinal elétrico operar de forma satisfatória, e para tal análise devemos verificar parâmetros como tensão, corrente, frequência, distorções harmônicas, fator de potência, entre outros, permitindo assim que equipamentos, processos industriais, instalações e sistemas elétricos sejam operados sem distúrbios, com isso evitamos perdas de produção, equipamentos danificados e a elevação do custo de energia [2].

Cargas lineares produzem correntes não distorcidas quando energizadas por uma fonte não distorcida (senoidal). Já as não lineares, produzem correntes distorcidas (não senoidais) mesmo quando energizadas por uma fonte não distorcida, podendo alterar a conformidade senoidal da tensão na barra de carga ou ponto comum de conexão [2].

A partir da análise dos harmônicos, é possível localizar e quantificar os mesmos, podendo-se assim definir estratégias de mitigação, para níveis aceitáveis. Hoje no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), define limites para os níveis de harmônicos nos sistemas nacionais, assim como o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), por meio da *IEEE Std. 519-1992* o faz internacionalmente.

Determinados equipamentos, tais como motores elétricos, fornos a arco, transformadores etc., necessitam para a sua operação de certa quantidade de energia reativa que pode ser suprida por diversas fontes ligadas ao sistema elétrico, funcionando individual ou simultaneamente. Estas fontes são [3]:

- Geradores;
- Motores síncronos;
- Capacitores.

O fator de potência (FP), indica o quanto da energia elétrica está sendo realmente utilizada para realizar trabalho. Ele é calculado pelo ângulo formado entre a potência ativa (kW) e potência aparente (kVA).

O baixo fator de potência decorrente do excesso de energia reativa, um dos problemas resultantes da má qualidade de energia elétrica [4], visto que há um aumento da corrente total que, dentre outros prejuízos, gera perdas na instalação, quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada [5]. Por causa disso, há a busca por sua correção, introduzindo elementos que geradores de correntes reativas contrárias àquelas geradas pelos equipamentos, que corrigem FP o mais próximo de um, com ângulo $\varphi = 0$. Quando corrigido, percebe-se a liberação de capacidade nas fontes supridoras, seja transformador ou gerador próprio, o que permite que sejam ligadas novas cargas nos circuitos alimentadores e distribuidores sem acréscimo de kVA [7]. Também, ocorre uma redução das variações de tensão (oscilações), aumento na vida útil dos equipamentos e os condutores tornam-se menos aquecidos, o que diminui as perdas de energia elétrica na instalação [8].

1.1 Objetivos Gerais

Este trabalho visa analisar os efeitos dos harmônicos e do fator de potência no prédio do Bioagro, situado no campus da Universidade Federal de Viçosa. Serão analisadas soluções com bancos de capacitores, filtros passivos, onde será buscada a melhor solução técnica, levando em consideração normas nacionais e internacionais.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Realizar análise de distorção harmônica e fator de potência de acordo com as medidas realizadas no prédio do Bioagro/UFV.
- Através das análises dos dados, propor uma solução para a correção dos problemas envolvendo a qualidade de energia do prédio do Bioagros através de simulações juntamente com os dados obtidos pelo medidor de qualidade de energia *Fluke*.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Caracterização dos Distúrbios na Qualidade

2.1.1 Introdução

Desde o fim dos anos 80 a questão da Qualidade de Energia Elétrica (QEE), que antes era negligenciada pelos consumidores e somente percebida no momento em que se constatavam as interrupções no fornecimento, tornou-se um fator importante à medida que tais consumidores se tornaram mais sofisticados sob o ponto de vista tecnológico e mais parâmetros associados a energia elétrica passaram a ser considerados. Para caracterizar a qualidade da energia elétrica, são analisados os sinais de tensão em sua amplitude, forma de onda e frequência. Um problema de qualidade da energia elétrica pode ser definido como qualquer desvio ou alteração manifestada nestas grandezas, que resulte na falha ou operação inadequada de instalações, aparelhos ou equipamentos. Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema supridor da concessionária [9].

A crescente utilização de equipamentos eletroeletrônicos, que de um modo geral utilizam dispositivos semicondutores operando como chave, acarreta distorções na forma de onda de corrente e/ou tensão. Isto vêm causando um comprometimento na qualidade da energia elétrica dos circuitos, bem como no barramento alimentador das cargas que possuem tais dispositivos [10].

O perfil de tensão usado como padrão de qualidade apresenta forma de onda alternada senoidal, com frequência fixa e amplitude que variam conforme a modalidade do atendimento, baixa, média ou alta-tensão. Dentro de cada modalidade, no entanto, o valor eficaz da tensão deve se manter dentro de faixas preestabelecidas; e a corrente, conservar a forma de onda da tensão, com deslocamento angular mantido dentro de faixas padronizadas [2].

Distúrbios na qualidade da energia elétrica podem provocar incorreta operação de equipamentos de controle e proteção, erros em medidores de energia ativa, utilizados em indústrias, comércio e residências, além de aumento na corrente de neutro de transformadores,

bem como interferência em sistemas de comunicação. Estes distúrbios na QEE podem ser divididos em duas categorias: transitórios e sustentados. Os eventos são fenômenos de curta duração que ocorrem ocasionalmente, geralmente na ordem de nano segundos ou microssegundos. Já os distúrbios sustentados são variações na tensão e corrente de regime permanente [2]. O foco principal deste trabalho são os distúrbios sustentados, sobretudo, as distorções harmônicas e a análise do Fator de Potência (FP).

2.1.2 Descrições dos Principais Distúrbios Sustentados de QEE

2.1.2.1 Sobretensão

A elevação de tensão é caracterizada pelo aumento do valor *RMS* da tensão entregue a um sistema durante um tempo de meio ciclo até um minuto, podendo ser causado por desligamento de grandes cargas ou conexão de banco de capacitores [11].

2.1.2.2 Subtensão

Quando o afundamento da tensão (onde a tensão cai para um valor abaixo do considerado normal durante um intervalo curto) ultrapassa o tempo de um minuto, este fato é caracterizado como subtensão [12].

2.1.2.3 Interrupção

A interrupção pode ser caracterizada pelo tempo de duração. Quando ocorrida por um tempo entre três segundos e um minuto, é denominada interrupção temporária. Esta interrupção ocorre quando um sistema de proteção com religação automático ligado em conjunto com a rede é acionado após a eliminação de um curto circuito. Quando ultrapassado um minuto de duração, esta interrupção é chamada de permanente. Este efeito ocorre quando não há previsão de religação após um curto circuito na rede [12].

2.1.2.4 Flutuação de Tensão

É o aumento ou a diminuição da tensão de um barramento em uma faixa compreendida entre 0,95 pu e 1,05 pu. Quando ocorre esta flutuação, um dos efeitos percebidos é a cintilação, uma variação do fluxo luminoso que é facilmente percebida em lâmpadas incandescentes [2].

2.1.2.5 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio de tensão é a diferença entre a magnitude das tensões de fase de um circuito polifásico. Pode ser ocasionado pelo tipo de transformador de distribuição utilizado ou pela natureza da carga e a forma como ela é ligada nas fases e neutro do sistema de distribuição [2].

2.1.2.6 Harmônicos

A distorção harmônica é caracterizada pela combinação de onda de tensão ou corrente, com componentes de frequência múltipla inteira da frequência fundamental. Os harmônicos ocorrem pelo uso de dispositivos não-lineares como, ponte de retificadores; compensadores controlados a tiristores; diodos; dentre outros [12].

2.2 Distorção Harmônica

2.2.1 Introdução

Segundo [2], uma onda periódica distorcida, deformada e sem conformidade senoidal é o resultado da sobreposição de uma série de ondas senoidais, que possui uma componente fundamental (50 ou 60 Hz), e um conjunto de ondas de frequências múltiplas inteiras da fundamental, estas últimas são denominadas componentes "harmônicas". Na Figura 1 é apresentada a forma de onda da tensão fundamental (60Hz) e uma componente múltipla de 5 da fundamental (300Hz), resultando assim numa onda distorcida vista na Figura 2. Estas componentes podem ser geradas por equipamentos elétricos e eletrônicos que possuem componentes não-lineares tais como: diodos, transistores, chaves manuais entre outros [13].

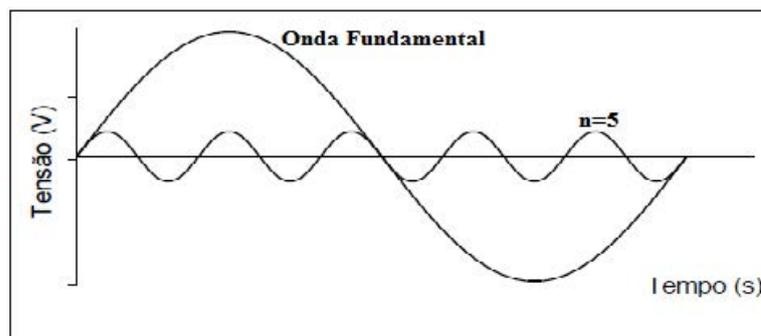


Figura 1 - Onda fundamental com sua harmônica de ordem 5.

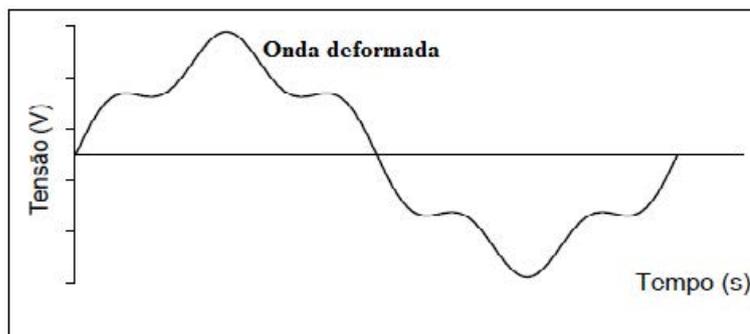


Figura 2 – Soma da onda fundamental com sua harmônica de ordem 5.

Podemos analisar o quanto um sinal está distorcido, seja ele um sinal de corrente ou de tensão, por meio dos espectros de harmônicos, que são capazes de decompor um sinal em suas componentes harmônicas e representá-lo na forma de um gráfico de barras, ou seja, cada barra representa a contribuição de distorção harmônica em uma dada frequência, como mostra a Figura 3.

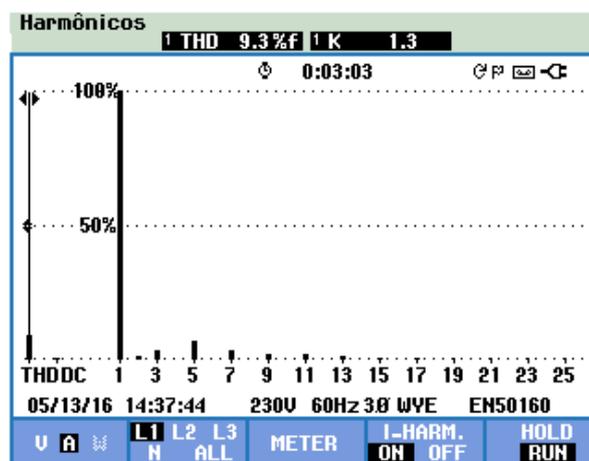


Figura 3 – Modelo de Espectro Harmônico de um Analisador de Energia.

Em uma fonte não distorcida, temos a circulação de correntes não distorcidas (senoidal) em uma carga linear. Já as cargas não lineares produzem correntes distorcidas (não senoidais) mesmo quando energizadas por uma fonte não distorcida. Entre a fonte e a carga está presente uma impedância Z , logo, a corrente distorcida vai provocar uma queda de tensão também distorcida nas linhas de transmissão.

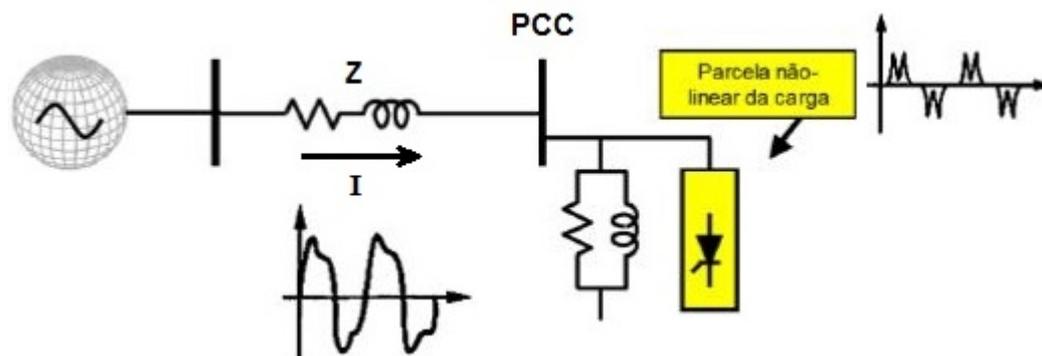


Figura 4 – Diagrama simplificado de suprimento à carga linear e não linear.

