



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS DE SOBRAL**  
**CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**LORENA MARIA OLIVEIRA DE SOUSA**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UM BANCO DE CAPACITORES DE  
UMA INDÚSTRIA EM SOBRAL - CEARÁ**

**SOBRAL**  
**2019**

LORENA MARIA OLIVEIRA DE SOUSA

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UM BANCO DE CAPACITORES DE  
UMA INDÚSTRIA EM SOBRAL - CEARÁ

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal do Ceará Campus de  
Sobral como requisito parcial à obtenção do  
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Me. Erasmo Saraiva de Castro (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Vandilberto Pereira Pinto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

O48a Oliveira de Sousa, Lorena Maria.

Análise de Qualidade de Energia em um Banco de Capacitores de uma Indústria em Sobral - Ceará / Lorena Maria Oliveira de Sousa. – 2019. 52 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Ciências Econômicas, Sobral, 2019.

Orientação: Prof. Me. Erasmo Saraiva de Castro.

Coorientação: Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira.

1. Qualidade de Energia. 2. Banco de Capacitores. 3. Distorções Harmônicas. 4. Fator de Potência. I. Título.

CDD 330

---

A Deus.

Aos meus pais.

Minhas irmãs.

Família, amigos e professores.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradecer a Deus pelo dom da vida, pelas dificuldades e por todas as graças alcançadas neste tempo.

Ao Prof. Erasmo Castro, pelo incentivo e orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Adson Moreira e Vandilberto Pereira pelo tempo, pelas colaborações e sugestões.

Aos professores e profissionais do curso de Engenharia Elétrica.

A toda minha família e amigos pelo apoio e força.

Aos amigos e colegas do curso por todo companheirismo e auxílio.

“Digo que muito importa, sobretudo, ter uma grande e muito decidida determinação de não parar enquanto não alcançar a meta, surja o que surgir, aconteça o que acontecer, sofra-se o que se sofrer, murmure quem murmurar, mesmo que não se tenha forças para prosseguir, mesmo que se morra no caminho ou não se suportem os padecimentos que nele há, ainda que o mundo venha abaixo.”

(Santa Teresa D'Ávila)

## RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso da qualidade de energia em um banco de capacitores de uma indústria de refrigerantes, que tem como finalidade analisar as distorções harmônicas, as tensões e correntes eficazes. E assim verificar se estes valores estão de acordo com a norma atualizada IEEE std 18-2012. Para uma melhor verificação e análise dos dados, foi utilizado um analisador de qualidade de energia elétrica da marca Minipa, que permite visualizar e registrar os valores de tensões, correntes, distorções harmônicas totais e frequência. A partir da inspeção das grandezas, constatou-se que todos os parâmetros estão de acordo com a norma. Desse modo, não houve perda da vida útil do banco de capacitores. Através da telemedição da Enel, foi possível visualizar o gráfico do comportamento do fator de potência, que também esteve dentro do limite da ENEL, que é 0,92.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia. Banco de Capacitores. Distorções harmônicas. Fator de Potência.

## ABSTRACT

This paper presents a case study of power quality in a capacitor bank of a soft drinks industry, whose purpose is to analyze harmonic distortions, voltages and currents. And so check if these values are in accordance with the updated IEEE std 18-2012 standard. In order to better verify and analyze the data, an electric power quality analyzer of the Minipa brand was used to visualize and record the values of voltages, currents, total harmonic distortions and frequency. From the inspection of the quantities, it was verified that all the parameters are in agreement with the norm. In this way, there was no loss of capacitor bank life. Through the Enel telemetry, it was possible to visualize the graph of the power factor behavior, which was also within the ENEL limit, which is 0,92.

**Keywords:** Power Quality. Capacitors bank. Harmonic Distortions. Power factor.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distúrbios associados à QEE .....	14
Figura 2.2 - Forma de onda da corrente gerada por uma fonte chaveada .....	18
Figura 2.3 - Espectro harmônico da corrente de uma fonte chaveada em funcionamento .....	19
Figura 3.1 - Onda distorcida e suas componentes harmônicas ímpares .....	20
Figura 3.2 - Triângulo das potências .....	22
Figura 3.3 - Tetraedro das potências com distorção harmônica .....	22
Figura 4.1 - Possíveis instalações de banco de capacitores .....	31
Figura 4.2 - Sistema para verificação da norma IEEE std 18-2002 .....	33
Figura 4.3 - Circuito ressonância paralela .....	36
Figura 4.4 - Gráfico ressonância paralela .....	36
Figura 4.5 - Circuito ressonância série .....	37
Figura 4.6 - Gráfico ressonância série .....	37
Figura 4.7 - Forma de onda da tensão no banco de capacitores .....	38
Figura 4.8 - Espectro harmônico total e individual da tensão no banco de capacitores .....	38
Figura 4.9 - Forma de onda da corrente no banco de capacitores .....	39
Figura 4.10 - Espectro harmônico total e individual da corrente no banco de capacitores .....	39
Figura 5.1 - Design analisador de QEE, Minipa et 5060C .....	41
Figura 5.2 - Esquema de ligação do analisador de QEE em sistemas trifásicos .....	42
Figura 5.3 - Banco de capacitores analisado .....	42
Figura 5.4 - Analisador instalado no disjuntor do banco de capacitores do QGBT .....	43
Figura 5.5 - Tensões eficaz das fases do banco de capacitores .....	44
Figura 5.6 - Correntes eficazes das fases do banco de capacitores .....	45
Figura 5.7 - DHT das tensões em cada fase do banco de capacitores .....	46
Figura 5.8 - DHT das correntes em cada fase do banco de capacitores .....	46
Figura 5.9 - Forma de onda da frequência do banco de capacitores .....	48
Figura 5.10 - Gráfico do fator de potência mensal .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Ordem, frequência e sequência das harmônicas .....	20
Tabela 5.1 - Valores medidos no BC e seus correspondentes .....	45
Tabela 5.2 - Limites de DHT do banco de capacitores .....	46

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>1.1</b>	Motivação do trabalho .....	12
<b>1.2</b>	Objetivos .....	12
<b>1.3</b>	Metodologia .....	13
<b>1.4</b>	Organização do Trabalho .....	13
<b>2</b>	<b>QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	14
<b>2.1</b>	Distúrbios elétricos .....	14
<b>2.2</b>	Cargas não – lineares .....	16
<b>3</b>	<b>HARMÔNICOS</b> .....	18
<b>3.1</b>	Valor eficaz ou RMS .....	19
<b>3.2</b>	Potência: Ativa (P), Reativa (Q) e Aparente (S) .....	20
<b>3.3</b>	Fator de potência .....	21
<b>3.4</b>	Influência dos harmônicos no SEP .....	23
<b>3.4.1</b>	Medidores de energia .....	24
<b>3.4.2</b>	Condutores .....	24
<b>3.4.3</b>	Transformadores .....	24
<b>3.4.4</b>	Máquinas rotativas .....	25
<b>3.4.5</b>	Relés de proteção .....	25
<b>3.4.6</b>	Banco de capacitor .....	25
<b>3.5</b>	Fontes harmônicas de cargas industriais .....	26
<b>3.6</b>	Distorção Harmônica Total (DHT) .....	26
<b>4</b>	<b>CAPACITORES</b> .....	30
<b>4.1</b>	Limites da norma IEEE std 18-2012 .....	32
<b>4.2</b>	Consequência dos harmônicos no banco de capacitores .....	35
<b>4.2.1</b>	Ressonância: Série ou Paralela .....	36
<b>4.3</b>	Caso real de medição em um Banco de Capacitores .....	38
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	40

<b>5.1</b>	Resultados e discussões .....	42
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	48
<b>6.1</b>	Trabalhos Futuros .....	49
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	50

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, grandes consumidores, como as indústrias, possuem muitos equipamentos eletrônicos, os quais são bastante sensíveis a perturbações de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) na rede da concessionária. De acordo com pesquisas feitas em todo o mundo, verificou-se que a cada ano aumenta-se o número de reclamações de consumidores sobre distúrbios relacionados à QEE (por exemplo, harmônicos, afundamentos de tensão, flicker, entre outros) (EBERHARD, 2011).

Normalmente, os consumidores reclamam das concessionárias de energia elétrica em relação à QEE fornecida, mas, muitas vezes, são os próprios clientes que utilizam carga e equipamentos ligados à instalação que prejudicam a qualidade da energia (PROCOBRE, 2001).

Os bancos de capacitores utilizados para a correção do fator de potência são utilizados para obter uma corrente com ângulo de fase adiantado em relação à tensão, para compensar correntes atrasadas, também em relação à tensão, produzidas por uma carga indutiva. Estes bancos são extremamente sensíveis aos efeitos provocados pelas harmônicas. Como a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência, os capacitores passam a absorver parte das elevadas correntes harmônicas para si. Essa passagem de corrente pode provocar aquecimentos, redução da vida útil e, nos casos mais severos, a explosão dos mesmos, devido ao efeito da ressonância (CHAPMAN, 2002).

Em Naves (2005), são mencionadas três das principais consequências da circulação de harmônicas nas barras onde o banco de capacitor está instalado:

- Aumento da tensão eficaz – A presença de harmônicas de tensão pode gerar aumento da tensão eficaz da barra e do seu valor de pico. Este ocasiona descargas parciais e deterioração do isolamento dos capacitores;
- Aumento da corrente nominal – Harmônicas presentes na corrente podem gerar o aumento da corrente eficaz e do valor de pico da mesma. Este ocasiona sobreaquecimentos localizados e instabilidades no comportamento dielétrico dos capacitores;
- Efeito combinado entre tensão e corrente – O comportamento não senoidal da tensão e corrente, com variações bruscas, gera também variações bruscas no campo elétrico interno entre as placas. Esta variação gera a deterioração das características dielétricas do capacitor.

De acordo com Garcia (2001), em casos específicos de instalação de bancos de capacitores “ shunt ” para correção do fator de potência e regulação de tensão, é necessário um estudo dos harmônicos para a escolha correta do equipamento. As soluções propostas para eliminação ou atenuação de harmônicos (por exemplo, banco de capacitores ou filtros harmônicos) envolvem investimentos em engenharia e equipamentos, sendo assim, de grande benefício para o sistema elétrico em análise.

Segundo Mamede Filho (2016), nas instalações de baixa tensão de comércios e indústrias, a correção do fator de potência normalmente é obtida com a instalação de bancos de capacitores conectados no barramento do Quadro Geral de Força, ou conectados em alguns Centros de Controle de Motores.

### **1.1 Motivação do trabalho**

Atualmente, muitas indústrias possuem banco de capacitores instalados para corrigir o fator de potência da instalação elétrica. Sabendo disso, em sistemas industriais com significativa presença de harmônicos, surge a preocupação com o aumento da tensão e da corrente no banco de capacitores, podendo assim, danificá-lo.

A partir disso, foi realizado o estudo de caso no banco de capacitores de uma indústria de refrigerantes de médio porte (com uma demanda mensal de aproximadamente 600 kW), com o intuito de verificar se as cargas não-lineares instaladas no sistema industrial interferem na eficiência do banco.

A Delrio é uma indústria especializada na fabricação de refrigerantes, situada na cidade de Sobral - CE. A mesma possui uma subestação aérea, com potência instalada de 750 kVA e com uma alimentação em tensão alternada de 13,8 kV no primário do transformador e 380 V no secundário. O banco de capacitores é automático e é utilizado para a correção do fator de potência, com 85 kVAr de potência reativa nominal, localizado no lado de baixa tensão do transformador.

### **1.2 Objetivos**

Analisar o impacto das distorções harmônicas em um banco de capacitores instalado em uma indústria de refrigerantes, localizada na cidade de Sobral - CE.

