



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



WELLERSON RODRIGO DUTRA

**PROJETO DE INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS:
ÊNFASE NO CONTROLE DA DEMANDA E DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA
PARA UM PROJETO DE QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTE**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2015

WELLERSON RODRIGO DUTRA

**PROJETO DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS INDUSTRIAIS:
ÊNFASE NO CONTROLE DA DEMANDA E DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA PARA UM PROJETO DE QUADRO DE
DISTRIBUIÇÃO INTELIGENTE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Luiz Fernando Ríspoli Alves

Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
Julho/2015

Monografia defendida e aprovada, em 03 de julho de 2015, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Luiz Fernando Rispoli Alves - Orientador



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro – Professor Convidado



Prof. Dr. Sávio Augusto Lopes da Silva – Professor Convidado

À Deus, primeiramente. À minha mãe Vanilda, pelo apoio e correções aplicadas nesse trabalho. Aos meus professores Luiz Fernando Ríspoli, Paulo Monteiro, Sávio e Henor pelo incentivo, orientação e dos livros. À equipe do Senai de Mariana. À todos que acreditaram em mim, agradeço e desejo tudo em dobro.

“A gente só conhece bem as coisas que cativou. Os
homens não têm mais tempo de conhecer .
Compram tudo prontinho nas lojas. Mas como não
existem lojas de amigos, os homens não têm mais
amigos. Se tu queres um amigo, cativa- me!”

Antoine de Saint- Exupéry

RESUMO

Um projeto de quadro de distribuição inteligente visando alcançar o equilíbrio dinâmico entre fases, que por enquanto é teórico. Com isso, baseando-se em noções e conceitos de variáveis pertencentes aos sistemas elétricos de potência e à eletrotécnica, permite-se compreender o porquê de controlar os distúrbios presentes na energia elétrica. Durante o estudo desse quadro de distribuição, serão avaliados os distúrbios frequentes, aos quais destacam-se a descarga atmosférica, as harmônicas, a tensão induzida, as interferências eletromagnéticas e eletrostáticas, o desequilíbrio de fase, a sobretensão, a subtensão, a cintilação. Esses fatores podem interferir na qualidade de energia, no rendimento de motores e geradores, na vida útil de banco de capacitores, nas perdas internas de um transformador, o que pode trazer desperdício de energia, como por exemplo, danos em equipamentos, diminuição da sua vida útil, danos materiais e danos pessoais, também causando perda na produtividade e consequentemente no lucro de uma empresa. Analisar os distúrbios e seus defeitos somente não basta, se não for levado em conta a estrutura tarifária e o gerenciamento de energia, pois eles avaliam se o fornecimento de energia condiz com aquela determinada estrutura tarifária ou não, se a indústria está sendo atendida com qualidade de produto e serviço. A melhoria na estrutura tarifária, o sistema de aterramento, a configuração de rede, o fator de carga influenciam na qualidade e eficiência energética, deve-se somente analisar a relação custo-benefício e determinar se é viável ou não esse quadro de distribuição inteligente.

Palavras-chave: quadro de distribuição inteligente, estrutura tarifária, qualidade na energia elétrica, gerenciamento de energia

ABSTRACT

A smart distribution frame seeks to achieve the dynamic equilibrium between phases, which for now is theoretical. Thus, it is based in notions and concepts of variables belonging to electric power systems and electrical engineering, what permits to understand why control disorders present in electricity. Therefore, during the study this distribution frame is evaluated frequent disorders which highlight the lightning, the harmonics, the induced voltage, electromagnetic and electrostatic interference, the phase unbalance, overvoltage, under voltage, flickering. They can interfere with the quality, efficient of motors and generators, in the life of capacitor bank, internal losses of a transformer, for example, which can bring energy waste, damage to the equipment, reduce the expected lives, property damage and personal injury, which causes loss of productivity and consequently the profit of a company. Analyze the disorders and their effects only is not enough if it is not taken into account the tariff structure and power management as they evaluate whether the power supply matches that particular tariff structure or not, if the industry is being serviced with quality product and service. The improvement in the tariff structure, grounding system, network configuration, the load factor influencing the quality and energy efficiency, it should only analyze the cost-effectiveness and determine whether it is feasible or not that smart distribution frame.

Keywords: smart distribution frame, tariff structure, quality of electricity, power management

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 2.1. Sistema Elétrico de Potência.
- FIGURA 2.2. Geração de Energia Elétrica Numa Usina Hidrelétrica
- FIGURA 2.3. Três Circuitos monofásicos independentes com suas correntes I_a , I_b e I_c
- FIGURA 2.4. Conexão Estrela, cada terminal é designado uma letra, U, V, W, X, Y, Z
- FIGURA 2.5. Conexão Triângulo, cada terminal é designado uma letra U, V, W, X, Y, Z
- FIGURA 2.6. Triângulo das Potências. P é a Potência Ativa, Q é a Potência Reativa e S Potência Aparente
- FIGURA 2.7. Sistema Elétrico Trifásico Balanceado, à Esquerda, e Sistema Elétrico Trifásico esbalanceado, à Direita
- FIGURA 2.8. Sistema TN-S, o Condutor Neutro e o Condutor de Proteção São Parados ao Longo de Toda Instalação
- FIGURA 2.9. Sistema TN-C, as funções do Neutro e de Condutor de Proteção São Combinadas em um Único Condutor ao longo de toda a instalação
- FIGURA 2.10. Sistema TN-CS, as funções de Neutro e de Condutor de Proteção São Combinadas em um único Condutor em uma Parte do Circuito
- FIGURA 2.11. Sistema TT, Neutro Aterrado Independente de Aterramento das Massas.
- FIGURA 2.12. Sistema IT, Não Há Ponto de Alimentação, Diretamente Aterrado. Massa Aterrada
- FIGURA 2.13. Simbologia
- FIGURA 2.14. Diagrama Simplificado de Suprimento à Carga Linear e Não Linear: Interação Sistema Carga.
- FIGURA 2.15. Tensão Senoidal Preserva a Forma de Onda das Correntes nos Componentes
- FIGURA 2.16. Classificação das Cargas

LISTA DE FÓRMULAS

- FÓRMULA 2.1. Energia Gasta por Equipamento
- FÓRMULA 2.2. Tensão em uma Ligação Estrela
- FÓRMULA 2.3. Tensão e Ligação em Triângulo
- FÓRMULA 2.4. Corrente em Ligação Triângulo
- FÓRMULA 2.5. Fórmula da Potência Elétrica
- FÓRMULA 2.6. Fórmula da Resistência em Função da Resistividade
- FÓRMULA 2.7. Fórmula da Reatância Indutiva
- FÓRMULA 2.8. Fórmula da Reatância Capacitivo
- FÓRMULA 2.9. Fórmula da Impedância da Linha
- FÓRMULA 2.10. Fórmula da Potência da Linha
- FÓRMULA 2.11. Fórmula da Potência em Função da Tensão e da Corrente
- FÓRMULA 2.12. Tensão Instantânea em Corrente e Alternada
- FÓRMULA 2.13. Fórmula da Corrente Instantânea Alternada
- FÓRMULA 2.14. Fórmula da Potência Aparente, em Função da Potência Ativa e Reativa
- FÓRMULA 2.15. Fórmula Fator de Potência
- FÓRMULA 2.16. Fórmula do DEC
- FÓRMULA 2.17. Fórmula do PEC
- FÓRMULA 2.18. Fórmula do DIC
- FÓRMULA 2.19. Fórmula do Fator de Carga
- FÓRMULA 2.20. Fórmula do Fator de Carga no Horário de Ponta
- FÓRMULA 2.21. Fórmula do Fator de Carga no Horário Fora de Ponta

LISTA DE TABELAS

- TABELA 2.1. Tipos de Usinas Geradoras de Energia Elétrica
- TABELA 2.2. Classificação dos Níveis de Tensão
- TABELA 2.3. Tipos de Energizações
- TABELA 2.4. Subgrupo Tarifário do Grupo A
- TABELA 2.5. Subgrupo Tarifário do Grupo B
- TABELA 2.6. Classificação dos Distúrbios
- TABELA 2.7. Principais Fenômenos Causadores de Distúrbios Eletromagnéticos segundo norma IEC
- TABELA 2.8. Fontes de Ruído e EMI

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

| | |
|---|----|
| 1.1. Visão Global e Contextualizada do Trabalho | 14 |
| 1.2. Objetivo | 15 |
| 1.3. Metodologia | 15 |
| 1.4. Justificativa | 16 |
| 1.5. Organização do trabalho | 16 |

2. DESENVOLVIMENTO

| | |
|--|-----------|
| 2.1. Revisão Teórica | 18 |
| 2.1.1. Sistema Elétrico de Potência | 18 |
| 2.1.2. Geração | 20 |
| 2.1.1.2. Transmissão | 21 |
| 2.1.1.3. Distribuição | 22 |
| 2.1.1.4. Consumo | 23 |
| 2.1.2. Sistemas Elétricos Trifásicos | 23 |
| 2.1.2.1. Conceitos Importantes a Respeito dos Sistemas Elétricos Trifásicos | 24 |
| 2.1.2.2. Impedância de Linha | 25 |
| 2.1.2.3. Tipos de Ligação num Sistema Elétrico Trifásico | 26 |
| 2.1.2.4. Tipos de Carga e Fluxo de Potência | 27 |
| 2.1.2.5. Fator de Potência | 31 |
| 2.1.2.6. Sistemas Trifásicos Equilibrados | 32 |
| 2.1.3. Qualidade na Energia Elétrica | 32 |
| 2.1.4. Desequilíbrio de Fase. | 34 |
| 2.1.4.1. Origem do Desequilíbrio de Fase | 35 |
| 2.1.4.2. Perturbações e Consequências dos Desequilíbrios de Fases | 36 |
| 2.1.5. Acoplamentos | 37 |
| 2.1.5.1. Acoplamentos Indutivos ou Magnéticos | 37 |
| 2.1.5.2. Acoplamentos Capacitivos ou Eletrostático | 38 |
| 2.1.6. Aterramento | 38 |
| 2.1.6.1. Tipos de Aterramento | 40 |
| 2.1.7. Tarifas e Demanda | 44 |
| 2.1.7.1. Tensão Fornecimento de Energia | 45 |
| 2.1.7.2. Grupos Tarifários | 45 |
| 2.1.7.3. Tarifas de Energia Elétrica | 46 |
| 2.1.7.4. Períodos e Horários | 48 |
| 2.1.8. Qualidade na energia elétrica em relação aos harmônicos | 49 |
| 2.1.8.1. Interação Entre Carga e Fonte | 49 |
| 3. METODOLOGIA DE ESTUDO SOBRE QUALIDADE, DISTÚRBIOS E GERENCIAMENTO DE ENERGIA | 51 |
| 3.1. Distúrbios | 52 |
| 3.1.1. Introdução | 52 |

| | | |
|--------------------------------|--|-----------|
| 3.1.2. | Harmônicos | 54 |
| 3.1.2.1. | Características da Presença de Harmônicos | 56 |
| 3.1.2.2. | Consequências da Presença de Harmônicos | 56 |
| 3.1.2.3. | Soluções Para Problemas de Harmônicos | 57 |
| 3.1.2.4. | Causas do Aparecimento das Distorções Harmônicas | 57 |
| 3.1.2.5. | Harmônicos Causas e Efeitos | 58 |
| 3.1.2.6. | Grupo de Cargas | 58 |
| 3.1.3. | Descarga Atmosférica | 59 |
| 3.1.4. | Tensão Induzida | 60 |
| 3.1.5. | Descarga Eletrostática | 61 |
| 3.1.6. | Subtensão e Sobretensão | 61 |
| 3.1.7. | Desequilíbrios de Tensão | 62 |
| 3.1.8. | Cintilação | 63 |
| 3.1.9 | Interferência Eletromagnética (EMI) | 63 |
| 3.2. | Efeito dos Distúrbios | 64 |
| 3.2.1 | Computadores | 64 |
| 3.2.2. | Sistemas de Comunicação | 66 |
| 3.2.3. | Controle dos Processos | 67 |
| 3.2.4. | Engenharia Biomédica | 67 |
| 3.2.5. | Fontes Alternativas de Energia | 68 |
| 3.2.6. | Transformadores | 68 |
| 3.2.7. | Lâmpada Fluorescente | 69 |
| 3.3. | Índice de Qualidade | 70 |
| 3.4. | Gerenciamento de Estrutura Tarifária | 73 |
| 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS | | 77 |
| REFERÊNCIAS | | 77 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Visão global e contextualização do trabalho

Um sistema elétrico trifásico, conforme definido por Deus (2007) é aquele que contém dois ou mais circuitos elétricos, cada um alimentado por uma fonte de tensão. Essas tensões têm mesmo valor de frequência e estão defasadas de si de 120° ou $2\pi/3$ rad. Cada circuito equivale a uma fase. Quando um sistema elétrico trifásico é expresso como equilibrado, conclui que as correntes e o seu fator de potência apresentam mesmo valor.

O desequilíbrio em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as três fases se diferenciam em valores de módulo ou defasagem angular entre fases distintas de 120° ou $2\pi/3$ rad. elétricos ou, ocorrendo as duas condições simultaneamente. As origens desses desequilíbrios estão nos sistemas de distribuição, os quais as cargas monofásicas estão mal distribuídas inapropriadamente, fazendo surgir tensões de sequência negativa. Esse problema se agrava quando consumidores que recebem alimentação trifásica possuem má distribuição de carga em circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito.

Tensões desequilibradas danificam fusíveis em uma fase de banco de capacitores trifásicos. O conceito de sistema trifásico equilibrado é apenas retratado empiricamente até o momento. Uma vez que é complexo, manter esse equilíbrio dinâmico entre as fases.

Quando o sistema trifásico está desequilibrado, poderão ocorrer correntes elétricas diferentes em módulo nas três fases, e neste caso, um quarto condutor opera, servindo como condutor de retorno da corrente de compensação, esse condutor se chama neutro. O escoamento dessa corrente pode ser entendido como forma de compensar a corrente excedente no circuito, que pode ser entendida como uma perda de energia do circuito, que implica na perda da eficiência, na qualidade e na inviabilidade técnica e econômica. (NISKIER, 2005).

O desequilíbrio de fase pode ser provocado por diferentes causas como: problema de entrega de energia, um defeito de isolamento ou um mau dimensionamento de cargas na fiação elétrica. Um desequilíbrio de corrente irá fazer que a corrente do desequilíbrio regresse ao neutro, o que pode disparar a potência elevando-a a um “pico”.(QENERGIA, 2014).

1.2. Objetivo

O principal objetivo discutir sobre uma análise de distúrbios e seus efeitos na qualidade da energia para que futuramente possa se alcançar um equilíbrio de fase dinâmico desejada em instalações industriais nas redes trifásicas através de um projeto teórico de um quadro de distribuição de inteligente, avaliando sua viabilidade econômica.

1.3. Metodologia

O problema a ser relevado são os efeitos que um desequilíbrio de fase e outros distúrbios podem provocar numa rede e como eles ocorrem , e em seguida, propor uma metodologia e aprofundamento no estudo de gerenciamento de energia elétrica, objetivando o uso do quadro de distribuição controle da demanda e da eficiência energética.

Inicialmente serão revisadas as etapas fundamentais da energia elétrica que são a geração, transmissão, distribuição e consumo. Após isso será detalhado os sistemas trifásicos, a forma como eles são ligados, e serão apresentados conceitos teóricos como, por exemplo, sistemas trifásicos equilibrados. Posteriormente, irá ser abordado sobre o desequilíbrio de fase, suas origens e efeitos na qualidade e eficiência.

Para isso recorreu-se a várias fontes de informações como livros, artigos, teses, trabalhos de conclusão de curso, *websites* e dentre outros, que irão servir para uma revisão bibliográfica de conceitos mesclando áreas do conhecimento como eletrotécnica, instalações elétricas industriais, sistemas elétricos de potência, eficiência e qualidade energética.

1.4. Justificativa

Portanto, uma das justificativas e motivações é que o estudo do gerenciamento de energia elétrica atrai cada vez mais interesse das empresas que objetivam reduzir seus custos, pois melhorando seu rendimento energético, proporciona maior aproveitamento dos equipamentos elétricos, resultando na melhoria da qualidade do produto, reduz as despesas com eletricidade, não afeta a segurança nem a vida útil dos equipamentos. Quanto aos consumidores, apresentam inúmeras vantagens como redução nos preços e serviços, maior garantia de atendimento e fornecimento de energia elétrica, evita-se também o desperdício, colaborando com a preservação do meio ambiente. (OZUR; PEREIRA; CORREA, 2014).

O uso da automação nesse meio busca minimizar essas perdas e conseqüentemente enumerar vantagens e desvantagens de um sistema de controle de demanda de energia. Os problemas só foram percebidos após a conscientização ecológica e a acentuação da crise energética brasileira no ano 2000. As principais preocupações que sentidas por parte das diversas unidades consumidoras, e que ocasionaram a procura pelo estudo são: aumento das multas e ajustes de tarifas demandados pelas concessionárias e a necessidade de aumento de produtividade através da diminuição de interrupções. (OZUR; PEREIRA; CORREA, 2014).