A Figura 4 apresenta uma simplificação da alteração da conformidade senoidal da tensão na barra de carga ou ponto comum de conexão (PCC), cuja tensão é obtida pela equação (1), em que a representação da tensão no PCC é dada por V_{PCC} , a tensão na fonte é dada por V , e ΔV_Z é a queda de tensão na impedância equivalente Z [2].

$$V_{PCC} = V - \Delta V_Z \quad (1)$$

O efeito direto das cargas não lineares sobre a QEE é a distorção da corrente, e de forma indireta, as cargas não lineares contribuem na distorção da tensão. Ou seja, a distorção de corrente é provocada, geralmente, pela carga, enquanto que a distorção de tensão é ascendente do sistema elétrico, isto é, tem como origem o sistema de fornecimento de energia.

Em um sistema dito "robusto", em que a corrente de falta é elevada e a impedância do sistema é pequena, o impacto das cargas não lineares sobre a distorção de tensão no PCC é em geral pequeno, não causando problemas de QEE. Já em um sistema "fraco", no qual a impedância do sistema é alta, a distorção na tensão no PCC pode atingir proporções elevadas, com a possibilidade de causar problemas de QEE como sobreaquecimento de cabos e equipamentos, diminuição da performance de motores e operações errôneas de disjuntores, relés e fusíveis. A qualidade da tensão denota a capacidade de um sistema de potência operar cargas sem perturbá-las ou danificá-las e está relacionada às características de todas as fontes a montante do PCC. A capacidade de cargas operarem sem perturbar ou reduzir a eficiência do sistema denota qualidade da corrente, que, por sua vez, está relacionada com as características de todas as cargas a jusante do PCC [2].

2.2.2 Distorção Harmônica Total (DHT) e Individual (DHI)

A distorção harmônica pode ser classificada de várias formas, sendo uma das mais utilizadas é a Distorção Harmônica Total (DHT) do inglês (*Total Harmonic Distortion - THD*). A DHT é uma medida global que representa a distorção devida a todos os harmônicos presentes em um sinal. Sua definição é dada como o desvio total, em porcentagem, de uma onda distorcida em relação à sua componente fundamental e é demonstrada através da equação (2) calculada para tensão e da equação (3) calculada para a corrente.

$$DHT_V = \frac{\sqrt{(\sum_{h \neq 1} V_h^2)}}{V_1} \quad (2)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{(\sum_{h \neq 1} I_h^2)}}{I_1} \quad (3)$$

Onde V_1 e I_1 representam as componentes fundamentais da tensão e corrente, respectivamente. Enquanto V_h e I_h representam as componentes harmônica de ordem h da tensão e corrente, respectivamente. A componente CC não é considerada para o cálculo de DHT na norma IEEE 519, 1992, embora o seja na norma IEEE Std. 1459,2010. Já para classificar a distorção harmônica individual (DHI) de tensão ou de corrente são utilizadas as equações (4) e (5), representadas por DHI_V e DHI_I , respectivamente [2].

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$DHI_I = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

Utilizando estes indicadores podemos determinar a necessidade de se empregar filtros harmônicos no sistema estudado, através de normas e regulamentações, bem como o estudo de ressonância destes sinais com outros equipamentos.

2.2.3 Normalização e Regulamentação de Harmônicos

Quanto a regulamentação de limites harmônicos, existem normas e recomendações internacionais como a IEEE 519-1992, e nacionais como o (Procedimento de Rede – PRODIST, Submódulo 2.8). Estas duas normas serão discutidas a seguir:

2.2.3.1 Guia IEEE Std 519-1992

De acordo com a norma IEEE *Std.* 519, 1992, um dos principais guias internacional, é necessário a divisão da responsabilidade do problema de harmônicos entre os consumidores e a concessionária. As concessionárias de energia elétrica são responsáveis pelo controle das distorções harmônicas individual e total de tensão, ou seja, DHIV e DHTV, nas barras da rede sob sua concessão, enquanto que os consumidores são responsáveis por controlar a injeção de correntes harmônicas DHTi na rede elétrica, decorrente de suas cargas. Nesta mesma norma se encontram recomendações quanto aos limites harmônicos de corrente que são apresentados na Tabela 1 (IEEE,1993).

Tabela 1 – Tabela 10.3 da IEEE 519-2, Limites de Distorção de Corrente para Sistemas de Distribuição em Geral (120V até 69000 V).

MAXIMA DISTORÇÃO DE CORRENTE HARMONICA EM % I_B						
ORDEM DA HARMÔNICA INDIVIDUAL (HARMÔNICAS ÍMPARES)						
I_{SC} / I_B	<11	11=h<17	17=h<23	23=h<25	35=h	TDD
<20*	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20<50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50<100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100<1000	12	5,5	5	2	1	15
<1000	15	7	6	2,5	1,4	20
AS HARMÔNICAS PARES SÃO LIMITADAS A 25% DOS LIMITES DAS HARMÔNICAS ÍMPARES INDICADAS ACIMA						
*TODO EQUIPAMENTO DE GERAÇÃO ESTÁ LIMITADO A ESSES VALORES DE DISTORÇÃO DE CORRENTE INDEPENDENTE DA RELAÇÃO I_{SC} / I_B						
ONDE:						
I_{SC} = MÁXIMA CORRENTE DE CURTO CIRCUITO NO PONTO DE CONEXÃO						
I_B = MÁXIMA CORRENTE DE PROJETO (COMPONENTE NA FREQUÊNCIA FUNDAMENTAL) NO PONTO DE CONEXÃO						

Para avaliar o nível de injeção de correntes harmônicas, a norma IEEE define o índice denominado taxa de distorção de demanda -TDD, também do inglês *total demand distortion*. O índice DDT é semelhante ao DHTi, equação (3), sua diferença está na relação entre a corrente harmônica e a corrente nominal do sistema, diferentemente do DHTi que é a relação entre a tensão harmônica e o valor eficaz da tensão fundamental. Portanto a relação de TDD e DHTi, é demonstrada pela equação (4).

$$TDD = \frac{\sqrt{(\sum_{h \neq 1} I_h^2)}}{I_1} \cdot \frac{I_1}{I_L} \quad (4)$$

Onde I_1 representa a corrente fundamental da carga, enquanto I_L representa a corrente nominal do circuito.

Já os limites das distorções harmônicas de tensão recomendados pela norma IEEE519-1996 são apresentados na Tabela 2, limites de DHIV e DHTv. O primeiro é utilizado para delimitar o nível de tensão em uma barra do sistema elétrico, independentemente do número de consumidores ligados a ela. O segundo delimita o nível máximo de DHT que a tensão de entrada de um único consumidor pode apresentar.

Tabela 2 – Limites de distorção harmônica da tensão em % da componente da tensão.

Barra de Tensão	Distorção Harmônica Individual de Tensão	Distorção Harmônica Total de tensão DHT(%)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69kV < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

2.2.3.2 Procedimento de Rede - Submódulo 2.8

Este documento elaborado pela ANEEL normatiza e padroniza as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, porém, trata somente dos limites de tensão, enquanto que os limites de harmônicos de corrente são estabelecidos de acordo com cada concessionária através de análises de penetração harmônico em seu sistema.

Tabela 3 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental).

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

De acordo com este documento, para se determinar o valor de DHTv de uma barra a ser comparada com os valores limites apresentados na Tabela 3 é necessário que em sistemas elétricos trifásicos, as medições devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

2.2.4 Consequências das Distorções Harmônicas

As consequências da presença de harmônicos no sistema elétrico são diversas, entre as principais e mais importantes temos:

- Aquecimento dos dispositivos elétricos através das perdas por efeito Joule, ou seja, ocorre a sobreposição entre as correntes fundamental e de seus harmônicos, reduzindo assim os rendimentos de transformadores e motores.
- Em equipamentos capacitivos ou indutivos pode-se ter frequências de ressonâncias iguais ou próximas a das harmônicas, com isso os harmônicos são amplificados e podem ocorrer danos na instalação como falha nos disjuntores e nos fusíveis ou aparecer sobretensões, entre outros distúrbios de qualidade de energia.
- Alguns efeitos podem ser de imediato como: falhas e mau funcionamento de aparelhos mais sensíveis, interferências entre equipamentos de comunicação; correntes no neutro, mesmo em sistemas balanceados e vibrações mecânicas nos motores elétricos.
- Outros efeitos podem ser em longo prazo como: envelhecimento e desgaste prematuro dos equipamentos e fadiga mecânica dos motores elétricos.

2.3 Fator de Potência

2.3.1 Introdução

O fator de potência (FP), pode ser definido, como sendo a relação angular entre os fasores de potência ativa e os fasores da potência aparente. Em um circuito puramente senoidal, pode-se dizer que o fator de potência é igual ao cosseno do ângulo ($\cos \varphi$) entre a tensão e a corrente eficaz, ou ainda, o cosseno do ângulo entre potência aparente e potência ativa [15].

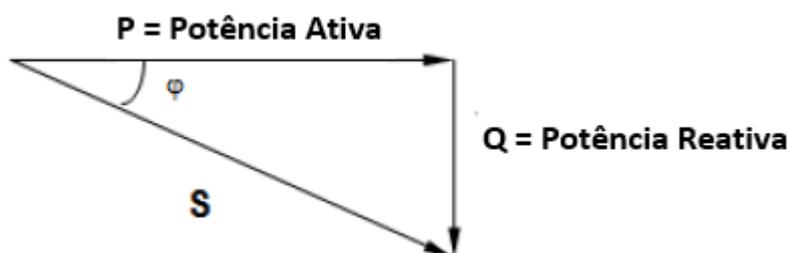


Figura 5 – Triângulo de Potência.

O FP é um número compreendido entre 0 e 1, podendo ser classificado como fator de potência indutivo (a corrente está atrasada em relação a tensão) ou como fator de potência capacitivo (a corrente está adiantada em relação a tensão). Este fator indica o quanto o sistema é eficiente. Se uma carga é puramente resistiva, toda a potência fornecida a ela é consumida como potência ativa, assim, com a potência reativa igual a zero, conseqüentemente o ângulo φ (letra grega *fi*) também é igual a zero, gerando um FP igual à 1. Cargas como transformadores e motores produzem potência reativa, reduzindo assim o FP do sistema. Portanto, um fator de potência baixo indica baixa eficiência e um alto fator de potência indica uma alta eficiência. Na Figura 5 encontra-se o triângulo de potências, demonstrando que quanto maior for a potência reativa, sendo adiantada ou atrasada, menor será o fator de potência, portanto maior será a potência aparente da rede.

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (5)$$

Portanto, com a redução da potência reativa, por conseqüência a potência aparente também é reduzida, permitindo assim conectar mais cargas no sistema bem como estabilizar o sistema evitando assim inconvenientes, como quedas de tensão e a subutilização da capacidade instalada.

2.3.2 Medição do Fator de Potência

Nos últimos anos, com o aumento de cargas não lineares conectadas a rede, as distorções harmônicas estão cada vez mais presentes nas instalações elétrica, ou seja, não recebemos das concessionárias a tensão senoidal de frequência fundamental, condição de sinal senoidal puro. Tradicionalmente as medidas mais utilizadas em sistemas de energia são, tensões e correntes “*average respording-rms indicating*” (indicação de resposta média-RMS). Contudo estas grandezas são definidas para um sistema de frequência fundamental, portanto, para detectar a presença de tensões e correntes de harmônicas necessitamos de equipamentos *True RMS* (indicação de valor eficaz verdadeiro). Assim, na presença de distorções harmônicas estas representações precisam ser complementadas [1]. O valor eficaz, ou RMS, de uma onda periódica é definido pela equação (5).