Avaliar se os valores de Distorção Harmônica Total (DHT) de tensão e corrente, e os valores de tensão e corrente eficazes do banco de capacitores estão de acordo com os limites da norma IEEE std 18-2012.

### **1.3 Metodologia**

O método utilizado neste trabalho final de curso é baseado na avaliação dos impactos das distorções harmônicas e de eventuais sobretensões e sobrecorrentes no banco de capacitor, através de um caso real, numa indústria de refrigerantes, onde são coletados dados para análise através de um analisador de qualidade de energia, que será instalado no lado de baixa tensão, no disjuntor do banco de capacitor.

### **1.4 Organização do trabalho**

O trabalho é dividido em sete capítulos, da seguinte maneira:

O Capítulo 1 é composto pela Introdução do tema, abordando a motivação da realização do trabalho, o objetivo e a metodologia utilizada.

O Capítulo 2 é composto pela parte teórica, abordando a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), definindo os principais distúrbios relacionados à QEE e a definição de cargas não-lineares.

O Capítulo 3 aborda os harmônicos, definindo de que forma estes influenciam no sistema elétrico de potência. Neste capítulo também é abordado a influência das distorções harmônicas totais no cálculo das tensões, correntes e potências do sistema.

No capítulo 4 é feito um estudo teórico sobre os capacitores, definindo suas características e comportamento na presença de harmônicos. Neste capítulo também é definida a norma atualizada IEEE Std 18-2012.

O Capítulo 5 apresenta a parte prática, ou seja, o estudo de caso realizado na indústria, abordando o desenvolvimento e os procedimentos adotados no trabalho, assim como, os resultados e discussões.

Por último, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## **2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**

Nas últimas décadas, a qualidade da energia elétrica vem sendo alvo de grande preocupação, pois, a maior demanda de tecnologias utilizadas no sistema de potência e a utilização de equipamentos eletrônicos, os quais possuem em sua constituição diodos e transistores, cargas que não são lineares, acarreta em problemas na tensão, corrente ou até mesmo na frequência da rede, que pode ocasionar no mal funcionamento dos aparelhos conectados à mesma.

A boa qualidade da energia elétrica está relacionada ao uso adequado e às normas previstas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Segundo o PRODIST, módulo 8 da ANEEL, a qualidade da energia ideal seria como uma fonte de alimentação em perfeito funcionamento, sem problemas na rede elétrica, na qual a forma de onda é uma senoidal pura, sem distorções, e está sempre dentro das tolerâncias de tensão, corrente e frequência.

O ideal seria que os sistemas trifásicos de energia elétrica fossem compostos por três ondas senoidais puras, defasadas entre si de 120 graus elétricos. No entanto, na realidade isso não acontece, pois depende da qualidade da energia elétrica, que com o aumento das cargas não-lineares na rede de distribuição, ocasiona distorção da forma de onda da tensão, que é causa do aparecimento de correntes harmônicas na rede.

A ANEEL, desde o ano de 2017, é responsável pela aplicação das penalidades sobre as condições de fornecimento de energia pelas concessionárias, que ficam sujeitas a multas se houver violação das condições previstas.

Surge então a necessidade do monitoramento da qualidade de energia, para assegurar ao consumidor que a energia que ele está adquirindo apresente características adequadas e para proteção e controle da própria concessionária.

### **2.1 Distúrbios elétricos**

De acordo com Procobre (2001), a mudança nos valores da forma de onda da tensão, da corrente e da frequência de uma dada instalação pode ser consequência de vários fatores associados à qualidade da energia elétrica, como por exemplo, a partida de motores, fornos à arco, lâmpadas fluorescentes, equipamentos eletrônicos, etc.

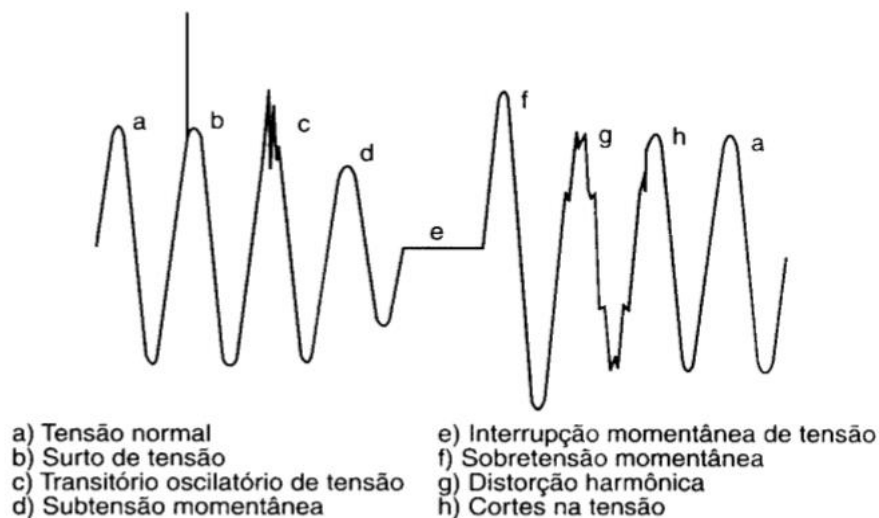
Um sistema elétrico de potência, devido as suas muitas interligações, está propenso a vários distúrbios que podem levá-lo à instabilidade. Como por exemplo, o mau funcionamento



de equipamentos da rede. Esses distúrbios comprometem a qualidade dos sinais de tensão e de corrente referentes à forma de onda, frequência e interrupção, e podem ocasionar a redução ou a parada de processos produtivos, trazendo prejuízos econômicos e sociais (BALTAZAR, 2007).

A figura 2.1 mostra o comportamento da forma de onda de alguns distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica.

Figura 2.1 - Forma de onda dos distúrbios associados à QEE.



Fonte: Baltazar (2007).

No trabalho realizado, foram analisados alguns distúrbios que podem afetar a qualidade de energia elétrica, tais como:

- **Harmônicas:** Tensões ou correntes de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (60 Hz), que são geradas a partir de equipamentos e cargas com características não lineares.
- **Sobretensão:** Aumento da tensão eficaz, acima de 1,1 pu, permanecendo com a mesma frequência industrial da rede.
- **Variação de frequência:** São definidas como o desvio da frequência fundamental do sistema de potência do valor nominal especificado por 60 Hz. A frequência é um importante parâmetro para se avaliar as características de um sistema elétrico. No Brasil, de acordo com o PRODIST, módulo 8, o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de

operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Na presença de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne à faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, no prazo de 30 segundos após sair desta faixa.

- **Fator de potência:** É definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Esse indicador determina a eficácia com que a potência ativa está sendo transferida para a carga. Segundo o PRODIST, módulo 8, em uma unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo.

## 2.2 Cargas não-lineares

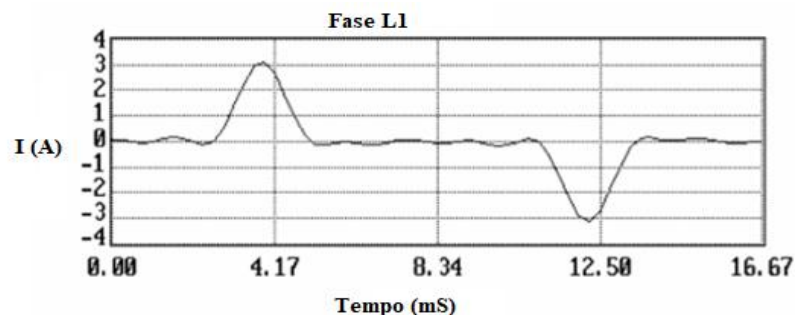
Uma carga é dita não linear quando distorce a forma de onda da corrente mesmo sendo alimentada pela rede com uma forma de onda de tensão senoidal (ROCHA, 2013).

Muitos dos equipamentos eletrônicos, são constituídos não apenas de resistências, indutâncias e capacitâncias, mas também por diodos, transistores e fontes chaveadas, os quais são caracterizados por sua deformação na forma de onda da corrente e da tensão.

Os conversores estáticos representam uma grande parcela das cargas geradoras de harmônicos presentes nos sistemas elétricos de potência, isso se deve ao fato desses equipamentos serem constituídos de cargas não-lineares e de grande importância para o funcionamento das cargas industriais (GARCIA, 2001).

A figura 2.2, segundo um exemplo citado por Garcia (2001), mostra a distorção da forma de onda da corrente, na fase L1, gerada pelo funcionamento de uma fonte chaveada.

Figura 2.2 - Forma de onda da corrente gerada por uma fonte chaveada.



Fonte: Garcia (2001).

A DHI (Distorção Harmônica Individual) da corrente é definida pela equação 2.1.

$$DHI_{\%} = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Onde,

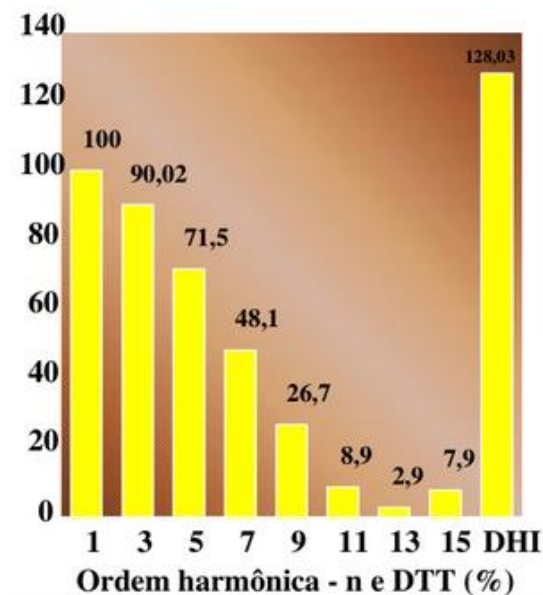
$I_h$  - Valor eficaz da componente harmônica da corrente de ordem h;

$I_1$  - Valor eficaz da componente fundamental da corrente.

A equação da distorção harmônica individual da tensão é análoga à DHI da corrente.

Na figura 2.3, ainda segundo o exemplo citado em Garcia (2001), é possível observar o espectro da corrente em que a harmônica de primeira ordem, corresponde à fundamental (100%).

Figura 2.3 - Espectro harmônico da corrente de uma fonte chaveada em funcionamento.



Fonte: Garcia (2001).

Ainda de acordo com a figura 2.3, percebe-se que não há influência das harmônicas de ordem par e que a harmônica de terceira ordem, é a que mais se destaca, com aproximadamente 90%.

### 3 HARMÔNICOS

Harmônicos podem ser definidos como componentes senoidais, de frequências múltiplas inteiras da fundamental. Estes podem ser de ordem par ou ímpar, e a sequência será positiva, negativa ou nula (PROCOBRE, 2001).

A presença de harmônicos nas instalações elétricas, é devido, principalmente, às cargas não-lineares, as quais distorcem os sinais de corrente e tensão.

Na tabela 3.1, pode-se observar a classificação das harmônicas de acordo com a ordem, a frequência e a sequência.

Tabela 3.1 - Ordem, frequência e sequência das harmônicas.

<b>Ordem</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>Sequência</b>
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
N	N · 60	...

Fonte: Procobre (2011).

Em uma onda senoidal distorcida, existem muitos harmônicos, porém, as harmônicas de frequência maiores são mais difíceis de visualizar, pois a amplitude é muito pequena em relação à onda fundamental, logo, as harmônicas mais distantes da fundamental não são levadas em consideração, pois os danos que causam na rede elétrica são irrelevantes.

