



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

ARTHUR DANTAS PEREIRA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DA ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Campina Grande, Paraíba.
Setembro de 2012

ARTHUR DANTAS PEREIRA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DA ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrotécnica

ORIENTADOR

Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano

Campina Grande, Paraíba.
Setembro de 2012

ARTHUR DANTAS PEREIRA

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DA ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do curso de Engenharia Elétrica
da Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Data da aprovação: ___/___/___

Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano

Professor Convidado

UFCG

Avaliador

Campina Grande, Paraíba.
Setembro de 2012

Agradecimentos

*Inicialmente, agradeço a Deus por tudo que me proporciona na vida. À Vera Lúcia Dantas Fernandes (minha mãe), Josinaldo Fernandes Pereira (meu pai), Aristófanés e André (meus irmãos) e toda minha família, pelo exemplo de vida e família bem como pelo apoio dado durante toda graduação. Um muito obrigado a todos os professores em especial ao Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano, orientador, pela dedicação e motivação transmitida na minha vida acadêmica. Meus agradecimentos também, aos amigos obtidos durante toda a graduação como Valdemir Brito, Bruno Santos, Laécio Sales, João Paulo de Andrade, Miquéias Melo, que sempre estivemos juntos nos momentos mais difíceis obtendo resultados satisfatórios para o término desse curso. E, finalmente, agradeço a todos que me ajudaram de forma direta ou indireta para o desenvolvimento deste projeto de vida. **MUITO OBRIGADO!***

Resumo

O presente trabalho analisa a qualidade da energia elétrica e a eficiência energética nos sistemas de distribuição de energia elétrica e caracterizam suas causas, efeitos e soluções para os problemas gerados. Inicialmente é feita uma revisão bibliográfica, incluindo um breve estudo sobre os sistemas de distribuição e os princípios básicos de transmissão de energia. Nesta mesma revisão estão bem definidos alguns distúrbios comumente presentes na distribuição da energia afetando a qualidade da energia e os princípios que regem a eficiência energética desde a transmissão até no uso final. Na parte final deste trabalho é apresentado um estudo realizado com a manutenção da rede de distribuição através da substituição de um regulador de tensão no Litoral Norte da Paraíba.

Palavras-chave: Eficiência energética, qualidade da energia elétrica, sistemas de distribuição de energia elétrica.

Sumário

| | |
|--|----|
| Resumo | v |
| Sumário | vi |
| 1. Introdução..... | 1 |
| 2. Sistemas Elétricos de Potência..... | 3 |
| 2.1 Sistemas de distribuição..... | 3 |
| 2.1.1 Sistema de subtransmissão | 5 |
| 2.1.2 Subestação de distribuição | 5 |
| 2.1.3 Sistema de distribuição primária | 7 |
| 2.1.4 Estações transformadoras | 8 |
| 2.1.5 Sistema de distribuição secundária..... | 8 |
| 3. Qualidade da Energia Elétrica..... | 9 |
| 3.1 Distorções de ondas que afetam a qualidade da energia elétrica | 10 |
| 3.1.1 Variações instantâneas de tensão | 11 |
| 3.1.2 Variações momentâneas de tensão | 13 |
| 3.1.3 Interrupções de tensão | 15 |
| 3.1.4 Variações sustentadas de tensão | 16 |
| 3.1.5 Variação de frequência | 17 |
| 3.1.6 Ruídos elétricos | 18 |
| 3.1.7 Cintilação ou <i>Flicker</i> | 19 |
| 3.1.8 Desequilíbrio de tensão | 20 |
| 3.1.9 Distorções harmônicas..... | 22 |
| 4. Eficiência Energética | 30 |
| 4.1 As leis das conservações energéticas..... | 30 |
| 4.1.1 Lei zero da termodinâmica..... | 30 |
| 4.1.2 Primeira lei da termodinâmica..... | 31 |
| 4.1.3 Segunda lei da termodinâmica..... | 33 |
| 4.1.4 Terceira lei da termodinâmica..... | 35 |
| 4.1.5 As leis da termodinâmica e a eficiência energética | 35 |
| 4.2 Aplicações da Eficiência Energética | 36 |
| 4.2.1 Na geração | 37 |
| 4.2.2 Na transmissão | 38 |
| 4.2.3 Na distribuição | 39 |
| 4.2.4 Nos usos finais | 40 |

| | |
|---|----|
| 5. Emprego de Reguladores de Tensão..... | 42 |
| 5.1 Princípio de funcionamento | 42 |
| 5.2 Tipos de conexões em banco de reguladores | 43 |
| 5.3 Manobras em reguladores de tensão | 45 |
| 5.4 Projeto..... | 45 |
| 5.5 Visita técnica | 48 |
| 6. Conclusão..... | 51 |
| 7. Referências..... | 52 |

Lista de figura

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Modelo esquemático de um sistema elétrico de potência (MARTINHO, 2010). | 3 |
| Figura 2 - Sistema de distribuição de energia elétrica (KAGAN <i>et al</i> , 2005)..... | 4 |
| Figura 3 - Subestação desabrigada (WEG, 2012)..... | 6 |
| Figura 4 - Subestação abrigada (ABB, 2012)..... | 7 |
| Figura 5 - Subestação blindada isoladas com SF ₆ (DUAILIBE, 1999). | 7 |
| Figura 6 – Forma de onda com variações instantâneas de tensão (MARTINHO, 2010). | 11 |
| Figura 7 - Topologia com SCRs e os cortes de tensão (GUERRA, 2010). | 12 |
| Figura 8 – Caracterização de um transitório oscilatório de tensão proveniente de um chaveamento de um banco de capacitores (GUERRA, 2010)..... | 13 |
| Figura 9 - Sobretensão e subtensão de tensão (BRONZEADO <i>et al</i> , 1997). | 15 |
| Figura 10 - Interrupção de tensão (POMILIO, 2010). | 16 |
| Figura 11 - Variação na frequência do sistema de 60,12Hz para 58,32 Hz em 3 segundos (MICHELS, 2009). | 17 |
| Figura 12 - Ruído superposto a uma tensão de 220 V (GUERRA, 2010)..... | 18 |
| Figura 13 - Sub-harmônica de amplitude 5 V, 10 Hz, superposta a uma tensão de 220 V(<i>rms</i>), 60 Hz (GUERRA, 2010). | 19 |
| Figura 14 – (a) Desequilíbrio de tensão na forma fasorial. (b) Desequilíbrio de tensão em forma de onda (POMILIO, 2010)..... | 20 |
| Figura 15 – Formas de ondas de corrente e tensão para: (a) cargas lineares (b) cargas não lineares (CHAPMAN, 2005)..... | 23 |
| Figura 16 - Exemplo de correntes com suas harmônicas, e decomposição da corrente global em seus componentes harmônicos (CHAPMAN, 2005). | 24 |
| Figura 17 – Espectro harmônico (CHAPMAN, 2005). | 25 |
| Figura 18 – Sistemas em equilíbrio. | 30 |
| Figura 19 – Sistemas 1 e 2 em contato..... | 31 |
| Figura 20 – Sistemas 1 e 2 em equilíbrio térmico. | 31 |
| Figura 21 – Todos os sistemas em equilíbrio. | 31 |
| Figura 22 – Esquema referente à primeira lei da termodinâmica (TIPLER, 2009)..... | 32 |
| Figura 23 - Esquema representativo de uma máquina térmica (SERWAY <i>et al</i> , 2004). | 35 |
| Figura 24 – Esquema do fluxo de energia..... | 36 |
| Figura 25 - Tecnologias renováveis: (a) Eólica (Portalmidia.net, 2009), (b) Solar (HALPER, 2011), (c) Marés (ECO, 2008). | 37 |
| Figura 26 – Usina hidrelétrica de Itaipu (PROJETONONAME, 2011). | 38 |
| Figura 27 – Repotenciação: (a) Pontes rolantes (b) Rotor do Gerador (IESA, 2005). | 38 |
| Figura 28 – Repotenciação de um transformador de distribuição imerso em óleo, trifásico com potência nominal de 15 kVA em 60 Hz, fabricado em 1973 (CARVALHO, 2009). | 39 |
| Figura 29 – Repotenciação de linhas de transmissão (JIE, 2009)..... | 39 |
| Figura 30 – Núcleo de liga amorfa de um transformador produzido industrialmente (LUCIANO <i>et al</i> , 2009)..... | 40 |
| Figura 31 – transformador de distribuição com núcleo de liga amorfa. (Portuguese, 2012). | 40 |
| Figura 32 – Diagrama representativo de um RT (Toshiba, 2011)..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 33 – Ligação com elevador de tensão (Toshiba, 2011)..... | 43 |
| Figura 34- Conexão de três reguladores monofásicos em uma linha trifásica em delta fechado fornecendo ao sistema 15% de faixa de regulação (Toshiba, 2011)..... | 43 |
| Figura 35 – Triângulo de tensões..... | 44 |
| Figura 36 – Procedimentos de inserção e retirada do banco de reguladores de tensão (Toshiba, 2010)..... | 45 |
| Figura 37 – Localidade da manutenção | 46 |
| Figura 38 – Esquematização da linha e de seus componentes (<i>interPlan</i> ®)..... | 46 |
| Figura 39 – Mapa esquemático da situação da tensão.Gráfico tensão (pu) X distância (km) (<i>interPlan AT Plus</i> ®)..... | 47 |
| Figura 40 - Mapa esquemático da situação da tensão.Gráfico tensão (pu) X distância (km) (<i>interPlan AT Plus</i> ®)..... | 47 |
| Figura 41 – Tipos de circuitos e cabos (<i>interPlan AT Plus</i> ®)..... | 48 |
| Figura 42 – Banco de reguladores de tensão para manutenção. Maio de 2012..... | 49 |
| Figura 43 – Manutenção dos reguladores. Maio de 2012. | 50 |
| Figura 44 – Foto do RT substituído e seus dados de placa (ITB, 2011). Maio de 2012. | 50 |

1. Introdução

Com o crescimento acelerado do mercado consumidor, por volta do século XVIII, as máquinas elétricas e os motores a combustão adquiriram maior destaque no mercado, porquanto sua confiabilidade e produção teriam que ser representadas por uma função crescente. Estas qualidades caracterizaram uma profunda modernização nas plantas fabris, gerando uma acentuada concorrência.

Com base no conhecimento científico, logo foram introduzidos modelos de máquinas mais eficientes, tendo como resultado final um produto de maior eficiência com menor custo.

A eficiência energética além de garantir o aumento da concorrência no mercado, reduz a quantidade de poluentes, trazendo com isso ações de responsabilidade ambiental como meio para a preservação do nosso planeta. Assim, a melhoria da eficiência energética é a solução mais econômica e rápida para minimizar os impactos causados pela utilização da energia.

Entretanto, quando se observa os efeitos causados pela modernização das fábricas relativos à Qualidade da Energia Elétrica (QEE) do sistema em que elas são empregadas, verifica-se um comprometimento da QEE, devido ao surgimento de distorções indesejadas na rede com a crescente utilização de sistemas automatizados por controle microprocessados, chaveamentos eletrônicos, cargas industriais e residenciais não lineares. Estas distorções resultam em distúrbios nos sistemas de distribuição, afetando a QEE injetada na rede para os usuários finais.

Nesse contexto, a utilização de novas tecnologias obrigou consumidores e fornecedores a buscarem uma energia elétrica de qualidade, ou seja, sem desvios na tensão, corrente ou frequência que resultem na falha ou má operação dos equipamentos dos consumidores.

Dentre os diversos distúrbios de QEE existentes, destacam-se as distorções harmônicas, fenômenos de distorções periódicas de alta frequência presentes nas tensões e nas correntes e que estão associadas à operação

continua de cargas com características não lineares, como os dispositivos que usufruem de eletrônica de potência (FREITAS, 2006).

Em face do exposto, podemos destacar a importância dos temas Eficiência Energética e a Qualidade da Energia nos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica e identificá-los com motivadores para a realização da proposta de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada neste documento.

2. Sistemas Elétricos de Potência

A maior parte da energia gerada no Brasil é provida de usinas hidrelétricas, em virtude do potencial hídrico brasileiro. A estrutura do sistema elétrico visto na figura 1 compreende os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, com o objetivo de fornecer energia continuamente aos usuários, sendo o mesmo planejado para distribuir energia elétrica atingindo certos padrões de confiabilidade, disponibilidade, qualidade e custos, com o mínimo de impacto ambiental e o máximo de segurança.

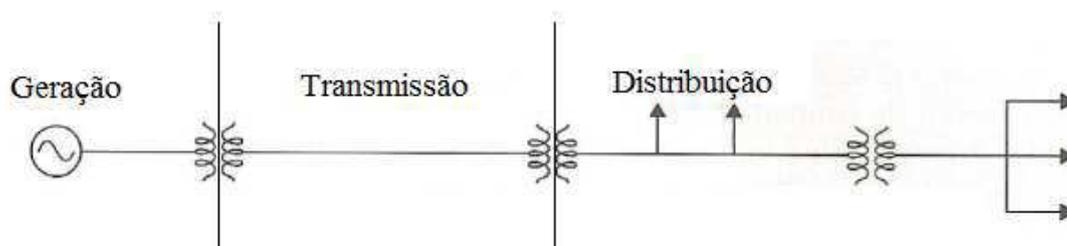


Figura 1 – Modelo esquemático de um sistema elétrico de potência (MARTINHO, 2010).

Os sistemas elétricos de potência podem ser subdivididos em três grandes grupos:

- Geração, sua função principal é converter alguma forma de energia em energia elétrica;
- Transmissão, responsável pelo transporte da energia elétrica dos centros de produção aos de distribuição;
- Distribuição, responsável por distribuir a energia elétrica recebida do sistema de transmissão aos grandes, médios e pequenos consumidores.

2.1 Sistemas de distribuição

Os sistemas de distribuição de energia elétrica constituem um segmento do sistema elétrico, formado pelas redes elétricas de distribuição de média e baixa tensão, cuja construção, manutenção e operação são de responsabilidade das companhias distribuidoras de eletricidade.

