

CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ANNE MERKLE

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA

LAGES

2018

ANNE MERKLE

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA

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

Prof. Dra. Franciéli Lima de Sá

LAGES

2018

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

Amone Mertle

NOME DO ALUNO

Análise da Qualidade de Energia

TÍTULO DO TRABALHO

BANCA EXAMINADORA:

Francieli Lima de Sá, Dra.

Titulação e nome do Orientador(a)

EUGRACIO CANANI WIGGERS

Titulação e nome do Avaliador (a).

Msc Silvio Moraes de Oliveira

Titulação e nome do Avaliador (a).

Francieli Lima de Sá, Dra.

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

Lages, 13 de dezembro de 2018.

Aos meus pais Carlos e Margareth e
meu companheiro Alexandre,
com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar sou grata a Deus por ter me dado sabedoria e com sua força divina me acompanhado ao longo desta caminhada. Em especial agradeço aos meus pais por sempre estarem ao meu lado ao longo da minha vida acadêmica, pela dedicação de seu tempo me auxiliando e me incentivando para que eu não desistisse ao longo dos dias mais difíceis, e principalmente por me fazerem ser curiosa e sempre buscar mais conhecimento e aprendizado. Agradeço também aos meus irmãos por me fazerem buscar sempre mais conhecimento para ser um bom exemplo para eles.

A minha orientadora que acreditou no meu tema de pesquisa e mostrou o caminho por onde seguir, de tal forma que somente assim foi possível à realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos em especial a Cristina, Israel e Rudson que me apoiaram ao longo desta etapa, sem vocês eu também não teria chego até aqui. A todos os professores que fizeram parte deste curso que com certeza contribuíram muito.

Agradeço também ao meu companheiro Alexandre, pelo apoio, paciência, incentivo, e principalmente por ter acreditado nos meus sonhos e me ajudado a realiza-los.

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA

Anne Merkle

Franciéli Lima de Sá

RESUMO

A qualidade de energia é um dos temas mais estudados na engenharia elétrica nos últimos anos. A busca pela crescente melhoria na qualidade de energia se dá pelo aumento da utilização de equipamentos mais sensíveis a perturbações da rede, sejam elas causadas pela rede elétrica da concessionária ou a própria rede interna do consumidor final. Também tem como prioridade a melhoria na qualidade de energia elétrica por conta do uso de equipamentos eletrônicos para fazer o controle dos processos industriais, onde a falha de algum componente pode acarretar a parada da linha de produção. Pensando nisso, este trabalho aborda os principais causadores de perturbações nas redes elétricas, como identificá-los e corrigi-los.

Palavras chave: Analisador. Qualidade de Energia.

ANALYSIS OF ENERGY QUALITY

Anne Merkle

Franciéli Lima de Sá

ABSTRACT

Power quality is one of the most studied topics in electrical engineering in recent years. The search for a growing improvement in energy quality is due to the increase in the use of equipment that is more sensitive to network disturbances, whether caused by the utility grid or the internal network of the final consumer. It also has as priority the improvement in the quality of electric power due to the use of electronic equipment to control industrial processes, where the failure of some component can cause the production line to stop. With this in mind, this paper addresses the main causes of disturbances in the electrical networks, such as identify them and correct.

Keywords: Analyzer. Power Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forma de onda e espectro harmônico de um inversor de frequência	19
Figura 2 - Distorção da forma de onda por harmônicas	20
Figura 3 - Interrupção de tensão de curta duração	28
Figura 4 – Afundamento de tensão de curta duração	30
Figura 5 - Elevação de tensão de curta duração.....	31
Figura 6 – Flutuação de tensão.....	33
Figura 7 – Flutuação de tensão causada por forno de arco	34
Figura 8 - Compensador dinâmico baseado em máquina síncrona	35
Figura 9– Estabilizador estático	36
Figura 10– Gráfico de análise do sistema com o compensador de tensão ligado e desligado.....	37
Figura 11– Distúrbio elétrico transitório impulsivo	38
Figura 12- Distúrbio elétrico transitório oscilatório.....	40
Figura 13- Perturbação oriunda de energização de capacitores	40
Figura 14– Sistema equilibrado.....	42
Figura 15 – Sistema desequilibrado	42
Figura 16– Relação entre os graus de desequilíbrio de tensão e de corrente	46
Figura 17 – Relação entre perda de vida útil e desequilíbrio de tensões	46
Figura 18 – Perfil do valor eficaz da tensão no período de uma semana.....	49
Figura 19 – Perfil do valor eficaz da tensão ao longo de uma semana	54
Figura 20 – Analisador de qualidade de energia FLUKE 435 – Série II	64
Figura 21 - Analisador de qualidade de energia MINIPA ET-5061C	65
Figura 22 - Analisador de qualidade de energia EMBRASUL – RE 8.000	66

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Distorção harmônica individual de tensão.....	22
Quadro 2 - Limite das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)	23
Quadro 3 - Efeito de harmônicos em componentes do sistema elétrico	24
Quadro 4 – Estratégias contra harmônicas	25
Quadro 5 – Classificação das variações de curta duração	31
Quadro 6– Classificação da tensão de atendimento a partir da tensão de leitura para diferentes valores de tensão nominal.....	48
Quadro 7 – Unidades consumidoras ou centrais geradoras com faixa de tensão contratada ≥ 69 kv.....	49
Quadro 8 - Unidades consumidoras ou centrais geradoras situadas em áreas urbanas com faixa de tensão contratada: $1 \text{ kv} < \text{tensão} < 69\text{kv}$	50
Quadro 9 - Unidades consumidoras ou centrais geradoras atendidas por sistemas isolados ou situadas em áreas não urbanas com faixa de tensão contratada: $1\text{kv} < \text{tensão} < 69\text{kv}$	51
Quadro 10 – Limites para avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios.....	57
Quadro 11 - categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos típicos nos sistemas elétricos.....	59
Quadro 12 - Resumo das características dos distúrbios relacionados com a qualidade de energia.....	60
Quadro 13 - Comparativo dos analisadores de qualidade de energia.....	67

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo geral	13
1.2	Objetivo específico	13
1.3	Justificativa	13
1.4	Aplicações.....	14
1.5	Metodologia	14
2	INTRODUÇÃO A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	15
2.1	O que é qualidade de energia elétrica	15
2.2	Importância da qualidade de energia elétrica	16
2.3	Problemas típicos da qualidade de energia elétrica	16
3	HARMÔNICAS	17
3.1	Definição	18
3.2	Indicadores de qualidade harmônica.....	21
3.2.1.	Distorção harmônica individual.....	21
3.2.2.	Distorção harmônica total.....	22
3.3	Quais cargas produzem harmônicas na rede	24
3.4	Soluções para harmônicas.....	25
4	VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO	27
4.1	Interrupções.....	27
4.1.1.	Interrupção momentânea	29
4.1.2.	Interrupção temporária.....	29
4.2	Afundamento de tensão.....	29
4.3	Elevação de tensão.....	30
4.4	Classificação das variações de tensão de curta duração	31
4.5	Solução para a variação de tensão	32
5	FLUTUAÇÃO DE TENSÃO	33
5.1	Definição	33

5.2	Soluções para flutuação de tensão	35
6	TRANSITÓRIO	38
6.1	Transitório impulsivo	38
6.2	Transitório oscilatório	39
6.3	Solução para transitório	40
7	DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES	41
7.1	Definições	42
7.2	Causas do desequilíbrio de tensão	44
7.3	Consequências do desequilíbrio de tensão.....	45
8	TENSÃO EM REGIME PERMANENTE	47
8.1	Regulação de tensão de atendimento.....	48
8.2	Métodos aplicados na regularização de tensão	52
9	FATOR DE POTÊNCIA.....	53
10	VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA	56
11	RESUMO DOS DISTÚRBIOS RELACIONADOS A QUALIDADE DE ENERGIA.....	58
12	MEDIDORES DE QUALIDADE DE ENERGIA DISPONÍVEIS NO MERCADO	62
12.1	Analisador da Qualidade da Energia FLUKE 435 Série II	63
12.2	Analisador de qualidade de energia MINIPA ET-5061C	64
12.3	Analisador de qualidade de energia EMBRASUL – RE 8.000.....	65
12.4	Comparativo entre os modelos escolhidos.....	66
13	CONCLUSÃO	68
	REFERÊNCIAS	69
	ANEXOS.....	71

1 INTRODUÇÃO

A automatização veio para facilitar a vida das pessoas tanto nas tarefas diárias quanto nos processos de produção industrial, por sua vez exigiu do sistema de fornecimento de energia uma demanda maior, para energizar os mais diversos equipamentos eletroeletrônicos.

Os equipamentos eletroeletrônicos que ao longo dos anos vem sendo cada vez mais utilizados são muito sensíveis às variações das formas de onda de tensão e corrente. De acordo com as Normas IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos) – 1159-2009, a IEEE – 519-2014 e a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) com o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), módulo 8, definem os parâmetros aceitáveis para uma boa qualidade de energia.

Para suprir a demanda e manter uma qualidade de energia elétrica boa se faz necessário o uso de analisadores de qualidade de energia, os quais fazem o monitoramento das diversas perturbações que resultam em energia elétrica de baixa qualidade e até mesmo a interrupção do fornecimento de energia, dessa forma auxiliando na identificação dos problemas que estão na rede.

Neste trabalho serão abordados os principais causadores das interferências na qualidade de energia de uma rede elétrica, como são classificados de acordo com os efeitos causados pelos mesmos. Também serão tratadas as formas de correção dos problemas de qualidade de energia, e equipamentos que fazem a análise da rede e identificam suas falhas.

1.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é o estudo dos causadores da baixa qualidade de energia de instalações em baixa, média e alta tensão, como residências, comércios e consumidores industriais.

1.2 Objetivo específico

São objetivos específicos deste trabalho:

- Identificar os principais efeitos causadores de uma baixa qualidade de energia;
- Detalhar como cada efeito é ocasionado;
- Apresentar formas de prevenir que os efeitos causadores de baixa qualidade de energia ocorram;
- Comparar analisadores de energia que já estão no mercado.

1.3 Justificativa

A utilização da eletrônica de potência cada dia mais presente nos processos tanto industriais quanto residências, possibilitou a execução de varias tarefas que antes eram inviáveis. Porém, esses sistemas usam chaves comutadoras que por sua vez tem comportamento semelhante ao de cargas não lineares, gerando harmônicos na rede e tornando assim a rede com uma baixa qualidade de energia.

Essas perdas por baixa qualidade de energia acarretam em um índice muito grande de desperdício de energia elétrica e um gasto muito elevado. Para ter maior controle dos efeitos de uma pobre qualidade de energia se faz necessário um analisador de qualidade de energia que fará o monitoramento e armazenamento dos dados. Possibilitando dessa forma uma maior visão do problema, o que resulta em um planejamento para o equilíbrio da qualidade de energia mais eficiente e eficaz.

1.4 Aplicações

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

1.5 Metodologia

A metodologia adotada será uma pesquisa de cunho qualitativo, no qual consiste na revisão bibliográfica sobre a qualidade de energia. As principais perturbações e os modelos de analisador de qualidade de energia disponíveis no mercado também serão apresentados no trabalho de forma comparativa.

2 INTRODUÇÃO A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 O que é qualidade de energia elétrica

O termo “qualidade da energia” pode ser entendido como o cuidado que se deve ter aos padrões estabelecidos por normas técnicas vigentes no país, no Brasil a norma utilizada é a IEEE ANSI 1159-2009 e a IEEE 519 - 2014. (MEHL, 2001).

Segundo a IEEE 1159 – 2009 a qualidade de energia elétrica pode ser definida por uma ampla variedade de fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a forma de onda da tensão e da corrente em um determinado momento em um determinado local no sistema de energia.

Para garantir o funcionamento correto dos equipamentos eletroeletrônicos deve-se respeitar as normas, pois estes equipamentos foram projetados seguindo limites estabelecidos nas mesmas.(MEHL,2001).

Um sistema possui uma baixa qualidade de energia quando sua onda de tensão e/ou corrente elétrica tem desvios da norma suficientes a ponto de prejudicar o funcionamento ou até mesmo gerar a falha de equipamentos, por sua vez um sistema possui boa qualidade de energia quando atende os requisitos das normas e os equipamentos funcionam sem problemas. (ROCHA, 2016).

A crescente aplicação de equipamentos eletrônicos que podem causar distúrbios eletromagnéticos, ou que podem ser sensíveis a esses fenômenos aumentou o interesse na qualidade de energia nos últimos anos, pois para cada tipo de equipamento há uma sensibilidade diferente em relação a qualidade da energia, desta forma para um determinado equipamento uma baixa qualidade de energia não o prejudica em contra partida outros equipamentos são afetados com esse problema. De qualquer forma se os parâmetros previamente estabelecidos pela norma não são seguidos a confiabilidade do sistema de produção é prejudicada. (IEEE 1159, 2009).

2.2 Importância da qualidade de energia elétrica

Um aspecto muito importante em relação a qualidade de energia é que para uma boa eficiência energia a qualidade da energia fornecida na rede também precisa ser boa. Por exemplo, permitindo que o sistema elétrico tenha um alto conteúdo harmônico isso caracteriza baixa qualidade de energia, o qual provoca perdas através do efeito Joule nos condutores da distribuição de energia, transformadores, entre outros equipamentos. (ROCHA, 2016).

Na busca pelo aumento da eficiência energética foram introduzidos equipamentos eletrônicos, por sua vez estes muitas vezes geram harmônicos no sistema elétrico como é o caso das fontes chaveadas que foram introduzidas no sistema elétrico para fazer a substituição das fontes lineares. (ROCHA, 2016).

O usuário muitas vezes tem grande influência sobre a qualidade de energia do sistema elétrico de distribuição. Pois pode inserir harmônicas de corrente na rede, geradas por equipamentos como conversores de frequência para acionamento de motores, UPS (Uninterruptible Power Supply) também chamado de Nobreak, computadores, entre outros que acabam provocando distorção na onda de tensão, espalhando o problema da baixa qualidade de energia para toda a instalação. (ROCHA, 2016).

É responsabilidade da concessionária de energia manter a qualidade de energia dentro dos níveis descritos em norma até a medição do consumidor, por sua vez é de responsabilidade do consumidor manter os padrões exigidos por norma dentro de sua instalação.

2.3 Problemas típicos da qualidade de energia elétrica

Saber identificar qual é o tipo de fenômeno que está afetando a qualidade de energia do sistema auxilia na compra do equipamento que resolverá o problema da qualidade de energia da mesma. Desta forma a norma IEEE 1159 – 2009 define

sem ambiguidade o conceito dos fenômenos que influenciam a qualidade de energia, são eles as harmônicas, as variações de tensão de curta duração, a flutuação de tensão, os transitórios, os desequilíbrios de tensão, a tensão em regime permanente, o fator de potência e a variação de tensão.

Nos próximos capítulos será abordado cada um destes fenômenos procurando esclarecer a abrangência dos mesmos que caracterizam a qualidade da energia elétrica de uma instalação.

3 HARMÔNICAS

3.1 Definição

Segundo a IEEE 1159 – 2009 harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência na qual o sistema de fornecimento é projetado para operar (denominado frequência fundamental, geralmente 50 Hz ou 60 Hz). Combinado com a tensão ou corrente fundamental, harmônicos produzem distorções na forma de onda. A distorção harmônica existe devido às características não lineares dos dispositivos e cargas ligados ao sistema de potência.