De acordo com o matemático e físico francês Fourier, um sinal periódico pode ser decomposto em uma série de funções senoidais, cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental do sinal de origem (SANKARAN, 2002). Desse modo, a série de Fourier para os sinais de tensão e corrente distorcidas pode ser expressa pelas equações (3.1) e (3.2).

$$v(t) = V_0 + V_1 \cdot \text{sen}(\omega t) + V_2 \cdot \text{sen}(2\omega t) + \dots + V_n \cdot \text{sen}(n\omega t) + \dots \quad (3.1)$$

$$i(t) = I_0 + I_1 \cdot \text{sen}(\omega t) + I_2 \cdot \text{sen}(2\omega t) + \dots + I_n \cdot \text{sen}(n\omega t) + \dots \quad (3.2)$$

Em que,

$\omega = 2\pi f$  - frequência angular em função da frequência fundamental ( $f = 60$  Hz);

$v(t)$  e  $i(t)$  - valores instantâneos de tensão e corrente, respectivamente;

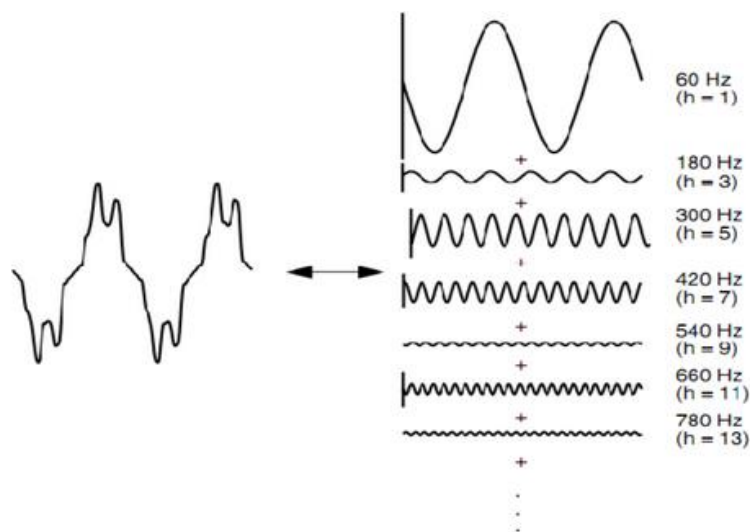
$V_0$  e  $I_0$  - valores constantes de tensão e corrente, respectivamente;

$V_1$  e  $I_1$  - valores fundamentais de tensão e corrente, respectivamente;

$V_n$  e  $I_n$  - valores máximos de tensão e corrente, respectivamente, de acordo com a ordem harmônica "n".

A figura 3.1 mostra uma onda distorcida que é resultado da soma de suas componentes harmônicas e fundamental. Pode-se observar que o formato da onda de primeira ordem é uma senóide pura, sem distorções harmônicas, com apenas a frequência fundamental de 60 Hz.

Figura 3.1 - Onda distorcida e suas componentes harmônicas ímpares.



Fonte: Rolim (2015).

### 3.1 Valor eficaz ou RMS (ROOT-MEAN-SQUARE)

Em sinais com a forma de onda de tensão distorcida, formada por componentes harmônicos com diferentes amplitudes, o valor RMS da tensão é calculado como mostra a equação (3.3) (DUGAN, 2002).

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_h^2} \quad (3.3)$$

Em que,  $V_h$  é valor da h-ésima componente harmônica de ordem “h” da tensão.

O valor RMS da corrente, com forma de onda distorcida, é calculado de maneira análoga ao da tensão na equação (3.4).

### 3.2 Potência: Ativa (P), Reativa (Q) e Aparente (S)

Para um sinal não senoidal, os valores reais dessas potências são calculados como a soma das potências em cada ordem dos harmônicos do sinal analisado, conforme descrito nas equações (3.4) e (3.5) (DUGAN, 2002).

$$P = \sum_{h=1}^{h_{m\acute{a}x}} \cdot (V_{h\_rms} \cdot I_{h\_rms} \cdot \cos \varphi_h) \quad (3.4)$$

$$Q = \sum_{h=1}^{h_{m\acute{a}x}} \cdot (V_{h\_rms} \cdot I_{h\_rms} \cdot \sen \varphi_h) \quad (3.5)$$

A potência aparente é definida como o produto dos valores eficazes de tensão e corrente, considerando as componentes harmônicas, conforme a equação (3.6).

$$S = V_{rms} \cdot I_{rms} \quad (3.6)$$

Em que,

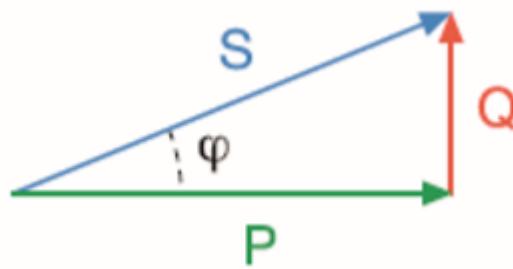
$V_{rms}$  - valor eficaz verdadeiro da tensão (considerando as componentes harmônicas);

$I_{rms}$  - valor eficaz verdadeiro da corrente (considerando as componentes harmônicas).

### 3.3 Fator de potência

O fator de potência (FP), em sistemas com senóides puras, é definido como a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) de um sistema elétrico, conforme a equação (3.7). A partir da análise da figura 3.2, tem-se que o FP pode ser calculado através do triângulo das potências, como o cosseno do ângulo entre as potências aparente e ativa, conforme a equação (3.8).

Figura 3.2 - Triângulo das potências.



Fonte: Talles (2015).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (3.7)$$

$$FP = \cos \varphi \quad (3.8)$$

Onde, a potência total ou aparente, é dada por (3.9):

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.9)$$

As potências ativa e reativa são calculadas (3.10) e (3.11), respectivamente.

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (3.10)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (3.11)$$

O valor do fator de potência pode variar entre 0 (zero) e 1 (um). Quanto mais eficiente a energia utilizada, mais próximo do valor unitário será o FP. Em sistemas com cargas puramente resistivas, o FP é máximo, pois as ondas da tensão e corrente estão em fase, logo o

coosseno do ângulo será unitário. Já em cargas puramente reativas, o FP será zero.

Segundo a Legislação Brasileira, o Fator de Potência mínimo permitido para as contas de energia é de 0,92. Abaixo deste valor, a Concessionária deve cobrar multa na fatura de energia sobre o consumo de excedentes reativos.

Em ambientes que contêm presença de harmônicos no sistema elétrico, o real valor do fator de potência é calculado, conforme a equação (3.12), como a relação entre a potência ativa total e a potência aparente total, onde também está presente neste cálculo os valores das distorções harmônicas (SANKARAN, 2002).

$$FP_r = \frac{P_r}{S_r} = \frac{\sum_{h=1}^{h_{m\acute{a}x.}} (V_{h\_rms} \cdot I_{h\_rms} \cdot \cos \varphi_h)}{V_{h\_rms} \cdot I_{h\_rms}} \quad (3.12)$$

Em que,

$FP_r$  - fator de potência real, considerando as componentes harmônicas;

$P_r$  - potência ativa real, considerando as componentes harmônicas;

$S_r$  - potência aparente real, considerando as componentes harmônicas;

$h_{m\acute{a}x}$  - ordem máxima da componente harmônica de ordem “h”;

$V_{hrms}$  - valor eficaz verdadeiro da tensão (considerando os harmônicos);

$I_{hrms}$  - valor eficaz verdadeiro da corrente (considerando os harmônicos);

$\cos \varphi_h$  - cosseno do ângulo de fase entre as potências ativa e aparente, de ordem “h”.

Em sinais senoidais, a potência aparente é calculada conforme visto na equação (3.9), entretanto, em sinais distorcidos não se verifica a igualdade, sendo o termo que complementa a igualdade definido como potência de distorção (D), e sua potência total aparente (S) é calculada segundo (3.13) (LEÃO, 2010).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.13)$$

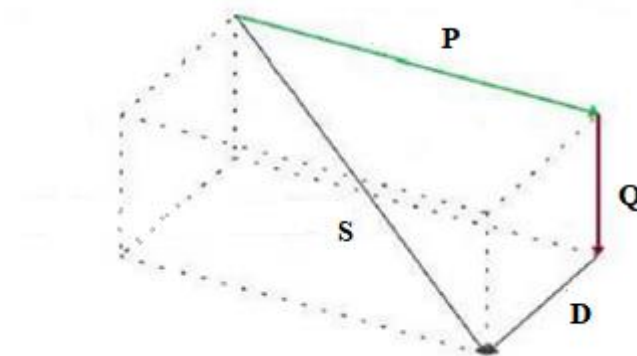
Dessa forma, o fator de potência também pode ser calculado relação (3.14).



$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} \quad (3.14)$$

Na figura 3.3, pode ser visto o tetraedro das potências, onde há uma nova dimensão, que é devido às distorções harmônicas presentes no sistema.

Figura 3.3 - Tetraedro das potências com distorção harmônica.



Fonte: Rolim (2015).

Por conta desse fator, as indústrias devem estar atentas à distorção harmônica no cálculo do fator de potência, visto que o FP é regulamentado pela ANEEL, sob pena de multas (ROLIM, 2015).

### 3.4 Influência dos harmônicos no Sistema Elétrico de Potência (SEP)

Devido ao aumento de cargas e a dispositivos não-lineares, cresce a quantidade de distorções harmônicas nos circuitos. Essas distorções interferem, muitas vezes, na qualidade de energia e no funcionamento de equipamentos, causando, assim, o aumento das perdas e a diminuição da vida útil desses. Em casos graves de harmônicas, recomenda-se utilizar "filtros de harmônicas", encontrados em lojas de componentes eletrônicos.

Com a presença de distorção harmônica, os equipamentos passam a trabalhar de forma deficiente; há redução de fator de potência; os transformadores são sobrecarregados; o isolamento dos condutores sofre perdas devido a altas temperaturas dos mesmos; ocorrem queimas de equipamentos mais sensíveis como variadores de velocidade, acioadores suaves, placas de interface entre equipamentos, entre outros. Além disso, com a diminuição da qualidade da energia, paga-se mais do que se consome, devido ao desperdício.

Dentre os principais equipamentos utilizados no SEP que sofrem com as harmônicas, podem ser citados os seguintes exemplos.

#### ***3.4.1 Medidores de energia***

Os aparelhos de medição que utilizam disco de indução são mais sensíveis aos harmônicos, podendo causar erros de medição positivos ou negativos, que variam de acordo com o modelo do medidor e com o tipo de harmônico presente. Para que o erro de medição seja levado em consideração, as distorções harmônicas devem ser em torno de 20%.

#### ***3.4.2 Condutores***

A presença de correntes harmônicas nos condutores pode aumentar de forma demasiada a temperatura do mesmo, podendo provocar perdas resistivas.

As harmônicas, de ordem múltipla de três, também agem de forma prejudicial sobre os condutores neutros. E, como consequência, esses condutores precisam ser projetados com um diâmetro maior que o normal (ROLIM, 2015).

A diminuição da eficiência e os problemas com perdas e falhas no sistema elétrico são consequências do sobreaquecimento dos condutores, que trabalham acima de sua temperatura nominal (PIRES, 2006).

#### ***3.4.3 Transformadores***

As distorções das correntes harmônicas no sistema aumentam o aquecimento dos transformadores, gerando perdas nas bobinas, pelo efeito Joule, e perdas no núcleo ferromagnético, pelas correntes de Foucault. Também é possível haver ressonância entre as reatâncias do transformador e do capacitor, podendo queimá-los.

Desse modo, os harmônicos comprometem a vida útil desses equipamentos, diminuindo a eficiência dos mesmos (SCHNEIDER, 2003).

