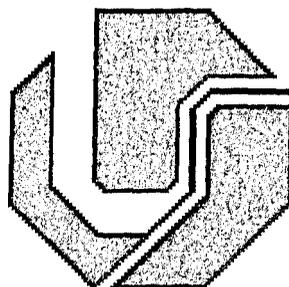


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**CONTRIBUIÇÕES ÀS ANÁLISES DA PROPAGAÇÃO DAS
FLUTUAÇÕES DE TENSÃO SOB O ENFOQUE DO
FENÔMENO FLICKER**

MARIA DAS GRAÇAS SANTOS RUFINO PONTES

100020270

SISBI/UFU



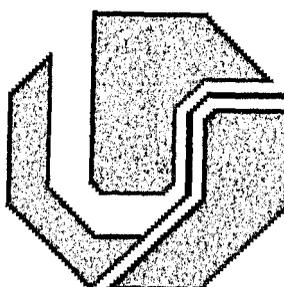
100020270

Dezembro

2000

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MON
621.3
P814c
TEC/MEM



**CONTRIBUIÇÕES ÀS ANÁLISES DA PROPAGAÇÃO DAS
FLUTUAÇÕES DE TENSÃO SOB O ENFOQUE DO
FENÔMENO FLICKER**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por **Maria das Graças Santos Rufino Pontes**, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca examinadora:

José Carlos de Oliveira, Dr. (UFU) – Orientador

Fernando Monteiro Figueiredo, Dr. (ANEEL / UNB)

Milton Itsuo Samesima, Dr. (UFU)

Kleiber David Rodrigues, Dr. (UFU)

Uberlândia, 20 de Dezembro de 2000

**CONTRIBUIÇÕES ÀS ANÁLISES DA PROPAGAÇÃO DAS
FLUTUAÇÕES DE TENSÃO SOB O ENFOQUE DO
FENÔMENO FLICKER**

Maria das Graças Santos Rufino Pontes

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por
Maria das Graças Santos Rufino Pontes, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências.

José Carlos de Oliveira
Orientador

Luis Carlos de Freitas
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

**Aos meus filhos,
Viviane e Ricardo,
com Amor.**

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força e luz divina que sempre me acompanharam, principalmente, nos momentos mais difíceis dessa jornada.

Ao professor José Carlos de Oliveira meu sincero agradecimento pela confiança, incentivo e boa vontade em sempre transmitir conhecimentos.

Ao meu marido, Ricardo Silva Thé, pelo amor, companheirismo e cumplicidade em todos os momentos.

Aos amigos Walkyria Krsthye Gonçalves, Elizete Lucilana Soares, Anderson Vilaça e Marcelo Fandi pelo apoio durante a realização deste trabalho.

Aos colegas Olívio Souto e Ana Claudia Daros pela convivência fraterna.

Aos demais colegas da pós graduação.

Aos meus pais, irmãs e irmãos por me permitirem, mesmo de longe, compartilhar dos laços que nos unem.

À Universidade de Fortaleza pelo apoio financeiro

A Joana Maria Proença pelo desprendimento e gentileza no atendimento às minhas solicitações.

RESUMO

Dentre os vários itens que definem a Qualidade da Energia Elétrica encontram-se as flutuações de tensão que, via de regra, são ocasionadas por cargas variáveis. Este fenômeno é caracterizado, basicamente, por uma variação na envoltória da tensão a 60Hz e conduz, dentre outros efeitos, a alterações do fluxo luminoso emitido pelos sistemas de iluminação, originando o denominado efeito *flicker*.

A propagação das flutuações de tensão ao longo dos sistemas elétricos tem sido escopo de inúmeras investigações, tanto por parte do meio acadêmico quanto dos órgãos normalizadores da Qualidade da Energia Elétrica, visto que os seus efeitos de cintilação luminosa, normalmente, são experimentados em pontos distantes daqueles onde os distúrbios se originam. Como resultados de tais pesquisas tem sido constatado que, vários são os fatores que podem contribuir para a atenuação ou amplificação das flutuações de tensão, dentre os quais pode-se citar: o nível de curto-circuito, a resistência dos componentes elétricos, o tipo de ligação e o nível de saturação dos transformadores e, ainda, as cargas motoras. Nesse sentido, este trabalho contribui com investigações a respeito dos fatores que exercem influências efetivas sobre as propagações das flutuações de tensão.