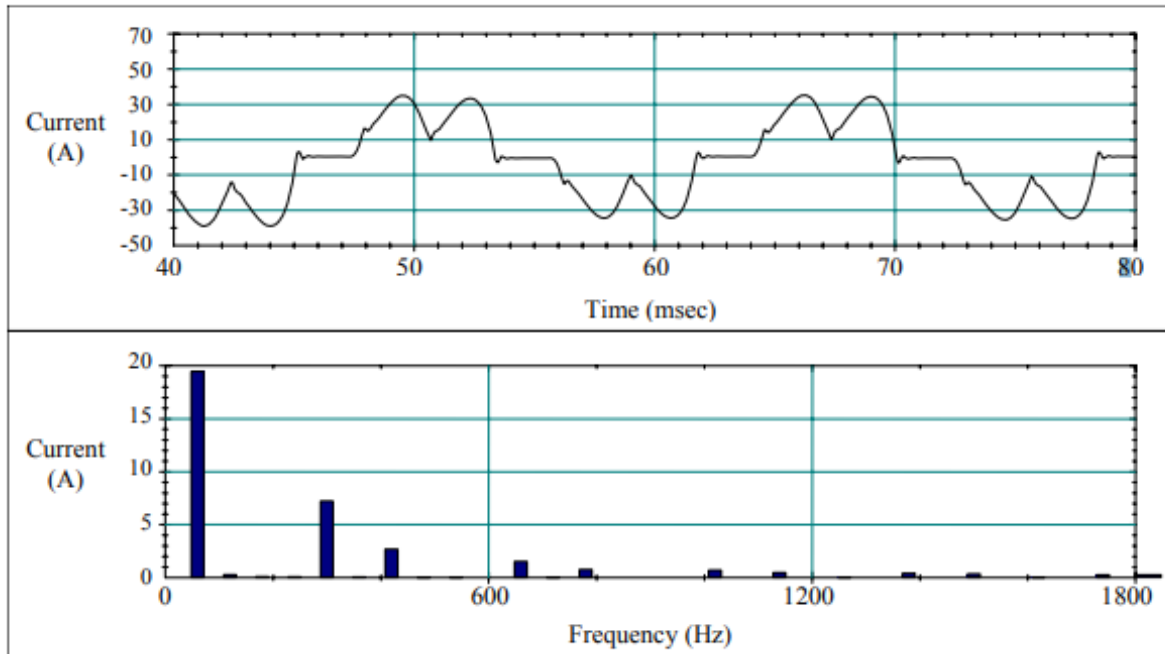
Cargas não lineares são aquelas que distorcem a forma de onda de corrente mesmo quando alimentadas por uma forma de onda de tensão puramente senoidal. (ROCHA, 2016)

Equipamentos de energia baseados em eletrônica são os principais contribuintes de harmônicas no sistema de energia. Esses dispositivos e cargas geralmente podem ser encontrados como fontes de corrente que injetam correntes harmônicas no sistema de energia. A distorção de tensão ocorre porque essas correntes causam quedas de tensão não lineares na impedância do sistema. A distorção harmônica é uma preocupação crescente para muitos clientes e para o sistema de energia. (IEEE 1159, 2009).

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados pelo espectro harmônico completo com magnitudes e ângulos de fase de cada componente harmônico individual. Também é comum usar uma única quantidade, o total de distorção harmônica (THD), como uma medida da magnitude da distorção harmônica. (IEEE 1159, 2009).

Correntes harmônicas resultam da operação normal de dispositivos não lineares no sistema de potência. A Figura 1 ilustra a forma de onda e o espectro harmônico para uma corrente de entrada típica de um inversor de frequência. (IEEE 1159, 2009).

Figura 1 - Forma de onda e espectro harmônico de um inversor de frequência



Fonte: IEEE 1159, 2009

Embora os níveis de distorção atuais possam ser caracterizados pelo total de distorção harmônica (THD) como descrito acima, isso geralmente pode ser enganador. Por exemplo, muitos inversores de frequência exibirão valores total de distorção harmônica (THD) altos para a corrente de entrada quando operando com cargas muito leves. Isto não é uma preocupação significativa porque a magnitude total de harmônicas a corrente é baixa, apesar de a distorção relativa ser alta. (IEEE 1159, 2009).

Para caracterizar as correntes harmônicas de maneira significativa, o padrão IEEE 519-2014 define outro termo, a distorção total de demanda (TDD). Este termo é o mesmo que o total de distorção harmônica (THD), exceto que a distorção é expressa como uma porcentagem da corrente de carga atual selecionada, como a demanda de pico, em vez de um percentual do valor de RMS magnitude de corrente fundamental.

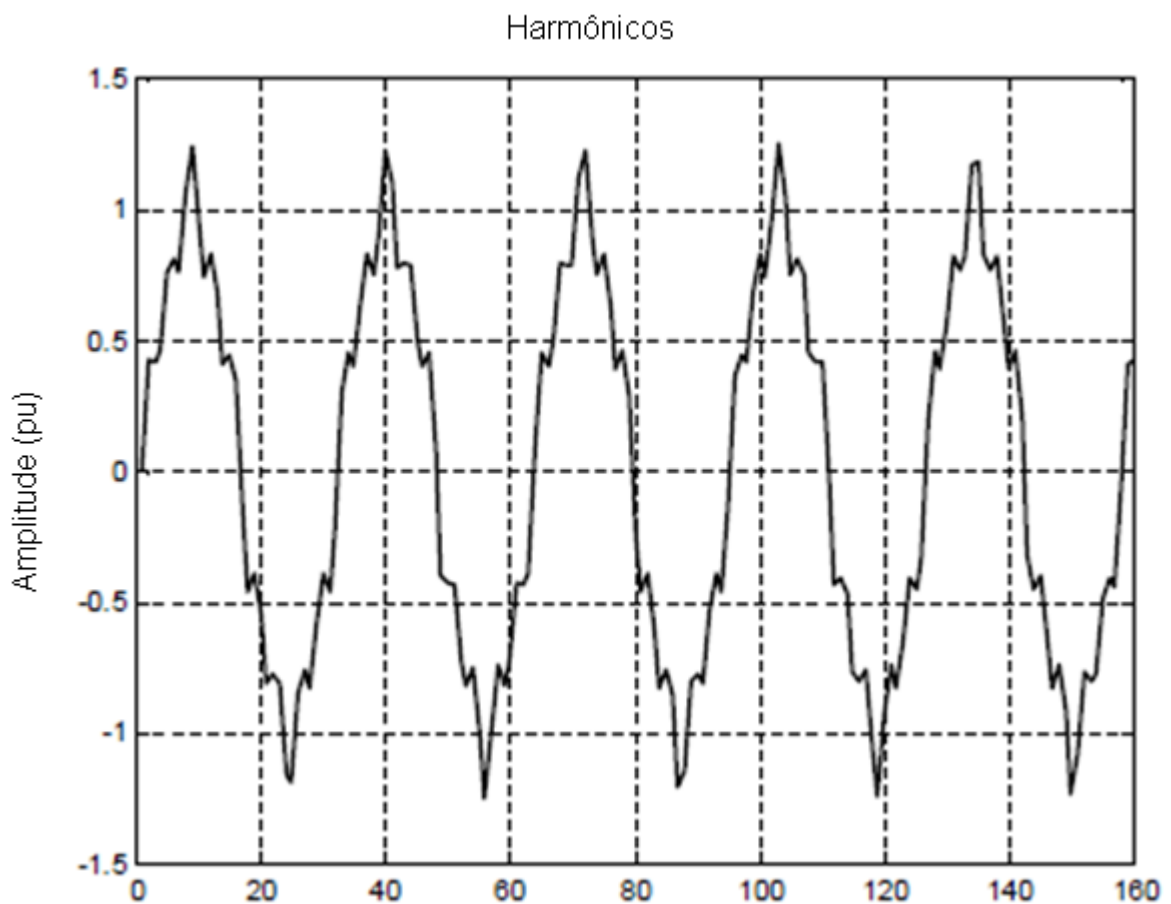
Os harmônicos múltiplos da frequência fundamental são denominados harmônicos ímpares e prevalecem sobre os harmônicos pares. Sendo a frequência de 60 Hz esses harmônicos são os de terceira ordem (180Hz), quinta ordem (300Hz), sétima ordem (420Hz) e assim sucessivamente. Os harmônicos ímpares

causam problemas principalmente em equipamentos e maquinários que funcionam através de uma onda senoidal. Como é o caso dos motores elétricos, onde o seu desempenho é afetado caso na rede transite os mesmos. Eles podem provocar até a degradação da estrutura do motor, pois este foi projetado para funcionar através de uma onda de tensão senoidal pura. (ALDABÓ, 2001).

A norma IEEE 519 - 2014 a qual foi criada com o intuito de fazer o controle de harmônicos em sistemas elétricos limita em 25% o limite para harmônicos pares e para evitar o surgimento de tensão contínua proíbe o uso de conversores meia-onda.

A figura 2 mostra a forma de onda contendo conteúdo harmônico.

Figura 2 - Distorção da forma de onda por harmônicas



Fonte: KERN, 2008.

3.2 Indicadores de qualidade harmônica

Para se obter a quantificação e enquadramento da poluição harmônica em uma instalação foram sendo criados vários indicadores da distorção provocada com base nas regulamentações.

3.2.1. Distorção harmônica individual

É definida como a relação entre a amplitude da harmônica de ordem “h” e a correspondente grandeza (tensão ou corrente) fundamental. A equação 1 calcula em percentual, a distorção harmônica individual da corrente de ordem “h”. (ROCHA, 2016).

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

Onde:

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

I_1 - Valor eficaz da componente fundamental da corrente

A equação 2 calcula em percentual, a distorção harmônica individual da tensão de ordem “h”.

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

Onde:

V_h - Valor eficaz da componente harmônica da tensão de ordem h

V_1 - Valor eficaz da componente fundamental da tensão

O quadro 1 apresenta as distorções harmônicas individuais de tensão de acordo com a ordem harmônica e com a variação de tensão da rede. Os valores permitidos de circulação de harmônicas transitando na rede são dados em porcentagem.

Quadro 1- Distorção harmônica individual de tensão

Ordem harmônica	Distorção Harmônica Individual de tensão [%]				
	$V_n \leq 1kV$		$1kV < V_n \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_n \leq 69kV$	$69kV \leq V_n < 230kV$
Ímpares não múltiplas 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 múltiplas 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: ROCHA, 2016.

3.2.2. Distorção harmônica total

É definida como a relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas e a correspondente grandeza (tensão ou corrente) fundamental. A equação 3 calcula em percentual a distorção total da corrente. (ROCHA, 2016).

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

Onde:

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

O quadro 2 mostra os valores de referência das distorções harmônicas totais.

Quadro 2 - Limite das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT 95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _P 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _I 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST),2018

Sendo, DTT 95% o valor do indicador DTT% (Distorção harmônica total da tensão) que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras validas;

DTT_P 95% o valor do indicador DTT_P% (Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3) que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras validas;

DTT_I 95% o valor do indicador DTT_I (Distorção harmônica total de tensão para as componentes impares não múltiplas de 3) que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras validas;

DTT₃ 95% o valor do indicador DTT₃ (Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3) que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras validas.

3.3 Quais cargas produzem harmônicas na rede

Existem algumas cargas monofásicas que geram harmônicas de corrente na rede são elas: fontes chaveadas, lâmpadas fluorescentes, pequenas fontes de energia ininterruptas, entre outras. Não se esquecendo de que os computadores e televisores, por exemplo, tem como um de seus componentes fontes chaveadas para fazer sua alimentação. (ROCHA, 2016)

Já as cargas trifásicas que produzem harmônicos de corrente são: conversores de frequência para acionamento de motores, grandes fontes de energia ininterruptas, forno a arco, entre outras. O forno a arco é um equipamentos especial, pois é o único que não possui o terceiro harmônico como seu primeiro harmônico ímpar, e também pode produzir harmônicos pares. (PIRES,2006).

O quadro 3 trás os principais equipamentos que sofrem com a presença de componente harmônico no sistema e quais são os efeitos provocados nos mesmos pelas harmônicas.

Quadro 3 - Efeito de harmônicos em componentes do sistema elétrico

Equipamentos	Efeitos devido à presença de harmônicas
Máquinas rotativas	Torque pulsante Ruído audível Sobreaquecimento Perda de vida útil no isolamento
Condutores	Sobreaquecimento Diminuição na capacidade de condução de corrente
Medidores de energia	Erro de tarifação
Relés de proteção	Operação indevida Inoperância
Capacitores	Ressonância Perda de vida útil do dielétrico
Transformadores	Aumento nas perdas nos enrolamentos, ferro e componentes Sobreaquecimento
Equipamentos eletrônicos	Maior susceptibilidade a Sags Perda de sincronismo em contadores digitais Imagens distorcidas nos tubos catódicos
Iluminação	Diminuição da vida útil em lâmpadas incandescentes Ruídos audíveis em lâmpadas fluorescentes Flicker
Sistemas de telefonia	Ruídos audíveis

Fonte: PIRES,2006

3.4 Soluções para harmônicas

Pode-se utilizar duas estratégias para resolver os problemas com harmônicas. A primeira é o sobre dimensionamento dos equipamentos, tendo como base que os efeitos negativos das correntes harmônicas aumentam com a impedância cumulativa de cabos e fontes, desta maneira a solução mais simples seria limitar a impedância total de forma a reduzir tanto a distorção da tensão como a subida da temperatura.(SCHNEIDER ELETRIC, 2015).

A segunda solução seria o uso de filtros passivos e ativos. Os filtros passivos LC são sintonizados para a frequência que requer eliminação ou atenuam uma banda das frequências. Sistemas de recombinação de harmônicas (ponte dupla, comutação de fase) também podem ser agrupados nesta categoria. Os filtros ativos, cancelam harmônicas injetado correntes harmônicas iguais onde elas surgem, este tipo de filtro atua em tempo real sobre as harmônicas existentes para fazer sua eliminação. (SCHNEIDER ELETRIC, 2015).

O quadro 4 trás de forma mais clara as vantagens e desvantagens dos métodos que podem ser utilizados para solucionar o problema das harmônicas.

Quadro 4 – Estratégias contra harmônicas

Estratégias	Vantagens	Desvantagens
Viver com harmônicas		
Aumentar as potências nominais de fontes e/ou à seção transversal dos cabos	Redução no THD de alimentação reduzindo a fonte de impedância. Redução em perdas de Joules	Difíceis nas soluções existentes. Solução dispendiosa, limitada à redução do componente resistivo para seções transversais pequenas (indutância mantém-se constante) Requer cabos paralelos para seções transversais grandes. Não evita distúrbios a montante da instalação. Não está em conformidade com as normas.
Alimentação especial para cargas não lineares	Limita distúrbios em cargas próximas por meio de desacoplamento.	O mesmo que acima

Continua

Estratégias	Vantagens	Desvantagens
Eliminar parcialmente as harmônicas		
Filtros passivos sintonizados	Solução simples.	Apenas para uma ou duas ordens de harmônicas. Filtros de banca larga não são muito eficazes. Possibilidade de ressonância. Requer trabalho de planejamento dispendioso.
Indutores a montante das instalações lineares	Redução em correntes harmônicas. Limita os efeitos de sobre tensões transitórias.	Aumento em THD dos terminais da carga.
Transformadores especiais		Eliminação de apenas determinadas ordens de harmônicas. Construção não padronizada
Eliminar completamente as harmônicas		
Filtros Ativos	Solução simples e flexível.	É possível a eliminação total de todas as harmônicas (até a 25ª ordem), sistema adaptável (ação configurada) e reutilizável.

Fonte: SCHNEIDER ELETRIC, 2015

4 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

Segundo a IEE 1159 – 2009 as variações de tensão de curta duração são quase sempre causadas por condições de falha, a energização de grandes cargas que requerem altas correntes de partida, ou conexões frouxas intermitentes na fiação de energia.

A condição de falha pode estar próxima ou distante do ponto de interesse. Em ambos os casos, o impacto na tensão durante a condição de falha real é um curto período de duração. Mudanças na corrente que se enquadram nas categorias duração e magnitude também estão incluídas em variações de curta duração. Dependendo a localização da falha e as condições do sistema, a falha pode causar elevação temporária de tensão (aumentos), afundamentos de tensão (quedas) ou a perda completa de tensão (interrupções). (IEEE 1159,2009).

4.1 Interrupções

Segundo a IEEE 1159 – 2009 a interrupção ocorre quando a tensão de alimentação ou corrente da carga diminui para menos de 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto. As interrupções podem ser o resultado de falhas no sistema de energia, falhas de equipamentos e falha de controle.

O Sistema por unidade (pu), é uma forma de expressar as grandezas elétricas em um circuito de forma normalizada, com base nos valores pré-determinados.

