

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
Curso de Engenharia Elétrica

FLAVIO DE ANDRADE REGAGNIN

**FLUTUAÇÕES DE TENSÃO CAUSADA PELOS
FORNOS A ARCO – EFEITOS E POSSÍVEIS MITIGAÇÕES**

Itatiba
2012

FLAVIO DE ANDRADE REGAGNIN – R.A. 002200600747

**FLUTUAÇÕES DE TENSÃO CAUSADA PELOS
FORNOS A ARCO – EFEITOS E POSSÍVEIS MITIGAÇÕES**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof.º Dr. Geraldo Peres Caixeta

Itatiba
2012

FLAVIO DE ANDRADE REGAGNIN

**FLUTUAÇÕES DE TENSÃO CAUSADA PELOS
FORNOS A ARCO – EFEITOS E POSSÍVEIS MITIGAÇÕES**

Dissertação aprovada pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Data de aprovação: 04/12/2012

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta (Orientador)

Universidade São Francisco

Prof. M.e Renato Franco de Camargo (Examinador)

Universidade São Francisco

Prof. ^aDra. Annete Silva Faesarella (Examinadora)

Universidade São Francisco

*Este trabalho é dedicado a Deus, aos meus pais e irmã,
aos meus amigos e a minha esposa, Suzana.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus por conceber o dom da vida e saúde para sempre seguir em frente e jamais desistir perante aos empecilhos que surgiram no decorrer desse trabalho e também durante todo o curso. E por guiar meus passos e por me conceder mais essa realização.

Agradeço a minha família, que me apoia e incentiva em cada momento de minha vida e sem a qual eu não seria nada.

A todos aqueles que de alguma forma, seja direta ou indiretamente, me motivaram e contribuíram ao longo desses anos, principalmente a minha esposa Suzana, que me “aturou” com muita paciência no decorrer desses anos, aos amigos Felipe e Daiane, Lucas e Fernanda, André, Samuel e Micheli, Célio e Gislaine, Flávia, Markinhos, Alcindo e Flavinha.

Agradeço ao professor Geraldo Peres Caixeta que me deu orientações valiosas para a elaboração deste trabalho.

“Se você quer ser bem sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si mesmo.”

Ayrton Senna

RESUMO

Neste trabalho é apresentado um estudo teórico sobre flutuação de tensão, onde apresentamos a conceituação do termo flutuação de tensão, a origem dessas flutuações no sistema elétrico e os métodos de atenuação desse fenômeno. Apresenta-se também o fenômeno “*Flicker*”, conhecido como principal efeito da flutuação de tensão podendo ser observado, através da variação da luminosidade da lâmpada. Esses efeitos causados pela flutuação de tensão atualmente não podem ser totalmente controlado podendo apenas ser mitigados conforme os métodos que foram discutidos. Com base em todos os métodos apresentados, podemos verificar que o STATCOM é o método mais eficiente tendo um tempo de resposta mais rápido e uma melhor estabilidade a variações nas impedâncias do sistema.

Palavras chave: Flutuação de tensão. Fornos a arco. *Flicker*.

ABSTRACT

This paper presents a theoretical study of voltage fluctuation, where we present the definition of the term voltage fluctuation, the origin of these fluctuations in the electrical system and methods for mitigation of this phenomenon. It also presents the phenomenon "*Flicker*", known as Main effect of voltage fluctuation can be observed by varying the lamp brightness. These effects caused by voltage fluctuation currently can't be fully controlled and can only be mitigated as the methods that were discussed. Based on such methods can verify that the STATCOM is the most efficient method having a response time faster and better stability against changes in system impedances.

Keywords: voltage fluctuation. Arc furnaces. *Flicker*.

LISTA DE ABREVIATURAS

CCT	Capacitor chaveado a tiristores
CPFL	Companhia Paulista de Força e Luz
PAC	Ponto de Acoplamento Comum entre a concessionária e o consumidor
PRODIST	Procedimento de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional
RCT	Reator controlado a tiristores
STATCOM	Conversor estático
P_{ca}	Determinação do valor do banco de capacitores
X_t	Reatância resultante do sistema de alimentação
X_s	Reatância própria do sistema de alimentação
X_c	Reatância do banco de capacitores
I_{ca}	Corrente que circula no banco de capacitores

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1-	Forma de onda da tensão de um forno elétrico a arco	1
Figura 2-	Forno elétrico a arco trifásico	4
Figura 3-	Unidade hidráulica	6
Figura 4-	Torre de resfriamento	7
Figura 5-	Transformador	8
Figura 6-	Reator	9
Figura 7-	Cabos flexíveis	10
Figura 8-	Disjuntor	11
Figura 9-	Painel de Comando	12
Figura 10-	Púlpito de basculamento	13
Figura 11-	Forma de onda do sinal resultante	15
Figura 12 -	Flutuação de tensão tipo A	16
Figura 13 -	Flutuação de tensão tipo B.....	17
Figura 14 -	Flutuação de tensão tipo C	18
Figura 15 -	Flutuação de tensão tipo D	19
Figura 16a -	Diagrama simplificado da ligação da carga	20
Figura 16b -	Diagrama fasorial	20
Figura 17-	Janela de medição de tensão eu um barramento de 380 Volts	21
Figura 18-	Diagrama de impedância de instalação de compensadores serie	26
Figura 19-	Diagrama de impedância de instalação de compensadores síncrono	28
Figura 20a-	Capacitar chaveado a tiristores	30
Figura 20b-	Reator controlado a tiristores.....	30
Figura 20c-	Reator controlado a tiristores com capacitor fixo	30
Figura 20d-	Solução mista CCT + RCT	30
Figura 21-	Representação unifilar do STATCOM	32
Figura 22-	Característica V versus I do reator a núcleo saturado	33
Quadro 1-	Resumo das vantagens e desvantagens relacionadas aos principais métodos de atenuação de flutuações de tensão	34

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	20
Equação 2	20
Equação 3	21
Equação 4	25
Equação 5	26
Equação 6	27
Equação 7	28
Equação 8	28

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 SURGIMENTO DOS FORNOS A ARCO	2
2.1 Princípios de funcionamento dor fornos a arco	2
3 COMPONENTES DE UM FORNO A ARCO	3
3.1 Composição mecânica	4
3.1.1 Carcaça	4
3.1.2 Cuba	4
3.1.3 Eletrodos	5
3.1.4 Tampa do forno ou abóbada	5
3.1.5 Unidade hidráulica	5
3.1.6 Torre de resfriamento	6
3.2 Composição elétrica	7
3.2.1 Transformador	7
3.2.2 Reator	8
3.2.3 Cabos flexíveis	10
3.2.4 Disjuntor do forno	10
3.2.5 Painel de comando	11
3.2.6. Púlpito de Basculamento	12
4 METODOLOGIA	13
4.1 Fundamento teóricos sobre as flutuações de tensão	14
4.1.1 Conceituação do termo flutuação de tensão	14
4.1.2 Origem das flutuações de tensão nos sistema elétricos	19
4.1.3 Efeitos associados às flutuações de tensão nos sistema elétricos	22
4.1.3.1 Efeitos em máquinas elétricas	22
4.1.3.2 Efeitos em retificadores e inversores	23
4.1.3.3 Efeitos em equipamentos de aquecimento	23
4.1.4 Métodos de atenuação das flutuações de tensão	24
4.1.4.1 Elevação do nível de curto circuito	25
4.1.4.2 Instalação de compensadores serie	26
4.1.4.3 Instalação de compensador síncrono	27

4.1.4.4 Instalação de compensador e autocomutados	29
4.1.4.5 Instalação de reatores a núcleo saturado	32
5 RESULTADOS	33
6 CONCLUSÃO	35
7 REFERÊNCIA	36

1 INTRODUÇÃO

Segundo Mamede Filho (1989) os fornos a arco são uma fonte permanente de distúrbios para o sistema de alimentação das concessionárias que, por este motivo, mantêm uma severa vigilância sobre as instalações siderúrgicas que operam com este tipo de equipamento.

Os distúrbios se fazem sentir principalmente na iluminação incandescente e se caracterizam por uma variação da luminosidade da lâmpada que, além de irritar o observador, pode provocar lesões ao olho humano. Esta variação da luminosidade é o resultado da variação do valor eficaz da tensão da rede provocada pela operação do forno, fenômeno este conhecido como “*Flicker*”.

Quando da operação dos fornos a arco, principalmente no período de fusão, os eletrodos tocam momentaneamente a carga sólida, entrando em regime de curto-circuito, em que a potência ativa absorvida do sistema se reduz às perdas ôhmicas do transformador, resultando num valor máximo de potência reativa, conseqüentemente reduzindo o fator de potência a níveis muito mais baixos.

O grande número de curtos-circuitos, no período de fusão, e a instabilidade do arco criam oscilações na rede que podem atingir cerca de até 20 variações por minuto.

A figura 1 mostra um exemplo das formas de ondas de tensão nas fases a, b, c, registradas no secundário do transformador do forno. Nota-se as formas de onda de tensão quando o forno está ligado, porém sem carga e o início da fase de fusão do aço.