1.5. Organização do trabalho

O trabalho está ordenado da seguinte forma para melhor compreensão. No capítulo 1, apresenta cinco subseções, pelo qual tratam a respeito da visão global e contextualização do trabalho, seus objetivo, a metodologia, a justificativa e a organização do trabalho, respectivamente. Ele é nomeado de introdução.

O capítulo 2 se chama desenvolvimento, ele aborda conceitos e está dividido em oito subseções que estão seccionadas em mais partes, dentre os temas abordados para noções e conceitos estão os sistemas elétricos de potência, revendo conceitos teóricos como sistemas trifásicos, equilíbrio e desequilíbrio de fase, acoplamentos, aterramentos, tarifas e demandas.

No capítulo 3 chamado de metodologia, evidenciam-se os distúrbios provenientes da rede elétrica como os harmônicos, a descarga atmosférica, a interferência eletrostática, a subtensão, a sobretensão, os desequilíbrios de tensão, a cintilação, a tensão induzida a interferência

eletromagnética e dentre outros. São mencionados os efeitos dos distúrbios em cada equipamento como computadores, controle de processos, na engenharia biomédica, transformadores, fontes alternativas de energia e lâmpadas fluorescentes. Nesse capítulo, envolve também a estruturação tarifária, o gerenciamento de energia.

O capítulo 3 chamado de considerações finais, é definido se o que foi levantado nos capítulos anteriores se valida para o projeto estudado ou não , se é viável a empresa investir no controle da qualidade de energia através de um quadro de distribuição inteligente ou não.

Em seguida, sucedem as referências bibliográficas, onde se baseou esse trabalho, variando entre livros, monografias, teses, dissertações, artigos, *site*, apostilas, manuais, programas.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Revisão Teórica

Para melhor entendimento e, na busca de uma melhor proposta para que se atinja aos objetivos deste trabalho é fundamental que se faça o aprofundamento dos estudos e isto se dará com uma revisão bibliográfica nos próximos tópicos.

2.1.1 Sistema Elétrico de Potência

Um sistema de energia elétrica compreende três etapas: geração, transmissão e distribuição. As fontes de energia para o subsistema de geração são provenientes do combustível fóssil (carvão, óleo, gás natural), nuclear ou renováveis (hidrelétrica, solar, eólica e biomassa). A energia gerada é dirigida da fonte para a carga. Através dos sistemas de transmissão e distribuição. Para chegar aos usuários, elas percorrem grandes distâncias, e se submetem à transformação nas subestações. (ELEUTÉRIO, 2014).

A transmissão é o transporte de grande quantidade de energia à longa distância. É caracterizada por linhas de transmissão sob torres e condutores de grande capacidade, cobrindo desde o ponto de geração até os centros de consumo de energia. A distribuição é encarregada de rebaixar a tensão e distribuir a energia de transmissão para o consumidor nas residências, indústrias e etc. (ELEUTÉRIO, 2014).

A quantidade de falhas provocadas por condições climáticas (raios, ventos, inundação) e por acidentes, é substancial. O próprio processo normal do sistema acarreta interferências como um subproduto capaz de degradar a energia. A quantidade e a intensidade dos problemas provenientes do sistema elétrico variam em função das condições climáticas, localização geográfica, requerimentos de carga. (ELEUTÉRIO, 2014).

Os sistemas elétricos de potência consistem em sistemas de energia que são ordenados em etapas que correspondem à geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, o qual transfere toda a energia elétrica, cujo destino principal são os consumidores, e no decorrer desse processo, ela é submetida a várias transformações. A energia elétrica pode ser obtida de várias fontes primárias, isso depende da usina geradora de energia elétrica, o qual está contido no Quadro 2.1.

| Quadro 2.1- Tipos de usinas geradoras de energia elétrica | |
|---|--|
| Usina hidrelétrica | Construída onde existe um grande potencial energético por meio da água fluvial |
| Usina solar | Aproveita o potencial energético via raios solares |
| Usina eólica | Energia proveniente dos ventos |
| Usina termoeletrica | Funciona como algum tipo de combustível fóssil como petróleo , gás natural ou carvão |
| Usina nuclear | Utiliza materias radioativos que, por meio de uma reação nuclear, produzem calor |
| Usina maremotriz | Utiliza a energia contida no movimento de massa de água devido as marés |
| Usina geotérmica | Energia gerada a partir do calor proveniente do interior da Terra |

FONTE: Adaptado de GERBRAN, 2014.

O sistema atual de energia elétrica no Brasil é baseado em usinas de geração que transmitem energia através de sistemas de alta tensão, que alimenta os sistemas distribuidores de baixa e média tensão, onde estão os consumidores.

O sistema elétrico de potência é dividido de forma funcional como ilustrado na Figura 2.1.

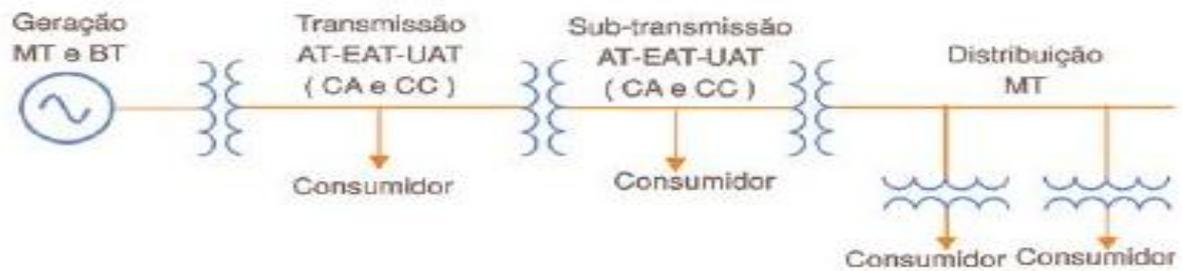


FIGURA 2.1: Sistema elétrico de potência.

FONTE: Adaptado de MECATRÔNICA ATUAL, 2013.

2.1.1.1. Geração

Gerar energia elétrica suficiente nos locais adequados, transmitindo-a até o centro de carga e então distribuí-la aos consumidores individuais sob forma e qualidade adequadas e ao mais baixo preço e corretamente ecológico. O sistema elétrico de potência é projetado para atender certas exigências, tais como: confiabilidade de suprimento, economia técnica e ecológica, qualidade de suprimento.

O sistema atual de energia elétrica é baseado em usinas de geração que despacham energia através de sistemas de transmissão de média e baixa tensão. Na geração de energia elétrica uma tensão alternada é produzida, a qual é expressa por uma onda senoidal, com frequência fixa e amplitude que varia conforme a modalidade de atendimento em baixa, média ou alta tensão. (ELEUTÉRIO, 2014).

Segundo Eleutério (2014), os geradores de energia elétrica estão limitados por diversos fatores, entre eles se destacam:

- a) Isolamento: é economicamente possível fabricar, porém limitações tecnológicas são impostas em termos de capacidade de corrente e potência;

b) Potência/velocidade: dependendo da velocidade da turbina propulsora, as aplicações de geradores de grande potência ficam limitadas em função do tipo de energia primária. A Figura 2.2 esquematiza a geração de energia elétrica.

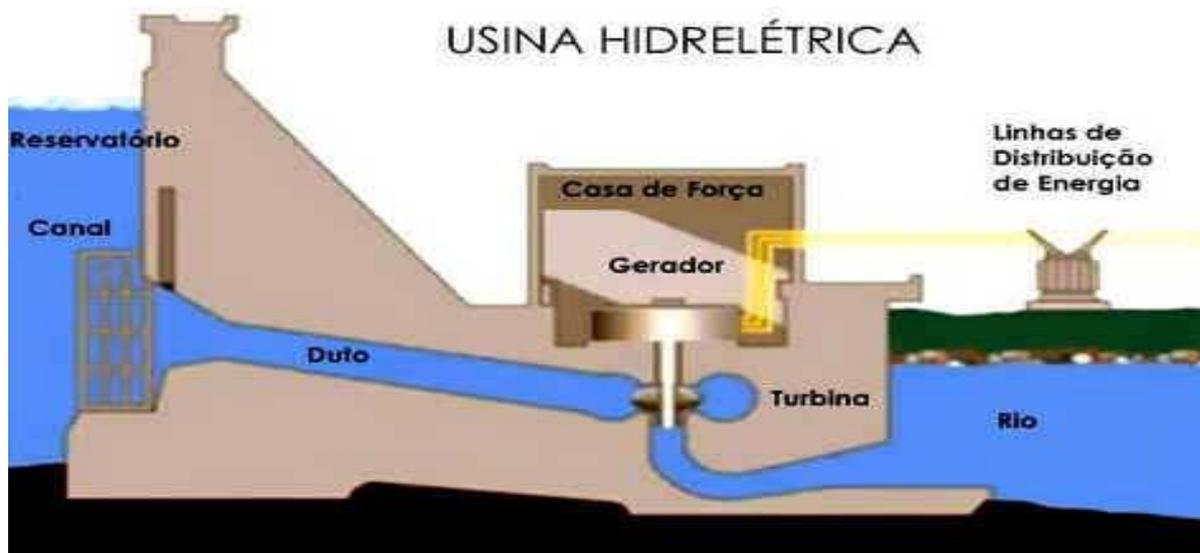


FIGURA 2.2: Geração de energia elétrica numa usina hidrelétrica.

FONTE: Adaptado de PORTAL SÃO FRANCISCO, 2014.

2.1.1.2. Transmissão

Parte do sistema elétrico de potência recebe energia gerada das usinas e transporta através de redes e cabos a energia proveniente dos grandes centros até os consumidores, levando energia com qualidade e segurança. (ELEUTÉRIO, 2014).

O sistema de transmissão se caracteriza por condutores, torres de transmissão e equipamentos auxiliares. O sistema de transmissão recebe duas subdivisões chamadas de transmissão e subtransmissão. A transmissão é a parte do sistema que interliga dois sistemas ou une um grande aproveitamento a um centro de carga, isto é, compreende as linhas e subestações da linha principal, com tensão de 230 kV para cima.

A subtransmissão reúne um conjunto de linhas e subestações que une as cargas à malha principal, com tensão compreendida entre 138 kV a 69 kV. A tensão dessas linhas depende da quantidade de energia a ser transportada e da distância a ser percorrida. Isso

significa que quanto maior a distância entre a geração e o consumo, maior será a tensão para transmissão. (GARCIA; JUNIOR, 2014).

2.1.1.3. Distribuição

As redes de distribuição atendem os consumidores industriais de médio e pequeno porte, consumidores comerciais e de serviços e consumidores residenciais.

Considera-se o sistema elétrico de distribuição, baseando-se na concepção de o processo de transferência de energia elétrica para os consumidores, abrangendo estruturas, equipamentos e condutores, a partir dos pontos que termina a transmissão, até a medição de energia.

De acordo com as redes de distribuição, são classificadas como:

- a) Linhas de distribuição primárias (AT): Parte do sistema de distribuição que transmite energia ligando subestações de distribuição, transmissão, unidades de geração e acessantes;
- b) Redes de distribuição primárias (MT): Parte do sistema de distribuição que surge da subestação e se encarrega ao suprimento da rede secundária e dos consumidores atendidos em tensão primária;
- c) Redes de distribuição secundárias (BT): Parte do sistema de distribuição que deriva dos transformadores ligados às redes primárias (MT) e se destina ao suprimento dos consumidores atendidos em tensão secundária e da iluminação pública.

A faixa de operação de tensão de serviço está situada entre 110/220 V a 35 kV. Em termos quantitativos de tensão para análise, pode-se concluir que:

- a) A geração é sempre feita em tensões iguais ou inferiores a 30 kV;

b) A transmissão é efetuada sob uma tensão maior que a geração: alta, extra-alta e ultra alta- tensão, em corrente alternada ou contínua;

O nível de tensão se relaciona à quantidade de energia e de extensão do sistema.

Veja no Quadro 2.2 as classificações dos níveis de tensão.

| Quadro 2.2- Classificação dos níveis de tensão | |
|--|--------------------|
| Baixa tensão(BT) | até 1 kV |
| Média tensão(MT) | de 1 a 66 kV |
| Alta tensão (AT) | de 69 a 230 kV |
| Extra- alta tensão | de 230 a 800 kV |
| Ultra- alta tensão | maiores que 800 kV |

Fonte: Adaptado de GEBRAN, 2014.

2.1.1.4. Consumo

Cada aparelho solicita da rede elétrica determinado consumo para poder funcionar, o computador onde você lê esse texto, consome uma quantidade dessa energia elétrica. Para fins de cálculos, para se encontrar a energia gasta de um equipamento basta utilizar a fórmula 2.1.

$$E = Pot \times \Delta t \quad (2.1)$$

Onde:

E: energia consumida pelo equipamento, em W.h;

Pot= potência solicitada pelo equipamento, em W;

Δt = intervalo de tempo, em horas.

2.1.2. Sistemas elétricos trifásicos

Quando uma rede elétrica é formada por três condutores cada um provido com uma tensão defasada de 120° ou $2\pi/3$ rad, temos uma rede trifásica. Na geração, transmissão

e distribuição de energia elétrica para fins industriais, utiliza-se o sistema trifásico quase que exclusivamente.

Pela definição de Deus (2007), um sistema elétrico trifásico equivale a um conjunto de dois ou mais circuitos monofásicos em que são geradas f.e.ms alternadas, defasadas de um certo ângulo e que estão ligadas entre si, conforme a Figura 2.3.

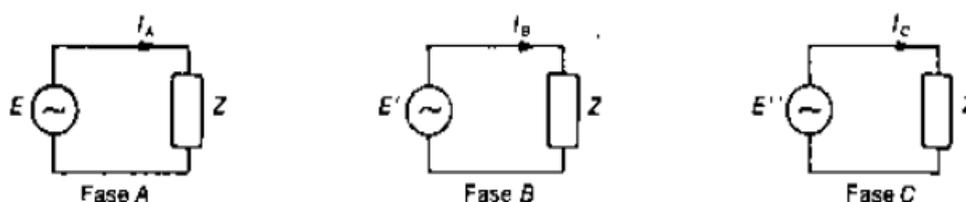


FIGURA 2.3: Três circuitos monofásicos independentes com suas correntes I_a , I_b e I_c .

FONTE: Adaptado de CIRCUITOS, 2014.

Um sistema elétrico trifásico é formado basicamente por três a quatro condutores, sendo três chamados de fase e um nomeado de neutro. Esse último caberá a função de retornar uma corrente menor proveniente das fases. (FILHO, 1986).

2.1.2.1. Conceitos importantes a respeito dos sistemas elétricos trifásicos

Serão mostradas algumas definições relevantes para o estudo dos sistemas elétricos trifásicos, de acordo com Corradi (2014) e com Eleutério (2014):

- a) Linha elétrica: conjunto constituído por um ou mais condutores, com elementos de fixação, destinado a transportar energia elétrica ou transmitir sinais elétricos;
- b) Sobrecarga: parte da carga existente em um circuito que excede a plena carga;
- c) Sobre corrente: Uma corrente que excede o valor nominal, ou seja, a capacidade de condução de corrente;
- d) Corrente de falta: Corrente que flui de um condutor para o outro ou de um condutor para o terra;
- e) Corrente de sobrecarga: sobre corrente em um circuito elétrico sem que haja falta elétrica;
- f) Carga: soma das potências nominais dos equipamentos elétricos instalados na unidade consumidora, equipamento elétrico que absorve potência ativa;

- g) Tensão de linha: é a tensão medida entre dois terminais (com exceção do centro-estrela) do gerador ou da carga;
- h) Tensão de fase: é a tensão medida em cada uma das bobinas do gerador ou da carga;

- i) Corrente de linha: é a corrente que percorre os condutores que ligam o gerador à carga;
- j) Corrente de fase: é a corrente que percorre cada uma das bobinas do gerador.

2.1.2.2. Impedância de linha

Grande parte dos distúrbios são provenientes do interior da instalação elétrica e não no sistema de distribuição da concessionária de energia. Esses distúrbios internos se relacionam com a interação da corrente de carga e a impedância de linha. (LOPEZ, 2013).

A tensão nos pontos de alimentação raramente é igual à tensão nominal. Uma das causas apontadas é a variação na capacidade e utilização da eletricidade na instalação, sendo chamada de regulação de linha. A outra é originada pelas variações da carga no interior da instalação, sendo conhecida como regulação de carga. (LOPEZ, 2013).

A impedância de linha se caracteriza pela soma da resistência, indutância e capacitância de todos os dispositivos elétricos tais como os condutores, transformadores, disjuntores, fusíveis, contadores e dentre outros. Um valor excessivo na impedância da linha causa *sags* de tensão, longos períodos de flutuação de tensão, distorção harmônica, quando as cargas são energizadas. (LOPEZ, 2013).