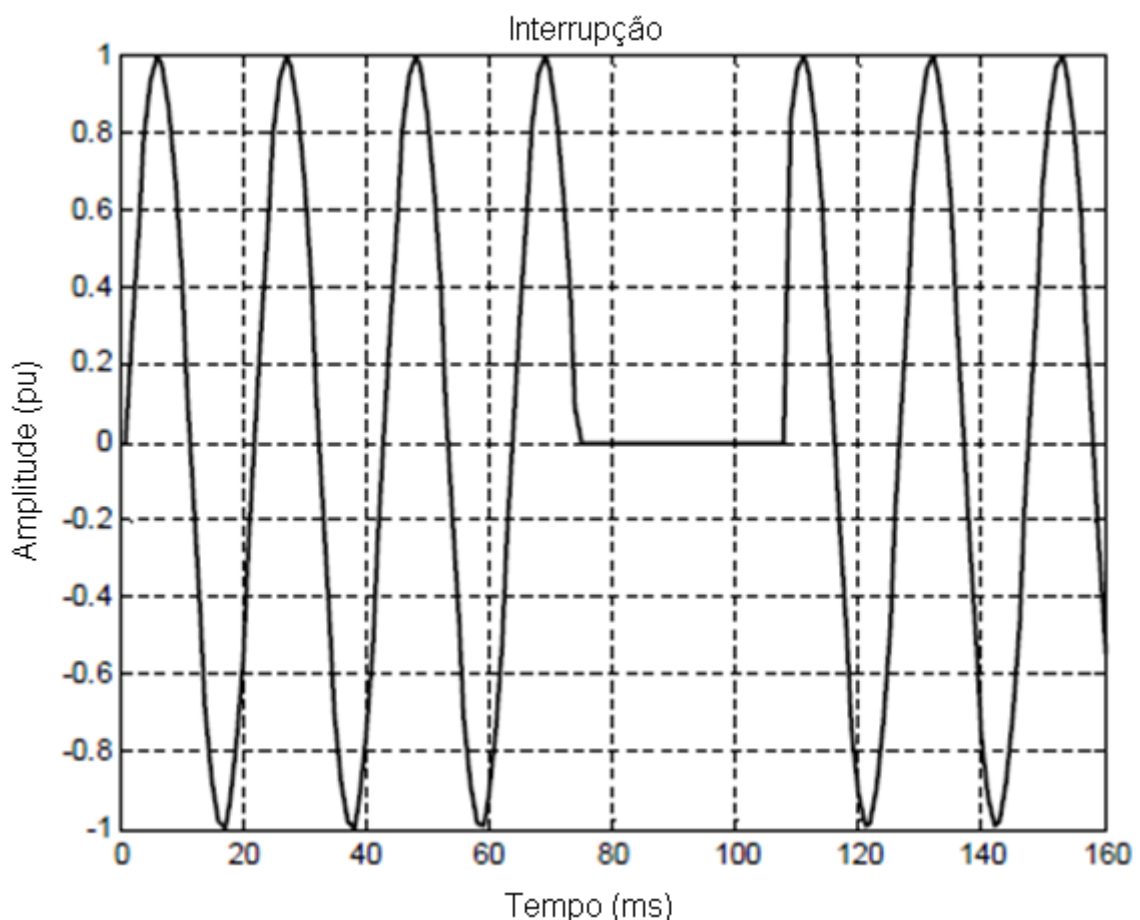
As interrupções são medidas pela duração desde que a magnitude da tensão é sempre menor que 10 % do nominal. A duração de uma interrupção devido a uma falha no sistema de utilidade é determinado pelos dispositivos de proteção da concessionária e pelo evento particular que está causando a falha. A duração de uma interrupção devido a avarias do equipamento ou conexões soltas pode ser irregular. (ROCHA, 2016).

Algumas interrupções podem ser precedidas por uma queda de tensão quando estas interrupções são devidas a falhas no sistema de origem. A queda de tensão ocorre entre os momentos em que uma falha é iniciada e o dispositivo de proteção opera. No alimentador com falha, as cargas terão uma queda de tensão, seguida imediatamente por uma interrupção. (ROCHA, 2016).

A duração da interrupção dependerá da capacidade de religamento do dispositivo de proteção. Ele será instantâneo quando a interrupção causada por uma falha for menor que 30 ciclos. E será retardado quando o tempo para o dispositivo religar causar uma interrupção momentânea ou temporária. (IEEE 1159, 2009).

A figura 3 mostra como é identificado uma interrupção de tensão de curta duração através da visualização da senóide de tensão em um osciloscópio.

Figura 3 - Interrupção de tensão de curta duração



Fonte: KERN,2008.

4.1.1. Interrupção momentânea

Segundo a ANEEL é toda a interrupção do sistema elétrico com duração menor ou igual a três segundos.

4.1.2. Interrupção temporária

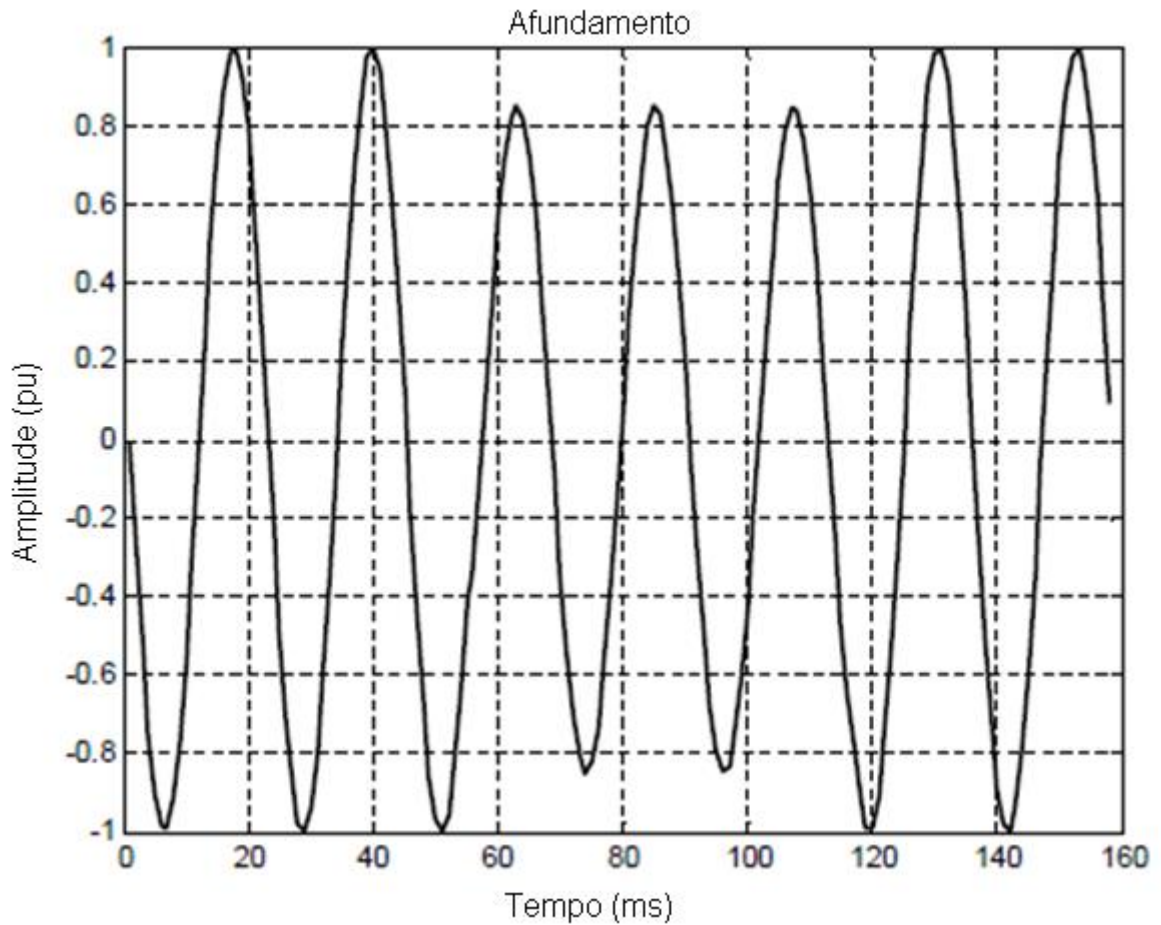
Segundo a ANEEL é toda a interrupção do sistema elétrico com duração superior a 3 segundos e inferior a 3 minutos.

4.2 Afundamento de tensão

Os afundamentos de tensão podem ser causados por faltas no sistema elétrico da concessionária, partida de grandes motores ou a corrente de inrush de transformadores. O afundamento prejudica o funcionamento de equipamentos sensíveis como equipamentos eletroeletrônicos. (HAFNER, 2006).

A figura 4 mostra o afundamento de tensão em uma rede, analisado através de um osciloscópio.

Figura 4 – Afundamento de tensão de curta duração



Fonte: KERN, 2008.

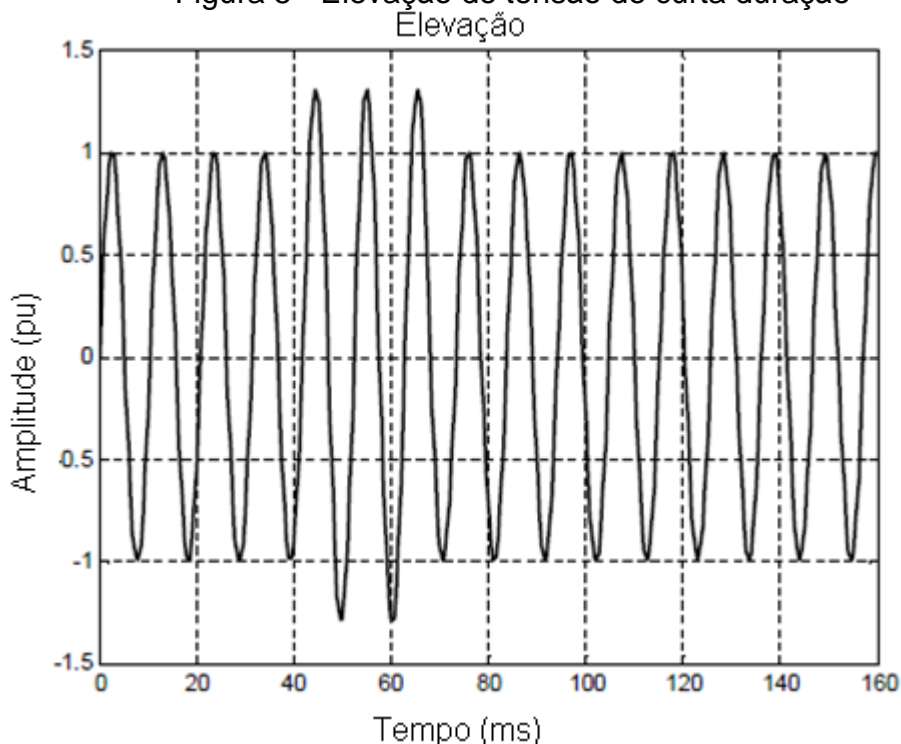
4.3 Elevação de tensão

As elevações de tensão são causadas por faltas monofásicas (curto-circuito fase-terra) no sistema elétrico da concessionária. A fase em curto tem sua tensão reduzida enquanto as outras duas têm as suas tensões elevadas. (HAFNER, 2006).

A elevação de tensão danifica os supressores de sobre tensão, pois estes são dimensionados para drenar uma energia concentrada em dezenas de microssegundos e a elevação da tensão tem um tempo de duração de dezenas de milissegundos. (HAFNER, 2006).

A figura 5 mostra a elevação na onda de tensão, analisada através de um osciloscópio.

Figura 5 - Elevação de tensão de curta duração



Fonte: KERN, 2008.

4.4 Classificação das variações de tensão de curta duração

O quadro 5 apresenta as variações de tensão de curta duração de acordo com a duração da variação em segundos e/ou ciclos e o limite da amplitude da onda de tensão permitida para cada uma das variações.

Quadro 5 – Classificação das variações de curta duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz em relação à tensão de referência)
Varição Momentânea de tensão	Interrupção momentânea de tensão	≤ 3 segundos	$< 0,1$ pu
	Afundamento momentânea de tensão	≥ 1 ciclo ou ≤ 3 segundos	$\geq 0,1$ pu E $< 0,9$ pu
	Elevação momentânea de tensão	≥ 1 ciclo e ≤ 3 segundos	$> 1,1$ pu

Continua

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz em relação à tensão de referência)
Variação temporária de tensão	Interrupção temporária de tensão	>3 segundos E <3 minutos	< 0,1 pu
	Afundamento temporário de tensão	>3 segundos E <3 minutos	≥ 0,1 pu E < 0,9 pu
	Elevação temporária de tensão	>3 segundos E <3 minutos	>1,1 pu

Fonte: PRODIST, 2018.

4.5 Solução para a variação de tensão

O maior problema das interrupções de energia está quando a rede é energizada novamente pois a tensão pode vir até 60 % maior que a nominal, ocorrendo desta forma a queima dos equipamentos mais sensíveis, uma alternativa para este problema é a instalação de restauradores dinâmicos de tensão (DVR). O DVR pega a energia da rede afundada e recupera a tensão até que ela fique em seu valor nominal durante o afundamento. (ROCHA, 2016).

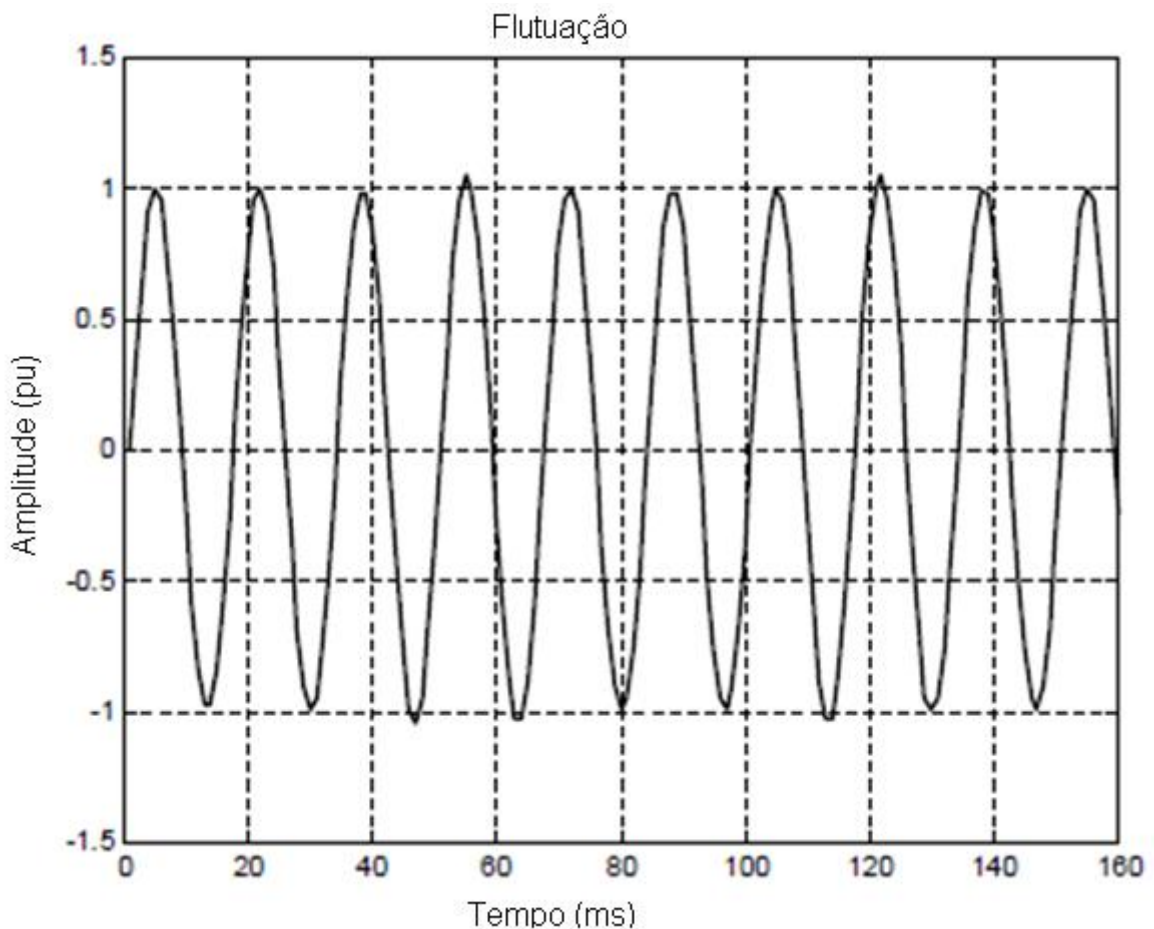
Com o mesmo propósito pode ser utilizado o sistema Flywheel. Este sistema armazena energia cinética em um volante de inércia. O Flywheel é composto por uma máquina síncrona que é montada no mesmo eixo de um volante de inércia. Para fazer a transformação da energia elétrica em energia cinética, a máquina síncrona funciona como um motor síncrono. Desta forma transforma a energia elétrica em energia mecânica, acelerando o eixo juntamente com o volante de inércia, até que a velocidade desejada seja atingida. (ROCHA, 2016).