O sistema de distribuição pode ser dividido em componentes como ilustrado na figura 2:

- Sistema de subtransmissão;
- Subestação de distribuição;
- Sistema de distribuição primária;
- Estações transformadoras;
- Sistema de distribuição secundária.

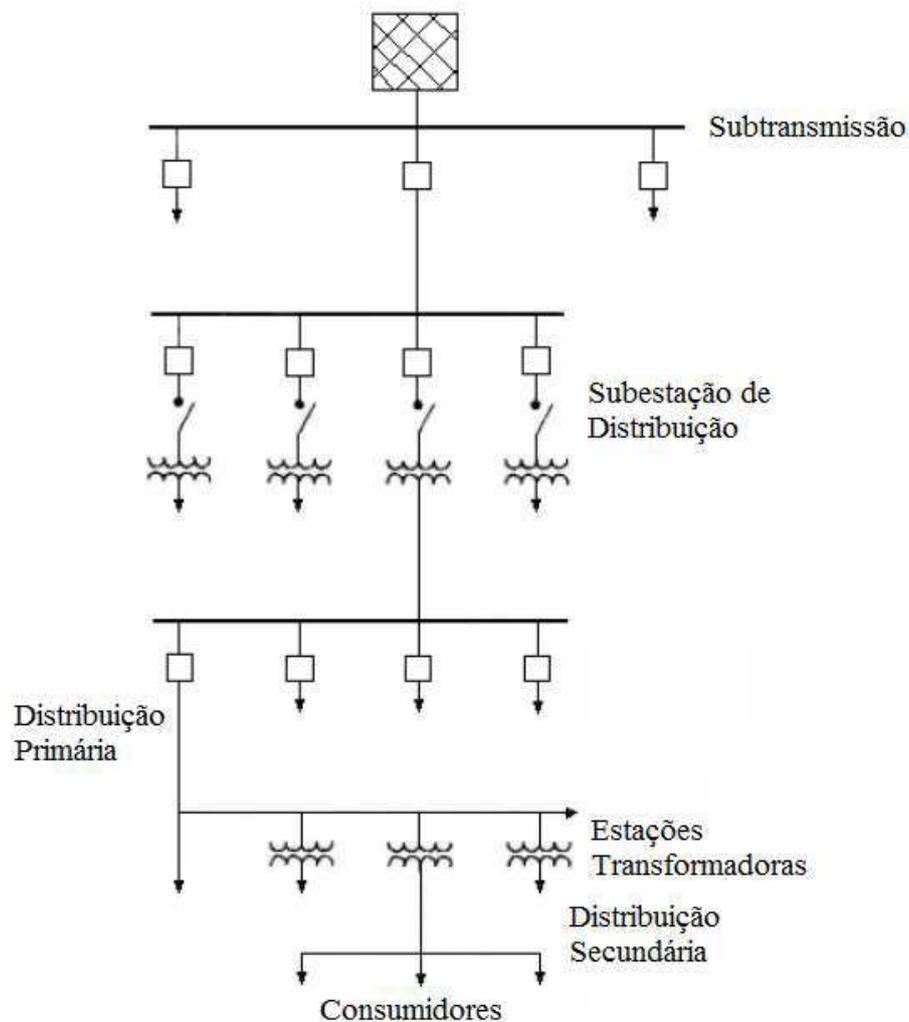


Figura 2 - Sistema de distribuição de energia elétrica (KAGAN *et al*, 2005).

2.1.1 Sistema de subtransmissão

Os sistemas de subtransmissão são formados por linhas trifásicas com tensão de operação usualmente, de 138 kV ou 69 kV ou, ainda 34,5 kV, com capacidade de transporte de algumas dezenas de MW por circuito. Tem a função de transferir a energia das subestações de subtransmissão para as subestações de distribuição. Os consumidores em tensão de subtransmissão são representados, por grandes instalações industriais, estações de tratamento e de bombeamento d'água (KAGAN *et al*, 2005).

2.1.2 Subestação de distribuição

Uma subestação (SE) é um conjunto de equipamentos de manobra e/ou transformação e ainda eventualmente de compensação de reativos usados para dirigir o fluxo de energia em sistemas de potência e possibilitar a sua diversificação através de rotas alternativas, possuindo dispositivos de proteção capazes de detectar os diferentes tipos de faltas que ocorrem no sistema e de isolar trechos onde estas faltas ocorrem (DUAILIBE, 1999).

De acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, as subestações de distribuição podem ser definidas como: "Conjunto de instalações elétricas em média ou alta tensão que agrupa os equipamentos, condutores e acessórios, destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas". Essas subestações de distribuição são responsáveis pela transformação da tensão de subtransmissão para a tensão de distribuição primária.

As SE podem ser classificadas:

- Quanto à função:
 - SE de manobra

Permite manobrar partes do sistema, inserindo ou retirando-as de serviço, em um mesmo nível de tensão.

- SE de transformação
 - SE elevadora

Localizadas na saída das usinas geradoras, com a função de elevar a tensão para níveis de transmissão e subtransmissão.

- SE abaixadora

Localizadas na periferia das cidades, a função da SE é rebaixar os níveis de tensão para o uso adequado dos consumidores.

- SE de distribuição

Nas SE de distribuição o nível de tensão da distribuição primária se situa na faixa de 13,8 kV a 34,5 kV.

- SE de regulação de tensão

SE de regulação de tensão são utilizadas para adequar a tensão aos níveis definido em norma com o emprego de equipamentos de compensação tais como reatores, capacitores, compensadores estáticos, etc.

- SE conversoras

As SE conversoras são empregadas para inversão de frequência. Associadas a sistema de transmissão em corrente contínua (CC).

- Quanto ao nível de tensão:
 - SE de alta tensão, a tensão nominal de operação é de 230 kV.
 - SE de extra alta tensão, a tensão nominal de operação está acima de 230 kV.
- Quanto ao tipo de instalação:
 - SE desabrigada, construídas em locais amplos ao ar livre, conforme a figura 3.



Figura 3 - Subestação desabrigada (WEG, 2012).

- SE abrigada, construídas em locais fechados.



Figura 4 - Subestação abrigada (ABB, 2012).

- SE blindadas, construídas em locais fechados, quando o espaço para construção é restrito. Equipamentos protegidos e isolados em óleo ou em gás (ar comprimido ou SF₆).



Figura 5 - Subestação blindada isoladas com SF₆ (DUAILIBE, 1999).

2.1.3 Sistema de distribuição primária

As redes de distribuição primária, ou de média tensão, são construídas em circuitos elétricos trifásicos a três fios (3 fases), normalmente nas classes de tensão 15 kV, 23 kV, ou 34,5 kV. Pela legislação vigente houve uma padronização dos níveis de tensão, impostos para 13,8 kV e 34,5 kV. Essas

redes emergem das subestações de distribuição e atendem aos consumidores primários e aos transformadores de distribuição, que suprem a rede secundária, ou de baixa tensão. Dentre os consumidores primários destacam-se indústrias de porte médio, conjuntos comerciais e instalações de iluminação pública (KAGAN *et al*, 2005).

2.1.4 Estações transformadoras

As estações transformadoras são constituídas por transformadores, que reduzem a tensão primária, ou média tensão, para a de distribuição secundária, ou baixa tensão. São compostas usualmente, com para-raios, para a proteção contra sobretensões, e chaves elos fusíveis para proteção contra sobrecorrentes, instalados no primário (KAGAN *et al*, 2005).

2.1.5 Sistema de distribuição secundária

As redes de distribuição secundária são construídas com circuitos elétricos trifásicos a quatro fios (3 fases e neutro). No Brasil, a padronização para tensão de distribuição secundária fixou valores de 220/127 V, para os estados da região sul e sudeste, e 380/220 V para as demais regiões do país. Os consumidores que fazem parte deste grupo são os consumidores residenciais, pequenos comércios e indústrias (KAGAN *et al*, 2005).

Na distribuição secundária é comum utilizar transformadores trifásicos, resfriado a óleo, com os enrolamentos do primário ligados em triângulo e os do secundário ligados em estrela, com o centro aterrado, garantindo o aprisionamento dos harmônicos de terceira ordem no primário e proteção mais eficiente para o sistema secundário devido a referência com o terra. É também bastante utilizado, em alguns sistemas, transformador monofásico e banco de transformadores monofásicos, simplificando a manutenção, garantindo a continuidade na transmissão da energia elétrica e a redução dos seus respectivos custos operacionais.

3. Qualidade da Energia Elétrica

O conceito de qualidade do produto e do serviço prestado pelas concessionárias de energia elétrica tem sido cada vez mais exigido, tendo em vista que sua realidade é retratada em um campo de pesquisa com destaque no setor elétrico nacional. Além de possuir um sistema que forneça tensão adequada e continuidade do serviço, é necessário também que a forma de onda de tensão entregue ao consumidor seja praticamente senoidal sem deformações, garantindo a qualidade da potência, tensão ou energia entregue aos consumidores.

A definição sobre Qualidade da Energia Elétrica (QEE) é caracterizada sobre vários pontos de vistas, de acordo com o observador em questão. “Para os técnicos de energia elétrica é a ausência de deformação de amplitude ou frequência, na forma de onda das grandezas elétricas que resultem em má operação ou defeitos em equipamentos de um sistema elétrico. Para os fabricantes de equipamentos QEE é definido como sendo as características do fornecimento de energia que atendam aos requisitos necessários para que seus equipamentos operem satisfatoriamente. Já para o consumidor, QEE é fundamentalmente o uso contínuo e eficiente do produto energia elétrica” (BRONZEADO, 1997).

No contexto geral QEE é definida como sendo “Qualquer problema de energia manifestada na tensão, na corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores” (FREITAS, 2006).

De acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST módulo 8 – qualidade da energia elétrica:

“Com relação aos valores de referência:

Os valores de tensão obtidos por medições devem ser comparados à tensão de referência, a qual deve ser a tensão nominal ou a contratada, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão;

➤ Com relação à regulação das tensões contratadas:

a) com relação às tensões contratadas pelos acessantes da Rede Básica, devem ser obedecidos os Procedimentos de Rede.

b) com relação às tensões contratadas entre distribuidoras:

A tensão a ser contratada nos pontos de conexão com tensão nominal de operação igual ou superior a 230 kV deverá ser a tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão;

A tensão a ser contratada nos pontos de conexão com tensão nominal de operação inferior a 230 kV deverá situar-se entre 95% (noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão.

➤ Com relação às tensões contratadas junto à distribuidora:

A tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em tensão nominal de operação superior a 1 kV deve situar-se entre 95% (noventa e cinco por cento) e 105% (cento e cinco por cento) da tensão nominal de operação do sistema no ponto de conexão e, ainda, coincidir com a tensão nominal de um dos terminais de derivação previamente exigido ou recomendado para o transformador da unidade consumidora;

A tensão a ser contratada nos pontos de conexão pelos acessantes atendidos em tensão igual ou inferior a 1 kV deve ser a tensão nominal do sistema.”

Sob o ponto de vista elétrico, alguns distúrbios que afetam a QEE nos sistemas de distribuição serão explanados observando as causas dos fenômenos sob suas consequências e soluções para mitigar esses respectivos problemas.

3.1 Distorções de ondas que afetam a qualidade da energia elétrica

Em um sistema elétrico trifásico ideal, as tensões em qualquer ponto deveriam ser, de forma permanente, perfeitamente senoidais, equilibradas, e com amplitude e frequência constantes. Qualquer desvio, acima de certos limites, na característica desses parâmetros é considerado um problema de QEE (BRONZEADO *et al*, 1997).

Os distúrbios associados à QEE e suas características são usualmente divididos de acordo com sua duração e amplitude, sendo estes descritos nos tópicos seguintes.

3.1.1 Variações instantâneas de tensão

Variações instantâneas de tensão são eventos de natureza momentânea, caracterizados pelas variações abruptas da tensão com pequena duração na ordem de micro segundos que, em geral, dependem da quantidade de energia armazenada nos elementos conectados e do comportamento transitório do sistema que leva ao regime permanente (FREITAS, 2006).

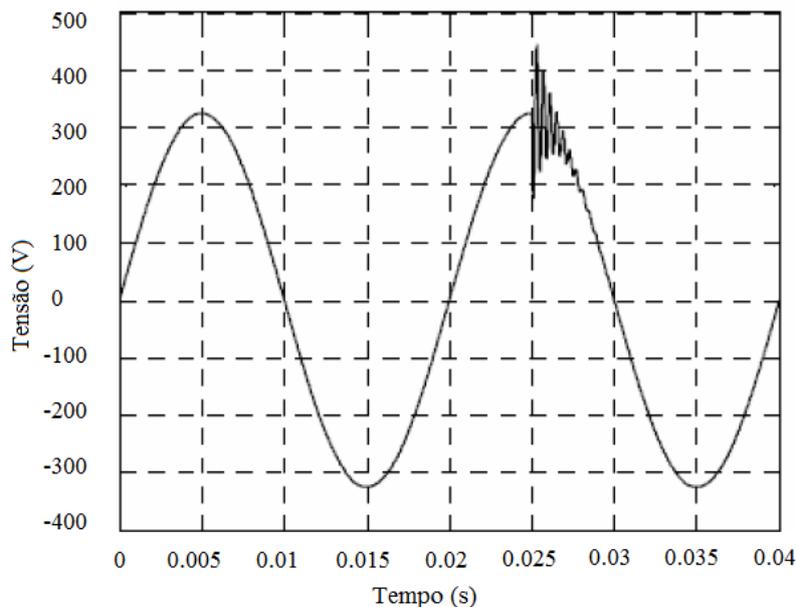


Figura 6 – Forma de onda com variações instantâneas de tensão (MARTINHO, 2010).

Neste grupo estão inclusos os Cortes na Tensão, Surtos de Tensão e os Transitórios Oscilatórios da Tensão.