Algumas considerações no cálculo da impedância de linha:

- a) Impedância de fonte, informada pela concessionária de energia elétrica;
- b) Impedância do transformador de distribuição, informado pelo fabricante;

- c) Impedância dos condutores, através de tabelas para condutores elétricos;
- d) Impedâncias de contatos, fusíveis e chaves, informados pelos fabricantes;
- e) Um medidor de impedância pode ser usado na medição.

2.1.2.3. Tipos de ligação num sistema elétrico trifásico

A) Conexões estrela ou Y

As três extremidades dos fios são conectadas entre si por um fio que recebe o nome de neutro, e as outras são ligadas à rede. Como se pode visualizar na Figura 2.4, as correntes que passam na linha é a mesma que passa nos elementos. A corrente de linha se iguala a corrente de fase, ou seja, $I = I_{\text{linha}} = I_{\text{fase}}$. A tensão aplicada a cada elemento (entre condutor fase e neutro) é chamada de tensão de fase e a tensão entre condutores fase de tensão de linha. Obtendo a relação na Fórmula 2.2.

$$E = E_{\text{linha}} = \sqrt{3} \times E_{\text{fase}} \quad (2.2)$$

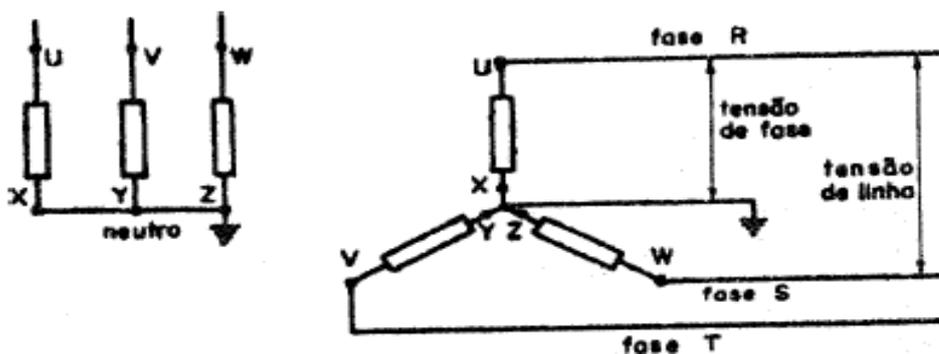


FIGURA 2.4: Conexão em estrela, cada terminal é designado por uma letra U, V, W, X, Y, Z.

FONTE: SENAI/ FIES, 1996.

B) Conexões triângulo ou delta ou Δ

A extremidade final de um elemento é ligado à extremidade final do outro, formando uma estrutura semelhante à forma geométrica de um triângulo equilátero. Os seus vértices são ligados à linha. As fórmulas de tensão e corrente são indicadas em 2.3 e 2.4,

respectivamente. E em seguida, é ilustrado como um sistema trifásico em triângulo é ligado, na Figura 2.5.

$$E = E \text{ linha} = E \text{ fase} \quad (2.3)$$

$$I = I \text{ linha} = \sqrt{3} \times E \text{ fase} \quad (2.4)$$

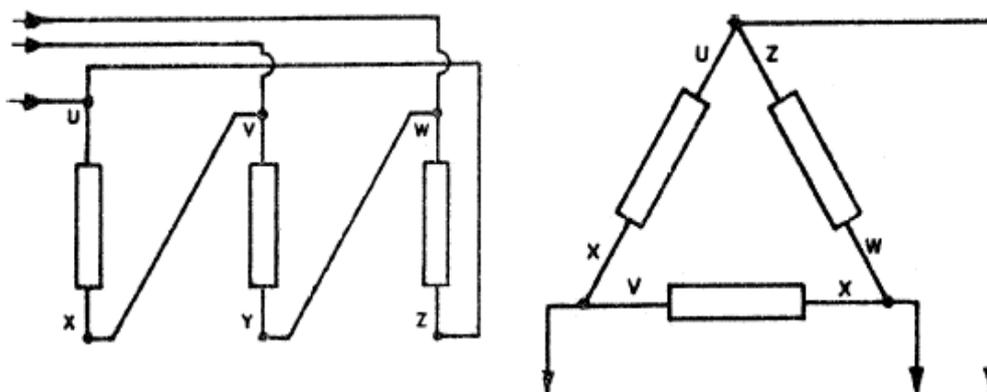


FIGURA 2.5: Conexões triângulo, cada terminal é designado por uma letra U, V, W, X, Y Z.

FONTE: SENAI/ FIES, 1996.

2.1.2.4. Tipos de carga e fluxo de potência

O transporte de energia, independente de ser primária ou secundária, estabelece um fluxo de carga entre a fonte de energia e os consumidores. Como o fluxo é variável, requer a cada instante a adequação da carga solicitada pelos consumidores, por isso precisa-se analisar o fluxo de carga entre geração e consumo. Conclui-se que a energia elétrica gerada é a soma da energia elétrica consumida e da energia elétrica perdida. (GERBRAN, 2014)

De acordo com Deus (2007), quanto ao tipo de carga, existem três tipos delas: resistiva, capacitiva e indutiva. A resistência pode ser definida como um elemento que limita o fluxo de corrente em um circuito. Essa limitação é convertida em forma de calor. Sua potência é dada pela Fórmula 2.5.

$$P = R \times I^2 \quad (2.5)$$

Onde:

P: potência, em *watts*;

R: resistência, em *ohms*;

I: corrente, em *amperes*;

O valor da resistência é em função da resistividade do material a ser utilizado, como contido na Fórmula 2.6.

$$R = \rho \times l/A \quad (2.6)$$

Onde:

ρ é a resistividade, em $\Omega \cdot m$;

A indutância em um sistema elétrico pode ser definida como o elemento que se opõe às variações de fluxo de corrente, armazena energia em forma de campo magnético quando a corrente cresce e a repõe ao circuito quando ela decresce. (DEUS, 2007).

A capacitância pode ser definida como a propriedade dos circuitos elétricos que armazena energia elétrica em um meio isolante. São separados por um material dielétrico. Todo sistema elétrico de potência, no decorrer das linhas de transmissão e distribuição, quando combinados, produzem as potências ativa e reativa. (DEUS, 2007).

A potência ativa é a potência de forma elétrica convertida em outra forma não elétrica. A potência reativa resulta no aumento de perdas no sistema, sempre causa um aumento na corrente em um sistema de corrente alternada. (REIS, 2014).

São exibidas as fórmulas das reatâncias indutiva e capacitiva, 2.7 e 2.8, respectivamente.

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L \quad (2.7)$$

Onde:

X_L : reatância indutiva, em *ohms* (Ω);

f: frequência da rede, em *hertz* (Hz);

L: indutância, em *Henry* (H);

$$X_c = 1/(2\pi fC) \quad (2.8)$$

Onde:

X_c : reatância capacitiva, em *ohms* (Ω);

C: capacitância, em *Farad* (F);

O sistema se manifesta da seguinte forma, se a reatância indutiva for maior que a reatância capacitiva, a corrente está defasada de um ângulo θ em relação à tensão; se a reatância capacitiva for predominante em relação à reatância indutiva, a corrente está adiantada de um ângulo θ em relação à tensão. (DEUS, 2007)

A impedância mescla os elementos resistivos, indutivos e capacitivos contidos no meio, abrangendo os seus efeitos no fluxo de corrente do sistema. A impedância é a soma algébrica das três grandezas e medida em *ohms*, e apresentado na Fórmula 2.9.

$$Z = R + j \times (X_L - X_C) \quad (2.9)$$

Onde:

Z: impedância, em *ohms*(Ω);

R: resistência, em *ohms*(Ω);

X_L : reatância indutiva, em *ohms*(Ω);

X_c : reatância capacitiva, em *ohms*(Ω);

A potência instantânea absorvida por uma carga pode ser expressa pelo produto da corrente pela tensão, ou pela Fórmula 2.10.

$$P = V \times I = R \times I^2 = V^2/R \quad (2.10)$$

Onde:

P: potência, em *watts*;

V: tensão, em *volts*;

R: resistência, em *ohms*;

I: corrente, em *ampéres*.

Em circuitos de corrente alternada, a expressão matemática das grandezas tensão e corrente é simbolizada pela Fórmula 2.11 e 2.12.

$$V = \sqrt{2}U \times \sin(\omega t) \quad (2.11)$$

$$i = \sqrt{2}I \times \sin(\omega t - \phi) \quad (2.12)$$

Onde:

U: valor eficaz da tensão, em volts(V);

I: valor eficaz da corrente, em A;

ϕ : defasagem entre onda senoidal da corrente e a onda senoidal da tensão;

ω : frequência angular.

Podemos determinar a potência por outra fórmula, 2.13.

$$P = UI \cos \phi - UI \cos (2 \omega t - \phi) \quad (2.13)$$

Percebe-se que a potência instantânea é dividida em duas parcelas. A primeira parte corresponde àquela entregue a carga, chamada de potência ativa, a segunda parte não chega à carga, sendo dissipada entre as reatâncias indutivas e capacitivas, sendo chamada de potência reativa. Pode-se expressar a potência através da Fórmula 2.14.

$$S = P + jQ \quad (2.14)$$

Onde:

S: Potência aparente em VA;

P: Potência ativa em W;

Q: Potência reativa em VAr.

Partindo desses conceitos e fórmulas, pode-se calcular a potência em função de qualquer carga que seja representada por uma impedância.

2.1.2.5. Fator de potência

O fator de potência é a razão entre a potência média e a potência aparente, presente na Fórmula 2.15 .

$$F_p = P / (V_{rms} I_{rms}) = \cos(\theta_v - \theta_i) = \cos \theta_{Z_L} \quad (2.15)$$

Onde:

F_p : fator de potência;

V_{rms} : valor eficaz da tensão, em *volts*;

I_{rms} : valor eficaz da corrente, em *ampéres* ;

θ_v : ângulo formado pela tensão;

θ_i : ângulo formado pela corrente.

Onde θ_{Z_L} é o ângulo de fase de impedância da carga. O fator de potência é uma grandeza adimensional e situada entre 0 e 1. Quanto mais o fator de potência tende a zero, o fluxo de energia é totalmente reativo, isso significa que a energia é devolvida a cada ciclo para a fonte. Quanto mais se tende a um valor unitário, toda a energia transmitida pela fonte é consumida pela carga. (DEUS, 2007).

Afim de melhorar o fator de potência, é efetuado a correção do fator de potência e é concretizado mediante o acoplamento de banco de indutores ou capacitores, com uma

potência Q que é contrária ao da carga, tentando ao máximo anular essa componente. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL estabelece que o fator de potência, indutivo ou capacitivo, não deve ser inferior a 0,92. (NISKIER, 2005).

Na Figura 2.6, é representado o triângulo das potências.

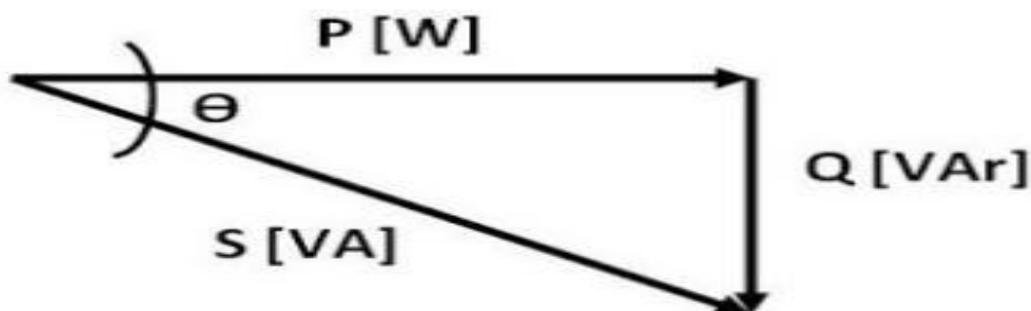


FIGURA 2.6: Triângulo das potências, P é a potência ativa, Q é a potência reativa e S é a potência aparente.

FONTE: Adaptado de CONCURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA BLOG, 2011.

2.1.2.6. Sistemas trifásicos equilibrados

Um circuito trifásico equilibrado ou balanceado é sequenciado em quatro etapas: geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica. Nas estações geradoras três tensões senoidais são geradas com mesmo módulo de amplitude, porém são defasadas de 120° uma das outras. Cargas equilibradas são consideradas as que apresentam impedâncias iguais, conectadas de forma a obter uma carga equilibrada em estrela, alimentada pelas fases provenientes da rede. (NISKIER, 2005).

Uma fase é chamada de equilibrada, quando não se passa nenhuma corrente de compensação pelo neutro, o que representa que as correntes que fluem para as fases exibem mesma intensidade. Quando o circuito está desequilibrado, afim de despachar com o excedente de corrente em uma fase, o neutro entra em operação e faz escoar essa corrente a mais no circuito. (NISKIER, 2005).

2.1.3. Qualidade na energia elétrica

Os benefícios da energia elétrica estão presentes no nosso dia-a-dia das pessoas, e com o passar do tempo vai se estendendo a sua possibilidade de uso em diversas atividades. Com isso, cresce também as exigências quanto á qualidade do produto, visto que a eletricidade é considerada como um produto comercial. O termo qualidade de energia está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. A definição abrange qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte numa falha ou má operação de equipamentos de consumidores. (LOPEZ, 2013).

Esses problemas vêm se agravando à medida que cada vez mais se instalam cargas não-lineares, que podem aumentar o nível de distorções harmônicas e podem levar o sistema a condições de ressonância. Além de se suportarem menos os distúrbios de qualidade de energia.

Podem monitorar a qualidade do suprimento através do padrão de continuidade do serviço, onde checam ocorrências de interrupção de energia; e o padrão de tensão que é definido de acordo com a forma da onda.

Lopez (2013) declara que os fenômenos transitórios duram cerca de alguns milissegundos a milésimos de segundo. De acordo com a natureza e a forma da onda, podem ser classificados como impulsivos (de origem atmosférica) ou oscilatórios (resultados de chaveamentos ou situações que há mudança súbita no regime permanente). Os efeitos da variação de tensão sob curta duração nos circuitos elétricos são a sensibilização de dispositivos de proteção, ou danificação de equipamentos, interrompendo a qualidade da produção.

Os fenômenos de longa duração ou chamados de regime permanente incluem as variações lentas nas amplitudes das tensões e na forma de onda. Desses tipos de variações, originam fenômenos como variações nos níveis de tensão, distorção harmônica de tensão e desequilíbrio de tensão. Outro efeito que pode ser abordado é o aquecimento térmico em equipamentos elétricos submetidos á condições não adequadas de funcionamento. Outro problema é o efeito de cintilação das lâmpadas, que é o efeito da variação na luminância de lâmpadas elétricas. (LOPEZ, 2013).

2.1.4. Desequilíbrio de fase

O desequilíbrio de fase é uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos, ou ainda incluir as duas condições simultaneamente. (REZENDE; SAMESIMA, 2002).

Os equipamentos operando com tensões desbalanceadas geralmente funcionarão de forma inadequada, podendo danificar e reduzir sua vida útil. A seguir é colocada a Figuras 2.7 , indicando um sistema trifásico equilibrado e um sistema trifásico desequilibrado, respectivamente.

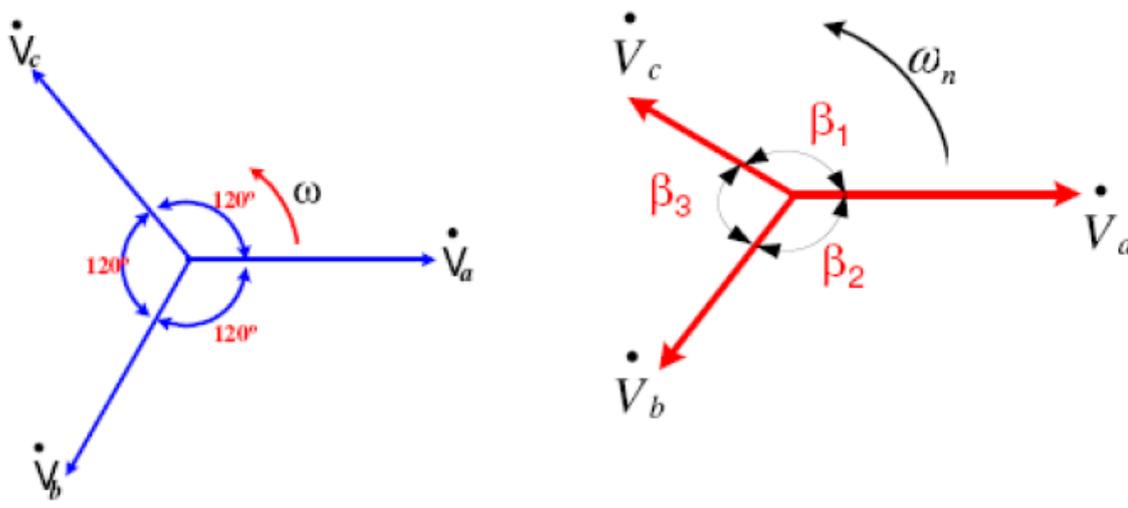


FIGURA 2.7: Sistema elétrico trifásico balanceado, à esquerda, e sistema elétrico trifásico desbalanceado, à direita.