#### ***3.4.4 Máquinas rotativas***

O principal efeito dos harmônicos nas máquinas rotativas é o sobreaquecimento, gerando perdas no cobre e no ferro. Assim, essas distorções dos sinais de tensão e corrente podem provocar o mau funcionamento, a redução do torque e a perda da vida útil dessas

máquinas.

As correntes harmônicas também podem gerar o aumento das vibrações e dos sons de ruídos durante o funcionamento dos motores.

#### ***3.4.5 Relés de proteção***

A presença de harmônicos no sistema elétrico gera sobreaquecimento e perdas nos equipamentos, diminuindo a capacidade nominal de corrente. Dessa maneira, quando há sinais de distorção no sistema, os dispositivos de proteção podem atuar de forma errada, ou ainda podendo não funcionar quando solicitado (RODRIGUES, 2009).

Com efeito, os dispositivos de proteção, quando estão na presença de harmônicos, podem causar grandes danos aos equipamentos da rede de energia e às pessoas, podendo provocar incêndios, em casos de não funcionamento dos mesmos.

#### ***3.4.6 Banco de capacitor***

Os bancos de capacitores são utilizados nos sistemas elétricos, na correção do fator de potência, evitando assim multas, por excesso de reativos, da concessionária.

Devido à grande presença de cargas não-lineares nos setores industriais, juntamente com a utilização dos bancos de capacitores nos sistemas elétricos, surge a preocupação com a ressonância e outros problemas que podem ser causados pelas distorções harmônicas no sistema elétrico de potência.

A ressonância surge quando a reatância da instalação (geralmente indutiva) iguala-se à reatância capacitiva do banco, resultando no aumento de corrente e/ou tensões no circuito elétrico, podendo danificar o equipamento (SOARES, 2015).

### **3.5 Fontes harmônicas de cargas industriais**

Modernas instalações industriais são caracterizadas pela ampla aplicação de cargas não-lineares. Essas cargas podem representar uma parte significativa das cargas totais da instalação e injetar correntes harmônicas no sistema de potência, causando distorção harmônica na tensão. Esse problema harmônico é agravado pelo fato de que essas cargas não lineares têm um fator de potência relativamente baixo. Instalações industriais, frequentemente, utilizam bancos de capacitores para melhorar o fator de potência e evitar cobranças de penalidades.

A aplicação de capacitores para correção do fator de potência pode, potencialmente, ampliar as correntes harmônicas das cargas não lineares, dando origem a condições de

ressonância dentro da instalação. O nível mais alto de distorção de tensão, geralmente, ocorre no barramento de baixa tensão da instalação, onde os capacitores são aplicados. As condições de ressonância causam superaquecimento de motor e de transformador e operação incorreta de equipamentos eletrônicos sensíveis.

### 3.6 Distorção Harmônica Total (DHT)

A DHT é a medida do grau de distorção de uma forma de onda em relação a uma forma de onda senoidal pura. Em sinais senoidais com apenas a presença da frequência fundamental, a DHT tem valor nulo (LEÃO, 2010).

A distorção harmônica total é a relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas e a correspondente grandeza (corrente ou tensão) fundamental. A DHT é expressa por uma composição quadrática das distorções individuais, que resulta numa distorção eficaz resultante.

A equação (3.15) mostra a formulação da distorção harmônica total da corrente, em percentual.

$$DHT_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^k I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (3.15)$$

Em que,

$k$  - Ordem máxima da harmônica considerada;

$I_h$  - Valor eficaz da componente harmônica da corrente de ordem  $h$ ;

$I_1$  - Valor eficaz da componente fundamental da corrente.

A equação da distorção harmônica total da tensão em percentual é análoga para DHT da corrente.

De acordo com Leão (2010), a tensão eficaz ou *rms* de um sistema, considerando a presença de harmônicos, pode ser calculada a partir da DHT, conforme visto nas equações (3.16) e (3.17).

$$V_{rms} = \sqrt{V_{1\_rms}^2 + V_{2\_rms}^2 + \dots} = \sqrt{V_{1\_rms}^2 \cdot \left(1 + \frac{V_{2\_rms}^2}{V_{1\_rms}^2} + \dots\right)} \quad (3.16)$$

$$V_{rms} = \sqrt{V_{1\_rms}^2 \cdot (1 + DHT_v^2)} \quad (3.17)$$

Logo, tem-se que o valor da DHT em relação à tensão *rms* é dado por (3.18):

$$DHT_v = \sqrt{\left(\frac{V_{1\_rms}}{V_{rms}}\right)^2 - 1} \quad (3.18)$$

A  $DHT_i$  é calculada de maneira análoga ao cálculo da  $DHT_v$  em relação ao valor *rms*, resultando na equação (3.19).

$$DHT_i = \sqrt{\left(\frac{I_{1\_rms}}{I_{rms}}\right)^2 - 1} \quad (3.19)$$

Onde,

$DHT_v$  - distorção harmônica total da tensão;

$DHT_i$  - distorção harmônica total da corrente;

$I_{1\_rms}$  - valor eficaz da corrente fundamental;

$V_{1\_rms}$  - valor eficaz da tensão fundamental;

$I_{rms}$  - valor eficaz da corrente total, incluindo as componentes harmônicas;

$V_{rms}$  - valor eficaz da tensão total, incluindo as componentes harmônicas.

A determinação de limites para as distorções harmônicas na corrente e na tensão é fundamental para atenuar ou impedir os efeitos prejudiciais que esses fenômenos podem causar. Esses limites servem de guia para os usuários seguirem, garantindo o adequado funcionamento

dos equipamentos da instalação.

De acordo com Corrêa (2007), o reconhecimento da existência de problemas devido às distorções harmônicas incentivou o desenvolvimento de normas específicas para tratar deste assunto.

Nos sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorção harmônica devem ser feitas através das tensões fase-neutro para sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações (PRODIST).

## 4 CAPACITORES

Os capacitores são utilizados para fornecer energia reativa e corrigir o fator de potência, diminuindo assim as perdas e ajudando a suportar a tensão no sistema. Eles são muito econômicos e geralmente atingem os objetivos, desse modo, os capacitores são bastante comuns em sistemas de energia (DUGAN, 2002).

Em condições razoáveis de operação, os capacitores duram em torno de quinze anos. Porém, em circuitos em que há uma considerável quantidade de cargas não-lineares, geradoras de harmônicas, os capacitores podem ser danificados e a sua vida útil é reduzida (MAMEDE FILHO, 2013).

Os bancos, sem nenhum controle da potência reativa capacitiva injetada no sistema elétrico, são denominados banco fixo. Já os bancos de capacitores manobrados através do controlador de fator de potência (CFP) são denominados bancos automáticos e são empregados na compensação de cargas reativas indutivas cuja variação de demanda é lenta, resultando em poucas manobras do banco de capacitores.

Nas indústrias, ao longo dos dias, há uma variação de cargas, logo há uma variação também na solicitação de potência reativa. Quando os capacitores são ligados para operação, há um aumento na tensão, podendo trazer problemas sérios em períodos de carga leve.

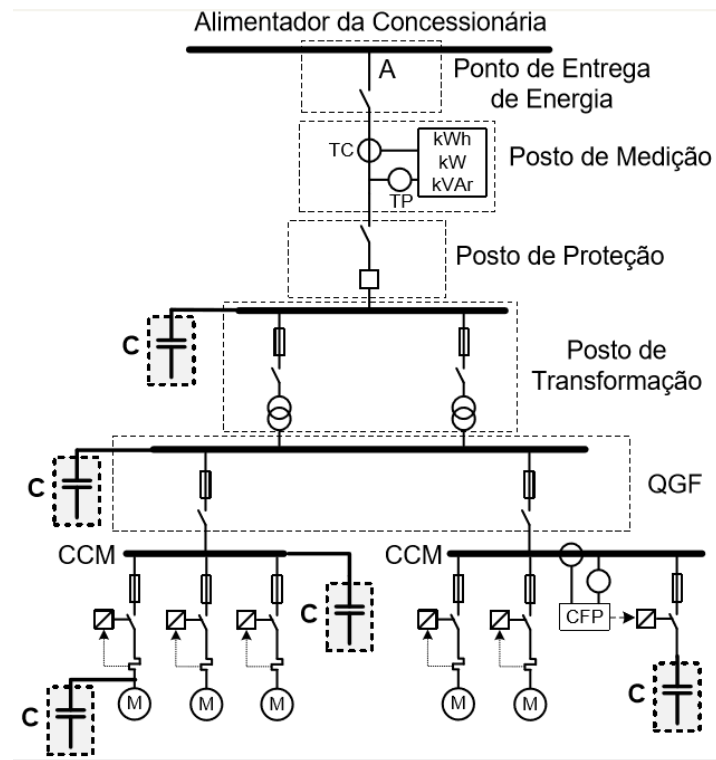
Para isso, os bancos são acoplados a controles automáticos, que ao “sentir” a necessidade de injeção de reativos na instalação, conectam as unidades capacitivas, em número adequado, de forma a se obter o fator de potência requerido num tempo muito pequeno e realizando o menor número de operações de comando (contatores ou disjuntores) responsáveis por essas conexões.

Quanto à aplicação dos capacitores, eles podem ser conectados em paralelo ou em série, dependendo da solicitação do sistema elétrico. E em relação à conexão, eles podem variar de acordo com a ligação em estrela ou delta (triângulo), podendo ser aterrado ou não.

A ligação em delta dos bancos de capacitores é recomendada para classes de tensão até 2,4 kV. Para tensões superiores, esta não se torna econômica em relação a outras, devido ao elevado custo da proteção associada. Esta ligação impede a circulação de correntes de terceira harmônica, que ocorre na conexão estrela com neutro aterrado e que pode causar interferência nos circuitos de comunicação e proteção.

Normalmente, a instalação de bancos de capacitores para correção de fator de potência em indústrias apresenta as seguintes possibilidades, de acordo com a figura 4.1.

Figura 4.1 - Possíveis instalações de banco de capacitores.



Fonte: Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais (2013).

De acordo com a figura 4.1, o banco de capacitores pode ser instalado, dependendo do sistema, nas seguintes especificações:

- Instalação no lado de alta tensão da transformação, localizada no primário do transformador, garantindo o valor de potência sob o ponto de vista da concessionária de energia elétrica;
- Instalação no lado de baixa tensão da transformação, localizada normalmente no quadro geral de força, essa solução normalmente é acompanhada do controlador de fator de potência;
- Instalação de banco de capacitores ligados a grupos de cargas (como por exemplo, um grupo de motores), garantindo a compensação de áreas específicas da planta industrial;
- Instalação em cargas específicas, garantindo a correção do fator de potência.

Uma desvantagem do uso de capacitores é que eles produzem oscilações transientes quando chaveado. Alguns capacitores são energizados o tempo todo (banco fixo), enquanto outros são trocados de acordo com os níveis de carga.



De acordo com Dugan (2002), quando em um determinado circuito houver um único harmônico, cujo valor seja significativo (averiguado pela distorção harmônica individual), existem grandes chances de haver circuitos ressonantes. Para fazer essa análise, deve-se medir a corrente elétrica no conjunto de capacitores, caso apareça um valor representativo de um harmônico, é provável que o capacitor esteja participando de um circuito ressonante dentro do sistema de potência. Se houver a ocorrência de ressonância, correntes elétricas altas podem circular sobre os ramos do circuito do banco de capacitores e transformador, causando sobrecarga em ambos.