- Cortes na Tensão (*Notching*):

Cortes na tensão são deformações na onda de tensão, causados pela comutação de tiristores (*SCRs*), equipamentos de eletrônica de potência, quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Essa comutação ocorre quando um *SCR* de uma fase entra em condução (ligado) e um *SCR* em outra fase entra em bloqueio (desligado). Devido à indutância do circuito alimentador, a transferência de corrente de um tiristor em uma fase para o próximo em outra fase não é instantânea. Neste processo, há um período de sobreposição (ou comutação) durante o qual os dois dispositivos estão conduzindo simultaneamente. Durante a comutação, um curto-circuito é criado entre as

duas fases, o que causa aumento da corrente e queda da tensão sendo esta queda definida como um *notch* de linha (GUERRA, 2010).

Na Figura 7 é apresentada uma topologia com *SCRs* e um sinal de tensão com cortes. Essa topologia retrata o valor médio de tensão desejável para uma determinada aplicação.

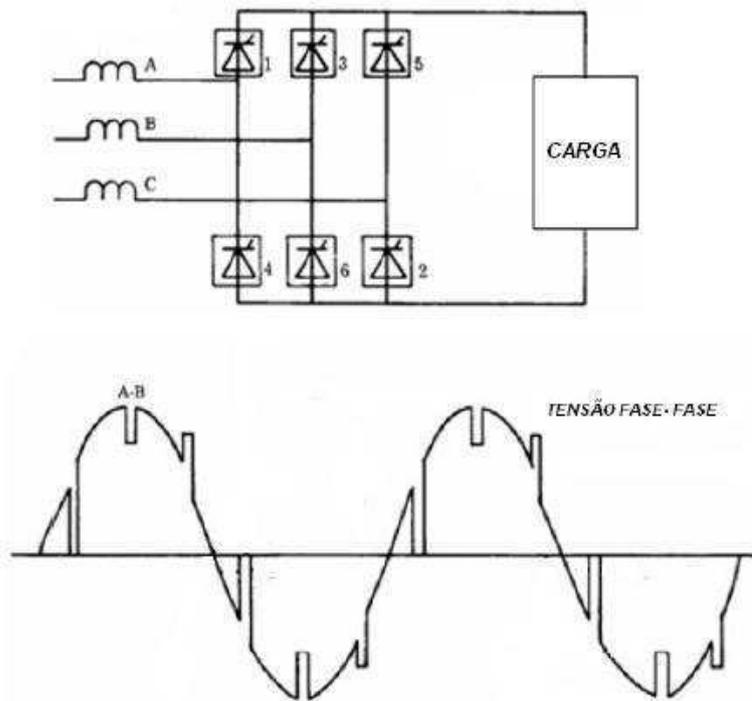


Figura 7 - Topologia com *SCRs* e os cortes de tensão (GUERRA, 2010).

- Surtos de tensão

Os surtos de tensão são caracterizados pelo tempo de subida (Tempo de Crista), tempo de caída (Tempo de Cauda) e pelo valor de pico da tensão que em geral, possui sua polaridade unidirecional. Usualmente, surtos de tensão são causados por descargas atmosféricas (BRONZEADO *et al*, 1997).

- Transitórios Oscilatórios da tensão

Um transitório oscilatório da tensão consiste em uma mudança instantânea de polaridade da tensão do seu ponto de operação em regime permanente. Sua análise pode ser feita mediante a observação de seu conteúdo espectral em alta, média e baixa frequência, duração e magnitude conforme a figura 8 (FREITAS, 2006).

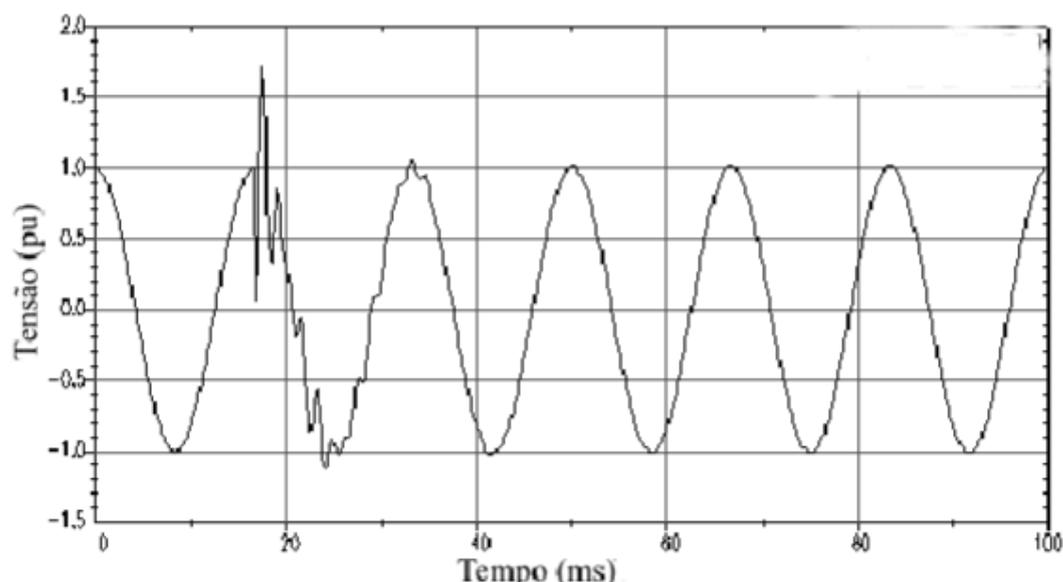


Figura 8 – Caracterização de um transiente oscilatório de tensão proveniente de um chaveamento de um banco de capacitores (GUERRA, 2010).

3.1.2 Variações momentâneas de tensão

As variações momentâneas de tensão são variações na amplitude da tensão em relação à tensão nominal e ocorrem entre meio ciclo e 1 minuto. São causadas na maioria das vezes por curtos circuitos no sistema elétrico e chaveamentos de equipamentos que demandam altas correntes de energização. A classificação das variações momentâneas de tensão de acordo com o PRODIST pode ser visto na tabela 1.

| Classificação | Denominação | Duração da Variação | Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência |
|-------------------------------|----------------------------------|--|--|
| Variação Momentânea de Tensão | Interrupção Momentânea de Tensão | Inferior ou igual a três segundos | Inferior a 0,1 p.u |
| | Afundamento Momentâneo de Tensão | Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos | Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u |
| | Elevação Momentânea de Tensão | Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos | Superior a 1,1 p.u |

Tabela 1 – classificação das variações momentâneas de tensão. (ANEEL-MÓDULO 8, 2010).

As variações momentâneas de tensão são classificadas em:

- Sobretensão momentânea (*SWELL*)

Uma sobretensão de curta duração é definida segundo a norma americana *IEEE 1159-1195*, como um aumento do nível de tensão eficaz entre 10% e 80%, na frequência da rede, com duração entre meio ciclo e 1 minuto. Os *swells* estão geralmente associados com condições de falta no sistema, principalmente as provenientes de falta fase-terra nas redes de distribuição. Porém esse fenômeno pode também estar associado por perda súbita de carga, mudanças rápidas da referência de terra e interrupções ou decréscimo abrupto no consumo de corrente de cargas indutivas (GUERRA, 2010).

Os efeitos ocorridos devido uma sobretensão de curta duração podem ocasionar diversos problemas, tais como: perda de dados, erros de processamento, degradação ou queima dos componentes de equipamentos eletrônicos, redução da vida útil de motores, queima de descarregadores de surtos, atuações indevidas de dispositivos de proteção como fusíveis e disjuntores que podem atuar desenergizando equipamentos, causando problemas de interrupção das cargas, falha em equipamentos ou manobras da concessionária.

- Subtensão momentânea (*SAG*)

Uma subtensão de curta duração é caracterizada por uma redução do nível de tensão eficaz, entre 10% e 90%, na frequência fundamental, com duração entre meio ciclo e 1 minuto.

Uma das principais causas que provoca este distúrbio é o acionamento de cargas de potências elevadas, pois o acionamento da carga ligada a um sistema exige uma grande quantidade de energia da rede, proporcionando um “afundamento” de tensão. Como exemplos podem ser citados: os surtos de corrente devido à energização de transformadores, partida de motores potentes, com durações de até 30 ciclos e acionamento de banco de capacitores que, ao serem energizados, exigem da rede uma maior demanda de corrente para energizar os circuitos inicialmente desenergizados, vencendo a inércia do sistema, como também fornecendo a queda de tensão em todo o

circuito, devido à incapacidade dos dispositivos das redes fornecerem essa corrente instantaneamente (GUERRA, 2010).

As consequências da subtensão de tensão além de causar problemas em componentes eletrônicos levam à perda de dados em equipamentos, gerando acionamentos indevidos e problemas de controle, criando perdas de segurança e produtividade.

Na figura 9 é apresentado, com detalhes, os níveis normais de tensão, assim como as subtensão e sobretensão de tensão.

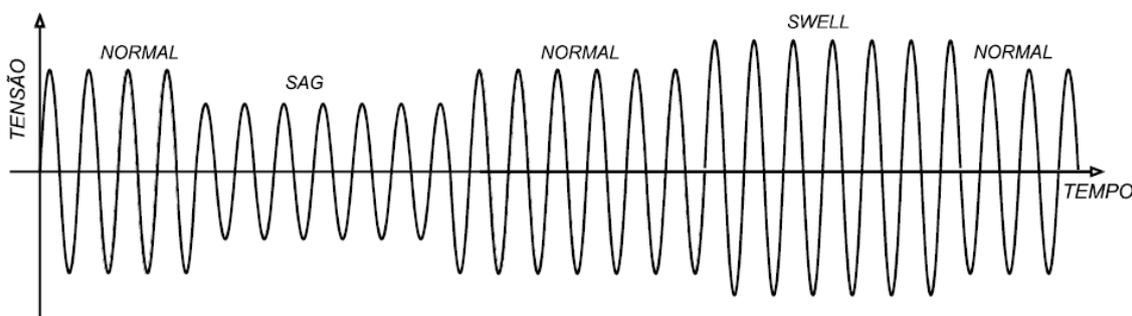


Figura 9 - Sobretensão e subtensão de tensão (BRONZEADO *et al*, 1997).

Existem várias formas para resolver estes distúrbios, como a utilização de estabilizadores de tensão, *no-breaks*, restauradores de tensão dinâmicos de diversos tipos, sendo a mais usual, a utilização dos *UPS (Uninterrupt Power System)*, sistemas ininterruptos de energia, que são equipamentos elétricos fornecedor de energia elétrica emergencial, garantindo uma proteção quase instantânea do circuito por ele alimentado. Isto é realizado através de um conjunto de baterias e circuitos eletrônicos ou geradores, dependendo dos níveis de potência associado ao sistema.

3.1.3 Interrupções de tensão

As interrupções de tensão são caracterizadas quando a tensão de suprimento cai para um valor menor que 10% da tensão nominal por um período, isso geralmente ocorre devido uma sobrecarga, falta no sistema, falhas de equipamentos, acionamento de dispositivos de proteção, ou mau funcionamento de sistemas de controle.

As interrupções são divididas em momentâneas, temporárias e sustentadas, dependendo do tempo de duração.

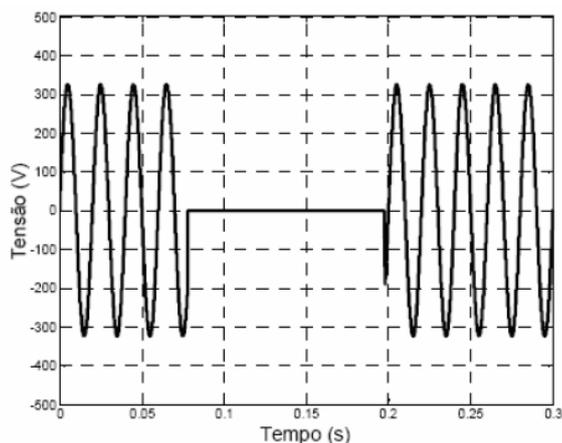


Figura 10 - Interrupção de tensão (POMILIO, 2010).

3.1.4 Variações sustentadas de tensão

As variações sustentadas de tensão são alterações no valor eficaz da tensão que possui duração superior a um minuto. Em geral, são causadas pela entrada e saída de grandes blocos de cargas, linhas de transmissão e equipamentos de compensação de potência reativa (FREITAS, 2006). A classificação das variações sustentadas de tensão de acordo com o PRODIST pode ser visto na tabela 2.

| Classificação | Denominação | Duração da Variação | Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência |
|-------------------------------|----------------------------------|--|--|
| Variação Temporária de Tensão | Interrupção Temporária de Tensão | Superior a três segundos e inferior a três minutos | Inferior a 0,1 p.u |
| | Afundamento Temporário de Tensão | Superior a três segundos e inferior a três minutos | Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u |
| | Elevação Temporária de Tensão | Superior a três segundos e inferior a três minutos | Superior a 1,1 p.u |

Tabela 2 – classificação das variações sustentadas de tensão. (ANEEL MÓDULO 8, 2010).

Essas variações podem ser classificadas como:

- Sobretensões sustentadas (*Overvoltage*): para valores de tensão acima de 110% da tensão nominal na frequência fundamental.
- Subtensões sustentadas (*Undervoltage*): para valores de tensão entre 10% e 90% da tensão nominal na frequência fundamental.

- Interrupção Sustentada de Tensão (*Sustained Interruption*): para valores de tensão inferiores a 10% da tensão nominal ou faltas de tensão. (BRONZEADO *et al*, 1997)

3.1.5 Variação de frequência

A variação de frequência no sistema elétrico em torno da sua fundamental (50 Hz ou 60 Hz) é regulamentada no Brasil com uma faixa em torno de $60 \pm 0,5\text{Hz}$. As principais causas que possa levar a um valor que ultrapasse a faixa estabelecida estão associadas à faltas em sistemas de transmissão, saída de grandes blocos de carga ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração em virtude de um desequilíbrio na geração e/ou carga.

