

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
FELIPE MACHADO DIAS

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS DISTÚRBIOS QUE INFLUENCIAM  
NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

LAGES  
2019

FELIPE MACHADO DIAS

**REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS DISTÚRBIOS QUE INFLUENCIAM  
NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro  
Universitário UNIFACVEST como parte dos requisitos  
para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.

Orientadora: Dra. Prof. Franciéli Lima de Sá

Co-orientador: Msc. Prof. Silvio Moraes de Oliveira

LAGES

2019

Monografia apresentada ao Centro Universitário Facvest – UNIFACVEST, como requisito necessário para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Felipe Machado Dias

NOME DO ALUNO

Revisão Bibliográfica dos Distúrbios  
que Influenciam na Qualidade de Energia  
Elétrica

TÍTULO DO TRABALHO

BANCA EXAMINADORA:

Dra. Prof.<sup>a</sup> Francieli Lima de Sá

Titulação e nome do Orientador (a)

Msc. Prof. Silvio Moraes de Oliveira

Titulação e nome do Co-orientador (a).

Dra. Prof.<sup>a</sup> Maria Benta Cassiani Rodrigues.

Titulação e nome do Avaliador (a).

Prof.<sup>a</sup> Francieli Lima de Sá

Coordenador (a) Prof. (a). Titulação e nome da Coordenador (a).

Lages, 12 de dezembro de 2019.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor,  
mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou  
o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o  
que era antes”.*

*(Martin Luther King)*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças e saúde para chegar até aqui.

A minha mãe Simone Aparecida Machado Dias, ao meu pai Vanderlei de Oliveira Dias e ao meu Irmão Renan Machado Dias pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Sem vocês nada disso seria possível.

A minha orientadora e coordenadora Prof.<sup>a</sup> Dra. Franciéli Lima de Sá, pelo acompanhamento, pela amizade e por todos os ensinamentos transmitidos durante o curso.

Aos professores, que com muita paciência e dedicação, ensinaram-me não somente o conteúdo programado, mas também o sentido da amizade e do respeito.

Aos meus colegas que fiz durante a graduação, em especial ao Cezar, Karine e Laíse. Sem a amizade de vocês essa jornada teria sido muito mais difícil.

Aos meus amigos do grupo vira-latas: Aylma, Camilla, Ellen, Floriano, Georgia, Janaína, Lucas, Mylena e Taysa.

Aos meus familiares que me auxiliaram perante minhas dificuldades.

E a todas as pessoas que de alguma forma me ajudaram a acreditar em mim e a chegar até aqui, quero deixar um agradecimento eterno, porque sem elas nada teria sido possível.

# **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS DISTÚRBIOS QUE INFLUENCIAM NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Felipe Machado Dias

Franciéli Lima de Sá

## **RESUMO**

O conceito de qualidade de energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema de distribuição de energia da concessionária. No passado, os problemas causados pela má qualidade no fornecimento de energia não eram tão expressivos, visto que, os equipamentos existentes eram pouco sensíveis aos efeitos dos fenômenos ocorridos e não se tinham instalados, em grandes quantidades, dispositivos que causavam a perda da qualidade de energia. Com o desenvolvimento da tecnologia, principalmente da eletrônica de potência, os consumidores e concessionárias têm-se preocupado muito com a qualidade de energia. Pensando nisso, este trabalho aborda os principais causadores de perturbações nas redes elétricas, e assim identificá-los e corrigi-las.

Palavras Chave: Qualidade de energia; Redes Elétricas;

# **BIBLIOGRAPHIC REVIEW OF DISTURBES THAT INFLUENCE THE QUALITY OF ELECTRICITY**

Felipe Machado Dias

Franciéli Lima de Sá

## **ABSTRACT**

The concept of energy quality is related to a set of changes that can occur in the electrical system. Such changes may occur in various parts of the power system, either at the consumer's premises or at the utility's upper system. In the past, the problems caused by the poor quality of the energy supply were not so significant, since the existing equipment was not very sensitive to the effects of the phenomena that had occurred and had not been installed in large quantities devices that caused the loss of quality. energy. With the development of technology, especially power electronics, consumers and dealerships have been very concerned about power quality. Thinking about this, this paper addresses the main causes of disturbances in the electrical grids, this identify and correct them.

Keywords: Energy quality; Electric Networks;

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Decomposição em correntes harmônicas.....	27
Figura 2 - Forma de onda com Harmônicas.....	27
Figura 3 - Interrupção de tensão de curta duração.....	35
Figura 4 - Afundamento de tensão.....	37
Figura 5 - Elevação de tensão.....	38
Figura 6 - Esquema básico de UPS a bateria.....	40
Figura 7 - Amplitude das faixas de tensão.....	42
Figura 8 - Regulador de tensão monofásico automático.....	47
Figura 9 - Flutuação de tensão.....	49
Figura 10 - Compensador dinâmico baseado em máquina síncrona.....	51
Figura 11 - Compensador estático dinâmico.....	52
Figura 12 - Gráficos de tensões com e sem compensador estático dinâmico.....	53
Figura 13 - Sistema equilibrado.....	54
Figura 14 - Sistema desequilibrado.....	55
Figura 15 - Relação entre os graus de desequilíbrio de tensão e de corrente.....	58
Figura 16 - Relação entre a vida útil e o desequilíbrio de tensão.....	58
Figura 17 - Triângulo de potência.....	60
Figura 18 - Representação da correção de fator de potência.....	62
Figura 19 - Mapa do sistema interligado nacional.....	68
Figura 20 - Analisador de qualidade EMBRASUL - RE 8000.....	75
Figura 21 - Analisador de qualidade MINIPA ET-5062.....	77
Figura 22 - Analisador de qualidade FLUKE 435 - Série II.....	79
Figura 23 - Diagrama UPS on-line.....	81
Figura 24 - Diagrama de stand-by.....	82
Figura 25 - Funcionamento filtro ativo.....	84



## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Distúrbios elétricos na categoria de eventos.....	19
Quadro 2 - Distúrbios elétricos sustentados.....	20
Quadro 3 - Distorção harmônica individual de tensão [%].....	29
Quadro 4 - Distorção harmônica total de tensão.....	30
Quadro 5 - Conseqüências da presença de harmônica.....	31
Quadro 6 - Classificação das variações de tensão de curtas duração.....	36
Quadro 7 - Faixas admissíveis para tensões 230/127 V e 230/115 V.....	43
Quadro 8 - Relação fator de potência x ângulo x acréscimo conta energia.....	62
Quadro 9 - Faixas de frequência e tempo máximo exposição.....	64
Quadro 10 - Comparação dos analisadores de energia Embrasul, Minipa e Fluke.....	79

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	14
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	14
1.3 JUSTIFICATIVA .....	14
1.4 APLICAÇÕES .....	15
1.5 METODOLOGIA .....	15
<b>2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .....</b>	<b>16</b>
2.1 HISTÓRICO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	16
2.2 O QUE É A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .....	18
2.3 A IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .....	22
2.4 PROBLEMAS TÍPICOS DE QUALIDADE DE ENERGIA.....	23
<b>3 HARMÔNICAS.....</b>	<b>25</b>
3.1 DEFINIÇÃO .....	25
3.2 INDICADORES DE QUALIDADE HARMÔNICA.....	28
3.2.1 Distorção harmônica individual.....	28
3.2.2 Distorção harmônica total.....	29
3.3 CARGAS QUE PRODUZEM HARMÔNICOS .....	30
3.4 SOLUÇÕES PARA HARMÔNICAS .....	32
<b>4 VARIAÇÕES DE TENSÃO .....</b>	<b>34</b>
4.2 INTERRUPÇÕES .....	34
4.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO .....	35
4.3 EFEITOS DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO SOBRE EQUIPAMENTOS .....	39
4.4 SOLUÇÕES PARA AS VARIAÇÕES DE TENSÃO.....	40
<b>5 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE .....</b>	<b>41</b>
5.1 DEFINIÇÃO DE INDICADORES PARA A TENSÃO EM REGIME PERMANENTE .....	41

5.2	MÉTODOS PARA A REGULAÇÃO DA TENSÃO .....	46
<b>6</b>	<b>FLUTUAÇÃO DE TENSÃO.....</b>	<b>49</b>
6.1	DEFINIÇÃO .....	49
6.2	SOLUÇÕES PARA ATENUAR A FLUTUAÇÃO DE TENSÃO.....	51
<b>7</b>	<b>DESQUILÍBRIO DE TENSÃO .....</b>	<b>54</b>
7.1	DEFINIÇÃO .....	54
7.2	CAUSAS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO .....	56
7.3	CONSEQUÊNCIAS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO .....	57
<b>8</b>	<b>FATOR DE POTÊNCIA .....</b>	<b>60</b>
<b>9</b>	<b>VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA.....</b>	<b>64</b>
<b>10</b>	<b>QUALIDADE DA ENERGIA POR SEGMENTO.....</b>	<b>66</b>
10.1	GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO.....	66
10.1.1	Geração de Energia Elétrica .....	67
10.1.2	Transmissão de Energia Elétrica .....	67
10.1.3	Distribuição de Energia Elétrica.....	69
10.2	SEGMENTO INDUSTRIAL .....	69
10.3	SEGMENTO COMERCIAL .....	70
10.4	SEGMENTO RESIDENCIAL.....	71
10.5	INSTALAÇÕES ELÉTRICAS ESPECIAIS .....	72
<b>11</b>	<b>CUIDADOS COM A QUALIDADE DE ENERGIA .....</b>	<b>73</b>
11.1	SEGURANÇA DA QUALIDADE DE ENERGIA .....	73
11.2	COMO MEDIR E IDENTIFICAR OS PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA.....	74
11.3	MEDIDORES DE QUALIDADE DE ENERGIA DISPONÍVEIS NO MERCADO..	75
11.3.1	Analisador de qualidade EMBRASUL - RE8000.....	75
11.3.2	Analisador de qualidade MINIPA ET-5062.....	77
11.3.3	Analisador de qualidade de energia FLUKE 435 - série II .....	78
11.3.4	Comparativo entre os analisadores de qualidade.....	79
<b>12</b>	<b>SOLUÇÕES PARA A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....</b>	<b>81</b>

12.1	UPS.....	81
12.1.1	UPS On-line.....	81
12.1.2	UPS off-line ou stand-by .....	82
12.2	REGULADORES DE TENSÃO .....	83
12.3	CONDICIONADOR DE ENERGIA .....	83
12.4	FILTROS.....	83
12.4.1	Filtro passivo .....	83
12.4.2	Filtro ativo .....	84
12.5	COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS .....	85
<b>13</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A prestação do serviço de fornecimento de energia é hoje um dos serviços mais desafiantes da sociedade moderna. Para que um consumidor desfrute da energia no momento que aciona um interruptor ou conecta um aparelho na tomada, é preciso de um vasto aparato que é composto por centrais geradoras, linhas de transmissão, subestações, linhas e transformadores de distribuição estejam aptos a operar de uma forma coordenada.

Como não há formas de armazenar a demanda produzida de energia elétrica, é preciso sincronizar a produção de energia com o consumo em tempo real. Com isso, a operação de sistemas elétricos precisa ajustar-se continuamente as oscilações no consumo de energia a fim de evitar desequilíbrios que, em alguns casos, podem levar todo o sistema ao colapso com graves consequências para os consumidores de energia elétrica.

O Setor Elétrico Brasileiro (SEB) atende a mais de 80 milhões de unidades consumidoras, dos mais diversos tipos e perfis, através de 98 concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2017). Por ser um serviço essencial e fundamental na sociedade, é importante a contínua averiguação e o controle de parâmetros técnicos da imensa e complexa rede de geração, transmissão e distribuição, que cobre a dimensão territorial do Brasil (CASTRO et al., 2017).

A qualidade do fornecimento de energia é, portanto, uma preocupação no planejamento e operação do setor elétrico. Para assegurar a qualidade há dois grandes desafios a serem encarados. Um deles é assegurar a confiabilidade de um sistema no qual a responsabilidade pelo fornecimento é compartilhada por tantas empresas diferentes e o outro é discernir o nível de qualidade almejado pelos consumidores que seja compatível com as receitas tarifárias requeridas para prover o serviço.

Um sistema elétrico com alto grau de qualidade requer níveis bastante elevados de investimento e manutenção, o que resulta em tarifas mais elevadas. Um sistema com poucos investimentos tende a ter uma menor qualidade, como, por exemplo, mais interrupções no fornecimento de energia, porém com tarifas menores.

A qualidade de energia possui várias definições para descrever o mesmo conjunto de fenômenos que afetam a amplitude e a forma de onda da tensão e da corrente. A primeira definição é que a frequência e severidade dos desvios na amplitude e forma de onda da tensão e da corrente. Já outra definição diz que é qualquer problema na tensão, na corrente, ou no desvio da frequência que resulte em uma falha ou prejudique a operação de um equipamento.

A terceira definição diz que um sistema elétrico com excelente qualidade de energia elétrica é caracterizado pelo fornecimento de energia e tensão com forma de onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência, como se emanasse de uma fonte de potência infinita.

Serão abordados neste trabalho os principais agentes que causam a interferência na qualidade de energia elétrica, como estes são classificados e os efeitos causados pelos mesmos na rede. Também serão analisados alguns equipamentos que pode avaliar e corrigir as falhas em uma rede.

A metodologia utilizada será uma pesquisa de cunho qualitativo, baseado na revisão bibliográfica envolvendo a qualidade de energia.

## 1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é analisar os parâmetros para uma elevada qualidade da energia e seus efeitos caso não estejam dentro do esperado pelas normas em instalações de baixa, média e alta tensão.

## 1.2 Objetivo específico

São objetivos específicos deste trabalho:

- Definir a expressão qualidade de energia elétrica e apresentar os principais fenômenos que a afetam;
- Apresentar a importância do monitoramento da qualidade da energia no sistema elétrico. Mostrar como vem sendo tratado este termo em nível de normatização nacional;
- Apresentar alguns tipos de instrumentos de monitoramento de qualidade de energia elétrica;

## 1.3 Justificativa

A energia elétrica está incluída na nossa rotina diária, sendo utilizada para iluminação, produção de trabalho mecânico (eletrodomésticos, elevadores, transporte público), telecomunicação (televisão, telefonia e internet), entre muitos outros fins. Fica muito difícil imaginar como seria uma vida moderna sem o uso da energia elétrica.

À medida que os benefícios da energia elétrica passam a fazer parte do dia-a-dia das pessoas, é natural que se inicie uma discussão quanto a qualidade dessa energia fornecida. Em uma análise inicial preocupa-se com a continuidade do serviço, já que qualquer interrupção do fornecimento implicará em transtornos. Mesmo falhas momentâneas, de poucos minutos podem provocar elevados prejuízos, sendo muito mais severas quando ocorrem de forma inesperada do que quando são previamente programadas e comunicadas.

A qualidade no fornecimento de energia elétrica é, portanto, uma preocupação central no planejamento e operação do setor elétrico.

## 1.4 Aplicações

O estudo pode ser aplicado para solucionar problemas em instalações elétricas residenciais, comerciais e industriais, de baixa, média ou alta tensão.

## 1.5 Metodologia

A metodologia utilizada será uma pesquisa de cunho qualitativo, que consiste na revisão bibliográfica sobre a qualidade de energia. As perturbações e alguns modelos de analisadores de qualidade de energia também serão apresentados no trabalho de forma comparativa.

Nos primeiros capítulos serão abordados a definição de qualidade de energia, a sua importância, conceitos e problemas típicos de qualidade de energia.

Na sequência será realizada a revisão bibliográfica com o contexto do trabalho, definindo os parâmetros que podem influenciar na qualidade da energia elétrica.

Por fim teremos as conclusões obtidas com a realização do trabalho através da análise da revisão bibliográfica para a elaboração do mesmo.

## 2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

### 2.1 Histórico da qualidade de energia elétrica no Brasil

De acordo com Bernardo (2013) antes da década de 70, não eram comuns exigências e um controle sobre a qualidade do fornecimento de energia elétrica que ocasionasse na aplicação de uma regulamentação. Até essa época, as concessionárias utilizavam apenas dados históricos que serviam como base para auxiliar nas projeções de melhoria da qualidade, nas medidas de interrupções e na quantidade de horas sem fornecimento de energia. Não existia um instrumento legal e unificado para o controle e por isso muitos indicadores não eram nem acompanhados pelas distribuidoras em algumas regiões do Brasil.

Durante a década de 70 o Brasil passou por um período de desenvolvimento econômico interno. Este período resultou na necessidade de implantar diversas melhorias, entre elas, um melhor controle na qualidade do fornecimento de energia elétrica. Com isso foram criadas as primeiras regulamentações das condições e da qualidade do serviço de energia elétrica.

Segundo Hassin (2013) no ano de 1978 o extinto DNAEE editou a portaria nº 046 para regulamentar as condições técnicas e a qualidade do serviço de energia elétrica, considerando imprescindível à conceituação de serviço adequado de energia elétrica, o estabelecimento de indicadores de continuidade do fornecimento de energia a serem observados pelas concessionárias. Foi aí que então surgiram os índices relativos a continuidade de energia elétrica, que foram denominados DEC (Duração Equivalente de interrupção por unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de interrupção por unidade Consumidora).

Essa portaria determinava que os indicadores DEC e FEC deveriam ser apurados para cada conjunto de unidades consumidoras, sendo considerados apenas as interrupções do fornecimento de energia elétrica com uma duração maior do que 3 minutos, ocorridas em qualquer parte do sistema elétrico e independente da sua natureza.

Os valores das metas anuais de DEC e FEC foram estipuladas de acordo com o padrão de rede, seja ele isolado ou conectado ao SIN – Sistema Interligado Nacional. Além das metas anuais, também foram definidos limites trimestrais, sendo estes 40% das metas anuais. No entanto, esses valores se mostraram inadequados, porque não consideravam as



características de cada região atendida, de forma que conjuntos com características distintas poderiam ter a mesma meta de continuidade.

Conforme Bernardo (2013), a década de 90 ficou marcada pelo avanço do neoliberalismo e dos processos de privatização de dos serviços públicos no Brasil. A grande parte dos serviços prestados pelo governo estava com uma qualidade muito baixa e a desconfiança da população estava cada vez mais alta. Com isso muitas estatais acabaram sendo vendidas para a iniciativa privada. Essas privatizações permitiram que os órgãos reguladores e fiscalizadores começassem a aplicar novas formas de regulação para a otimização dos sistemas, melhorar o atendimento a sociedade e uma padronização, tudo isso procurando uma maior qualidade dos serviços prestados.

Influenciado por estas privatizações, no ano de 1992 segundo Hassin (2003) “com o impulso dado pelo programa brasileiro de qualidade e produtividade, o DNAEE iniciou um estudo com o objetivo de realizar um levantamento sobre a qualidade de energia elétrica”. Com o auxílio da portaria DNAEE nº 293/92, foi instituído um grupo de trabalho que tinha como objetivo efetuar uma revisão sobre os indicadores DEC e FEC. Com a conclusão deste estudo, constatou-se que apenas estes indicadores não seriam suficientes para tratar melhor a questão da qualidade de energia elétrica.

Para complementar essa falha, foi emitida uma nova portaria, a 163/93, onde foi criado um grupo de trabalho com o propósito de ampliar o escopo dos indicadores utilizados até aquele momento afim de que conseguissem refletir melhor as expectativas quanto a qualidade do serviço de fornecimento de energia elétrica. De acordo com Hassin (2003), foram pesquisados novos atributos de qualidade e foram instituídos quatro novos atributos que deveriam ser considerados: disponibilidade, conformidade, restaurabilidade e flexibilidade.

Este grupo de trabalho visou somente os fenômenos de longa duração que influenciam a qualidade do fornecimento aos consumidores, que são: sobretensão, subtensão, desequilíbrio de tensão e interrupção do fornecimento. Distorções harmônicas, cintilação (flicker), desequilíbrio de tensão, nível de interferência de comunicação e ruído não foram objetos de estudo.