5 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

5.1 Definição

Segundo a IEEE 1159 – 2009, a flutuação de tensão é a variação sistêmica da tensão ou uma série de tensão que sofre alterações aleatórias, cuja magnitude normalmente não ultrapassa as faixas de tensão especificadas pelas ANSI C84.1 – 2006 de 0,95 pu para 1,05 pu. As flutuações de tensões podem ser percebidas por humanos por mudanças na incidência luminosa das lâmpadas. A figura 6 mostra a forma de onda de uma rede que está com o problema de flutuação.

Figura 6 – Flutuação de tensão

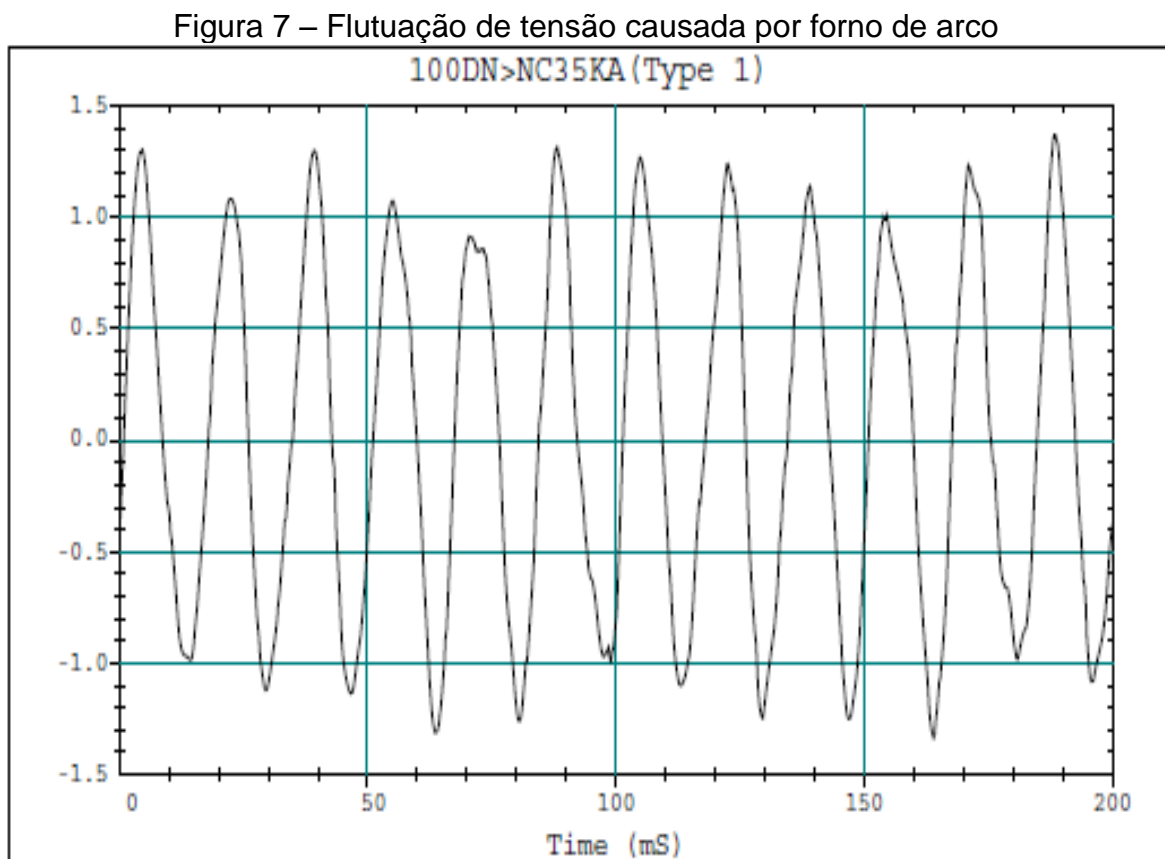


Fonte: KERN, 2008.

Qualquer carga que tenha variações cíclicas significativas, especialmente no componente reativo, pode causar flutuação na tensão. Cargas que exibem variações rápidas e contínuas na magnitude da corrente de carga podem causar na tensão variações erroneamente referidas como cintilação. O termo cintilação é derivado do impacto da tensão flutuante na intensidade de iluminação. (IEEE 1159, 2009).

Flutuação é um fenômeno eletromagnético, e flicker é um resultado indesejável desse fenômeno. Embora haja uma clara distinção entre os termos, os padrões ANSI/ IEEE os associam. Eles são frequentemente confundidos ao ponto em que o termo cintilação de tensão é usado em alguns documentos quando termo flutuação de tensão deve ser usado. (IEEE 1159, 2009)

Os fornos de arco são a causa mais comum de flutuação de tensão na transmissão e distribuição do sistema de energia. A figura 7 mostra a flutuação da tensão causada pela operação do forno de arco. (IEEE 1159 – 2009).



Fonte: IEEE 1159, 2009.

5.2 Soluções para flutuação de tensão

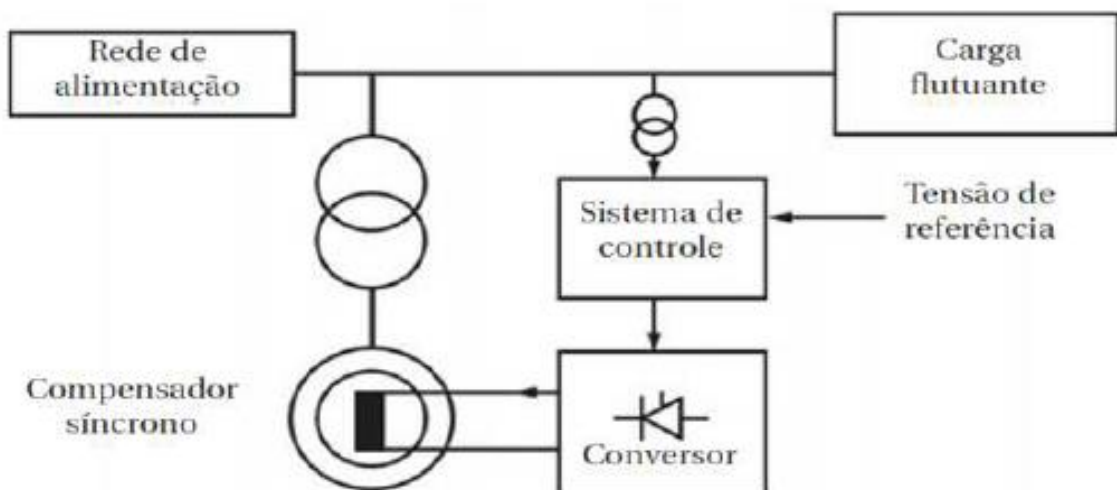
Existem diversas técnicas para reduzir a flutuação de tensão, mas duas possibilidades para a atenuação do flicker são as mais usadas, a primeira consiste na redução do fluxo de potência, especialmente a componente reativa. Já a segunda é baseada no aumento da potência de curto-circuito em relação à potência 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 esse fim. (NETO, 2013)

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. (NETO, 2013)

A figura 8 mostra como esse método funciona.

Figura 8 - Compensador dinâmico baseado em máquina síncrona

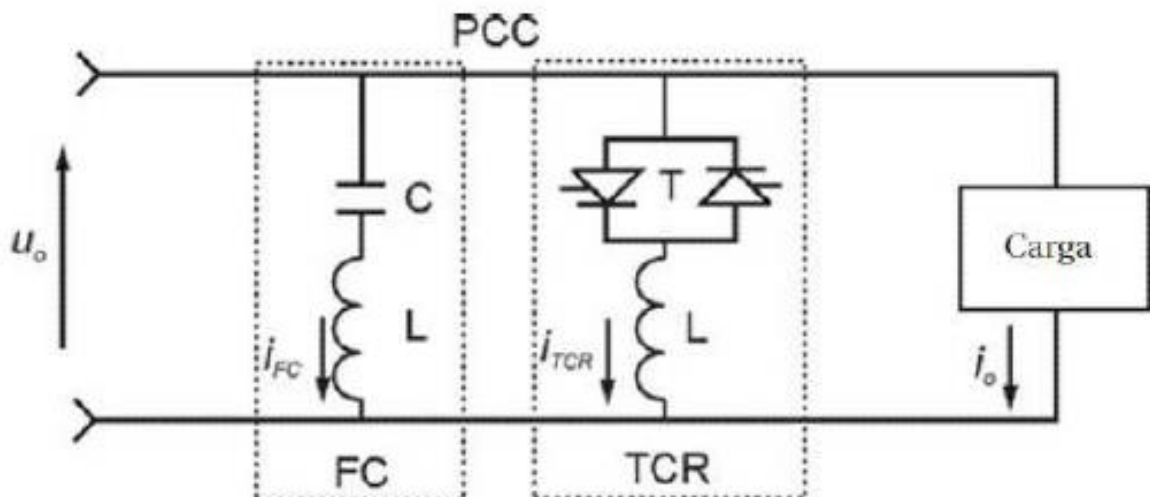


Fonte: NETO, 2013.

Para fazer a redução da variação da energia reativa no sistema de alimentação usa-se o compensador estático de reativo. O controle do reator por tioristor, juntamente com o capacitor fixo, possibilita o controle do consumo e geração

de reativo conforme a necessidade do sistema. A figura 9 mostra o capacitor ligado em série com uma pequena indutância. A reatância equivalente desse nó na frequência de 60 Hz é capacitiva. A indutância em série ameniza a circulação de correntes com frequências harmônicas, através da geração de harmônicos de corrente no sistema provocados pelo chaveamento dos tiristores. No nó seguinte está o indutor fixo em série com os tiristores em antiparalelo. É o chaveamento dos tiristores que faz o controle da corrente de entrada do indutor, por sua vez controla o consumo de reativo indutivo, mediante esse controle o reativo que vem da fonte consegue ser mantido constante. (SIQUEIRA, 2017).

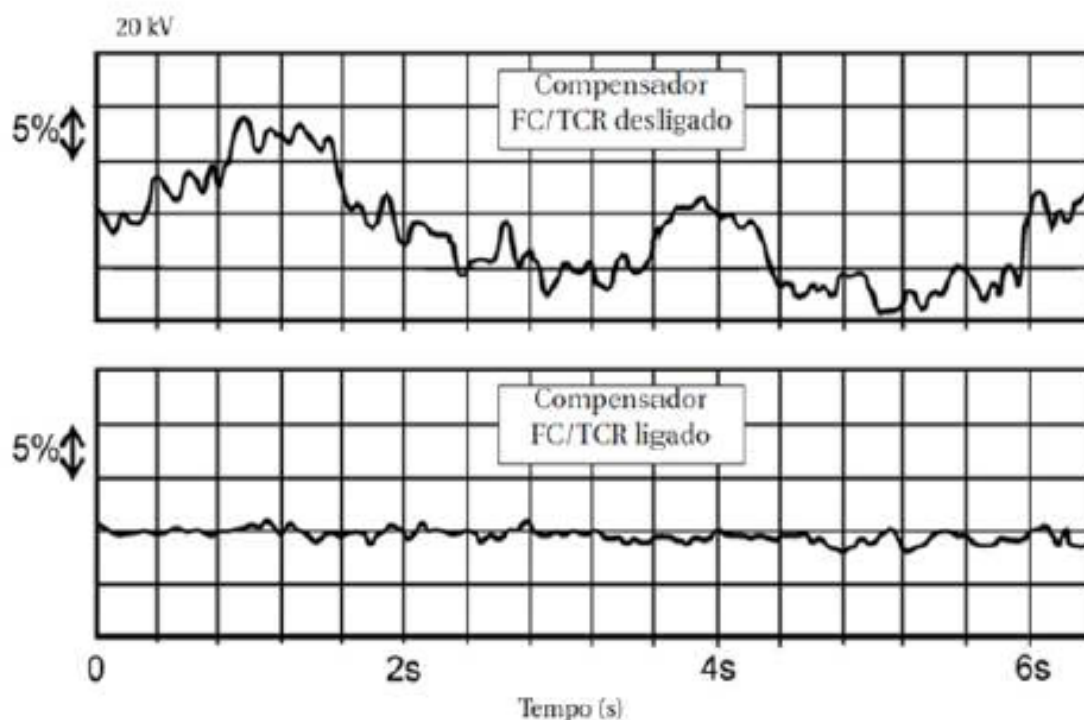
Figura 9– Estabilizador estático



Fonte SIQUEIRA, 2017.

Por meio dos gráficos apresentados na figura 10 a grandeza tensão é representada nos eixos verticais e no eixo horizontal é representado o tempo. No primeiro gráfico observa-se uma grande variação no valor da tensão, essa variação caracteriza a existência de flutuação de tensão, ou seja, o compensador estático não está ligado. Já no segundo gráfico, a variação de tensão é quase imperceptível, pois o compensador de tensão está ligado. (Siqueira, 2017).

Figura 10– Gráfico de análise do sistema com o compensador de tensão ligado e desligado



Fonte: SIQUEIRA, 2017.

A segunda possibilidade é aumento da potência de curto-circuito em relação a potência da carga para atenuação da flutuação de tensão, este método é melhor empregado durante o projeto da instalação pois seu custo são menores durante essa etapa.(ROCHA, 2016)

Para obter-se o aumento da potência de curto circuito podem ser empregadas as seguintes medidas:(ROCHA, 2016)

- 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.

Uma alternativa bem simples para reduzir a cintilação é usar transformadores diferentes para fazer a separação da alimentação das cargas flutuantes da alimentação do sistema de iluminação. (ROCHA, 2016)

6 TRANSITÓRIO

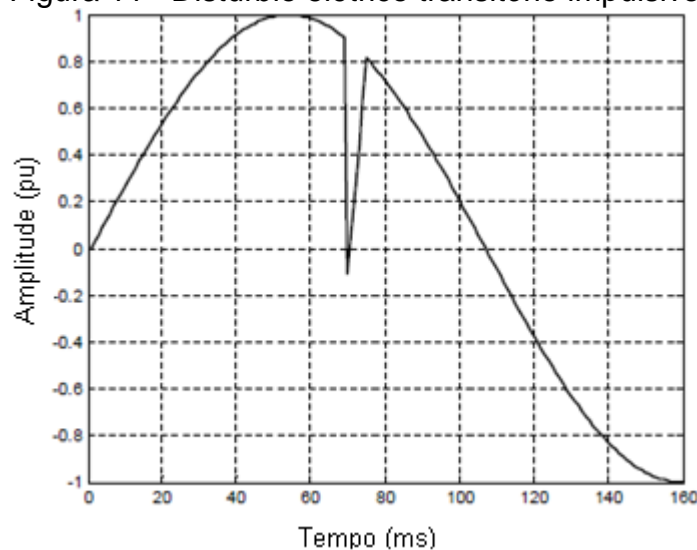
Segundo a IEEE 1159 – 2009, os transitórios são as perturbações de corrente e/ou tensão com duração bem curta (alguns milissegundos), porém sua magnitude é alta e seu tempo de subida é muito rápido. Eles podem ser classificados de duas maneiras, os transitórios impulsivos causados como efeito de descargas atmosféricas e os transitórios oscilatórios causados pelo chaveamento de cargas muito grandes ou reativas.

6.1 Transitório impulsivo

Os distúrbios transitórios impulsivos são causados por descargas atmosféricas e descargas eletrostáticas, ocorrem repentinamente nas condições de regime permanente de tensão e corrente, tendo como principal característica a apresentação de polaridade e frequência unidirecionais bem diferentes do sistema elétrico. (KERN, 2008).

A figura 11 mostra o desenho de onda quando ocorre um transitório impulsivo na rede elétrica.

Figura 11– Distúrbio elétrico transitório impulsivo



Fonte: KERN, 2008.

Podem causar desde corrupção de dados ou perda até danos físicos ao equipamento. Facilmente se reconhece o dano físico causado por uma descarga atmosférica, pois esse fenômeno ocorre em dias de tempestade. Não existe a necessidade da queda direta de um raio em um sistema elétrico para que o mesmo cause falhas em equipamentos. Os campos eletromagnéticos gerados pelas descargas atmosféricas induzem transitórios impulsivos em instalações próximas. (ROCHA, 2016).