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_t^{t+T} f^2(t) dt} \quad (5)$$

Onde T representa o período do sinal e f (t) o sinal a ser analisado. Portanto, como o sinal harmônico possui uma frequência múltipla inteira da fundamental podemos representar a tensão e a corrente RMS, equações (6) e (7), como a soma do sinal fundamental com as suas respectivas harmônicas[2].

$$\begin{aligned} V_{rms} &= \frac{1}{kT} \cdot \int_t^{t+kT} v^2(t) dt = V_{rms,1}^2 + \left(V_{cc}^2 + \sum_{h \neq 1} V_{rms,h}^2 \right) \\ &= V_{rms,1}^2 + V_H^2 \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} I_{rms} &= \frac{1}{kT} \cdot \int_t^{t+kT} i^2(t) dt = I_{rms,1}^2 + \left(I_{cc}^2 + \sum_{h \neq 1} I_{rms,h}^2 \right) \\ &= I_{rms,1}^2 + I_H^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Portanto, com as devidas distinções entre grandezas fundamentais (h = 1) e grandezas harmônicas (h = número inteiro positivo), podemos dar uma nova definição sobre o fator de

potência. Em um sistema de somente componentes lineares, o fator de potência é determinado de acordo com a equação (5) e chamado de fator de potência de deslocamento, ou fator de potência da fundamental [2]. Já na presença de distorções harmônicas o fator de potência total (ou verdadeiro) é calculado considerando todas as tensões e correntes, incluindo as distorções, de acordo com a equação (8).

$$FP_T = \frac{V_0 \cdot I_0 + \sum_{k \neq 0} V_{rms,k} \cdot I_{rms,k} \cos \theta_k}{\left(\sqrt{V_0^2 + \sum_{k \neq 0} V_{rms,k}^2} \right) \cdot \left(\sqrt{I_0^2 + \sum_{k \neq 0} I_{rms,k}^2} \right)} \quad (8)$$

De acordo com a equação (8), a medida que as distorções harmônicas são aplicadas no sistema, o fator de potência total se torna menor que o fator fundamental, e por consequência, a eficiência e qualidade do sistema é prejudicado. Outra forma de analisar este caso é através da visualização espacial do tetraedro de potência com a presença de distorções harmônicas.

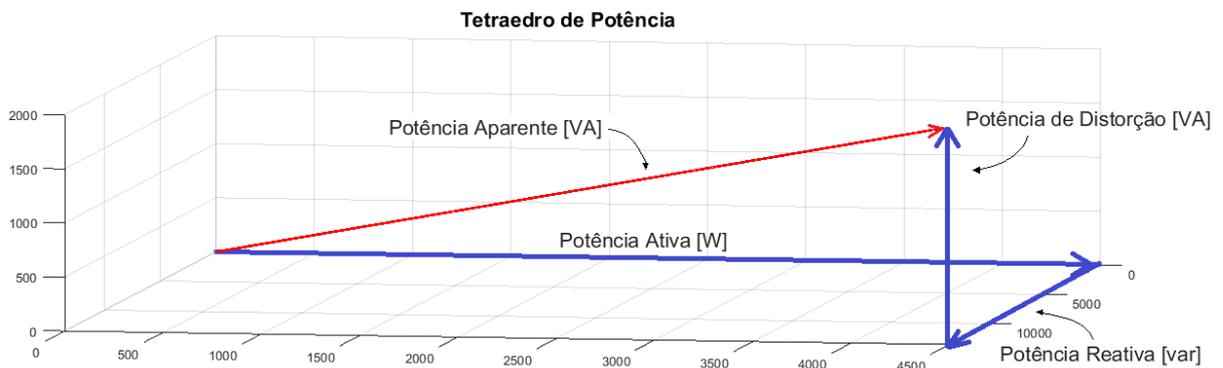


Figura 6 – Tetraedro de Potência.

Assim, a condição ideal no ponto comum de conexão entre o distribuidor e a carga é que a potência aparente (representado pela diagonal do tetraedro) permaneça o mais próximo possível da potência ativa, ou seja, sem a presença da potência de distorção e sem a presença da potência reativa.

A potência aparente total pode ser expressa a partir da decomposição de tensão e corrente *RMS* em suas componentes fundamentais e harmônicas. Isto está representado na equação (9) resultando na equação (10).

$$\begin{aligned} S^2 &= (V_{RMS} \cdot I_{RMS})^2 = (V_{RMS,1}^2 + V_{RMS,H}^2) \cdot (I_{RMS,1}^2 + I_{RMS,H}^2)^2 \\ &= S_1^2 + D_1^2 + D_v^2 + S_H^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (10)$$

Onde S_1 é a potência fundamental, D_1 é a potência de distorção da corrente, D_V é a potência de distorção da tensão, e por fim, S_H é a potência aparente da distorção harmônica. Em situações em que temos $DHT_V < DHT_I$, a potência aparente não fundamental S_N pode ser aproximada da potência aparente fundamental S_1 pela equação (11) (IEEE Std 1459,2010) [2].

$$S_N = S_1 \sqrt{(DHT_V^2 + DHT_I^2)} \quad (11)$$

2.3.5 Legislação Atual Sobre Fator de Potência

Em 1966 foram definidas as primeiras regras a respeito do fator de potência no Brasil, ou seja, o fator de potência indutivo médio se limitava a 0,90 para consumidores atendidos em tensão superior a 13,2 kV e para os demais consumidores um fator de potência de 0,85. Desde então, o baixo valor do fator de potência já era combatido por concessionárias de energia elétrica através de multas de acordo com normas e regras [16].

Atualmente a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável pela regulamentação que vigora, estabelece que o fator de potência de referência para unidades consumidoras conectadas na distribuição até o nível de 230 kV deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com a regulamentação do PRODIST (item 3.2 do Módulo 8). Para unidade consumidora que possua equipamento de medição apropriado, o período compreendido entre 23h 30min e 6h 30min, o fator de potência deve ser no mínimo 0,92 capacitivo, já no período complementar o fator de potência deve ser no mínimo 0,92 indutivo. Esta verificação é realizada em cada intervalo de uma hora, de acordo com o artigo 96 da Resolução Normativa nº. 414/2010 (Direitos e Deveres do Consumidor de Energia Elétrica - Atualizada até a REN 499/2012).

2.3.4 Vantagens da Correção do Fator de Potência

Uma das maiores vantagens da correção do baixo fator de potência é a liberação de capacidade para instalação de novos equipamentos sem a necessidade de investimentos em transformador ou substituição de condutores para esse fim específico. Isto se deve a redução da corrente reativa na rede elétrica, ou seja, redução do efeito Joule [17]. Entre outras vantagens para o consumidor podemos citar:

- Aumento na vida útil dos equipamentos;
- Aumento da eficiência energética da instalação;
- Redução na conta de energia elétrica devido o sistema estar operando com baixo fator de potência;
- Redução ou eliminação de quedas e flutuações de tensão nos circuitos de distribuição.
- Evita a limitação da capacidade dos transformadores de alimentação;

As concessionárias também são beneficiadas pela correção do fator de potência e as principais vantagens são:

- Diminui os custos de geração;
- Aumenta a capacidade do sistema de transmissão e distribuição de enviar energia ativa para outros consumidores;
- Evita a perdas por efeito Joule em linhas de transmissão e distribuição.

O modo mais econômico de corrigir o baixo fator de potência é adicionando energia reativa capacitiva através da instalação de bancos de capacitor.

2.3.6 Banco de Capacitor Automatizado

Para aumentar o fator de potência em um sistema indutivo é necessário injetar energia reativa no sistema. O método mais prático de se obter esta energia é a instalação de capacitores próximos dos equipamentos. Estes bancos de capacitores passarão a funcionar como geradores de potência reativa para a carga, portanto, a energia necessária para máquinas, transformadores, reatores, entre outros equipamentos que necessitam de energia reativa, será fornecida pelos bancos de capacitores e não mais pela rede de distribuidora de energia.

Antes de iniciar o processo de instalação de banco de capacitores, é preciso analisar algumas situações como os problemas causados por distorções harmônicas na rede. Estas distorções ocorrem junto ao banco de capacitores e dão origem as chamadas condições de ressonância, este fenômeno causa sobretensões nos terminais do banco de capacitor, e com isto a degradação dos isolamentos das unidades capacitivas. O banco de capacitor é normalmente um caminho de impedância baixa para as correntes harmônicas, em alguns casos mesmo sem a ocorrência da ressonância [17].

A instalação de capacitores na saída da baixa tensão é feita utilizando bancos automáticos de capacitores ou bancos fixos, como visto na Figura 7. Porém, a vantagem dos bancos automáticos é a possibilidade de comutação de capacitores de acordo com a exigência da carga que normalmente flutua ao longo do dia.



Figura 7 – Banco de Capacitor da WEG.

Antes da instalação de bancos de capacitores, alguns aspectos devem ser verificados para evitar a redução da vida útil dos capacitores, sobreaquecimentos e sobrecargas. Uma destas categorias é a presença de harmônicos e é discutida pela norma ANSI/IEEE *Std* 18-2002 da seguinte forma.

- Se a potência harmônica das cargas não lineares é menor que 10% da potência nominal do transformador, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância.
- Se a potência harmônica das cargas não lineares for menor que 30% da potência nominal do transformador e a potência reativa dos capacitores for menor que 20% da potência nominal do transformador, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância.
- Se a potência harmônica das cargas não lineares for maior que 30% da potência nominal do transformador, devem ser empregados filtros aos capacitores.

Se o total de cargas não lineares ultrapassar 20% da carga total instalada deverá ser efetuada uma medição detalhada dos níveis de harmônicas. Detectando-se a existência de harmônicas na instalação elétrica deve-se obedecer ao seguinte critério [17]:

- Limite de distorção harmônica individual de tensão deverá ser menor ou igual à 3%;
- Limite de distorção total de harmônicas de tensão (THD) deverá ser menor ou igual à 5%.

Ultrapassando estes limites deverão ser instalados indutores de proteção anti-harmônicas nos capacitores ou filtros para as harmônicas significativas; (Conforme IEEE Std. 519 “*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*”) [17].

A instalação mais utilizada é derivação/shunt pois possui um custo reduzido. Além dos bancos, para a instalação de um banco de capacitor automatizado, são necessários controladores de fator de potência, estes responsáveis pelo chaveamento dos bancos através dos contatores. Geralmente estes contatores utilizados são projetados para manobras de bancos de capacitores juntamente com os resistores de pré-carga, que diminuem as correntes de *inrush*, que ocorrem quando se manobra um banco de capacitores.

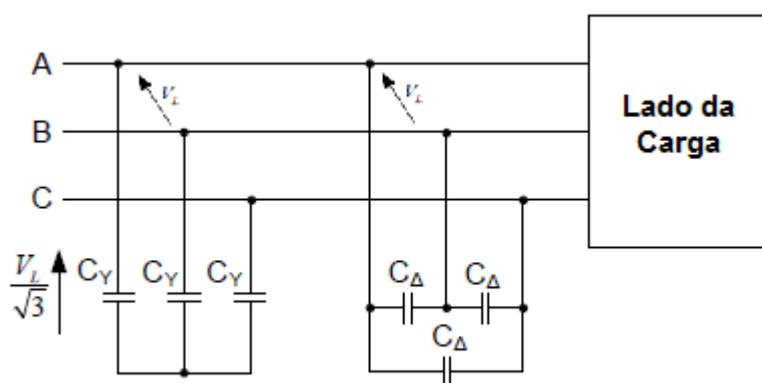


Figura 8 – Conexão delta e estrela dos capacitores.

A conexão dos capacitores geralmente possui a configuração delta, Figura 8, pois é a configuração que necessita de menos capacitância como demonstrado pelas equações (12) até (15).

$$C = \frac{Q_{C3\phi}}{3 \cdot 2\pi f V_F^2} F \quad (12)$$

$$C_Y = \frac{Q_{C3\phi}}{3 \cdot 2\pi f \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right)^2} = \frac{Q_{C3\phi}}{3 \cdot 2\pi f \frac{V_L^2}{3}} = \frac{Q_{C3\phi}}{2\pi f V_L^2} F \quad (13)$$

$$C_\Delta = \frac{Q_{C3\phi}}{3 \cdot 2\pi f V_L^2} F \quad (14)$$

$$C_\Delta = \frac{C_Y}{3} \quad (15)$$

Por fim, o esquema de funcionamento de um banco de capacitor automatizado pode ser exemplificado como o esquema da Figura 9.

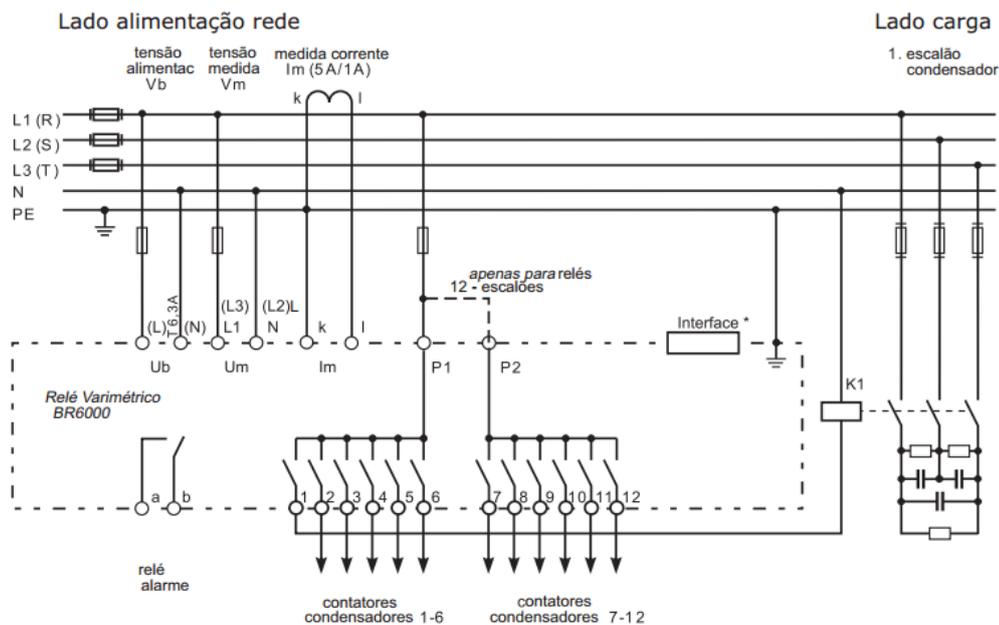


Figura 9 – Esquema de ligação utilizando o controlador de energia reativa - BR6000 (SIEMENS).