Com a intenção de preencher as ausências e tomar ações para melhorar o controle de qualidade de forma imediata, a ANEEL, sucessora legal do DNAEE, aproveitou o momento da alta das privatizações e iniciou um maior controle dos padrões mínimos de qualidade técnica e de atendimento através de contratos de concessões feitos para cada concessionária privatizada. Estes contratos previam apenas a manutenção da qualidade frente a regulação

vigente, no entanto, posteriormente foram incorporados novos indicadores, planos de melhorias e rotinas de aplicação de penalizações (HASSIN, 2003).

Já no ano de 2000, através da resolução normativa nº 024, a ANEEL utilizou para definir os limites dos indicadores de continuidade, a análise comparativa de desempenho. Neste método, primeiramente são formados agrupamentos de conjuntos com características físicas e técnicas semelhantes entre si, e em seguida, em cada agrupamento são definidos as metas para os indicadores DEC e FEC, comuns aos conjuntos classificados no agrupamento. O que implicou na comparação de desempenho de cerca de 6.000 conjuntos que eram existentes naquele momento, das mais de 60 concessionárias de distribuição de energia elétrica.

Em 2008 a ANEEL através da resolução nº 345/2008 elaborou o PRODIST – Procedimentos de Distribuição, que em seu módulo 8 trata da qualidade de energia elétrica. Este módulo define a metodologia e caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos as variações de tensão de longa duração e as perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos para fixar padrões correspondentes. Referente a qualidade do serviço, o módulo 8 estabelece para a apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

Os aspectos a serem considerados com o módulo 8 do PRODIST são todos relativos a tensão: Tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e variação de tensão de curta duração.

Desde a sua elaboração, o módulo 8 já passou por 10 revisões, sendo que a última está em vigência desde o dia 01/01/2018.

## 2.2 O que é a qualidade de energia elétrica

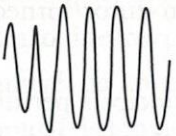
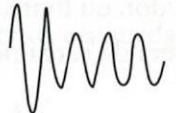
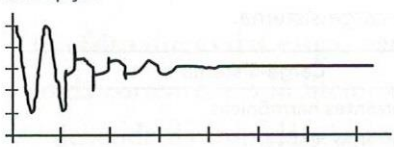

Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014) qualidade de energia elétrica “é a condição do sinal elétrico de tensão e corrente que permite que equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e de vida útil”. A expressão é usada para descrever a energia elétrica que aciona uma carga elétrica, fazendo-a operar corretamente. Com uma alimentação inadequada e com certo padrão de qualidade, a carga pode operar inadequada ou incorretamente, falhar prematuramente ou simplesmente não funcionar.

O perfil que é usado como padrão de qualidade apresenta uma forma de onda alternada senoidal, com uma frequência fixa e uma amplitude que varia de acordo com a modalidade de atendimento, baixa, média ou alta-tensão. Em cada modalidade, o valor eficaz da tensão deve se manter dentro de faixas estipuladas; e a corrente, deve conservar a forma de onda da tensão, com um deslocamento angular mantido dentro de faixas padronizadas (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

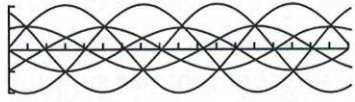
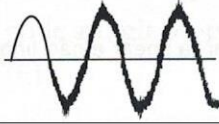

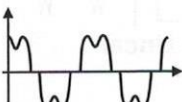
A qualidade de energia elétrica é um conceito que engloba uma diversidade de fenômenos eletromagnéticos que ocasionam o desvio formal de onda da tensão e corrente. As perturbações elétricas podem ser divididas em duas categorias de distúrbios: eventos e sustentados. Os eventos são fenômenos de curta duração que ocorrem ocasionalmente. Os distúrbios sustentados são variações na tensão e corrente de regime permanente (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

As Tabelas 1 e 2 relacionam os tipos de distúrbios elétricos, nas categorias eventos e distúrbios permanentes, mostrando sua respectiva forma de onda, duração e métodos de caracterização.

Quadro 1 – Distúrbios elétricos na categoria de eventos (parte 1).

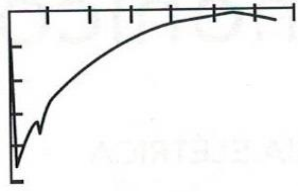
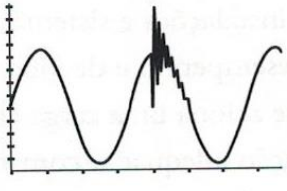

Tipos de Distúrbios	Duração	Métodos de caracterização
Sobretensão 	Estado permanente	Magnitude 1,1 – 1,2 pu Duração > 1min
Subtensão 	Estado permanente	Magnitude 0,8 – 0,9 pu Duração > 1min
Interrupção 	Estado permanente	Duração > 3min Frequência de ocorrência
Flutuação de tensão 	Estado permanente	Variação da magnitude Frequência de modulação Frequência de ocorrência

Quadro 1 – Distúrbios elétricos na categoria de eventos (parte 2).

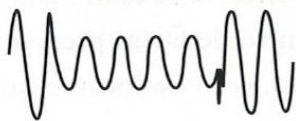
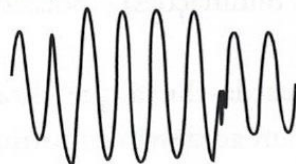
Desequilíbrio de tensão 	Estado permanente	Fator de desequilíbrio
Ruídos 	Estado permanente ou Curta duração	Magnitude Espectro de frequência
Notches ou Cortes 	Estado permanente	Magnitude Duração
Harmônicos 	Estado permanente	Espectro harmônico Distorção harmônica

Fonte: Fonte: Leão; Sampaio; Antunes, 2014

Quadro 2 – Distúrbios elétricos sustentados (parte 1).

Tipo de Distúrbios	Duração	Método de Caracterização
Transitório impulsivo 	Curta duração < 50 ns 50 ns – 1 ms > 1 ms	Tempo de subida 5 ns 1 μs 0,1 ms Magnitude de pico Duração
Transitório oscilatório 	Curta duração 0,3 – 30 μs 20 μs 5 μs	Tempo de subida Banda de frequência Baixa frequência: < 5 kHz Média frequência: 5 – 500 kHz Alta frequência: 0,5 – 5 MHz Magnitude de pico 0 – 4 pu 0 – 8 pu 0 – 4 pu
Interrupção 	Curta duração	Magnitude < 0,1 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de ocorrência

Quadro 2 – Distúrbios elétricos sustentados (parte 2).

<p>Afundamento de tensão</p> 	<p>Curta duração</p>	<p>Magnitude 0,1 – 0,9 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de ocorrência</p>
<p>Elevação de tensão</p> 	<p>Curta duração</p>	<p>Magnitude 1,1 – 1,8 pu Duração 1 ciclo – 3 min Frequência de ocorrência</p>

Fonte: Leão; Sampaio; Antunes, 2014

A presença de um ou mais desses fenômenos é condição para a perda de qualidade de energia elétrica.

É comum utilizar-se três conceitos para atribuir a qualidade do fornecimento de energia elétrica, que são: a qualidade do atendimento, a qualidade do serviço e a qualidade do produto.

A qualidade do atendimento diz respeito ao relacionamento comercial entre empresa e cliente. Que podem ser via procedimentos para ligação nova de consumidor, religamento de consumidor, elaboração de estudos e orçamentos de serviços na rede de distribuição, entre outros (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

A qualidade do serviço pode ser definida como a continuidade do fornecimento, lidando basicamente com as interrupções no sistema que podem ser provocadas por falhas no sistema (manutenção corretiva) ou por atividades de manutenção programada (manutenção preventiva), em função de serviços a serem realizados no sistema (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

Já a qualidade do produto é descrita pela forma de onda de tensão dos componentes de um sistema trifásico, também pode ser chamada como qualidade da tensão. Abrange principalmente os seguintes fenômenos que serão estudados a seguir: Variação de frequência, variação de tensão de longa duração, variação de tensão de curta duração, distorções harmônicas, desequilíbrios de tensão e corrente e flutuações de tensão (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

Quando uma instalação elétrica tem uma qualidade de energia pobre, quer dizer que a onda de tensão e/ou a onda da corrente elétrica tem desvios suficientes das normas a ponto de prejudicar o funcionamento ou ocasionar a falha de equipamentos. Quando uma instalação

elétrica tem boa qualidade de energia, pode-se dizer que o nível dos desvios das normas é baixo, e conseqüentemente, os equipamentos funcionam sem problemas (ROCHA, 2016).

Como a sensibilidade pode variar de um equipamento para outro, o que pode ser considerado como qualidade de energia baixa em um equipamento pode ser aceitável em outro. Ainda assim, a confiabilidade do sistema de produção é afetada se os desvios em relação aos indicadores das regulações não são seguidos (ROCHA, 2016).

## 2.3 A IMPORTÂNCIA DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

A preocupação é cada vez maior por uma boa qualidade de energia elétrica, principalmente nos últimos anos, isso se deve à grande quantidade de equipamentos e processos sensíveis, que podem ser afetados por problemas de qualidade de energia elétrica. Existe também um crescimento considerável de cargas não lineares vindas de novos equipamentos instalados nos consumidores. A procura por sistemas cada vez mais produtivos demanda equipamentos que se apresentem para o sistema como cargas não lineares (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

Os problemas causados por uma baixa qualidade de energia elétrica provocam enormes prejuízos, principalmente aos consumidores industriais e comerciais. Cada um dos acontecimentos que são tratados na qualidade de energia elétrica sejam eles considerados como qualidade dos serviços prestados ou qualidade do produto relacionado a forma de onda, provoca efeitos sobre equipamentos e processos dos consumidores (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

A qualidade de energia é um aspecto importante para consumidores industriais, visto que, de modo geral, as indústrias necessitam cada vez mais que o fornecimento de energia elétrica tenha um alto nível de qualidade para que não ocorram quebras no processo produtivo, ocasionando prejuízos passíveis de ocorrer no processo produtivo. Esses prejuízos podem ser interrupção da produção, perdas de informações, perda de matéria-prima, perda da credibilidade junto aos clientes, riscos a segurança dos trabalhadores, riscos a impactos ambientais, entre outros (CASTRO et al., 2017).

Atualmente, os equipamentos vêm utilizando a eletrônica embarcada, e com isso estão mais sensíveis às variações nos parâmetros da rede elétrica. Estes parâmetros podem ser os níveis de distorção da onda ou a variação da amplitude da mesma.

Um sistema elétrico que não entrega uma amplitude correta de tensão pode ser o responsável por um mau funcionamento de um equipamento e até a sua falha. Um nível de tensão inadequado também caracteriza uma baixa qualidade de energia, além de provocar maiores perdas no sistema elétrico (ROCHA, 2016).

Os responsáveis por definir os indicadores que determinam se um sistema elétrico está funcionando dentro do que é considerado satisfatório em termos de qualidade de energia são as agências reguladoras. A principal preocupação dessas agências é a qualidade do produto, ou seja, a sua forma de onda, sua amplitude, distorção e também a qualidade do serviço, ou seja, o número de interrupções de energia e sua duração. Mas não é somente as agências reguladoras que são responsáveis pela qualidade de energia, os usuário também pode poluir o sistema elétrico com injeção de harmônicos de corrente. Cargas não lineares, como conversores de frequência para acionamento de motores, computadores, entre outras cargas podem gerar correntes distorcidas que podem promover a distorção de onda de tensão propagando o problema de qualidade para toda a instalação (ROCHA, 2016).

Um baixo fator de potência também pode ocasionar uma qualidade de energia pobre na instalação, pois a circulação de uma potência reativa ocasiona perdas no efeito Joule nos condutores e transformadores. A potência reativa ocupa o espaço da seção do condutor reduzindo a capacidade de transferir potência ativa.

## 2.4 PROBLEMAS TÍPICOS DE QUALIDADE DE ENERGIA

O termo qualidade de energia elétrica é aplicado a uma grande diversidade de fenômenos eletromagnéticos dos sistemas elétricos. A IEEE 1159-1995 define cada um destes fenômenos procurando evitar equívocos entre os conceitos. O PRODIST, em seu modulo 8 define alguns desses fenômenos que serão estudados nesse trabalho (ROCHA, 2016).

Saber a diferença entre uma interrupção e um transitório oscilatório pode fazer uma grande diferença quando se é feita uma decisão para a compra de um equipamento para resolver esses problemas. Um erro na identificação do problema pode trazer consequências financeiras quando equipamentos para a correção não são os apropriados para a solução do mesmo.

Os fatores considerados da qualidade do produto em regime permanente ou transitório podem ser: os harmônicos, as variações de tensão de curta duração, a flutuação de

tensão, os desequilíbrios de tensão, tensão em regime permanente, fator de potencia e a variação de frequência (ROCHA, 2016).

Cada um destes fenômenos será abordado nos próximos capítulos procurando entender cada um e esclarecer a abrangência dos mesmos que caracterizam a qualidade da energia elétrica.



### 3 HARMÔNICAS

#### 3.1 DEFINIÇÃO

Segundo a IEEE 1159 – 2009, as harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas da frequência na qual o sistema de fornecimento é projetado para operar. Em combinação com a tensão ou a corrente fundamental, os harmônicos produzem distorções na forma de onda. A distorção harmônica acontece devido às características não lineares dos dispositivos e cargas ligados ao sistema de potência.

De acordo com Kagan, Robba e Schimidt (2009) “uma carga não-linear se caracteriza por uma relação não constante entre tensão e corrente, (ou, de forma equivalente, por uma impedância variável com a tensão)”. Como exemplo de cargas não lineares pode-se citar equipamentos que possuem componentes eletrônicos de retificação de onda: fontes de alimentação de computadores, carregadores de celular e demais equipamentos que são alimentados por corrente alternada mas que internamente trabalham em corrente contínua de baixa tensão.

A presença de harmônicas em sinais elétricos não é um fenômeno novo, o cuidado com a distorção harmônica despontou durante o início da história dos sistemas de potência em corrente alternada. No início, a principal preocupação era com as correntes harmônicas de terceira ordem, que eram causadas pela saturação magnética do ferro em transformadores e máquinas (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Com a popularização dos equipamentos eletrônicos, consideráveis problemas de qualidade de energia começaram a aparecer nas instalações, como por exemplo: disparos intempestivos de disjuntores, sobreaquecimento de transformadores e motores, corrente excessiva nos condutores neutros, explosão de capacitores, entre outros. Estes problemas, possuem como causa na grande maioria a presença de harmônicos decorrentes da carga de natureza não linear, que leva a distorção na forma de onda da corrente e da tensão em estado permanente (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

A presença de cargas eletrônicas e de bancos de capacitores que são usados para corrigir o fator de potência e regular a tensão, pode resultar na amplificação dos sinais de tensão e corrente por ocorrência de ressonância, fenômeno esse que é causado pela associação de elementos capacitivos e indutivos na rede ou no circuito elétrico, proporcionando variações na impedância e modificações na forma de onda da tensão e da corrente.

Praticamente todos os equipamentos eletrônicos são fontes de correntes harmônicas. Quando essas correntes harmônicas atingem uma magnitude suficiente, ocorre a interação com o subsistema de distribuição elétrica e com outras cargas na vizinhança. A simples presença de uma harmônica em uma instalação não representa um problema, o problema acontece quando há uma interação com o sistema de distribuição, causando distorções e perdas na tensão (LOPEZ, 2013).

Quando esta distorção alcança um nível elevado, pode ocorrer diversos tipos de problemas nos equipamentos eletrônicos. Se os picos de tensão são suprimidos, as fontes de tensão podem não acumular uma energia suficiente para suprir sags momentâneos. Se estes picos forem amplificadores, detectores de sobretensão podem atuar desligando a carga (LOPEZ, 2013).

A distorção harmônica total (DHT) é a medida em graus que uma forma de onda pode se afastar em relação à forma puramente senoidal. Quando a distorção de tensão aumenta, a DHT para a forma de onda decresce. Isto ocorre porque a distorção de tensão força o aumento no tempo do fluxo de corrente. Um aumento de 2 ms para 4 ms no período torna a forma de onda mais senoidal e a distorção harmônica decresce (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Para descrever as correntes harmônicas de maneira significativa, o padrão IEEE 519-2014 define outro termo, a distorção total de demanda (TDD). Esse termo tem o mesmo significado que o TDH, com a diferença que a distorção é expressa em porcentagem da corrente de carga atual selecionada como a demanda de pico, em vez de um percentual do valor RMS magnitude de corrente fundamental (MERKLE, 2018).

Na ocorrência de harmônicas, as de ordem ímpar prevalecem sobre as de ordem par. No entanto, as harmônicas de ordem par tem um impacto muito grande em instalações elétricas porque criam resquícios de tensão CC em dispositivos como motores e transformadores (LOPEZ, 2013).

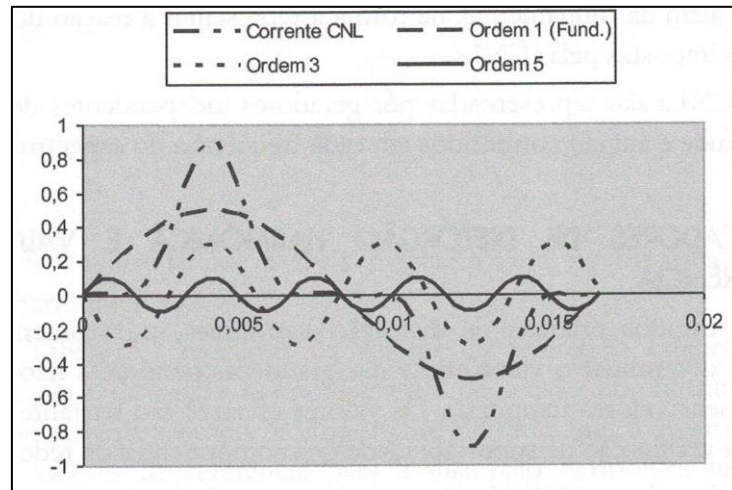
Os harmônicos ímpares causam problemas em equipamentos e maquinários que funcionam através de uma onda senoidal. No caso dos motores elétricos, onde seu desempenho é afetado caso na rede transite os mesmos. Eles podem provocar até o desgaste na estrutura do motor, pois este foi projetado para funcionar através de uma onda de tensão senoidal pura (ALDABÓ, 2001).

A norma IEEE 519 – 2014 define o limite de 25% para harmônicas de ordem par e proíbe o uso de conversores meia-onda para evitar condições de aparecimento na tensão CC. Em cargas conectadas em estrela, um tipo particular de harmônica deve ter uma atenção

especial. Os múltiplos das harmônicas de terceira ordem são aditivos e retornam em grande quantidade pelo neutro (LOPEZ, 2013).

A figura 1 mostra a decomposição da corrente em seus componentes harmônicos de primeira, terceira e quinta ordem.

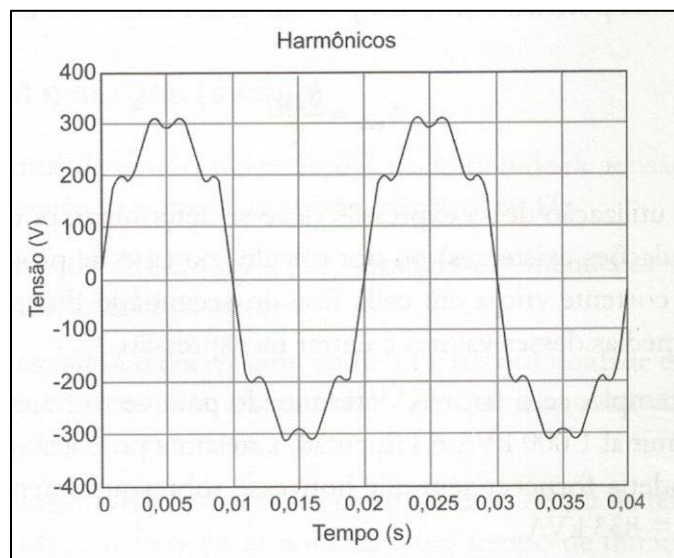
Figura 1 – Decomposição em correntes harmônicas



Fonte: Kagan, Robba e Schimidt (2009)

A figura 2 apresenta uma forma de onda com harmônicas.

Figura 2 – Forma de onda com Harmônicas.