Na figura 11 é ilustrado um exemplo no qual a frequência sofre grandes variações, dando ênfase ao intervalo em que houve a interrupção na linha de transmissão de 765 kV entre Itaipu e São Paulo. Esta falta, ocorrida em 16 de outubro de 2005, resultou em uma variação na frequência do sistema de 60,12 Hz para 58,32 Hz em 3 s (MICHELS, 2009).

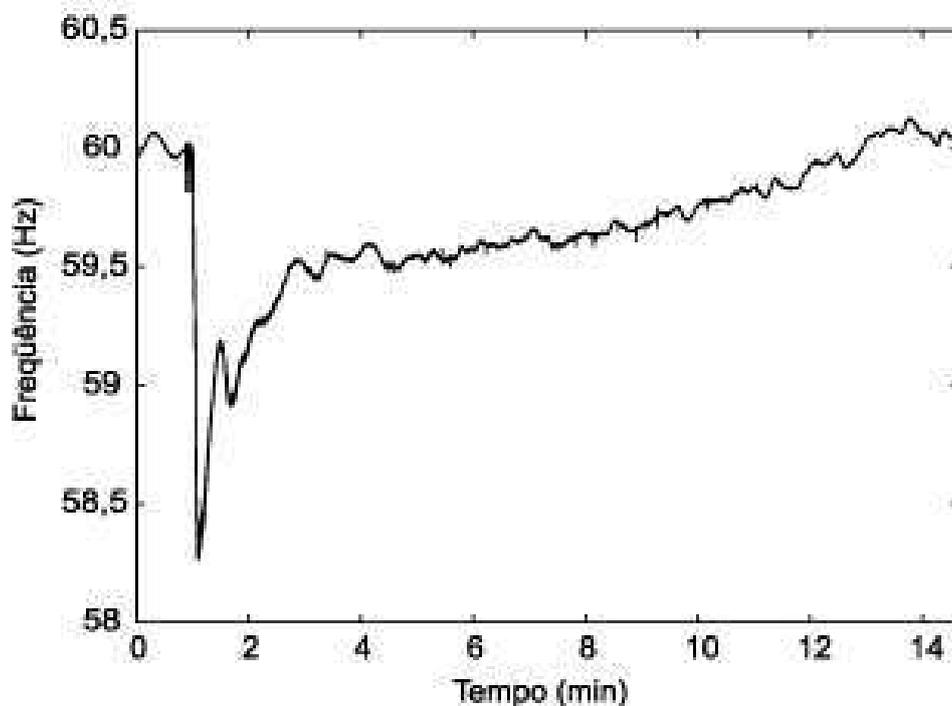


Figura 11 - Variação na frequência do sistema de 60,12Hz para 58,32 Hz em 3 segundos (MICHELS, 2009).

3.1.6 Ruídos elétricos

O ruído elétrico é o termo utilizado para descrever um sinal de alta frequência superposto ao sinal de potência (quando comparado com 50 ou 60 Hz da rede) provocando interferências na rede elétrica, alterando suas características, além de provocar danos ao sistema, pode comprometer os dados entre estações energéticas, fornecendo diagnósticos errados, podendo causar enormes prejuízos para as estações.

Essas interferências são causadas por emissão eletromagnética ou por rádio frequência através de equipamentos como os transmissores de estações de radio e TV, as linhas de alta e extra-alta tensão, eletrodomésticos, motores, conversores estáticos, contatos elétricos defeituosos e as lâmpadas fluorescentes.

Para atenuar os ruídos elétricos são utilizados transformadores de isolamento, filtros, blindagem de estruturas e, principalmente, cuidados com o aterramento, evitando conectar aparelhos sensíveis na mesma fase onde estão ligados aparelhos de maior potência.

Na figura 12 é observado um ruído com amplitude de 10 V, 4,5 kHz, superposto a uma tensão de 220 V, 60 Hz.

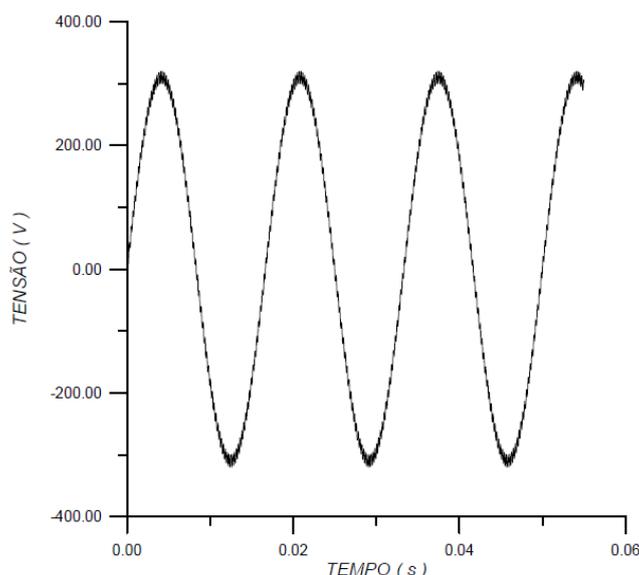


Figura 12 - Ruído superposto a uma tensão de 220 V (GUERRA, 2010).

3.1.7 Cintilação ou *Flicker*

Flicker é o fenômeno designado por cintilação luminosa, referente à percepção pelo olho humano das variações luminosas, causada por modulação da tensão na faixa de 0 Hz a 30 Hz provocando uma flutuação da tensão de alimentação, em virtude da sensibilidade restrita a essa faixa bastante estreita de frequência.

A cintilação ocorre principalmente quando outras cargas ligadas ao mesmo circuito de alimentação variam em virtude dos inter-harmonicos e harmônicos, consumindo uma maior corrente instantânea, provocando flutuações na amplitude da tensão.

Essa variação luminosa sofre maiores consequências em lâmpadas incandescentes e de mercúrio, por apresentarem uma maior sensibilidade a alterações de tensão, assim como televisores, monitores, podem causar dificuldades para leitura, incômodo e cansaço visual, dor de cabeça, estresse mental, perda de concentração, irritabilidade e etc.

Na figura 13 é apresentado um tipo de oscilação que pode ocasionar *flicker*.

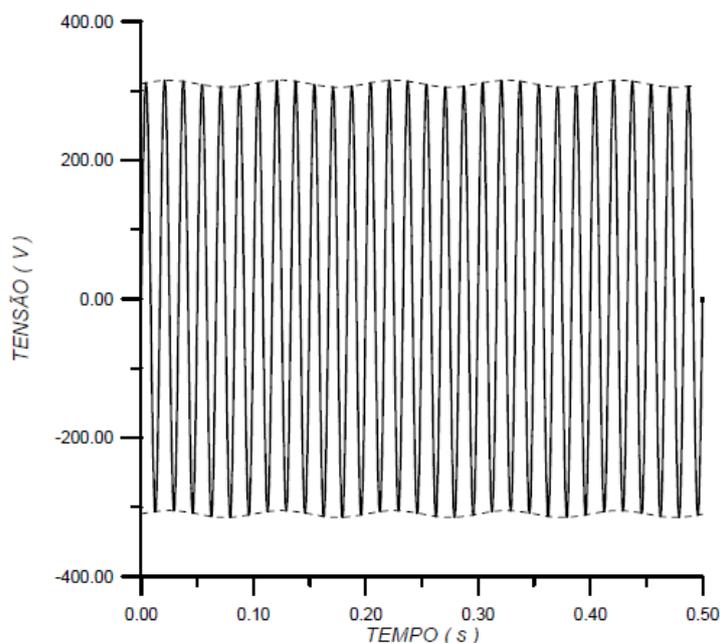


Figura 13 - Sub-harmônica de amplitude 5 V, 10 Hz, superposta a uma tensão de 220 V(rms), 60 Hz (GUERRA, 2010).

3.1.8 Desequilíbrio de tensão

Desequilíbrio de tensão é por definição a diferença entre a magnitude das tensões de fase de circuitos polifásicos, identificado como um problema típico em sistemas de distribuição, característico de regime permanente (POMILIO, 2010).

De acordo com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, o valor de referência nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT, deve ser igual ou inferior a 2%. Esse valor serve para referência do planejamento elétrico em termos de QEE e que, regulatoriamente, será estabelecido em resolução específica, após período experimental de coleta de dados.

Na geração e na transmissão de energia elétrica a preocupação é restritamente voltada ao fornecimento de tensões equilibradas. Quando a energia passa a ser distribuída, seus níveis de equilíbrio são muito reduzidos, pois as cargas são normalmente monofásicas distribuídas de forma irregular, desequilibrando o sistema trifásico, comprometendo a tensão de fornecimento na rede.

Esse desequilíbrio de tensão é ilustrado na forma fasorial e em forma de onda nas figuras 14(a) e 14(b) respectivamente, demonstrando a diferença nas amplitudes dentre as tensões de fase ou no desvio da defasagem de 120° entre estas tensões.

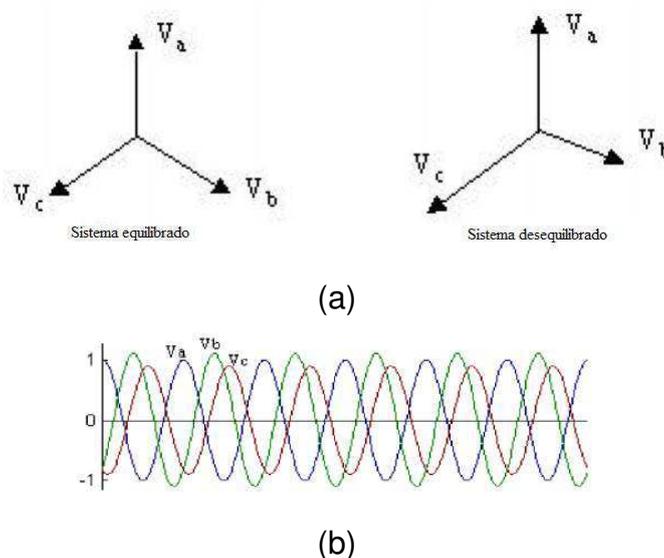


Figura 14 – (a) Desequilíbrio de tensão na forma fasorial. (b) Desequilíbrio de tensão em forma de onda (POMILIO, 2010).

3.1.8.1 Fatores que acarretam o desequilíbrio de tensão

Os fatores que acarretam o desequilíbrio de tensão na distribuição de energia elétrica:

- Distribuição irregular de cargas por fase, ocasionada pela inserção e/ou retirada de cargas;
- Emprego excessivo de transformadores monofásicos em ramais de sistemas de distribuição primária trifásicos a quatro fios com o neutro aterrado, como os sistemas MRT (Monofásico com Retorno pela Terra);
- Em transformadores trifásicos, a corrente de magnetização se diferencia de uma fase para outra devido a diferenças magnéticas encontradas na construção do núcleo. Se a conexão é do tipo estrela com neutro isolado, as tensões de fase se apresentam sensivelmente desbalanceadas, fato que é minimizado caso o secundário seja ligado em triângulo;
- Em zonas com indústrias siderúrgicas, os fornos elétricos trifásicos a arco são as principais fontes de desequilíbrio nas redes elétricas. Durante o processo de fusão e refino, há diferentes carregamentos nas fases, originando altas correntes desequilibradas que provocam desequilíbrios significativos nas tensões;
- Quando uma carga trifásica equilibrada é conectada a uma rede desequilibrada, as correntes de carga serão desequilibradas.

(GUERRA, 2010).

3.1.8.2 Impactos ocasionados pelo desequilíbrio de tensão

Dentre os diversos impactos possíveis causados pelo desequilíbrio de tensão destacam-se os ocorridos nas máquinas elétricas. Nos motores trifásicos, as tensões desequilibradas nos enrolamentos do estator produzem correntes de sequência negativa adicionais circulando no rotor. Isto aumenta as perdas e provoca elevações de temperatura, reduzindo sua eficiência e provocando sobreaquecimento. Outro efeito bem típico é a deformação do campo magnético girante, causada pela composição dos campos de sequência positiva e negativa. Isto implica na produção de esforços mecânicos axiais e radiais sobre o eixo, causando os seguintes problemas: vibrações, ruídos, batimentos, desgastes e aquecimento excessivo dos mancais, em

consequência do surgimento de correntes parasitas no sistema eixo-mancais-terra, reduzindo sua vida útil (GUERRA, 2010).

3.1.8.3 Técnicas para reduzir os impactos ocasionados por desequilíbrio de tensão

Para reduzir o desequilíbrio de tensão as concessionárias assim como os consumidores apresentam grande importância. Algumas técnicas e seus respectivos agentes são descritos em seguida:

Técnicas da concessionária.

- Redistribuição de cargas monofásicas buscando maior equilíbrio;
- Uso de reguladores monofásicos;
- Uso de compensadores passivos ou ativos.

Técnicas do consumidor.

- Balanceamento da carga;
- Equipamentos sensíveis não devem ser conectados em redes com grande número de cargas monofásicas;
- Proteger motores de indução com relés para tensão ou corrente de sequência negativa.

(POMILIO, 2010).

3.1.9 Distorções harmônicas

Equipamentos como computadores pessoais, reatores eletrônicos, variadores de velocidades e fontes de alimentação em geral são exemplos de cargas que têm seu funcionamento baseado em componentes eletrônicos de potência tais como diodo, tiristores, transistores e outros. Esses equipamentos trazem consigo o inconveniente de provocar deformações nas formas de onda presentes nas instalações elétricas, o que resulta nas chamadas tensões e correntes harmônicas (MORENO, 2001).

As correntes harmônicas são geradas pelas cargas não lineares conectadas à rede. A circulação das correntes harmônicas geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação (CHAPMAN, 2005).

Na figura 15 tem-se uma ilustração das formas de ondas de corrente e tensão para cargas lineares e não lineares.