Para a proteção de cargas sensíveis contra a presença de descargas atmosféricas se faz necessário o uso de DPS (Dispositivo de Proteção contra Surtos). Os DPS tem a função de identificar a existência de um impulso e aterrar o sistema elétrico fazendo com que a descarga atmosférica seja direcionada para a terra. (ROCHA, 2016)

Descargas eletrostáticas são geradas através do desequilíbrio da quantidade de elétrons em relação à carga elétrica dos núcleos dos átomos. Podem-se classificar em dois tipos as caras eletrostáticas, em positivas quando a quantidade de elétrons é menor que a quantidade de prótons em um átomo e em negativas quando a quantidade de elétrons é maior que a quantidade de prótons em um átomo. (ARAUJO, QUOIRIN, ARDJOMAND, 2004).

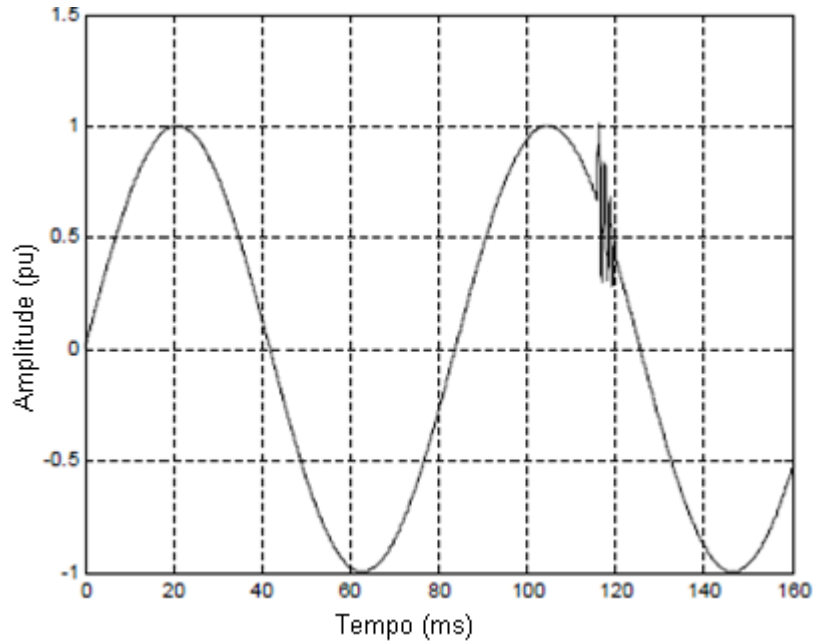
6.2 Transitório oscilatório

O transitório oscilatório tem como principal característica a alteração com polaridade positiva e negativa nas condições de regime permanente da tensão e/ou corrente, é gerado pelo chaveamento de tensão de equipamentos. (KERN, 2008).

É resultado da energização das linhas, corrente indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores. Para definir os tipos de transitórios pode ser analisado o seu conteúdo espectral, duração e magnitude da tensão. (KERN, 2008)

A figura 12 mostra a forma de onda quando ocorre um transitório impulsivo no sistema elétrico.

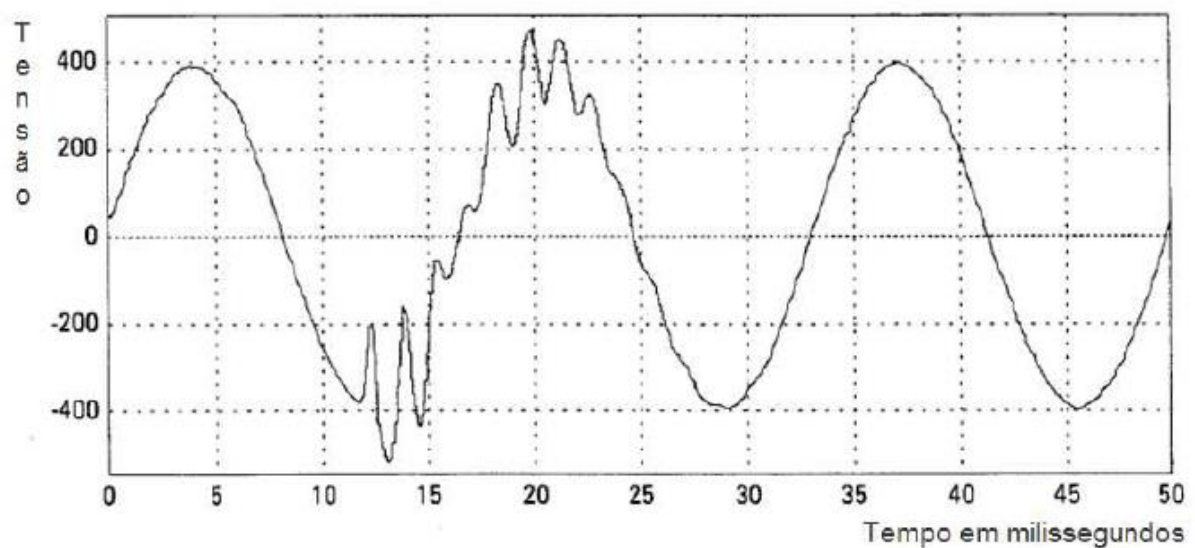
Figura 12- Distúrbio elétrico transitório oscilatório



Fonte: KERN, 2008.

A energização de um banco de capacitores dentro de uma planta fabril é a causa mais comum para o surgimento de um transitório oscilatório. A figura 13 mostra um oscilograma gerado pela energização de um banco de capacitores. (ROCHA, 2016)

Figura 13- Perturbação oriunda de energização de capacitores



Fonte: ROCHA, 2016.

6.3 Solução para transitório

Como já mencionado no texto anteriormente o transitório impulsivo pode ser impedido de trazer efeitos nocivos a instalação elétrica através do uso de DPS.

Já para a correção do transitório oscilatório onde a ligação do banco de capacitores para correção do fator de potência é seu mais comum causador, podemos utilizar contatores para a conexão dos capacitores com resistores de pré carga com a função de evitar uma corrente de partida excessiva. (REIS, 2015).

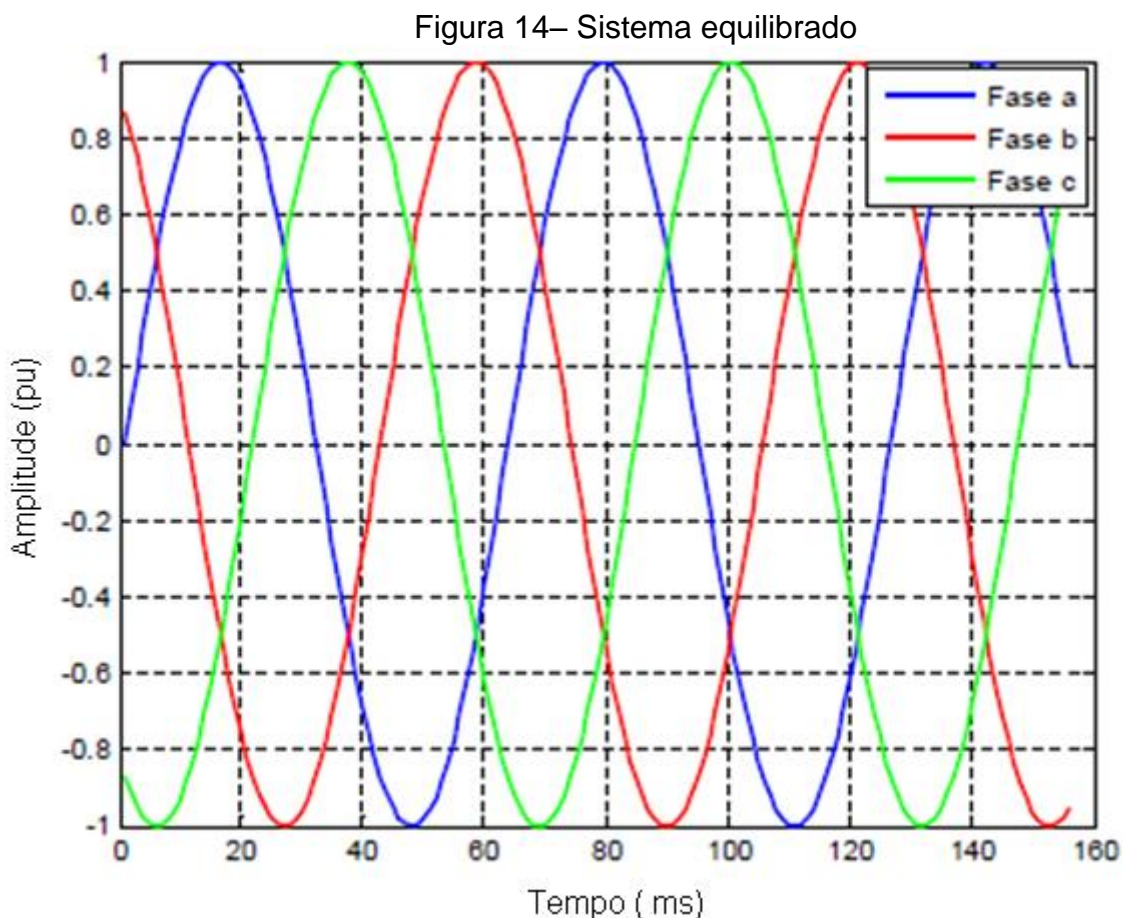
Também podem ser utilizados os tiristores para correção do transitório oscilatório, com a função de uma conexão suave do sistema elétrico ao banco de capacitores. Esse método utiliza a conexão e o desligamento dos capacitores quando suas correntes passam por zero. (REIS, 2015).

7 DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES

7.1 Definições

O Desequilíbrio de tensão tem por definição, a diferença entre a magnitude das tensões de fase de circuitos polifásicos. As tensões geradas em sistemas polifásicos são senoidais, iguais em magnitude e com defasagem de 120 graus entre as fases. Entretanto as tensões existentes no sistema de distribuição e nas instalações em baixa tensão podem estar desequilibradas por varias razões. (MEHL,2001).

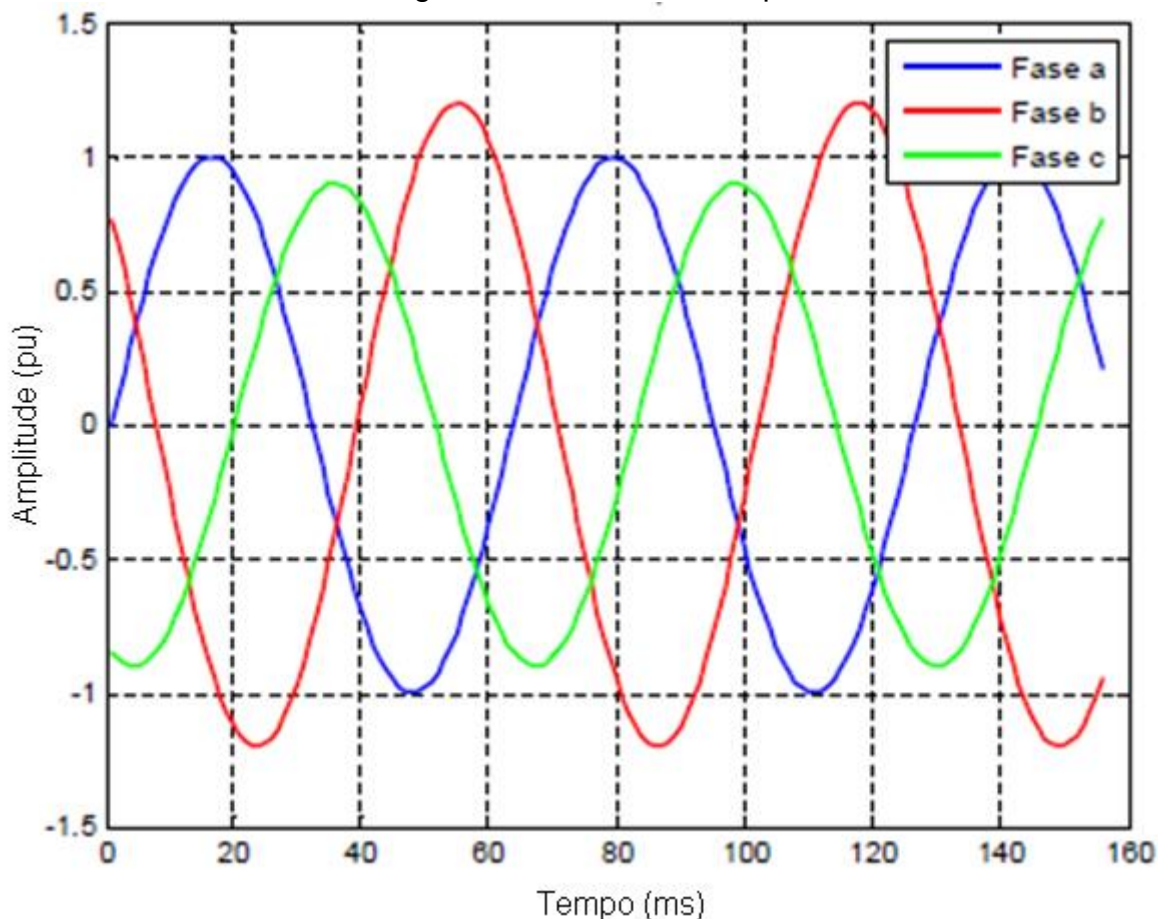
A figura 14 mostra como são as formas de onda em um sistema polifásico equilibrado.



Fonte: KERN, 2008.

Já a figura 15 mostra a forma de onda de um sistema polifásico desequilibrado.

Figura 15 – Sistema desequilibrado



Fonte: KERN, 2008.

Na natureza do desequilíbrio podem 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 o bom funcionamento do sistema elétrico. (MEHL, 2001).

A EM - 50160 e a IEC 61000-3-x são normas internacionais que estabelecem o limite de 2% de desequilíbrio de tensão em baixa tensão e média tensão e 1% para alta tensão. O PRODIST, módulo 8, é no Brasil a norma que regulamenta o desequilíbrio de tensão estipulando o valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição igual ou inferior a 2%, com exceção da baixa tensão. (ROCHA, 2016)

Para fazer a caracterização do desequilíbrio de tensão podem ser utilizados diversos métodos. O PRODIST, módulo 8, utiliza o método das componentes

simétricas. O qual faz a análise do grau de desequilíbrio através da relação entre os módulos das tensões de sequencia negativa e da tensão de sequencia positiva.

A fórmula 4 faz o cálculo do desequilíbrio de tensão.

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} 100 \quad (4)$$

Pode-se utilizar a fórmula 5, para conduzir resultados em consonância com a expressão anterior:

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (5)$$

Sendo:

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (6)$$

Outro método utilizado para calcular o desvio de tensões é o de máximo desvio da tensão média, onde o grau de desequilíbrio é definido entre a relação do máximo desvio da tensão média e a tensão média. Pela formula 7. (ROCHA, 2016).

$$GD\% = \frac{\Delta V}{V_{\text{médio}}} \times 100 \quad (7)$$

7.2 Causas do desequilíbrio de tensão

É um problema bem grave no controle da qualidade de energia, afeta todos os níveis de tensão principalmente os sistemas de distribuição em baixa tensão. Alguns problemas causados pelo desequilíbrio das tensões pode afetar o funcionamento de muitos equipamentos. (MEHL,2001)

O desequilíbrio das cargas monofásico é o principal gerador do desequilíbrio das correntes que por consequência gera o desequilíbrio das tensões. Quando

projetado um sistema, é planejado a distribuição das cargas, porém um sistema trifásico possui diversas cargas monofásicas ligadas a ele, essas cargas são distribuídas em fase de projeto de forma uniforme. Não sendo dessa forma na prática, pois as cargas são ligadas e desligadas conforme sua necessidade dessa forma ocorre o desequilíbrio das fases em função da queda de tensão de cada fase. (KERN,2008).

O desequilíbrio também pode ser gerado durante a transmissão da energia. Pois a geometria da distribuição dos condutores das fases, as capacitâncias intrínsecas entre os condutores das diferentes fases não são iguais. Dessa forma as fases têm diferentes parâmetros, gerando uma queda de tensão na passagem da corrente elétrica diferente em cada uma das fases. O método de transposição de fases é utilizado para minimizar o problema. (ROCHA, 2016).