Fonte: Lopez (2013)

## 3.2 INDICADORES DE QUALIDADE HARMÔNICA

Para permitir a quantificação e o enquadramento da poluição harmônica em determinada instalação quanto à conformidade com as regulamentações foram criados indicadores de distorção harmônica, a distorção harmônica individual (DHI), a distorção harmônica total (DHT).

### 3.2.1 Distorção harmônica individual

A distorção harmônica individual é definida como sendo a relação entre a amplitude da harmônica de ordem “h” e a correspondente grandeza (corrente ou tensão) fundamental. A Equação 1 expressa a formulação da distorção harmônica individual de corrente de ordem harmônica h, em percentual

$$DHI\% = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (1)$$

onde:

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

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

A Equação 2 expressa, em porcentagem, a formulação da distorção harmônica individual de tensão de ordem harmônica.

$$DHT\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

onde:

$V_h$  - Valor eficaz da componente harmônica da tensão em ordem h;

$V_1$  - Valor eficaz da componente fundamental da tensão;

A Tabela 3 apresenta os valores máximos admissíveis das distorções harmônicas individuais de tensão de acordo com a ordem harmônica e a variação de tensão da rede. Os valores são dados em porcentagem

Quadro 3 – Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]

Ordem Harmônica	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{ kV} < V_n < 13,8\text{ kV}$	$13,8\text{ kV} < V_n < 69\text{ kV}$	$69\text{ kV} < V_n < 230\text{ kV}$	
Ímpares não múltiplos de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
> 25	1,5	1	1	0,5	
Ímpares múltiplos de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	> 21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	> 12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica nos Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, 2018.

### 3.2.2 Distorção harmônica total

A distorção harmônica total pode ser definida como sendo a relação porcentual entre o valor eficaz da tensão, considerados todos os componentes harmônicos exceto o fundamental, e o valor eficaz deste componente (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009). A Equação 3 expressa a formulação da distorção harmônica total da corrente, em percentual.

$$DTT \% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}}{I_1} \times 100 \quad (3)$$

onde:

$\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots}$  → Valor eficaz dos harmônicos de corrente;

Com esta definição resulta que no caso de ausência de distorção harmônica a distorção harmônica total é igual a zero.

A Tabela 4 apresenta os valores de referência que são estabelecidos pela ANEEL para a distorção harmônica total de tensão em função da tensão nominal do sistema elétrico.

Quadro 4 – Distorção harmônica total de tensão

Tensão Nominal	Distorção harmônica total de tensão (DTT) [%]
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	3

Fonte: ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica nos Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, 2018.

### 3.3 CARGAS QUE PRODUZEM HARMÔNICOS

Os harmônicos de corrente são causados por cargas não lineares. Essas cargas possuem chaves semicondutoras que recortam a onda de corrente. Estas cargas podem ser monofásicas ou trifásicas.

As cargas não lineares são cargas nas quais a corrente que circula por elas não é diretamente proporcional à tensão que é fornecida. Qualquer carga que requisita uma corrente não senoidal de uma tensão senoidal, é uma carga não linear (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Mesmo se não forem alimentadas por uma fonte de tensão não distorcida (senoidal) as cargas lineares causam correntes distorcidas. Se uma tensão distorcida for aplicada sobre uma carga linear, a forma de onda da corrente na carga será distorcida como a tensão. Porém, se uma carga não linear for alimentada por uma tensão não senoidal a forma de onda da corrente será distorcida por causa da tensão distorcida e da não linearidade da carga. Em ambos os casos, a relação entre tensão e corrente não é constante (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Cargas lineares podem ser divididas em dois tipos, convencionais ou chaveadas. As convencionais são caracterizadas pela ausência de interruptores estáticos, com alguns

componentes de características lineares e não lineares, e pela presença de harmônicas. Já as chaveadas são caracterizadas pela presença de interruptores estáticos e presença de harmônicos.

Algumas cargas monofásicas que podem gerar harmônicos de corrente são: fontes chaveadas, lâmpadas fluorescentes, pequenas fontes de energia ininterrupta, entre outros. Computadores e televisores podem gerar harmônicos, visto que, um de seus componentes são as fontes chaveadas que fazem a sua alimentação (ROCHA, 2016).

Dentre as cargas trifásicas que podem gerar harmônicos de corrente temos: inversores de frequência para o acionamento de motores, grandes fontes de energia ininterruptas, forno a arco, entre outros equipamentos (MERKLE, 2018).

A Tabela 5 mostra alguns equipamentos que podem sofrer com a presença de harmônicas e suas consequências.

Tabela 5 – Consequências da presença de harmônicas

Equipamentos	Consequências devido à presença de harmônicas
Capacitores	Queima de fusíveis e redução da vida útil
Motores	Redução da vida útil e impossibilidade de atingir potência máxima
Fusíveis/Disjuntores	Operação falsa ou errônea e componentes danificados
Transformadores	Aumento de perdas, causando redução de capacidade e diminuição da vida útil
Medidores	Possibilidade de medições errôneas e de maiores contas
Telefones	Interferências
Máquinas síncronas	Sobreaquecimento das sapatas polares provocado pela circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores
Iluminação	Diminuição da vida útil e ruídos audíveis em lâmpadas fluorescentes
Condutores	Sobreaquecimento e diminuição na capacidade de condução de corrente

Fonte: Leão, Sampaio e Antunes (2014)

### 3.4 SOLUÇÕES PARA HARMÔNICAS

A distorção harmônica está presente em todos os sistemas de potência. Em geral, os harmônicos de corrente e tensão devem ser reduzidos somente quando ultrapassam os limites normatizados e vem a se tornar um problema (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Os níveis de distorção harmônica do sistema resultam de várias fontes, tais como a impedância, composição de cargas (linear e não linear), distorção da tensão, condições de operação (percentual de cargas) e tipo de conversor. Existem várias soluções para solucionar os problemas com harmônicas. Cada técnica tem seu próprio conjunto de vantagens e limites e oferece determinada faixa de desempenho. A decisão deve ser tomada como base os adjetivos de qualidade de energia requerido para a instalação e o orçamento disponível (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Segundo Leão, Sampaio e Antunes (2014) as alternativas geralmente utilizadas para reduzir as harmônicas são:

- Usar reator de linha com cerca de 4% de impedância para mitigar a distorção harmônica de corrente na entrada de cada acionamento de velocidade variável. A medida reduz os harmônicos da carga para cerca de 35% a 38%, protege o retificador do acionamento de velocidade variável contra elevação momentânea de tensão, reduz a distorção harmônica no transformador ou gerador a montante, e reduz o custo de qualquer filtro central que pretenda ser instalado.
- Instalar filtros harmônicos sintonizados o mais próximo possível da fonte de corrente harmônico. A medida concorre para melhorar a qualidade da energia da instalação bem como dos pontos a montante. Tanto a instalação como o sistema de suprimento terão benefícios. A distorção harmônica poderá ser reduzida a níveis de 5% a 35% de DHT, dependendo do projeto do filtro e do ponto de conexão.
- Usar filtro harmônico passa-baixa quando necessitar de uma solução econômica para atender à condição de limites muito baixos de distorção harmônica de corrente. A eficácia do filtro passa-baixa é melhorada quando as indutâncias a-se-fase de todos os componentes magnéticos do filtro são balanceadas e mantidas dentro de uma tolerância de cerca de 3%. O filtro harmônico passa-baixa é apropriado para uso em uma ou mais cargas não lineares. Não se devem conectar



cargas lineares, como motores, na saída de um filtro passa-baixa devido ao alto conteúdo harmônico no estágio do filtro.

- Usar conversores de 12 ou 18 pulsos com a saída retificada conectada em série para alcançar o mais baixo nível de distorção harmônica dentro de uma larga faixa de condições de operação.
- Reduzir o tamanho e custo do filtro ativo inserindo um reator de linha com impedância de 4% para cada acionamento de velocidade variável individual do sistema, assim a necessidade de cancelamento de corrente requerida do filtro é diminuída.

## 4 VARIAÇÕES DE TENSÃO

Os sistemas elétricos estão propensos a uma variedade de problemas referente a qualidade de energia que podem interromper os processos de produção, afetar equipamentos, causar indisponibilidade e prejuízos. As principais causas destes problemas são as interrupções e as variações de tensão de curta duração.

### 4.2 INTERRUPÇÕES

Interrupções são eventos de tensão zero ou menor que 0,1 pu e que podem ser causadas por vários motivos, entre eles: clima, mau funcionamento de equipamento, operação de religamento ou interrupção no sistema de transmissão. As faltas temporárias costumam ser causadas por galhos de árvores que se agitam com o vento e até descargas atmosféricas que geram ondas com nível de tensão superior a capacidade de isolamento dos isoladores (ROCHA, 2016).

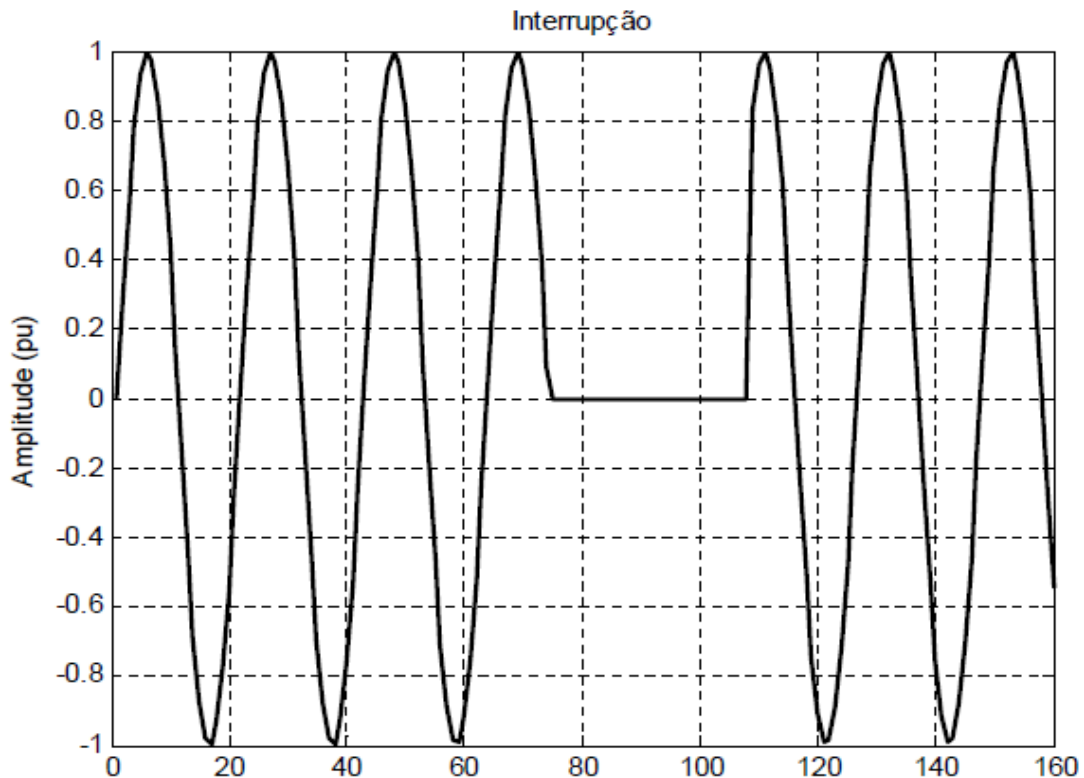
As interrupções são medidas pela duração desde que sua magnitude da tensão seja sempre menor que 10% do nominal. O tempo de uma interrupção devido a uma falha no sistema é determinado por dispositivos de proteção da concessionária e pelo evento que está causando a falha (MERKLE, 2018).

Algumas interrupções podem ser antecipadas por quedas de tensão quando são ocasionadas devido a falhas no sistema de origem. Essas quedas ocorrem entre os momentos em que uma falha é iniciada e o dispositivo de proteção opera. Em um alimentador com falha, as cargas sofrerão uma queda de tensão seguida imediatamente por uma interrupção (MERKLE, 2018).

O PRODIST - módulo 8, classifica as interrupções em: interrupções momentâneas de tensão e interrupções temporárias de tensão. A interrupção é considerada momentânea se a sua duração é inferior ou igual a três segundos. E é considerada temporária quando sua duração é superior a três segundos e inferior a três minutos.

A figura 3 mostra como é visualizada uma interrupção de curta duração em um osciloscópio.

Figura 3 - Interrupção de tensão de curta duração



Fonte: Kern, 2008

## 4.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

As variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. As variações de tensão de curta duração podem ser classificadas em dois tipos, afundamentos de tensão e elevação de tensão.

Segundo o IEEE, afundamentos de tensão correspondem a uma diminuição do valor eficaz da tensão para 0,1 a 0,9 pu, durante um intervalo de tempo entre 0,5 ciclo até 1 minuto da frequência fundamental. Elevações de tensão são definidas como aumentos do valor da tensão eficaz para 1,1 a 1,8 pu, durante 0,5 ciclo a 1 minuto. Quando a tensão eficaz cai abaixo de 0,1 pu, considera-se o evento como interrupção de curta duração. (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

A tabela 6 mostra como são classificadas as variações de tensão de curta duração de acordo com o procedimento de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (PRODIST) - módulo 8.

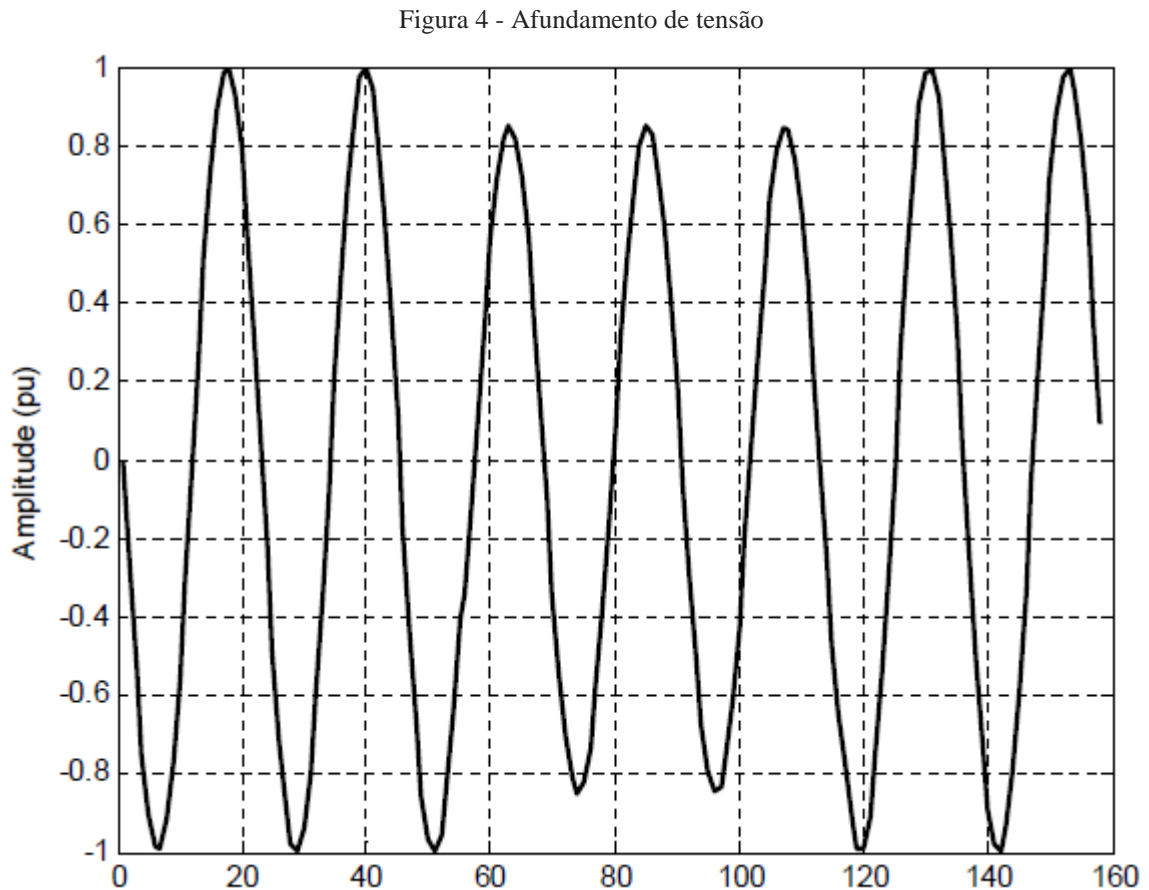
Quadro 6 - Classificação das variações de tensão de curtas duração

CLASSIFICAÇÃO	DENOMINAÇÃO	DURAÇÃO DA VARIACÃO	AMPLITUDE DA TENSÃO (VALOR EFICAZ) EM RELAÇÃO A TENSÃO DE REFERÊNCIA
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção momentânea de tensão	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Variação temporária de tensão	Interrupção temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento temporário de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação temporária de tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 pu

Fonte: ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica nos Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, 2018.

Os afundamentos de tensão podem ser classificados como afundamento momentâneo de tensão e temporário de tensão. O afundamento será momentâneo quando seu tempo de duração for superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos. E é classificado como temporário quando seu tempo de duração for superior a três segundos e inferior a três minutos (ROCHA, 2016)

A figura 4 apresenta uma onda de tensão afundada. Pode-se observar que a onda de tensão diminui a sua amplitude durante alguns ciclos e em seguida retorna para a sua amplitude normal.



Fonte: Kern, 2008.

De acordo com Rocha (2016), “os afundamentos podem ser causados por faltas no sistema elétrico da concessionária, partida de grandes motores ou a corrente de ligação (inrush) de transformadores”. A razão mais comum é o curto-circuito em redes de distribuição, onde nesse caso, a tensão do barramento em que o circuito submetido ao curto está conectada é afundada, devido ao elevado valor da corrente de curto.

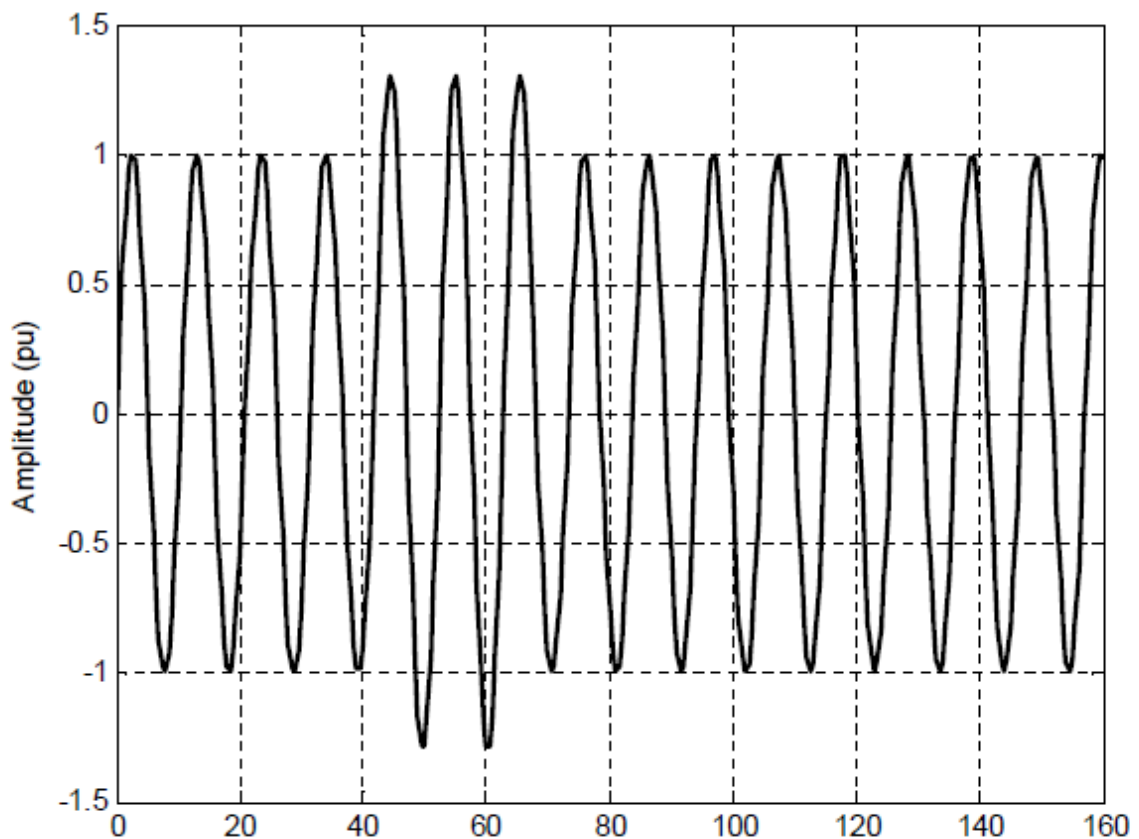
O afundamento de tensão prejudica o funcionamento de equipamentos sensíveis, como por exemplo, controladores programáveis e conversores de frequência que acionam motores por indução.