Na Figura 9 temos a representação de um controlador de energia reativa realizando o chaveamento de um conjunto de capacitores em triângulo. Este conjunto pertencente a um banco de capacitor, é conectado ao sistema através do contator K1 (por norma os contadores são designados pela letra K). Os controladores são encontrados comercialmente com saídas que variam de 6 a 12 estágios, assim é possível realizar o chaveamento de forma automática de acordo com a necessidade de energia reativa exigida para a correção do fator de potência.

3 *Materiais e Métodos*

3.1 *Introdução*

Os dados analisados e a proposta de melhoria da QEE que se encontram neste trabalho são pertencentes ao prédio do Instituto de Biotecnologia Aplicada à Agropecuária (Bioagro) da Universidade Federal de Viçosa (Bioagro/UFV). O instituto, representado na Figura 10, desenvolve pesquisas na área de biotecnologia para a criação de produtos e processos biotecnológicos. Atualmente, a estrutura do Bioagro possui dois pavimentos: o Bioagro e o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia – INCT / Anexo ao Bioagro. Esta estrutura possui 26 laboratórios instalados, além de dois laboratórios associados, e reúne um número de aproximadamente 600 usuários [14].



Figura 10 – Prédio Bioagro situado na Universidade Federal de Viçosa.

A Figura 11 representa o conjunto de equipamentos que mais se encontram conectados à rede de energia elétrica do prédio. São eles geladeiras, autoclave e congeladores profissionais (ultra congeladores). Estes congeladores consomem uma carga com variação entre 700W, podendo ultrapassar os 3000W.



Figura 11 – Equipamentos mais utilizados: autoclave, ultra freezer e geladeiras (da esquerda para a direita).

3.2 Descrição dos Materiais e Equipamentos Utilizados

3.2.1 Transformador Trifásico

O transformador trifásico da marca União S.A. que alimenta o prédio principal, é demonstrado na Figura 12. Através de sua placa de identificação foi possível verificar que possui potência nominal de 500 kVA, frequência de 60 Hz e impedância de 4,57%. Em contato com o fabricante verificou-se que o equipamento foi fabricado pelo antigo consórcio SIEMENS/TUSA.



Figura 12 – Transformador trifásico do prédio principal do Bioagro.

Assim, em contato com a SIEMENS foi obtida a informação de que a corrente nominal no primário é de 20,91 A, e no secundário é de 656,07 A, assim como a corrente de curto no primário é de 0,46 kA (em 13,8 kV), e no secundário é de 14,36 kA.

3.2.2 Analisador de Qualidade de Energia *Fluke*

Com o Analisador de Qualidade de Energia Trifásica *Fluke* 435, representado na Figura 13, foram realizadas medições da tensão, potência ativa, reativa e aparente, fator de potência e taxa de distorção harmônica total da corrente DHTi e de distorção harmônica total de tensão DHTv com o aparelho ajustado para registrar amostras a cada 1 minuto. Para a análise dos dados, foram utilizados os valores médios coletados de DHTi e DHTv, e valores máximos coletados de tensão, potência ativa, reativa e aparente e do fator de potência, todas elas medidas em cada uma das três fases (L1, L2 e L3).



Figura 13 – Analisador de Qualidade de Energia Trifásica *Fluke* 435.

3.3 *Parte Prática*

3.3.1 Ponto de Medição Utilizando o Analisador de Qualidade *Fluke*

As medições foram realizadas no secundário do principal transformador do prédio do Bioagro no período entre às 9h35min do dia 11/05/2016 até às 2h14min do dia 13/05/2016 e foram realizadas no painel geral, representado pela Figura 14, do prédio principal do Bioagro, situado no campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

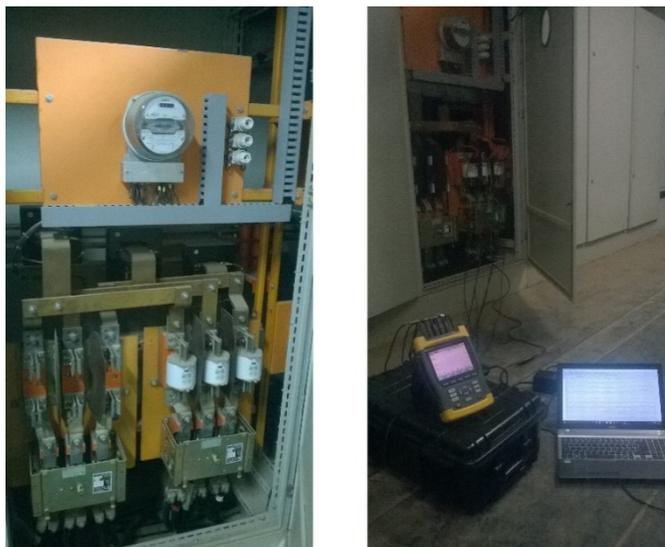


Figura 14 – Painel geral do prédio principal do Bioagro.

Este painel possui uma alimentação elétrica de 4 barramento, sendo 3 fases e 1 neutro (3F+N) vindas da saída do transformador, cuja tensão é 220V entre fases e 127V entre fase e neutro.

3.3.2 Considerações de Caso

Em dias de muito calor, o prédio do bioagro depende ainda mais de seu sistema de energia elétrica, e por este motivo foi instalado um gerador de energia a diesel para suprir esta deficiência. O que despertou o interesse em analisar a qualidade de energia deste prédio.

As medições foram realizadas em duas etapas. Na primeira, com o analisador de energia instalado no barramento da rede interna do prédio, foram coletados dados com uma amostragem de 1 minuto por um período 1 dia e 16 horas, entre quarta-feira (11 de maio de 2016) e sexta-feira (13 de maio de 2016), ou seja, em dias úteis, onde o consumo de energia é considera típico. Os dados foram selecionados conforme o objetivo da análise, isto é, dados como: fator de potência verdadeiro, distorções de harmônicas totais de corrente e de tensão (THD), potência aparente, potência reativa e ativa. Com uma análise prévia dos dados, verificou-se a necessidade de uma análise mais abrangente sobre as distorções de correntes harmônicas de forma a individualizar cada componente. Assim, na segunda etapa das medições, foram coletados dados com uma amostragem de 0,5 segundos em um período de 15 minutos na sexta-feira (01 de julho de 2016) no período vespertino (entre 15h e 03 min até 15h e 18 min). A necessidade deste intervalo de medição se deve a limitação do equipamento analisador em registrar componentes harmônicas individuais.

4 Resultados e Discussões

4.1 Análise das Tensões Harmônicas

Na Figura 15 encontram-se os dados obtidos pelas medições das distorções harmônicas totais de tensão (THD_v) das fases 1, 2 e 3. Os pontos representam as medidas discretas coletadas pelo analisador ao longo do período de monitoramento. Para uma análise mais clara empregou-se o método de regressão polinomial para ajustar uma curva para cada fase de acordo com a série de pontos, utilizou-se a ferramenta MatLab (APPS *Curve Fitting*) para a obtenção das curvas.

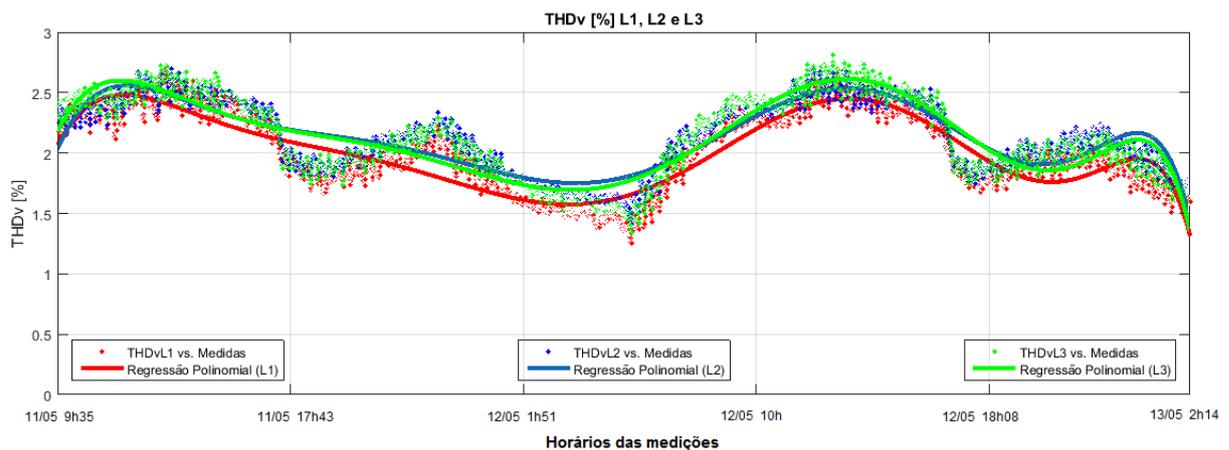


Figura 15 – Distorção harmônica total da tensão (THD_v).

De acordo com os valores de DHT_v observados na Figura 15, juntamente com a informação do percentil 95% de DHT_v que é de 2,56% para a fase 1 e 2 e 2,62% para a fase 3 (Anexo A1), verifica-se que as distorções de tensão estão dentro das normas estabelecidas pela IEEE 519-2 (Tabela 2) que é de 5%, bem como da norma da Prodist – Modulo 8, que representa um limite de 10% (Tabela 3) de distorção de tensão para barramentos abaixo de 69 kV.

4.2 Análise das Correntes Harmônicas

Já na Figura 16 é possível verificar o comportamento da distorção harmônica total de corrente (DHTi) obtido pelas medições discretas. Da mesma maneira que a seção anterior, empregou-se o método de regressão polinomial para ajustar uma curva para cada fase de acordo com a série de pontos.

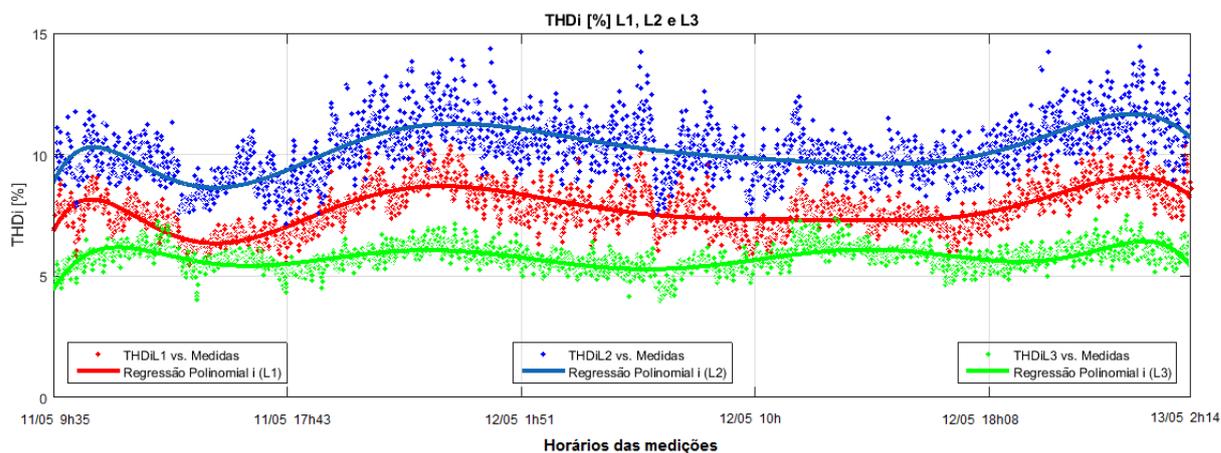


Figura 16 – Distorção harmônica total de corrente (THDi) medida no período de monitoramento.