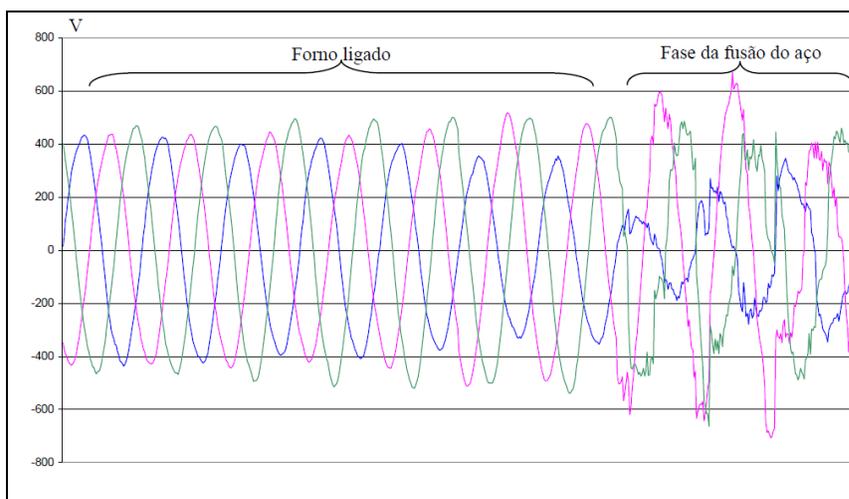


Figura 1 – Forma de onda da tensão de um forno elétrico a arco.

Fonte: Candido (2009)

2 SURGIMENTO DOS FORNOS A ARCO

Segundo Candido (2009) os fornos a arco surgiram no começo do século, mais precisamente no ano de 1904, concebido pelo Francês Paul Louis Toussaint Hérault para fabricação de alumínio. No Brasil os primeiros fornos a arco instalados datam da década de 40 e um considerável crescimento no número de instalações foi notado nos anos 70. Nos últimos anos, os investimentos nessa área se concentram na modernização dos equipamentos existentes, visando maior produtividade e qualidade tanto dos produtos finais como das condições ambientais. Isto se nota na implementação de técnicas como painéis refrigerados, sistemas de exaustão de fumos, técnicas de vazamento sem escória, automação do processo sendo que o destaque consiste no aumento de potência específica.

Segundo artigo publicado pela CPFL (2000) conforme o agravante da crise energética que gerou programas de conservação de energia e de substituição de combustíveis líquidos por energia elétrica ao longo da década de 80, aliado ao avanço tecnológico e as necessidades de produtos metalúrgicos com características de qualidade cada vez mais rigorosas, tanto no âmbito do mercado interno como em nível internacional, levaram ao surgimento e a utilização de equipamentos que se utilizam do aquecimento elétrico de forma crescente.

Estes equipamentos, se de um lado melhoram significativamente a performance destes segmentos industriais, em partida provocam sérios distúrbios ao sistema superior de energia elétrica.

2.1 Princípios de funcionamento dos fornos a arco

Segundo artigo publicado pela CPFL (2000) os fornos a arco funcionam através de ciclos distintos de operações, iniciando como carregamento do forno e subsequente ignição do arco, terminando com acorrida do metal fundido. Este ciclo, carga-fusão-descarga, é repetido várias vezes num processo siderúrgico.

No ciclo de operação do forno a arco, observam-se fases distintas, caracterizando comportamentos diversos do forno em relação ao sistema elétrico. A primeira etapa realizada é com a estrutura superior (tampa) do forno fora de sua posição (abóbada aberta) para que o carregamento de sucata, denominado de primeiro cesto, seja colocado no forno.

Depois disso, dois períodos distintos de operação são destacados: o período de fusão e o período de refino.

O período de fusão ocorre após o fechamento da abóbada, o disjuntor do forno é ligado, energizando o transformador e o sistema hidráulico dos braços mecânicos, inicia-se a descida até que a extremidade dos eletrodos faça contato com a carga, começando os arcos voltaicos, esse processo tem duração aproximada de duas horas, notando-se um subperíodo final de 40 minutos, denominado oxidação.

O período seguinte de refino ou redução tem duração aproximada de uma hora e meia onde as operações metalúrgicas necessárias são feitas nesta etapa, preparando a carga nas características desejadas para o vazamento.

Nos fornos que operam na produção de aço-liga, e que, portanto trabalha com sucata metálica, a fase inicial do ciclo de operação é caracterizada por inúmeros curtos-circuitos entre os eletrodos ocasionados pelos pedaços daquele material, provocando violentas e rápidas variações de carga, geralmente monofásicas e de baixo fator de potência e trazendo como consequência, flutuações de tensão. A frequência de ocorrência destes curtos-circuitos é estimada de 0,5 a 2,0 Hz. Atingindo o processo, a fase de refino ou redução, o metal já atingiu a forma líquida, sendo possível manter uniforme o comprimento do arco nos três eletrodos, mediante o uso de dispositivo de regulação automática.

Esta fase de operação é caracterizada por uma carga trifásica estável, de alto fator de potência.

As características operativas básicas de um forno são baixas tensões e altas correntes, que circulam pelos arcos voltaicos e transferem a energia elétrica para a carga metálica.

3 COMPONENTES DE UM FORNO A ARCO

Conforme Figura 2 podemos observar alguns componentes do forno a arco.

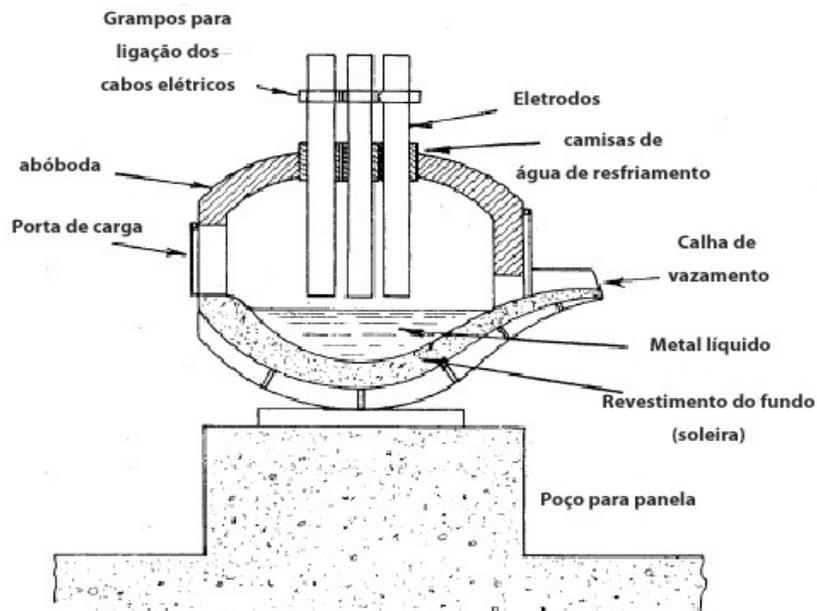


Figura 2 – Forno elétrico a arco trifásico.

Fonte: <<http://b2bgroup.com.br/index.php/2011/07/03>>

3.1 Composição Mecânica

3.1.1 Carcaça

Construída com chapas de aço, contendo revestimentos internos, material isolante térmico e refratário, geralmente toma a forma circular.

3.1.2 Cuba

Parte interna à carcaça. É constituída de um recipiente de aço de grande espessura, isolada termicamente com materiais refratários, a cuba é a parte mais atacada pelo calor do forno, se desgasta rapidamente, é a parte do forno onde se aloja o material a ser fundido bem como os eletrodos.

3.1.3 Eletrodos

Segundo Mamede Filho (1989) os eletrodos são constituídos de um bloco cilíndrico de grafite de comprimento e diâmetro variáveis em função da capacidade do forno.

O uso provoca desgaste dos eletrodos, diminuindo o seu comprimento, o que pode ser compensado através de emendas apropriadas.

Os eletrodos de grafite apresentam uma densidade máxima de corrente da ordem de $40A/cm^2$.

A fim de manter uma determinada distância entre os eletrodos e a carga, estes são movidos individualmente na vertical através de um sistema automático de regulação. Esta distância é necessária para manter um comprimento de arco entre os eletrodos e a carga que resulte uma potência a mais aproximadamente constante durante o ciclo de operação.

3.1.4 Tampa do forno ou abóbada

Geralmente de formato côncavo, é constituída de aço revestido internamente por uma camada de material refratário, tanto a cuba como a tampa normalmente resfriadas através de um sistema de refrigeração cujo meio circulante é água. (Leme, 2011)

3.1.5 Unidade hidráulica

O forno a arco elétrico possui alguns comandos que são acionados hidráulicamente. Quando o forno encontra-se em final de operação com o metal já totalmente derretido é preciso colocar esse metal na panela. Para tal fim, o forno possui um sistema de basculamento. Esse sistema consiste numa inclinação do forno em torno de 91° até 93° para que o metal seja vazado nas “panelas coletoras de metal”. Esse sistema é acionado hidráulicamente. A Unidade Hidráulica é a responsável pelo envio de óleo nos cilindros de basculamento para a execução de determinada função. Outras funções que necessitam da unidade hidráulica é a abertura da abobada para fazer o carregamento do forno com a sucata e a abertura da porta de carga por onde os operadores fazem o acerto do aço líquido para chegar na composição ideal, vindo a jogar por essa porta ferro liga e fazem também a imersão de oxigênio para fazer o controle do carbono. (Leme, 2011)



Figura 3 – Unidade hidráulica

Fonte: Empresa Cruzaço Fundição e Mecânica (2012)

3.1.6 Torre de resfriamento

A Torre de Resfriamento é ligada, assim como a estação de bombeamento, a parte de refrigeração do forno. No processo de refrigeração do equipamento, a água é aquecida, trata-se de um ciclo. Em novo ciclo a água tem de novamente estar em temperatura baixa na qual se terminou o ciclo anterior. A Torre de resfriamento faz exatamente essa função. Entre um ciclo e outro a água que já refrigerou as partes do forno entra na Torre para ser resfriada e novamente entra no ciclo de refrigeração. Existem diversos componentes para monitoração da água de refrigeração. Entre eles estão: termostatos, pressostatos, manômetros e fluxostatos com a finalidade de estarem monitorando o tempo todo, a pressão, temperatura e fluxo da água de refrigeração. (Leme, 2011)



Figura 4 – Torres de resfriamento

Fonte: Empresa Cruzaço Fundição e Mecânica (2012)

3.2 Composição Elétrica

3.2.1 Transformador

Segundo Mamede Filho (1989) este equipamento é de fabricação especial, sendo imerso em óleo mineral e refrigerado a água. Como o transformador do forno alimenta frequentes curto circuitos, no seu projeto tem que se prever os esforços mecânicos resultantes destes curtos. O seu enrolamento secundário tem que ser forte e muito bem preso por braçadeiras especiais. Contrariamente aos transformadores comuns, as bobinas de alta tensão são colocadas próximas do núcleo. O enrolamento primário fica aberto fora do tanque para permitir as mudanças de ligação triângulo ou estrela. Vários tipos de ligação primária são previstos. Um transformador de um forno a arco pode ser exigido em até 130 interrupções por dia, sobrecarregando também o disjuntor. A reatância própria dos transformadores para fornos se situa entre 4% e 6%. Para os transformadores pequenos, isto é, de potência abaixo de 7.500

kVA, há necessidade de se adicionar reatores no forno, para prevenir exageradas correntes de curto-circuito. Em geral pequenos transformadores recebem 30% de reatância adicional.