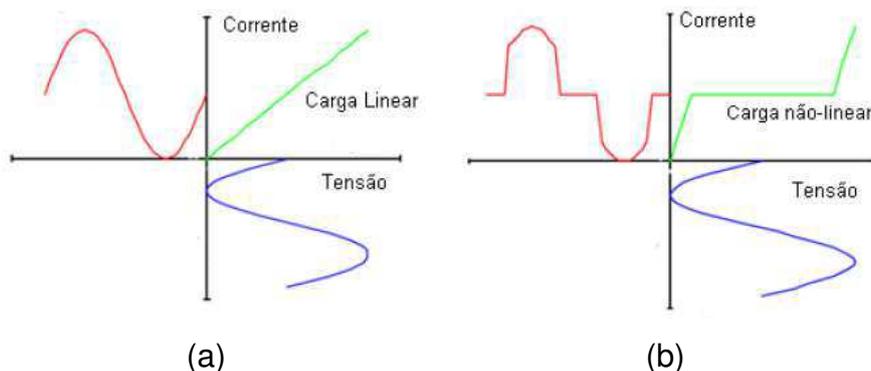


Figura 15 – Formas de ondas de corrente e tensão para: (a) cargas lineares
(b) cargas não lineares (CHAPMAN, 2005)

Segundo o Teorema de Fourier, todo sinal periódico qualquer é composto de uma série de ondas senoidais com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, cada uma com determinada amplitude e uma determinada fase, mais uma componente contínua CC (de frequência zero) (MARTINHO, 2010).

As harmônicas ímpares são mais frequentes e possui maior intensidade, sendo as maiores causadoras de danos em equipamentos conectadas nas instalações elétricas em geral. De acordo com a ordem da harmônica, ela pode ser de sequência positiva, negativa ou zero (MORENO, 2001).

Os sinais harmônicos podem ser classificados quanto à sua ordem, frequência e sequência, conforme indicado na tabela 3.

| Ordem | Frequencia (Hz) | Sequencia |
|-------|-----------------|-----------|
| 1 | 60 | + |
| 2 | 120 | - |
| 3 | 180 | 0 |
| N | $n \times 60$ | — |

Tabela 3 - Ordem, frequência e sequência das harmônicas (MORENO, 2001).

Na figura 16 é observada a componente fundamental e suas componentes harmônicas de ordem ímpar. Vale salientar que as características da carga é o fator determinante da ordem das harmônicas produzidas.

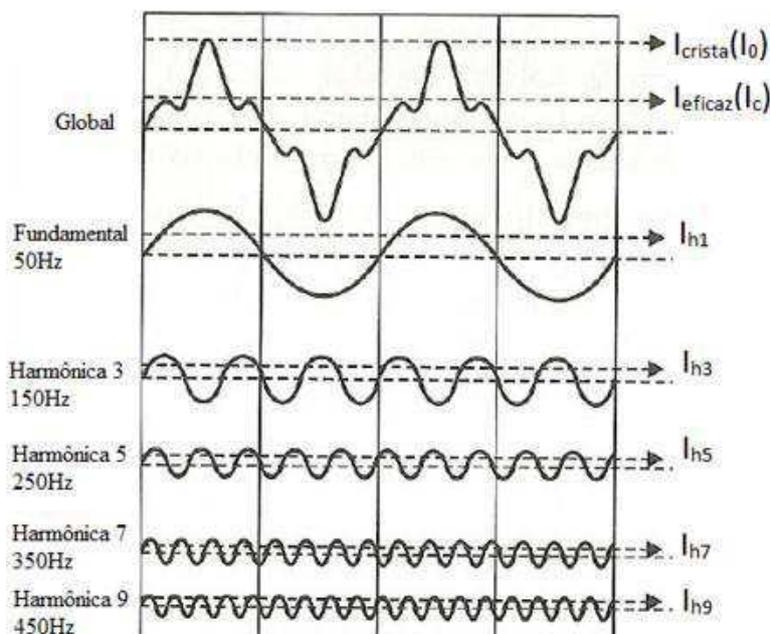


Figura 16 - Exemplo de correntes com suas harmônicas, e decomposição da corrente global em seus componentes harmônicos (CHAPMAN, 2005).

Algumas expressões e determinados limites foram estabelecidos para avaliar o nível de distorção harmônica das ondas de tensão e de corrente. São estes: distorção harmônica total, distorção harmônica individual, espectro harmônico, fator de potência e fator de crista.

- Distorção harmônica total:

Distorção Harmônica Total (DHT) é uma grandeza que quantifica a distorção presente em uma forma de onda periódica em relação à sua fundamental. Para um sinal qualquer y , a DHT é definida pela expressão 1:

$$DHT(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} y_n^2}{y_1^2}} \times 100\%, \quad (1)$$

onde y_1 e y_n são as amplitudes dos harmônicos de frequência fundamental e de ordem “n”, respectivamente.

Quando a referência é harmônica de corrente ou de tensão, basta substituir os valores de y_n por valores de amplitude de corrente ou de tensão na expressão 1, respectivamente, conforme as expressões 2 e 3.

$$DHT_i(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}{I_1^2}} \times 100\%. \quad (2)$$

$$DHT_V(\%) = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}{U_1^2}} \times 100\%. \quad (3)$$

Para uma onda puramente senoidal, livre de distorções, o DHT é de 0%. Já para algumas ondas muito distorcidas, como exemplo corrente de alguns aparelhos eletrônicos, o DTH pode chegar a 100% (CHAPMAN, 2005).

- Distorção harmônica individual

Distorção harmônica individual (DHI) é a razão em percentual dos harmônicos de ordem n em relação a sua fundamental. A DHI pode ser calculada mediante o emprego da expressão 4:

$$DHI_y = \frac{y_n}{y_1} \times 100. \quad (4)$$

Para determinar a Distorção Harmônica Individual de Tensão (DHI_v) ou a Distorção Harmônica Individual de Corrente (DHI_i), basta substituir os valores de y por valores de amplitude de tensão e de corrente, respectivamente.

- Espectro harmônico

O espectro harmônico é uma decomposição em frequência do sinal, que permite representá-lo na forma de um gráfico tipo barras, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência, valor eficaz e defasagem, permitindo avaliar sua deformação. Um exemplo de espectro pode ser visto na Figura 17.

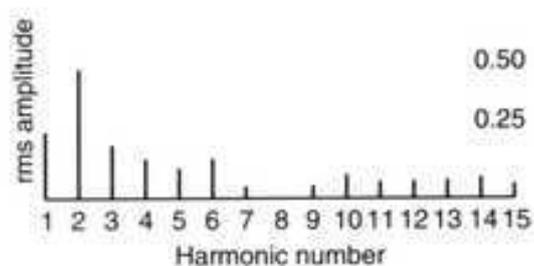


Figura 17 – Espectro harmônico (CHAPMAN, 2005).

- Fator de potência

O fator de potência é uma relação entre a potência ativa e a potência aparente consumida por um equipamento. O fator de potência é um número

adimensional que varia entre 0 e 1. Quando o fator de potência é igual a zero, o fluxo de energia é inteiramente reativo, e a energia armazenada é devolvida totalmente à fonte em cada ciclo indicando baixa eficiência. Quando o fator de potência é 1, toda a energia fornecida pela fonte é consumida pela carga indicando alta eficiência, ou seja, este parâmetro indica a eficiência com a qual a energia está sendo usada.

O fator de potência é calculado de acordo com a expressão 5:

$$FP = \frac{\text{Potência Ativa}}{\text{Potência Aparente}} = \cos \phi. \quad (5)$$

Quando a tensão de alimentação possui conteúdo harmônico na sua composição é necessário realizar uma adequação para o cálculo correto do fator de potência. Essa adequação é apresentada na expressão 6:

$$FP = \frac{\cos \phi}{\sqrt{1 + DHT^2}}. \quad (6)$$

- Fator de Crista

Define-se Fator de Crista (FC) como sendo a relação entre o valor de pico e o valor eficaz de um sinal de tensão ou corrente, de acordo com a expressão 7:

$$FC = \frac{U_{\text{pico}}}{U_{\text{rms}}} \quad \text{ou} \quad FC = \frac{I_{\text{pico}}}{I_{\text{rms}}} \quad (7)$$

O fator de crista é um forte indicador de distorção e simples de ser aplicado. Através de medições e na obtenção de FC's com valores distantes de $\sqrt{2}$ há grandes indícios de sobrecargas pontuais consideráveis, isto porque para um sinal perfeitamente senoidal o $FC = \sqrt{2}$ (CHAPMAN, 2005).

3.1.9.1 Normas de distorções harmônicas

Os níveis de compatibilidade para os harmônicos de tensão para redes de baixa-tensão são definidos de acordo com a norma IEC 61000-2-2, conforme mostrados na tabela 4 (FREITAS, 2006).

| Harmônicos Ímpares não Múltiplos de 3 | | Harmônicos Ímpares Múltiplos de 3 | | Harmônicos Pares | |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------|------------------|----------------------|
| Ordem(N) | Tensão Harmônica (%) | Ordem(N) | Tensão Harmônica (%) | Ordem(N) | Tensão Harmônica (%) |
| 5 | 6 | 3 | 5 | 2 | 2 |
| 7 | 5 | 9 | 1,5 | 4 | 1 |
| 11 | 3,5 | 15 | 0,3 | 6 | 0,5 |
| 13 | 3 | 21 | 0,2 | 8 | 0,5 |
| 17 | 2 | >21 | 0,2 | 10 | 0,5 |
| 19 | 1,5 | | | 12 | 0,2 |
| 23 | 1,5 | | | >12 | 0,2 |
| 25 | 1,5 | | | | |
| >25 | $0,2+0,5 \times 25/n$ | | | | |

Tabela 4 - Níveis de Compatibilidade para harmônicos de tensão em redes públicas de baixa tensão (FREITAS, 2006).

Para as redes industriais a norma IEC 61000-2-4 estabelece os níveis de compatibilidade das distorções harmônicas de acordo com a classe pertencente. Definem-se as três classes com exigência de compatibilidade diferente em função dos ambientes eletromagnéticos possíveis, isto pode ser observado na Tabela 5:

- Classe 1: aplica-se às redes protegidas e tem níveis de compatibilidade mais baixos do que os das redes públicas. Diz respeito à utilização de aparelhos muito sensíveis às perturbações da rede elétrica, como por exemplo: instrumentação de laboratórios tecnológicos, certos equipamentos de automação e de proteção, certos computadores, etc.
- Classe 2: esta classe aplica-se aos PAC (Ponto de Acoplamento Comum à rede pública) e aos pontos de ligação interna nos ambientes industriais em geral. Os níveis de compatibilidade desta classe são idênticos aos das redes públicas, pelo que os equipamentos destinados à utilização nestas redes podem ser usados nesta classe de ambiente industrial.
- Classe 3: esta classe aplica-se somente aos pontos de ligação interna dos ambientes industriais. Os níveis de compatibilidade são superiores aos da classe 2 para certas perturbações. Esta classe deve ser considerada, por exemplo, quando uma das seguintes condições é satisfeita: a maior parte das cargas é alimentada através de

conversores; existem máquinas de soldar; ocorrem arranques (partidas) frequentes de motores de grande potência; as cargas variam rapidamente.

| Distorção Harmônica Total | Classe 1 | Classe 2 | Classe 3 |
|---------------------------|----------|----------|----------|
| | 5% | 8% | 10% |

Tabela 5 - Níveis de compatibilidade para redes industriais (FREITAS, 2006).

3.1.9.2 Efeitos das harmônicas

A formação de harmônicos e as distorções de onda nas linhas de distribuição de energia elétrica trazem sérios problemas nos equipamentos, nas instalações e nos componentes do sistema elétrico. Dentre eles podemos listar alguns de grande importância:

- Aumento das perdas (aquecimento), saturação, ressonâncias, vibrações nos enrolamentos e redução da vida útil de transformadores;
- Aquecimento, binários pulsantes, ruído audível e redução da vida útil das máquinas elétricas rotativas;
- Disparo indevido dos semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- Problemas na operação de relés de proteção, disjuntores e fusíveis;
- Aumento nas perdas dos condutores elétricos, isto em decorrência do efeito pelicular, que restringe a secção condutora para componentes de frequência elevada;
- Aumento considerável na dissipação térmica dos condensadores, levando à deterioração do dielétrico;
- Redução da vida útil das lâmpadas e flutuação da intensidade luminosa (*flicker* – para o caso de ocorrência de subharmônicos);
- Erros nos medidores de energia elétrica e instrumentos de medida;
- Interferência electromagnética em equipamentos de comunicação;
- Mau funcionamento ou falhas de operação em equipamentos eletrônicos ligados à rede elétrica, tais como computadores, controladores lógicos programáveis (PLCs), sistemas de controlo comandados por microcontroladores, etc.

(GUERRA, 2010).

- Nas máquinas elétricas, a presença de harmônicos origina uma diminuição do rendimento da máquina, diminuição essa que se deve não somente devido à existência de campos girantes com sentido de rotação contrário (devido à sequência negativa) ao do campo fundamental, mas também ao aumento das perdas nos enrolamentos e no material ferromagnético estatórico e rotórico da máquina. Sua caracterização de acordo com a sequência harmônica pode ser visto na Tabela 6.

| Sequencia | Rotação | Efeito |
|-----------|---------|--|
| Positiva | Direta | Sobreaquecimento |
| Negativa | Inversa | Sobreaquecimento e menor rendimento |
| Zero | - | Sobreaquecimento(Correntes superpostas ao condutor neutro) |

Tabela 6 – Caracterização das sequencias harmônicas em motores e geradores (FREITAS, 2006).

3.1.9.3 Soluções para redução de distorções harmônicas

Dependendo do nível de distorção harmônica, as formas de atenuação são enquadradas em soluções base e soluções radicais:

Soluções base

- Reagrupamento de cargas poluentes;
- Separação de fontes;
- Utilização de transformadores em conjugado separados;
- Inserção de indutâncias na instalação.

Soluções radicais

- Filtro passivo;
- Filtro ativo;
- Filtro híbrido.

4. Eficiência Energética

Eficiência energética consiste, basicamente, em reduzir perdas e eliminar desperdícios.

Nos processos de conversão de energia a energia é sempre conservada, mas algumas formas de energia são mais úteis do que outras. Baseados na Lei da Conservação da Energia, cientistas e engenheiros estão sempre tentando melhorar a eficiência nos sistemas de geração, transmissão, distribuição de energia elétrica e no seu uso final (TIPLER, 2009).