#### 4.1 Limites da norma IEEE std 18-2012

Nesta norma internacional são considerados capacitores de potência nominal a partir 2,5 kVAr e tensão de 216 V ou mais, e projetados para conexão em derivação a sistemas de transmissão e distribuição de corrente alternada operando a uma frequência nominal de 50 Hz ou 60 Hz. Os capacitores em derivação são dimensionados para operar de acordo com a norma IEEE std 18-2012, que especifica os seguintes limites de tensão, corrente e potência, incluindo os harmônicos:

- Tensão eficaz medida  $\leq 110\%$  do valor da tensão nominal (contínuo); Em que o limite de distorção harmônica total da tensão é dada de acordo com (4.1).

$$\frac{V_{rms}}{V_1} = \sqrt{1 + DHT_v^2} \leq 1,1 \Rightarrow DHT_v \leq \sqrt{0,21} = 45,8 \% \quad (4.1)$$

- Corrente eficaz medida  $\leq 135\%$  do valor da corrente nominal de fase; Em que o limite de distorção harmônica total da corrente é dada de acordo com a equação (4.2).

$$\frac{I_{rms}}{I_1} = \sqrt{1 + DHT_i^2} \leq 1,35 \Rightarrow DHT_i \leq \sqrt{0,8225} = 90,69 \% \quad (4.2)$$

- Tensão de pico medida  $\leq 120\%$  do valor da tensão de pico nominal; pode-se ver o cálculo na equação (4.3), para se achar a relação de VCF (Voltage Crest Factor) ou fator de crista da tensão.

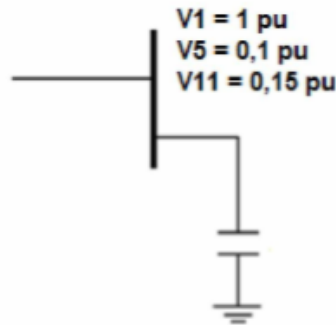
$$\frac{V_P}{V_1} = 1 + VCF \leq 1,2 \Rightarrow VCF \leq 0,2 \quad (4.3)$$

• Potência reativa medida  $\leq 135\%$  do valor da potência reativa nominal. A equação que limita a potência reativa em banco de capacitores pode ser vista na equação (4.4).

$$\frac{Q_C}{Q_{C,1}} = \sum_{h=1}^{h_{\text{máx}}} h \cdot \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2 = \sum_{h=1}^{h_{\text{máx}}} \frac{1}{h} \cdot \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \leq 1,35 \quad (4.4)$$

Em Braz (2017), é visto um exemplo no qual é verificado se a norma IEEE 18-2002 corresponde aos valores dos limites estabelecidos para este capacitor. O sistema possui uma barra com tensões harmônicas de ordem 5 e 11 e um banco de capacitor que está em paralelo com a mesma. O circuito do sistema correspondente ao exemplo pode ser visualizado na figura 4.2.

Figura 4.2 - Sistema para verificação da norma ANSI/IEEE 18-2002.



Fonte: Braz (2017).

Foi considerado que os valores de  $X_{C,1}$  e  $I_1$  são iguais a 1 pu. O cálculo da reatância e da corrente para cada ordem pode ser visto de acordo com as equações (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8).

$$X_{C,5} = \frac{X_{C,1}}{5} = 0,2 \text{ pu} \quad (4.5)$$

$$I_5 = \frac{V_5}{X_{C,5}} = \frac{0,1}{0,2} = 0,5 \text{ pu} \quad (4.6)$$

$$X_{C_{11}} = \frac{X_{C_1}}{11} = 0,091 pu \quad (4.7)$$

$$I_{11} = \frac{V_{11}}{X_{C_{11}}} = \frac{0,15}{0,091} = 1,65 pu \quad (4.8)$$

O cálculo dos valores eficazes de corrente, tensão e do valor da tensão de pico são dados por (4.9), (4.10) e (4.11).

$$I_{ef} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2 + I_{11}^2} = \sqrt{1^2 + 0,5^2 + 1,65^2} = 1,99 pu = 199\% \quad (4.9)$$

$$V_{ef} = \sqrt{V_1^2 + V_5^2 + V_{11}^2} = \sqrt{1^2 + 0,5^2 + 1,65^2} = 1,065 pu = 101,6\% \quad (4.10)$$

$$V_p = V_1 + V_5 + V_{11} = 1 + 0,1 + 0,15 = 1,25 pu = 125\% \quad (4.11)$$

A partir dos valores obtidos no exemplo citado, tem-se que a corrente eficaz (199%) e a tensão de pico (125%) ultrapassaram os limites da norma, que são, respectivamente 180% e 120%. Já o valor da tensão eficaz (101,6%) está dentro do limite da norma, que é 110%. Sabendo que a norma foi atualizada para IEEE std 18-2012, tem-se que o valor limite atualizado para corrente é de 135%.

Os valores nominais de tensão e potência de operação são utilizados para o dimensionamento dos capacitores em funcionamento na frequência fundamental. Entretanto, em circuitos com presença de harmônicos, os valores de suportabilidade dos capacitores ficarão prejudicados em função do acréscimo de corrente, tensão e potência introduzidos por este fenômeno.

O projeto de um capacitor está condicionado, durante a sua vida útil, a operar com tensões e correntes senoidais. Para um projeto de capacitor atender às condições operacionais anormais dos sistemas elétricos, seria necessário elevar o valor da sua tensão nominal, aumentando os custos de manutenção, para que ele pudesse operar sem perda de vida útil. Diversos tipos de indústrias utilizam equipamentos que geram harmônicos que poluem os seus sistemas e os das concessionárias. Vale ressaltar que os capacitores não são responsáveis pela formação das tensões harmônicas no sistema. A forma de onda da tensão fundamental (onda de

tensão na frequência industrial, isto é, 60 Hz) é deformada pelo uso dos equipamentos que são constituídos de cargas não-lineares, gerando as chamadas tensões harmônicas, que influenciam a operação dos bancos de capacitores. De fato, a reatância de um capacitor varia de acordo com a frequência na proporção inversa. Assim, um capacitor, quando submetido a uma tensão de frequência maior que a sua nominal, se constitui em um caminho fácil para circulação de correntes elevadas, pelo simples fato de apresentar, nessas condições, uma baixa reatância. A vida útil dos capacitores está, portanto, condicionada aos efeitos dos componentes harmônicos sobre as diversas partes desse equipamento (MAMEDE FILHO, 2013).

#### **4.2 Consequência dos harmônicos no banco de capacitores**

De acordo com Leão (2010), os componentes harmônicos afetam a qualidade de vida dos capacitores da seguinte maneira:

- Sobrecarga por correntes harmônicas uma vez que a reatância dos capacitores diminui com a frequência, tornando-os como sorvedouros por harmônicos. As tensões harmônicas também produzem grandes correntes causando a ruptura de fusíveis de proteção dos capacitores;
- Aumento das perdas dielétricas tendo como consequência direta o aumento de calor e redução de vida útil;
- Os capacitores combinados com a indutância da fonte formam um circuito ressonante paralelo. Na presença de ressonância, os harmônicos são amplificados. As tensões resultantes excedem em muito a tensão nominal e suas consequências são a danificação do capacitor e a queima de fusíveis.

Em um estudo realizado por Garcia (2001), tem-se que a forma de onda distorcida da tensão analisada sobre um capacitor instalado, apresenta pontos de súbita variação, resultantes da interação dos valores instantâneos dos harmônicos presentes.

Na equação (4.12), pode-se verificar a influência das bruscas variações de tensão em relação ao aumento repentino da corrente demandada pelo capacitor, e conseqüentemente, súbitos aumentos no campo elétrico entre as placas do capacitor, em que tais sobrecorrentes geram danos ao dielétrico, comprometendo assim a vida útil do capacitor.

$$i(t) = \frac{dV(t)}{dt} \quad (4.12)$$

#### 4.2.1 Ressonância: Série ou Paralela

O efeito da ressonância pode ser classificado como série ou paralela. A ressonância é uma condição especial de qualquer circuito elétrico, que ocorre sempre que a reatância capacitiva se iguala à reatância indutiva em uma dada frequência particular – a qual é conhecida como frequência de ressonância. O cálculo da frequência ressonante nos sistemas elétricos, é de acordo com as equações (4.13), (4.14) e (4.15) que resultam em (4.16).

$$X_C = X_L \quad (4.13)$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (4.14)$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (4.15)$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \quad (4.16)$$

Onde:

$X_C$  - reatância capacitiva;

$X_L$  - reatância indutiva;

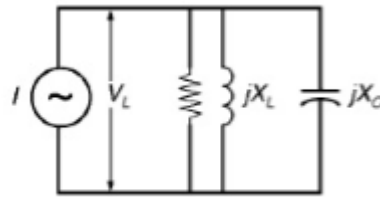
f - frequência de ressonância (em Hertz);

L - indutância do circuito (em Henry);

C - capacitância do circuito (em Farad).

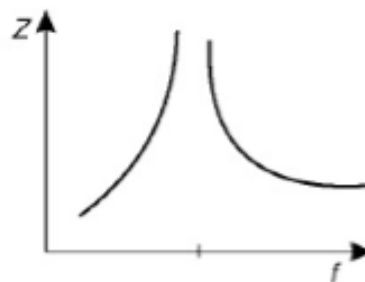
A ressonância paralela ocorre quando a indutância equivalente do sistema supridor da concessionária e um banco de capacitores da instalação consumidora entram em ressonância em uma frequência próxima à gerada por uma fonte de harmônicos, constituindo um caminho de alta impedância para o fluxo de determinada corrente harmônica. Nas figuras 4.3 e 4.4, observa-se respectivamente o circuito elétrico e o comportamento do gráfico de uma ressonância paralela.

Figura 4.3 - Circuito ressonância paralela.



Fonte: Creder (2016).

Figura 4.4 - Gráfico ressonância paralela.



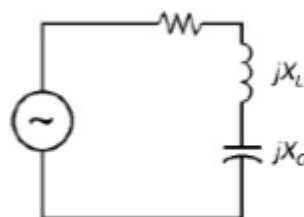
Fonte: Creder (2016).

Como  $V = Z \cdot I$ , mesmo uma pequena corrente harmônica pode dar origem a uma sobretensão significativa na frequência ressonante.

A ressonância série, normalmente, ocorre quando há uma associação de um transformador com um banco de capacitores ligados em um mesmo barramento. Neste caso, as reatâncias se cancelam entre si e a impedância do circuito se torna igual à resistência, a qual é um valor muito pequeno provocando sobrecorrentes que danificam os capacitores (WEG AUTOMAÇÃO S.A).

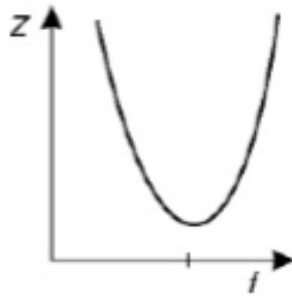
Nas figuras 4.5 e 4.6, encontram-se respectivamente o circuito elétrico e o gráfico de uma ressonância série.

Figura 4.5 - Circuito ressonância série.



Fonte: Creder (2016).

Figura 4.6 - Gráfico ressonância série.



Fonte: Creder (2016).

Como  $I = \frac{V}{Z}$ , uma impedância harmônica reduzida pode resultar em elevada corrente, mesmo quando excitada por uma tensão harmônica não muito alta.