Dependendo do tamanho e de justificativa econômica, o reator adicional pode ser mantido dentro do próprio tanque do transformador. Nas maiores potências, o reator encontra-se em tanque separado. Quanto às ligações, o reator pode ficar na linha, caso do transformador com o primário em estrela ou ficar nas bobinas primárias, caso do transformador em delta.



Figura 5 – Transformador

Fonte: Empresa Cruzaço Fundição e Mecânica (2012)

3.2.2 Reator

O Reator é instalado em série para ajustar a reatância do sistema às necessidades de estabilização do arco. O reator possui um certo número de derivações de modo que o ajuste é feito por saltos de reatância através do uso de um comutador de derivações que é comandado

a distância pela mesa de controle de operação do forno. Se a necessidade de ajuste é muito frequente, é conveniente o uso de um comutador sob carga.

A queda de tensão no reator deverá ser linear em função da intensidade da corrente. É normal especificar que a linearidade deve ser mantida para, no mínimo, até duas vezes a corrente nominal do transformador de alimentação do forno. Os reatores com núcleo de ferro são mais compactos, têm menores perdas e podem ser instalados junto ao transformador do forno. Os reatores com núcleo de ar são mais volumosos e exigem um espaço grande para sua instalação. Normalmente eles são instalados na intempérie, próximo da subestação do forno ou dentro da subestação principal. Os reatores com núcleo de ar são mais lineares, custam menos, mas possuem perdas maiores e são viáveis onde a comutação pode ser feita com a linha desenergizada.



Figura 6 – Reator

Fonte: Empresa Cruzação Fundição e Mecânica (2012)

3.2.3 Cabos flexíveis

São condutores de cobre anular resfriados a água e fazem a conexão entre as barras fixas, ligadas ao secundário do transformador do forno, e os blocos móveis fixados no braço do porta eletrodo.

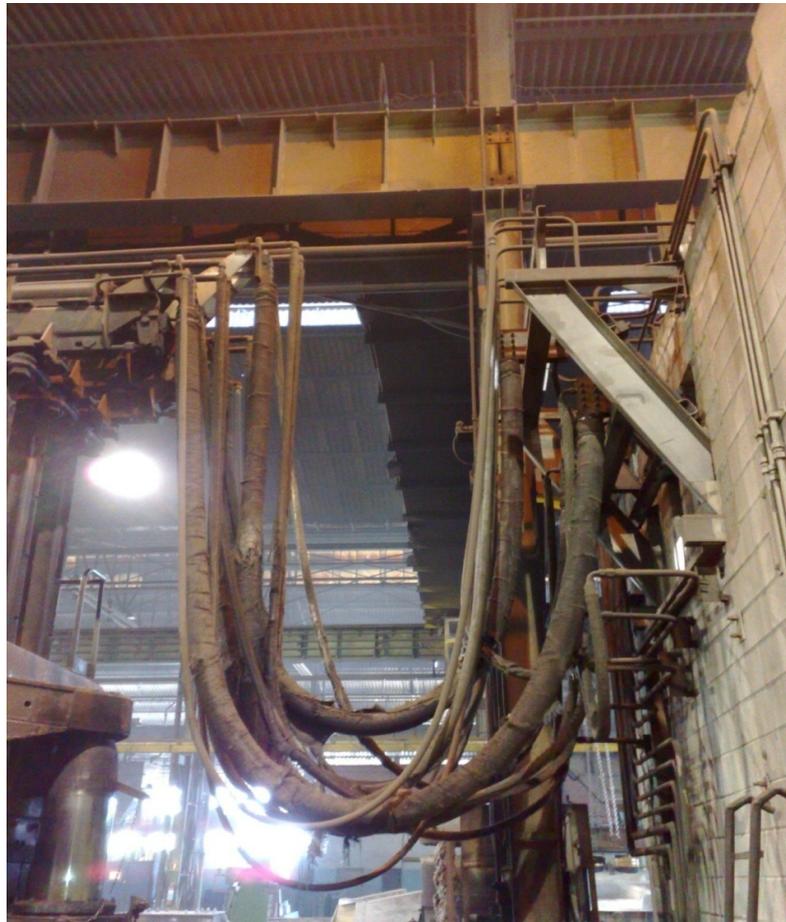


Figura 7 – Cabos flexíveis

Fonte: Empresa Cruzaço Fundição e Mecânica (2012)

3.2.4 Disjuntor do forno

É o equipamento de proteção do transformador do forno. Deve possuir uma elevada capacidade de ruptura. Devido as suas severas condições de operação, os disjuntores de proteção de fornos a arco são normalmente a ar comprimido ou do tipo a vácuo.



Figura 8 – Disjuntor

Fonte: Empresa Cruzaço Fundição e Mecânica (2012)

3.2.5 Painel de comando

Segundo Mamede Filho (1989) o painel de comando inclui todas as funções necessárias para a operação do forno. Possui um comando manual e um automático, independentes, o que assegura maior flexibilidade ao comando dos eletrodos. O controle automático dos eletrodos é feito por meio de acionamentos eletrônicos, de respostas reversíveis e de resposta instantânea, programáveis através de um sinal de referência e de sinal gerado no arco, podendo ser de corrente ou impedância.



Figura 9 – Painel de comando

Fonte: Empresa Cruzeiro Fundição e Mecânica (2012)

3.2.6. Púlpito de Basculamento

O púlpito é uma espécie de “mesa de operação” que geralmente fica próxima à panela, a fim de facilitar a vida do operador. Para que o operador não precise ficar indo até o painel de comando para ligar e desligar o equipamento, o púlpito possui essa função, além da função de parada de emergência. (Leme, 2011)



Figura 10 – Púlpito de basculamento

Fonte: Empresa Cruzaço Fundição e Mecânica (2012)

4 METODOLOGIA

Por se tratar de um trabalho que tem por objetivo abranger de forma teórica o tema escolhido, os métodos utilizados para a montagem deste trabalho consistem em pesquisas teóricas em livros, normas e legislação.

Também faz parte da metodologia adotada para o desenvolvimento deste trabalho, a busca de relatos oficiais com profissionais que de alguma forma tenham envolvimento com o controle da flutuação de tensão causada pelos fornos.

Além dos tópicos já citados, a pesquisa sobre o tema abordado também contemplará a visita a um forno a arco para verificar o seu funcionamento bem como o contato com os componentes que formam o forno desde a entrada da energia elétrica, por parte da concessionária, até o seu fornecimento para a cabine de uso específico do forno.

De forma simples e objetiva, também faz parte do método adotado para a pesquisa do tema escolhido, a busca por novas tecnologias ou tendências de mercado que possam vir a surgir e mudar o cenário atual sobre como controlar ou mitigar a flutuação de tensão.

4.1 Fundamentos Teóricos sobre as Flutuações de Tensão

Conforme Macedo Junior (2009) as flutuações de tensão representam um dos diversos problemas relacionados à qualidade de energia elétrica, conferindo impactos relevantes tanto para pequenos consumidores residenciais quanto para grandes indústrias, dos mais variados tipos de processos. Neste sentido, apresentaremos os fundamentos teóricos relacionados ao fenômeno da flutuação de tensão nas redes elétricas, assim como suas causas, efeitos e soluções.

4.1.1 Conceituação do termo flutuação de tensão

Conceitualmente, as flutuações de tensão podem ser definidas como variações repetitivas, aleatórias ou esporádicas do envelope da onda de tensão, geralmente provocadas pela operação de cargas com características de alterações rápidas e bruscas nas magnitudes das potências ativa e reativa como, por exemplo, verificado nos fornos a arco. As flutuações de tensão, de uma maneira geral, estão mais fortemente relacionadas à variações bruscas e rápidas na amplitude da componente de potência reativa.

O conceito de flutuação de tensão é comumente confundido com outros tipos de variações na magnitude da tensão de suprimento, notadamente com as variações de tensão em longa duração. Assim, tem-se que as variações de tensão de longa duração são aquelas para as quais os elementos de regulação comumente presentes nas redes de energia elétrica como, por exemplo, reguladores de tensão, bancos de capacitores automáticos e tapes automáticos de transformadores, conseguem facilmente promover sua estabilização em valores aceitáveis. Isto se deve ao fato de que os tempos envolvidos nestas variações de tensão são relativamente grandes e, portanto, compatíveis com o tempo de resposta dos equipamentos mencionados. Por outro lado, as flutuações de tensão são caracterizadas por variações rápidas (da ordem de ciclos de duração), repetitivas ou aleatórias, da envoltória da onda de tensão, não sendo possível sua estabilização através dos equipamentos de regulação tipicamente encontrados nas redes elétricas. A figura 11 ilustra um exemplo de flutuação senoidal da onda de tensão, com detalhamento do envelope de modulação. Na prática o comportamento do envelope de modulação é totalmente aleatório em termos de frequência e amplitude de modulação.