A norma IEEE519-1992 emprega outro termo para limitar as correntes de distorções harmônicas, se trata da Distorção de Demanda Total-DDT (do inglês *total demand distortion - TDD*) que é semelhante ao DHT, porém sua diferença é que a distorção é expressa como um percentual da média dos últimos doze meses da demanda máxima mensal da corrente fundamental. Portanto a TDD será quase sempre menor que a DHTi [2]. A utilização de indicadores de distorção harmônica total é um bom indicador de presença deste sinal, sobretudo da má distribuição de cargas não lineares em circuitos, porém não é suficiente para uma análise mais abrangente.

Devido as altas distorções de correntes harmônicas total (DHTi) presentes na fase 2, foram realizadas medições de correntes harmônicas individuais para determinar qual seria a ordem da corrente harmônica responsável por este aumento. Estes resultados são apresentados de acordo com a Figuras 17, 18 e 19, onde se encontram os histogramas gerados pelo programa *Power Log*, programa desenvolvido pelo fabricante do analisador *Fluke*.

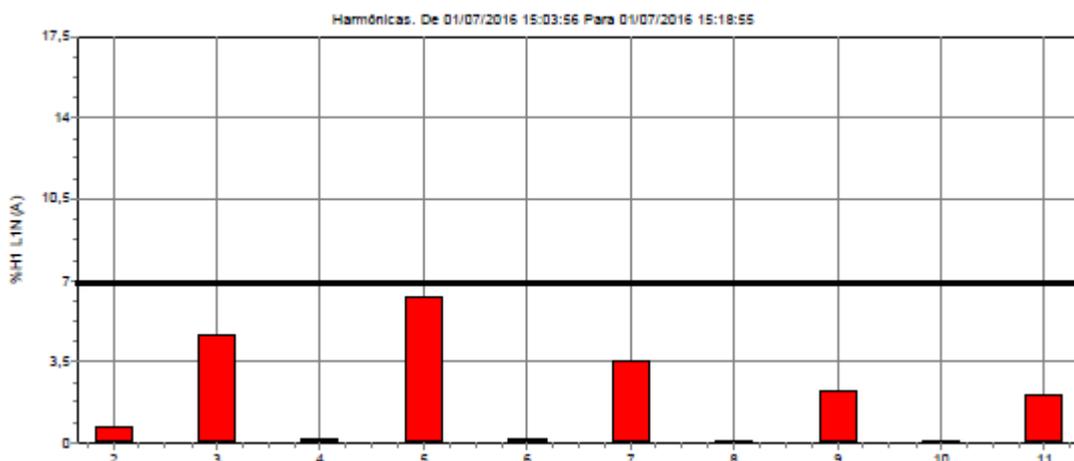


Figura 17 – Distorção harmônica individual de corrente da fase 1 (DHIi – L1N).

De acordo com a tabela 1, que representa os limites DHIi determinados pela norma IEEE 519-1992, para o cálculo do valor limite de distorção harmônica de corrente, devemos verificar a relação entre a corrente de curto circuito e a corrente nominal no ponto de conexão. Portanto, de acordo com os dados fornecidos pelo fabricante do transformador (subseção 3.2.1) encontramos a relação aproximada de $I_{sc}/I_b = 21,9$ o que representa um limite de 7% para harmônicas menores que a décima primeira ordem, ou seja, para $h < 11$.

Na Figura 17, é possível verificar que o harmônico de 5° ordem é a distorção que mais se aproxima do limite. De acordo com o programa *Power Log*, o valor da distorção harmônica individual de corrente (DHIi) para o 5° componente é de 6,292% na fase 1.

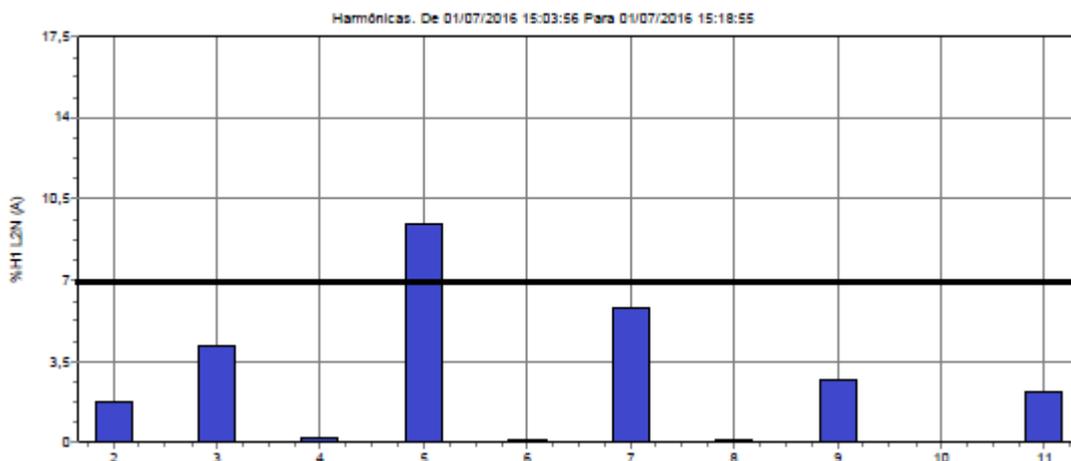


Figura 18 – Distorção harmônica individual de corrente da fase 2 (DHIi – L2N).

Já, ao verificar os dados da fase 2 do circuito, representado pela Figura 18, é possível comprovar que a corrente do 5º harmônico ultrapassa o limite da norma IEEE519-1992. De acordo com o programa *Power Log*, o valor da DH_{Ii} para a 5º componente é de 9,388%, na fase 2.

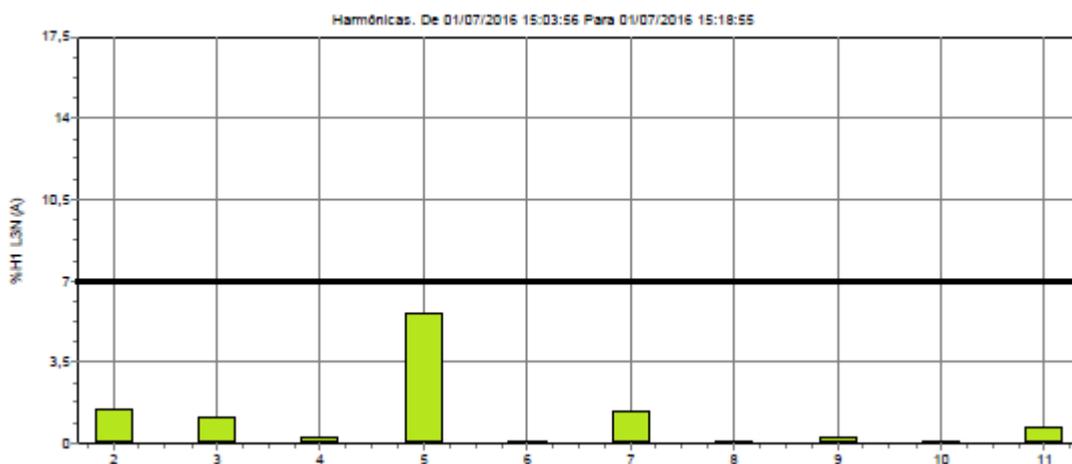


Figura 19 – Distorção harmônica individual de corrente da fase 3 (DH_{Ii} - L3N).

Na Figura 19, temos as distorções da fase 3. Podemos verificar que esta é a fase que possui as menores distorções DH_{Ii}, como esperado de acordo com os valores apresentados de DHT_i na Figura 16. De acordo com o programa *Power Log*, o valor da DH_{Ii} para a 5º componente é de 5,603%, na fase 3.

Os harmônicos de 5ª ordem foram os mais presentes nas 3 fases, seguidos pelos harmônicos de 7ª ordem e de 3ª ordem. Isto se deve ao fato de que, o primário do transformador é ligado em delta, na grande maioria dos transformadores abaixadores. Assim, ocorre um caminho de circulação para reter as harmônicas triplas ímpares, ou seja, de 3ª, 9ª, 15ª ordem. Portanto as harmônicas de 5ª e 7ª ordem entram no sistema causando distorções de corrente e tensão.

Já para os harmônicos de 3ª ordem é mais comum sua presença em cargas com fontes chaveadas monofásicas em edifícios comerciais. O crescente aumento dessas fontes causa preocupação com a sobrecarga no neutro, em especial em instalações mais antigas. Há ainda uma preocupação com o sobreaquecimento de transformadores devido à combinação de conteúdo harmônico da corrente, fluxo de dispersão, e elevada corrente no neutro [18].

4.3 Análise do Fator de Potência

Na Figura 20 temos os valores de fator de potência real monitorado e analisado da mesma forma que as seções anteriores. Empregou-se o método de regressão polinomial para ajustar uma curva para cada fase de acordo com a série de pontos e utilizou-se a ferramenta MatLab (APPS *Curve Fitting*) para a obtenção das curvas.

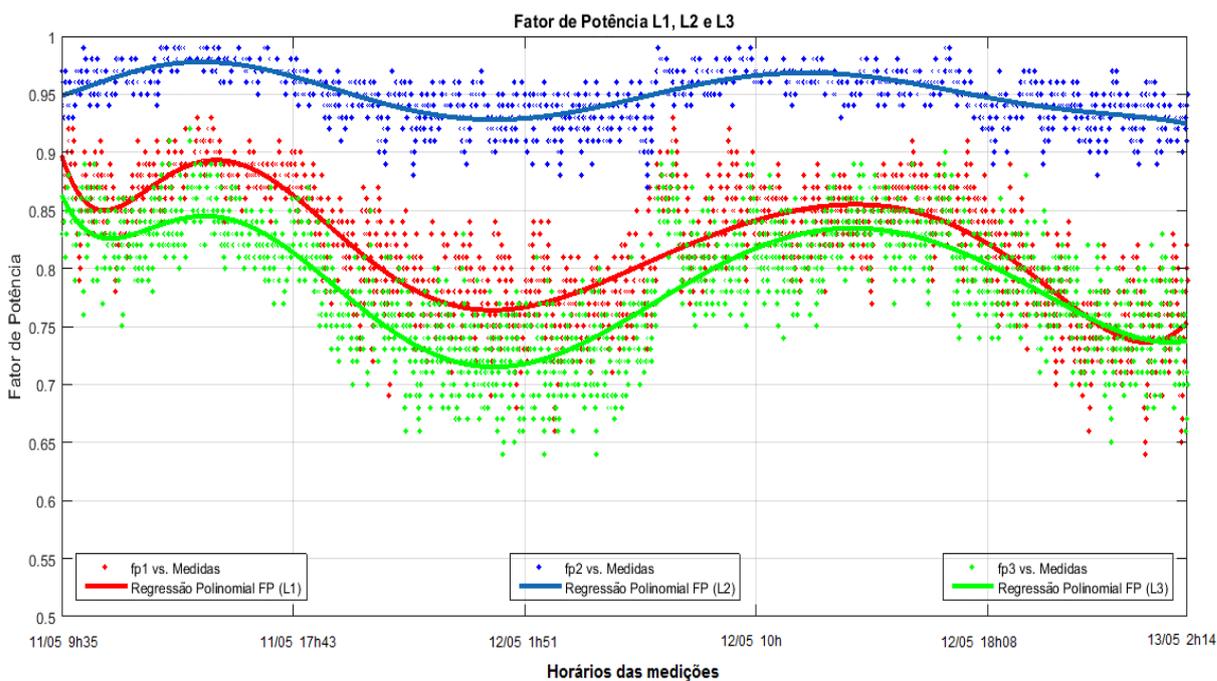


Figura 20 – Fator de potência real medido no período de monitoramento.

Na Figura 20 é possível verificar o baixo fator de potência na primeira fase (L1) em vermelho, e na terceira fase (L3) em verde, sobre tudo, nos horários noturnos até o amanhecer. De acordo com os valores estabelecidos pelo regulamento da PRODIST (item 3.2 do Módulo 8) o fator de potência deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo. Ao verificar os valores mais baixos do período monitorado, foi obtida a Tabela 4, que informa os mais baixos valores de fator de potência e seu respectivo horário de ocorrência:

Tabela 4 – Menores valores de fator de potência total, entre o período noturno até o amanhecer.

Dia e hora	Fator de Potência Total (ou verdadeiro)
11/05/2016 as 23:01 (fase 1)	0.75
12/05/2016 as 00:13 (fase 2)	0.92
12/05/2016 as 05:31 (fase 3)	0.69

Este baixo fator de potência se dá pelo fato do transformador, nestes horários, encontrar-se trabalhando a vazio ou com pouca carga. Já os maiores valores de fator de potência podem ser notados nos horários de maior atividade nos laboratórios do Bioagro, o chamado horário comercial. Ao verificar os maiores valores de fator de potência do período monitorado, bem como seu horário de ocorrência, foi obtida a Tabela 5.