4.1 As leis das conservações energéticas

As principais definições de grandezas termodinâmicas constam de suas leis: a lei zero é a que define a temperatura; a primeira lei (calor, trabalho mecânico e energia interna) é a do princípio da conservação da energia; a segunda lei define entropia e fornece regras para conversão de energia térmica em trabalho mecânico e a terceira lei aponta limitações para a obtenção do zero absoluto de temperatura (TIPLER, 2009).

4.1.1 Lei zero da termodinâmica

“Se dois sistemas estão em equilíbrio entre si e em equilíbrio térmico com um terceiro sistema, conseqüentemente os três sistemas se encontrarão em equilíbrio térmico” (R. H. FOWLER.).

Ilustração do princípio:

- Estágio Inicial: os sistemas 1, 2 e 3 estão em equilíbrio interno.

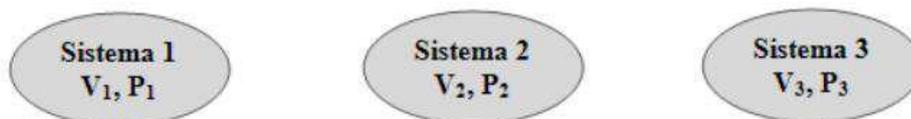


Figura 18 – Sistemas em equilíbrio.

- Estágio Intermediário 1: os sistemas 1 e 2 são colocados em contato, sendo observadas modificações nas propriedades de ambos os sistemas.

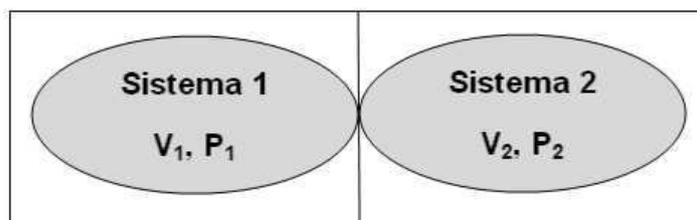


Figura 19 – Sistemas 1 e 2 em contato.

- Estágio Intermediário 2: os sistemas 1 e 2 não apresentam alteração das suas propriedades.

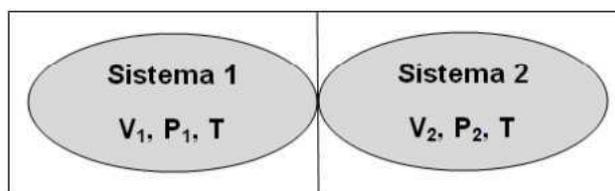


Figura 20 – Sistemas 1 e 2 em equilíbrio térmico.

- Estágio Final: um terceiro sistema (3) é colocado em contato com o sistema 1 e nenhuma alteração é observada, indicando portanto o equilíbrio térmico entre os sistemas 1 e 3; sendo assim os sistemas 2 e 3 estão também em equilíbrio térmico.

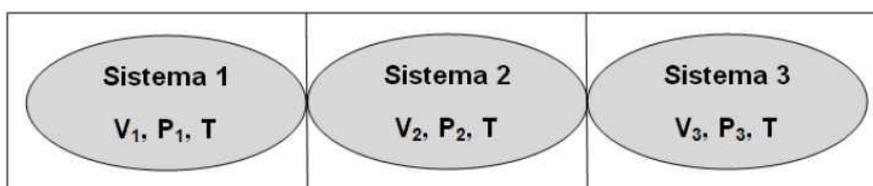


Figura 21 – Todos os sistemas em equilíbrio.

(BASTOS *et al*, 2011).

4.1.2 Primeira lei da termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica surgiu quando, percebeu-se que trabalho poderia ser convertido em calor, ou seja, o gasto de uma quantidade fixa de trabalho sempre origina a produção da mesma quantidade de calor. Este princípio introduziu uma nova função de estado, a energia interna do sistema (BASTOS *et al*, 2011).

A variação da energia interna (ΔE_{int}) de um sistema é igual ao calor transferido para o sistema (Q_{entra}) mais o trabalho realizado sobre o sistema (W_{sobre}) (TIPLER, 2009).

A partir da figura 22 é fácil a visualização do enunciado:

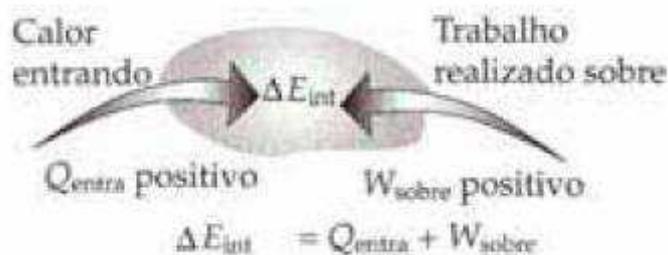


Figura 22 – Esquema referente à primeira lei da termodinâmica (TIPLER, 2009).

Em forma de equação

$$\Delta E_{\text{int}} = Q_{\text{entra}} + W_{\text{sobre}} \quad (8)$$

Quando um sistema muda de um estado para outro, diz-se que o sistema sofre uma transformação reversível ou irreversível. Sabendo que os processos reais são irreversíveis concluímos que, sempre que ocorre uma transformação, a entropia do universo (sistema isolado) aumenta (TIPLER, 2009).

4.1.2.1 Processo reversível

Processos reversíveis são aqueles que, teoricamente, são completamente reversíveis, podendo realizar a trajetória inversa do processo, isto é, quando a transformação ocorre mediante a restauração das condições iniciais, tanto do sistema quanto das vizinhanças, não há produção de trabalho líquido (BASTOS *et al*, 2011).

O processo reversível requer:

- Balanço de pressão interna ou externa;
- Ausência de atrito;

- Tempo suficientemente grande para a restauração das condições iniciais, após variação infinitesimal de volume;
- Processos reversíveis servem de modelo para cálculos termodinâmicos ideais;
- Os processos são idealizados a temperatura constante;
- A energia acumulada nas vizinhanças no processo de expansão é exatamente igual à quantidade necessária para comprimir o gás para o estado inicial.

(BASTOS *et al*, 2011).

4.1.2.2 Processo irreversível

Processos irreversíveis são aqueles que só podem ser executados em um sentido, sem que haja a possibilidade da manutenção do processo ao primeiro estado, isto é, quando o sistema e/ou as vizinhanças não têm as suas condições iniciais restauradas, exceto com o aporte de energia para o sistema. Todos os processos reais são irreversíveis, ainda que em alguns casos seja possível fazer uma aproximação reversível. É possível se aproximar da reversibilidade, mas não atingi-la (BASTOS *et al*, 2011).

Alguns fatores são responsáveis por tornar os processos irreversíveis. Dentre os diversos temos como principais:

- Fricção – fricção por deslizamento, bem como fricção no escoamento de fluidos;
- Expansão não resistida de um gás ou líquido para uma pressão menor;
- Transferência de calor através de uma diferença de temperaturas finita;
- Mistura espontânea de substâncias diferentes ou em diferentes estados;
- Reação química espontânea;
- Fluxo de corrente elétrica através de uma resistência;
- Magnetização ou polarização com histerese;
- Deformação inelástica.

(BASTOS *et al*, 2011).

4.1.3 Segunda lei da termodinâmica

Segundo Clausius, em todos os processos reais de conversão energética, sempre deve existir uma parcela de energia térmica como produto,

cujo valor corresponde as imperfeições nos processos resultando em um incremento líquido da entropia (S) no Universo.

Entropia é uma grandeza termodinâmica que aparece geralmente associada ao que se denomina de "grau de desordem" de um sistema termodinâmico.

$$(S_{\text{total}})_{\text{estado final}} > (S_{\text{total}})_{\text{estado inicial}} \quad (9)$$

Para o processo ser irreversível

$$\Delta S_{\text{total}} > 0 \quad (10)$$

Os enunciados da 2ª Lei sempre enfatizam a impossibilidade de certos tipos de máquinas operarem em processos cíclicos monotérmicos (BASTOS *et al*, 2011).

Segundo o enunciado de Kelvin para a 2ª lei da termodinâmica:

Nenhum sistema pode absorver calor de um único reservatório e convertê-lo inteiramente em trabalho sem que resultem outras variações no sistema e no ambiente que o cerca.

Uma definição equivalente da segunda lei da termodinâmica é o enunciado de Clausius:

Um processo cujo único resultado efetivo seja o de retirar calor de um reservatório frio e liberar a mesma quantidade de calor para um reservatório quente é impossível.

A formulação de Kelvin-Plank para a segunda lei da termodinâmica diz que:

É impossível construir uma máquina térmica que, operando em um ciclo, receba uma quantidade de calor em sua entrada e a transforme em igual quantidade de trabalho.

O esquema representativo de uma máquina térmica que engloba reservatório quente, motor, reservatório frio, pode ser visto na figura 23.

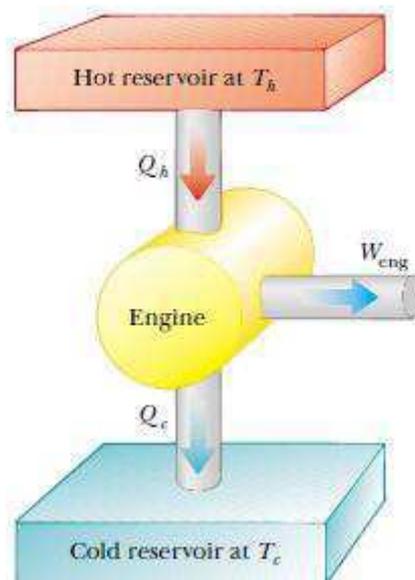


Figura 23 - Esquema representativo de uma máquina térmica (SERWAY *et al*, 2004).

4.1.4 Terceira lei da termodinâmica

Segundo a terceira lei da termodinâmica é impossível reduzir qualquer sistema à temperatura do zero absoluto mediante um número finito de operações. De acordo com esse princípio, também conhecido como teorema de Nernst, a entropia de todos os corpos tende a zero quando a temperatura tende ao zero absoluto (MACHADO, 1998).

4.1.5 As leis da termodinâmica e a eficiência energética

De acordo com a Primeira Lei da Termodinâmica, a energia total num sistema isolado é constante e, conforme a Segunda Lei, a entropia de um sistema isolado tende a um máximo. Assim a eficiência energética é a minimização das perdas na conversão de energia primária em energia útil como pode ser observado no esquema da Figura 24 (MACHADO, 1998).



Figura 24 – Esquema do fluxo de energia.

A eficiência energética de um processo pode ser medida em termos da Primeira ou da Segunda Lei da termodinâmica. Pela Primeira Lei, a eficiência é a razão entre a energia que sai do processo e a energia que entra nele. Já pela Segunda Lei, a eficiência pode ser definida como a razão entre a energia mínima teoricamente necessária para a realização de um processo e a energia efetivamente usada no processo.

A eficiência de um sistema energético pode ser calculada pelas seguintes expressões:

$$\eta_{energ} = \frac{E_{útil}}{E_{entrada}} \quad (11)$$

$$\eta_{energ} = \frac{E_{entrada} - Perdas}{E_{entrada}} \quad (12)$$

$$\eta_{energ} = 1 - \frac{Perdas}{E_{entrada}} \quad (13)$$

4.2 Aplicações da Eficiência Energética

Segundo a Associação Brasileira das Empresas de serviços de Conservação de Energia (ABESCO) a eficiência energética trata de uma atividade técnico-econômica que objetiva:

- Proporcionar o melhor consumo de energia, com redução de custos operacionais correlatos;
- Minimizar contingenciamentos no suprimento desses insumos;
- Introduzir elementos e instrumentos necessários para o gerenciamento energético da empresa ou empreendimento.

No setor elétrico são aplicadas técnicas de eficiência energética submetidas na geração, na transmissão, na distribuição e nos usos finais.

4.2.1 Na geração

- Utilização de técnicas de reuso, captação de águas pluviais, pesquisa para autoprodução.
- Aplicação de tecnologias renováveis: eólica, solar, marés e células a combustível.
- Utilização de usinas hidrelétricas: devido a suas grandes dimensões e potencial hídrico, o Brasil tem a maior parte de sua energia elétrica obtida por meio de hidrelétricas, de grande, médio e pequeno porte (PCH de até 30 MW).
- Repotenciação, reabilitação ou repotenciamento de usinas com mais de 20 anos de uso é uma ação de efficientização energética. (LUCIANO, 2011).



(a)

(b)

(c)

Figura 25 - Tecnologias renováveis: (a) Eólica (Portalmidia.net, 2009), (b) Solar (HALPER, 2011), (c) Marés (ECO, 2008).



Figura 26 – Usina hidrelétrica de Itaipu (PROJETONONAME, 2011).



(a)



(b)

Figura 27 – Repotenciação: (a) Pontes rolantes (b) Rotor do Gerador (IESA, 2005).

4.2.2 Na transmissão

- Repotenciação de Transformadores de Força e de Linhas de Transmissão é uma ação de eficiência energética. O processo de repotenciação envolve o emprego de novos materiais e novas ferramentas computacionais no “reprojeto” do equipamento. (LUCIANO, 2011).



Figura 28 – Repotenciação de um transformador de distribuição imerso em óleo, trifásico com potência nominal de 15 kVA em 60 Hz, fabricado em 1973 (CARVALHO, 2009).



Figura 29 – Repotenciação de linhas de transmissão (JIE, 2009).

4.2.3 Na distribuição

- Emprego de Reguladores de Tensão (RTs), transformadores com mudança de *tap*, sem e sob carga, capacitores paralelos e os capacitores série, na forma de banco de capacitores.
- Emprego de materiais, mais eficientes, nos cabos, isoladores e equipamentos, como por exemplo: transformadores com núcleo de liga amorfa.
- Sistemas de proteção eficazes e eficientes.
- Emprego de novas tecnologias da informação para a redução das perdas técnicas e perdas comerciais.