A elevação de tensão pode ser classificada em elevações momentâneas e elevações temporárias de tensão. Ela é classificada como momentânea quando seu tempo de duração é superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos. E é classificada como

temporária quando seu tempo de duração for superior a três segundos e inferior a três minutos (ROCHA,2016).

A figura 5 apresenta um exemplo de onda de tensão elevada. Quando uma onda de tensão é elevada pode-se observar que a onda de tensão aumenta a sua amplitude durante alguns ciclos e em seguida retorna para a sua amplitude normal.

Figura 5 - Elevação de tensão



Fonte: Kern, 2008.

Conforme Rocha (2016) “as elevações de tensão são causadas por faltas monofásicas (curto-circuito fase-terra) no sistema elétrico da concessionária”. A fase que entra em curto tem a sua tensão reduzida enquanto as outras duas fases têm suas tensões elevadas.

A elevação de tensão pode danificar os supressores de sobretensão, os mesmos são dimensionados para drenar uma energia concentrada em dezenas de microssegundos e a elevação de tensão tem um tempo de duração de dezenas de milissegundos.

### 4.3 EFEITOS DE VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO SOBRE EQUIPAMENTOS

As variações de tensão de curta duração podem ocasionar diferentes impactos sobre uma carga. Equipamentos eletrônicos que são utilizados para o controle de processos, como CLP (controlador lógico programável) e ASD (acionamento de velocidade variável) são sensíveis às variações de tensão de curta duração e podem apresentar problemas no funcionamento, afetando portanto os processos onde estão envolvidos (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

Os principais itens que podem ser prejudicados com a parada de um processo por afundamentos de tensão são:

- Perda de produção;
- Reinicialização do processo;
- Mão de obra;
- Danos em equipamentos e reparos;

As principais características de afundamentos de tensão que podem provocar impactos sobre equipamentos são a sua magnitude e duração. Alguns equipamentos são sensíveis somente à magnitude dos afundamentos, como por exemplo, os relés de proteção de subtensão, certos controles de processo e muitos tipos de máquinas automatizadas. Sendo assim, o equipamento apresentará algum problema quando a tensão cair abaixo de certa tensão mínima, no caso de afundamento de tensão, e acima de tensão máxima, no caso de elevação de tensão (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

Outros equipamentos além de serem sensíveis a magnitude, também são sensíveis a duração da variação de tensão de curta duração, nesses casos é importante saber a duração na qual o equipamento apresenta um mau funcionamento quando a tensão está abaixo de um determinado valor, no caso de afundamento de tensão, ou acima de um determinado valor, no caso de elevação de tensão (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

Além de magnitude e duração da variação de tensão de curta duração, alguns equipamentos são afetados por outras características, como o desequilíbrio entre fases, o ponto na forma de onda da tensão onde a variação de tensão de curta duração se inicia, dentre outros. Porém estes parâmetros são mais difíceis de generalizar, sendo assim os indicadores utilizados para a análise de desempenho concentra-se nos parâmetros de magnitude e duração das variações de tensão (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

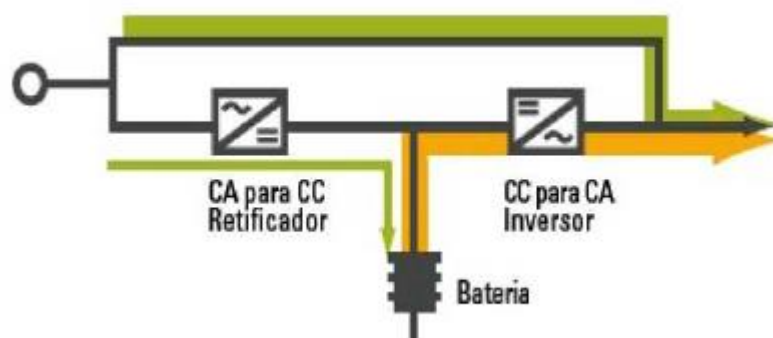
#### 4.4 SOLUÇÕES PARA AS VARIAÇÕES DE TENSÃO

O principal obstáculo quando ocorrem interrupções de energia é quando ocorre o religamento, pois a tensão pode chegar a até 60% maior que a tensão nominal, acontecendo a queima de equipamentos mais sensíveis. Uma alternativa para solucionar esse problema é a instalação de restauradores dinâmicos de tensão (DVR). O DVR captura energia da rede para recuperar a tensão nominal durante a interrupção. Este transformador é alimentado por um inversor de frequência, esse inversor recebe energia de um retificador que recebe energia da rede. A vantagem do DVR é que ele não utiliza nenhum sistema de acumulação de energia, pois estes necessitam de muita manutenção (ROCHA, 2016).

O sistema que é usado com mais frequência para manter a energia disponível é o Sistema de Energia Ininterrupta (UPS), popularmente conhecidos como no-break, suportado por bancos de baterias (ROCHA, 2016).

Um UPS é composto basicamente de um retificador que carrega o banco de baterias de forma controlada e de um inversor de frequência que é responsável por transformar a energia armazenada na forma contínua em alternada (ROCHA, 2016). A figura 6 apresenta um esquema básico de um UPS à bateria.

Figura 6 - Esquema básico de UPS (Sistema de Energia Ininterrupta) a bateria



Fonte: Rocha, (2016)

Um UPS pode manter um sistema alimentado por vários minutos ou horas, tudo vai depender da capacidade da bateria em relação ao consumo das cargas, ele também pode alimentar um sistema por apenas alguns segundos, desde que esse sistema tenha um gerador de emergência que tenha condição de assumir tal carga.



## **5 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE**

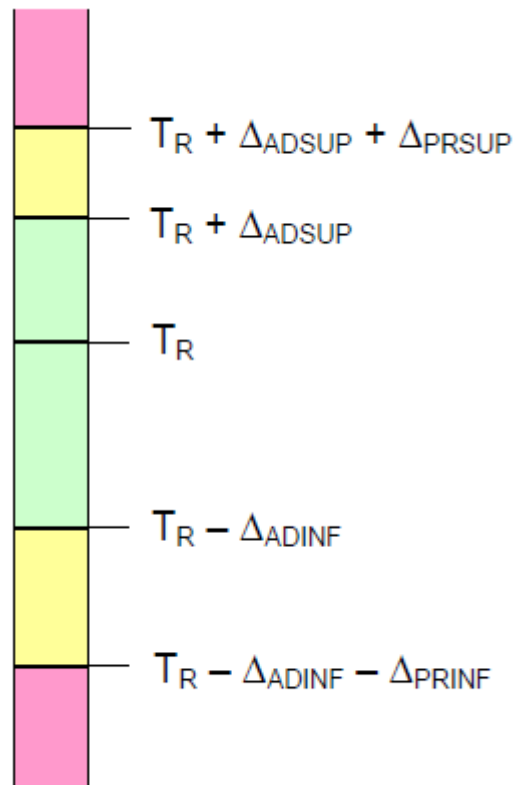
Todos os equipamentos, sejam eles da concessionária ou que pertencem aos consumidores, são projetados para operar em uma determinada tensão. Uma operação prolongada desses equipamentos fora de sua faixa de tensão pode afetar o seu funcionamento reduzindo a sua vida útil ou até mesmo causando interrupções não programadas no sistema, com isso a tensão deve ser sempre mantida dentro de limites aceitáveis. A tensão em regime permanente pode ser definida como a condição na qual as características do sistema permanecem dentro de limites estabelecidos para uma operação normal (ROCHA, 2016).

### **5.1 DEFINIÇÃO DE INDICADORES PARA A TENSÃO EM REGIME PERMANENTE**

A ANEEL, através do módulo 8 do PRODIST, estabelece que a tensão de atendimento deve ser classificada segundo faixas em torno da tensão de referência (TR), que corresponde a tensão contratada, no caso de unidades atendidas pelo Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT), ou pelo Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT). No caso de unidades atendidas pelo Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT) a tensão de referência passa a ser a tensão nominal de operação (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

De acordo com o PRODIST - módulo 8, a tensão em regime permanente deve ser avaliada por meio de um conjunto de leituras obtidas por medição apropriada. Para cada tensão de referência, as leituras classificam-se em três categorias: adequadas, precárias ou críticas, baseando-se no afastamento do valor de tensão de leitura em relação à tensão de referência. A figura 7 ilustra a amplitude dessas três categorias.

Figura 7 - Amplitude das faixas de tensão



Fonte: ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica nos Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, 2018.

Onde:

$T_R \rightarrow$  Tensão de referência;

$T_R - \Delta_{ADINF}$ ,  $T_R - \Delta_{ADSUP} \rightarrow$  Faixa adequada de tensão;

$T_R + \Delta_{ADSUP}$ ,  $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$  ou  $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$ ,  $T_R - \Delta_{ADINF} \rightarrow$  Faixas precárias de tensão;

$> T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$  ou  $< T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF} \rightarrow$  Faixas críticas de tensão;

A tabela 7 apresenta os valores correspondentes as faixas de tensão adequada, precária e crítica nas tensões de 230/127 V e 230/115 V

Quadro 7 - Faixas admissíveis para tensões 230/127 V e 230/115 V

Condição operativa	Tensão 220/127 V		Tensão 220/115 V	
	Fase-Fase	Fase-Neutro	Fase-Fase	Fase-Neutro
Adequada	$201 \leq VF \leq 231$	$116 \leq VN \leq 133$	$216 \leq VF \leq 241$	$108 \leq VN \leq 127$
Precária	$189 \leq VF < 201$	$109 \leq VF < 116$	$212 \leq VF < 216$	$105 \leq VF < 108$
	$231 < VF \leq 233$	$133 < VF \leq 140$	$241 < VF \leq 253$	$127 < VF \leq 129$
Crítica	$VF < 189$	$VF < 109$	$VF < 212$	$VN < 105$
	$VF > 233$	$VF > 140$	$VF > 253$	$VN > 129$

Fonte: Kagan, Robba e Schimidt (2009)

Periodicamente ou sempre que houver reclamações por parte de consumidores, devem ser realizadas medições de campo da tensão para o acompanhamento da qualidade de energia elétrica. A ANEEL estabelece o equipamento a ser utilizado para a realização dessas medições conforme a seguir:

- As leituras devem ser obtidas por meio de equipamentos que operem segundo o princípio da amostragem digital;
- Devem atender os seguintes requisitos mínimos:
  - a) Taxa amostral: 16 amostras/ciclo;
  - b) Conversor analógico/digital de sinal de tensão: 12 bits;
  - c) Precisão: até 1% da leitura;
- Os equipamentos de medição devem permitir a apuração das seguintes informações:
  - a) Valores calculados dos indicadores individuais;
  - b) Tabela de medição;
  - c) Histograma da medição;
- A medição de tensão deve corresponder ao tipo de ligação da unidade consumidora, abrangendo medições entre todas as fases ou entre todas as fases e o neutro, quando este for disponível;

O Procedimento de medição é especificado pela ANEEL da seguinte forma:

O conjunto de leituras para gerar os indicadores individuais deverá compreender o registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. No intuito de se obter 1008 leituras válidas, intervalos adicionais devem ser agregados, sempre consecutivamente. (ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica nos Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) – Módulo 8, 2018)

As 1008 leituras especificadas, com um intervalo de integração de 10 minutos correspondem a medições efetuadas durante 10080 minutos, isto é, 7 dias. Assim a medição irá englobar todos os dias úteis e o fim de semana levando em conta as variações diárias de demanda dos consumidores (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009). O conjunto de leituras efetuadas deve ser armazenado por no mínimo cinco anos, inclusive os intervalos correspondentes às leituras expurgadas, para efeito de fiscalização.

Após realizadas as medições e obtidas o conjunto de leituras válidas, são calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) através da Equação 4 e o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRC) através da Equação 5.

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5)$$

onde:

$nlp$  - representa o número de leituras situadas nas faixas precárias;

$nlc$  - representa o número de leituras situadas nas faixas críticas;

Quando a medição é realizada para um conjunto de consumidores, define-se o índice de unidades consumidoras com tensão crítica (ICC) pela Equação 6:

$$ICC = \frac{N_C}{N_L} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

$N_C$  - representa o número de unidades consumidoras com registros de tensões nas faixas críticas;

$N_L$  - representa o número de unidades consumidoras da amostra;

Para se determinar índices equivalentes por consumidor, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária equivalente ( $DRP_E$ ) de acordo

com a Equação 7 e o índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica equivalente ( $DRC_E$ ) de acordo com a Equação 8.

$$DRP_E = \frac{\sum_{i=1}^{N_P} DRP_i}{N_L} \quad (7)$$

$$DRC_E = \frac{\sum_{i=1}^{N_C} DRC_i}{N_L} \quad (8)$$

Onde:

$DRP_i$  - Duração relativa de transgressão de tensão precária individual da unidade consumidora “i”;

$DRC_i$  - Duração relativa de transgressão de tensão crítica individual da unidade consumidora “i”;

$DRP_E$  - Duração relativa de transgressão de tensão precária equivalente;

$DRC_E$  - Duração relativa de transgressão de tensão crítica equivalente;

$N_L$  - Número total de unidades consumidoras da amostra;

$N_P$  - Número total de unidades consumidoras da amostra com tensão precária;

$N_C$  - Número total de unidades consumidoras da amostra com tensão crítica;

A ANEEL, através do PRODIST - módulo 8, determina que o valor da duração relativa de transgressão máxima de tensão precária (DRPM) deve ser limitado em 3% e o valor da duração relativa da transgressão máxima de tensão crítica (DRCM) deve ser limitado em 0,5%. Caso esses limites sejam excedidos, a ANEEL estabelece prazos para ser regularizada essa tensão, caso não seja regularizado dentro do prazo estabelecido, a distribuidora deve compensar aqueles consumidores responsáveis pelas unidades consumidoras que estiverem submetidas a tensões de atendimento com transgressão dos indicadores DRP e/ou DRC, calculada através da Equação 9 (KAGAN; ROBBA; SCHIMIDT, 2009).

$$Valor = [(DRP - DRPM).k_1 + (DRC - DRCM).k_2].k_3 \quad (8)$$

Onde:

$k_1 = 0$ , se  $DRP < DRPM$ ;

$k_1 = 3$ , se  $DRP > DRPM$ ;

$k_2 = 0$ , se  $DRC < DRCM$ ;

$k_2 = 7$ , para unidades consumidoras atendidas em baixa tensão, se  $DRC > DRCM$ ;

$k_2 = 5$ , para unidades consumidoras atendidas em média tensão, se  $DRC > DRCM$ ;

$k_2 = 3$ , para unidades consumidoras atendidas em alta tensão, se  $DRC > DRCM$ ;

DRP representa o valor do DRP, expresso em %, apurado na última medição;

$DRPM = 3\%$ ;

DRC representa o valor do DRC, expresso em %, apurado na última medição;

$DRCM = 0,5\%$ ;

$k_3 =$  Valor do encargo de uso do sistema de distribuição, referente ao mês de apuração;

A compensação deverá ser mantida enquanto o indicador DRP for superior ao DRPM ou o indicador DRC for superior ao DRCM. O valor da compensação será creditado na fatura do consumidor, referente ao mês subsequente ao término dos prazos de regularização dos níveis de tensão.

## 5.2 MÉTODOS PARA A REGULAÇÃO DA TENSÃO

Problemas referentes ao perfil de tensão nas redes elétricas são um dos mais comuns quando relacionados a qualidade de energia elétrica. Inúmeros métodos e modos de controle de tensão podem ser utilizados para se manter o nível da tensão dentro do limite de faixa considerado adequado (ROCHA, 2016).

A localização do consumidor ao longo da linha de distribuição irá definir se o nível da tensão em sua instalação está adequada, isso porque, a tensão ideal para um consumidor que está próximo a subestação pode ser inadequada para um consumidor que está localizado em uma distância maior da subestação (ROCHA, 2016).

A maior dificuldade quanto ao fornecimento de energia elétrica aos consumidores é distribuir tensões em faixas adequadas, pois a queda de tensão ao longo da transmissão e a queda de tensão na impedância do transformador que alimenta o consumidor são as principais adversidades encontradas (MERKLE, 2018).

Um dos métodos utilizados para a regulação de tensão é a elevação do fator de potência com a instalação de banco de capacitores que reduzem a corrente que vem da concessionária e conseqüentemente reduz a queda de tensão no transporte da energia elétrica. A regulamentação penaliza se a instalação estiver com o fator de potência abaixo do permitido. A concessionária também pode utilizar bancos de capacitores em suas subestações de distribuição com o objetivo de controlar o reativo e a tensão do sistema (ROCHA, 2016).

A regulação de tensão pode ser feita nas subestações de energia ou ao longo dos alimentadores utilizando-se reguladores de tensão, o controle de tensão destes reguladores é feita através de relés de controle automático de tensão. A concessionária também pode inserir pequenos bancos de capacitores ao longo da linha de distribuição de média tensão que são conectados automaticamente em função do nível de tensão (ROCHA, 2016).

O regulador de tensão monofásico automático é um autotransformador imerso em óleo isolante, Figura 8. O mesmo é instalado ao longo dos alimentadores de distribuição quando este é muito longo e costuma regular a tensão de linha em até +/- 10% com intervalos de 0,625% da tensão nominal (ROCHA, 2016).

Figura 8 - Regulador de tensão



Fonte: ITB transformadores, disponível em <<https://itb.ind.br/produtos/reguladores-automaticos-de-tensao-monofasicos/>>. Acesso em: 13 nov. 2019

Os transformadores das subestações de distribuição possuem comutação sob carga. Eles têm dispositivos de controle dos níveis de tensão chamados taps. Os taps são responsáveis por mudar a relação de transformação, permitindo a variação da tensão em um determinado intervalo. A alteração do valor eficaz da tensão permite o controle e a redistribuição dos fluxos de potência reativa no sistema, melhorando o perfil de tensão (ROCHA, 2016).

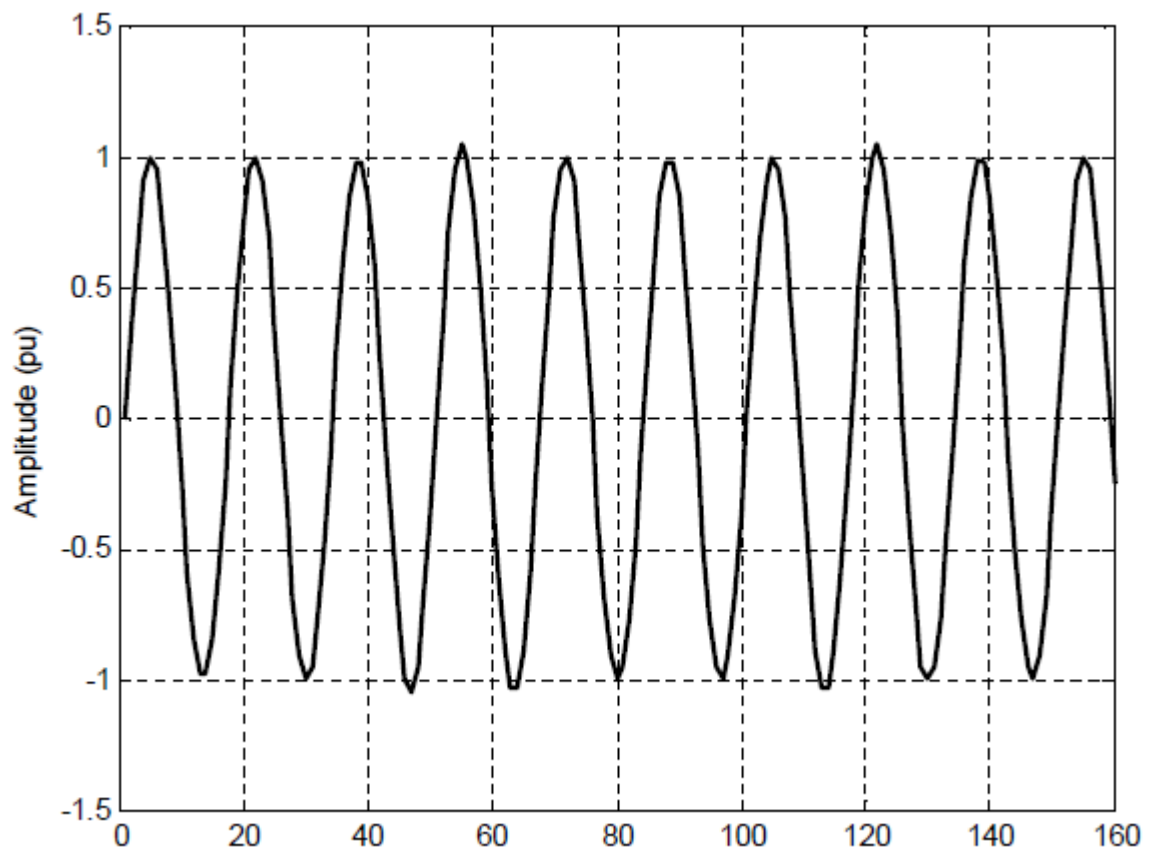


## 6 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

### 6.1 DEFINIÇÃO

Flutuação de tensão é uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. Essa variação sistemática da tensão é de pequena dimensão, normalmente com valores entre 90% e 110% da tensão nominal. A frequência da variação nominal costuma ficar abaixo de 25 Hz (ROCHA, 2016). A Figura 9 mostra um exemplo de flutuação de tensão.