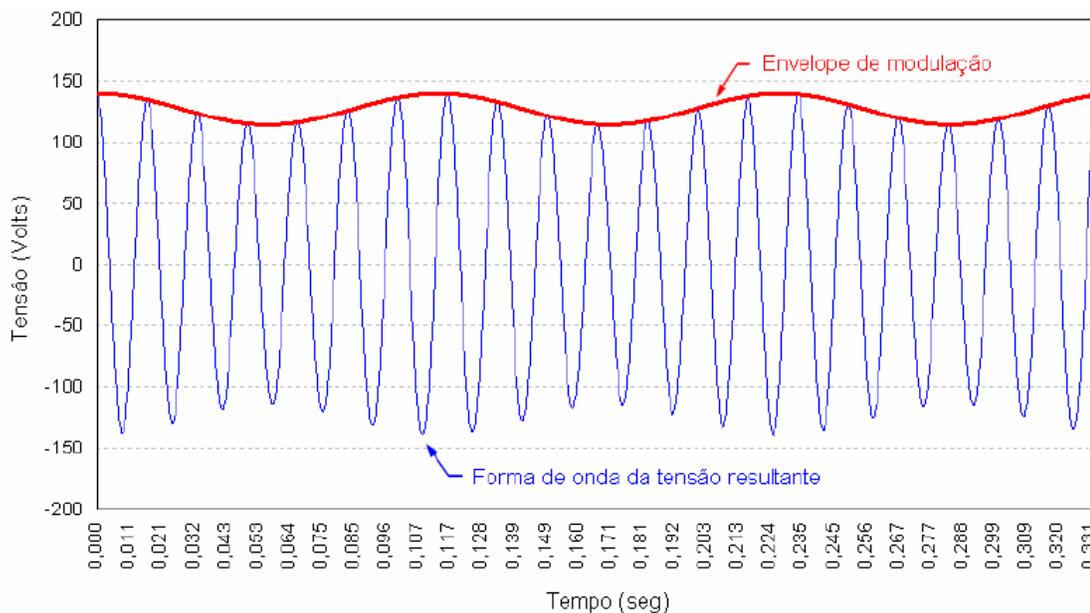


Figura 11 – Forma de onda do sinal resultante

Fonte: Macedo Junior (2009)

Até muito recentemente, as flutuações de tensão eram associadas à operação de cargas com características de alterações rápidas e bruscas nas magnitudes das potências ativa e, principalmente, reativa. Contudo, a partir do início do século XXI, o fenômeno da flutuação de tensão começou a ser analisado sob um novo enfoque, notadamente no que diz respeito à presença de componentes inter-harmônicas nos sinais de tensão das redes de energia elétrica. Neste sentido, um novo conceito mais amplo e abrangente para o fenômeno da flutuação de tensão é sugerido conforme a seguir.

“As flutuações de tensão são variações repetitivas, aleatórias ou esporádicas do valor eficaz da tensão de fornecimento, provocadas pela operação de cargas capazes de produzir componentes de frequências inter-harmônicas nos sinais de tensão das redes de energia elétrica.”

A presença de componentes inter-harmônicas nos sinais de tensão das redes elétricas está associada à operação de cargas que operam com frequência de chaveamento estático (comumente associadas a elementos de eletrônica de potência) de forma não sincronizada com a frequência fundamental do sistema, como, por exemplo, verificado nos ciclo conversores e demais equipamentos constituídos por sistemas de dupla conversão (CA-CC para CC-CA). Nestes casos, a flutuação do sinal de tensão ocorre em função da superposição

de um determinado conteúdo espectral ao sinal na frequência fundamental. Comumente, o termo flutuação de tensão e cintilação luminosa (*Flicker*) são utilizados como representativos de um mesmo fenômeno. Contudo, existe uma diferença importante entre as duas terminologias. Assim, o fato de um determinado sinal de tensão apresentar flutuação não significa necessariamente que tal flutuação resulte em uma cintilação luminosa visível para maioria dos observadores. Na verdade, o fenômeno da cintilação luminosa deve ser considerado como sendo apenas um dos vários efeitos relacionados com as flutuações de tensão, conforme será mostrado mais adiante. A Norma Europeia IEC 60555-3 define quatro tipos de flutuações de tensão. Estas definições visam a facilitar a aplicação de metodologias de análise diversas, assim como a realização de ensaios laboratoriais de conformidade em equipamentos e dispositivos em geral. Os tipos de flutuações de tensão assim definidos são mostrados abaixo.

Tipo A – São flutuações compostas por uma série repetitiva de variações retangulares em torno de um nível de tensão de referência. Um período, ou ciclo, é composto por duas variações em sentidos opostos. As variáveis, neste caso, são a amplitude e a frequência das variações, uma vez que sua forma (retangular) é perfeitamente definida. Este é o tipo padrão de flutuação usado para calibração de *Flickermeters*.

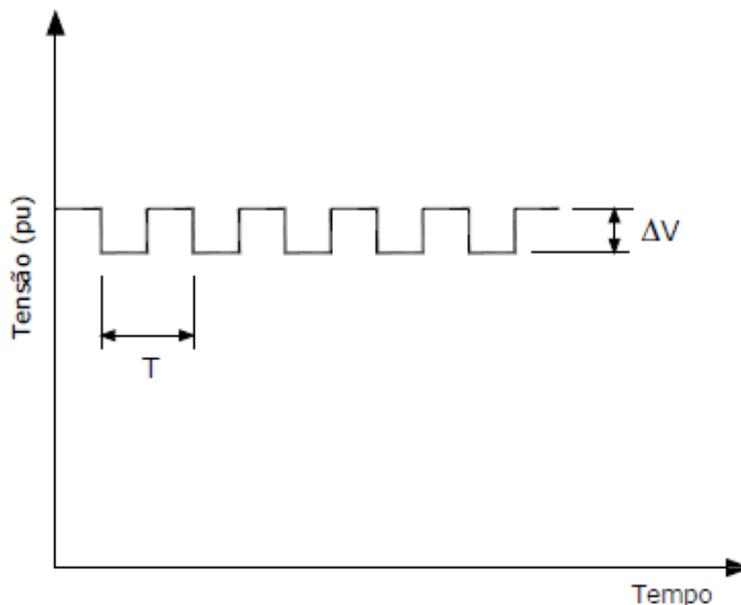


Figura 12 – Flutuação de Tensão Tipo A

Fonte: Macedo Junior (2009)

Tipo B – São flutuações compostas por uma série irregular de variações bruscas. Neste caso, não se define um ciclo ou período para as variações. Esse tipo de flutuação permite representar degraus sucessivos, decrescentes ou crescentes de tensão, simulando entrada ou saída de cargas com características de operação por etapas, como elevadores, laminadores, prensas, etc.

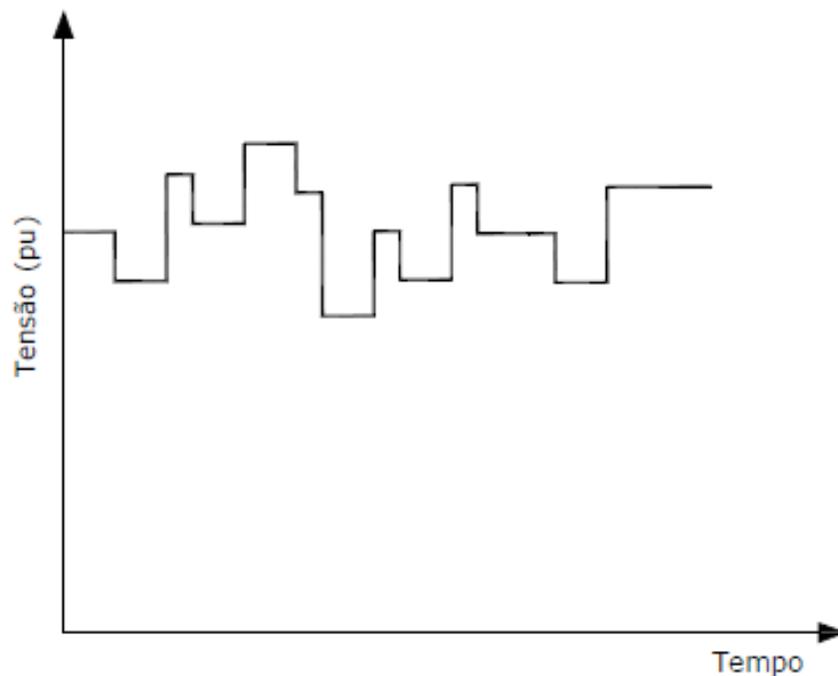


Figura 13 – Flutuação de Tensão Tipo B

Fonte: Macedo Junior (2009)

Tipo C – São flutuações compostas por uma série irregular de variações de formas diversas. Neste caso, não se define a forma nem tampouco o período da variação. A qual pode ser brusca (retangular), em rampa (triangular) ou oscilatória (senoidal). Este tipo de flutuação permite combinar diferentes tipos de cargas, tais como motores, prensas, compressores, bombas, elevadores, etc.