FONTE: Adaptado de REZENDE; SAMESIMA, 2002.

Para o estudo dos desequilíbrios é usado o método de componentes simétricas. Esse consiste na decomposição da tensão ou corrente trifásicos desequilibrados em dois circuitos equilibrados, ou seja, mesmo módulo, mas defasados de 120° e um com mesmo módulo e defasado de 0° . Um é nomeado de sequência positiva, outro chamado de sequência negativa segue a sequência só que na forma contrária ao original e o outro é a sequência zero, porque está defasado de zero graus. (PAULILO, 2005).

O desequilíbrio de fase é entendido como um problema de qualidade típico de sistemas de distribuição, relacionado ao regime permanente. Os motores elétricos e as cargas não-lineares são os que mais se sensibilizam com o desequilíbrio. (REZENDE; SAMESIMA, 2002).

2.1.4.1. Origens do desequilíbrio de fase

O desequilíbrio de fase apresenta dois tipos de origem: estrutural e funcional. As causas estruturais podem ser caracterizadas por qualquer desequilíbrio na rede elétrica como os que ocorrem nos transformadores, linhas de transmissão e bancos de capacitores desbalanceados. Essa causa se mantém constante, o que é comprovado pelas pequenas variações dos parâmetros da rede elétrica. As causas funcionais se limitam às distribuições desiguais de carga nas três fases, seja pela presença de cargas desequilibradas ou pela variação nos ciclos de demanda de cada fase. (REZENDE; SAMESIMA, 2002)

A seguir são mostrados alguns exemplos de causas funcionais no desequilíbrio de fase: fornos de indução, fornos à arco, máquinas de solda elétrica, aparelhos de raio - X, linhas aéreas assimétricas e dentre outros. Os desequilíbrios podem ser provocado por diferentes causas: problema na entrega de energia elétrica, baixa tensão numa das fases, um defeito de isolamento ou um mau dimensionamento nas cargas elétricas.

Os desequilíbrios de tensão afetam fortemente o nível de distribuição de energia elétrica se comparado com os demais níveis. As fontes do desequilíbrio de fase são: a combinação de sistemas monofásicos com sistemas trifásicos principalmente cargas especiais como os fornos à arco e máquinas de solda, no mesmo sistema de distribuição, sendo as cargas monofásicas mal distribuídas ao longo do sistema trifásico.

Em sistemas de transmissão de energia elétrica também ocorrem desequilíbrio de tensão, devido às características das impedâncias das linhas. Uma maneira de minimizar esses efeitos são a transposição das fases nas torres de transmissão de energia elétrica.

2.1.4.2. Perturbações e consequências do desequilíbrio de fase

O desequilíbrio de fase podem provocar consequências danosas no funcionamento de alguns equipamentos elétricos, comprometendo-os na maioria dos casos, o seu desempenho e sua vida útil. (GERBRAN, 2014).

Nos motores de indução, um pequeno desequilíbrio pode gerar um aumento nas perdas do motor de indução trifásico. A alteração na amplitude de tensão pode influenciar a eficiência e o fator de potência de motores elétricos. Valores pequenos de tensão também são considerados nocivos, pois além de elevarem o consumo de energia, reduzem a vida útil do motor, devido ao aquecimento gerado pelo aumento das perdas internas. (GERBRAN, 2014).

A seguir são indicados os possíveis problemas que os motores podem sofrer quando submetidos ao desequilíbrio: aumento de perdas internas, elevação de temperatura de operação, surgimento de torque eletromagnético afim de frear o motor, alterações no tempo de partida do motor, diminuição do fator de potência e dentre outros.

Nas máquinas síncronas, a corrente da sequência negativa flui através do estator, criando um campo magnético girante igual à velocidade do rotor, mas no sentido contrário da sequência positiva. Conseqüentemente, as tensões e correntes induzidas nos enrolamentos de campo, a frequência será igual a duas vezes a frequência da rede, aumentando significativamente as perdas do motor. (GERBRAN, 2014).

Nos retificadores, principalmente nas pontes retificadoras CA/CC, quando o sistema supridor encontra desequilibrado, os retificadores geram além das correntes harmônicas características, o terceiro harmônico e seus múltiplos. O que é indesejável, já que possibilita a manifestação de ressonâncias, causando danos à vários equipamentos. (PAULILO, 2005).

A) Interferência e compatibilidade eletromagnética

A interferência eletromagnética (EMI), conforme Lopez (2013) é qualquer tipo de sinal indesejado, conduzido ou radiado, capaz de interferir no correto funcionamento de um equipamento sensível.

Lopez (2013) declara que a compatibilidade magnética (EMC) de um equipamento não deve sofrer interferências nem interferir no correto funcionamento de outros equipamentos situados no mesmo ambiente.

A susceptibilidade eletromagnética mede a capacidade de um equipamento suportar emissões eletromagnéticas interferentes sem sofrer problemas de funcionamento.

É difícil tornar os equipamentos imunes às interferências e devem ser consideradas a distribuição física e a fiação dos equipamentos.

Há dois modos de interferência eletromagnética:

- a) Conduzida por cabos, fios, e etc.;
- b) Radiada por indução estacionária (campos magnéticos ou eletrostáticos) e/ ou ondas eletromagnéticas (rádio).

Campos elétricos e magnéticos estacionários são geralmente significativas somente nas proximidades das fontes e têm sua influência facilmente reduzida pela instalação dos equipamentos a uma distância adequada delas.

2.1.5. Acoplamentos

Os acoplamentos no sistema elétrico de transmissão, distribuição ou subestação transformadora geram interferências eletromagnéticas.

2.1.5.1. Acoplamentos indutivos ou magnéticos

Acoplamento indutivo é o campo magnético produzido por um sistema que induz tensões numa instalação, sendo proporcional à taxa de variação da corrente e da indutância mútua que abrange o circuito. Esses acoplamentos podem originar correntes elétricas que percorrem o equipamento e o terra, fazendo surgir uma diferença de potencial causadas por tensões induzidas. (LOPEZ, 2013).

Na concepção de Lopez (2013), podem-se enumerar várias condições que afetam a intensidade das forças induzidas entre os sistemas emissor e receptor, as quais são citadas: afastamento entre os sistemas emissor e receptor, comprimento dos condutores paralelos entre os sistemas, correntes de defeito que intensificam as forças induzidas e a blindagem do sistema receptor.

2.1.5.2. Acoplamento capacitivo ou eletrostático

Trata-se da transferência de energia elétrica da instalação emissora para uma instalação localizada na sua vizinhança através de suas capacitâncias próprias e mútuas, sendo diretamente proporcional à taxa de variação de tensão e à impedância entre os circuitos emissor e receptor. (LOPEZ,2013).

As consequências associadas ao acoplamento capacitivo são: corrente elétrica seguindo através da conexão à terra do sistema receptor aterrado e a diferença de potencial induzida entre o sistema receptor e o terra, se o receptor não estiver aterrado. (LOPEZ,2013).

2.1.6. Aterramento

Conforme Filho (2002), o aterramento é a ligação de um equipamento ou de um sistema à terra, por motivo de proteção ou por exigência quanto ao funcionamento do mesmo. Um sistema de aterramento é caracterizado por unicidade para toda a instalação, canalização de gás não deve ser utilizada como aterramento.

Na visão de Cotrim (2009), o aterramento objetiva assegurar sem perigo o escoamento de corrente de falta, fuga e compensação para terra, satisfazendo as necessidades de segurança das pessoas e funcionamento das instalações.

A ligação ao equipamento pelo fio terra, se impõe por meio de condutores de proteção ligados ao neutro ou à massa do equipamento, ou seja, às carcaças metálicas dos

motores, caixas de transformadores, neutro da alimentação de energia a um prédio. (GERBRAN, 2014).

Filho (2002) reforça que o aterramento é executado com o emprego de um:

- a) Condutor de proteção: Condutor que liga as massas e os elementos condutores estranhos à instalação entre si e/ou ao aterramento principal;
- b) Eletrodo de aterramento: formado por um condutor ou por um conjunto de condutores (ou barras) que estão em contato direto com a terra, podendo se integrar a malha da terra, ligados ao terminal de aterramento.

O condutor de proteção pode ser designado como PE, quando envolve o condutor de proteção mais o neutro, ele passa a ser simbolizado PEN. Quando o condutor de proteção assegura ao sistema uma proteção equipotencial, recebe o nome de condutor de equipotencialidade. (GERBRAN, 2014).

Os aterramentos de circuitos elétricos desenergizados têm como objetivo proteger os profissionais e equipamentos na manutenção contra possíveis energizações, como: energização acidental, descargas atmosféricas, tensão estática e tensões induzidas (capacitivas e eletromagnéticas). (FILHO, 1986). Segundo previsto pela NBR5410 e NR10, foi elaborado o Quadro 2.3 para mais detalhes.

| Quadro 2.3- Tipos de energizações | |
|-----------------------------------|--|
| Energização acidental | A única proteção utilizada neste caso são os aterramentos, essas energizações são causadas não somente por religamento da rede, mas também por contatos acidentais diretos ou indiretos com linhas energizadas. |
| Descargas atmosféricas | Boas condições atmosféricas não elimina a possibilidade de que uma descarga atmosférica está atingindo o sistema a um outro local distante, energizando-o. Os aterramentos fornecem proteção, mas nada adianta se estiver realizando alguma atividade com más condições atmosféricas no local. |
| Tensão estática | Devido ao atrito com o ar e a poeira, linhas de transmissão sofrem uma contínua indução, que se soma às demais tensões. As tensões estáticas vão crescendo continuamente, ao longo período de tempo, pode ser relativamente grande. |
| Tensões induzidas | Pode-se ter tensões induzidas nas linhas de transmissão devido ao acoplamento capacitivo e eletromagnético. As tensões induzidas capacitivas ocorrem se os condutores estiverem separados por meios dielétricos, propiciando o efeito capacitivo. A utilização do aterramento para a manutenção evita o perigo de tais correntes, descarregando-as para a Terra. As tensões induzidas eletromagnéticas, apesar da maior parte das correntes, ao aterrar a rede serem despachadas para a Terra. Ainda resta uma tensão induzida eletromagneticamente. Essa tensão é induzida por redes ou por linhas de transmissão energizadas próximas. Tratando de uma linha aterrada em apenas uma das extremidades, a tensão terá seu maior pico na extremidade aterrada, mas se ambas forem aterradas, existirá uma corrente fluindo no circuito formado com a Terra. Ao se instalar o aterramento provisório uma corrente fluirá por seu intermédio, diminuindo a diferença de potencial existente e ao mesmo tempo "jampeando" a área de trabalho, o que possibilita uma maior segurança neste ponto para o profissional de manutenção. |

FONTE: GERBRAN, 2014.

2.1.6.1. Tipos de aterramento

Segundo a simbologia literal de Filho (1986), os sistemas elétricos de baixa tensão, tendo em vista a alimentação e as massas dos equipamentos em relação à terra, são classificadas pela NBR5410:

- a) A primeira letra equivale a situação da alimentação em relação à terra:
- T: para um ponto diretamente aterrado;
 - I: isolamento de todas as partes vivas em relação à terra ou emprego de uma impedância de aterramento, a fim de limitar a corrente de curto-circuito para a terra;

b) A segunda letra diz sobre a situação das massas em relação à terra:

- T: para massas diretamente aterradas, independente de um aterramento eventual de um ponto de alimentação;
- N: massas ligadas diretamente ao ponto de alimentação aterrado;

c) Outras letras para indicar a disposição do condutor neutro e do condutor de proteção:

- S: quando as funções de neutro e condutor de proteção são realizados por condutores distintos;
- C: quando as funções de neutro e condutor de proteção são exercidas num único condutor.

São exibidos os diagramas de cada uns dos tipos de aterramento nas Figuras 2.8, 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13.

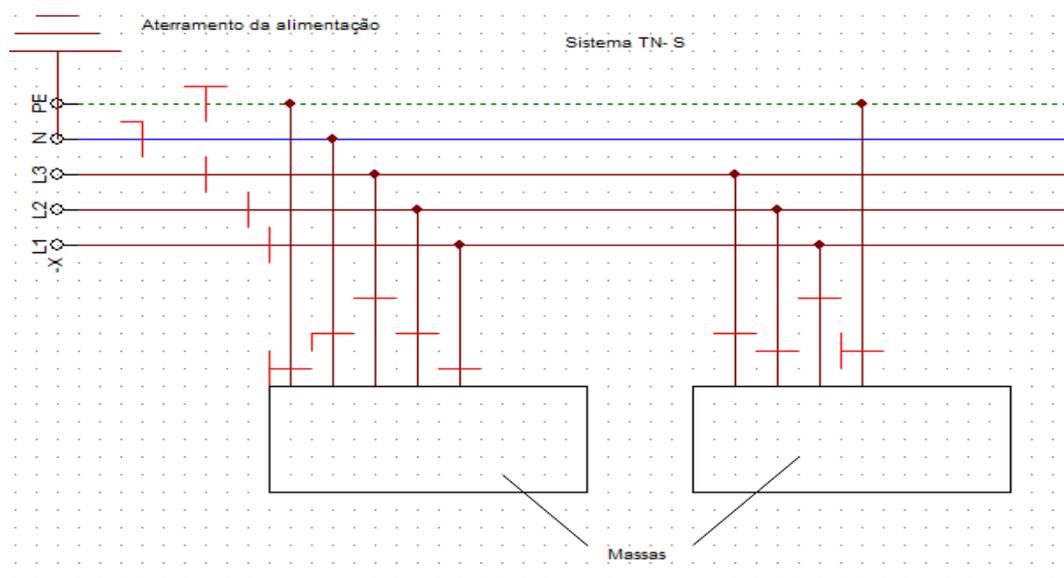


FIGURA 2.8: Sistema TN- S, o condutor neutro e o condutor de proteção são separados ao longo de toda a instalação.

FONTE: Adaptado de NISKIER, J., 2005.

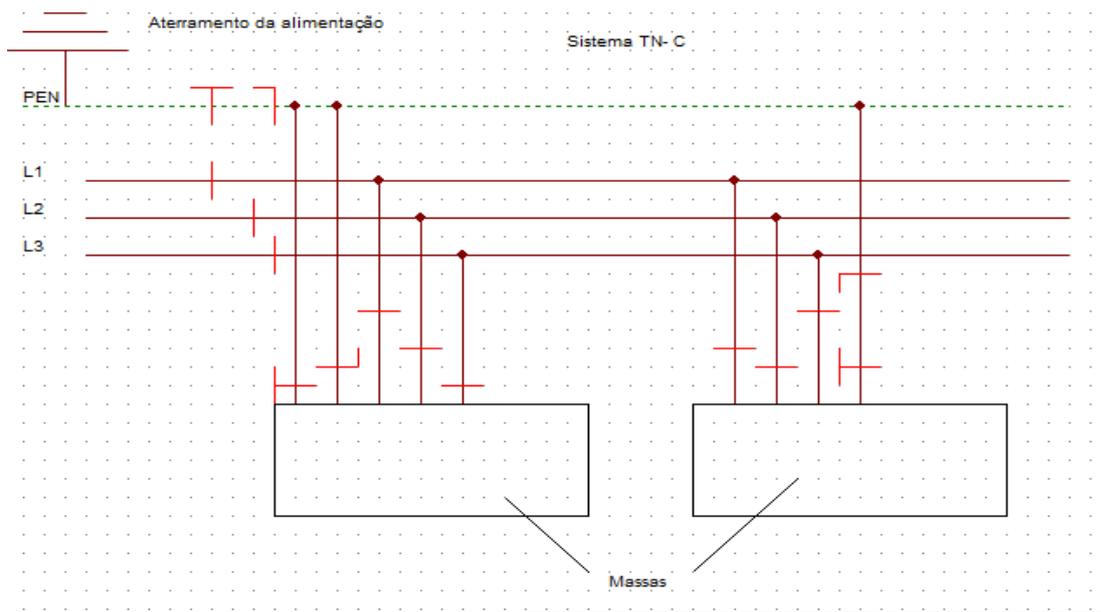


FIGURA 2.9: Sistema TN- C, as funções do neutro e de condutor de proteção são combinadas em um único condutor ao longo de toda a instalação.

FONTE: Adaptado de NISKIER, J., 2005.