Para se atingir tais metas, esta dissertação realiza estudos computacionais, utilizando o simulador SABER, com vistas a avaliar a influência de tais fatores de forma individual. Utilizando tal ferramenta, à qual foi inserida uma modelagem própria de carga perturbadora, procede-se a uma série de estudos de forma a melhor compreender e quantificar os níveis de influência dos fatores anteriormente mencionados.

ABSTRACT

Amongst a variety of Power Quality indicators, emerges the well known voltage fluctuation caused by large variable loads. This phenomenon is characterised by a low frequency envelop upon the 60 Hz voltage. This mainly affects the luminous flux produced by lamps and arises the flicker effect.

Many papers have dealt with this subject and the propagation of voltage fluctuation along electrical power systems. Power supply companies, investigation centres and power regulator organisations are concerned about this matter as the effect can cause harm to distant illumination systems. As a result of this investigation, it has been concluded that the propagation may produce either voltage fluctuation amplification or attenuation. The short circuit level, components resistance, transformer connection and saturation level and motor loads have been pointed out as reasons for the above. In this way, this dissertation contributes towards the investigation of the refereed factors on the attenuation/amplification of the flicker phenomenon. To reach the above targets, this dissertation uses computational studies utilising a platform known as SABER simulator. In order to provide means of modelling the variable load, a special template was developed and many practical cases were performed to achieve a better understanding of the overall behaviour

SUMÁRIO

• CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	01
• CAPÍTULO II – CONCEITUAÇÃO E CÁLCULO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	09
2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS	09
2.2 - CARACTERIZAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO	11
2.3 - PRINCIPAIS CARGAS PERTURBADORAS	15
2.3.1 - Fornos a Arco Elétrico	15
a) Fornos a arco direto	18
b) Fornos a arco resistência	18
c) Fornos a arco indireto	19
2.3.2 - Máquina de Solda Elétrica	19
2.3.3 – Laminadores	22
2.3.4 – Partida de Motores	23
2.3.5 – Outras Cargas	25
2.4 - CÁLCULO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	25
2.4.1 – Circuito Equivalente de Thévenin	25
2.4.2 – Nível de Curto-Circuito	29
2.5 - OS IMPACTOS PROVOCADOS PELAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	30
2.6 - FATORES QUE INFLUENCIAM AS VARIAÇÕES DE TENSÃO	32
2.7 - ATENUAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	34
2.7.1 – Redução da Potência da Carga Perturbadora	35
2.7.2- Fortalecimento do Sistema Supridor	35
2.7.3- Instalação de Equipamentos Reguladores de Tensão	36

2.8 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
• CAPÍTULO III – O EFEITO <i>FLICKER</i>	40
3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	40
3.2 – O EFEITO <i>FLICKER</i>	42
3.3 – SENSIBILIDADE DE DIVERSOS TIPOS DE LÂMPADAS ÀS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	46
3.4 – MEDIÇÃO DE <i>FLICKER</i>	51
3.4.1 – Método Padrão UIE	53
3.4.1.1 – Estágio 1: Adaptação da tensão de entrada	56
3.4.1.2 – Estágio 2; Demodulação do sinal adaptado	56
3.4.1.3 – Estágio 3 : Ponderação em frequência	58
3.4.1.4 – Estágio 4 : Média quadrática	59
3.4.1.5 – Estágio 5 ; Tratamentos estatístico	60
A) Indicador de Flicker de Curta Duração (P_{ST})	61 63
B) Indicador de Flicker de Longa Duração (P_{LT})	63 66
C) Valores Limites para P_{ST} e P_{LT}	67
3.5 – NORMAS PARA MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE <i>FLICKER</i>	
3.5.1 - IEC 61000-4-15 Standard on Flicker Measurement	68
3.5.2 - IEC 61000-3-3 <i>Electromagnetic Compatibility</i> (EMC)	67 68
3.5.3 - IEC 61000-3-5 <i>Electromagnetic Compatibility</i> (EMC)	69
3.5.4 - IEC 1000-3-7 <i>Electromagnetic Compatibility</i> (EMC)	69