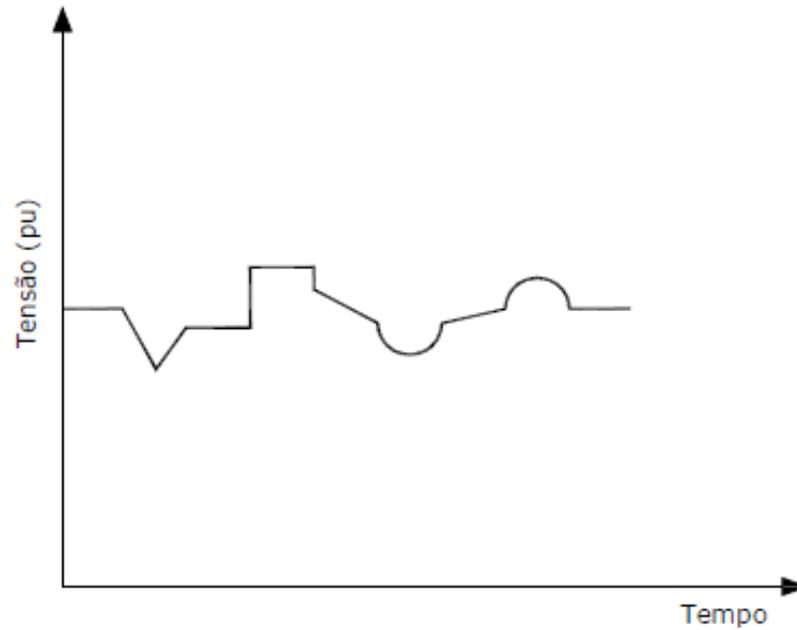


Figura 14 – Flutuação de Tensão Tipo C

Fonte: Macedo Junior (2009)

Tipo D - São flutuações compostas por variações contínuas e aleatórias. É o caso típico de flutuações de tensão provocadas por equipamentos que operam com correntes de arco elétrico como, por exemplo, fornos a arco e máquinas de solda a ponto. No caso da operação de grandes fornos a arco (com potências de até 120 MW), o impacto das flutuações de tensão pode alcançar o sistema de transmissão, propagando-se para os sistemas de sub-transmissão e distribuição.

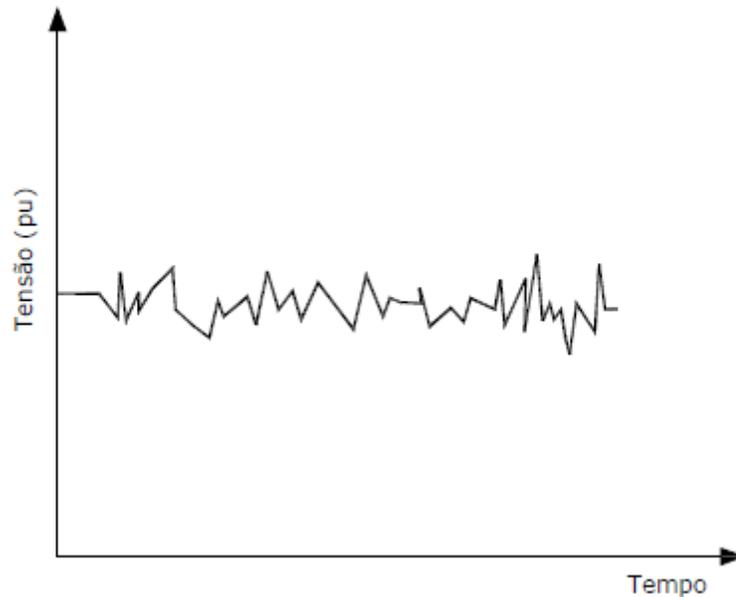


Figura 15 – Flutuação de Tensão Tipo D

Fonte: Macedo Junior (2009)

4.1.2 Origem das flutuações de tensão nos sistemas elétricos

De acordo com a conceituação sugerida no tópico anterior, as flutuações de tensão nos sistemas elétricos podem ser originadas de duas formas distintas:

1º Através da operação de cargas com características de alterações rápidas e bruscas nas magnitudes das potências ativa como, por exemplo, verificado nos fornos elétricos a arco.

2º Através da superposição de componentes inter-harmônicas ao sinal de tensão na frequência fundamental, comumente geradas por ciclo conversores e demais de dupla conversão.

O surgimento do fenômeno da flutuação de tensão em função da operação de cargas relacionadas com alterações rápidas e bruscas nas amplitudes da potência requerida merece um maior detalhamento. Assim, para esse propósito, considera-se o modelo simplificado representativo da conexão de uma carga com características de flutuação das potências ativa e reativa, conforme indicado na figura 16 (a).

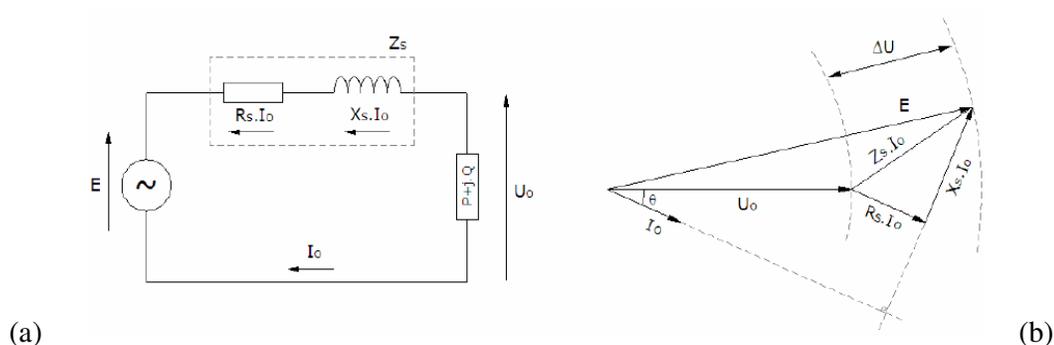


Figura 16 – (a) Diagrama simplificado da ligação da carga e (b) diagrama fasorial

Fonte: Macedo Junior (2009)

As equações 1 e 2 representam a forma algébrica de representação da queda de tensão percentual em função da corrente de operação da carga flutuante conectada ao circuito. A referida queda de tensão (ΔU) é também apresentada em forma de diagrama fasorial, conforme indicado na figura 16 (b).

$$\Delta U = R_s \cdot I_0 \cdot \cos\theta + X_s \cdot I_0 \cdot \sin\theta \quad (1)$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = R_s \cdot \frac{P}{U_0^2} + X_s \cdot \frac{Q}{U_0^2} \quad (2)$$

Em que:

ΔU = Queda de tensão;

U_0 = Tensão de fornecimento nos terminais da carga;

θ = Ângulo de deslocamento entre a tensão e a corrente;

R_s, X_s = Resistência e reatância equivalente do sistema;

P, Q = Potência ativa e reativa da carga;

I_0 = Corrente de Carga;

Em termos práticos, notadamente para os sistemas de média e alta tensão, a reatância equivalente do sistema é muito superior à magnitude de sua resistência equivalente, ou seja, $X_s \gg R_s$. Adicionalmente, em condições normais de operação, tem-se $U_0 = E$ (pu). Dessa forma, a equação 2 pode ser simplificada conforme a seguir.

$$\frac{\Delta U}{E} = X_s \frac{Q}{E^2} \text{ ou } \frac{\Delta U}{E} = \frac{Q}{S_{cc}} \quad (3)$$

Em que:

E = Tensão de suprimento;

ΔU = Queda de tensão;

X_s = Reatância equivalente do sistema;

P, Q = Potências ativa e reativa da carga;

S_{cc} = Potência de curto-circuito nos terminais de carga.

A equação 3 demonstra que as amplitudes das variações e flutuações de tensão estão fortemente relacionadas à variação da componente reativa das cargas flutuantes.

Dependendo da causa associada à variação de tensão, o valor de ΔU pode assumir a forma de uma queda de tensão constante ao longo do tempo como, por exemplo, verificado durante o período de refino dos fornos a arco direto. Adicionalmente, o valor de ΔU pode assumir a forma de uma flutuação de tensão com variações repetitivas, esporádicas ou aleatórias em uma amplitude ao longo do tempo. Os efeitos para estes dois tipos de comportamento de ΔU são bastante distintos, sendo aqueles associados às flutuações de tensão os mais impactantes para os sistemas elétricos de uma forma geral. Para efeito de ilustração a 17 mostra a flutuação de tensão em um barramento de 380 volts, obtida através de uma medição real dentro das instalações de uma indústria possuidora de um forno a arco de 44MW.

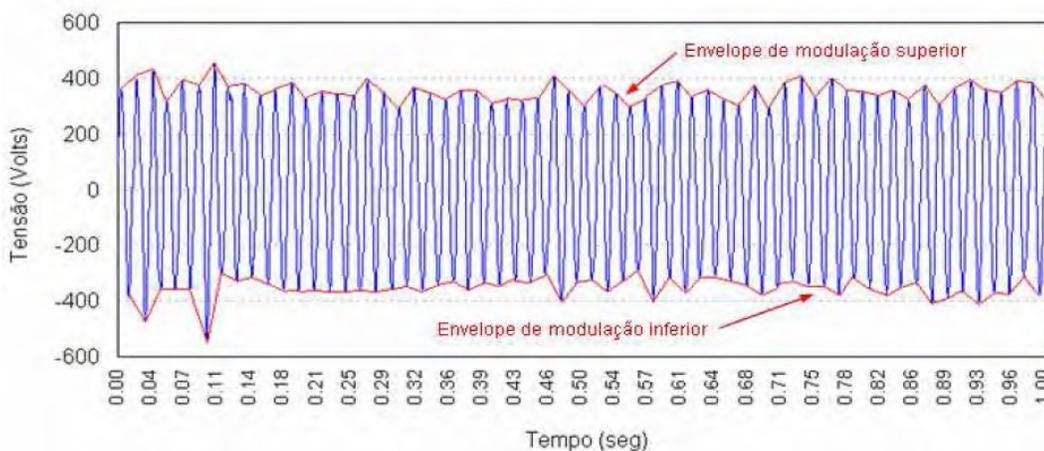


Figura 17 – Janela de medição de tensão em um barramento de 380 volts

Fonte: Macedo Junior (2009)

Vale observar que no caso mostrado na figura 17, os envelopes de tensão superior e inferior são totalmente distintos, sendo este um aspecto típico da operação de fornos a arco direto, notadamente nos primeiros minutos do período de fusão.