Tabela 5 – Maiores valores de fator de potência total, entre o período do amanhecer até o anoitecer.

Dia e hora	Fator de Potência Total (ou verdadeiro)
11/05/2016 as 09:50 (fase 1)	0.95
11/05/2016 as 10:21 (fase 2)	0.99
11/05/2016 as 09:47 (fase 3)	0.93

Analisando os dados anteriores podemos verificar a grande variação do fator de potência sobre as fases 1 e 3, enquanto que a fase 2 permanece grande parte do tempo próximo ao fator limite determinado pelo regulamento da PRODIST que é de 0,92 indutivo.

4.4 Análise da Potência Ativa e Reativa

Como pode ser visto na Figura 21, a potência demandada pelo prédio do Bioagro chegou a picos de 50kW no período compreendido entre 13h e 17h do dia 11 de maio. A energia ativa consumida pela fase 1 e fase 3 foram praticamente as mesmas.

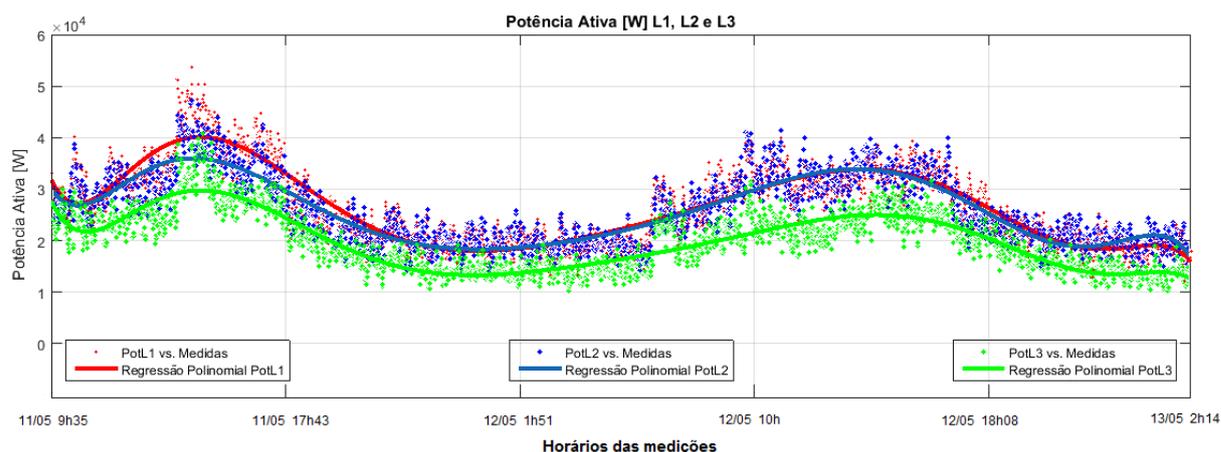


Figura 21 – Energia ativa consumida no período de monitoramento do prédio do Bioagro.

Através da Figura 22, podemos verificar que as cargas ligadas nas fases 1 e 3 possuem características reativas, ou seja, em sua maioria são equipamentos que possuem indutores e reatores.

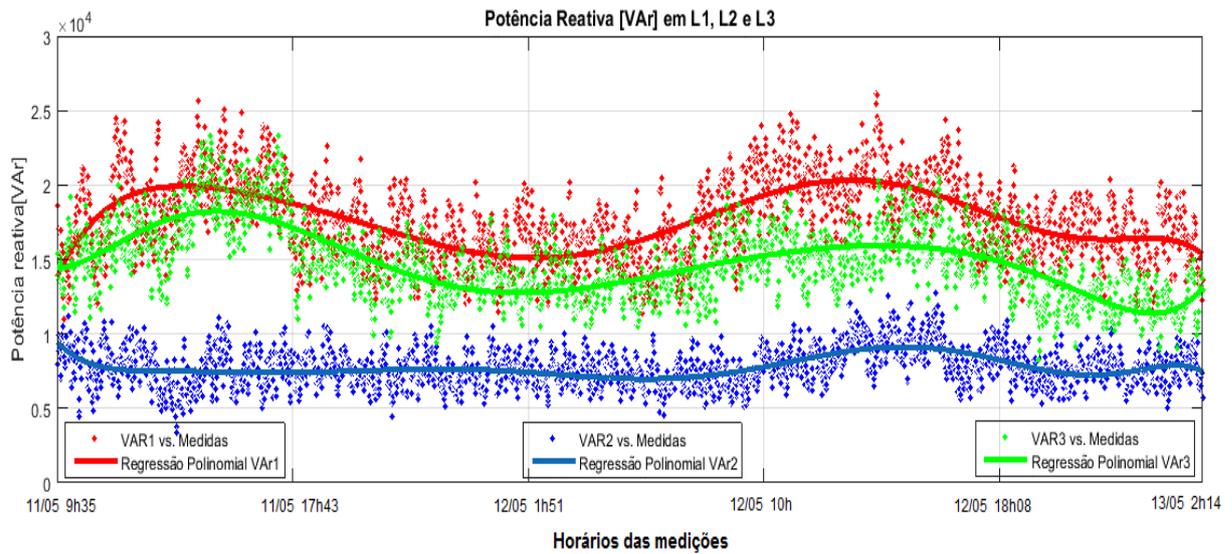


Figura 22 – Energia reativa consumida no período de monitoramento do prédio do Bioagro.

Estes equipamentos são responsáveis pela magnetização dos enrolamentos (bobinas) que necessitam de energia magnetizante, ou seja, os motores, transformadores e reatores; para transformar a energia elétrica em energia mecânica, porém, uma parte desta energia trocada entre a carga e o gerador não é consumida pela carga, isto é, a energia reativa é alternadamente armazenada e devolvida à rede.

4.4 Discussões Finais

Como verificado na seção *medição do fator de potência* (subseção 2.3.2), para o cálculo do fator de potência real, deve-se considerar a potência de distorção, a potência ativa e a potência reativa. Portanto, de acordo com o tetraedro de potências podemos determinar, para exemplificar, o comportamento da potência aparente total, nas 3 fases simultaneamente, de acordo com os dados obtidos pelo *Fluke*. Assim, os piores fatores de potência reais nas 3 fases ocorreram no dia 12 de maio de 2016 as 00 horas e 10 minutos e apresentados na Tabela 6:

Tabela 6 – Dados coletados pelo *Fluke* no dia 12 de maio de 2016 as 00h e 10 min.

	Potência Aparente [kVA]	Potência Ativa [kW]	Potência Reativa [kvar]	Fator de Potência Real (FP)	Fator de Potência Aparente (DPF)	THD _v [%]	THD _i [%]
Fase 1	23,7	19,3	13,9	0,81	0,82	1,79	8,57
Fase 2	18,5	17,5	6,1	0,94	0,95	2,03	12,83
Fase 3	20,1	14,5	14	0,72	0,72	1,95	6,52

A Figura 23 representa as potências envolvidas no cálculo de fator de potência, em seu período de menor valor para a fase 1. Assim, de acordo com as equações (6) até (11) juntamente com os dados da Tabela 6, é possível determinar as seguintes potências para esta fase como:

Tabela 7 – Potências calculadas na fase L1.

Potência Ativa Fundamental (L1)	19,19 kW
Potência Reativa (L1)	13,75 kvar
Potência de Distorção	2,067 kVA

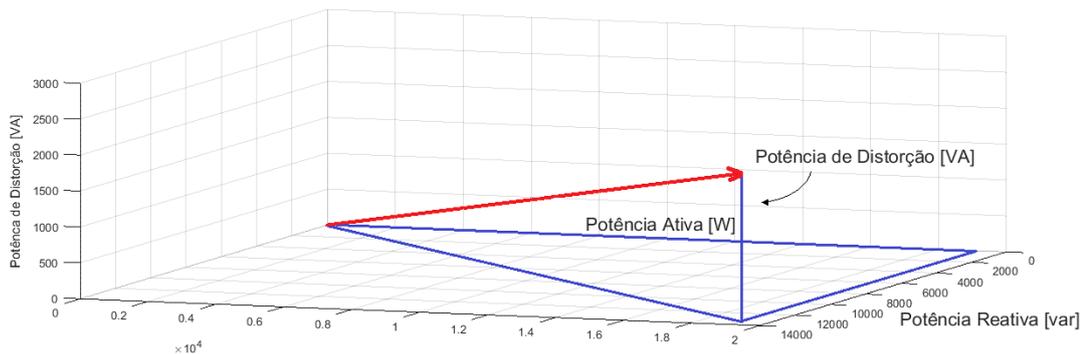


Figura 23 – Tetraedro de potência representando a potência ativa, reativa e a aparente real da fase 1.

Já na figura 24, pode-se notar que, apesar do fator de potência estar dentro das normas, a potência de distorção harmônica é maior que as outras duas fases, ou seja, a maioria das cargas não lineares estão conectadas nesta fase, causando assim este aumento da potência de distorção.

Tabela 8 – Potências calculadas na fase L2.

Potência Ativa Fundamental (L2)	17,43 kW
Potência Reativa (L2)	5,73 kvar
Potência de Distorção	2,38 kVA

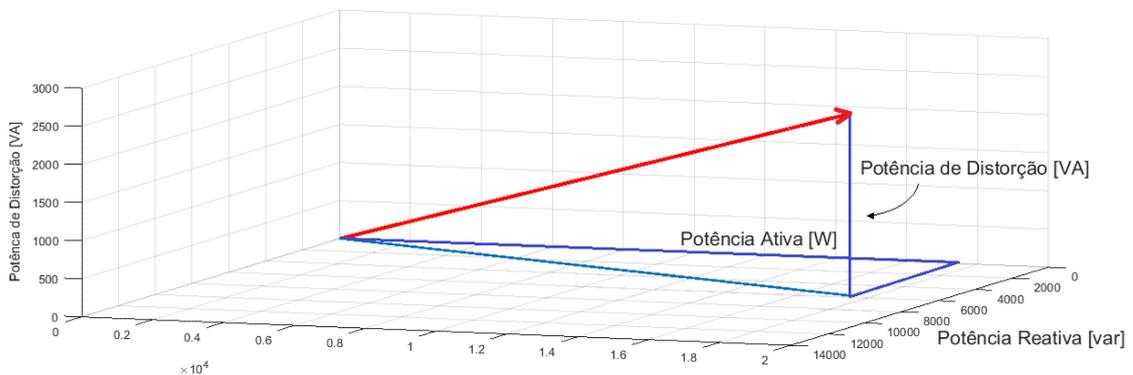


Figura 24 – Tetraedro de potência representando a potência ativa, reativa e a aparente real da fase 2.

E por fim, na Figura 25 é possível verificar o que mais contribui para o baixo valor do fator de potência na fase 3, e isto se deve a necessidade, das cargas conectadas nesta fase, de

maior energia reativa. Outra observação relevante é que as cargas da fase 3 possuem características opostas à da fase 2, ou seja, uma menor potência de distorção harmônica e uma maior potência reativa requisitada ao sistema.

Tabela 9 – Potências calculadas na fase L3.

Potência Ativa Fundamental (L3)	14,47 kW
Potência Reativa (L3)	13,88 kvar
Potência de Distorção	1,36 kVA

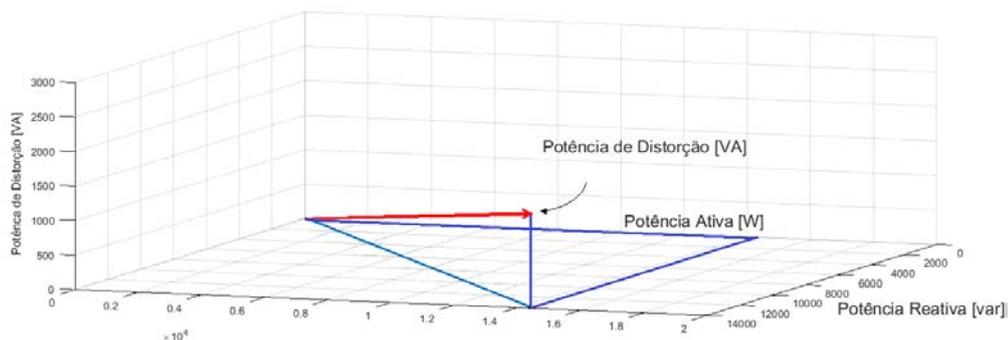


Figura 25 – Tetraedro de potência representando a potência ativa, reativa e a aparente real da fase 3.