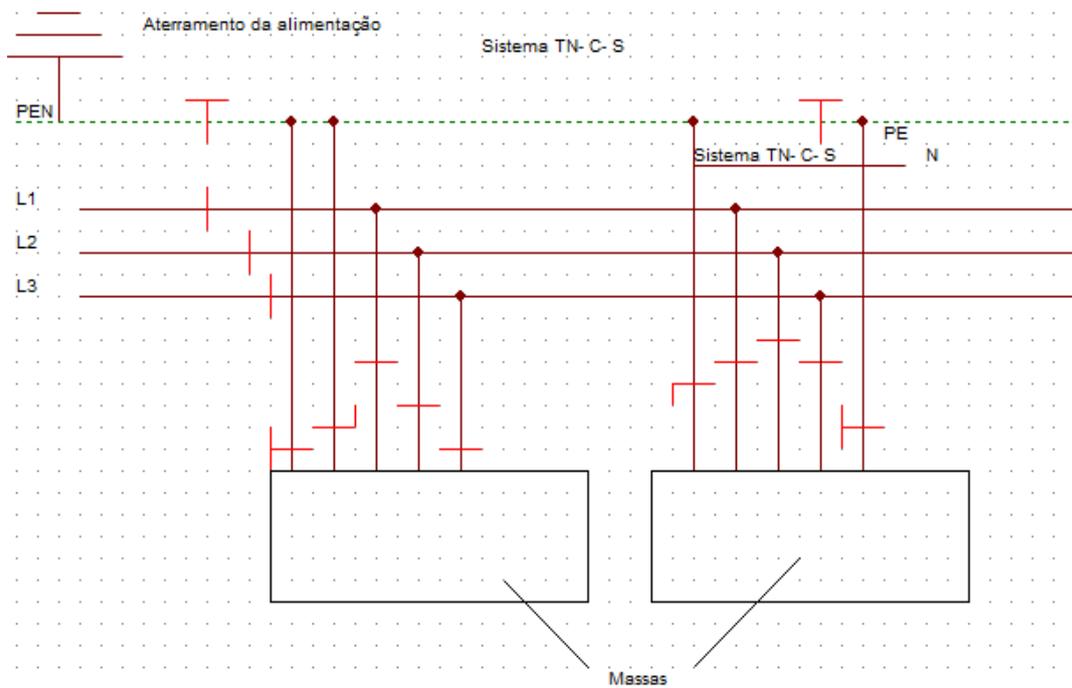


FIGURA 2.10: Sistema TN- C- S, as funções de neutro e de condutor de proteção são combinadas em um único condutor em uma parte do circuito.

FONTE: Adaptado de NISKIER, J., 2005.

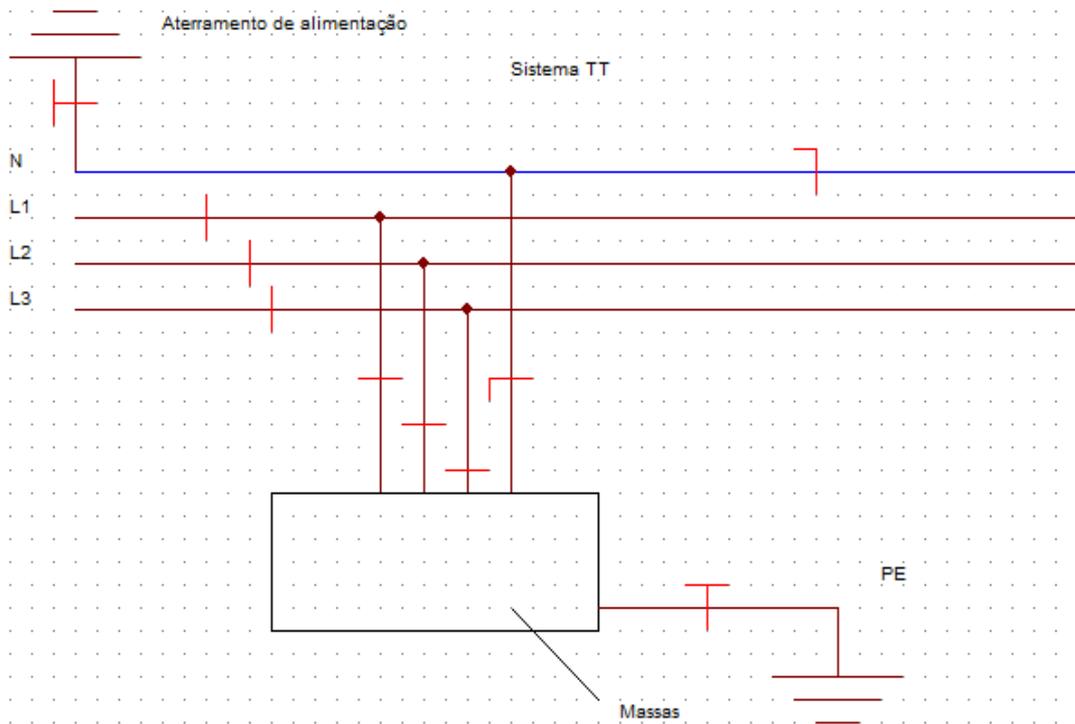


FIGURA 2.11: Sistema TT, neutro aterrado independente de aterramento das massas.

FONTE: Adaptado de NISKIER, J., 2005

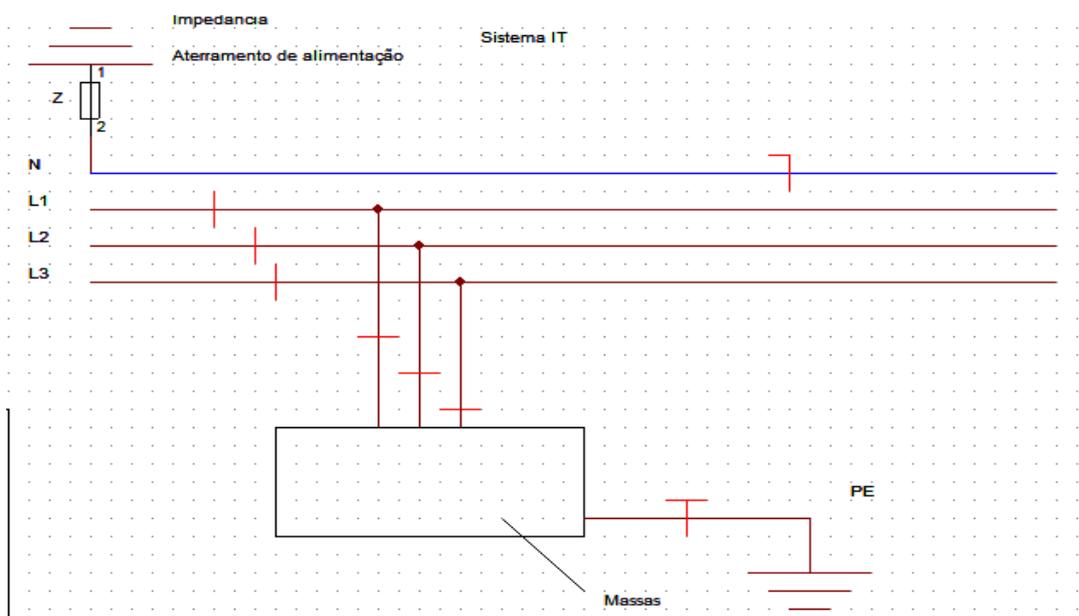


FIGURA 2.12: Sistema IT, não há ponto de alimentação diretamente aterrado. Massa aterrada.

FONTE: Adaptado de NISKIER, J., 2005.

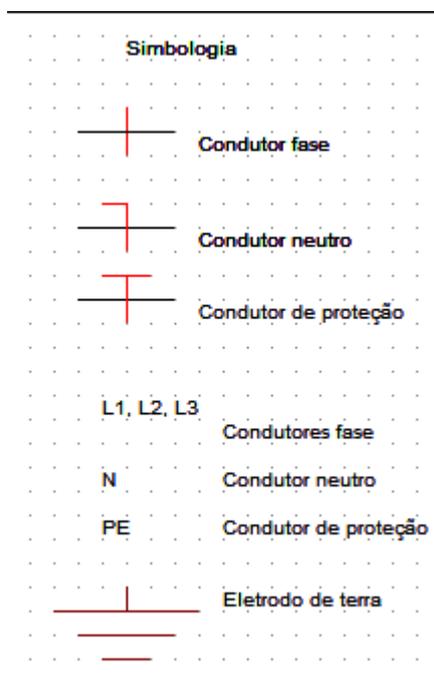


FIGURA 2.13: Simbologia.

FONTE: Adaptado NISKIER, J., 2005.

2.1.7. Tarifas e demanda

A medição de energia elétrica é empregada, na prática para possibilitar à entidade fornecedora o faturamento adequado da quantidade de energia elétrica consumida pelo usuário e, também permitir que a unidade consumidora possa redistribuir entre os seus consumidores internos o consumo totalizado de energia e assim fazer a distribuição interna de custos de energia. (OZUR;PEREIRA;CORREA, 2011).

A energia elétrica é uma “mercadoria” comercializada como outra qualquer, tendo então algumas implicações de ordem prática. (OZUR;PEREIRA;CORREA, 2011). A Resolução da ANEEL nº 456 de 29/11/2000, são algumas definições adotadas, tendo em vista as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, visando a sua conservação.

2.1.7.1. Tensão fornecimento de energia.

Conforme abordado por Ozur; Pereira; Correia (2011) foi estabelecido qual o nível de tensão de fornecimento para a unidade consumidora, observando-se os seguintes limites:

- a) Tensão primária de distribuição inferior a 69.000 kV: quando for superior a 75 kW e a demanda contratada ou estimada pelo interessado for igual ou inferior a 2.500 kW;
- b) Tensão primária de distribuição igual ou superior a 69.000 V: quando a demanda contratada ou estimada para o fornecimento for superior a 2.500 kW;
- c) Tensão secundária de distribuição: quando a carga instalada da unidade consumidora for igual ou inferior a 75kW.

2.1.7.2. Grupos Tarifários

Os problemas da gestão de energia, só foram percebidos após a conscientização ecológica e a acentuada crise energética brasileira, ocorrida após o ano de 2000.

O sistema de Gestão de Energia Elétrica, portanto, é um complexo e específico sistema capaz de gerenciar o consumo de energia elétrica, prevendo e advertindo os operadores nos momentos em que ocorrem estouros de consumo de energia, bem como de cortar, automaticamente, o consumo de dispositivos, com respeito à escala de prioridades e hierarquias pré-definidas.

Distinguem-se dois grupos tarifários, para efeito de faturamento:

- a) Grupo “A” (Alta Tensão)

Composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2.300 V, ou, atendidas em tensão inferior a 2.300 V a partir de sistema subterrâneo de distribuição, caracterizado pela estruturação tarifária binômica (consumo da energia ativa + demanda faturável) e subdividido nos seguintes subgrupos, conforme Quadro 2.4.

| Quadro 2.4- Subgrupo tarifário do grupo A | | | | | |
|---|-----------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|--|
| Subgrupo A1 | Subgrupo A2 | Subgrupo A3 | Subgrupo A3a | Subgrupo A4 | Subgrupo AS |
| Tensão igual ou superior a 230.000 V | Tensão 88.000 V a 138.000 V | Tensão 69.000 V | Tensão 30.000 V a 44.000 V | Tensão 2.300 V a 25.000 V | Tensão Inferior a 2.300 V, Subterrâneos (redes elétricas subterrâneas) |

FONTE: OZUR; PEREIRA; CORREA, 2011.

b) Grupo “B” (Baixa Tensão)

Composto de consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2.300 V, ou ainda, atendidas em tensão superior a 2.300 V, caracterizado pela estruturação tarifária monômnia (consumo da energia ativa) e subdividido nos seguintes subgrupos, conforme Quadro 2.5.

| Quadro 2.5- Subgrupo tarifário do grupo B | | | |
|---|------------------------------------|----------------|--------------------|
| Subgrupo B1 | Subgrupo B2 | Subgrupo B3 | Subgrupo B4 |
| Residencial | Rural | Demais classes | Iluminação pública |
| Residencial baixa renda | Cooperativa de eletrificação rural | | |
| | Serviço público de irrigação | | |

FONTE: OZUR; PEREIRA; CORREA, 2011.

2.1.7.3. Tarifas de Energia Elétrica

Conjunto de tarifas aplicáveis às componentes de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência ativas de acordo com a modalidade de fornecimento.

A. Sistema Tarifário Convencional

Caracterizado pela aplicação de tarifas de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência independente das horas utilizadas do dia e dos períodos do ano.

B. Sistema Tarifário Horo-Sazonal

É uma modalidade tarifária que se caracteriza pela aplicação diferenciada de acordo com o horário de utilização e dos períodos do ano. As tarifas verde e azul contemplam a utilização dos conceitos apresentados a seguir conforme (OZUR;PEREIRA;CORREA, 2002): horário de ponta, horário fora de ponta, demanda medida, demanda contratada, período seco.

C. Tarifa Azul

Tarifas diferenciadas de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.

É considerada a modalidade tarifária que tem aplicação compulsória para as unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 69KV (A1, A2 e A3), sendo opcionais para demais consumidores. Exige um contrato específico entre a distribuidora de energia e o consumidor onde, destacam-se as seguintes cláusulas:

- a) Dois valores de demanda contratada (KW), um para o segmento de ponta e o outro para o segmento fora de ponta;
- b) Para cada posto horário é aplicado uma tarifa diferente, sendo a tarifa de ponta da ordem de 3 vezes o valor da tarifa fora de ponta;
- c) Dentro do período de faturamento, a demanda faturável será o maior dentre a demanda contratada e a demanda medida em cada posto horário;

d) São aplicadas tarifas diferentes para o período de ponta e fora de ponta em caso de ultrapassagem da demanda contratada.

D. Tarifa Verde:

Tarifado de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência. E só pode ser atendidas em tensão inferior a 69kV (A3a, A4 e AS), sendo necessário um contrato específico, com as seguintes características:

- a) Um único valor de demanda contratada (KW), independente do posto horário (ponta ou fora de ponta), sendo aplicada uma única tarifa para esta demanda;
- b) Dentro do período de faturamento;
- c) Um único valor de tarifa para o caso de ultrapassagem de demanda.

2.1.7.4. Períodos e horários

A) Horário de ponta (P):

Período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos e feriados nacionais, considerando as características do seu sistema elétrico. (OZUR;PEREIRA;CORREA, 2011).

B) Horário fora de ponta (F):

Período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta. (OZUR;PEREIRA;CORREA, 2011).

C) Período úmido (U):

Período de 5 (cinco) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano e abril do ano seguinte. (OZUR;PEREIRA;CORREA, 2011).

D) Período seco (S):

Período de 7 (sete) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro. (OZUR;PEREIRA;CORREA, 2011).

2.1.8. Qualidade da energia elétrica em relação aos harmônicos

De acordo com Leão; Sampaio; Antunes (2014), a qualidade da energia elétrica (QEE) 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. Sem uma alimentação adequada, com certo padrão de qualidade, a carga pode operar inadequada ou incorretamente, falhar prematuramente ou simplesmente não funcionar.

O perfil de tensão usado como padrão de qualidade apresenta forma de onda alternada senoidal, com frequência fixa e amplitude que varia conforme a modalidade do atendimento. Em sistemas em corrente contínua (cc), o padrão de tensão e corrente é de valor fixo (sem ondulações) e polaridade constante. (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

2.1.8.1. Interação Entre Carga e Fonte

Uma das propriedades da energia elétrica é que alguma de suas características dependem não só da eletricidade fornecida pelo produtor/fornecedor, mas também dos equipamentos nas instalações dos clientes. (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

A QEE é uma via de duas mãos, visto que a qualidade da tensão de suprimento tem influência no perfil da corrente que circula na instalação, e a natureza da carga pode influenciar o perfil da tensão. (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

A figura 2.14, um diagrama unifilar simplificado com fonte de suprimento e carga linear e não linear ilustra a interação sistema-carga.

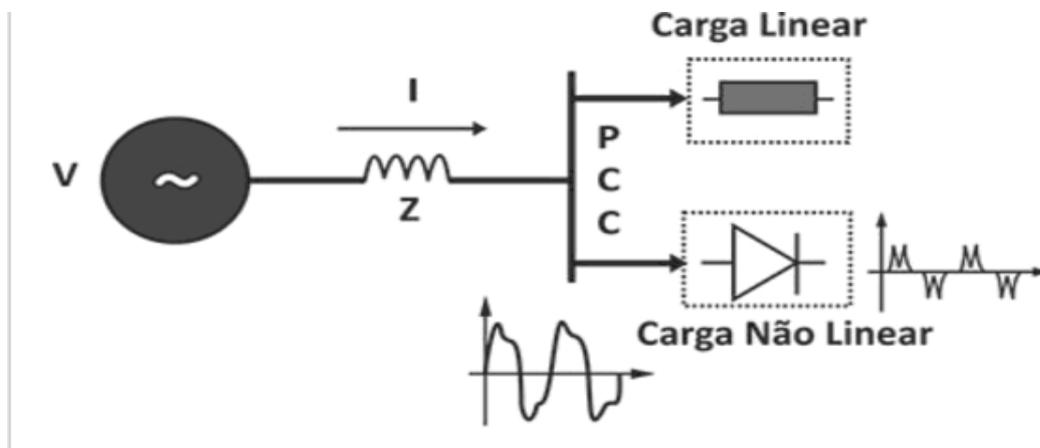


Figura 2.14 – Diagrama simplificado de suprimento à carga linear e não linear: interação sistema-carga.