(LUCIANO, 2011)



Figura 30 – Núcleo de liga amorfa de um transformador produzido industrialmente (LUCIANO *et al*, 2009).



Figura 31 – transformador de distribuição com núcleo de liga amorfa. (Portuguese, 2012).

4.2.4 Nos usos finais

- Emprego de equipamentos com selo Procel.
- Campanhas educativas junto aos consumidores.
- Gerenciamento pelo Lado da Demanda (GLD).
- Substituição de dispositivos de iluminação por outros mais eficientes (lâmpadas PL, luminárias com melhor refletância, reatores eletrônicos).
- Utilização de sistemas de automação, possibilitando acionamento de motores.

- Adequar grandezas elétricas como harmônicos e fator de potência às características da operação em questão.
- Substituição de insumo energético como energia elétrica por energia solar em caso de aquecimento de água.
- Reaproveitamento de energia em dissipação em insumo, como por exemplo, o uso de energia térmica extraída em processo de aquecimento de ar como insumo para pré-aquecimento de água, etc.

A adoção de medidas dessa natureza, além de trazer benefícios diretos para o usuário (exemplos redução de custos, melhoria da competitividade), é igualmente benéfica para a sociedade, pois contribui para o desenvolvimento sustentável (utilização de menos recursos naturais e redução de gases de efeito estufa) (ABESCO, 2011).

5. Emprego de Reguladores de Tensão

O regulador de tensão (RT) é um equipamento instalado em redes de distribuição e subestações que tem por finalidade a manutenção da tensão de saída de um circuito elétrico, mantendo-a constante independente da tensão de entrada. Na prática cada regulador de tensão regula sua própria fase nos sistemas monofásicos e trifásicos. Assim, teremos ligações que utilizam 2 ou 3 tanques, sendo que este conjunto é denominado Banco de Reguladores de Tensão (Toshiba, 2011).

A aplicação de RT nos sistemas de distribuição de energia elétrica é indicada quando os centros de consumo estão distantes dos pontos de geração. Aliado a isso, o aparecimento de grande quantidade de novos aparelhos eletroeletrônicos, sensíveis a oscilações de tensão, fez aumentar as reclamações dos consumidores, que passaram a exigir boa qualidade na distribuição de energia elétrica (Toshiba, 2011).

A instalação desses RT traz enormes consequências benéficas dentre elas podemos destacar:

- Equilíbrio de tensão;
- Redução das perdas na distribuição;
- Satisfação do consumidor;
- Aumento do faturamento das concessionárias de energia elétrica.

5.1 Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do RT é similar ao de um autotransformador, ou seja, existe, além do acoplamento magnético entre o primário e o secundário, um acoplamento elétrico, conforme pode ser visto na figura 32:

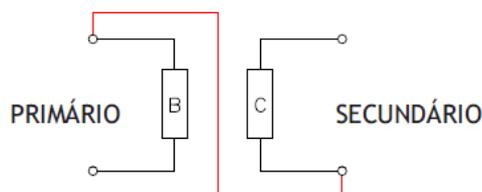


Figura 32 – Diagrama representativo de um RT (Toshiba, 2011).

Existem duas formas de executar a ligação elétrica entre o primário e o secundário, tornando o autotransformador elevador ou abaixador. Em virtude do problema a ser solucionado que reflete quedas de tensão nos trechos da linha foi imposto como solução a instalação de reguladores elevadores de tensão.

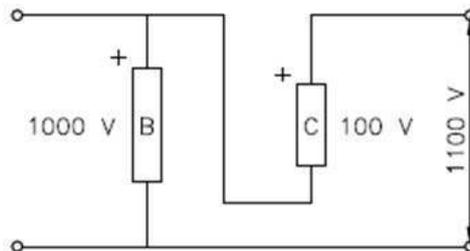


Figura 33 – Ligação com elevador de tensão (Toshiba, 2011).

5.2 Tipos de conexões em banco de reguladores

Os reguladores aplicados neste projeto são reguladores monofásicos em banco trifásico, podendo estes ser interligados na forma:

- Estrela aterrado ou não aterrado;
- Triângulo fechado;
- Triângulo aberto.

Por critérios econômicos e viabilidade no projeto, a conexão adotada foi a disposição triângulo fechado, que além de garantir uma regulação de tensão em até 15%, para variações de tensão em 10%, inibe o furto de cabos de aterramento, de comum ocorrência, presente na disposição estrela aterrado. Sua representação esquemática pode ser vista na figura 34.

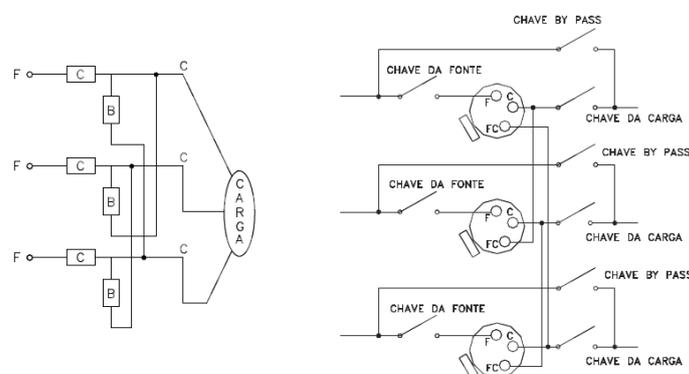


Figura 34- Conexão de três reguladores monofásicos em uma linha trifásica em delta fechado fornecendo ao sistema 15% de faixa de regulação (Toshiba, 2011).

Demonstração da regulação de tensão:

Para os reguladores de 13,8 kV, e uma variação na tensão em 10%:

$$\text{Variação} = 13800 \times 0,1 = 1380 \text{ V} \quad (14)$$

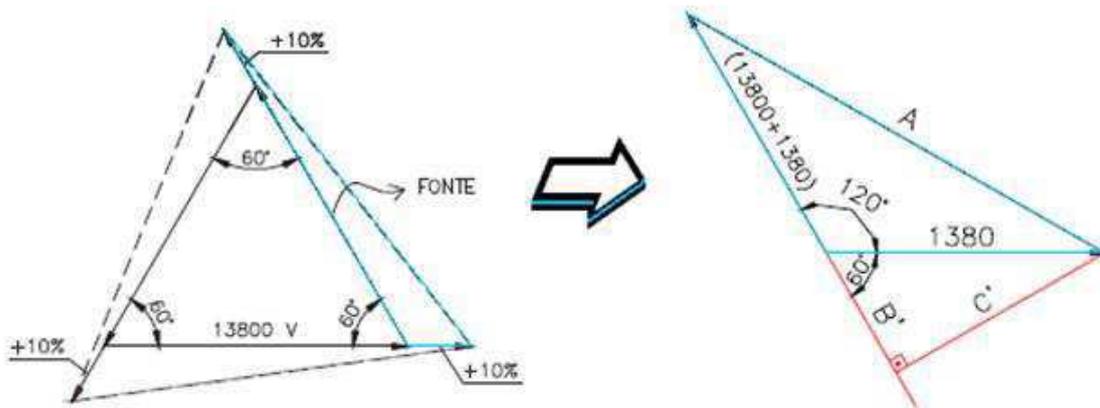


Figura 35 – Triângulo de tensões.

$$\text{sen } 60^\circ = \frac{C'}{1380}, C' = 1195, \quad (15)$$

$$\text{cos } 60^\circ = \frac{B'}{1380}, B' = 690, \quad (16)$$

Logo,

$$\text{sen } 60^\circ = \frac{C'}{1380}, C' = 1195, \quad (17)$$

$$A = \sqrt{1580^2 + 1195^2}, A = 15915 \text{ V} \quad (18)$$

Regulação de tensão:

$$R(\%) = \frac{15915}{13800} = 115\% \quad (19)$$

Assim, a regulação de tensão no regulador é de 15%, garantindo a tensão dentro da faixa permitida.

(Toshiba, 2011).

5.3 Manobras em reguladores de tensão

A colocação e a retirada do RT de serviço devem obedecer ao procedimento dos reguladores com controle TB-R1000, como pode ser observado na Figura 36.

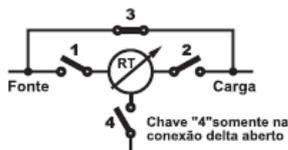
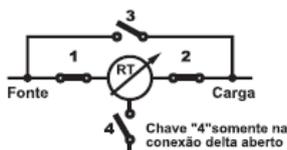
| Principais operações de manobra | |
|--|---|
| <p>Colocação do regulador em serviço e abertura da chave by-pass</p>  <p>01- Utilize os equipamentos de segurança.</p> <p>02- Verifique se as partes metálicas estão rigidamente aterradas.</p> <p>03- Coloque a chave de alimentação "normal/desliga/externo" do painel inferior da caixa de controle na posição "desliga" em todos os reguladores do banco.</p> <p>04- Feche a chave "4" apenas para o banco em delta aberto em todos os reguladores do banco.</p> <p>05- Feche a chave "1" (lado da fonte) em todos os reguladores do banco.</p> <p>06- Coloque a chave de alimentação "normal/desliga/externo" do painel inferior do controle na posição "normal", selecione a opção "manual" através da tecla "manual/auto" do painel superior do controle e coloque todos os reguladores do banco na posição "0" através das teclas elevar \uparrow e abaixar \downarrow do painel superior do controle.</p> <p>07- Certifique-se que a lâmpada indicadora de posição neutra localizada no painel inferior do controle esteja acesa e se há indicação de tap "0" no painel superior do controle em todos os reguladores do banco.</p> <p>08- Não continuar com os procedimentos de manobra do regulador caso exista divergência entre a indicação de tap "0" do painel superior do controle e a indicação da lâmpada de posição neutra localizada no painel inferior do controle.</p> <p>09- Coloque a chave de alimentação "normal/desliga/externo" do painel inferior do controle na posição "desliga" em todos os reguladores do banco.</p> <p>10- Feche a chave "2" (lado da carga) em todos os reguladores do banco.</p> <p>11- Abra a chave "3" (by-pass) em todos os reguladores do banco.</p> <p>12- Coloque a chave de alimentação "normal/desliga/externo" do painel inferior do controle na posição "normal" e selecione a opção "auto" através da tecla "manual/auto" do painel superior do controle em todos os reguladores do banco.</p> | <p>Retirada do regulador de serviço e fechamento da chave by-pass</p>  <p>01- Utilize os equipamentos de segurança.</p> <p>02- Verifique se as partes metálicas estão rigidamente aterradas.</p> <p>03- Selecione a opção "manual" através da tecla "manual/auto" do painel superior do controle e coloque todos os reguladores do banco na posição "0" através das teclas elevar \uparrow e abaixar \downarrow do painel superior do controle.</p> <p>04- Certifique-se que a lâmpada indicadora de posição neutra localizada no painel inferior do controle esteja acesa e se há indicação de tap "0" no painel superior do controle em todos os reguladores do banco.</p> <p>05- Não continuar com os procedimentos de manobra do regulador caso exista divergência entre a indicação de tap "0" do painel superior do controle e a indicação da lâmpada de posição neutra localizada no painel inferior do controle.</p> <p>06- Coloque a chave de alimentação "normal/desliga/externo" do painel inferior do controle na posição "desliga" em todos os reguladores do banco.</p> <p>07- Feche a chave "3" (by-pass) em todos os reguladores do banco.</p> <p>08- Abra a chave "2" (lado da carga) em todos os reguladores do banco.</p> <p>09- Abra a chave "1" (lado da fonte) em todos os reguladores do banco.</p> <p>10- Abra a chave "4" apenas para o banco em delta aberto em todos os reguladores do banco.</p> |

Figura 36 – Procedimentos de inserção e retirada do banco de reguladores de tensão (Toshiba, 2010).

5.4 Projeto

Neste TCC é apresentado um estudo de caso implementado na empresa Energisa Paraíba em parceria com a Control Construções Ltda, refinando dados e rotinas sobre reguladores de tensão, com o objetivo de fornecer equilíbrio de tensão reduzindo as perdas na distribuição da energia elétrica, enfatizando a QEE e a Eficiência Energética.

Apartir dos estudos realizados com o *software interPlan AT Plus®*, foi identificado a importância da manutenção do RT nas proximidades da cidade de Baía da Traição – PB, confrontando com as características que a rede

apresentava de grandes perdas em consequência do comprimento da linha. No mapa da Figura 37 pode ser visto a localização desse trecho da linha que apresenta uma extensão total de 38 km.



Figura 37 – Localidade da manutenção

As linhas de transmissão, reguladores de tensão e os transformadores instalados naquela região podem ser visto na Figura 38.

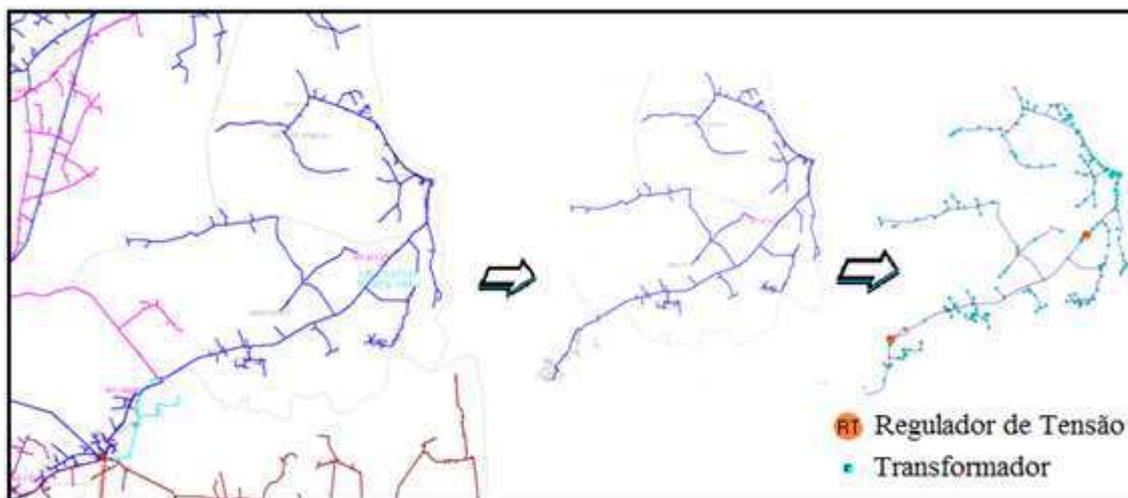


Figura 38 – Esquematização da linha e de seus componentes (*interPlan*®).