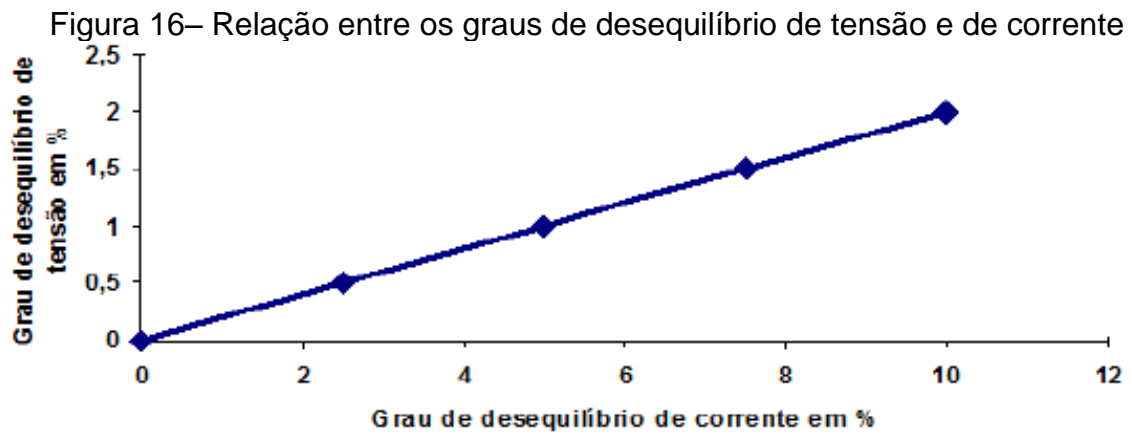
A micro geração tem apresentado alguns desafios quando se trata de manter os níveis adequados de tensão e o equilíbrio da tensão entre as fases. A micro geração normalmente é feita por meio de sistemas monofásicos ou bifásicos de geração. Alguns cuidados devem ser mantidos para que as fases se mantenham adequadas quando a tensão em baixa tensão. (ROCHA, 2016)

7.3 Consequências do desequilíbrio de tensão

A circulação da componente de sequência negativa em um sistema elétrico de potência tem como consequência a perda adicional de energia, a diminuição da capacidade de transmissão de energia pela componente de sequência positiva, aquecimento adicional dos equipamentos e afeta em especial o funcionamento dos motores por indução. (REZENDE, 2007)

A presença da componente de sequência negativa nos motores de indução gera um fluxo magnético que rotacional em sentido inverso ao fluxo principal. Como consequência traz a redução da eficiência energética, o aumento da temperatura de operação, redução do conjugado disponível, a existência de torque pulsante e a redução da vida útil do motor. A figura 16 apresenta um gráfico com os valores da

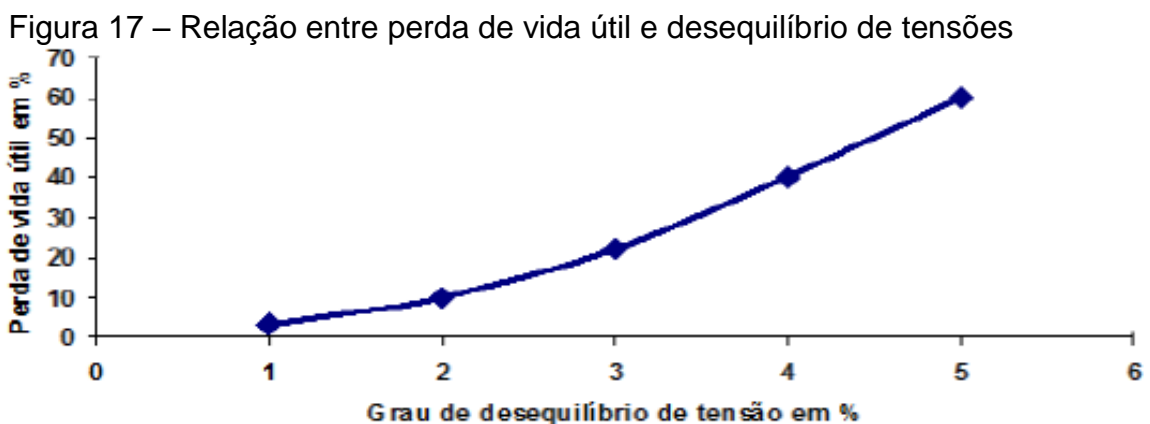
relação entre o grau de desequilíbrio de tensão e o de corrente em um motor de indução. (REZENDE, 2007).



Fonte: ROCHA, 2016.

Com o auxílio da figura 16 pode-se chegar a seguinte conclusão, com uma pequena variação na tensão do motor de indução, o desequilíbrio causado na corrente é grande.

Outro problema bem grave causado pelo desequilíbrio de tensões é o aquecimento, ele faz com que a vida útil do motor de indução seja reduzida. Uma situação em que o motor não esteja operação com seu carregamento máximo ou que a temperatura ambiente seja relativamente baixa permite que o desequilíbrio entre as tensões seja maior sem causar redução da vida útil do motor. A figura 17 mostra a relação entre a vida útil do motor e o desequilíbrio entre as tensões. (REZENDE, 2007).



Fonte: ROCHA, 2016.

Os fabricantes garantem a vida útil nominal dos motores para desequilíbrios de até 1%, porém na prática esse desequilíbrio é bem maior. Por esta razão os motores são sobre dimensionados quando especificados por técnicos experientes. O sobre dimensionamento tem como consequência a perda de eficiência e o aumento do fator de potência da instalação, mas assegura a não interrupção do processo produtivo industrial. (ROCHA, 2016).

8 TENSÃO EM REGIME PERMANENTE

Os equipamentos são projetados para funcionar com determinado nível de tensão, quando operam com níveis fora do seu limite por longos períodos acabam tendo redução da sua vida útil, que podem ocasionar interrupções não planejadas. Por esses motivos a tensão deve ser sempre mantida dentro dos limites estabelecidos pelas normas.

8.1 Regulação de tensão de atendimento

No Brasil a ANEEL através da resolução do PRODIST, no módulo 8, é quem regulamenta a tensão em regime permanente. O termo regime permanente é definido pelo PRODIST, módulo 8, como o intervalo de tempo da leitura de tensão, sendo esse de dez minutos, onde não ocorrem distúrbios elétricos capazes de invalidar a leitura.

Depois de obtido um conjunto de leituras válidas, o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e o índice para tensão crítica (DRC), devem ser calculados. (PRODIST, 2018)

A caracterização da tensão precária e tensão crítica é feita após o conceito de tensão de atendimento estar definido. A tensão de atendimento é o valor de tensão no ponto de entrega ou de conexão, obtido através de medição, o qual pode ser classificado como adequada, precária ou então crítica.(PRODIST, 2018)

O quadro 6 mostra como são classificadas a tensão em adequada, precária e crítica segundo os critérios da ONS(Operador Nacional do Sistema Elétrico).

Quadro 6– Classificação da tensão de atendimento a partir da tensão de leitura para diferentes valores de tensão nominal

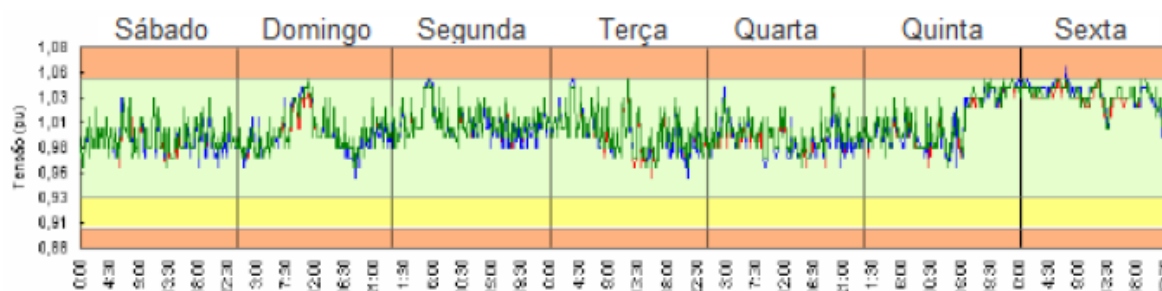
Tensão Nominal (TN) do Ponto de Medição (kV)	Classificação da tensão de atendimento (TA) a partir da tensão de leitura (TL), em pu da Tensão Contratada (TC em kV), para diferentes valores de tensão nominal (TN)		
	Adequada	Precária	Critica
$TN \geq 230$	$0,95TC \leq TL \leq 1,05 TC$	$0,93TC \leq TL \leq 0,95TC$ Ou $1,05TC \leq TL \leq 1,07TC$	$TL < 0,93 TC$ Ou $TL > 1,07 TC$
$69 \leq TN < 230$	$0,95TC \leq TL \leq 1,05 TC$	$0,90TC \leq TL \leq 0,95TC$ Ou $1,05TC \leq TL \leq 1,07TC$	$TL < 0,90 TC$ Ou $TL > 1,07 TC$
$1 < TN < 69$	$0,93TC \leq TL \leq 1,05 TC$	$0,90TC \leq TL \leq 0,93TC$	$TL < 0,90 TC$ Ou $TL > 1,05 TC$

Fonte: ONS, 2010

A conformidade de tensão precisa ser analisada seguindo os parâmetros estabelecidos no PRODIST módulo 8, nos pontos de conexão à Rede de Distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras.

A análise da tensão em regime permanente é feita após 1008 leituras validas realizadas ao longe de uma semana. Pode-se observar na figura 18 a leitura semanal de tensão.(PRODIST, 2018)

Figura 18 – Perfil do valor eficaz da tensão no período de uma semana



Fonte: ROCHA, 2016.

Os quadros 7, 8 e 9, apresentam segundo o PRODIST, módulo 8, a tensão de atendimento para as tensões contratadas as quais devem ser classificadas de acordo com as faixas de variação de tensão de leitura. Sendo Duração de Interrupção por unidade Consumidora (DIC), Frequência de Interrupção por unidade

Consumidora (FIC) e Duração Máxima de Interrupção Contínua por unidade consumidora ou ponto de conexão (DMIC).

Quadro 7 – Unidades consumidoras ou centrais geradoras com faixa de tensão contratada ≥ 69 kv

Sistema	Limite de Continuidade por Unidade Consumidora ou Central Geradora						
	Unidades Consumidoras ou Centrais Geradoras com faixa de tensão contratada ≥ 69 kV						
	DIC (horas)			FIC (interrupções)			DMIC(Horas)
	Anual	Trim.	Mensal	Anual	Trim.	Mensal	Mensal
Interligado	5,00	3,00	2,00	5,00	3,00	2,00	1,50
Isolado	6,00	4,00	3,00	6,00	4,00	3,00	2,50

Fonte: PRODIST - Módulo 8, 2018.

Quadro 8 - Unidades consumidoras ou centrais geradoras situadas em áreas urbanas com faixa de tensão contratada: $1 \text{ kv} < \text{tensão} < 69\text{kv}$

Faixa de variação de indicadores de continuidade dos conjuntos (DEC ou FEC)	Limite de Continuidade por Unidade Consumidora ou Central Geradora						
	Unidades Consumidoras ou Centrais Geradoras situadas em áreas urbanas com faixa de tensão contratada: $1\text{kv} < \text{Tensão} < 69\text{kV}$						
	DIC (h)			FIC (interrupções)			DMIC(h)
	Anual	Trim.	Mensal	Anual	Trim.	Mensal	Mensal
1	11,25	5,62	2,81	6,48	3,24	1,62	2,36
2	11,68	5,84	2,92	6,93	3,46	1,73	2,39
3	12,12	6,06	3,03	7,37	3,68	1,84	2,41
4	12,55	6,27	3,13	7,82	3,91	1,95	2,44
5	12,99	6,49	3,24	8,27	4,13	2,06	2,46
6	13,43	6,71	3,35	8,71	4,35	2,17	2,49
7	13,86	6,91	3,46	9,16	4,58	2,29	2,52
8	14,30	7,15	3,57	9,61	4,80	2,40	2,54
9	14,73	7,36	3,68	10,05	5,02	2,51	2,57
10	15,17	7,58	3,79	10,50	5,25	2,62	2,60
11	15,61	7,80	3,90	10,95	5,47	2,73	2,62
12	16,04	8,02	4,01	11,40	5,70	2,85	2,65
13	16,48	8,24	4,12	11,84	5,92	2,96	2,68
14	16,91	8,45	4,22	12,29	6,14	3,07	2,71
15	17,35	8,67	4,33	12,74	6,37	3,18	2,74
16	17,79	8,89	4,44	13,18	6,59	3,29	2,76
17	18,22	9,11	4,55	13,63	6,81	3,40	2,79
18	18,66	9,33	4,66	14,08	7,04	3,52	2,82
19	19,09	9,54	4,77	14,52	7,26	3,63	2,85
20	19,53	9,76	4,88	14,97	7,48	3,74	2,88

Continua

Faixa de variação de indicadores de continuidade dos conjuntos (DEC ou FEC)	Limite de Continuidade por Unidade Consumidora ou Central Geradora						
	Unidades Consumidoras ou Centrais Geradoras situadas em áreas urbanas com faixa de tensão contratada: 1kV<Tensão< 69kV						
	DIC (h)			FIC (interrupções)			DMIC(h)
	Anual	Trim.	Mensal	Anual	Trim.	Mensal	Mensal
>20 e ≤22	19,97	9,98	4,99	15,42	7,71	3,85	2,91
>22 e ≤24	20,84	10,42	5,21	16,31	8,15	4,07	2,98
>24 e ≤26	21,71	10,85	5,42	17,20	8,60	4,30	3,04
>26 e ≤ 28	22,58	11,29	5,64	18,10	9,05	4,52	3,10
>28 e ≤ 30	23,45	11,72	5,86	18,99	9,49	4,74	3,17
>30 e ≤ 32	24,33	12,16	6,08	19,88	9,94	4,97	3,24
>32 e ≤ 34	25,20	12,60	6,30	20,78	10,39	5,19	3,31
>34 e ≤ 36	26,07	13,03	6,51	21,67	10,83	5,41	3,38
>36 e ≤ 38	26,94	13,47	6,73	22,57	11,28	5,64	3,45
>38 e ≤ 40	27,81	13,90	6,95	23,46	11,73	5,86	3,52
>40 e ≤ 45	29,34	14,67	7,33	25,02	12,51	6,25	3,55
>45 e ≤ 50	32,52	15,76	7,88	27,26	13,66	6,81	3,80
>50 e ≤ 55	33,70	16,85	8,42	29,49	14,74	7,37	4,06
>55 e ≤ 60	35,88	17,94	8,97	31,32	15,86	7,93	4,34
>60 e ≤ 65	38,06	19,03	9,51	33,96	16,98	8,49	4,64
>65 e ≤ 70	40,24	20,12	10,06	36,19	18,09	9,04	4,96
>70 e ≤ 80	43,51	21,75	10,87	39,54	19,77	9,88	5,47
>80 e ≤ 90	47,87	23,93	11,96	44,01	22,00	11,00	6,23
>90 e ≤ 100	52,33	26,11	13,05	48,48	24,24	12,12	7,10
>100 e ≤ 110	56,59	28,29	14,14	52,95	26,47	13,23	8,07
>110 e ≤ 120	60,95	30,47	15,23	57,42	28,71	14,35	9,17
>120	63,61	31,56	15,78	59,65	29,82	14,91	9,77

Fonte: PRODIST - Módulo 8, 2018.