Fonte: Adaptada de LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014.

Cargas lineares produzem correntes não distorcidas quando energizadas por uma fontes não distorcida (senoidal). Já as não lineares produzem correntes distorcidas (não senoidal) mesmo quando energizadas por uma fontes não distorcida.

O efeito direto das cargas não lineares sobre a qualidade da energia é a distorção da corrente, e o indireto, a distorção na tensão. Correntes harmônicas circularão por cargas lineares conectadas nos pontos alimentados por tensões não senoidais. Quando submetidas a tensões não senoidais, as cargas não lineares produzem correntes harmônicas em proporções diferentes das alimentadas por tensão senoidal. (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Em um sistema dito “robusto”, em que a corrente de falta é elevada e a impedância do sistema é pequena, o impacto das cargas não lineares sobre a distorção de tensão no PCC é em geral pequeno, não causando problemas de QEE. Em um sistema sensível, no qual a impedância do sistema é alta, a distorção na tensão do PCC pode atingir proporções elevadas, com a possibilidade de causar problemas de QEE.

A qualidade da tensão denota a capacidade de um sistema de potência operar cargas sem perturbá-las ou danificá-las e está relacionada às características de todos os suprimentos e montante do PCC. (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

3. METODOLOGIA DE ESTUDO SOBRE QUALIDADE, DISTÚRBIOS E GERENCIAMENTO DE ENERGIA

O principal objetivo desse trabalho como foi comentado anteriormente, era de se realizar um estudo teórico a respeito de conceitos que abrangem qualidade, demanda e eficiência para um projeto teórico de um quadro de distribuição inteligente, foi enfatizado um estudo sobre os distúrbios presentes na energia elétrica para que assim, futuramente alguém possa implementá-lo. O tema foi escolhido com o intuito de propor um modelo de quadro de distribuição inteligente, de forma que esse possa alcançar o equilíbrio dinâmico, implicando numa melhoria da produtividade industrial, além da viabilidade técnica e econômica. Para que a sugestão fosse compreendida, iniciou-se o trabalho com conceitos fundamentais, mostrando como a energia elétrica chega em nossas residências e nas empresas, como estão dispostas as fases na rede elétrica, definiu-se conceitos teóricos de sistema trifásico equilibrado e desequilíbrio entre fases, e o que o desequilíbrio pode causar.

Usou-se também meios para facilitar o que estava sendo explicado em cada seção e subseção através de ilustrações, figuras, tabelas, desenhos, esquemas, inclusive pode-se citar as figuras contidas na subseção 2.1.4.1, nomeada de “Tipos de Aterramento”, os esquemas foram projetados num *software* conhecido como SimuCAD.

Esse conjunto de definições e teorias serviu para embasar o principal foco da análise que são os efeitos originados do desequilíbrio, e o que ocorre se o sistema estiver sujeito a distúrbios.

Quanto aos distúrbios, serão indicados um por um, estabelecendo uma relação entre esses e seus efeitos nos equipamentos elétricos e eletrônicos, a relevância disso se

justifica o motivo de se criar os quadros de distribuição inteligentes num ambiente residencial ou industrial.

Recorreu-se às várias fontes bibliográficas como livros, artigos, monografias, apostilas, *sites*, teses, programas de computadores e dentre outros.

Tentou-se mesclar o ponto de vista de um autor com outro, afim de tentar elencar as vantagens de um, as desvantagens do outro, e também para complementar uma literatura com a outra, o que um autor traz de inovador em relação ao outro. E assim, o leitor pode tirar suas devidas conclusões, além de que desse trabalho pode-se servir de inspiração para outros trabalhos adiante.

3.1. Distúrbios

O distúrbio de energia produz resultados indesejáveis para o sistema conectado como carga. Também chamado de problema de energia, que é um conjunto de distúrbios, ele aparece no sistema devido a fatores externos e internos. Os fatores externos são os produzidos pelos subsistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição.

3.1.1. Introdução

A maioria dos problemas que surgem nos sistemas elétricos é causado pela excessiva distorção das correntes ou tensões junto ao consumidor final. A principal causa deste fenômeno deve-se à crescente utilização de equipamentos eletrônicos alimentados pela rede elétrica. Quase todos os equipamentos eletrônicos, com alimentação monofásica ou trifásica, incorporam um circuito retificador à sua entrada, seguindo de um conversor comutado do tipo CC-CC ou CC-CA. Um dos tipos de retificadores mais utilizados e equipamentos de baixa potência é o monofásico de onda completa com filtro capacitivo, que possui uma corrente e entrada altamente distorcida. O elevado conteúdo harmônico da corrente distorce a tensão na saída devido à queda de tensão nas impedâncias do sistema de alimentação. (LOPEZ, 2013).

O Quadro 2.6 apresenta a classificação dos distúrbios.

| Quadro 2.6 Classificação dos Distúrbios | | |
|---|---|---|
| Distúrbios | Causas | Efeitos |
| Harmônicas | Cargas não lineares, chaveamento | Ressonância, perdas adicionais, interferências telefônicas |
| Sobretensão | Curto desequilibrado, redução de carga | Sobrecorrente, aumento de perdas, redução de vida útil de aparelhos |
| Subtensão | Curto-circuito | Sobrecorrente, desligamento |
| Interferência eletromagnética | Mau contato, chaveamento em alta frequência | Aquecimento localizado e falhas de sistemas |
| Interferência eletrostática | Harmônicas | Ruídos |
| Descarga atmosférica | Sobretensões | Tensões induzidas, sobrecorrentes |
| Desequilíbrio de tensão | Cargas desiguais, curto entre fases | Sobretensão e sobrecorrente |
| Cintilação | Cargas variáveis | Incômodo, estresse |

FONTE: Adaptado de DECKMANN; POMILIO, 2015.

De acordo com o Quadro 2.7, são divididos a proveniência dos fenômenos causadores de distúrbios segundo a norma IEC.

| Quadro 2.7- Principais fenômenos causadores de distúrbios eletromagnéticos segundo norma IEC | |
|--|--|
| Fenômenos conduzidos de baixa frequência | Harmônicas, ruídos do sistema elétrico, flutuação de tensão,, afundamento e interrupção de tensão, desbalanceamento de tensão, tensões induzidas de baixa frequência |
| Fenômenos radiados de baixa frequência | Campos magnéticos, campos elétricos |
| Fenômenos conduzidos de alta frequência | Tensões ou correntes de fontes contínuas induzidas, transientes unidirecionais, transientes oscilatórios |
| Fenômenos radiados de alta frequência | Campos magnéticos, campos elétricos, campos eletromagnéticos, ondas contínuas, transientes |
| Fenômenos de descarga elétrica (ESD) | - |
| Pulsos eletromagnéticos nucleares (NEMP) | - |

FONTE: Adaptado de LOPEZ, 2013.

Os distúrbios elétricos são eventos que podem ser medidos ou registrados por instrumentos utilizados para monitorar sistemas elétricos. Esses instrumentos são, geralmente, voltímetros de precisão que podem mudar magnitudes e polaridades de voltagens instantâneas.

Em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, os impactos econômicos da qualidade da energia são enormes. E diante deste potencial de prejuízos, ficam evidente a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica, no intuito de determinar as causas e as consequências dos distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnica e economicamente viável para solucionar o problema. (LOPEZ, 2013).

O transiente é o distúrbios no sistema, além de apresentar medidas técnica e economicamente viável para solucionar o problema. (LOPEZ, 2013). O transiente é o distúrbio que dura menos de um ciclo. Os transientes são de natureza impulsiva ou oscilatória. Um transiente impulsivo é normalmente um impulso elevado, oscilatório. A descarga atmosférica é a causa mais comum de transientes impulsivos. (LOPEZ, 2013).

Um transiente oscilatório oscila na frequência natural do sistema e normalmente acontece em um ciclo. Esses transientes (também chamados de transientes de chaveamento) ocorrem quando uma carga indutiva ou capacitiva é retirada do circuito (por exemplo, motor e banco de capacitores para correção, de fator de potência). Um transiente oscilatório ocorre porque a carga remanescente ao circuito rejeita a alteração. Isso é similar ao que acontece quando é bloqueado repentinamente o fluxo de água num conduto (fenômeno conhecido como golpe de aríete): a repentina mudança no fluxo da água provoca uma rejeição de carga.

3.1.2. Harmônicos

Leão; Sampaio; Antunes (2014) informam que os harmônicos têm origem na área de acústica e de instrumentos musicais, com significado de múltiplo inteiro ou

componentes de um tom, bem como múltiplos não inteiros denominados sub e sobretons. Na engenharia, o termo “harmônico” ou “harmônica” é usado indistintamente, notando-se maior preferência pelo último.

Sua presença em um sinal elétrico não é um fenômeno novo. A preocupação com a distorção harmônica surgiu durante o início da história dos sistemas de potência em corrente alternada.

O sinal senoidal mantém suas características de frequência única para tensão e corrente quando observada através de componentes passivos de circuitos, como resistores, indutores e capacitores, conforme Figura 2.15. As formas de ondas senoidais são condições almeçadas nos sistemas elétricos, uma vez que transformadores, máquinas e aparelhos elétricos são projetados com base em um suprimento senoidal. (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

| Componente | Símbolo | Unidade | Forma de Onda da Tensão de Entrada | |
|------------|---------------------------------------|------------------|---|-------------------------|
| | | | Senoidal | Quadrada |
| Resistor | | ohm (Ω) | Corrente senoidal | Corrente retangular |
| | $i = \frac{v}{R}$ | | $i = \frac{v}{R} \cdot \sin(\omega t)$ | |
| Indutor | $i = \frac{1}{L} \int v \cdot dt$ | henri (H) | Corrente senoidal $i = \frac{v}{\omega L} \cdot \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$ | Corrente triangular |
| Capacitor | $i = C \cdot \frac{dv}{dt}$ | farad (F) | Corrente senoidal $i = (\omega C)v \cdot \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$ | Corrente impulsiva |

Figura 2.15 – Tabela: Tensão senoidal preserva a forma de onda das correntes nos componentes.

Fonte: Adaptado de de LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014.

Uma onda periódica distorcida, deformada ou sem conformidade senoidal é o resultado da sobreposição de uma série de ondas senoidais, que possui uma componente fundamental e um conjunto de ondas, denominadas “harmônicas”, responsáveis pelo maior ou menor grau de distorção da onda distorcida.

Mais recentemente, a presença de harmônicos tem crescido pela aplicação, na indústria, comércio, residências e serviços, da eletrônica incorporada aos equipamentos elétricos para aumento da eficiência e confiabilidade dos equipamentos.

A presença simultânea de cargas eletrônicas e de bancos de capacitores usados para a correção de fator de potência e regulação de tensão pode resultar na amplificação dos sinais de tensão e corrente por ocorrência de ressonância, fenômeno causado pela associação de elementos capacitivos e indutivos na rede ou circuito elétrico, proporcionando variações na impedância e, por consequência, modificações na forma de onda da tensão e de corrente. Entre as soluções para atenuar os efeitos dos harmônicos, a filtragem é uma das mais aplicadas. Várias alternativas de filtros e análise da resposta da filtragem podem ser examinadas por simulação.

3.1.2.1. Características da presença de harmônicas

Pode-se alistar as seguintes características de equipamentos na presença de harmônicas:

- a) Condutores da presença de harmônicas;
- b) Transformadores quentes e ruidosos;
- c) Motores com falhas frequentes e trabalhando com temperaturas elevadas;
- d) UPS (*no-break*) com falhas frequentes;
- e) Geradores de energia com baixo rendimento (50 a 60% da capacidade nominal);
- f) Baixo fator de potência na instalação;
- g) Relógios elétricos adiantando constantemente.

3.1.2.2. Consequências da presença de harmônicas;

- a) Capacitores: queima de fusíveis e redução da vida útil;
- b) Motores redução da vida útil e impossibilidade de atingir potência máxima;
- c) Fusíveis/Disjuntores: operação falsa ou errônea e componentes danificados;
- d) Transformadores: aumento de perdas, causando redução da capacidade e diminuição da vida útil;
- e) Telefones; interferências;

f) Banco de capacitores: podem originar condições de ressonância, caracterizando uma sobretensão nos terminais das unidades capacitivas. Além disso, consumidores conectados no mesmo ponto ficam submetidos a tensões perigosas. Mesmo sem uma condição de ressonância, um capacitor é sempre um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas, e sempre estará sempre sujeito a sobrecarga e sobreaquecimento excessivo.

3.1.2.3. Soluções para problemas de harmônicas

- a) Aplicar fontes de alimentação com controle interno de harmônicas e correção do fator de potência;
- b) Usar disposição balanceada nas cargas fontes de harmônicas na instalação, de forma a obter corrente senoidal;
- c) Adicionar impedância (reatores de linha) e identificar fontes de correntes harmônicas para reduzir suas magnitudes.

3.1.2.4. Causas do aparecimento das distorções harmônicas

- Circuitos de iluminação com lâmpadas de descarga;
- Fornos a arco;
- Compensadores estáticos, tipo reator saturado etc.;
- Motores de indução controlados por inversores com comutação forçada;
- Motores síncronos controlados por ciclo conversores;
- Fornos de indução de alta frequência etc.;
- Velocidade dos motores CA controlados por tensão de estator;
- Reguladores de tensão a núcleo saturado;
- Reguladores de tensão a núcleo saturado;
- Computadores.

3.1.2.5. Harmônicos Causas e Efeitos

Para estudar as características dos sistemas elétricos e usual considerá-los como resultado da interligação e interação de diferentes componentes básicos, como fonte de alimentação, componentes de rede e carga elétrica. Uma das propriedades da energia elétrica é que algumas de suas características dependem não só da eletricidade fornecida pelo produtor/distribuidor, mas também dos equipamentos nas instalações dos consumidores. (LEÃO, 2014).

3.1.2.6. Grupos de Cargas

As cargas, de modo geral, podem ser classificadas em essenciais, sensíveis e perturbadoras na Figura 2.16.

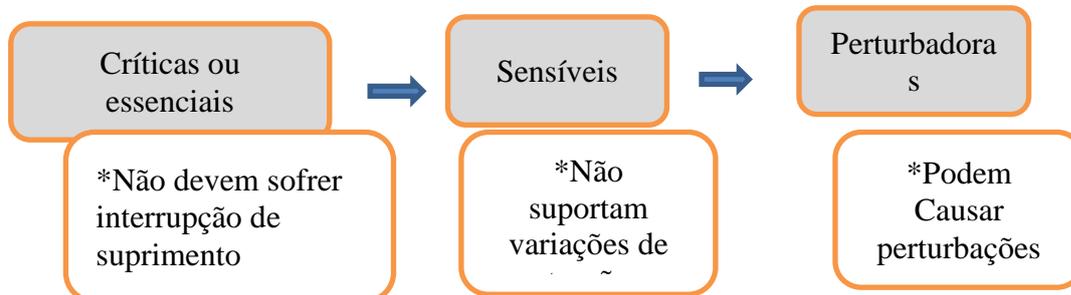


Figura 2.16 – Classificação das cargas

Fonte: Adaptado de LEÃO, 2014.

Cargas críticas ou essenciais, pela sua natureza indispensável não devem sofrer interrupção de fornecimento de energia ou operação indevida causada pela falta de suprimento de energia, sob pena de pôr em risco vidas humanas ou resultar em prejuízos vultosos. Exemplo de cargas críticas são as do tipo linear e não linear, como as dos centros de controle de voos, dos grandes centros de processamento de dados financeiros, hospitais, etc.

Cargas sensíveis não suportam variações de tensão, mesmo de curta duração (p. ex., inferior a 30 ciclos). Nessa classe estão incluídas as cargas não lineares eletrônicas e digitais. Constituem tal grupo aquelas utilizadas em modernas instalações industriais, como controladores lógicos programáveis, robôs, acionamento de velocidade variáveis para motores, computadores pessoais, dispositivos de redes de computadores, impressoras, conversores de frequência etc.

Cargas perturbadoras são aquelas cuja operação pode causar perturbações, como distorções harmônicas, desequilíbrios, flutuação, afundamentos de tensão etc. Exemplos são as cargas lineares e não lineares, do tipo ferromagnéticas e eletrônicas. São, na maioria, cargas industriais com processos de retificação, fornos elétricos a arco, grandes motores e outras.

3.1.3. Descarga atmosférica

O raio é simplesmente uma descarga de eletricidade estática. Eles ocorrem em nuvens de chuva, onde cargas estáticas são geradas em água e partículas de gelo e separadas por fortes correntes de ar. A carga estática sobre cada partícula individual é pequena, mas em grandes concentrações de nuvens de carga se tornam elevada. (LOPEZ, 2013).

As partículas dentro da nuvem (chamadas hidrometeoros) estão sempre crescendo e interagindo e, através de colisões, é possível que elas adquiram carga elétrica. (LOPEZ, 2013).