Uma das propostas de melhoria na qualidade de energia para o prédio do Bioagro é a distribuição de cargas de forma uniforme, tanto em relação a questão de energia reativa quanto a questão de harmônicos. Apesar da influência mútua entre suprimento e carga, a carga não tem controle sobre a tensão distorcida, ou seja, uma determinada carga em diferentes locais do sistema de potência pode resultar em diferentes valores de distorção de harmônicos [2]. Porém, com a distribuição de carga não linear entre os circuitos, de acordo com os maiores valores de distorção em determinadas harmônicas, podemos equilibrar as distorções presentes no sistema, ou seja, distribuindo os equipamentos na rede de acordo com a emissão de harmônicos. A tabela 10, informa os valores de DH_i de ordem ímpar medidos de acordo com os equipamentos mais utilizados no prédio do Bioagro.

Tabela 10 – Medidas de DH_i dos equipamentos mais utilizados no prédio do Bioagro.

Equipamentos	3° harmônica	5° harmônica	7° harmônica
Superfreezer 1	11,30%	15,81%	3,85%
Superfreezer 2	5,35%	8,69%	0,73%
Geladeira antiga	3,22%	4,36%	1,19%
Geladeira nova	5,85%	3,19%	0,39%
Centrifuga	2,07%	2,34%	1,12%
Incubadora Shaker	9,85%	4,51%	3,77%
Freezer antigo	6,815%	3,07%	0,65%
Ar condicionado	12,15%	9,05%	0,53%
Freezer novo	12,19%	5,53%	7,27%

Como esperado, os equipamentos que mais se encontram no prédio são os que mais introduzem harmônicos de 5ª ordem no sistema, isto é, equipamentos como *Superfreezer* (conhecidos também como Freezer -80°C), geladeiras e ar condicionado.

Para a simulação do uso de um banco de capacitor automático no sistema, considera-se duas condições. A primeira condição é a redistribuição das cargas entre as 3 fases, o mais próximo possível de um sistema equilibrado, de forma que as cargas em cada fase necessitam aproximadamente da mesma energia reativa. A segunda condição é a redistribuição de cargas não lineares, ou seja, que cada fase receba aproximadamente a mesma quantidade de cargas não lineares. Assim, podemos verificar pela Figura 26 uma melhora no fator de potência nas 3 fases representada pela curva escura.

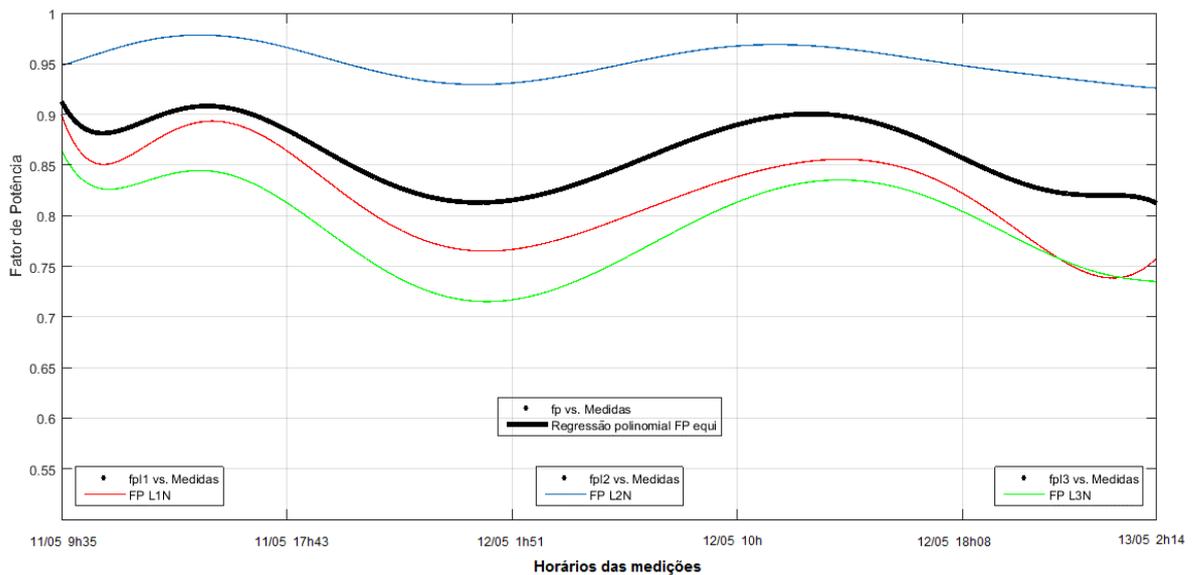


Figura 26 – Fator de potência das 3 fases em equilíbrio (curva escura) após a redistribuição das cargas.

Com base na norma ANSI/IEEE *Std* 18-2002, juntamente com os dados das tabelas 7,8 e 9, podemos verificar que a potência harmônica das cargas não lineares é menor que 10% da potência nominal do transformador, que é de 500kVA, portanto, capacitores podem ser utilizados sem preocupação de ressonância. Para o fator de potência ser igual a 0,92 é preciso calcular a energia reativa necessária para ser adicionada ao sistema através da equação (16).

$$tg \varphi = \frac{kvar}{kW} \quad (16)$$

Como $\cos^{-1}(0,92) = 23,07^\circ$, ou seja, $\varphi = 23,07$, com isto temos a seguinte relação de potência reativa em função da potência ativa expressa na equação (17).

$$kvar = 0,4259 \cdot kW \quad (17)$$

Logo, determinou-se qual a energia reativa necessária para manter o fator de potência próximo de 0,92. De acordo com a Figura 27 é possível verificar que a maior energia necessária para a correção do fator de potência é de 7 kvar.

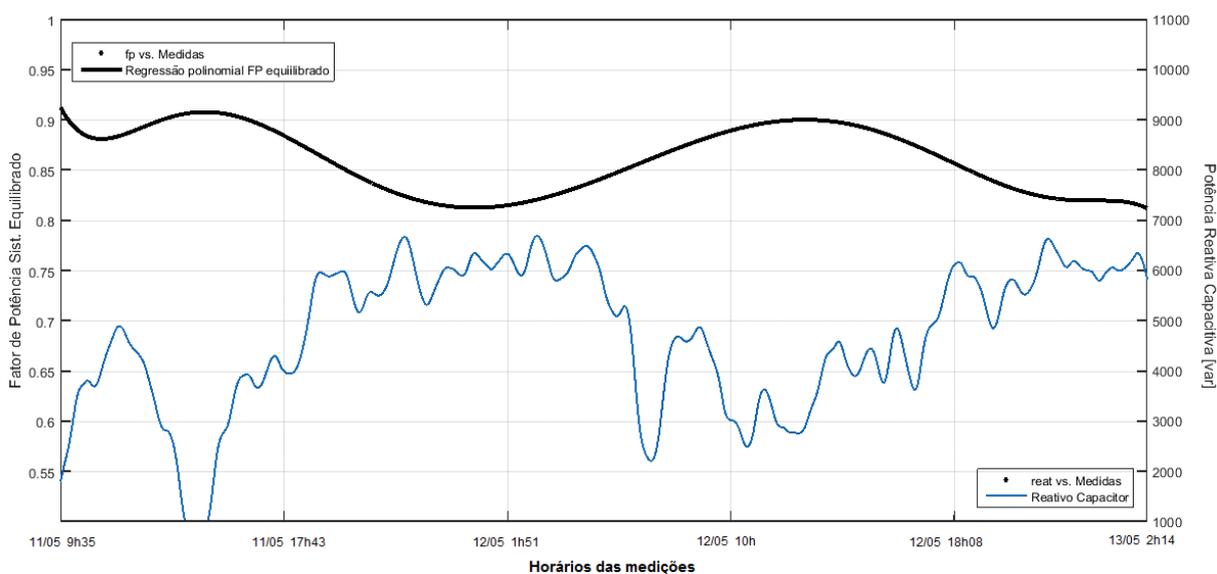


Figura 27 – Energia Reativa necessária para ser adicionada à rede e obter um fator de potência de 0,92.

Assim, com a ajuda de catálogos dos fabricantes de bancos, foi possível verificar a variação de energia reativa para capacitores trifásicos de acordo com a necessidade do projeto.

Normalmente um banco de capacitor automático é formado por quatro capacitores, que geralmente são dimensionados de acordo com a necessidade e variação da energia reativa do sistema ao longo do dia.

O equipamento que realiza o monitoramento, bem como a entrada e a saída dos estágios do banco de capacitor de forma rápida, é chamado de controlador de energia reativa. Para simular um banco de capacitor corrigindo o fator de potência das fases em equilíbrio, foram utilizadas 3 configurações. A primeira de dois estágios com capacitores de 5 kvar, a segunda de três estágios com capacitores de 2,50 kvar, a terceira configuração de quatro estágios com capacitores de 2,50 kvar.

A Figura 28 demonstra a atuação destas configurações simuladas de acordo com a energia reativa demandada no período de monitoramento.

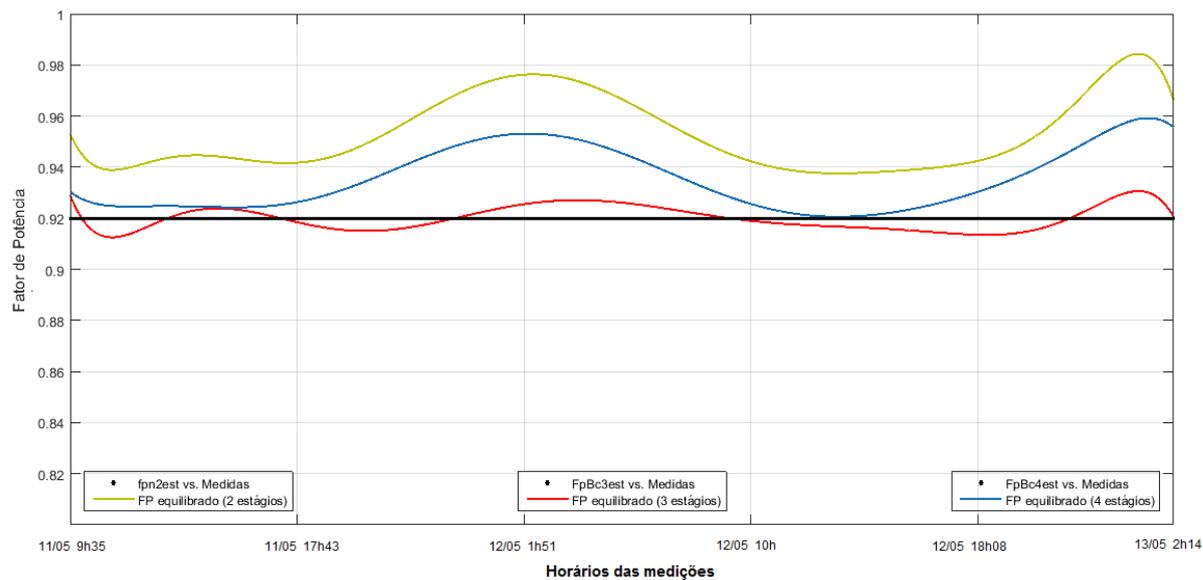


Figura 28 – Utilização do banco de capacitor automatizado em três configurações.

De acordo com a Figura 28, é possível comparar a simulação das 3 configurações e verificar que a aplicação do banco em 4 estágios (curva azul) utilizando capacitores de 2,50 kvar apresentou o melhor resultado. Pode-se notar que o valor do fator de potência ficou compreendido entre 0,92 e 0,96 de acordo com a regressão polinomial.

5 *Conclusões*

Este trabalho apresentou os resultados de uma análise do sistema de energia elétrica do prédio pertencente ao Bioagro/ UFV. Foram analisados os dados referentes as distorções de tensão e corrente de harmônicos, bem como o fator de potência. As correções propostas foram baseadas em documentos e normas técnicas de forma a corrigir e melhorar a qualidade de energia do sistema de distribuição interna do prédio.

Inicialmente, foram demonstrados os indicadores de distorções harmônicas de tensão e de corrente, a primeira de responsabilidade da concessionária de energia e a segunda do consumidor. Foi verificado que a fase L2N está conectada a grande maioria das cargas não lineares, causando assim uma corrente de harmônica de terceira ordem acima dos limites estabelecidos pela norma internacional IEEE *Std.* 519-1992, norma esta, utilizada devido à falta de uma norma nacional que trate das distorções das correntes de harmônicos.

Para o restante das fases, foi observado que a fase 3 necessita de uma quantidade de energia reativa maior que as demais fases. Analisando as fases 2 e 3 é possível verificar um desequilíbrio do sistema, onde uma das propostas de melhoria da energia no prédio é a distribuição de cargas de acordo suas características, isto é, distribuir entre as 3 fases cargas responsáveis pela distorção harmônicas (cargas não lineares) e também a distribuição das cargas que necessitam de energia reativa, esta última a maior causa do fator de potência baixo.