Figura 9 - Flutuação de Tensão



Fonte: Kern, 2008

Flutuações aleatórias em geral são causadas por forno a arco, sendo que as amplitudes das oscilações em dependência do estado de fusão em que o material se encontra, inclusive do nível de curto-circuito da instalação. As flutuações repetitivas são causadas, principalmente, por máquinas de solda, elevadores de minas e ferrovias, laminadores e as

flutuações esporádicas são aquelas ocasionadas por partida direta de grandes motores (KERN, 2008).

Qualquer variação que aconteça na intensidade da tensão de alimentação resulta em uma variação de fluxo luminoso, que é conhecido como cintilamento (flicker). Cintilamento é um sintoma de flutuação de tensão. O problema é o incomodo provocado pelo efeito de cintilação luminosa no ser humano. Cintilamento é a impressão visual da variação do fluxo de luz quando sua luminância varia no tempo. As lâmpadas incandescentes são mais sensíveis do que as fluorescentes, portanto, em ambientes iluminados com lâmpadas fluorescentes, o efeito do cintilamento é mais pronunciado (ROCHA, 2016).

O cintilamento pode causar no ser humano fadiga, redução do nível de concentração, desconforto e irritabilidade. Além de afetar o ser humano, também pode atrapalhar o funcionamento de alguns componentes da instalação elétrica. Por exemplo, pode dificultar a operação de contadores e relés, prejudicando o processo de produção (ROCHA, 2016).

Para a obtenção dos níveis de severidade de cintilação, associados a flutuação de tensão, são definidos indicadores e procedimentos estabelecidos nos documentos da IEC. Estes valores são derivados da medição e processamento das tensões dos barramentos da instalação. A severidade de cintilação é uma representação quantitativa do incômodo visual percebido pelas pessoas expostas ao fenômeno de cintilação (ROCHA, 2016).

Os níveis de severidade de cintilação, causados pela flutuação de tensão, são quantificados, segundo o PRODIST - Módulo8, pelos indicadores: indicador de severidade de cintilação de curta duração - Pst e indicador de severidade de cintilação de longa duração - Plt.

O indicador Pst representa a severidade dos níveis de cintilação associados a flutuação de tensão verificada em um período contínuo de dez minutos e é calculado a partir dos níveis instantâneos de sensação de cintilação (ROCHA, 2016), e é calculado conforme a Equação 9.

$$P_{st} = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (9)$$

Onde:

Pi (i = 0,1; 1; 3; 10; 50) - Corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante o tempo, obtido a partir da função de distribuição acumulada complementar, de acordo com o procedimento estabelecidos nas normas IEC.

O indicador  $Plt$  representa a severidade dos níveis de cintilação causados pela flutuação de tensão verificada em um período contínuo de duas horas e é calculado a partir dos registros de  $Pst$  (ROCHA, 2016), e é calculado conforme a Equação 10.

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (Psti)^3} \quad (10)$$

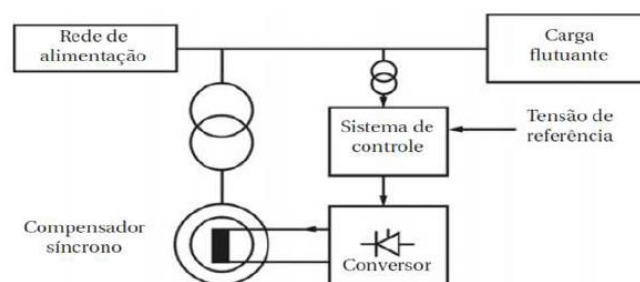
Para a obtenção dos valores de severidade de cintilação são feitas medições e processamento das tensões dos barramentos com classificação em faixas de probabilidade de ocorrência.  $P_{st}D95\%$  é o valor do indicador  $P_{st}$  que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 24 horas.  $P_{lt}95\%$  é o valor semanal do indicador  $P_{lt}$  que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos.

## 6.2 SOLUÇÕES PARA ATENUAR A FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Existem diversas técnicas disponíveis para a atenuação do Flicker. A ideia principal é reduzir a flutuação da tensão e, assim reduzir o Cintilamento (Flicker). Duas possibilidades para atenuação do Flicker são as mais utilizadas. A primeira é reduzir a variação do fluxo de potência, particularmente a sua componente reativa. A segunda é aumentar a potencia de curto-circuito em relação à potência da carga (ROCHA, 2016).

A redução do fluxo de potência reativa pode ser feita com a instalação de compensadores dinâmicos, usualmente conhecidos como estabilizadores dinâmicos. São utilizadas máquinas síncronas para essa finalidade (MERKLE, 2018). A Figura 10 mostra um compensador dinâmico baseado em uma máquina síncrona.

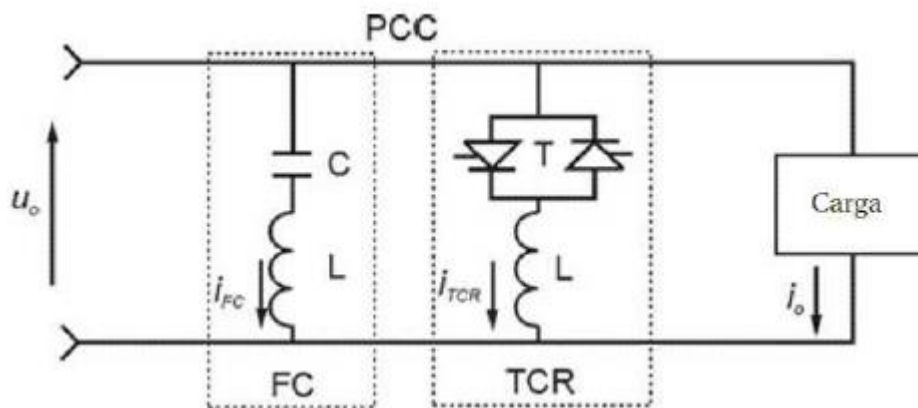
Figura 10 - Compensador dinâmico baseado em máquina síncrona



Nesse modelo de sistema a operação ocorre com o controle de tensão em malha fechada e com o controle rápido de corrente de excitação. Desta forma, a correção da corrente reativa da máquina é executada rapidamente (MERKLE, 2018).

Outra maneira de reduzir as variações de energia reativa no sistema de alimentação é o uso de compensadores estáticos de reativo. O reator é controlado por um tiristor que é associado ao capacitor fixo, isso permite o controle da geração ou do consumo de reativo, dependendo da necessidade do sistema elétrico (ROCHA, 2016). A Figura 11 apresenta o sistema de compensadores estáticos de reativo.

Figura 11 - Compensador estático dinâmico

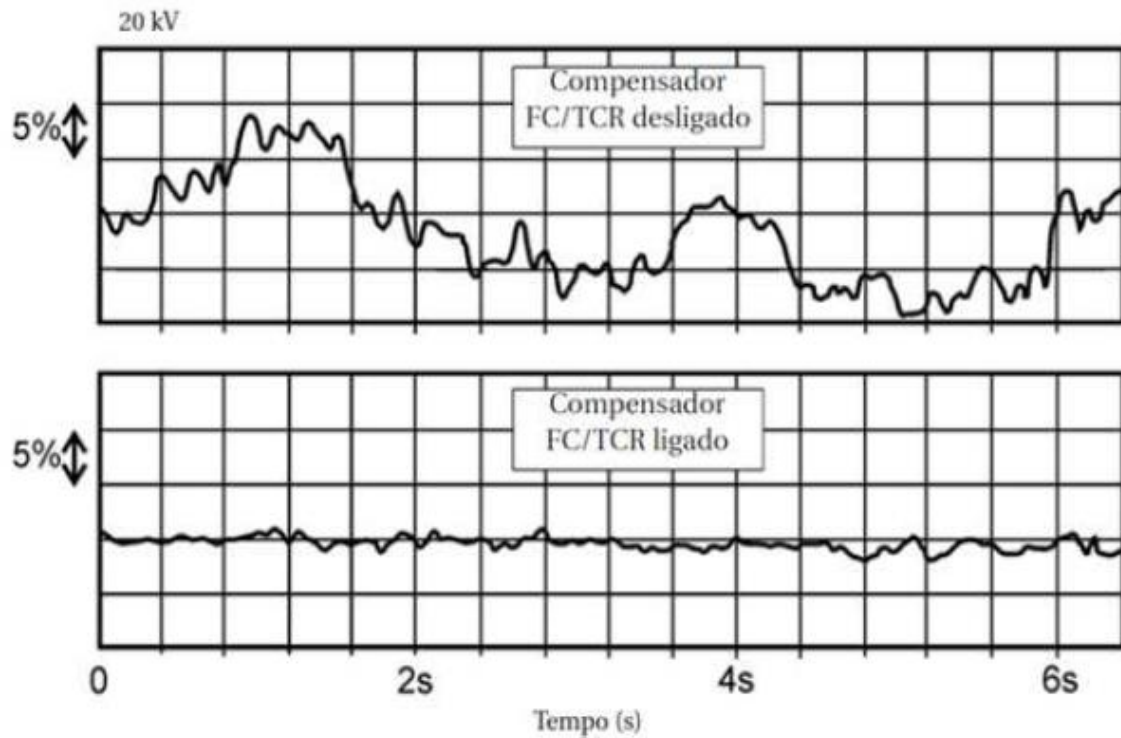


Fonte: Rocha, 2016

Pode-se observar que no compensador estático existe um capacitor fixo em série com uma pequena indutância. A reatância equivalente desse ramo, em 60 Hz é capacitiva. A indutância em série atenua a entrada de correntes com frequências harmônicas, pois o chaveamento dos tiristores gera harmônicos de corrente no sistema. No outro ramo, encontra-se um indutor fixo em série com os tiristores em anti-paralelo. O chaveamento dos tiristores controla a corrente de entrada no indutor e, portanto, controla o consumo de reativo indutivo. É esse controle que permite que o reativo que vem da fonte seja mantido aproximadamente constante (ROCHA, 2016).

A Figura 12 possui dois gráficos com a tensão de grandeza representada no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal. No primeiro gráfico pode-se observar que existe uma grande variação no valor eficaz da tensão. Isso evidencia que existe flutuação de tensão, nesse caso o compensador estático dinâmico não está ligado. No segundo gráfico, com o compensador ligado, a variação do valor eficaz de tensão é minimizado, evidenciando a eficácia do compensador adotado.

Figura 12 - Gráficos de tensões com e sem compensador estático dinâmico



Fonte: Rocha, 2016.

A segunda possibilidade para atenuar a flutuação de tensão é aumentar a potência de curto-circuito em relação a potência da carga. Esta abordagem é mais bem aplicada na fase de projetos, pois os custos são menores do que a sua execução com a instalação em funcionamento (ROCHA, 2016).

Podem ser empregadas algumas medidas para obter-se o aumento da potência de curto-circuito, entre elas:

- Conectar a carga a um nível de tensão maior nominal;
- Instalar capacitores em série;
- Aumentar a potência nominal do transformador ou colocar outro transformador em paralelo;

Para reduzir o fenômeno da cintilação, pode-se utilizar uma técnica bem básica que é usar transformadores diferentes para separar a alimentação das cargas flutuantes da alimentação do sistema de iluminação (ROCHA, 2016).

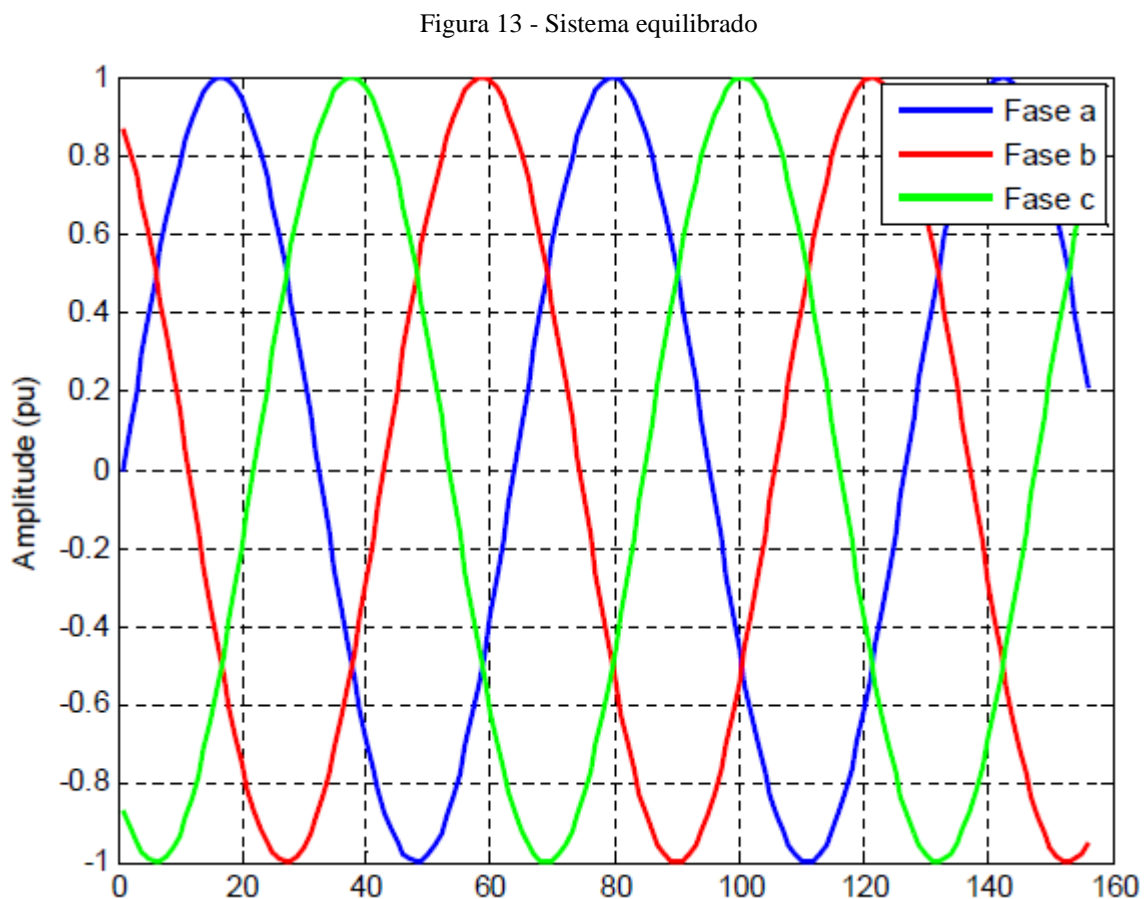
## 7 DESQUILÍBRIO DE TENSÃO

### 7.1 DEFINIÇÃO

Desequilíbrio de tensão pode ser definida como a razão entre a componente de sequencia negativa, ou zero, pela componente de sequencia positiva (KERN, 2008).

A tensão elétrica apresenta um desequilíbrio quando um sistema trifásico possui fases com módulos diferentes entre si, ou não apresentam uma defasagem de  $120^\circ$  elétricos, ou se estas condições se apresentam de forma simultânea (KERN, 2008).

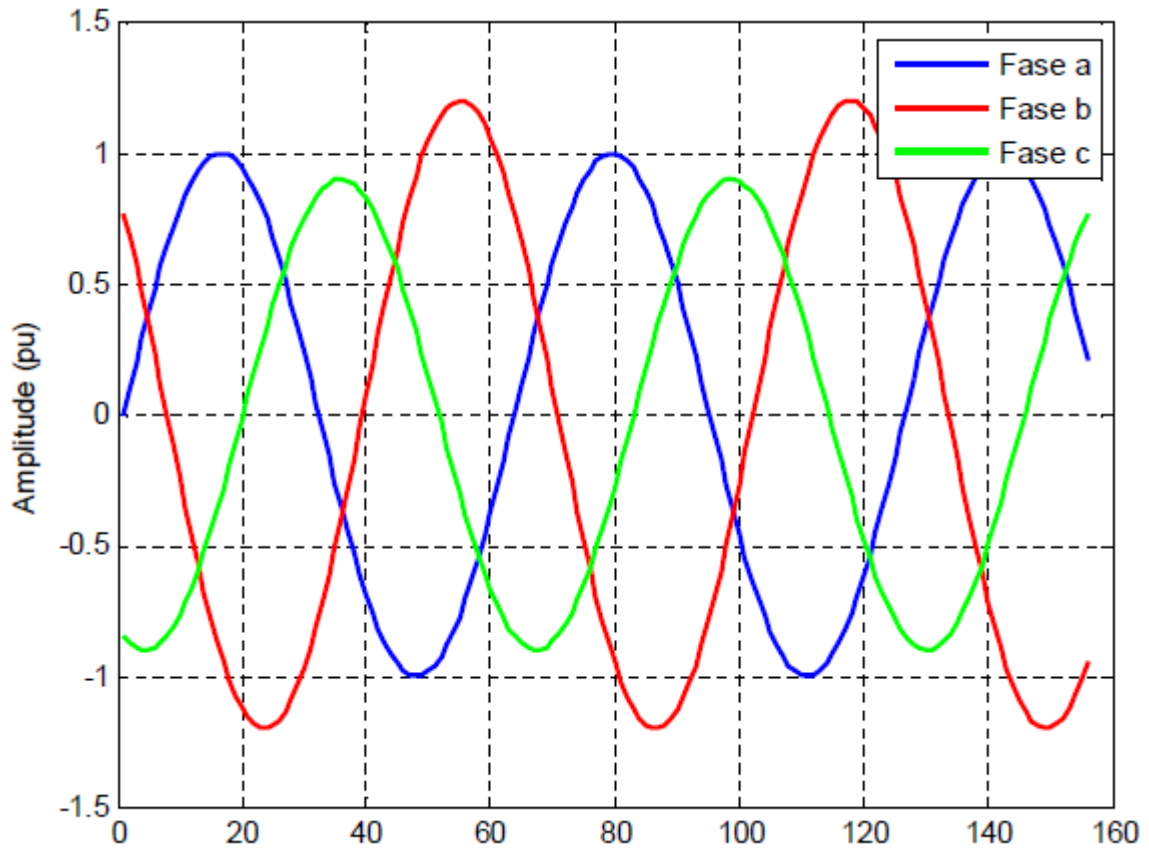
A Figura 13 apresenta como são as formas de onda em um sistema polifásico equilibrado.



Fonte: Kern, 2008

A Figura 14 mostra a forma de onda de um sistema polifásico desequilibrado.