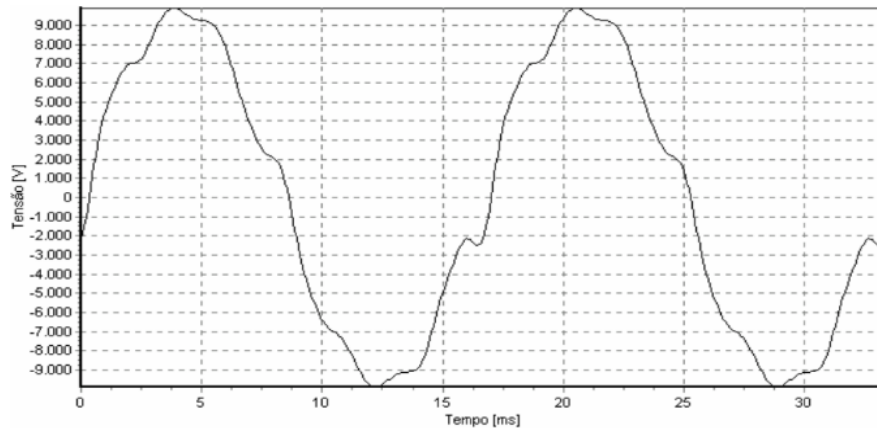
Segundo Creder (2016), as possíveis soluções a serem analisadas quando ocorrer o fenômeno da ressonância, com a presença de corrente harmônica na instalação, são:

- A remoção parcial ou integral do banco de capacitores para outro ponto do sistema elétrico;
- A conexão de um reator de dessintonia, em série, com o capacitor, a fim de que se reduza a frequência de ressonância do circuito para um valor inferior ao da corrente harmônica perturbadora.

### 4.3 Caso real de medição em um banco de capacitores

Um estudo prático realizado por Garcia (2001), mostra o resultado das medições realizadas em um banco de capacitores com perda de vida útil. Na figura 4.7 pode-se visualizar a forma de onda distorcida da tensão nos terminais do banco de capacitores com especificações de 15 MVar e 69 kV.

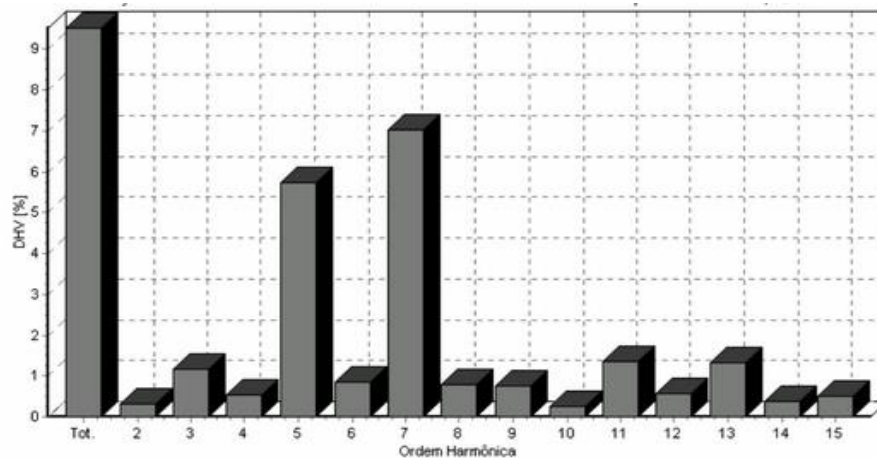
Figura 4.7 - Forma de onda da tensão do banco de capacitores.



Fonte: Garcia (2001).

Na figura 4.8, pode-se ver o espectro das harmônicas de tensão nos terminais do banco de capacitores.

Figura 4.8 – Valor de DHT e espectro das tensões do banco de capacitores.



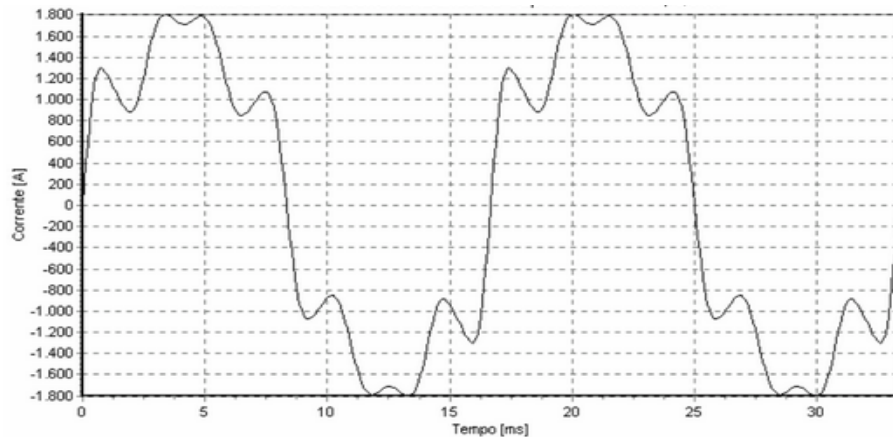
Fonte: Garcia (2001).

Pode-se observar que há uma significativa presença de harmônicos de 5º e 7º ordem, e uma distorção harmônica total de 9% aproximadamente.

Na figura 4.9 pode-se visualizar a forma de onda da corrente nos terminais do banco de capacitores.



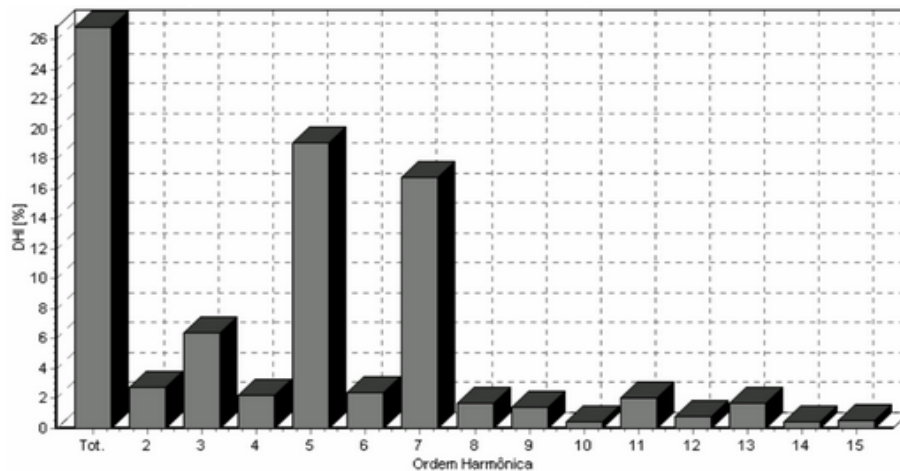
Figura 4.9 - Forma de onda da corrente do banco de capacitores.



Fonte: Garcia (2001).

Na figura 4.10, pode-se ver o espectro das harmônicas de corrente nos terminais do banco de capacitores.

Figura 4.10 - Valor de DHT e espectro das correntes do banco de capacitores.



Fonte: Garcia (2001).

Pode-se observar que há uma significativa presença de harmônicos de 5º e 7º ordem, com aproximadamente 18% e 16% de distorção, respectivamente.

A deformação da forma de onda da corrente e da tensão está diretamente relacionada com os harmônicos presentes na rede.

Logo, a partir da análise desse estudo, pode-se concluir que em casos de sistemas com uma presença significativa de harmônicos, não é recomendado o uso do banco de capacitores para corrigir o fator de potência. Outra solução para este caso, seria a utilização de filtros harmônicos ou o sobredimensionamento dos capacitores.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 Características da medição

Utilizou-se o analisador de QEE fabricado pela empresa Minipa, que permite medir a qualidade da energia e captar os eventos de tensão, corrente, potência com capacidade de registrar e armazenar dados por longos períodos. Importante ressaltar que o profissional responsável pela medição da qualidade da energia possua experiência no uso do equipamento, assim como no desempenho da função. A Figura 5.1 ilustra o design do analisador de QEE utilizado neste estudo.

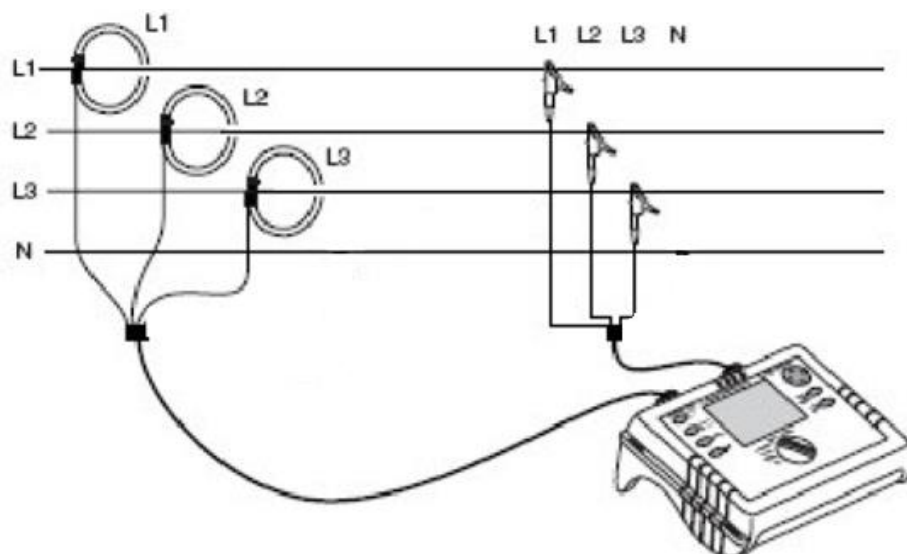
Figura 5.1 - Design analisador de QEE, Minipa et 5060c.



Fonte: MINIPA.

O diagrama de ligações da figura 5.2 aplica-se tanto à ligação em estrela como em triângulo. Como o banco de capacitores está instalado na conexão triângulo, na opção menu do analisador, mudou-se a topologia da rede de alimentação para triângulo. Sabendo que a medição para esta configuração é realizada de acordo com o circuito Aron (método de 2 wattímetros).

Figura 5.2 - Esquema de ligação do analisador de QEE em sistemas trifásicos.



Fonte: MINIPA.

O banco de capacitores (BC) instalado na indústria é utilizado para a correção do fator de potência e é automatizado por um controlador para atuar de acordo com a demanda das cargas, evitando assim desperdício de reativos. A potência em kVAr do banco é composta pelo seguinte arranjo de capacitores: 2x20, 2x15, 1x10 e 1x5. O BC é alimentado por uma tensão de 380V, na configuração triângulo (delta). Na figura 5.3 pode ser visto os capacitores utilizados para análise.

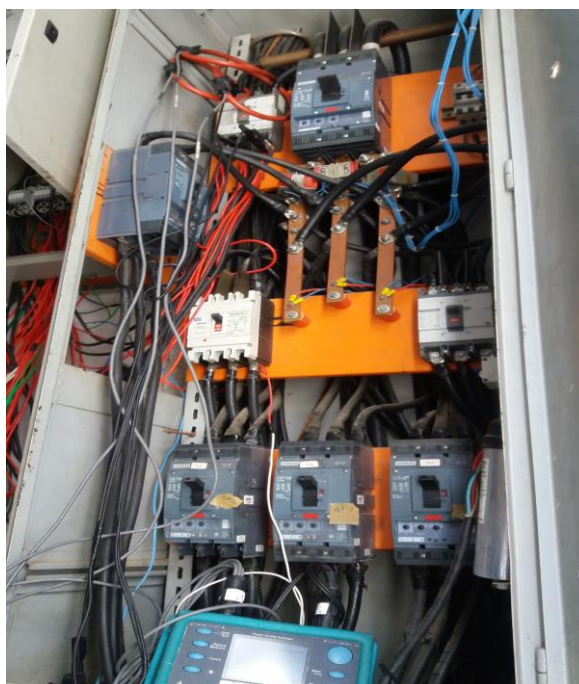
Figura 5.3 - Banco de capacitores analisado.



Fonte: Autor.

O analisador foi instalado no disjuntor de proteção do banco de capacitores, durante os dias 14 a 21 de maio de 2019. A subestação da indústria é composta por dois transformadores de 300 kVA ligados em paralelo e outro reserva de 150 kVA, que operam com tensões de 13,8 kV/380 V. O tempo das amostras foi configurado em 420 segundos, ou seja, a cada 7 minutos será registrado uma amostra dos valores. Na figura 5.4 é visto o analisador de QEE instalado no disjuntor de proteção do banco.