4.1.3 Efeitos associados às flutuações de tensão nos sistemas elétricos

De uma maneira geral, as flutuações de tensão podem causar uma série de efeitos indesejáveis nas redes elétricas, ocasionando falhas e interrupção de processos. Todos os efeitos relacionados às flutuações de tensão podem provocar perdas financeiras, em maior ou menor intensidade, seja através do comportamento dos processos de produção, seja pelo aumento dos custos de manutenção ou perda de material.

Apesar dos diversos efeitos que podem ser associados às flutuações de tensão nas redes elétricas, o efeito denominado cintilação luminosa, ou *Flicker*, é o mais conhecido. Inclusive, e principalmente no Brasil, o termo flutuação de tensão é comumente confundido com o fenômeno da cintilação luminosa. Contudo, vale ressaltar que o efeito visual das flutuações de tensão compõe apenas um dos diversos efeitos relacionados à flutuação da amplitude da onda de tensão. São apresentados a seguir os principais efeitos associados às flutuações de tensão nos sistemas de energia elétrica.

4.1.3.1 Efeitos em máquinas elétricas

As flutuações de tensão nos terminais de um motor de indução, principalmente com frequências situadas entre 0,2 e 2,0 Hz, podem, muito raramente, causar oscilações eletromecânicas, com conseqüentes variações no torque e no escorregamento da máquina, afetando o processo de produção ao qual em questão se destina. Nos casos mais severos, podem surgir vibrações excessivas, resultando em uma fadiga mecânica do motor e a redução de sua vida útil.

4.1.3.2 Efeitos em retificadores e inversores

Os efeitos mais comuns das flutuações de tensão em retificadores e inversores de frequência estão relacionados com a geração de harmônicas não características, assim como a geração de componentes de frequências inter-harmônicas. No pior caso, a existência de flutuações de tensão nos terminais destes equipamentos pode resultar desde falhas de comutação até perda total dos mesmos.

4.1.3.3 Efeitos em equipamentos de aquecimento

Na presença de níveis consideráveis de flutuações de tensão, a eficiência de todos os equipamentos de aquecimento como, estufas, fornos a arco e fornos a indução, reduz-se significativamente. Em função destes problemas, estes equipamentos podem requerer tempos maiores para cada ciclo de operação, aumentando-se os custos envolvidos em cada processo.

De maneira geral, as flutuações de tensão e as componentes de tensão inter-harmônicas estão fortemente relacionadas, de modo que todos os efeitos associados às componentes de frequência inter-harmônicas estão também associados às flutuações de tensão nos sistemas elétricos. Assim, entre outros efeitos das flutuações de tensão.

- Falhas de sensores e equipamentos de comando elétrico que operam através da identificação da passagem por zero ou de pico dos valores instantâneos da tensão e/ou corrente elétrica.
- Aquecimento adicional em máquinas e condutores devido ao incremento de parcelas de perdas joulicas;
- Saturação de transformadores de corrente;
- Interferência em sistemas de telecomunicação;
- Incremento de vibrações mecânicas e ruídos audíveis;
- Cintilação luminosa, ou *Flicker*.

O efeito da cintilação luminosa (*Flicker*), em função talvez de sua percepção direta por parte da maioria dos observadores humanos, é o mais discutido e analisado mundialmente, tendo sido este o objeto de vários trabalhos técnicos ao longo dos anos. A própria

metodologia de quantificação de flutuações de tensão, atualmente utilizada em vários países do mundo, é baseada substancialmente neste particular efeito do fenômeno da flutuação de tensão.

4.1.4 Métodos de atenuação das flutuações de tensão

Existem diversas formas de mitigação dos principais problemas causadas pelas flutuações de tensão nos sistemas elétricos de potência. A escolha da melhor solução, para uma determinada instalação elétrica, depende essencialmente do tipo do efeito associado, o qual por sua vez pode possuir ainda várias particularidades. O custo da solução é um fator de análise primordial, podendo, em muitas das vezes, representar uma parcela significativa do investimento realizado em toda a planta elétrica. Por esse motivo, a análise do problema da flutuação de tensão deve ser realizada ainda durante a fase de planejamento das instalações. As análises custo versus benefício do empreendimento deverão incorporar os custos associados à mitigação das flutuações de tensão.

Em termos práticos, a solução para mitigação das flutuações de tensão deve ser buscada dentro das próprias plantas industriais, de onde se originam tais perturbações. Para os casos em que o problema da flutuação de tensão não tenha uma origem muito bem identificada, a mitigação da anomalia poderá ser realizada pela concessionária de energia elétrica local, de distribuição ou transmissão, sendo os custos associados repassados diretamente para as tarifas de energia elétrica. Contudo, se a origem das flutuações for seguramente identificada, a solução para o problema deverá ser implementada nas próprias instalações da carga comprovadamente perturbadora. Isto não impede, entretanto, que a mesma, sendo então os custos associados repassados diretamente ao consumidor industrial responsável pelas perturbações. Neste caso, o novo ativo incorporado ao sistema da concessionária não deverá ser remunerada para efeito de tarifa, assim como não deverá ser depreciado.

A seguir são apresentadas as principais formas de mitigação da flutuação de tensão nos sistemas elétricos, considerando-se a origem do problema associado a operação de cargas com potência variável como fornos a arco.

4.1.4.1 Elevação do nível de curto-circuito

O nível de curto-circuito em um determinado barramento elétrico é um indicador natural da proximidade elétrica dos geradores de energia ou, em outros termos, da robustez do sistema elétrico. Considerando-se o equacionamento segundo o qual resultou a equação 4, repetida abaixo por comodidade pode-se facilmente verificar que com o aumento dos níveis de curto-circuito (S_{cc}), a amplitude das variações de tensão diminui na mesma proporção.

$$\frac{\Delta U}{E} = \frac{Q}{S_{cc}} \quad (4)$$

Em que:

$\Delta U/E$ = Amplitude da variação/flutuação da tensão de fornecimento nos terminais de carga;

Q = Potência reativa da carga;

S_{cc} = potência de curto-circuito nos terminais da carga.

Aumentando-se o nível de curto-circuito nos terminais da carga ocorre uma diminuição da variação/flutuação de tensão, para uma mesma amplitude de variação de carga. Nesse sentido, têm-se as seguintes alternativas para elevação dos níveis de curto-circuito nos terminais da carga.

- Recondutoramento dos condutores do circuito de alimentação da planta industrial, de forma a reduzir a impedância série do circuito, elevando-se os níveis de curto-circuito;
- Elevação dos níveis de tensão de fornecimento, reduzindo-se a corrente de linha;
- Implementação de sistema de compensação série no circuito de alimentação da planta industrial, de forma a reduzir a impedância série do circuito, elevando-se os níveis de curto-circuito;
- Duplicação do circuito de alimentação da planta reduzindo-se a impedância série do mesmo e elevando-se o nível de curto-circuito;
- Instalação de compensador síncrono.

As soluções apresentadas acima possuem custos envolvidos substancialmente elevados. No caso específico da implementação de um sistema de compensação série, cuidados especiais devem ser tomados com o intuito de não se possibilitar a ocorrência de

ressonância série no sistema, o que poderia excitar frequências de oscilação subsíncronas em equipamentos rotativos, com possíveis danos aos mesmos.

4.1.4.2 Instalação de compensadores série

Considerando que o sistema de alimentação do forno seja representado por uma reatância indutiva ao se instalar um banco de capacitores com uma determinada reatância capacitiva em série com o referido sistema, a reatância resultante é sensivelmente reduzida, diminuindo os efeitos da queda de tensão provocada pelas elevadas correntes provenientes da operação do forno, principalmente no ciclo de fusão.

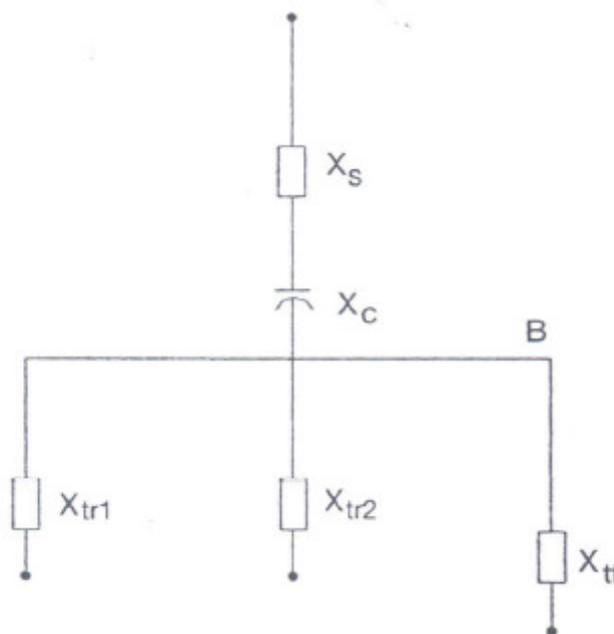


Figura 18 – Diagrama de impedância

Fonte: Mamede Filho (1989)

Observando-se o esquema elétrico da figura 18, pode-se concluir que:

$$X_r = X_s - X_c \quad (5)$$

X_r - reatância resultante do sistema de alimentação, em pu/fase;

X_s - reatância própria do sistema de alimentação, em pu/fase;

X_c - reatância do banco de capacitores, em pu/fase.