Figura 14 - Sistema desequilibrado



Fonte: Kern, 2008

A natureza dos desequilíbrios de tensão pode estar à desigualdade na magnitude das tensões e desvios nos ângulos de fase. O equilíbrio das tensões é responsabilidade do consumidor que deve manter o equilíbrio adequado para um bom funcionamento do sistema elétrico (MERKLE, 2018)

As normas internacionais EN-50160 ou a série IEC 61000-3-x estabelecem como o limite de 2% para a baixa tensão e a média tensão, e 1% para a alta tensão. No Brasil, o valor de referencia nos barramentos do sistema de distribuição é definido pelo PRODIST - módulo 8, e deve ser igual ou inferior a 2%, com exceção da baixa tensão (ROCHA, 2016).

Para se caracterizar o desequilíbrio de tensão podem ser feitos de diversas maneiras. O método utilizado pelo PRODIST - Módulo 8 é o método das componentes simétricas. Neste método, o grau de desequilíbrio é definido pela relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva (ROCHA, 2016). A Equação 11 expressa o calculo para o desequilíbrio de tensão segundo o PRODIST - Módulo 8.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde:

FD - Fator de Desequilíbrio;

$V_-$  - Magnitude da tensão de sequência negativa (RMS);

$V_+$  - Magnitude da tensão de sequência positiva (RMS);

Alternativamente, pode-se utilizar a Equação 12, que conduz a resultados em consonância com a formulação anterior.

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (12)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (13)$$

Onde:

$V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  - Magnitudes das tensões trifásicas de linha (RMS);

## 7.2 CAUSAS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão é um problema sério de qualidade de energia, afeta principalmente os sistemas de distribuição de baixa tensão. Alguns dos problemas gerados pelo desequilíbrio podem afetar significativamente o funcionamento dos equipamentos conectados a ele (ROCHA, 2016).

O desequilíbrio de tensão possui basicamente dois tipos de origem: estrutural e funcional. As causas estruturais correspondem a qualquer desequilíbrio na rede elétrica, como transformadores, linhas de transmissão e bancos de capacitores desbalanceados. Esse tipo de causa é praticamente constante, devido a pequena variação dos parâmetros da rede elétrica. As causas funcionais correspondem a distribuições desiguais de carga nas três fases, seja pela



presença de cargas trifásicas desequilibradas, pela má distribuição de cargas monofásicas ou pela variação nos ciclos de demanda de cada fase (REZENDE; SAMESIMA, 2009).

O desequilíbrio de cargas monofásicas é o principal gerador do desequilíbrio das correntes que como consequência gera o desequilíbrio das tensões. Quando um sistema é projetado, é projetada a distribuição das cargas monofásicas ligadas a ele, no entanto, estas cargas são ligadas e desligadas de acordo com a necessidade. Assim, as correntes nas fases são desequilibradas gerando desequilíbrios de tensão em função de quedas de tensão diferentes em cada fase (MERKLE, 2018).

Outra causa dos desequilíbrios de tensão podem ser as linhas de transmissão aéreas. Devido a distribuição geométrica dos condutores de fase, as capacitâncias intrínsecas entre os condutores de fase não são iguais. Sendo assim, as fases tem diferentes parâmetros causando diferentes quedas de tensão na passagem da corrente elétrica. A transposição das fases é o método utilizado para diminuir o problema (ROCHA, 2016).

Na micro geração distribuída é comum o uso de sistemas monofásicos ou bifásicos de geração, sendo assim, devem ser tomados cuidados especiais para que as fases se mantenham com uma tensão adequada na baixa tensão. A geração distribuída é usualmente operada no modo de “não controle a tensão”, neste modo, a geração distribuída fornece potência ativa a um fator de potência constante e a tensão do circuito muda de acordo com o efeito da inserção de potência. Existem indicadores que limitam o efeito de conexão da geração nas amplitudes da tensão, no desequilíbrio e na distorção harmônica (ROCHA, 2016).

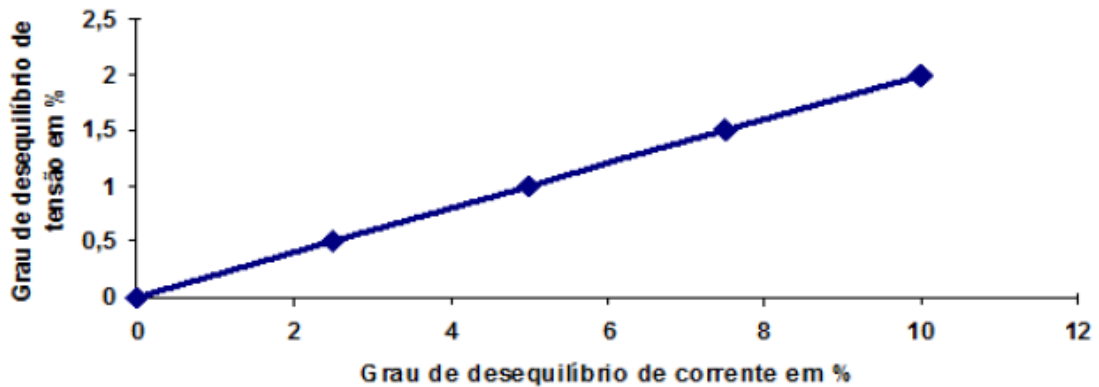
### 7.3 CONSEQUÊNCIAS DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

O efeito da circulação da componente de sequência negativa em um sistema elétrico de potência resulta em perdas adicionais de energia, diminuição da capacidade de transmissão de energia através da componente de sequência positiva, aquecimento adicional de equipamentos e, principalmente, afeta a operação de motores de indução (ROCHA, 2016).

A presença da componente de sequência negativa nos motores de indução gera um fluxo magnético que rotaciona em sentido inverso ao fluxo principal. Como consequência traz a redução da eficiência energética, aumento da temperatura de operação, redução do conjugado disponível, a existência de torque pulsante e a redução da vida útil (MERKLE, 2018).

A Figura 15 demonstra um gráfico com valores típicos de relação entre o grau de desequilíbrio de tensão e o grau de desequilíbrio de corrente em um motor de indução.

Figura 15 - Relação entre os graus de desequilíbrio de tensão e de corrente



Fonte: Rocha, 2016

Analisando a Figura 15 podemos perceber que mesmo um pequeno desequilíbrio de tensão provoca um grande desequilíbrio de corrente no motor de indução.

Outro problema causado pelo desequilíbrio de tensão é o aquecimento adicional, ele faz com que a vida útil do motor seja reduzida. Um motor que não esteja em seu carregamento pleno ou em que a temperatura ambiente esteja baixa permite um aumento no grau de desequilíbrio sem afetar a vida útil esperada (Rocha, 2016).

A Figura 16 mostra a relação entre a vida útil do motor e o desequilíbrio de tensão.

Figura 16 - Relação entre a vida útil e o desequilíbrio de tensão



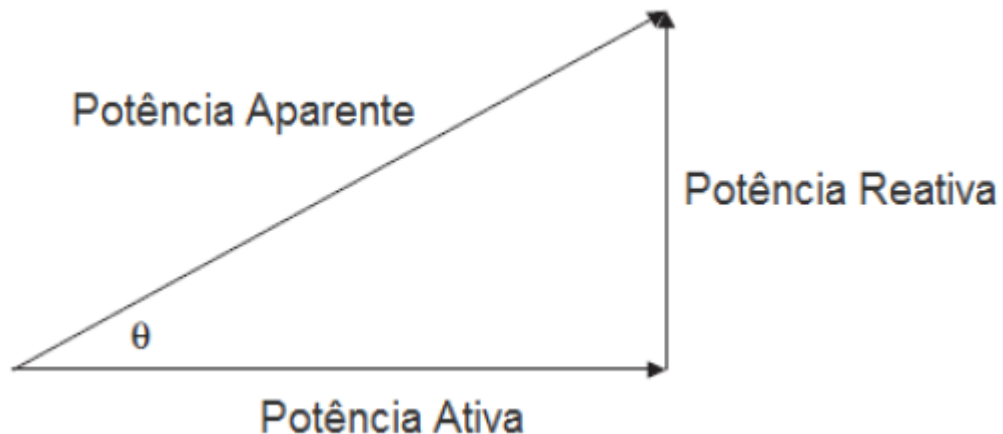
Fonte: Rocha, 2016

Os fabricantes de motores geralmente garantem a vida útil nominal para desequilíbrios de até 1%, porém, na prática não é isto que acontece e o desequilíbrio é bem maior. Por esta razão os motores são superdimensionados quando são especificados por técnicos experientes, esse superdimensionamento acaba prejudicando a eficiência e o fator de potência da instalação, mas por outro lado garante a continuidade do processo industrial (ROCHA, 2016).

## 8 FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência é o ângulo de defasagem entre a potência ativa e a aparente no triângulo de potências, conforme Figura 17. Esse indicador determina a eficácia com que a potência ativa está sendo transferida para a carga. O fator de potência só poderá ser considerado igual ao cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente no caso de ambas as grandezas serem senóides puras, ou seja, que não possuam componentes harmônicas (ROCHA, 2016).

Figura 17 - Triângulo de potência



Fonte: Rocha, 2016

Podemos definir as potências aparente, ativa e reativa de acordo com Martinho (2012). Potência aparente ( $S$ ) é o valor total da potência que será utilizada de uma fonte geradora, ou seja, é a soma vetorial da potência ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ). A potência ativa ( $P$ ) é a componente da potência aparente ( $S$ ), que é utilizada por um equipamento para realizar trabalho, ou seja, é a potência transformada integralmente em trabalho. Já a potência reativa ao contrario da potencia útil, é a componente da potência aparente que não realiza trabalho. A parece no circuito devido às características das impedâncias dos componentes da rede e dos equipamentos ligados a ela.

O triângulo de potência nos mostra que o ângulo entre as potências aparente e ativa representa quanto um circuito é eficaz no uso da energia, isto é, quanto mais próximo de 1 o cosseno do ângulo, menor será a potência reativa e, conseqüentemente, as perdas serão menores (MARTINHO, 2012).

O valor do fator de potência segundo o PRODIST - Módulo 8 deverá ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa, ou das respectivas energias, utilizando as Equações 14 e 15.

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (14)$$

$$fp = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (15)$$

Onde:

fp - Fator de potência;

P - Potencia ativa [W];

Q - Potência reativa [VAr]

EA - Energia ativa;

ER - Energia reativa;

O controle do fator de potência deverá ser efetuado por medição permanente e obrigatória no caso de unidades consumidoras pelo Sistema de Distribuição de Média Tensão (SDMT) e Sistema de Distribuição de Alta Tensão (SDAT) ou por medição individual permanente e facultativa nos casos de unidades consumidoras do grupo B com instalações conectadas pelo Sistema de Distribuição de Baixa Tensão (SDBT), observando do disposto em regulamentação.

Através da resolução 456 da ANEEL, o Brasil estabeleceu o valor de 0,92 indutivo durante o dia e capacitivo durante a madrugada. E determina que a concessionária deve cobrar um valor para instalações com alimentação em média tensão. A resolução ainda define que a empresa de energia pode ou não cobrar esse ajuste de fator de potência em baixa tensão, ficando a critério da mesma (MARTINHO, 2012).

A Tabela 8 relaciona o fator de potência com o ângulo  $\Phi$  e a porcentagem de acréscimo na conta de energia.

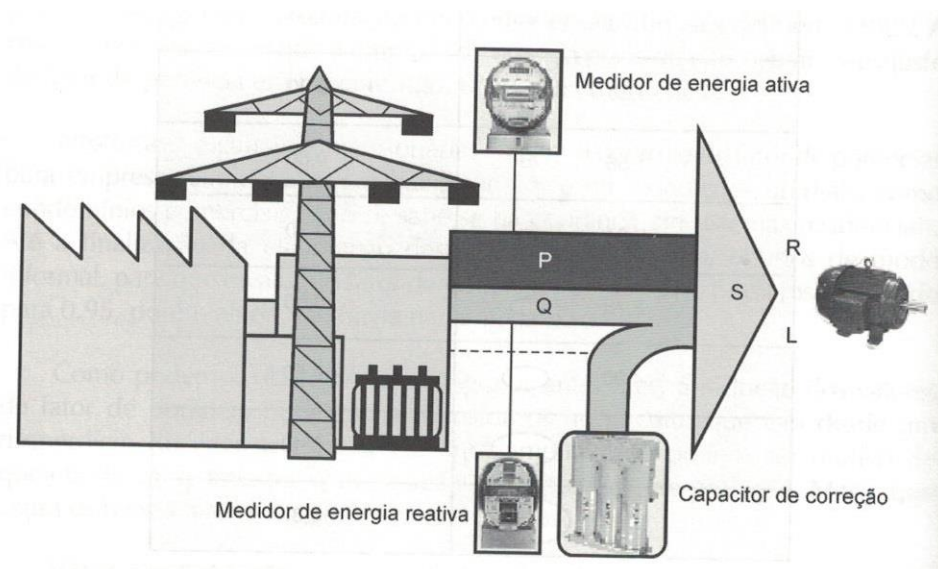
Quadro 8 - Relação fator de potência x ângulo x acréscimo conta de energia

$dPF = \cos \Phi$	Ângulo $\Phi$	Acréscimo %
0,95	18,19	0,00
0,92	23,07	0,00
0,90	25,84	2,20
0,85	31,79	8,30
0,80	36,87	15,0
0,75	41,41	22,7
0,70	45,57	31,4
0,65	49,46	41,5

Fonte: Martinho, 2012

Com a tabela podemos observar que um fator de potência médio de 0,8, a conta de energia fica 15% mais cara. Para solucionar este problema, é necessário inserir energia reativa no circuito para que o fator de potência seja aumentado e chegue ao valor desejado, conforme mostra a Figura 18.

Figura 18 - Representação da correção de fator de potência



Fonte: Martinho, 2012

A melhor forma de se fazer isso é usar banco de capacitores. A inserção de bancos de capacitores para a correção do fator de potência fará com que a energia seja restabelecida e com isso reduzirá as perdas e todas as situações inerentes ao baixo fator de potência (MARTINHO, 2012).

Outro fator que deve ser levado em consideração é o caso da presença de harmônicas, que podem afetar significativamente o fator de potência de um circuito, e que podem também influenciar negativamente ou positivamente a correção através de capacitores (MARTINHO, 2012).

Para a aplicação de capacitores onde existe circulação de correntes harmônicas, uma forma de diminuir a perda da vida útil do banco é sobredimensionar a sua tensão nominal. Ou seja, utilizar um capacitor de 440 volts de valor nominal em uma instalação elétrica cuja tensão nominal é de 380 volts (ROCHA, 2016)

A inserção de capacitores na rede pode não solucionar os problemas de energia reativa. Em alguns casos de cargas de acionamento rápido, como, por exemplo, guindastes, elevadores, fornos a arco, entre outros, recomenda-se o uso de compensação estática de reativo, que são mais conhecidos como compensadores de energia reativa em tempo real. Estes dispositivos possuem tempo de manobras rápido, cerca de 16ms, e utilizam a injeção de reativos com elementos estáticos de manobra de capacitores. (MARTINHO, 2012).

As principais vantagens em se manter o fator de potência podem ser: a redução do preço da fatura de energia elétrica, a liberação da capacidade em kVA dos transformadores, a liberação da capacidade de transferir potências aos alimentadores, redução nas perdas de energia para a transferência de potência entre a concessionária e o consumidor e a menor queda de tensão, devido à diminuição do valor eficaz da corrente, melhorando a regulação da tensão nas linhas (ROCHA, 2016).

## 9 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

A variação de frequência é definida segundo Martinho (2012) como “o desvio no valor da frequência fundamental, que pode ser 50 ou 60 Hz, e tem origem normalmente na geração de energia elétrica e pode ser um grande desafio para quem encontra esse distúrbio”.

A frequência é um importante parâmetro para se avaliar as características de operação de um sistema elétrico. A frequência deve ser a mesma em todo o sistema elétrico interligado, uma vez que está vinculada com a velocidade de rotação dos geradores síncronos. Para manter a frequência constante há o controle centralizado entre a energia que está sendo consumida e a que está sendo gerada (ROCHA, 2016).

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”.

De acordo com o PRODIST - Módulo 8 as instalações de geração conectadas ao sistema de distribuição devem garantir que a frequência retorne para a faixa de 59,9 Hz a 60,5 Hz no prazo de 30 segundos após sair desta faixa, quando de distúrbios no sistema de distribuição, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração.

A Tabela 9 apresenta as faixas de frequência e qual o tempo máximo do desvio da frequência.

Quadro 9 - Faixas de frequência e tempo máximo de exposição

Desempenho	Tempo acumulado máximo de exposição a desvio de frequência (segundos)
$f > 60 \text{ Hz}$	0
$63,5 < f \leq 66,0 \text{ Hz}$	30,0
$62,0 < f \leq 63,5 \text{ Hz}$	150,0
$60,5 < f \leq 62,0 \text{ Hz}$	270,0
$58,5 < f \leq 59,5 \text{ Hz}$	390,0
$57,5 < f \leq 58,5 \text{ Hz}$	45,0
$56,5 < f \leq 57,5 \text{ Hz}$	15,0
$f < 56,5 \text{ Hz}$	0

Fonte: ONS - Submódulo 25.6, 2010



A variação de frequência acontece no sistema de geração e por uma falha nos controladores de velocidade dos geradores. Porém o grande desafio não está no sistema das concessionárias, mas nos sistemas isolados, ou de geração própria, que a regulamentação não pode fiscalizar. Esse desafio consiste em obter sistemas de geração ou cogeração que também consigam obter do sistema uma velocidade constante com a ajuda de automação de correção e atenda os valores de frequência solicitados pelos equipamentos que estão ligados a rede (MARTINHO, 2012).

Atualmente, a nível mundial, são utilizadas apenas duas frequências para a transmissão e distribuição de energia elétrica, que são a frequência nominal de 50 Hz, mais utilizada na Europa e a de 60 Hz mais utilizada nos Estados Unidos e que é utilizada no Brasil.

A frequência de 60 Hz apresenta vantagens como o menor uso de materiais e o menor volume de equipamentos eletromagnéticos como transformadores e máquinas elétricas. Por outro lado, para transmissões em longa distância quanto mais baixa a frequência melhor, pois assim, as reatâncias do sistema são menores e melhor é a sua estabilidade (MERKLE, 2018).

## 10 QUALIDADE DA ENERGIA POR SEGMENTO

Neste capítulo vamos ver como a qualidade de energia afeta alguns setores, como a geração, transmissão e distribuição de energia, setores industriais, comerciais e residenciais e até mesmo instalações elétricas especiais.

### 10.1 GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO

Desde a geração, passando pela transmissão, chegando a distribuição e ao consumidor, existem um longo caminho a ser percorrido, e com isso existe a possibilidade de ocorrer distúrbios na energia que afetam na qualidade da mesma. Como, por exemplo, a incidência de descargas atmosféricas, faltas causadas por diversos motivos, como queda de árvores, animais silvestres, acidentes automobilísticos ou até mesmo alteração nas características dos condutores por temperatura ou até seu rompimento.

Situações como essa podem causar sérios problemas para os consumidores, que na ocorrência de uma falha recebe a energia elétrica com o distúrbio, podendo causar prejuízos. Por isso, é de suma importância o monitoramento da energia elétrica desde a geração até a entrega da energia e a pronta correção dos distúrbios, caso sejam possíveis para que os efeitos sejam minimizados (MARTINHO, 2012).

Algumas regras que são definidas pela ANEEL através do PRODIST - Módulo 8 e são aplicadas às empresa que geram, transmitem e distribuem a energia pública, de forma a garantir que estejam atentas as suas obrigações.

Estão sujeitos a essas regras:

- Concessionárias, permissionárias e autorizadas dos serviços de geração distribuída e de distribuição de energia elétrica;
- Consumidores de energia elétrica, conectados ao sistema de distribuição, em qualquer classe de tensão (baixa, média ou alta);
- Cooperativas de eletrificação rural;
- Importador e exportador de energia elétrica, conectados ao sistema de distribuição;

Os índices de qualidade de energia que são alvo dessa fiscalização e são definidos no módulo 8 do PRODIST abrangem os seguintes setores:

- Unidades consumidoras com instalações conectada em qualquer classe de tensão de distribuição;
- Produtores de energia;
- Distribuidoras;
- Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;

### 10.1.1 Geração de Energia Elétrica

A geração de energia elétrica é uma das principais fases da energia com relação a qualidade, pois é o ponto inicial e com isso deve estar dentro dos parâmetros mínimos de qualidade de energia para que os problemas não sejam causadores de um efeito dominó, isto é, deve ser controlado de forma a gerar uma energia adequada e sem variações para que na transmissão e distribuição os efeitos que venham a ocorrer não se somem a um possível desvio na qualidade inicial (MARINHO, 2012).