Quadro 9 - Unidades consumidoras ou centrais geradoras atendidas por sistemas isolados ou situadas em áreas não urbanas com faixa de tensão contratada: 1kv < tensão < 69kv

Faixa de variação de indicadores de continuidade dos conjuntos (DEC ou FEC)	Limite de Continuidade por Unidade Consumidora ou Central Geradora						
	Unidades Consumidoras ou Centrais Geradoras atendidas por sistemas isolados ou situadas em áreas não urbanas com faixa de tensão contratada: 1kV < Tensão < 69kV						
	DIC (h)			FIC (interrupções)			DMIC(h)
	Anual	Trim.	Mensal	Anual	Trim.	Mensal	Mensal
1	31,98	15,99	7,99	15,49	7,74	3,87	4,32
2	32,62	16,31	8,15	15,96	7,98	3,99	4,39
3	33,26	16,63	8,31	16,43	8,21	4,10	4,46
4	33,90	16,95	8,47	16,90	8,45	4,22	4,53
5	34,54	17,17	8,63	17,37	8,68	4,34	4,60

Continua

Faixa de variação de indicadores de continuidade dos conjuntos (DEC ou FEC)	Limite de Continuidade por Unidade Consumidora ou Central Geradora						
	Unidades Consumidoras ou Centrais Geradoras atendidas por sistemas isolados ou situadas em áreas não urbanas com faixa de tensão contratada: 1kV < Tensão < 69kV						
	DIC (h)			FIC (interrupções)			DMIC(h)
	Anual	Trim.	Mensal	Anual	Trim.	Mensal	Mensal
6	35,18	17,59	8,79	17,84	8,92	4,46	4,67
7	35,82	17,91	8,95	18,31	9,14	4,57	4,74
8	36,46	18,23	9,11	18,78	9,39	4,69	4,81
9	37,10	18,55	9,27	19,24	9,62	4,81	4,88
10	37,74	18,87	9,43	19,72	9,84	4,93	4,95
11	38,38	19,19	9,59	20,19	10,09	5,04	5,02
12	39,02	19,51	9,75	20,66	10,33	5,16	5,09
13	39,66	19,83	9,91	21,13	10,46	5,28	5,16
14	40,30	20,15	10,07	21,60	10,80	5,40	5,24
15	40,94	20,47	10,23	22,07	11,03	5,51	5,31
16	41,58	20,79	10,39	22,54	11,27	5,63	5,38
17	42,22	21,11	10,55	23,01	11,50	5,75	5,45
18	42,86	21,43	10,71	23,48	11,74	5,87	5,52
19	43,50	21,45	10,87	23,95	11,97	5,98	5,59
20	44,14	22,07	11,03	24,42	12,21	6,10	5,66
>20 e ≤22	44,78	22,39	11,19	24,90	12,45	6,22	5,73
>22 e ≤24	46,06	23,03	11,51	25,84	12,92	6,46	5,87
>24 e ≤26	47,34	23,67	11,83	26,78	13,39	6,69	6,01
>26 e ≤28	48,61	24,30	12,15	27,72	13,86	6,93	6,15
>28 e ≤30	48,89	24,94	12,47	28,66	14,33	7,26	6,29
>30 e ≤32	51,17	25,58	12,79	29,60	14,80	7,40	6,43
>32 e ≤34	52,45	26,22	13,11	30,54	15,27	7,63	6,47
>34 e ≤36	53,73	26,86	13,43	31,48	15,74	7,87	6,72
>36 e ≤38	55,01	27,50	13,75	32,42	16,21	8,10	6,86
>38 e ≤40	56,29	28,14	14,07	33,36	16,68	8,34	7,00
>40 e ≤45	58,53	29,26	14,63	34,01	17,50	8,75	7,24
>45 e ≤50	61,73	30,86	15,43	37,36	18,68	9,34	7,60
>50 e ≤55	64,92	32,46	16,23	39,71	19,84	9,92	7,95
>55 e ≤60	68,12	34,06	17,03	42,06	21,03	10,51	8,30
>60 e ≤65	771,32	35,66	17,83	44,42	22,21	11,10	8,65
>65 e ≤70	74,52	37,63	18,63	46,77	23,38	11,69	9,01
>70 e ≤80	79,32	39,66	19,83	50,30	24,14	12,57	9,54
>80 e ≤90	85,71	42,85	21,42	55,00	27,50	13,75	10,24
>90 e ≤100	92,11	46,05	23,02	59,70	28,85	14,92	10,95
>100 e ≤110	98,50	49,25	24,62	64,41	32,20	16,10	11,65
>110 e ≤120	104,80	52,45	26,22	69,11	34,55	17,27	12,36
>120	108,10	54,06	27,02	71,46	35,73	17,86	12,71

Fonte: PRODIST - Módulo 8, 2018.

8.2 Métodos aplicados na regularização de tensão

Os problemas oriundos ao perfil de tensão nas redes elétricas são bem comuns e tem grande impacto na qualidade de energia elétrica. Existem diferentes métodos para que seja mantido o nível da tensão dentro da faixa adequada apresentada anteriormente.

A localização de uma unidade consumidora dentro da linha de distribuição será o que definirá o nível de tensão em sua instalação. A tensão ideal para um consumidor que esteja localizado próximo da subestação de distribuição poderá ser inadequada para um consumidor que esteja mais afastado. (ROCHA, 2016).

O maior desafio no fornecimento de energia elétrica aos consumidores é distribuir tensões em faixas apropriadas, pois a queda de tensão ao longo do transporte e a queda de tensão na impedância do transformador que alimenta o consumidor são os principais empecilhos. (ROCHA, 2016)

Um dos métodos utilizados é a elevação do fator de potência com o auxílio de banco de capacitores, para a redução da corrente que vem da concessionária, o que leva a redução da queda de tensão no transporte da energia elétrica. É o consumidor que faz esse acerto no fator de potência, porém existem limites preestabelecidos, estando sujeito a multa caso o mesmo não seja seguido. (ROCHA, 2016).

A regulação de tensão é feita nas subestações de energia ou ao longo dos alimentadores através de reguladores de tensão e o controle de tensão dos mesmos é realizado pelos relés de controle automático de tensão (CAT). (ROCHA, 2016).

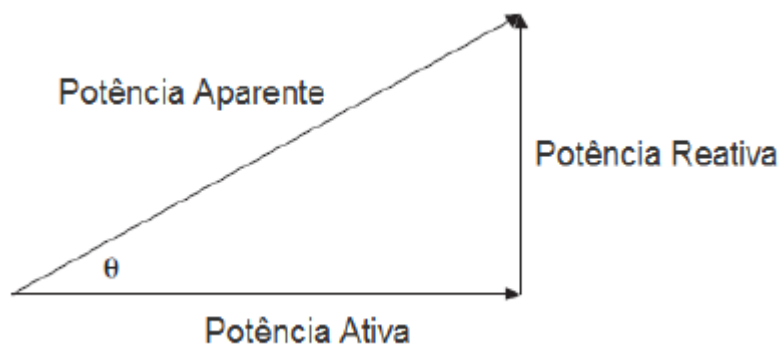
O regulador de tensão monofásico automático nada mais é que um autotransformador imerso em óleo isolante. Sua instalação é feita ao longo do alimentador de distribuição quando o mesmo é muito longo. Regula a tensão de linha até +/- 10% com intervalos de 0,625% da tensão nominal. (ROCHA, 2016).

9 FATOR DE POTÊNCIA

Segundo a ANEEL o fator de potência é a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas num mesmo período específico. Outra definição para o fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente.

A figura 19 representa o triângulo das potências para grandezas puramente senoidais.

Figura 19 – Perfil do valor eficaz da tensão ao longo de uma semana



Fonte: ROCHA, 2016

O fator de potência determina a eficácia que a potência reativa está sendo utilizada pela carga. Para ser considerado igual ao cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente, as grandezas devem ser puramente senoidais, não podem possuir harmônicas. (ROCHA, 2016)

Os motores de indução são cargas indutivas, as quais demandam uma grande quantidade de energia reativa para gerar o fluxo magnético. A energia reativa não realiza trabalho útil, porém ocupa espaço dentro dos condutores para ser transmitida e gera perdas. Por esses motivos ela deve ser produzida o mais próximo da carga que necessita dela para seu funcionamento. (ROCHA, 2016)

Nos motores o fator de potência pode variar de 0,6 quando operado em vazio até 0,93 quando operado a plena carga. Esses valores variam em virtude da

potência do motor, para amenizar o problema com o controle do fator de potência é utilizado os controladores automáticos que ligam e desligam os estágios dos bancos de capacitores de acordo com a necessidade do sistema. A concessionária faz o controle do valor medido de fator de potência, caso o limite seja ultrapassado o consumidor é penalizado na fatura de energia. (REIS e KIKUCHI, 2015).

O banco de capacitores quando usado de maneira correta mantém o valor do fator de potência dentro dos limites estabelecidos pela concessionária. O capacitor gera o reativo que é consumido pelas cargas indutivas. Dessa forma diminui a corrente eficaz circulando entre a concessionária e o consumidor, o que conseqüentemente resulta na diminuição da bitola dos condutores, diminuindo assim o custo do sistema de distribuição. (REIS e KIKUCHI, 2015).

Em sistemas onde existe a circulação de harmônicas para que a vida útil dos capacitores não seja afetada o sobre dimensionamento com relação a sua tensão nominal. Por exemplo, instalar um capacitor de 440 volts em um sistema cuja tensão nominal seja 380 volts. (ROCHA, 2016)

Outra saída para a correção do fator de potência são os motores síncronos e o controle da corrente de excitação de campo dos mesmos. Não é muito usual por questão de custo do motor síncrono, seria viável caso além de corrigir o fator de potência, esse motor estivesse fazendo o acionamento de cargas mecânicas. (REIS e KIKUCHI, 2015).

De acordo com o PRODIST, módulo 8, para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230kV, o fator de potência deverá ser entre os valores 0,92 e 1,00 indutivo ou poderá ser também entre 1,00 e 0,92 capacitivo.

As principais vantagens quanto ao controle do fator de potência são: a redução do valor da fatura de energia elétrica, a liberação de capacidade em kVA dos transformadores, a maior capacidade de transferir potência nos condutores, a redução de perdas durante a transferência da concessionária para o consumidor final e a menor queda de tensão, melhorando assim a regulação da tensão nas instalações. (REIS e KIKUCHI, 2015).

Quando o fator de potência não é corrigido os o banco de capacitores não está funcionando de forma adequada e ultrapassam os limites permitidos pelas normas o consumidor final é penalizado na próxima fatura de energia, pagando desta forma sobre o maior valor medido para excesso de reativo. A penalização pode chegar a 30% do valor da fatura.

10 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

Um importante parâmetro para avaliação das características de operação de um sistema elétrico é a frequência. A frequência é a mesma em todo o sistema elétrico, por estar vinculada a velocidade de rotação dos geradores síncronos. Para manter-se constante há o controle centralizado entre a energia que está sendo consumida e a que está sendo gerada. O acerto no valor da frequência para que permaneça constante é feito pelo Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS) o qual é responsável por controlar o despacho de carga.

Segundo o PRODIST, módulo 8, o sistema de geração e distribuição devem em condições normais de operação e em regime permanente, operar com frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. No caso de ocorrer algum distúrbio no sistema de distribuição o tempo em que a frequência deve ser estabilizada novamente é de 30 segundos, para a faixa de 59,5 Hz até 60,5 Hz.

O quadro 10 apresenta as faixas de frequência e qual o tempo máximo do desvio da frequência.

Quadro 10 – Limites para avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios

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

Fonte: ONS – Sub módulo 25.6, 2010

Atualmente são utilizadas apenas duas frequências para transmissão e distribuição de energia elétrica, são elas a frequência nominal de 50 Hz, mais utilizada na Europa e de 60Hz mais utilizada nos Estados Unidos e também Brasil. (CPFL ENERGIA, 2014)

A escolha da frequência a ser utilizada teve aspectos históricos, técnicos e principalmente interesses comerciais do final do século 19. Durante o século 19 os sistemas de transmissão eram isolados, tendo como influência para a frequência injetada no sistema o tipo de fonte geradora, a frequência gerada variava de 16 Hz até 133 Hz, porém não existia um padrão. (CPFL ENERGIA, 2014)

Para facilitar a fabricação dos equipamentos elétricos, no fim do século 19 a empresa Westinghouse, nos Estados Unidos da América, começou a produzir equipamentos que geravam frequência de 60 Hz, já na Alemanha a empresa AEG, começou a fabricar equipamentos em 50Hz. Dessa forma ficaram definidas as duas frequências que são utilizadas até hoje. (CPFL ENERGIA, 2014)

A frequência de 60 Hz apresenta como vantagem o menor uso de matérias e o menor volume de equipamentos eletromagnéticos como transformadores e máquinas elétricas. Entretanto, para transmissão de energia em longas distâncias quanto mais baixa a frequência melhor, pois assim as reatâncias do sistema são menores e melhor é a sua estabilidade. (CPFL ENERGIA, 2014)

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, é possível através do uso de inversores de frequência nos sistemas industriais, a adequação da frequência de acordo com as necessidades do processo, principalmente no acionamento de motores, diminuindo assim sua corrente inicial. (ROCHA, 2016)

11 RESUMO DOS DISTÚRBIOS RELACIONADOS A QUALIDADE DE ENERGIA

O quadro 11 mostra as principais categorias e características dos fenômenos eletromagnéticos típicos dos sistemas elétricos.

Quadro 11 - categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos típicos nos sistemas elétricos

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
Transitório			
Impulsivo			
Nano segundo	5ns	<50ns	
Microsssegundo	1µs	50ns – 1 ms	
Milissegundo	0.1 ms	>1ms	
Oscilatório			
Baixa Frequência	<5kHz	0.3 – 50 ms	0 – 4 pu
Média Frequência	5 – 500 kHz	20 µs	0 – 8 pu
Alta Frequência	0.5 - MHz	5 µs	0 – 4 pu
Variação de tensão de curta duração			
Instantânea			
Afundamento de tensão		0.5 – 30 ciclos	0.1 – 0.9 pu
Elevação de tensão		0.5 – 30 ciclos	1.1 – 1.8 pu
Momentânea			
Interrupção		0.5 ciclos – 3s	< 0.1 pu
Afundamento de tensão		30 ciclos – 3 s	0.1 – 0,9 pu
Elevação de tensão		3s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
Temporária			
Interrupção		3s – 1 min	< 0.1 pu
Afundamento de tensão		3s – 1 min	0.1 – 0.9 pu
Elevação de tensão		3s – 1 min	1.1 – 1.2 pu
Variação de tensão de longa duração			
Interrupção sustentada		>1min	< 0.8 pu
Sub tensão		>1min	0.8 – 0.9 pu
Sobre tensão		>1min	1.1 – 1.2 pu
Desequilíbrio de tensão		Regime permanente	0.5 – 2%
Distorção na forma de onda			
DC Offset		Regime permanente	0 – 0,1%

Continua

Harmônicas		Regime permanente	0 – 20%
Inter harmônicas	0 – 6 kHz	Regime permanente	0 – 2%
Notching		Regime permanente	
Ruído	Faixa ampla	Regime permanente	0 – 1 %
Flutuação de tensão	< 25 Hz	intermitente	0,1 – 7%
Varição da frequência do Sistema		< 10 s	

Fonte: IEEE 1159,2009

O quadro 12 apresenta o resumo das características dos distúrbios relacionados à qualidade de energia.

Quadro 12 - Resumo das características dos distúrbios relacionados com a qualidade de energia

Tipos de Distúrbios	Causas	Efeitos	Soluções
Transitórios Impulsivos	Descargas atmosféricas; Chaveamento de cargas	Excitação de circuitos ressonantes; Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	Filtros; Supressores de surto; Transformadores isoladores.
Oscilações Transitórias	Descargas atmosféricas; Chaveamento de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	Mal funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potencia, etc	Filtros; Supressores de surto; Transformadores isoladores.
Sub e Sobre tensões	Partida de motores; Variações de cargas Chaveamento de banco capacitores.	Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; Falhas em equipamentos eletrônicos; Redução da vida útil de maquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP's e TC's; Operação indevida de relés de proteção.	Reguladores de tensão; Fontes de energia de reserva; Chaves estáticas; Geradores de energia.

Continua

Tipos de Distúrbios	Causas	Efeitos	Soluções
Interrupções	Curto-circuito; Operação de disjuntores; Manutenção.	Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; Desligamento de equipamentos; Interrupção do processo produtivo (altos custos).	Fontes de energia sobressalentes; Sistemas no-break; Geradores de Energia.
Desequilíbrio	Fornos a arco; Cargas monofásicas e bifásicas; Assimetrias entre as impedâncias.	Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; Geração, pelos retificadores de 3º harmônico e seus múltiplos.	Operação simétrica; Dispositivos de compensação.
DC Offset	Operação ideal de retificadores de meia onda, etc.	Saturação de transformadores; Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores	
Harmônicos	Cargas não-lineares	Sobreaquecimento de cabos transformadores e motores de indução; Danificação de capacitores, etc.	Filtros; Transformadores isoladores.
Inter harmônicos	Conversores estáticos de potência; Ciclo conversores; Motores de indução; Equipamentos a arco, etc.	Interferência na transmissão de sinais carrier; Indução de flicker visual no display de equipamentos.	
Notching	Equipamentos de eletrônica de potência		
Ruídos	Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência; Radiações eletromagnéticas	Distúrbios de equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis)	Aterramento das instalações; Filtros.
Oscilações de Tensão	Cargas intermitentes Fornos a arco; Partida de motores.	Flicker; Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; Queda de rendimento de equipamentos elétricos; Interferência nos sistemas de proteção.	Sistemas estáticos de compensação de reativos; Capacitores série.