Figura 5.4 - Analisador instalado no disjuntor do banco de capacitores do QGBT.



Fonte: Autor.

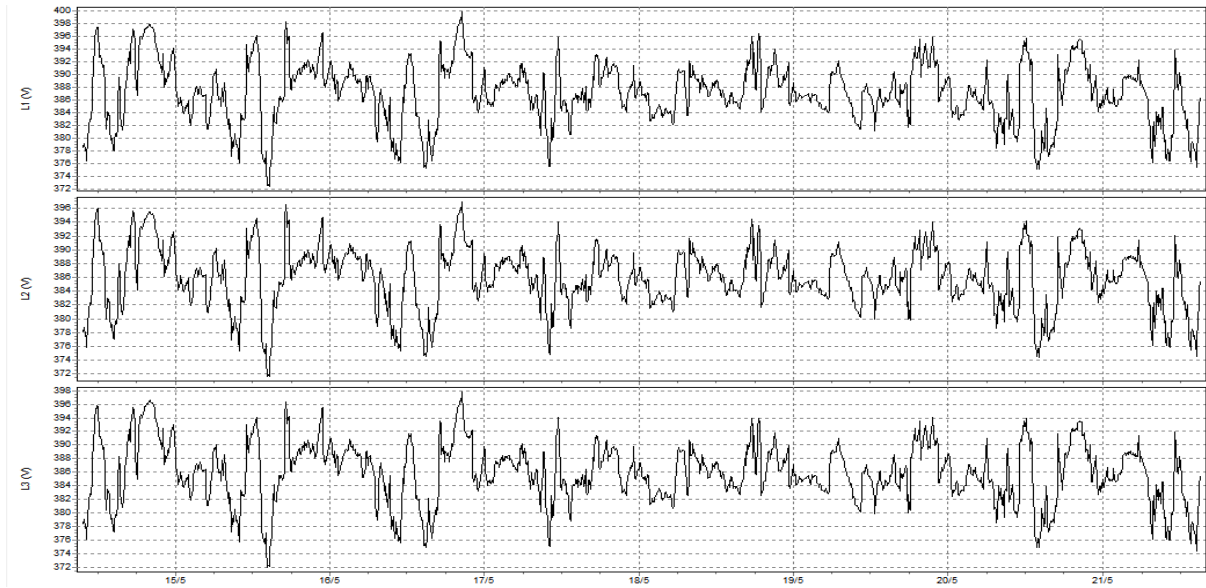
## 5.2 Resultados e discussões

Neste tópico se encontram os resultados obtidos a partir das medições feitas pelo analisador de QEE e analisadas pelo software PQLogview.

A figura 5.5 apresenta as tensões eficazes nas fases L1, L2 e L3 do banco de capacitor durante o período analisado. O comportamento das variações das tensões eficazes pode ser explicado devido à variação das cargas elétricas no decorrer dos horários de funcionamento.

A fase L1, teve uma maior variação de tensão, sendo o valor máximo de 399,8 V e o mínimo de 372,48 V.

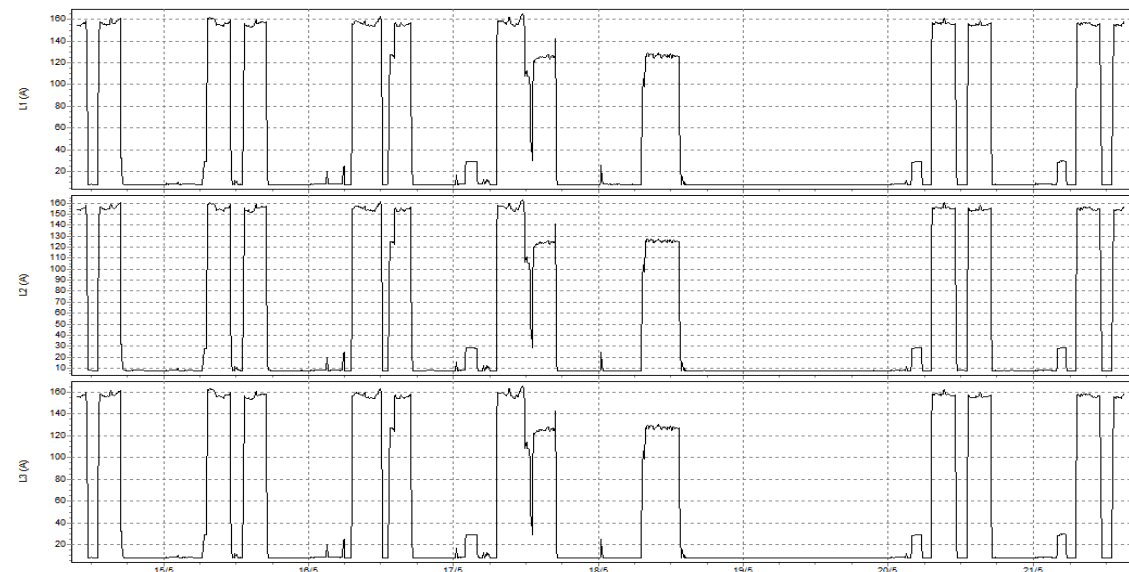
Figura 5.5 - Tensões eficazes das fases do banco de capacitores.



Fonte: Autor.

Na figura 5.6, é visto o comportamento das correntes eficazes nas fases do banco de capacitores. É possível observar que, em alguns períodos, há um aumento e um decréscimo no valor das correntes, o qual corresponde ao intervalo de tempo em que a indústria para ou diminui a produção, nesse instante ocorre a diminuição da potência de operação do banco de capacitores. Em função dos valores medidos da corrente eficaz, a fase L3 foi a que obteve uma maior variação, com valor máximo de 165,71A e o mínimo de 7,66A.

Figura 5.6 - Correntes eficazes das fases do banco de capacitores.

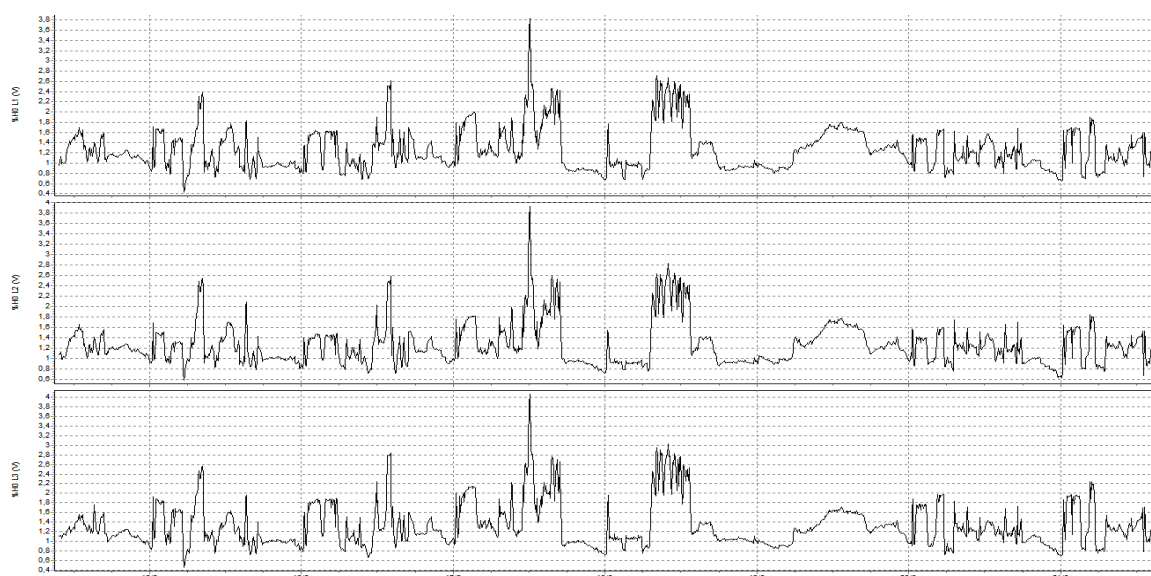


Fonte: Autor.

Na figura 5.7 é vista a DHT da tensão eficaz em cada fase. A partir da análise destas distorções, é possível observar que há um valor máximo na DHT da tensão na fase L3, com 4,1% , no dia 17/05 no horário de 12 horas, isso pode ser explicado devido a maior demanda de cargas que se comportam de maneira não-linear na indústria, que podem afetar o sistema e, conseqüentemente, o banco de capacitores. Vale ressaltar que valores muito altos de DHT podem comprometer a vida útil dos capacitores.

Apesar da distorção harmônica na tensão, esse valor da DHT não interfere na eficiência do banco, pois é inferior ao limite previsto pela norma atualizada IEEE std 18-2012, que suporta até 45,8%.

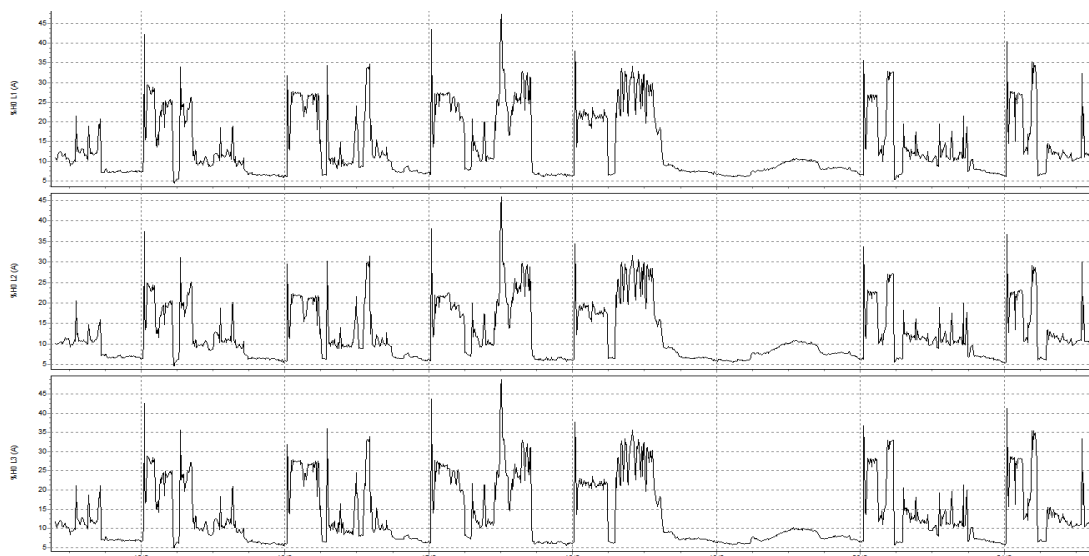
Figura 5.7 - DHT das tensões em cada fase do banco de capacitores.



Fonte: Autor.

A figura 5.8 mostra a DHT da corrente, e pode ser observado que assim como na figura 5.7, há um valor máximo na DHT da corrente do dia 17/05 no mesmo horário de 12 horas, chegando a 48,7% na fase L3.

Figura 5.8 - DHT das correntes em cada fase do banco de capacitores.



Fonte: Autor.

De acordo com os dados obtidos na opção *tabla* do PQLogView, foi montada a tabela 5.1. Nesta tabela estão contidos os valores e informações correspondentes aos valores máximos obtidos de corrente, tensão e distorção harmônica total.

Tabela 5.1 - Valores medidos no BC e seus correspondentes.