Independente da fonte de energia na geração, a qualidade de energia é baseada no nível de tensão gerado que deve ficar dentro de determinados valores máximos e mínimos e normalmente são expressos em porcentagem, na simetria entre as fases, pois a geração normalmente é realizada em um sistema trifásico, portanto as fases devem estar simetricamente defasadas entre si. Outra condição a ser levada em consideração na qualidade de energia gerada é a forma de onda, a geração na sua grande maioria deve ser na forma senoidal e a senoide não pode sofrer deformações (MARINHO, 2012).

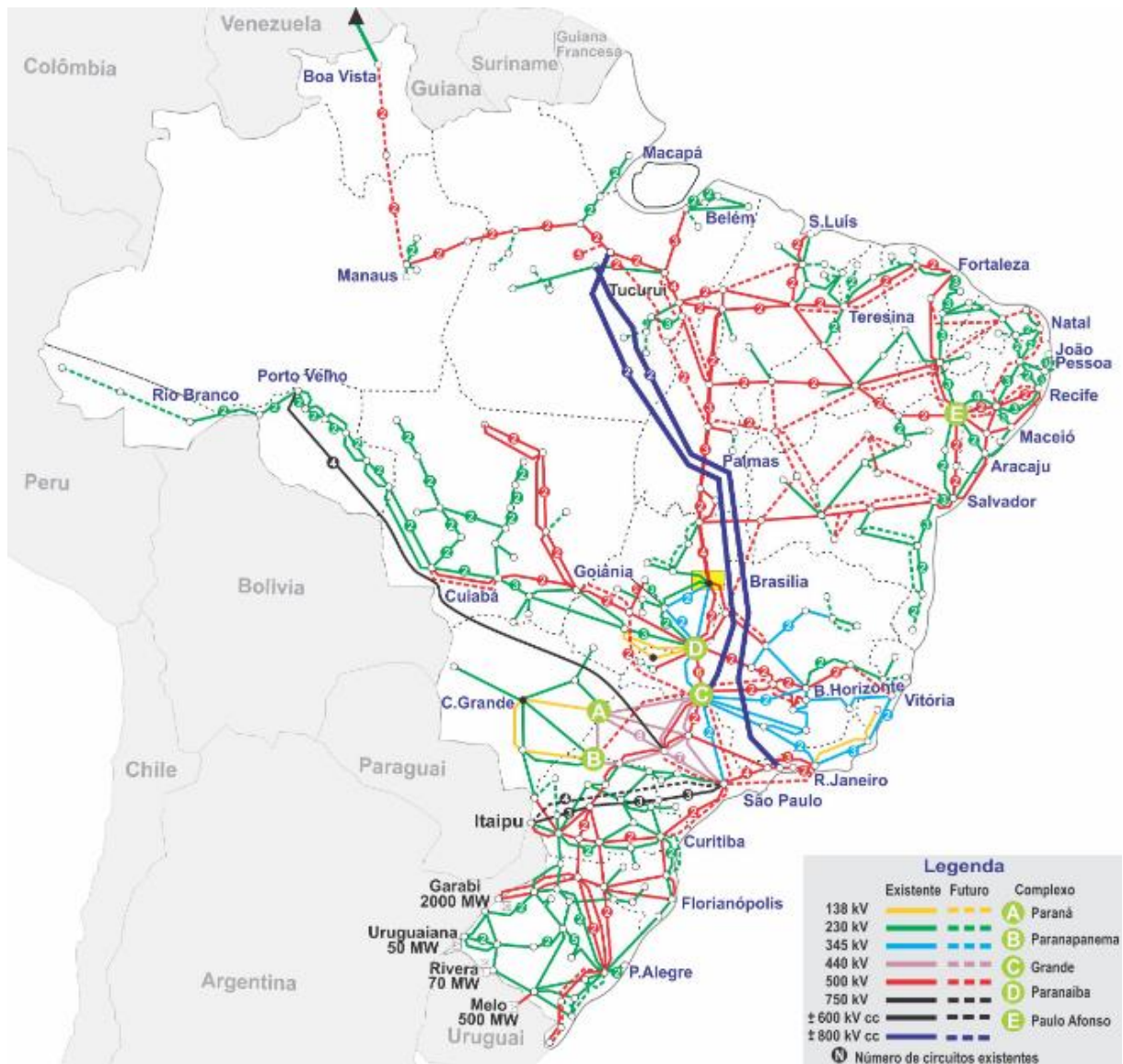
Os parâmetros que garantem a qualidade da energia na geração são nível de tensão, simetria das fases, forma de onda e variação de frequência.

### 10.1.2 Transmissão de Energia Elétrica

A transmissão de energia é a forma como a energia gerada é levada aos consumidores por longas distâncias. Assim como a geração de energia, a transmissão deve se preocupar com a qualidade da energia, avaliando e corrigindo determinados parâmetros, porém, devemos lembrar que enquanto a geração é feita em apenas um local para ser controlado, as linhas de transmissão muitas vezes atravessam o país com seu sistema interligado (MARINHO, 2012).

Conforme a Figura 19 pode-se observar que os condutores percorrem quilômetros e quilômetros passando por campos, vales, montanhas situações passíveis de ocorrer vários distúrbios que possam prejudicar a qualidade da energia elétrica.

Figura 19 - Mapa do sistema interligado nacional



Fonte: Operador Nacional do Sistema (NOS), 2019.

O controle dos índices de qualidade da energia nas linhas de transmissão são mais difíceis devido as longas distâncias percorridas, pois uma simples interrupção em um trecho pode deixar cidades inteiras sem energia elétrica. E devido a essas distâncias, as linhas de transmissão sofrem com temperaturas que podem influenciar os condutores e isolamentos,

sofrem adversidades como descargas atmosféricas, curtos-circuitos causados por quedas de árvores ou qualquer outro distúrbio.

O principal critério para se ter uma boa qualidade de energia na transmissão é o nível de tensão que deve ser mantido dentro dos parâmetros aceitáveis.

### 10.1.3 Distribuição de Energia Elétrica

Semelhante a transmissão de energia elétrica, a distribuição também é feita pelas concessionárias de energia, e em determinadas regiões tem a obrigação de controlar certos parâmetros de qualidade de energia de forma a garantir que os consumidores tenham a disposição a energia necessária a sua disposição.

A distribuição tem um papel fundamental de gestão de energia, ela interliga o consumidor, que precisa de uma energia limpa, com parâmetros definidos e que sente os primeiros efeitos de uma má qualidade de energia. Muitas vezes o próprio consumidor é gerador de distúrbios que acabam repassados para rede de distribuição e, conseqüentemente, causam problemas para os demais consumidores. Cabe a empresa de distribuição de energia elétrica fiscalizar os índices de qualidade de energia, de forma a manter os serviços aos seus clientes e tomando providências quando for necessário (MARINHO, 2012).

O principal problema que podemos encontrar em uma distribuição de energia pode aliar alguns que também são encontrados na transmissão, distúrbios naturais como descargas atmosféricas, quedas de árvores e ação de animais, mas também os problemas que o consumidor pode gerar em sua unidade e que eventualmente refletem na rede de distribuição, como é o caso das harmônicas (MARINHO 2012).

## 10.2 SEGMENTO INDUSTRIAL

A preocupação com a qualidade de energia dentro do segmento industrial é normalmente maior que em outros segmentos, visto que o índice de automação nas indústrias é muito elevado. Em consequência disso, o impacto de problemas com relação a qualidade passa a ser muito maior, pois uma parada de máquinas e queima de equipamentos causam prejuízos financeiros enormes para o empresário e para o usuário (MARTINHO, 2012).

Apesar de haver uma preocupação maior neste segmento com relação a qualidade de energia, podemos dizer que a solução desses problemas ainda está distante. Em muitos casos o investimento é feito pelo preço e pela atuação dos dispositivos de automação e poucas vezes são avaliados o efeito colateral que ele pode gerar aos demais circuitos.

Um exemplo de equipamento que é utilizado para melhorar o desempenho de máquinas e motores são os inversores, mas também são responsáveis pela distorção das correntes, causando correntes harmônicas nas linhas. A aquisição de inversores requer um estudo mais aprofundado do impacto dele na rede em que será instalado, e na maioria dos casos a necessidade da aquisição de inversores que possuam dispositivos que controlem internamente a distorção, de forma a não prejudicar a rede elétrica na qual será instalado (MARTINHO, 2012).

Dentro da indústria, todos os itens que compõem a qualidade de energia devem estar em controle constante para que não sejam motivos de perdas, paradas e prejuízos. Podemos citar aqui o controle do fator de potência que já é exigido e as empresas devem ficar atentas, ou caso contrário serão alvo de multas por parte das concessionárias.

Podemos citar como motivos que afetam a qualidade na indústria as descargas atmosféricas, ou as perturbações que elas geram como surtos de tensão, elevação de tensão de curta duração, entre outros. Mas o principal distúrbio que afeta a indústria são as harmônicas, que além de causarem efeitos nocivos aos equipamentos, são também motivos de desperdício de energia (MARTINHO, 2012).

O controle da qualidade de energia na indústria é ligado a um bom desempenho da produção, que conseqüentemente dá um retorno maior para as empresas e é importante para toda a sociedade.

### 10.3 SEGMENTO COMERCIAL

O segmento comercial vem em uma crescente nos últimos tempos, principalmente nos grandes centros. Além disso, os segmentos de serviços também crescem em uma proporção considerável, o que significa mais áreas comerciais, shoppings, escolas, supermercados, centrais de telemarketing, entre outros. O uso de automação em áreas comerciais ainda tem um índice pequeno se comparado com a indústria, porém é um segmento que demanda um uso expressivo de computadores pessoais, o que pode trazer problemas para a qualidade de energia. No geral, como um todo isso ainda não é um problema

tão grande, entretanto alguns setores como bancos são alvos de preocupação com esses distúrbios, uma parada de alguns segundos pode gerar um colapso em todo o sistema, e aos seus usuários (MARTINHO, 2012).

A área comercial não é afetado por todos os problemas causados pelos distúrbios da energia como na indústria, mas grande parte desses distúrbios já são passíveis de tratamento, como os efeitos das descargas atmosféricas e as variações e interrupções de tensão. Esses distúrbios são tratados com condicionadores de energia (nobreaks, geradores) e na maioria dos casos já incorporam protetores de sobretensão, ou de surto (MARTINHO, 2012).

Outros setores que necessitam o controle dos problemas em relação a qualidade de energia de forma mais intensa são os shoppings, lojas de departamentos ou home centers onde o nível de automação é maior. Porém, neste caso, a preocupação tem a mesma configuração do segmento industrial.

#### 10.4 SEGMENTO RESIDENCIAL

A preocupação com a qualidade de energia nas residências ainda é pequena, porém, mesmo sem perceber ou conhecer os termos de qualidade de energia acabam tomando providências para que alguns itens sejam minimizados. É o caso das interrupções que são tratadas com o uso de nobreaks e também na ocorrência de surtos de tensão por motivos como descargas atmosféricas que devem ser tratados com a instalação de dispositivos de proteção contra sobtensão (DPS) (MARTINHO, 2012).

O segmento residencial vem modificando suas características devido a necessidades como: segurança, conforto e facilidades. Com isso começa a ter uma importância maior no que diz respeito a qualidade de energia. Casas com porte médio ou alto cada vez mais utilizam sistemas automatizados como forma de melhorar o conforto de seus moradores.

Esse índice de automação exige que os equipamentos estejam sempre funcionando adequadamente para cumprir seu papel. Quanto mais equipamentos eletrônicos, maior a demanda por uma energia de qualidade. O segmento residencial é um forte candidato a problemas em um futuro breve, e mostra a tendência da necessidade da realização de um estudo mais apurado neste quesito, seja no projeto, na instalação, na adequação ou até mesmo no uso diário (MARTINHO, 2012).

## 10.5 INSTALAÇÕES ELÉTRICAS ESPECIAIS

Em instalações elétricas especiais como hospitais, áreas militares, indústrias com ambientes potencialmente explosivos requerem um índice muito elevado de cuidados com a energia elétrica e conseqüentemente sua qualidade. Os projetos devem ter um cuidado especial no fornecimento de energia elétrica, levando em consideração os principais efeitos colaterais, conseqüências da implementação de sistemas automáticos, sistemas de condicionamento de energia, geradores, entre outros (MARTINHO, 2012).

O projeto deve adequar às instalações as necessidades, a instalação requer um acompanhamento e medições constantes, chegando a uma manutenção que deve ser sistemática para garantir que os equipamentos funcionem corretamente. Todos os cuidados devem ser tomados para garantir um correto funcionamento dos equipamentos e uma qualidade adequada.

Neste tipo de instalação, um problema ocasionado por uma má qualidade de energia pode trazer conseqüências muito graves, como a morte de pacientes, explosões, incêndios, perda de dados ou perda de proteção do sistema de segurança.



## **11 CUIDADOS COM A QUALIDADE DE ENERGIA**

### **11.1 SEGURANÇA DA QUALIDADE DE ENERGIA**

A segurança da qualidade de energia pode ser vista de diferentes fatores. Pode ser pela segurança da informação (dados), pela continuidade dos serviços ou pela prevenção de acidentes (MARTINHO, 2012).

Quando ocorre sobretensão ou desbalanceamento de fases, ou mesmo a presença de correntes harmônicas em determinados equipamentos, como motores, transformadores e condutores pode-se iniciar um incêndio. Se partirmos do princípio que as instalações elétricas devem ser providas com dispositivos de proteção contra aquecimentos, o incêndio não aconteceria, porém, é provável que o dimensionamento desses dispositivos não tenha levado em consideração alguns parâmetros dos distúrbios de energia elétrica, como a circulação das frequências harmônicas (diferentes de 60 Hz), e não atuando, podendo ser o causador de uma ignição e possível incêndio.

Os surtos transitórios resultantes de descargas atmosféricas podem elevar substancialmente sua tensão e gerar aquecimento e faiscamento, podendo ser o ponto de ignição de incêndio. Este é um exemplo onde a qualidade de energia pode afetar a segurança do patrimônio. A presença de afundamentos de tensão, Flicker, harmônicos, surtos pode contribuir para um mau funcionamento de controle e proteção e com isso causar acidentes envolvendo pessoas, como por exemplo o acionamento acidental de prensas ou a falha em sensores de temperatura, entre outros problemas (MARTINHO, 2012).

Surtos de tensão, harmônicas e Flicker são fontes de problemas na segurança das informações, e podem ser os causadores de interferências no envio de informações entre dois dispositivos de comando e controle.

O maior fator para a avaliação da qualidade de energia é garantir a continuidade dos serviços. O fato de um problema com a qualidade de energia causar a parada de uma máquina ou equipamento, trazendo prejuízos para as empresas e clientes, faz pensar em eliminar as causas, ou tomar algumas providências para eliminar esses distúrbios e assim reduzir as paradas e o custo do desperdício (MARTINHO, 2012).

## 11.2 COMO MEDIR E IDENTIFICAR OS PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA

Há diferentes maneiras de identificarmos os problemas de qualidade de energia. O mais comum é a ocorrência de problemas na instalação que causam prejuízos, como por exemplo, paradas de máquinas que causam prejuízos financeiros e leva os profissionais a tentarem identificar a causa da parada e iniciar uma avaliação com medições, suposições e medidas a serem tomadas. Outra é a suspeita de desperdício de energia e a manutenção preventiva para que se obtenha uma instalação elétrica adequada e sem riscos de problemas de qualidade de energia elétrica.

Para identificarmos problemas com a qualidade de energia primeiramente devemos avaliar as condições da instalação, desde o projeto até a demanda contratada, passando pelos tipos de cargas instaladas, tipo de ligação de motores e transformadores, equipamentos de automação instalados, entre outros. O fator de potência total e individual também é um item a ser avaliado como premissa para a avaliação da qualidade de energia.

O principal item da avaliação da qualidade de energia é a medição, e a escolha do instrumento de medição adequado é o primeiro passo e depende diretamente da análise e da suspeita do problema de qualidade de energia (MARTINHO, 2012).

Feita a escolha do equipamento, é hora de definir os parâmetros que serão avaliados, e em seguida, o período que se aplicará a medição para que se obtenha uma amostra significativa da qualidade de energia, de forma a facilitar a avaliação dos resultados. O recomendado é que a avaliação da qualidade de energia seja feita no máximo de tempo possível, sendo o ideal pelo menos cinco dias (MARTINHO, 2012).

Após identificados os problemas, deve-se analisar qual a melhor opção para ser efetuada a medição. Se é alugar um equipamento e fazer o levantamento de dados, porém se a empresa não possui funcionários que tenham condição de avaliar os dados coletados, a contratação de uma empresa de consultoria é a melhor opção. Outra decisão que vem ao caso é referente ao modelo de equipamento que deverá ser usado.

## 11.3 MEDIDORES DE QUALIDADE DE ENERGIA DISPONÍVEIS NO MERCADO

O mercado brasileiro possui diferentes modelos de medidores de qualidade de energia, cada um com suas características, funções e preços diferentes. Neste trabalho serão feitas a análise dos 3 modelos mais comuns de serem utilizados e das marcas mais conhecidas, EMBRASUL, MINIPA E FLUKE.

### 11.3.1 Analisador de qualidade EMBRASUL - RE8000

O analisador de energia EMBRASUL - RE8000 foi projetado para adquirir simultaneamente quatro canais de tensão e quatro canais de corrente. Ele realiza a medição de grandezas secundárias, em conformidade com as normas internacionais e nacionais. O seu protocolo de medição e agregação é o descrito na norma IEC 61000-4-30, o que o caracteriza como um equipamento de classe A.

Suas principais características são:

- Diagramação de ligação elétrica na tela que facilita a instalação;
- Agendamento de início e fim de registro, com possibilidade de múltiplas medições;
- Parametrização para que todas as grandezas integrem para registrar em conformidade com a Classe A (61000-4-30);
- Inserção de informações do ponto de medição, com comentários, dados do cliente e geoposicionamento pelo GPS integrado ao equipamento;
- Botão câmera fotográfica que possibilita a fotografia da tela em qualquer momento, para posterior uso em computador para análises e relatórios;
- Parametrização do intervalo de integração diferente para cada grandeza, memorize personalizações de parâmetros (para uso futuro);

O analisador de qualidade RE8000 possui algumas funções exclusivas como:

- Lista de eventos: exibe uma lista de eventos em conformidade com as normas IEC e o PRODIST e ocorrências de transitórios, listando o tipo de evento (classificação), duração em segundos e amplitude (%) dos eventos;

- Gráfico de tendências em tempo real: mostra as tendências das grandezas a cada segundo de mais de 400 variáveis, pré selecionando a visualização em janela de diferentes tamanhos, como 1 minuto, 10 minutos ou por tempo indeterminado;
- Magnitude e duração de eventos: A curva ITIC projeta o percentual de evento de tensão versus tempo de duração da ocorrência. Se estiver dentro da curva, a energia fornecida respeita os limites estabelecidos;
- Monitoramento: tabelas de visualização das grandezas para monitoramento, existem tabelas pré configuradas e permite que o usuário crie sua própria tabela selecionando as grandezas que preferir;
- Tela multigráficos: visualização de forma de onda, fasores, gráfico de barras e curva ITIC em uma mesma tela, facilitando a análise dos principais distúrbios;

A Figura 20 mostra o modelo de analisador de qualidade de energia EMBRASUL - RE8000.