Tipos de Distúrbios	Causas	Efeitos	Soluções
Variações na frequência do sistema elétrico	Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc.	

Fonte: ALBADÓ, 2001.

Com o auxílio dos quadros 11 e 12 fica mais clara a diferença entre cada um dos distúrbios que causam uma baixa qualidade de energia. Possibilitando assim a identificação correta do fenômeno que está causando problemas na instalação, pois esta análise do problema facilita na sua correção posteriormente.

12 MEDIDORES DE QUALIDADE DE ENERGIA DISPONÍVEIS NO MERCADO

Para que os sistemas de monitoramento apresentem os mesmos resultados eles precisam seguir as normas vigentes sobre qualidade de energia. Dessa forma dois equipamentos de monitoramento instalados na mesma rede precisam apresentar resultados iguais ou muito semelhantes dentro da precisão de cada um deles.

Existem no mercado vários fabricantes diferentes, cada um com características, funções e preços diferentes. Serão analisados 3 modelos das seguintes marcas, FLUKE, MINIPA e EMBRASUL.

12.1 Analisador da Qualidade da Energia FLUKE 435 Série II

O medidor de Energia FLUKE tem como características as medições de qualidade de energia, mostra os detalhes das formas de onda da energia, captura e registra os eventos de interferência, faz os cálculos de perda e de eficiência energética. Possui a possibilidade de ser analisado os dados registrados no equipamento através de aplicativo FLUKE Connect disponível para smartphones e do PowerLog 430- II disponível para desktop.

Principais características do analisador:

- Eficiência do inversor de energia: mede simultaneamente a energia de saída CA e a energia de entrada CC para sistemas eletrônicos de energia usando grampo de CC opcional.
- Captura de dados PowerWave: capta dados rápidos de RMS e exibe meio-ciclo e formas de onda para caracterizar a dinâmica do sistema elétrico (inicializações de gerador, variação de UPS etc.)
- Calculadora de perda energética: medições clássicas de potência ativa e reativa, desequilíbrio e potência harmônica, são quantificados para identificar os custos fiscais de perdas de energia.

- Resolução de problemas em tempo real: analisa as tendências usando as ferramentas de zoom e cursores.
- Mais alta classificação de segurança da indústria: 600 V CAT IV/1000 V CAT III, classificado para uso na entrada do serviço.
- Meça todas as três fases e o neutro: com quatro sondas de corrente flexíveis inclusas com design avançado fino e flexível para caber nos menores espaços.
- Tendências automáticas: toda medida é sempre gravada automaticamente, sem a necessidade de nenhuma configuração.
- Tela do sistema: dez parâmetros de qualidade de energia em uma tela de acordo com o padrão EN50160 de qualidade de energia.
- Função de registro: o instrumento pode ser configurado para qualquer situação de teste, com memória para até 600 parâmetros em intervalos definidos pelo usuário.
 - Visualização de gráficos e geração de relatórios: com o software de análise incluído.
- Vida útil da bateria: operação contínua de 7 horas para cada carga de bateria Li-ion.
- Download sem fio de dados: Faça download do dados para o PC sem o uso de fios e capture telas usando o aplicativo Fluke Connect.

Figura 20 – Analisador de qualidade de energia FLUKE 435 – Série II



12.2 Analisador de qualidade de energia MINIPA ET-5061C

O analisador de qualidade de energia MINIPA tem como características a visualização em tempo real das seguintes grandezas, tensão, corrente, frequência, potências, energias, $\cos\phi$, flicker, picos de tensão, transitórios, assimetria, distorções harmônicas totais, harmônicos, sequência de fase, apresenta também as formas de onda de tensão, corrente, histograma, harmônicos e os diagramas vetoriais de tensões e correntes.

Sua faixa de medição de tensão para instalações trifásicas é de 0 a 1.000 Volts para medições entre fase-fase e 0 a 600 Volts para medições entre fase-neutro, fase-terra ou para fase única em casos em que a instalação é monofásica.

Figura 21 - Analisador de qualidade de energia MINIPA ET-5061C



Fonte: MINIPA, 2018

12.3 Analisador de qualidade de energia EMBRASUL – RE 8.000

O analisador de qualidade de energia EMBRASUL foi desenvolvido para fazer a leitura de 4 canais de tensão e 4 canais de corrente simultaneamente. Através da frequência de 200kHz do sistema de coleta de dados é possível fazer a medição de transitórios a partir de 5µs. Ele realiza a medição das seguintes grandezas, tensão, corrente e frequência, e faz o cálculo das grandezas secundárias, de acordo com o que está estabelecido pelas normas.

Tem como principais características:

- Diagrama de ligação elétrica na tela para facilitar a instalação
- Agendamento de início e fim de registro, com possibilidade de programar múltiplas medições
- Parametrização para que todas as grandezas integrem para registrar em conformidade com a Classe A (61.000- 4 -30)
- Inserção de informações do ponto de medição, com comentários, dados do cliente e geoposicionamento pelo GPS integrado ao equipamento.
- Possibilidade de inserção de senha para habilitar acesso a interface.

Figura 22 - Analisador de qualidade de energia EMBRASUL – RE 8.000



Fonte: EMBRASUL,2018.

12.4 Comparativo entre os modelos escolhidos

Algumas características fundamentais foram analisadas com relação aos 3 equipamento e construiu-se o quadro 13 .

Quadro 13 - Comparativo dos analisadores de qualidade de energia

Características	FLUKE 435 Série II	MINIPA ET-5061C	EMBRASUL-RE 8000
Frequência de amostragem	200 kS/s	Não descrito no manual	2MHz e 250kHz por canal
Resolução do conversor analógico - digital	16 bits	16 bits	16 bits
Faixa de medição de tensão	Até 1000 V	Até 1000 V	Até 1000 V
Faixa de medição de corrente	Até 6000 A	Até 3000 A	Até 6000 A
Faixa de medição de frequência	60 até 3000 Hz	42,5 até 69 Hz	15 até 75 Hz
Periodo de registro	1 hora até 1 ano	1 hora até 1 ano	1 hora até 3 anos
Calcula perda de energia	SIM	NÃO	SIM
Memória	Até 32 Gb	15 Mb	Até 32 Gb
Atende a norma IEC 6100-4-7	SIM	SIM	SIM
Atende a norma IEC 61000-4-30	SIM	SIM	SIM
GPS	NÃO	NÃO	SIM
Wi-fi	SIM	NÃO	SIM
Custo	57.096,58	21,700,99	37.900,00

Fonte: Autor, 2018

Os valores dos analisadores de qualidade de energia foram encontrados através do site dos fabricantes.

Dessa forma pode-se concluir que o analisador FLUKE 435 Série II pode ser utilizado para a classificação na entrada de serviços e na rede interna, para tensões até 1.000 Volts medição entre fase-fase em sistema trifásicos, em ocasiões onde a frequência do circuito seja alta.

Já o MINIPA ET-5061C pode ser utilizado para analisar os diversos parâmetros da energia elétrica em ambientes industriais, comerciais e residências, onde não haja uma grande mudança na faixa de frequência. É um instrumento que possibilita a exibição instantânea no display TFT Retro-Iluminado Touch Screen,

com armazenamento de dados em sua memória interna ou através de um dispositivo de armazenamento removível.

Em contra partida o EMBRASUL – RE 8000 pode ser utilizado em sistemas monofásicos, bifásicos e trifásicos, com sua principal vantagem o sistema de conectividade wi-fi o qual possibilita o acompanhamento em tempo real, porém com uma faixa de frequência um pouco limitada.

Com relação ao custo benefício o equipamento de medição de qualidade de energia que melhor atenderia as necessidades de um cliente industrial seria o EMBRASUL – RE 8000, pois as suas características se enquadram melhor ao setor industrial, possibilitando que o operador tenha melhor controle sobre a qualidade de energia do sistema, sem precisar se deslocar para coletar os dados.

13 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado os principais causadores segundo a IEEE – 1159 - 2009 de uma baixa qualidade de energia em um sistema elétrico. A maneira de identificá-los através de seus efeitos e algumas possíveis soluções.

Podendo-se assim concluir que para identificar cada um dos distúrbios da qualidade de energia é necessário analisar seus efeitos. Desta forma pode-se escolher um analisador de qualidade de energia que satisfaça as necessidades de determinada instalação, pois este é um equipamento de alto custo e a escolha inadequada pode trazer prejuízos ao consumidor.

Cada analisador de qualidade de energia possui diferentes características, ou seja, é de extrema importância que sejam analisados as características do sistema elétrico onde ele será instalado e as características dos efeitos causados pelos distúrbios. Pois para que o analisador de qualidade de energia faça o monitoramento adequado é indispensável que o mesmo atenda as necessidades do sistema, pois cada analisador possui suas particularidades, alguns são feitos para fazer o monitoramento em altas frequências enquanto que outros ligados em altas frequências acabam estragando, da mesma forma funciona a análise das tensões e das correntes.

Deixo como sugestão a criação de um analisador de qualidade de energia para instalações em baixa tensão monofásicas que faça a coleta dos dados através de um processo digital. Possibilitando o barateamento do protótipo, desta forma propiciando a mais usuários do sistema elétrico o controle da qualidade de energia de suas instalações, reduzindo assim os prejuízos da concessionária e principalmente do usuário que muitas vezes tem seus equipamentos danificados devido à falta de controle da qualidade de energia de suas instalações.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, módulo 8.** Brasília, 2018.

ALDABÓ, RICARDO. **Qualidade na Energia Elétrica.** São Paulo, Artliber Editora, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR14724:** informação e documentação – Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2005.

Eliminação de Harmônicas em Instalações. Schneider Eletric. 2018

HAFNER, Ângelo Alfredo. **Estudo e Simulação dos Módulos Lógicos de um Medidor de Qualidade de Energia Elétrica.** Curitiba: Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

KERN, Fernanda Gonzaga. **Análise da Qualidade de Energia Elétrica Utilizando Transformada Wavelet.** 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática), Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008.

Manual analisador de qualidade de energia EMBRASUL RE-8000. Disponível em: <<http://www.embrasul.com.br/solucoes-detalhes?id=3&title=RE8000%20Classe%20A>> Acesso em: 20 de outubro de 2018.

Manual analisador de qualidade de energia Fluke 435 Série II. Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/os-analisadores-de-qualidade-de-energia/analises-da-qualidade-da-energia-trifasica/fluke-435-series-ii>> Acesso em: 20 de outubro de 2018.

Manual analisador de qualidade de energia MINIPA ET-5061C. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/categoria/3/linha-industrial/medidores-de-potencia/analises-de-energia/283-et-5061c>> Acesso em: 20 de outubro de 2018.

PIRES, Igor Amariz. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de**

energia elétrica. 2006. 173 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós- Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2006.

REIS, Júlio César Silva dos; KIKUCHI, George Tsuruji. **Banco de Capacitores para Correção do Fator de Potência em Indústria.** 2015. 44 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2015.

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

ROCHA, Joaquim Eloir. **Qualidade de Energia.** 2016.37f. Monografia (Especialização) – Curso de Engenharia Elétrica, Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

RODRIGUES, Renato, GONÇALVES, José Correia. **Procedimentos de Metodologia Científica.** 8.ed. Lages: Ed. Papervest, 2017. 1v.

SIQUEIRA, Eduardo Chagas de. **Estudo investigativo da flutuação de tensão causada pela presença de um forno elétrico a arco.** 2017. 76 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2017.

SOUSA NETO, Cecilio Martins de. **Estabilizador de Sistema de Potência para Máquinas Síncronas de Polos Salientes Utilizando a Transformada Wavelet.** 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.

ANEXOS

Em anexo estão os manuais dos analisadores de qualidade de energia estudados neste trabalho, para maiores informações sobre as características de cada um deles entrar nos sites dos fabricantes.

DADOS TÉCNICOS

Analísadores de Qualidade de Energia Trifásica Fluke 430 Série II



MEDIDAS PRINCIPAIS

Medições de qualidade da energia, Detalhes da forma de onda da energia, Captura e registro de evento, Cálculos de perda e de eficiência de energia

COMPATÍVEL COM FLUKE CONNECT®

Visualizar dados localmente no instrumento, por meio do aplicativo móvel Fluke Connect e do software para desktop PowerLog 430-II

COM CLASSIFICAÇÃO DE SEGURANÇA PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

600 V CAT IV/1.000 V CAT III classificado para uso na entrada de serviço e na rede interna

*Nem todos os modelos estão disponíveis em todos os países. Verifique com um representante regional da Fluke.

Capacidade mais detalhada de análise de qualidade de energia e uma nova função patenteada da Fluke de cálculo de custo de energia

Os novos Analísadores de qualidade de energia e potência 430 Série II oferecem o que há de melhor em análise de qualidade de energia e apresentam pela primeira vez a capacidade para quantificar monetariamente as perdas de energia.

Os novos modelos Fluke 434, 435 e 437 Série II ajudam a localizar, prever, evitar e solucionar problemas de qualidade de energia em sistemas de distribuição de energia monofásicos e trifásicos. Além disso, o algoritmo de perda de energia patenteado da Fluke, Unified Measurement, mede e quantifica as perdas de energia devidas a harmônicas e questões de desequilíbrio, permitindo ao usuário identificar a origem do desperdício de energia dentro de um sistema.

- **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 usando grampo de CC opcional.
- **Captura de dados PowerWave:** Os analisadores do 435 e do 437 Série II capturam dados rápidos de RMS, exibem meio-ciclo e formas de onda para caracterizar a dinâmica do sistema elétrico (inicializações de gerador, variação de UPS, etc.).
- **Captura de forma de onda:** Os modelos 435 e 437 Série II capturam 50/60 ciclos (50/60 Hz) de cada evento detectado em todos os modos, sem configuração.
- **Modo transiente automático:** Os analisadores 435 e 437 Série II capturam simultaneamente dados de forma de onda de 200 kHz em todas as fases até 6 kV.
- **Conformidade total com a Classe A:** Os analisadores 435 e 437 Série II realizam testes de acordo com o exigente padrão internacional da IEC 61000-4-30 Classe A.
- **Sinalização de linhas de alimentação:** Os analisadores 435 e 437 Série II medem a interferência dos sinais de controle de oscilação em frequências diferentes.
- **Medições em 400 Hz:** O analisador 437 Série II captura medições de qualidade de energia para sistemas militares e de aviação.
- **Solução de problemas:** Analisa as tendências usando as ferramentas de zoom e cursores.

ANALISADOR DE ENERGIA MODELO: ET-5061C



PROJETADO
CONFORME NORMA
IEC 61010-1

**CAT IV
600V**

In-Rush

Interface USB

CARACTERÍSTICAS

Visualização em Tempo Real

Parâmetros Gerais da Rede

Tensão, Corrente, Frequência, Potências, Energias, Cos ϕ , Flicker, Picos de Tensão e Transientes, Assimetria, THD%, Harmônicos, Sequência de Fase.

Forma de Onda dos Sinais

Tensões, Correntes, Histogramas Harmônicos.

Diagrama Vetorial

Tensões, Correntes.

Registro

Parâmetros

Cada parâmetro geral + energia

Número de Parâmetros Seleccionáveis

Máximo 251

Período de Integração

1, 2, 5, 10, 30seg. 1, 2, 5, 10 15, 30, 60min.

Capacidade da Memória (15Mbytes)

Para análises maiores que 3 meses, 251 parâmetros @15min.

Display

TFT Retro-Iluminado Touch Screen.

1/4" VGA (320 x 240).

Contraste variável.

Sistema Operacional e Memória

Sistema Operacional

Windows CE

Memória interna

15Mbytes, expansível por Compact Flash.

Interface

USB (Host e Client), Compact Flash.

Normas Aplicadas

Segurança do Instrumento

IEC / EN61010-1 CAT IV 600V para terra (Máx. 1000V entre as entradas)

Documentação Técnica

IEC / EN61187

Segurança dos Acessórios de Medida

IEC / EN61010-031, IEC / EN61010-2-032

Qualidade da Rede Elétrica

IEC / EN50160

Qualidade da Potência Elétrica

IEC / EN61000-4-30 Classe B

Flicker

IEC / EN61000-4-15, IEC / EN50160

Assimetria

IEC / EN61000-4-7, IEC / EN50160

Dupla Isolação

Grau de Poluição 2

IP 50

Analizador de Energia RE8000



Classe A

Conf.: IEC 61000-4-30



- Display TFT LCD Colorido Touch screen 7”;
- Interface amigável e fácil operação;
- Funções completas de Qualidade de Energia.