Sob a influência das correntes de ar e da gravidade, essas partículas tendem a se distribuir, as carregadas negativamente se situam na parte superior da nuvem, enquanto as partículas positivas ficam na parte inferior. A separação de cargas eletricamente positivas com as eletricamente negativas produz um grande potencial elétrico (na ordem de um milhão de volts) no interior da nuvem e entre nuvem e terra.

Quando a descarga elétrica encontra-se a alguns metros da superfície da terra, seu potencial elétrico produz campos elevados na superfície. (LOPEZ, 2013).

Após o encontro entre descargas descendentes com as descargas ascendentes, o potencial elétrico concentrado é despachado para a terra. O resultado é um pulso de corrente com alta intensidade e de curta duração sobre o solo ou objeto. Esse pulso é denominado de surto de retorno, inicia na terra e propaga-se em direção a nuvem.

Quando um raio incide diretamente sobre uma instalação, o caminho principal acontece pela cobertura, atingindo a estrutura metálica de fundação, fiações condutoras, equipamentos elétricos e eletrônicos. A incidência sobre linhas de eletricidade, telefone e dados situados na proximidade também podem causar danos severos por impulsos de corrente, e podem induzir tensões extremamente altas em condutores elétricos. O raio é composto pelo relâmpago (flash de luz) e trovão (som).

Quanto aos tipos de descarga atmosférica em Lopez (2013):

- a) Raio nuvem - terra: é o tipo mais perigoso e que causa mais danos. Muitas descargas são originadas no centro de carga menos negativo e se propagam conduzindo cargas negativas em direção ao aterramento. Contudo, uma parcela das descargas conduz cargas positivas que ocorrem geralmente durante o período de dissipação de tempestades;
- b) Raio intranuvem: O processo tem início no interior e é difundido para o exterior da nuvem, podendo extravasar seus limites e tornar-se um raio do tipo nuvem - terra;
- c) Raio entre nuvens: ocorre entre centros de carga de nuvens diferentes, produzindo uma descarga entre elas.

3.1.4. Tensão induzida

Um dos efeitos mais relevantes das descargas atmosféricas consiste nas tensões induzidas pela corrente que circula no canal ionizado constituído entre nuvem e solo durante o estabelecimento da descarga. (LOPEZ, 2013).

As tensões induzidas constituem a mais importante fonte de distúrbios em sistemas elétricos e eletrônicos de média e baixa tensão. As sobretensões associadas são responsáveis pela maior parte dos desligamentos das linhas de distribuição de energia e pelos danos repercutidos na rede elétrica e eletrônica de nível de tensão reduzido, como as de telecomunicações. (LOPEZ, 2013).

As sobretensões induzidas por descargas próximas das redes de distribuição e de telecomunicações se propagam no sistema, ao difundir-se ao longo dos seus condutores. (LOPEZ, 2013). Tais redes podem atuar como consumidoras alimentadas, sendo ali capaz de causar danos.

3.1.5. Descarga eletrostática

Quando há uma diferença no potencial eletrostático entre dois objetos carregados, estabelece fluxo de energia eletrostática para que os seus potenciais fiquem equilibrados. Esse fluxo de energia é chamado de descarga eletrostática. (LOPEZ, 2013).

A eletricidade estática é um fenômeno no qual as cargas elétricas estacionárias, produzidas por fricção ou separação de materiais distintos, se acumulam em materiais condutores não aterrados ou em superfícies não condutivas.

A eletricidade estática fornece pequenas correntes e altas tensões. Quando ocorre a descarga eletrostática, geralmente abaixo de 200 V, pode haver falha em semicondutores eletrônicos sensíveis, tais como circuitos integrados.

3.1.6. Subtensão e sobretensão

Subtensão, conforme Lopez (2013) é a diminuição na tensão CA RMS para menos de 90% de seu valor nominal com duração superior a 1 minuto. Sobretensão é o aumento na tensão CA RMS superior a 110% do valor nominal, com duração superior a 1 minuto.

As condições de subtensão são causadas por instalações mal dimensionadas, taps incorretos de transformadores, reguladores de tensão desajustados ou sobrecarga não intencional na rede elétrica. A subtensão pode resultar em erros ou baixa performance dos equipamentos. Motores drenam mais corrente, trabalham com aquecimento excessivo e menos eficiência sob condições de subtensão.

4.1.7. Desequilíbrios de tensão

Os desequilíbrios de tensão podem ser definidos como o desvio máximo da média das correntes ou tensões trifásicas, expressado em percentual. As origens deste desequilíbrio estão geralmente nos sistemas de distribuição, os quais apresentam cargas monofásicas distribuídas inadequadamente, fazendo surgir no circuito tensões de sequência negativa.

Este problema se agrava quando consumidores alimentados de forma trifásica exibem uma má distribuição de carga em seus circuitos internos, impondo correntes desequilibradas no circuito da concessionária. (LOPEZ, 2013).

Estes circuitos podem causar problemas indesejáveis no funcionamento de equipamentos, dentre os quais se destacam:

a) Motores de indução: consideram-se somente os efeitos produzidos pelas tensões de sequência negativa, que somados aos resultados da tensão de sequência positiva, resultam num conjunto pulsante no eixo da máquina e no sobreaquecimento da máquina; (LOPEZ, 2013).

b) Máquinas síncronas: a corrente de sequência negativa, escoando através do estator de uma máquina síncrona, cria um campo magnético girante com velocidade igual à do rotor, porém no sentido contrário ao da rotação definida pela sequência positiva. Consequentemente, as tensões e correntes induzidas nos enrolamentos de campo, de amortecimento e na superfície do ferro do rotor, terão uma frequência igual à duas vezes ao da rede, aumentando significativamente as perdas no rotor. (LOPEZ, 2013).

3.1.8.Cintilação

Baseando em Lopez (2013), flutuações de tensão entre 0,5 e 25 Hz que causam variações visíveis a olho nu na iluminação. É a existência de pequenas e repetitivas quedas de tensão que são causadas por cargas elevadas que solicitam altas correntes por breves e repetidos períodos.

O fenômeno da cintilação consiste de uma impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso de lâmpadas.

A impedância da rede é constituída pelo conjunto de cabos e transformadores AT/BT (alta tensão ou baixa tensão), sendo esta tão menor quanto maior for a potência(kVA) do transformador. O *flicker* tem um efeito fisiológico desagradável para as pessoas que trabalham em ambientes com lâmpadas incandescentes, mas sem nenhum efeito sobre os aparelhos e circuitos eletrônicos. O *flicker* é causa de preocupação somente quando cargas pesadas são manobradas ou quando a impedância do circuito é alta. (LOPEZ, 2013).

3.1.9. Interferência eletromagnética (EMI)

O Quadro 2.8 mostra as possíveis fontes de ruído e EMI.

| Quadro 2.8- Fontes de ruído e EMI | |
|-----------------------------------|--|
| Industrial e comercial | Fornos e arcos de indução, lâmpadas fluorescentes, impressoras laser e ar |
| Comunicações | Estações de rádio e TV. Radar, telefonia celular e transmissores de controle |
| Sistemas de potência | Contator, retificador, chaveamentos e curtos-circuitos |
| Causas naturais | Descargas atmosféricas e tempestades magnéticas |
| Máquinas e ferramentas | Aparelhos de solda, compressores, motores e sistemas de ignição |
| Eletrodomésticos | Forno de microondas, máquinas de lavar e secar, termostatos |

FONTE: Adaptado de LOPEZ, 2013.

3.2. Efeitos dos distúrbios

3.2.1. Computadores

Equipamentos de comutação trabalham e armazenam grande quantidade de informações e são altamente sensíveis a distúrbios na energia.

Os computadores e as redes de dados utilizam o terra como referência para todas as etapas e funcionam com níveis baixos de tensão, ± 5 V.

A seguir, destacam algumas consequências dos distúrbios na energia:

- a) Falhas em componentes eletrônicos;
- b) Apagamento da memória ou instruções de programas;
- c) Erros de paridade;
- d) Reinicializações e desligamentos indesejados.

As variáveis que afetam diretamente a sensibilidade do equipamento aos distúrbios elétricos são: sistema de aterramento, características do projeto, velocidade de operação, interligações entre equipamentos, configurações de rede e a densidade de equipamentos de instalação. (LOPEZ, 2013).

As interferências eletromagnéticas podem ser relacionadas internamente e/ ou externamente ao sistema de comunicação, mas sua causa sempre se origina nas perturbações eletromagnéticas. (LOPEZ, 2013).

As perturbações com origem interna são geradas dentro do ambiente por onde passam os cabos de dados e de voz digital (cabeamento lógico) e outros tipos de cabo. (LOPEZ, 2013).

As perturbações de origem externa são campos eletromagnéticos vindos de fora da rede de dutos ou canaletas e que causam perturbações diretamente sobre os cabos lógicos, como sinais de TV, ondas de rádio, motores elétricos e etc.

As perturbações sejam provenientes de ondas eletromagnéticas externas ou de outros cabos próximos que transmitem outras formas de energia ou sinal de dentro da tubulação ou canaleta, devem ter um tratamento especial durante a etapa de instalação do sistema de cabeamento, objetivando-se adotar medidas para atenuar ou mesmo eliminar defeitos.

O mercado de equipamentos e acessórios exibem basicamente canaletas e dutos fabricados com os seguintes materiais:

- a) Plástico: excelente isolante térmico, porém não dispõe de proteção contra campos eletromagnéticos;
- b) Alumínio: não oferece proteção elétrica, porém realiza boa blindagem eletromagnética;
- c) Aço: não é bom condutor de eletricidade, não serve para proteção elétrica, mas assegura boa blindagem eletromagnética.

Um campo eletromagnético variável pode criar uma corrente elétrica que por sua vez, gera um campo magnético contrário ao que lhe deu origem. Esse efeito é considerado responsável pela atenuação das interferência eletromagnética quando são utilizadas canaletas ou dutos de alumínio. Além desse fato, as canaletas de alumínio são praticamente imunes às correntes de *Foucault* devido à sua condutibilidade elétrica. (LOPEZ, 2013).

3.2.2. Sistemas de comunicação

Os equipamentos de telecomunicações atuais, conforme Lopez (2013) são muito sensíveis a distúrbios na rede elétrica. Sistemas telefônicos digitalizados correspondem a computadores programados para processar sinal de voz.

O sistema telefônico adota como referência o terra e utiliza diversos níveis de tensão (± 5 V; - 48 V).

Pode-se citar algumas consequências dos distúrbios na energia:

- a) Interferência nos programas;
- b) Alteração na informação dos endereços;
- c) Chamadas incompletas;
- d) Baixa relação sinal- ruído (interferência na banda de fonia).

As variáveis que afetam diretamente a sensibilidade do equipamento aos distúrbios elétricos são: sistema de aterramento, características de projeto, velocidade de operação, interligações entre equipamentos, configuração de rede e densidade de equipamentos na instalação. (LOPEZ, 2013).

As correntes harmônicas circulando no sistema de distribuição ou na instalação de consumidor final podem criar interferências nos circuitos de comunicação compartilhando um caminho comum. Tensões induzidas em condutores paralelos por correntes harmônicas normalmente situadas dentro da faixa de comunicação de voz. A tensão induzida por ampère de corrente contínua aumenta com a frequência. Harmônicas de 3^a, 9^a e 15^a ordem são problemáticas em sistemas de quatro fios, porque estão nas fases do circuito trifásico e diretamente no neutro, que está mais vulnerável aos circuitos de comunicação.

As correntes harmônicas no sistema elétrico são acopladas em circuitos de comunicação por indução ou condução direta. A utilização de cabos blindados e condutores de par trançado minimizam o problema. O acoplamento indutivo direto equivale a ambos os

67

condutores, resultando em tensão de nó nula no loop formado por condutores. O acoplamento indutivo pode causar problemas se altas correntes são induzidas na blindagem em torno dos condutores. A corrente circulando na blindagem produz uma diferença de potencial em relação ao terra nas extremidades do cabo telefônico. (LOPEZ, 2013).

A corrente na blindagem também pode ser causada por condução direta. Se as condições do solo local não são tais que uma quantidade relativamente grande de corrente circula na blindagem, ocorre a formação de diferença de potencial das extremidades do cabo telefônico em relação ao terra. (LOPEZ, 2013).

3.2.3. Controle de processos

O controle de processo é observado em sistemas tais como automação de fábricas, controle de iluminação e controle de temperatura. (LOPEZ, 2013).

- a) Ressaltam- se algumas consequências dos distúrbios na energia:
- b) Falhas em componentes eletrônicos; Interferência nos programas;
- c) Controle digital/analógico com erros.

As variáveis que afetam diretamente a sensibilidade do equipamento aos distúrbios elétricos são: sistema de aterramento, características de projeto, velocidade de operação, interligações entre equipamentos, configuração de rede e densidade de equipamentos na instalação.

3.2.4. Engenharia biomédica

Os equipamentos eletrônicos da área biomédica são utilizados em aplicações médicas para monitoração de sinais vitais, substituição funcional de órgãos, medição e análise de componentes orgânicos e medição controlada de medicamentos.

Consequências dos distúrbios na energia:

- a) Interferência nas medições;
- b) Falhas nos equipamentos eletrônicos;

68

A frequência de ondas cerebrais situa-se na faixa entre 3 Hz e 100 Hz, ritmo cardíaco de 60 a 200 batidas por minuto; níveis de tensão entre 70 mV e 2 V. Os distúrbios de 60 Hz e 180 Hz ficam situados diretamente nesses intervalos.

Os efeitos dos sinais eletromagnéticos irradiados dependem da intensidade do campo (V/m) percebido pelo equipamento, do comprimento de onda desse sinal em relação às dimensões dos componentes e cabos (agindo como antenas espúrias), do tipo de modulação do sinal (analógica ou digital) e do acoplamento entre as antenas (posicionamento e polarização).

3.2.5. Fontes alternativas de energia

As fontes alternativas de energia, tais como geradores de emergência e UPS (*no-break*), são utilizados para alterar o nível de tensão e frequência, providenciar a regulação da tensão, isolar equipamentos elétricos e manter alimentação para cargas durante a interrupção de energia pela concessionária de serviço.

Consequências dos distúrbios na energia:

- a) Falha de redes de controle;
- b) Distorção na tensão que pode forçar operação contínua de baterias;
- c) Abertura de disjuntores.

As fontes podem conduzir aos seguintes distúrbios:

- a) Picos de corrente ou harmônicos geradas pela carga que podem interagir com a impedância da própria fonte, causando distorção e instabilidade na tensão.

As variáveis que afetam diretamente a sensibilidade do equipamento aos distúrbios elétricos são: projeto, envelhecimento do equipamento e temperatura ambiente.

3.2.6. Transformadores

A capacidade de um transformador trabalhar com cargas não lineares é função do projeto e material utilizado: tipo e qualidade do material do núcleo, enrolamentos de alumínio-cobre e técnica de montagem.

Os transformadores são muito imunes aos distúrbios elétricos, mas podem ser afetados por alguns eventos:

- a) Correntes harmônicas que aumentam a temperatura de funcionamento;
- b) Sobretensão que pode saturar o transformador;
- c) Picos de corrente ou correntes harmônicas geradas pela carga que podem interagir adversamente com a impedância do transformador, causando a instabilidade e distorção de tensão.

As variáveis que afetam diretamente a sensibilidade do equipamento aos distúrbios elétricos são: projeto, temperatura ambiente, concentração de correntes harmônicas em relação à corrente senoidal e tensão aplicada .

3.2.7. Lâmpada fluorescente

O princípio de funcionamento da lâmpada fluorescente baseia-se na formação de um arco elétrico entre dois eletrodos imersos em um gás apropriado. Nessas condições, ocorre a emissão de raios ultravioleta, que se tornam visíveis quando em contato com a camada de fósforo existente na parede interna do bulbo da lâmpada.

O reator eletromagnético controla e estabiliza a corrente elétrica que circula entre os eletrodos da lâmpada, além de estabelecer a ignição do arco. O princípio de funcionamento é baseado na saturação de uma bobina, com núcleo de ferro, ligada em série com um eletrodo de lâmpada. O reator consiste de um circuito retificador e um oscilador.

No circuito básico do reator são agregados filtro de harmônicas, supressor de interferência radiada e capacitores para correção do fator de potência.

3.3. Índices de qualidade

Esses distúrbios que ocorrem nos sistemas podem provocar inúmeras interferências indesejáveis, como o acionamento indevido de relés, mau funcionamento de equipamentos sensíveis, distorções em equipamentos de medição, podendo chegar até mesmo à interrupção do fornecimento de energia. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

Na avaliação da qualidade de energia podemos levar em conta a qualidade do produto e a qualidade do serviço. A primeira diz respeito à conformidade do produto energia elétrica, que pode ser interpretada como a capacidade do sistema elétrico em fornecer energia elétrica com tensões equilibradas e sem deformações de forma de onda. Resumindo, seria atender a demanda de energia elétrica com tensões senoidais, equilibradas e com amplitudes e tensões constantes, sem os problemas apontados nos tópicos anteriores.