Figura 20 - Analisador de qualidade EMBRASUL - RE8000



Fonte: EMBRASUL, disponível em: <<http://www.embrasul.com.br/solucoes-detalhes?id=3&title=RE8000%20Classe%20A>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

### 11.3.2 Analisador de qualidade MINIPA ET-5062

O analisador de qualidade de energia MINIPA ET-5062 foi projetado para avaliar e analisar os diversos parâmetros da energia elétrica em ambientes industriais, comerciais e residências. É um instrumento que possibilita a exibição instantânea no display TFT retro iluminado, com armazenamento de dados em sua memória interna. Está de acordo com as normas nacionais e internacionais para realizar testes de qualidade de energia.

Suas principais características são:

- Visualização em tempo real;
- Parâmetros gerais da rede: tensão, corrente, frequência, potências, energia,  $\cos \Phi$ , Flicker, picos de tensão e transientes, assimetria, THD % e harmônicos;
- Forma de onda dos sinais: tensões, correntes e harmônicos;
- Diagrama vetorial: tensões e correntes;
- Gravação de distúrbios (afundamentos, picos, harmônicas, interrupção, etc.) em um período de integração (1, 2, 5, 10, 30 e 60 min);
- Capacidade de memória de 8 GB;

Figura 21 - Analisador de qualidade MINIPA ET-5062



### 11.3.3 Analisador de qualidade de energia FLUKE 435 - série II

O analisador de qualidade de energia FLUKE 435-Série II ajudam a localizar, prever, evitar e solucionar problemas de qualidade de energia em sistemas de distribuição de energia monofásicos e trifásicos. Mostra os detalhes da forma de onda da energia, captura e registra os eventos de interferência, faz os cálculos de perda e eficiência energética.

As principais características são:

- Calculadora de perda de energia: medidas de energia ativa e reativa clássicas, energia de harmônicos e desequilíbrios são quantificadas para identificar perdas reais de energia do sistema em dólares (outras moedas locais estão disponíveis);
- Eficiência de energia do inversor: mede simultaneamente a energia de saída CA e a energia de entrada CC para sistemas eletrônicos de energia;
- Captura de dados PowerWave: capturam dados rápidos de RMS, exibem meio-ciclo e formas de onda para caracterizar a dinâmica do sistema elétrico;
- Conformidade total com a classe A: realizam testes de acordo com o exigente padrão internacional da IEC 61000-4-30 Classe A;
- Sinalização de linhas de alimentação: medem a interferência dos sinais de controle de oscilação em frequências diferentes;
- Classificação de segurança mais alta do setor: 600 V CAT IV/1000 V CAT III classificado para uso na entrada da rede elétrica;
- Medição de três fases e do neutro: com quatro sondas de corrente flexíveis inclusas com design avançado fino e flexível para caber nos menores espaços;
- Tendência automática: toda medida é gravada automaticamente, sem a necessidade de nenhuma configuração;
- Monitoração do sistema: dez parâmetros de qualidade de energia em uma tela de acordo com o padrão EN0160 de qualidade de energia;
- Função de Logger: configure para qualquer condição de teste com memória para até 600 parâmetros em intervalos definidos pelo usuário;
- Visualização de gráficos e geração de relatórios com software de análise fornecido;
- Download de dados sem fio: faça o download de dados para o PC sem o uso de fios e capture telas usando o aplicativo Fluke Connect;

Figura 22 - Analisador de qualidade FLUKE 435 - série II



Fonte: Fluke, disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analísadores-da-qualidade-de-energia/435-series-ii>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

#### 11.3.4 Comparativo entre os analisadores de qualidade

Foram analisadas algumas características que são fundamentais para a escolha do melhor equipamento para se utilizar na medição da qualidade de energia com relação aos três equipamentos demonstrados neste trabalho, a Tabela 10 apresenta estes dados.

Quadro 10 - Comparação dos analisadores de qualidade EMBRASUL, MINIPA E FLUKE

Características	EMBRASUL - RE8000	MINIPA ET-5062	FLUKE 435 - Série II
Resolução do conversor analógico - digital	16 bits	16 bits	16 bits

Faixa de medição de tensão	1 - 1000 V	1 - 1000 V	1 - 1000 V
Faixa de medição de corrente	0,1 - 6000 A	0,1 - 3000 A	5 - 6000 A
Faixa de medição de frequência	40 Hz - 75 Hz	42,5 - 57,5 Hz (50 Hz nominal) e 51 - 69 Hz (60 Hz nominal)	42,5 Hz - 57,5 Hz (50 Hz nominal) ou 51,0 Hz - 69,0 Hz (60 Hz nominal)
Período de registro	1 hora a até 3 anos	1 hora a até 1 ano	1 hora a até 1 ano
Efetua cálculo perda média	Sim	Não	Sim
Memória	16 GB	8 GB	8 - 32 GB
Atende a Norma IEC 6100-4-7	Sim	Sim	Sim
Atende a norma IEC 61000-4-30	Sim	Sim	Sim
GPS	Sim	Não	Não
Wi-fi	Sim	Não	Sim
Valor	R\$ 37.900,00	R\$ 27. 339,21	R\$ 34.735,00

Fonte: Autor, 2019

Analisando o quadro podemos perceber que os três analisadores possuem praticamente as mesmas configurações e características técnicas. Portanto a escolha dependerá muito de qual analisador atenderá melhor as necessidades do cliente.



## 12 SOLUÇÕES PARA A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Existem diferentes formas de solucionar os problemas com a qualidade de energia, neste capítulo iremos conhecer algumas delas.

### 12.1 UPS

A sigla UPS vem do inglês, Uninterrupt Power System, que em tradução para o português fica sistema ininterrupto de energia. O termo expressa a função do equipamento que mantém a energia fornecida sem interrupções, mesmo durante os distúrbios causados na energia, como os afundamentos e interrupções (MARTINHO, 2012).

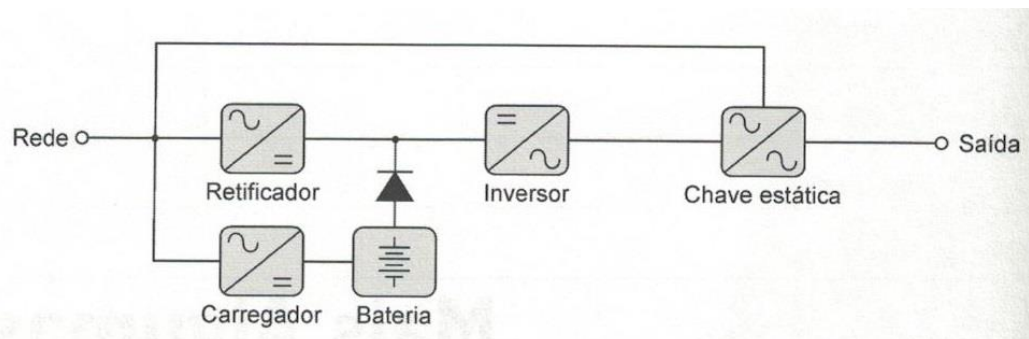
Outra função dos UPS é fornecer ao sistema que estiver ligado um sinal condicionado, ou seja, estabilizado e dentro dos parâmetros estabelecidos, de forma a filtrar e eliminar distúrbios indesejáveis que estejam ocorrendo na rede, antes desse equipamento.

Os UPS são classificados em dois tipos, on-line e off-line (stand-by) que foram definidos através da norma técnica NBR 15014/04.

#### 12.1.1 UPS On-line

Nos sistemas on-line a carga é alimentada diretamente pelo conjunto UPS, que é alimentado pela rede, este sistema é apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Diagrama UPS on-line



Fonte: Martinho, 2012

A rede alimenta um sistema retificador que serve tanto para alimentar o inversor que alimenta a carga como a bateria. Nesta situação a carga não é alimentada diretamente pela

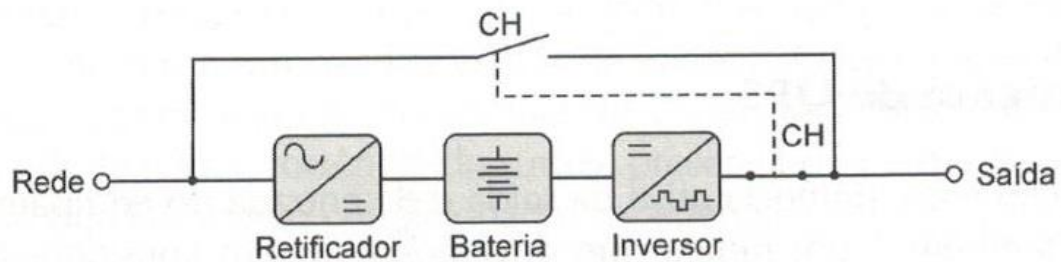
rede, mas por uma forma de onda construída a partir do inversor. Independente de acontecer uma interrupção na rede, a carga sempre estará alimentada pelo conjunto de baterias. A vantagem do sistema on-line é que a carga sempre terá uma alimentação estável e com qualidade, porque quem fornece a alimentação é o inversor que pode ser controlado (MARTINHO, 2012).

O sistema UPS on-line é um grande aliado no tratamento da qualidade de energia, porém, requer muito cuidado na escolha para não adquirir um equipamento desnecessário, ou que não atenda as necessidades.

### 12.1.2 UPS off-line ou stand-by

O sistema stand-by se utiliza de um conjunto de baterias, carregador e inversor, além de uma chave de comutação que fará a interligação do sistema de alimentação pelas baterias, sempre que ocorrer uma redução da tensão de alimentação abaixo dos índices permitidos. Assim que a tensão de alimentação do sistema for restabelecida a chave é desconectada e a carga passa a ser alimentada pela rede, como mostra a Figura 24 (MARTINHO, 2012).

Figura 24 - Diagrama de stand-by



Fonte: Martinho, 2012

As desvantagens desse sistema são que não há um condicionamento da energia fornecida a carga, enquanto o sistema não for alimentado pelo conjunto UPS, a carga estará sujeita as condições da rede de alimentação. Outra desvantagem é que no momento da falta de energia há um chaveamento do sistema, o que pode demorar um tempo, e mesmo que seja um tempo muito rápido, alguns equipamentos podem ser afetados.

## 12.2 REGULADORES DE TENSÃO

De acordo com Martinho (2012) “os reguladores de tensão são dispositivos que tem como objetivo manter a tensão de alimentação de um equipamento ou sistema dentro de um valor especificado”. Este dispositivo é utilizado para o controle de tensões em sistemas que apresentam variações de tensão de curta ou longa duração, como SAG, SWELL, sobretensão ou subtensão.

## 12.3 CONDICIONADOR DE ENERGIA

Condicionadores de energia são dispositivos destinados a melhorar a qualidade de energia da alimentação que é fornecida ao equipamento de alimentação elétrica. É um dispositivo que atua sobre todas as variáveis de potência (tensão, corrente, frequência e distorção), entregando energia a um nível adequado para permitir que equipamentos sensíveis ou sujeitos a exposição de redes elétricas possam funcionar corretamente (MARTINHO, 2012).

O uso destes dispositivos pode atender a prevenção e ao controle de vários distúrbios, como, por exemplo, a variação de tensão, ocorrência de surtos, presença de harmônicas, entre outras.

## 12.4 FILTROS

Os filtros são utilizados para desviar correntes de determinadas frequências para outro local, como a terra, por exemplo, ou simplesmente confiná-los em um certo ponto. É possível a utilização de filtros para controlar a qualidade de energia, os filtros são divididos em passivos e ativos.

### 12.4.1 Filtro passivo

Os filtros passivos são formados por um conjunto RLC (resistência, indutância e capacitância), é um dispositivo sintonizado para uma determinada faixa de frequência. A instalação de filtros para o controle de harmônicas, a instalação recomendada é a mais próxima da carga deformante, pois o percurso das harmônicas fica menor, influenciando

menos no circuito. Outra característica que deve ser observada na instalação de um filtro passivo é a decisão da faixa de frequência em que o filtro será sintonizado, ou seja, definir as frequências que o filtro irá permitir passar por ele (MARTINHO, 2012).

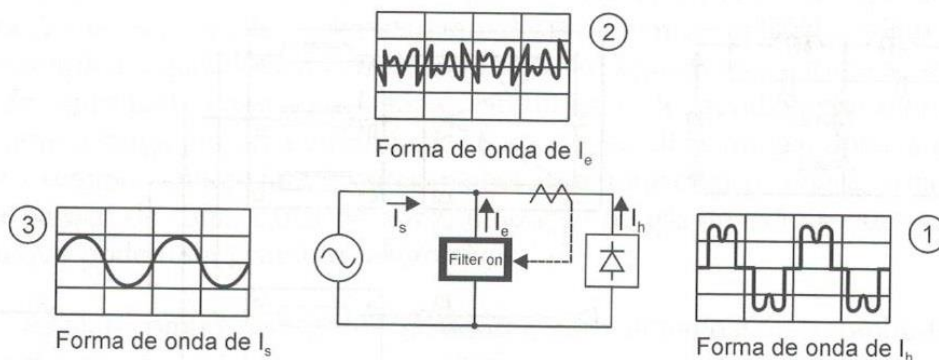
Filtros passivos são totalmente dependentes das características do circuito a que está ligado, ou seja, depende da corrente, tensão, frequência e da impedância da rede. Por esse motivo a aplicação de um filtro passivo requer um estudo apurado do sistema de forma a não sofrer alterações, permitindo que os distúrbios sejam eliminados ou minimizados.

#### 12.4.2 Filtro ativo

Os filtros ativos são utilizados para o tratamento de harmônicas, são baseados em transistores com tecnologia IGBT (transistores de alta velocidade) e tem como função injetar na rede uma forma de onda que seja inversa à forma de onda das harmônicas presentes no circuito. O filtro ativo para eliminação de harmônicas encontrado no mercado faz uma avaliação de sinais com frequência até a 51ª ordem, ou seja, no caso da frequência do Brasil, até 3060 Hz (MARTINHO, 2012).

Com estes dados o filtro utiliza a própria energia do circuito para inserir uma forma de onda contrária que vai eliminar as harmônicas presentes, conforme mostra a Figura 25.

Figura 25 - Funcionamento de filtro ativo



Fonte: Martinho, 2012

Estágio 1: Medição da corrente harmônica gerada pela carga.

Estágio 2: Injeção de correntes harmônicas de fase oposta em relação a carga.

Estágio 3: A corrente harmônica gerada pela carga é cancelada.

O filtro ativo é um sistema totalmente dinâmico que acompanha a variação do sistema e por ser um sistema praticamente on-line, qualquer alteração da característica da rede é avaliada momentos antes de gerar a forma de onda a ser injetada na rede para a correção.

Assim como nos filtros passivos, é importante instalar o sistema ativo o mais próximo da carga deformante possível, pois se reduz a circulação das deformações pelo barramento, eliminando a possibilidade de influenciar outras cargas (MARTINHO, 2012).

## 12.5 COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS

Os compensadores estáticos de reativos são formados por um grupo de capacitores e indutores shunt, controlados por um chaveamento contínuo de tiristores. São sistemas utilizados para o tratamento de energia reativa nos circuitos.

Usados também no tratamento de Flicker gerados pelo consumo excessivo de reativos, o compensador estático reativo pode agregar um benefício muito importante que é a economia de energia, ou ainda a redução das perdas de energia (MARTINHO, 2012).

As principais características de um sistema de compensação estática são:

- Tempo de manobra rápido que atende às cargas dinâmicas como prensas, fornos a arcos, entre outros;
- Isenção de transientes de manobras pela característica do zero crossing;
- Possibilidade de compensação reativa monofásica;
- Eficiência na regulação da tensão pela velocidade da compensação dos reativos;
- Compensação de Flicker pela compensação instantânea da energia reativa;

### 13 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentados o histórico da qualidade de energia no Brasil e a sua importância para alguns setores, como o setor industrial, comercial e residencial. Também apresentou-se os problemas, que podem ocorrer com uma má qualidade de energia de acordo com as normas existentes, e as soluções e cuidados que devem ser tomados para se evitar estes problemas.

Os problemas causados pela falta de qualidade de energia podem causar danos materiais e até pessoais, como acidentes causados pela atuação de dispositivos de forma errônea, aquecimentos indevidos de componentes da instalação que também podem ser motivos para o desperdício de energia, bem como a elevação de custos por paradas de produção.

O uso cada vez maior de dispositivos automáticos e eletrônicos como forma de melhorar o desempenho no dia a dia é também um fator preocupante. Ao mesmo tempo em que são medidas para alcançar a redução do tempo de produção, melhorar a qualidade de um produto ou simplesmente forma de garantir o conforto são causadores de problemas de qualidade de energia gerada, poluindo e modificando os padrões de fornecimento de energia elétrica estabelecida como aceitáveis pelas normas. Portanto, cada vez mais os profissionais das áreas ligadas à qualidade de energia devem ficar atentos a este assunto.

Diante de tudo isso sabemos que a qualidade de energia, ou a falta dela, é uma preocupação vivida por todos os segmentos que estão envolvidos com a energia elétrica e que precisa ser tratada de forma a reduzir seus efeitos, porque como já dissemos, os equipamentos estão cada vez mais sensíveis aos diversos distúrbios.

A necessidade de otimização de trabalhos também faz com que os usuários se utilizem cada vez mais de equipamentos de alta eficiência que demandam uma melhor qualidade no fornecimento de energia elétrica. O crescimento do mercado de meios de comunicação (voz e dados) também é um fator preocupante em relação a qualidade de energia.

A qualidade de energia também é um fator importante para a sustentabilidade do planeta, que é uma preocupação mundial e deve ser tomada como princípio para qualquer atividade nos dias de hoje.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, módulo 8**. Brasília, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: Informação e Documentação - Trabalhos Acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2005.

ARRILLAGA, Jos et al. **Power system harmonic analysis**. New York: Wiley, 1997.

AVANÇADA, Rede de Tecnologia. **Condicionadores de potência**. Disponível em: <<https://www.rta.com.br/produtos/condicionadores-de-potencia/>>. Acesso em: 22 nov. 2019.

BALTAZAR, Antônio Carlos dos Santos. **Qualidade da Energia no Contexto da Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro**. 2007. 139 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo - Usp, São Paulo, 2007.

BERNARDO, Natália. **Evolução da Gestão da Qualidade de Serviço de Energia Elétrica no Brasil**. 2013. 55 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro - Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2013.

CASTRO, Nivalde José de et al. **Qualidade do fornecimento de energia elétrica: aspectos regulatórios e perspectivas**. Rio de Janeiro: Publit, 2017.

HASSIN, Eduardo Sormanti. **Continuidade dos Serviços de Distribuição de Energia Elétrica: Análise Regulatória, Correlação dos Indicadores e Metodologia de Compensação ao Consumidor**. 2003. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

KAGAN, Nelson; ROBBA, Ernesto João; SCHIMIDT, Hernán Prieto. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. São Paulo: Blucher, 2009.

KERN, Fernanda Gonzaga. **Análise da qualidade de energia elétrica utilizando transformada de wavelet**. 2008. 106 f. - Curso de Mestrado em Modelagem Matemática, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008.

LEÃO, Ruth Patôra Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Luiz Marcelo; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo. **Harmônicos em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Qualidade na energia elétrica: efeitos dos distúrbios, diagnósticos e soluções**. São Paulo: Artliber, 2013.

**Manual analisador de qualidade de energia MINIPA ET-5062**. Disponível em: <<http://minipaelectric.com.br/produto/et5062>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

**Manual analisador de qualidade de energia e potência Fluke 435 série II**. Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/analísadores-da-qualidade-de-energia/435-series-ii>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

**Manual analisador de Qualidade EMBRASUL RE8000**. Disponível em: <<http://www.embrasul.com.br/solucoes-detalhes?id=3&title=RE8000%20Classe%20A>>. Acesso em: 20 nov. 2019.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.

MERKLE, Anne. **Análise da qualidade de energia**. 2018. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Universitário Unifacvest, Lages, 2018.

REZENDE, Paulo Henrique Oliveira; SAMESIMA, Milton Itsuo. **Efeitos do Desequilíbrio de tensões de suprimento nos motores de indução**. 2009. 30 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.

ROCHA, Joaquim Eloir. **Qualidade da energia elétrica**. 2016. 37 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.



RODRIGUES, Renato; GONÇALVES, José Correia. **Procedimentos de metodologia científica**. Lages: Papervest, 2014.

SENRA, Renato. **Energia elétrica: Medição, qualidade e eficiência**. São Paulo: Baraúna, 2015.