Data	Horário	Fase	$V_{rms}$ (V)	$I_{rms}$ (A)	$DHT_v$ (%)	$DHT_i$ (%)
17/05/2019	11:22	L3	392,67	165,71	2,6	25
16/05/2019	20:33	L1	399,8	8,059	1,4	8,8
17/05/2019	12:04	L3	384,88	113,85	4,1	48,7

Fonte: Autor.

A partir dos valores obtidos na tabela 5.1, pode-se perceber que as distorções harmônicas totais de corrente e tensão não influenciam muito nos valores eficazes. Tomando como exemplo o dia 16/05, onde obtive o maior valor da tensão eficaz, a  $DHT_v$  é de apenas 1,4%. Já no dia 17/05, às 12:04 horas, ocorreu o maior valor de  $DHT_i$ , porém não houve o maior valor eficaz de corrente.

Tendo como base os valores máximos da tabela 5.1 e sabendo que a norma IEEE std 18-2012 limita os parâmetros dos valores de tensão e corrente eficazes de até 110% e 135% do valor nominal, respectivamente, tem-se que:

Tensão nominal do banco de capacitores,  $V_n = 380V$ ;

Limite da tensão eficaz de acordo com a norma,  $V_{rms} < 418V$ ;

Tensão eficaz máxima medida,  $V_{máx} = 399,8V$ ;

Logo,  $V_{máx} < V_{rms}$ .

Corrente nominal do banco de capacitores,  $I_n = 129,3 A$ ;

Limite da corrente eficaz de acordo com a norma,  $I_{rms} = 174,55 A$ ;

Corrente eficaz máxima medida,  $I_{máx} = 165,71 A$ ;

Logo,  $I_{máx} < I_{rms}$ .

Deste modo, os valores máximos medidos de tensão e corrente eficazes estão dentro dos parâmetros da norma internacional.

Na tabela 5.2, tem-se os valores máximos de DHT da tensão e da corrente medidos, e comparados com os valores limites de acordo com a norma IEEE std 18-2012.

Tabela 5.2 - Limites de DHT do banco de capacitores.

<b>Dados</b>	<b>Valores medidos (%)</b>	<b>Limites de acordo com a norma (%)</b>	<b>O limite foi excedido?</b>
DHT <sub>v</sub>	4,10	45,80	NÃO
DHT <sub>i</sub>	47,8	90,69	NÃO

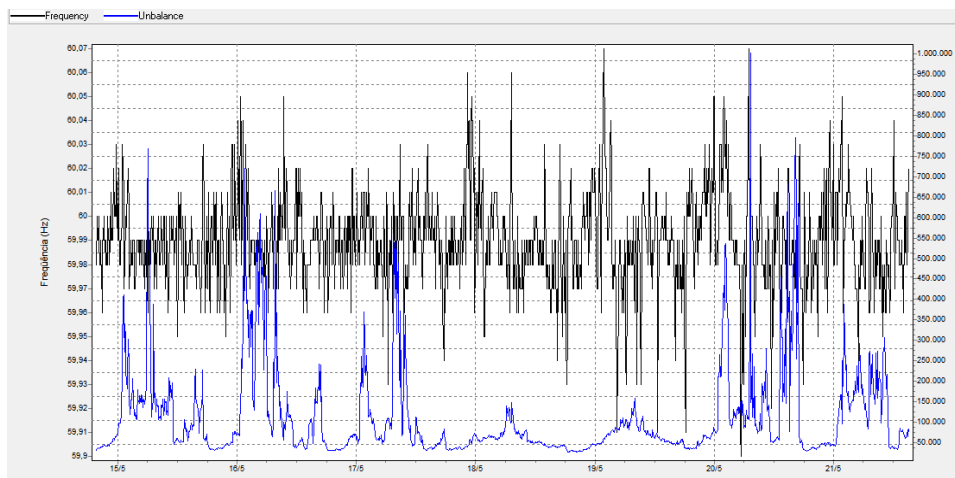
Fonte: Autor.

O gráfico referente à variação da frequência pode ser visto na figura 5.9, onde pode ser observado que ela pouco varia, com aproximadamente 0,28%, sendo a máxima com um valor próximo de 60,07 Hz e a mínima de 59,9 Hz.

Dessa forma pode-se concluir que a variação da frequência está dentro dos limites da norma brasileira, a PRODIST - Módulo 8, que está situada entre 59,9 Hz e 60,1 Hz nas condições normais de operação e em regime permanente. O desbalanceamento da tensão na ligação triângulo, é desconsiderado.



Figura 5.9- Forma de onda da frequência do banco de capacitores.



Fonte: Autor.

O gráfico do fator de potência foi analisado pela telemedição da ENEL, pois não foi possível a medição pelo analisador de QEE, devido a ligação triângulo do mesmo, que utiliza o circuito Aron para o cálculo. O FP não possui significado físico no circuito Aron. Na figura 5.10 é visto o gráfico do fator de potência referente ao mês de maio, de acordo com a telemedição da Enel. É possível observar que o FP está de acordo com os valores estabelecidos pela Enel, que é de no mínimo 0,92 indutivo ou capacitivo, logo pode-se afirmar que o banco de capacitor está correspondendo à tarefa de corrigir o FP. Se o FP não tivesse dentro dos limites da ENEL, os capacitores deveriam ser novamente dimensionados para atuar na correção do FP.

Figura 5.10 - Gráfico do fator de potência mensal.



Fonte: ENEL.

## 6 CONCLUSÃO

A partir do estudo teórico sobre a qualidade da energia, envolvendo os distúrbios elétricos no sistema de potência, é necessário colocar em prática a utilização das normas e os limites das distorções harmônicas, segundo o módulo oito da PRODIST.

Apesar de não ter sido apresentado situações de ressonância no banco de capacitores da indústria analisada, levando em consideração que a indústria aumente a quantidade de cargas que apresentam a não-linearidade da corrente em relação à tensão, pode haver neste caso, um aumento dos componentes harmônicos, aumentando assim as perdas e diminuindo a vida útil do mesmo. Também nesta situação pode ocorrer a ressonância, resultando em uma possível explosão do banco.

Neste estudo de caso, foram analisadas as tensões e as correntes eficazes das três fases do circuito, sendo o valor máximo de tensão eficaz de 399,8 V e o valor máximo de corrente eficaz de 165,71 A. Os valores de tensão e corrente eficazes máximos não ultrapassaram os parâmetros da norma internacional IEEE std 18-2012, podendo assim o banco de capacitores em análise suportar valores eficazes com tensão de até 418 V e corrente de até 174,55 A. Deste modo, pode-se concluir que os capacitores possuem maior vida útil operando nestas condições.

Com a avaliação da distorção harmônica total da tensão e da corrente, a fase L3 foi a que teve maior distorção total de tensão e corrente, no período de avaliação do dia 17/05, no horário aproximado de 12 horas. De acordo com os valores da tabela 6.2, tem-se que as distorções harmônicas de tensão e corrente não excederam os valores limites propostos pela norma, sendo assim, as DHT de tensão e corrente não interferiram na operação do banco de capacitores.

Também pode ser observado a eficiência do banco de capacitores em relação ao fator de potência, que esteve dentro do valor estipulado pela Enel.

Como não foi possível a medição da potência reativa através do medidor de QEE, pode-se afirmar que através do fator de potência analisado ( $\text{fp} > 0,92$ ), não há reativos excedentes na rede. Então, pode-se dizer que a potência reativa de operação do banco de capacitores está dentro do limite previsto pela norma IEEE std 18-2012, que está estipulada em um valor inferior a 135% do seu valor nominal.

A variação da frequência analisada no período de amostragem também esteve dentro dos limites previstos pela PRODIST, com um valor máximo de 60,07 Hz e mínimo de 59,9 Hz.

Em situações onde há harmônicos no sistema, uma solução para que a vida útil do capacitor não seja afetada, consiste no sobredimensionamento do banco de capacitores, ou seja,

o aumento da tensão e da potência nominal do banco, o que aumenta suportabilidade do mesmo a estes efeitos, fazendo com que os capacitores operem nas condições reais existentes como condições nominais.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Para o prosseguimento do trabalho feito, considerando um crescimento das cargas da indústria analisada, é recomendado fazer:

- Uma nova medição dos valores de distorções harmônicas totais (DHTv e DHi), e das tensões e correntes eficazes no banco de capacitores, assim como a medição das distorções harmônicas individuais (DHI), para que seja analisado o espectro harmônico. Também seria analisado se os novos valores medidos de tensão e corrente do banco de capacitores estariam de acordo com a norma internacional IEEE std 18-2012.

Para trabalhos futuros, considerando outra indústria que tenha uma maior demanda de cargas não-lineares, é sugerido realizar:

- Medições em indústrias siderúrgicas, as quais possuem uma maior demanda de cargas geradoras de harmônicos, como por exemplo os fornos a arco e as máquinas de solda. Neste caso, as medições seriam feitas no barramento de baixa tensão da subestação, no PAC, com o auxílio de um analisador de qualidade de energia. Com isso, seria possível, a partir dos resultados obtidos, analisar se os valores de distorções harmônicas estão de acordo com os limites da PRODIST, encontrados no módulo oito. Também poderia ser analisado com o estudo e as devidas medições, se neste caso, é viável a utilização de um banco de capacitores para correção do fator de potência, ou então apresentar outras soluções, como a utilização de filtros harmônicos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALTAZAR, A. C. S. **Qualidade da Energia no Contexto da Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8**. Qualidade da energia elétrica, aprovado pela Resolução Normativa 728/2016.

BRAZ, L. L. **Análise Harmônica de Redes Elétricas Utilizando o Software Pcflo**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

CHAPMAN, David. Harmônicas - Causas e Efeitos. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**, Julho 2002b.

PROCOBRE, P. -I. B. D. **Harmônicas nas Instalações Elétricas**. 1º Edição. ed. São Paulo: [s.n.], 2001.

CORRÊA, F. I. M. **Estudo de um Sistema de Distribuição com Enfoque na Qualidade da Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007.

**Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais**, 2013. Disponível em: <[https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/capitulo\\_4\\_2013-1s\\_2.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/capitulo_4_2013-1s_2.pdf)>. Acesso em 21 de abril, 2019.

CREDER, H.; COSTA, L. S. **Instalações Elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, W. H. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. McGraw-Hill, 2002.

EBERHARD, A. **Power Quality**. 5. ed. Copyright, 2011.

GARCIA, F. R. **Cálculo da perda de vida útil de capacitores em função da distorção harmônica existente nas redes de distribuição de energia elétrica**. Inepar S/A Indústria e Construção, 2001.

Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard 18 - 2012, **IEEE Standard for Shunt Power Capacitors**, Nova Iorque: IEEE, 2012.

LEÃO, R. P. S. **Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. Universidade Federal do Ceará, 2010.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MINIPA. **Manual de instruções**. Power Quality Analyzer. Minipa Indústria e Comércio Ltda, 2009.

NAVES, A. C. . G. F. R. Efeitos Harmônicos da Aplicação de Bancos de Capacitores em Indústrias Eletrointensivas sobre a Rede Elétrica de Alta Tensão – Casos. **VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE**, Belém, 2005.

RODRIGUES, J. E. **Interferência de Harmônicas em equipamentos de Medição de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2009.

ROLIM, M. E. **Análise da Qualidade de Energia Elétrica: Distorções Harmônicas em uma Planta Industrial** – Estudo de Caso em uma Indústria de Biodiesel. Trabalho de conclusão de curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015.

SANKARAN, C. **Power Quality**. CRC Press, 2002.

SCHNEIDER. **Qualidade de Energia** – Harmônicas, 2003.

SOARES, Í. S. C. **Análise das Distorções Harmônicas em uma Subestação de Média**

**Tensão.** Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Vale do São Francisco, Juazeiro, BA, 2015.

**PIRES, I. A. Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletroeletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica.** Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.