A) Indicadores de qualidade de produto

O Módulo 8 do Procedimento de Distribuição(Prodíst) da ANEEL em Barros; Borelli; Gedra (2010), determina os seguintes parâmetros de qualidade de produto:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônicos;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão.

Dentre esses parâmetros, somente a tensão em regime permanente e o fator de potência estão regulamentados pela ANEEL. Os demais estão sendo submetidos à análise e podem receber uma regulamentação futuramente.

Qualquer consumidor pode solicitar uma medição do seu nível de tensão. Caso esteja enquadrado dentro do limite considerado adequado, a distribuidora deve cobrar esse

serviço do consumidor, porém se os valores medidos enquadrarem nos limites considerados críticos ou precários, a cobrança da medição não é feita e a distribuição deve providenciar as devidas correções em seu sistema de distribuição.

B) Indicadores de qualidade de serviço

Os critérios e limites referentes à qualidade de serviço de fornecimento de energia são definidos pela ANEEL, por meio do módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist), conforme observado. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

DEC: Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Conservadora, expressa em horas e acréscimos de hora, ela informa o intervalo de tempo, em média, no período de observação, cada unidade consumidora do conjunto delimitado, ocorreu descontinuidade na energia elétrica. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

O DEC pode ser calculado pela Fórmula 2.16.

$$DEC = \left[\sum_{i=1}^k Ca(i) \times t(i) \right] / Cc \quad (2.16)$$

Em que:

i: índice de eventos ocorridos no sistema, os quais provocam interrupções em uma ou mais unidades consumidoras;

t(i): duração de cada evento (i) no período de apuração em horas;

Ca(i): número de unidades consumidoras interrompidas em um evento (i) no período de apuração;

Cc: número total de unidades consumidoras, do conjunto considerado, no final do período de apuração;

k: número máximo de eventos no período considerado.

FEC: Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora, expressa em número de interrupções e centésimos do número de interrupções. O FEC expressa o número de interrupções ocorridas, em média no período de observação, em cada unidade consumidora do conjunto considerado.

Ele é calculado pela Fórmula 2.17.

$$FEC = [\sum_{i=1}^k Ca(i)] / Cc \quad (2.17)$$

Os componentes da fórmula referem aos mesmos disponibilizados na expressão anterior.

DIC: Duração de Interrupções por Unidade Consumidora ou ponto de conexão considerado, expressa em horas e centésimos de hora. Ele representa o intervalo de tempo, no período de observação, numa unidade consumidora ou ponto de conexão, ocorreu descontinuidade na distribuição de energia.

O DIC pode ser obtido da Fórmula 2.18.

$$DIC = \sum_{i=1}^n t(i) \quad (2.18)$$

Sendo:

i: índice de interrupções da unidade consumidora ou do ponto de conexão, no período de apuração, variando de 1 a n;

n: número de interrupções da unidade consumidora ou do ponto de conexão considerado, no período de apuração;

t(i): tempo de duração da interrupção (i) da unidade consumidora ou do ponto de conexão considerado, no período de apuração.

FIC: Frequência de Interrupções por Unidade Consumidora ou ponto de conexão considerado, expressa em número de interrupções;

DMIC: Duração Máxima de Interrupções por Unidade Consumidora ou ponto de conexão considerado, expressa em horas e centésimos de hora.

Esses valores apurados e suas metas são publicados mensalmente na fatura de energia do consumidor, entretanto esses índices refletem somente o intervalo de tempo em que

o sistema permanece desligado e a frequência desses. Não informam as alterações das formas de onda e o valor da frequência do sinal elétrico, causada por ruídos, distorções harmônicas, condições de falta e chaveamento de capacitores que podem comprometer as operações dos equipamentos. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

3.4. Gerenciamento da estrutura tarifária

Pelo gerenciamento da estrutura tarifária apropriada é possível julgar se o contrato de fornecimento é adequado, ou se permite ações que reduzam os custos associados ao faturamento de energia elétrica.

A) Seleção da melhor estrutura tarifária

Um consumidor do grupo A pode se enquadrar na tarifa convencional, Horosazonal azul ou Horosazonal verde. Cada estrutura tarifária exhibe valores e forma de cobrança variada. Por isso, é importante analisar a conveniência de mudança da estrutura tarifária visando alcançar redução dos valores da fatura de energia elétrica. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

Se o valor da demanda contratada for menor que 300 kW e a tensão de fornecimento inferior a 69 kV, a unidade consumidora pode se enquadrar nos três tipos de tarifas. Para tensões inferiores a 69 kV, a unidade consumidora pode se enquadrar na estrutura tarifária Horosazonal azul ou verde. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

A unidade consumidora que esteja conectada a uma tensão de fornecimento igual ou superior a 69 kV somente se classifica na estrutura tarifária Horosazonal azul, portanto nesse caso não existe análise aplicável ao tipo de tarefa devido à obrigatoriedade de aplicação da tarifa Horosazonal azul.

É possível nesses casos, a mudança de estrutura tarifária, a análise deve ser iniciada com a obtenção dos valores de tarifa na distribuidora de energia, geralmente disponibilizadas no *site* da empresa.

O próximo passo é simular o valor da fatura de energia elétrica considerando as outras estruturas tarifárias aplicáveis. Comparados os valores da simulação com a fatura atual, é possível avaliar se é ou não conveniente a mudança da estrutura tarifária.

Pode ocorrer de uma tarifa ser mais vantajosa em um mês e menos em outro devido às variações envolvendo o perfil de consumo da unidade consumidora. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

B) Fator de carga

O fator de carga é definido como o índice calculado pela razão entre a energia ativa consumida e a energia máxima que poderia ser utilizada em um dado intervalo de tempo. Também é possível afirmar que o fator de carga é representado pela razão entre a demanda média e a demanda máxima registrada em um determinado período. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

Para calcular o fator de carga de uma unidade consumidora pertencente ao grupo A, o primeiro passo é verificar o enquadramento tarifário da instalação: convencional ou Horosazonal.

Considerando a tarifa convencional, o fator de carga é obtido dividindo a energia consumida pela demanda medida, multiplicada pelo tempo de utilização, conforme a Fórmula 2.19.

$$\text{Fator de Carga} = \text{Consumo (kWh)} / \text{Demanda (kW)} \times t(h) \quad (2.19)$$

Para os consumidores atendidos pela estrutura tarifária Horosazonal são calculados dois fatores de carga, um correspondente ao horário de ponta e outro para o horário fora de ponta, baseando na Fórmula 2.20 e 2.21, respectivamente.

$$\text{Fator de Carga (ponta)} = \text{Consumo ponta (kWh)} / \text{Demanda ponta(kW)} \times t_p(h) \quad (2.20)$$

$$\text{Fator de Carga(fora de ponta)} = \frac{\text{Consumo fora de ponta(kWh)}}{\text{Demanda fora de ponta(kW)}} \times \text{tfp(h)}$$

(2.21)

A demanda utilizada no denominador da expressão do fator de carga é a demanda extraída da fatura de energia, que corresponde à demanda máxima registrada no período, ou seja, é o pico de demanda medido no período de análise. Ao multiplicar pelo tempo de período analisado, obtém-se a energia que seria consumida caso a demanda máxima fosse utilizada ao longo do tempo, caracterizando-se como o máximo de utilização da rede disponível. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

O valor da demanda contratada corresponde ao pico de demanda máxima registrada. Outra importante conclusão da análise é que a demanda contratada estará adequada ao pico e na maior parte do tempo não será utilizada. Caso seja possível reduzir o pico de demanda, automaticamente estaremos reduzindo a demanda contratada, e conseqüentemente, reduzindo os valores envolvidos na fatura de energia elétrica. (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2010).

C) Melhoria do fator de carga

A melhoria do fator de carga permite uma redução no valor da demanda contratada, implicando assim na redução de custos na fatura, contudo algumas medidas devem ser empregadas para a evolução do fator de carga. Dessa forma, recomenda analisar se a economia obtida com a redução da demanda compensa a elevação dos custos internos.

O gerenciamento da energia permite avaliar as implicações e a relação custo/ benefício em função das providências que devem ser adotadas. Esses dados a respeito do fator de carga são enviados para a memória de massa do medidor na distribuidora, mediante o pagamento de uma taxa.

A memória de massa somente estará disponível se o medidor de energia empregado for eletrônico. Esse medidor é utilizado em larga escala nos consumidores do grupo A. A evolução tecnológica trouxe equipamentos, para o gerenciamento de energia, dotados de

softwares específicos para essa finalidade, os quais recebem informações das concessionárias, constituindo uma ferramenta a ser empregada no monitoramento de grandezas como a demanda e o fator de potência.

Os analisadores de grandezas elétricas são instalados no secundário do transformador ou nas entradas dos quadros gerais de distribuição. Caso haja mais de um transformador no sistema elétrico de uma empresa, convém instalar simultaneamente, um analisador para cada transformador, para que posteriormente seja possível sobrepor os dados na mesma base de tempo.

A análise deve ser feita nesses picos, identificando quais cargas operam no horário afetado, buscando alternativas para remanejar a operação das tais cargas em outros períodos de menor demanda da unidade consumidora.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Recentemente, as empresas vêm buscando cada vez mais métodos que proporcionem confiança, segurança, praticidade e viáveis tecnicamente, com o objetivo de minimizar os desperdícios materiais e de energia. Isso pode ser solucionado por meio de dispositivos tecnológicos inovadores e pela mudança de hábitos por parte de seus funcionários e consumidores. Porém, a tarefa de controlar um sistema para que ele alcance o equilíbrio dinâmico através de um quadro de distribuição inteligente é bastante complexo, pois deve-se avaliar as condições do meio em que esse equipamento irá inserir e também se ele se tornará viável.

Então, conclui-se que o quadro de distribuição é viável desde que a empresa tenha planejado como ela irá fazer para administrar sua energia, analisar sua viabilidade por meio de indicadores financeiros de qualidade como a seleção de despesas e receitas, o seu *payback*, o quanto esse projeto irá retornar financeiramente. Como foi mencionado anteriormente, não compensa mudar a estrutura tarifária, se essa implicar no aumento dos custos internos de uma empresa. Uma alternativa sugerida é concentrar-se no controle de variáveis fundamentais para a mitigação dos distúrbios como a tensão, a frequência, a corrente, o fator de potência, a potência reativa e o fator de carga.

Isso combinado com a estrutura tarifária adequada e o tipo de aterramento, seriam ideal para um quadro de distribuição inteligente. Lembrando que até os próprios equipamentos são formados por peças eletrônicas, e essas estão sujeitas aos distúrbios elétricos na rede, é preciso pensar em como reduzir os efeitos deles sobre as peças.

Um dos avanços tecnológicos observados são as redes inteligentes, nomeada também de *smart grids*, estão sendo desenvolvidos eletrodomésticos inteligentes que podem

controlar o consumo remotamente sobre o pico. Outro aspecto que se deve ressaltar é que eles podem contribuir para a estabilização dos níveis de tensão e as microrredes podem operar de maneira independente na distribuição.

Concluindo, existem muitas barreiras técnicas, comerciais e políticas que impedem a implementação desses modelos, algumas delas são: infraestrutura avançada de medição e atualização do modelo de precificação das concessionárias, resistência da sociedade com relação a infraestrutura de medição que é proibitiva, redes elétricas inteligentes utilizam amplamente tecnologia de informação, os dados devem ser compartilhados entre os envolvidos e em todos os níveis e esse modelo depende do modelo de setor elétrico adotado, e dentre outros.

REFERÊNCIAS

BARROS, Benjamin Ferreira de; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo Luis. **Gerenciamento de energia**: Ações administrativas e técnicas de uso adequado da energia elétrica. 1ª ed. São Paulo, Érica, 2010. 176p.

CIRCUITOS elétricos, circuitos trifásicos equilibrados e desequilibrados.

Disponível

em:<http://www.engonline.fisp.br/3ano/circuitos_eletricos/circusitos_trifasicos_equilibrados_e_desequilibrados.pdf>. Acesso em: 7 dez. 2014, 19:35.p. 1-2.

CONCURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA BLOG. **Triângulo de potências.**

Disponível em:< <http://concursosengenhariaeletrica.blogspot.com.br/2011/12/triangulo-de-potencias.html>>. Acesso em:7 dez. 2014, 08:48.

CORRADI, Prof.**1.Instalações elétricas.** UNICAMP. Disponível em:< <http://www.corradi.junior.nom.br/instalaele.pdf>>.Acesso em: 8 dez. 2014, 10:02.p. 17-23.

COTRIM, Ademaro. **Instalações elétricas.** Revisão e adaptação técnica José Aquiles Baesso Gromoni e Hilton Moreno. 5ª edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.p.1-65.

DECKMANN, S.M.; POMILIO, J. A. **Curso avaliação da qualidade na energia elétrica.**Disponível em:

<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a2.pdf>. Acesso em: 27 jun. 2015.p. 20.

DEUS, Rivamilton Brito de. **Sistema de controle para balanceamento de cargas elétricas**. Trabalho de Conclusão de curso (Monografia) .Graduação em Engenharia de Controle e Automação. Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Controle e Automação. Ouro Preto, Minas Gerais. 2007. Disponível em:<

<http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2007/RIVAMILTON%20%20DE%20DEUS.pdf>. Acesso: 8 dez. 2014, 08:17.p. 6-17.

ELEUTÉRIO, Hegberton Rodrigo. Senai/ FIEMG,CFP-Dr. José Luciano Duarte Penido.**Sistema elétrico de potência**. Senai Editora.Mariana, 2014.p.10-34.

FILHO, João Mamede. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1986.478p.

FILHO, Silvério Visacro. **Aterramentos elétricos: conceitos básicos, técnicas de medição e instrumentação, filosofias de aterramento**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.p.11-56.

GARCIA, Douglas A.A.; JUNIOR, Francisco Elio Duzzi.**Capítulo I- Aspectos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica**. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed73_fasc_distribuicao_cap1.pdf>.Acesso em: 7 dez. 2014, 16:23. 6 p.

GERBRAN, Amaury Pessoa. “Manutenção e operação de equipamentos de subestações”. Porto Alegre. Bookman, 2014.http://www.engonline.fisp.br/3ano/circuitos_eletricos/circusitos_trifasicos_equilibrados_e_desequilibrados.pdf >. Acesso em: 8 dez. 2014, 10: 15.

LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Furtado; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo. **Harmônicos em sistemas elétricos**. 1ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier. 2014. p. 1-8.

LOPEZ, Ricardo Albaró. **Qualidade na energia elétrica**. 2ª edição. São Paulo: Artliber Editora. 2013. p. 24-25; 75- 119; 135- 167.

MECATRÔNICA ATUAL. **Digitalização de subestação de energia- parte 1**. Disponível em: < <http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1374-digitalizao-de-subestao-de-energia-parte-1>>. Acesso em: 7 dez. 2014,19:19.

NISKIER, Júlio. **Manual de instalações elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.p.1-25;143-152.

OZUR, Fernando Silva; PEREIRA, Thiago Henrique; CORREA, Joana D'Arque da Silva. **Controle de demanda de energia elétrica**. Disponível em:< <http://revistas.unibh.br/index.php/dcet/article/viewFile/696/405>>. Acesso em: 8 dez. 2014, 08:05. p. 1-4.

PAULILO, Gilson. **Qualidade de energia: Desequilíbrios de tensão**. Megabarre. Brasil. Itajubá, 2005.

PORTAL SÃO FRANCISCO. **Energia hidrelétrica**. Disponível em: < <http://www.portalsaofrancisco.com.br/alfa/energia-hidreletrica/energia-hidreletrica.php>>. Acesso em: 8 dez. 2014, 10: 10.

QENERGIA. **Detecção de desequilíbrio e sobrecargas**. Disponível em:< <http://www.qenergia.com/content/index.php?action=detailfo&rec=192>>. Acesso em: 7 dez. 2014, 08:59.

REIS, Dr. Eng. Fernando Soares. **Potência e fator de potência**. PUC-RS. Disponível em:< http://www.feng.pucrs.br/~fdosreis/ftp/medidas/FSR07_RevisaoPotencia.pdf>. Acesso em:8 dez. 2014, 09:45.

REZENDE, Paulo Henrique Oliveira; SAMESIMA, Milton Itsuo. **Efeitos do desequilíbrio de tensões nos suprimentos de motores de indução trifásico**.

Disponível

em:<<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4473/11857>>

. Acesso em:8 dez. 2014, 09:55.

SENAI/ FIEMG, CFP- Dr. José Luciano Duarte Penido. **Instalações elétricas**. Mariana, 2011.p.66-70.

SÓ FÍSICA. **Consumo de energia elétrica**. Disponível em: <

<http://www.sofisica.com.br/conteudos/Eletromagnetismo/Eletrodinamica/consumo.php>

>. Acesso em: 7 dez. 2014,19:25.