Para a correção do baixo fator de potência foi estudado a adoção de um banco de capacitores automático, devido a flutuação de energia reativa ao longo do dia, sendo que em alguns casos o fator de potência possuía variações entre 0,75 chegando até 0,90. Portanto, a utilização de um banco de capacitor que compreendesse estes estágios foi necessária para uma correção mais satisfatória, já que a conexão de capacitores causa como distúrbio a sobretensão, e da simulação aplicada, notou-se uma grande eficiência na utilização de banco de capacitor para a correção do fator de potência. Com isto a maior liberação de capacidade para fornecer mais energia para as cargas, permitindo que sejam ligadas novas cargas nos circuitos.

Referências Bibliográficas

CASOS

- [01] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, H. W. Beaty. *Electrical Power Systems. Quality*, (2nd ed), McGraw-Hill - 2003
- [02] Leão, Ruth. *Harmônicos Em Sistemas Elétricos*. Ed Campus - 2014
- [03] Filho, João Mamede. *Instalações Elétricas Industriais*. 8ª. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. Editora LTC, 2010; 666 pg.
- [04] Póvoa, Marcos Cortez Brito Leite. *Fatores de Influência na Eficiência Energética*. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, p. 25. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica).
- [05] Alves, Valter Luiz. *Construção e Integração de um Protótipo de Hardware/Software para Monitoração e Correção de Fator de Potência em uma Rede Elétrica*. Universidade Regional de Blumenau. Blumenau, SC, p. 19. 2003. Monografia (Graduação em Ciências da Computação).
- [06] Junior, Erasto Leonel Sommerfeld. PETRY, Jacir Rodrigo. *Bancada Didática para Estudo de Fator de Potência*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, PR, p. 9. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Tecnologia em Manutenção Industrial).
- [07] Dualibe, Paulo. *Capacitores: Instalação e Correção do Fator de Potência*. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. P. 8, janeiro/2000.
- [08] Silva, Davi Leite da. *Controle de Fator de Potência no Secundário (Lado da Carga) de um Transformador Trifásico*. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, p. 18. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação).
- [09] Franco, E. *Qualidade de Energia - Causas, Efeitos e Soluções*. Página na internet acessada no dia 20 de junho de 2016: iecom.dee.ufcg.edu.br/~mylene/potencia/artigo2.doc.
- [10] Moraes Jr., Gentil Mota. *Diagnóstico Harmônico de Cargas Não Lineares Alimentadas Pelo Sistema de Distribuição*. Dissertação de Mestrado, UFG. Goiânia, 2004.
- [11] Rocha, M. *Fonte: Fontes Sistemas de Energia*. Página na internet acessada no dia 12 de junho de 2016: <https://fontessistemasdeenergia.wordpress.com>.
- [12] Deckmann, S. M., & Pomilio, J. A. (2010). *IT - 012 Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica*. Campinas: UNICAMP/FEEC/DSCE.
- [13] MAIA, Juliana Avena; PINHEIRO, José Renes. *Harmônicos de Corrente e Tensão, XXI Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia e VI Feira de Protótipos*. UFSM, Santa Maria-RS, 2006.
- [14] Fonte: http://www.bioagro.ufv.br/?page_id=13/
- [15] Edminister, Joseph A. *Circuitos elétricos*. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1991.3

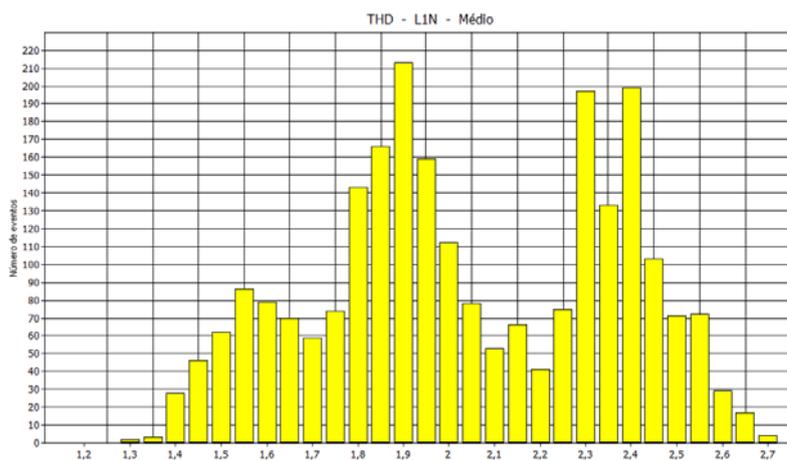
[16] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Proposta de abertura de Audiência Pública para o recebimento de contribuições visando aprimorar a regulamentação acerca do fator de potência e cobrança do excedente de reativos: Nota Técnica nº 0083/2012-SRD/ANEEL.

[17] WEG Acionamentos. Manual para Correção do Fator de Potência. Jaraguá do Sul - SC: 2002. 34 pg.

[18] LEAO, R. P. S. Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência. Universidade Federal do Ceará, 2010.

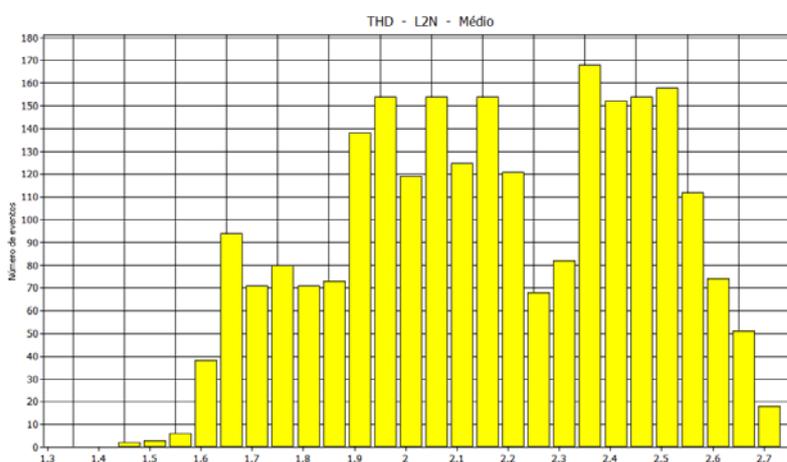
Apêndice A – Outros Dados Estatísticos Obtidos pelo Fluke

A.1 Estatísticas do THDv das Fases L1N, L2N e L3N.



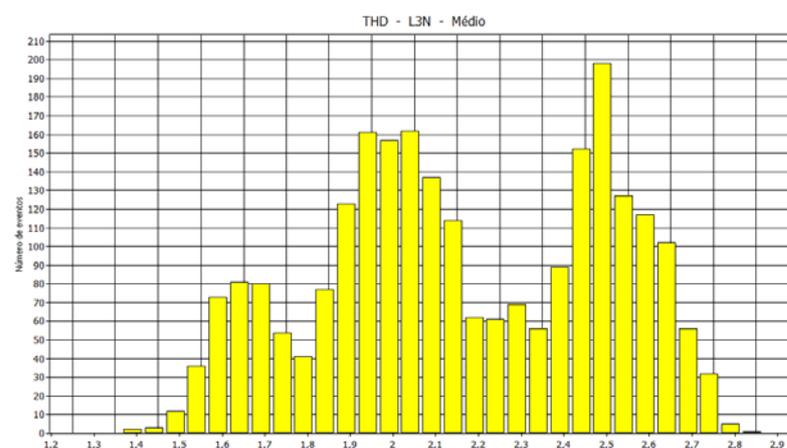
Sumário

De	11/05/2016 09:35:07
Para	13/05/2016 02:14:07
Valor máximo	2,7
Em	11/05/2016 13:38:07
Valor mínimo	1,41
Em	12/05/2016 06:06:07
μ	2,13883
s	0,28955
5% percentil	1,64
95% percentil	2,56
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0%



Sumário

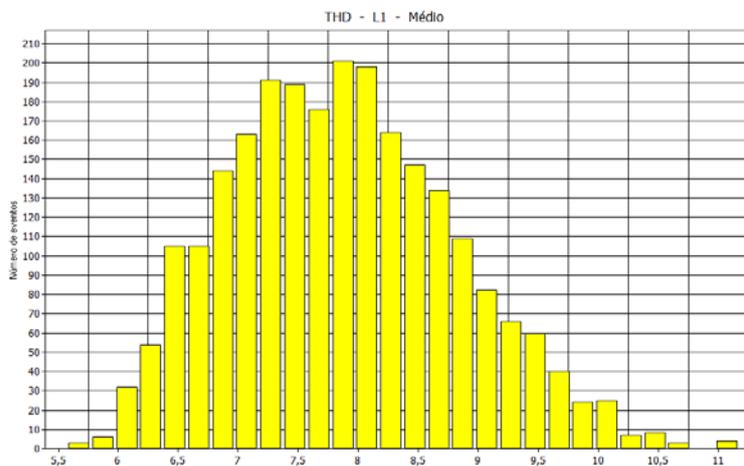
De	11/05/2016 09:35:07
Para	13/05/2016 02:14:07
Valor máximo	2,7
Em	11/05/2016 13:38:07
Valor mínimo	1,41
Em	12/05/2016 06:06:07
μ	2,13883
s	0,28955
5% percentil	1,64
95% percentil	2,56
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0%



Sumário

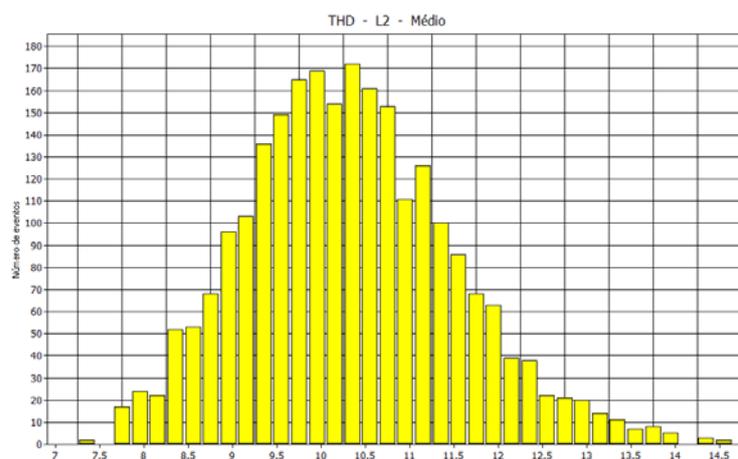
De	11/05/2016 09:35:07
Para	13/05/2016 02:14:07
Valor máximo	2,81
Em	12/05/2016 13:18:07
Valor mínimo	1,34
Em	12/05/2016 06:06:07
μ	2,13428
s	0,330563
5% percentil	1,58
95% percentil	2,62
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0%

A.2 Estatísticas do THDi das Fases L1N, L2N e L3N.



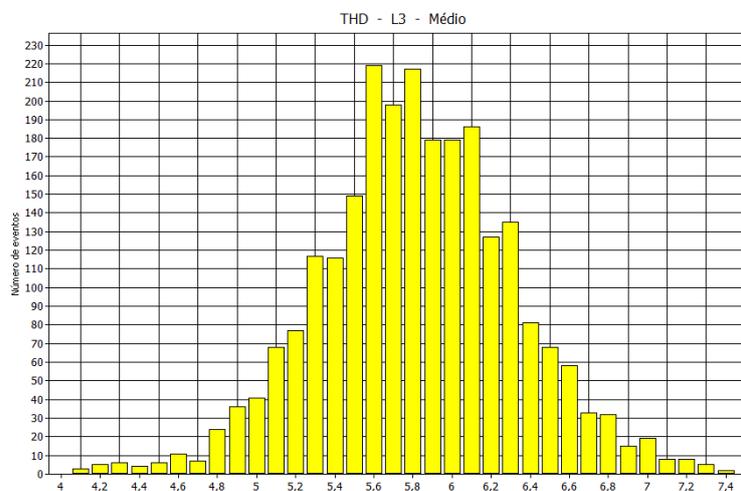
Sumário

De	11/05/2016 09:35:07
Para	13/05/2016 02:14:07
Valor máximo	11,03
Em	12/05/2016 22:36:07
Valor mínimo	5,47
Em	11/05/2016 14:23:07
μ	7,7622
s	0,945901
5% percentil	6,31
95% percentil	9,42
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0%



Sumário

De	11/05/2016 09:35:07
Para	13/05/2016 02:14:07
Valor máximo	14,46
Em	13/05/2016 00:17:07
Valor mínimo	7,15
Em	11/05/2016 17:51:07
μ	10,2209
s	1,18357
5% percentil	8,36
95% percentil	12,27
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0%



Sumário

De	11/05/2016 09:35:07
Para	13/05/2016 02:14:07
Valor máximo	7,51
Em	12/05/2016 23:49:07
Valor mínimo	4
Em	12/05/2016 07:12:07
μ	5,77079
s	0,504032
5% percentil	4,94
95% percentil	6,61
% [85% - 110%]	0%
% [90% - 110%]	0%