A implementação do banco de reguladores teve por objetivo, regular a tensão naquele trecho. Na figura 39 podem ser observadas as características da rede sem os RT, sendo os ramos na cor vermelha representações das quedas de tensão ao longo da linha com mais de 10%, nos trechos amarelos quedas de tensão entre 7 e 10% e assim sucessivamente conforme a diversificação da legenda no mapa.

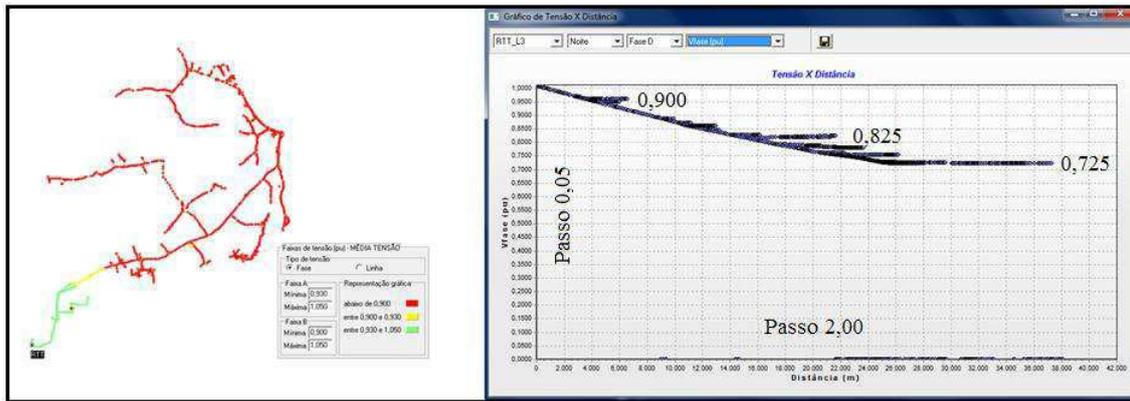


Figura 39 – Mapa esquemático da situação da tensão. Gráfico tensão (pu) X distância (km) (*interPlan AT Plus®*).

Com a inserção dos reguladores, é verificada na figura 40 a diferença imposta nas partes jusantes dos bancos, apresentando um melhor rendimento no fornecimento de energia e garantindo sua qualidade. No geral é observado que há necessidade de melhorias nas partes centrais da rede, projeto este que se encontra em andamento no Departamento de Acessoria Planejamento e Orçamento (ASPO) da Energisa Paraíba.

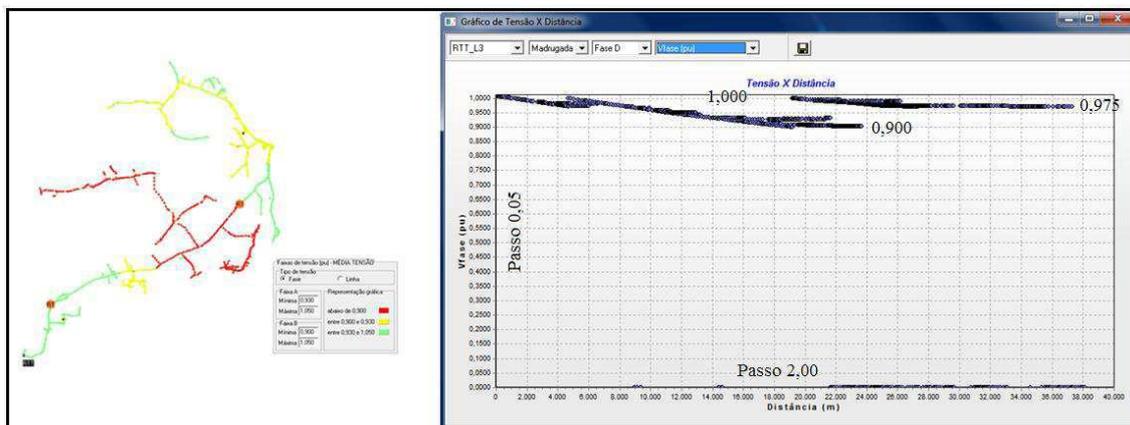


Figura 40 - Mapa esquemático da situação da tensão. Gráfico tensão (pu) X distância (km) (*interPlan AT Plus®*).

Quanto ao tipo de sistema é apresentado os respectivos trechos e a quantidade de fases em cada ramificação na figura 41. As partes na cor vermelha do sistema representam o sistema trifásico a três fios sem neutro, com a tensão de base 13,2 kV. O cabo utilizado nas linhas onde se encontram os reguladores é do tipo S1/0SN, cabos estes com secção de aproximadamente 53 mm² com uma capacidade de condução de 138 ampères, para uma temperatura média de 70°C, segundo a Associação Brasileira de

Normas Técnicas (ABNT) (NBR 5410) representadas pela coluna central na cor violeta.

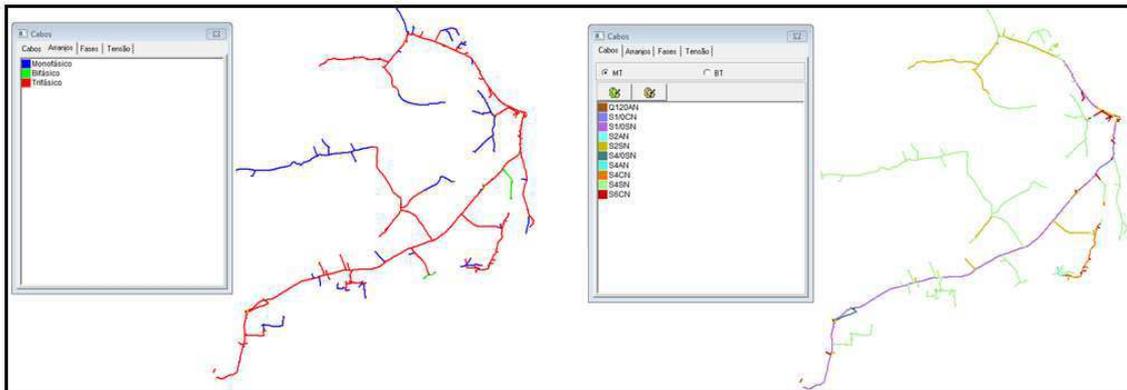


Figura 41 – Tipos de circuitos e cabos (*interPlan AT Plus®*).

5.5 Visita técnica

Na visita técnica ao local no momento da manutenção foi verificada a importância da utilização do método de proteção tipo à distância, no qual o trabalhador interage com a parte energizada a uma distância segura, mediante o emprego de certos procedimentos, uso de estruturas, Equipamentos de Proteção Individual (EPI), Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC), ferramentas e dispositivos isolantes apropriados, garantindo a integridade da saúde e da vida do colaborador. Verificou-se, também, a necessidade de treinamentos específicos dos trabalhadores para a realização de tais atividades.

Para esse serviço é apresentado alguns equipamentos utilizados em uma operação em linha energizada ou linha “viva” e em seguida alguns registros efetuados no momento da manutenção:

Equipamentos de proteção coletiva

- Dispositivo de seccionamento: chaves facas.
- Dispositivo contra queda em altura: cestas aéreas.
- “Munck” ou guindaste.
- Dispositivos de manobra: varas de manobra, bastões.
- Detectores de tensão por aproximação.

Equipamentos de proteção individual

- Vestimentas de trabalho.
- Capacete de segurança.
- Óculos de proteção.
- Protetor solar.
- Luvas de segurança contra choques elétricos de classe 2, com isolamento até 17 kV.
- Luvas de pelica.
- Mangas de segurança isolante com níveis de isolamento de até 20 kV.
- Calçado de segurança.
- Perneira de segurança.
- Cinturão de segurança.
- Talabarte.
- Dispositivo trava-quedas.

Nas figuras 42, 43 e 44 podemos observar os RT do estudo, a manutenção dos RT e os dados de placa do regulador em questão respectivamente.



Figura 42 – Banco de reguladores de tensão para manutenção. Maio de 2012.



Figura 43 – Manutenção dos reguladores. Maio de 2012.



Figura 44 – Foto do RT substituído e seus dados de placa (ITB, 2011). Maio de 2012.

6. Conclusão

Ao realizar este trabalho, pude perceber a importância do conhecimento mais aprofundado sobre a eficiência energética e a preocupação ininterrupta relacionada à qualidade da energia elétrica. Eficiência energética e QEE são fatores característicos de um mundo moderno em virtude da crescente utilização de equipamentos eletroeletrônicos chaveados e da procura por redução de custos dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Em termos práticos, foi realizado um estudo de caso de um regulador de tensão realizado na empresa Control Construções Ltda. em parceria com a Energisa, com o objetivo de regular a tensão em torno de 13% da tensão inicial, de um alimentador localizado no litoral Norte do estado da Paraíba. Este projeto na íntegra foi extremamente importante para obtenção do vínculo inicial entre a teoria obtida na graduação e da prática vista no setor empresarial, formalizando assim um marco para aplicações e necessidades do mercado profissional.

7. Referências

1. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional: Prodist – Procedimento de distribuição. Módulo 8: Qualidade da energia elétrica. Disponível em <http://www.aneel.com.br>. Acesso em março de 2012.
2. BRONZEADO, H. Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições Associados à Qualidade de Energia Elétrica. Itajubá. II SBQEE. 1997.
3. BASTOS, A. C. L. M. Físico-Química. Belém: UFPA, 2011.
4. CARVALHO, J. R. R. *et al.* Setor Elétrico. Reprojeto de transformador com aumento de potência. 38 ed., março de 2009. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/component/content/article/89-tcc-reprojeto-de-transformador-com-aumento-de-potencia.html>. Acesso em: março de 2012.
5. CHAPMAN, D. Qualidade de Energia: Harmônicos. Schneider Electric Workshop, 2005.
6. DUAILIBE, Paulo. Consultoria para Uso Eficiente de Energia. Rio de Janeiro, 1999.
7. ECO, Urbana. Coletivo ecologia Urbana. 2008 Disponível em: <http://ecourbana.wordpress.com/page/51/?archives-list=1>. Acesso em março de 2012.
8. FREITAS, G. E. R., FONSECA, R. J. Análise de Distúrbios Harmônicos em Componentes do Sistema Elétrico. Belém, 2006.
9. GUERRA, F. C. F. Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos. Campina Grande: UFCG, 2010.
10. HALPER, M. U.S. solar PV will nearly triple this year. August 18, 2011. Disponível em: <http://www.smartplanet.com/blog/intelligent-energy/us-solar-pv-will-nearly-triple-this-year/8095>. Acesso em março de 2012.
11. IESA. Boletim informativo. 4 ed. 2005. Disponível em: <http://www.iesa.com.br/informativo/082005/>. Acesso em março de 2012.
12. ITB. RT monofásico. 2011. Disponível em: <http://www.itb.ind.br/regulador-de-tensao-monofasico.php>. Acesso em maio de 2012.

13. JIE - jornal de Itaipu eletrônico. Nas alturas, troca de equipamento traz segurança à transmissão de energia. 2009. Disponível em: http://jie.itaipu.gov.br/print_node.php?secao=turbinadas1&nid=5248. Acesso em março de 2012.
14. KAGAN, N., OLIVEIRA, C. C. B., ROBBA, E. J. Introdução a Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica, São Paulo: Edgard Blucher, 1. ed. 2005. 344p.
15. LUCIANO, B. A.; FREIRE, R. C. S.; INACIO, R. C.; BATISTA, T. C.; CAMACHO, M. A. G. Eficiência energética associada aos transformadores com núcleo de liga amorfa. In: III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, 2009, Belém. Anais do CBEE 2009, p. 1-6, 2009.
16. LUCIANO, B. A. Gerenciamento de Energia. Campina Grande: UFCG, maio de 2010.
17. MACHADO, A. C. Pensando a Energia. Rio de Janeiro: ELETROBRÁS. 1998.
18. MARTINHO, Edson. Distúrbios da Qualidade da Energia Elétrica. São Paulo: Érica. 2. ed., 2010.
19. MICHELS, L. STEFANELLO, M. GRUNDLING, H. A. Controlador repetitivo para inversores PWM com referência de frequência variável. Revista Controle & Automação/Vol.20 nº 3. Joinville /Julho, Agosto e Setembro 2009.
20. MORENO; H.; Harmônicas nas instalações elétricas: Causas, efeitos e soluções. 1 ed. São Paulo, SP. PROCOBRE. 2001.
21. POMILIO, J. A. DECKMANN, S.M, Curso Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. 2010.
22. Portamidia.net. Informativo. 2009. Disponível em: <http://www.portalmidia.net/2009/06/empresa-australiana-planeja-implantar-uma-terceira-usina-eolica-em-mataraca/>. Acesso em março de 2012.
23. Portuguese. Disponível em: <http://portuguese.alibaba.com>. acesso em: setembro de 2012.
24. PROJETONONAME. Usinas hidrelétricas e seus impactos ambientais. 2011. Disponível em: <http://projetononame.blogspot.com.br/>. Acesso em: março de 2012.
25. SERWAY, R. A., JEWETT, J. W. Physics for Scientists and Engineers. 6. ed. Orlando. Saunders Golden Sunburst Series.2004.

26. TIPLER, P. A. MOSCA, G. Física para Cientistas e Engenheiros. Vol. 1. São Paulo: LTC 6. ed. 2009.
27. Toshiba Infraestrutura América do Sul Ltda. Manual de instruções para reguladores de tensão monofásicos, revisão, junho de 2011. Disponível em: <http://www.toshiba.com.br>. Acesso em maio de 2012.