Deve-se alertar que a instalação de capacitores em derivação não é adequada para a correção de flutuação de tensão, devido à operação de fornos a arco. O seu efeito sobre o sistema pode até agravar as flutuações de tensão, pois a queda de tensão nos terminais do capacitor devido à operação do forno resulta um menor fornecimento de reativos por parte deste, devendo a fonte suprir a parcela restante, deste modo, uma maior queda de tensão no sistema.

A determinação do valor do banco de capacitores série pode ser feita através da equação

$$P_{ca} = \frac{3 X_c I_{ca}^2}{1.000} (kVA) \quad (6)$$

X_c - reatância capacitiva em Ω /fase;

I_{ca} - corrente que circula no banco de capacitores, em A.

A instalação de capacitores série resulta um aumento considerável da potência de curto-circuito do sistema. No entanto, a sua utilização tem sido muito limitada devido à ocorrência de sobretensões em transformadores e motores de indução de correntes do fenômeno conhecido como ressonância série, quando o valor de reatância capacitiva torna-se igual ao valor de reatância indutiva, ficando a corrente do circuito limitada somente pela sua resistência.

4.1.4.3 Instalação de compensador síncrono

A instalação de um compensador síncrono rotativo como solução para atenuar flutuações de tensão se prende ao fato de que as quedas de tensão produzidas na rede, pela operação do forno a arco, são consequência das oscilações de corrente reativa absorvida pelo referido forno e que, nestas condições, o compensador síncrono fornece uma parcela da potência reativa, enquanto a rede de suprimento fornece a parcela restante do total dos reativos absorvidos pelo forno.

A resposta do compensador síncrono às flutuações de tensão é considerada no regime de operação transitória da máquina rotativa. Desta forma, no diagrama de impedâncias o valor considerado para representar o compensador síncrono é o da reatância transitória que pode ser

tomado como um valor médio aceitável igual a 0,5 pu na base da potência nominal da máquina.

A potência nominal do compensador síncrono é baseada na máxima potência reativa que o mesmo pode fornecer à barra do forno. Esta potência reativa é estimada na ordem de 5 a 10% superior à potência reativa absorvida pelo forno, isto é:

$$P_{nc} = (1,05 \text{ a } 1,10) \times P_{vf} \text{ (kVA)} \quad (7)$$

P_{nc} - potência nominal do compensador síncrono rotativo, em kVA;

P_{vf} - potência reativa média absorvida pelo forno, em kVA.

A queda de tensão percentual na barra do forno após a instalação do compensador síncrono pode ser dada pela equação.

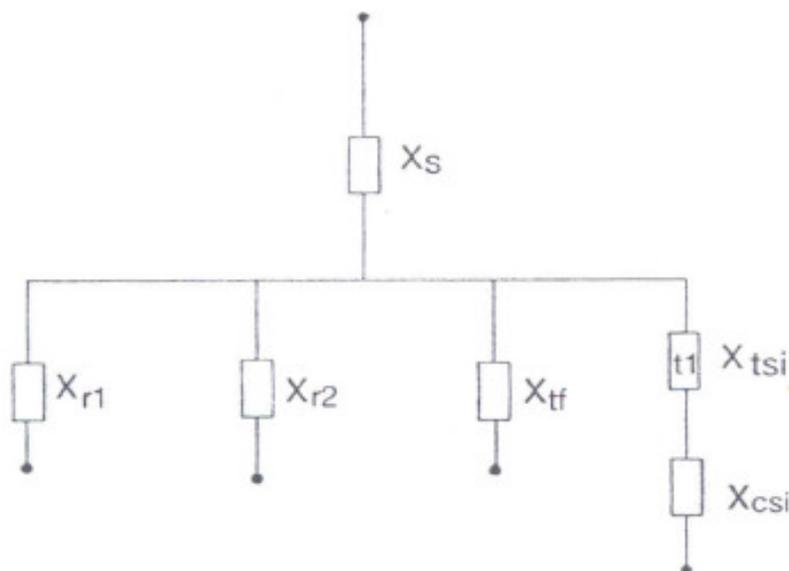


Figura 19 – Diagrama de impedância

Fonte: Mamede Filho (1989)

$$\Delta V\% = \frac{100 \times \frac{X_{us}}{X_{tf}}}{1 + \left(\frac{X_{ur}}{X_{tf}}\right) + \left(1 + \frac{X_{tf}}{X_{tc}}\right)} \text{ (\%)} \quad (8)$$

X_{TF} - reatância do forno e do transformador do forno, em pu;

X_{CC} - reatância do circuito do compensador síncrono que compreende a do transformador mais a da máquina, em pu;

X_{US} - reatância indutiva do circuito de alimentação, em pu.

A instalação de compensadores síncronos permite a elevação do nível de curto-circuito no sistema de alimentação. Medições efetuadas com fornos a arco utilizando compensadores síncronos demonstraram que o *Flicker* foi reduzido em até 30%.

Algumas desvantagens podem ser atribuídas à instalação de compensadores síncronos:

- Contribui com as correntes de curto-circuito, quando da ocorrência de um defeito no sistema de suprimento;
- Responde com lentidão às flutuações de tensão;
- Preço de aquisição e custo de instalação geralmente elevados

4.1.4.4 Instalação de compensadores e autocomutados

Além das soluções já apresentadas, as quais promovem a elevação direta dos níveis de curto-circuito nos terminais da carga, existem ainda métodos modernos de mitigação das flutuações de tensão, baseados em compensadores estáticos com excelentes tempos de resposta. Dentre os principais compensadores estáticos, podem-se citar:

- Capacitor chaveado a tiristores (CCT);
- Reator controlado a tiristores (RCT);
- Soluções mistas (RCT + CCT);
- Compensador autocomutado (STATCOM)

O capacitor chaveado a tiristores tem sido usado principalmente por sua capacidade de também corrigir o fator de potência das instalações. Para o caso de instalações com fornos a arco o fator de potência associado é geralmente baixo, da ordem de 70 e 80% indutivos. Apesar de rápido, quando comparado aos equipamentos tradicionais de regulação de tensão, o CCT possui uma limitação na rapidez de resposta necessária para limitar a transitória de chaveamento de capacitores sob tensão variável. Como a corrente solicitada pelo capacitor é proporcional à taxa de variação da tensão, o chaveamento do capacitor somente deverá ocorrer quando a tensão da rede elétrica for próxima da tensão pré-carga do capacitor. Isto

significa que ao ser desligado da rede, o capacitor somente poderá ser religado quando a tensão passar pelo mesmo valor, no ciclo seguinte. Apesar disto, em contrapartida, a entrada em operação do capacitor ocorrerá de forma suave, sem transitórios. A figura 20(a) ilustra um esquema de instalação do CCT.

Os circuitos mostrados na figura 20 compreendem apenas uma fase dos equipamentos e não consideram os filtros passivos, geralmente necessários para filtragem das harmônicas de corrente geradas pelo chaveamento dos tiristores.

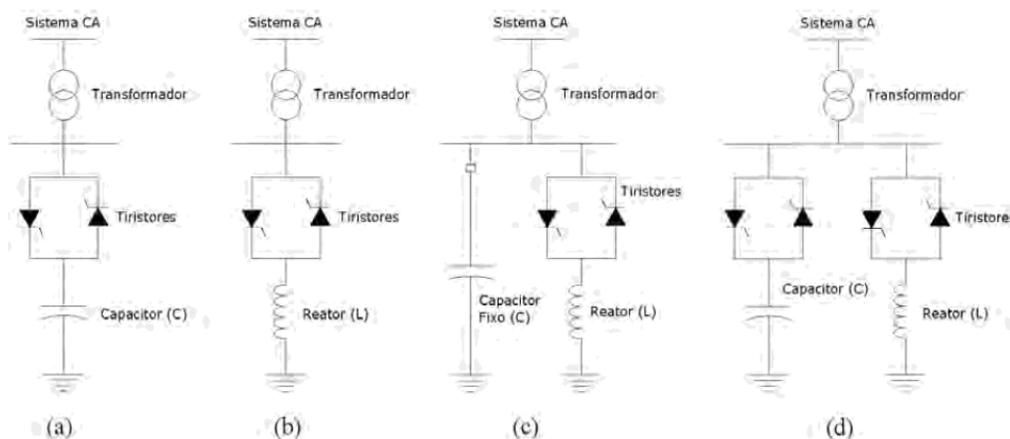


Figura 20 -- (a) Capacitor chaveado a tiristores, (b) reator controlado a tiristores, (c) reator controlado a tiristores com capacitor fixo, (d) solução mista CCT + RCT

Fonte: Macedo Junior (2009)

O reator controlado a tiristores, mostrados na figura 20 (b) e 20 (c), por sua vez, permite tempos de resposta menores que aqueles possíveis com a utilização do CCT, que lhe confere uma capacidade maior de compensar as flutuações rápidas da carga. No entanto, por produzir descontinuidade de condução de corrente, introduz no sistema elétrico harmônicas características, que viriam em amplitude com o ângulo de disparo dos tiristores. Como consequência direta, o RTC requer a utilização de filtros sintonizados passivos, ou então de configurações físicas com maior número de tiristores (pontes de 12 ou 24 pulsos) de forma a reduzir o impacto das geradas, elevando-se sobremaneira os custos da solução.

De forma a compensar as desvantagens apresentadas tanto pelo CCT quanto pelo RCT, é comum a utilização de soluções mistas, como a indicada na figura 20 (d), consistindo na combinação das compensações série e paralela.

Comparados ao RCT e ao CCT, os modernos compensadores de reativos autocomutados (STATCOM), por sua vez, apresentam algumas vantagens, a saber.

- Podem fornecer potência reativa variável, possibilitando uma economia considerável em capacitores e reatores. Isso por sua vez reduz a possibilidade de ressonâncias em algumas condições críticas de operação;
- Como a resposta do conversor autocomutado pode ser mais rápida que o ciclo da rede de alimentação, a potência reativa pode ser contínua e precisamente controlada;
- As altas frequências de modulação do conversor autocomutado resultam em um baixo conteúdo harmônico na corrente de entrada, reduzindo assim o tamanho dos componentes de filtragem;
- Não geram corrente de partida;
- O desempenho dinâmico sob variações de tensão e transitórios é melhor;
- Compensadores de reativos autocomutados são capazes de gerar 1,0 pu de corrente reativa mesmo quando as tensões de linha são de baixa amplitude. Esta habilidade para dar suporte ao sistema de potência é melhor do que o obtido com capacitores reativos controlados a tiristor, uma vez que a corrente em capacitores e reatores paralelos é proporcional ao quadrado do nível de tensão;
- Compensadores autocomutados com controle apropriado podem também atuar como filtros de linha ativos, restauradores dinâmicos de tensão, ou controladores unificados de fluxo de potência.

A figura 21 ilustra a representação unifilar simplificada de um STATCOM.

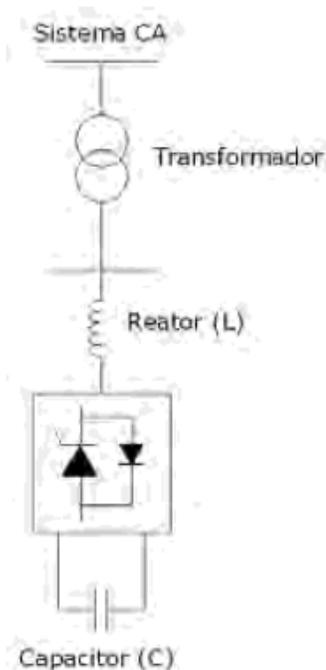


Figura 21 – Representação unifilar simplificada do STATCOM.

Fonte: Macedo Junior (2009)

4.1.4.5 Instalação de reatores a núcleo saturado

Os reatores a núcleo saturado compreendem uma solução muito utilizada no passado para atenuação das flutuações e variações de tensão em função da operação de cargas variantes no tempo. Este equipamento é um dispositivo eletromagnético, dimensionado de forma a operar na região de saturação magnética do núcleo, e conectado em paralelo com a carga variável. Devido à característica *V versus I* do reator saturado ser quase plana na região de saturação, como indicado na figura 22, este equipamento pode acomodar grandes variações de carga (corrente) resultando em pequenas variações de tensão. Assim, o reator saturado absorve as variações de potência reativa da carga e, ao mesmo tempo, confere uma boa regulação de tensão nos terminais de conexão. Como essa ação reguladora é intrínseca, não requerendo nenhuma malha de controle adicional, diz-se que o reator a núcleo saturado possui capacidade de auto-regulação de tensão.

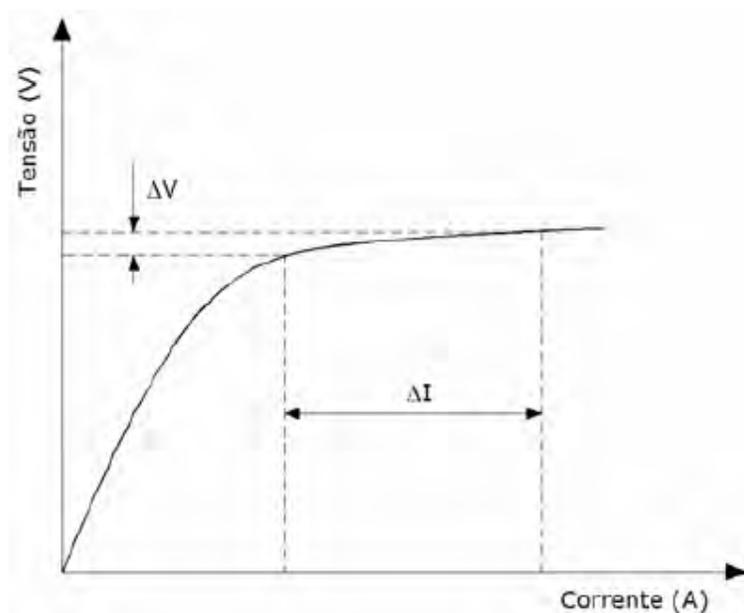


Figura 22 – Característica *V versus I* do reator a núcleo saturado

Fonte: Macedo Junior (2009)

Existem ainda algumas desvantagens que comprometem a relação custo x benefício deste tipo de solução, como:

- Perda ferromagnéticas elevadas devido à operação do núcleo sob saturação, gerando problemas de aquecimento;
- Geração de ruídos audíveis;
- Geração de harmônicas de corrente devido a não linearidade da característica *V versus I* do material ferromagnético do núcleo do reator;
- Baixo fator de potência, quando da não instalação de capacitores fixos.

5 RESULTADOS

O quadro 1 apresenta um resumo das vantagens e desvantagens relacionadas aos principais métodos de atenuação das flutuações de tensão:

Solução Adotada	Vantagens	Desvantagens
Aumento do nível de curto-circuito através do recondutoramento do circuito alimentador	Prática convencional, com baixo nível de complexidade técnica.	Custos elevados dos condutores. Solução restrita à capacidade física de aumento da bitola dos condutores. Eventualmente, podem ser necessárias novas estruturas de transmissão/distribuição.
Aumento do nível de curto-circuito através da duplicação do circuito alimentador	Prática convencional, com baixo nível de complexidade técnica.	Custos elevados dos condutores. Solução restrita à capacidade física de aumento da duplicação dos condutores. Custos adicionais com a duplicação das torres, quando for o caso.
Elevação do nível de tensão	Prática convencional, com baixo nível de complexidade técnica.	Custos elevados para o aumento do nível base de isolamento. Custos com novos transformadores, quando não for possível a simples alteração de tapes. Grande número de desligamentos programados para execução das alterações.
Compensação série	Ação eficaz e aumento da capacidade de transmissão.	Risco de ressonância subsíncrona. Custos elevados.
Compensador síncrono	Aumenta a autonomia.	Ruído audível e vibrações mecânicas. Necessita de manutenções constantes. Possui capacidade limitada para redução de flutuações de tensão.
Capacitor Chaveado a Tiristores (CCT)	Não produz harmônicas, chaveamentos suaves e sem transitórios, corrige o fator de potência.	Resposta lenta e risco de ressonância. Custo elevado do equipamento, sobretudo do sistema de controle.
Reator Controlado a Tiristores (RCT)	Rapidez de resposta e precisão.	Geração de correntes harmônicas, necessidade de filtros passivos e custo elevado do equipamento.
STATCOM	Tempo de resposta mais rápido e uma melhor estabilidade a variações nas impedâncias do sistema.	Custos elevados.
Reator a núcleo saturado	Ação automática. Auto-regulação da tensão. Custo reduzido em função, sobretudo, da não necessidade de ambiente climatizado para operação.	Perdas adicionais, ruído audível, geração de correntes harmônicas e baixo fator de potência.

Quadro 1 – Resumo das vantagens e desvantagens relacionadas aos principais métodos de atenuação de flutuações de tensão

Fonte: Macedo Junior (2009)

6 CONCLUSÃO

Apresentamos os fundamentos teóricos associados às flutuações de tensão nas redes de energia elétrica, partindo-se de sua conceituação, ocasião na qual foi proposta uma nova definição para o fenômeno das flutuações de tensão.

Na sequência, foram apresentadas as origens das flutuações de tensão nos sistemas elétricos, assim como as principais cargas envolvidas. Os efeitos decorrentes da presença de flutuações de tensão nas redes elétricas também foram considerados. Por fim, foram também apresentadas as principais formas de mitigação do fenômeno, seja através de soluções técnicas convencionais, seja através de soluções modernas envolvendo compensadores estáticos de potência, como o capacitor chaveado a tiristores (CCT), o reator controlado a tiristores (RCT) e o STATCOM.

Verificou-se que a flutuação de tensão “atualmente” não pode ser totalmente controlada, por se tratar de cargas pesadas com características de alterações rápidas e bruscas, tornando o controle total desse fenômeno muito difícil.

Com base em todos os métodos apresentados podemos verificar que o STATCOM é o método mais eficiente, tendo um tempo de resposta mais rápido e uma melhor estabilidade a variações nas impedâncias do sistema.

7 REFERÊNCIAS

CANDIDO, Marcos. **Análise do forno elétrico a arco com uma carga especial**. 2009. 44 f. Tese. Programa de Pós-Graduação, Universidade São Paulo, São Paulo, 2009.

CPFL. **Critério para atendimento a forno a arco**. 2000. Disponível em www.cpfl.com.br, acesso em 17/03/12.

FILHO, João Mamede. **Instalações elétricas industriais**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ, Editora LTC, 1989, p.362-391.

GRUPO B2B. Tipos de fornos existentes no mercado de fundição. Disponível em: <http://b2bgroup.com.br/index.php/2011/07/03>. Acesso em: 01 dez.2012.

JUNIOR, José Rubens Macedo. **Uma contribuição à análise das componentes inter-harmônicas e seus efeitos nos indicadores de flutuação de tensão**. 2009. 197 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

LEME, Rodrigo Moraes. **Características dos fornos a indução com conversores IGBTs**. 2011. 46 f. TCC. Programa de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade São Francisco, Itatiba, 2011.