3.5.5 - CENELEC EN 50160 “ <i>Characteristics of Voltage Supplied by the Electrical Distribution Network</i> ”	69
3.5.6 - Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais – GCOI/SCEL/CECE	71 72
3.5.7 - Limites Estabelecidos em outros Países	73
3.5.8 - Limites a Serem Estabelecidos no Brasil	
3.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	
• CAPÍTULO IV – PROPAGAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	74
4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	74
4.2 – COEFICIENTES UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A PROPAGAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	76
4.3 - FATORES QUE INFLUENCIAM NA PROPAGAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	80
4.3.1 – Nível de Curto-Circuito	81
4.3.2 – Cargas Rotativas	82
4.3.3 – Saturação dos Transformadores	84
4.3.4 – Tipo de Ligação dos Transformadores	85
4.3.5 – A Resistência dos Condutores	94
4.4 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	96
• CAPÍTULO V – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	98
5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	98
5.2 – ESTRATÉGIA DE ESTUDO	99
5.3 – MODELAGEM DA CARGA GERADORA DE FLUTUAÇÕES DE TENSÃO	100
5.4 – SISTEMA SIMULADO	102

5.5 – CASOS ESTUDADOS	104
5.6 – RESULTADOS OBTIDOS	108
5.6.1 – Caso 1: Caso Base	108
5.6.2 – Caso 2: Influência da Potência de Curto-Circuito	109
5.6.3 – Caso 3: Influência da Resistência dos Cabos	111
5.6.4 – Caso 4: Influência do Tipo de Ligação dos Transformadores	112
5.6.5 – Caso 5: Influência da Saturação dos Transformadores	123
5.6.6 – Caso 6: Influência dos Motores Elétricos	125
5.7 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	132
• CAPÍTULO VI – CONCLUSÕES	134
• REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	138

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 – ASPECTOS GERAIS

O objetivo primário de uma concessionária de energia é o de fornecer um suprimento de energia com qualidade aos consumidores industriais, comerciais e residenciais. Qualidade esta que pressupõe um fornecimento de tensão puramente senoidal com frequência e amplitude constantes [1]. Os principais fenômenos responsáveis pela degradação da qualidade da energia, definidos como Itens de Qualidade, bem como suas causas, efeitos e soluções, estão apresentados na tabela 1.1.

Atualmente, face à nova realidade do setor elétrico brasileiro, onde, com a privatização as diversas concessionárias encontram-se sob controle de grupos oriundos de outros países, com padrões e gerências diversificadas, o assunto “Qualidade da Energia Elétrica” assume destacada importância no cenário energético nacional. Em decorrência disto e de outros aspectos, sob o controle da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e do Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS), vários estudos, pesquisas e desenvolvimentos têm sido realizados através dos grupos de trabalhos específicos, a exemplo daquele (GTE – QEE) incumbido de estabelecer as diretrizes para a normatização dos padrões da Qualidade da Energia Elétrica na rede elétrica brasileira.

Tabela 1.1 – Características dos itens de qualidade.

Tipo de Distúrbio	Causas	Efeitos	Soluções
Transitório Impulsivos	-Descargas Atmosféricas; -Chaveamento de cargas.	-Excitação de circuitos ressonantes; -Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	-Filtros; -Detectores de surtos; -Transformadores isoladores.
Transitórios Oscilatórios	-Descargas atmosféricas; -Chaveamento de: capacitores, linhas, cabos, cargas e transformadores.	-Mal funcionamento de equip. controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; -Redução da vida útil de motores, geradores, transformadores, etc.	-Filtros; -Detectores de surtos; -Transformadores isoladores.
Sub e Sobretensões	-Partidas de motores; -Variação de cargas; -Chaveamento de capacitores.	-Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo dos bancos de capacitores; -Falhas de equip. eletrônicos; -Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TP's e TC's; -Operação indevida de relés de proteção.	-Reguladores de tensão; -Fontes de energia de reserva; -Chaves estáticas; -Geradores de energia.
Interrupções	-Curto-circuito; -Operação de disjuntores; -Manutenção.	-Falha de equip. eletrônicos e de iluminação; -Desligamento de equipamentos; -Interrupção do processo produtivo (altos custos).	-Fontes de energia sobressalentes; -Sistemas "no-break"; -Geradores de energia.
Desequilíbrios	-Fornos a arco; -Cargas monof. e bif; -Assimetria entre as impedâncias.	-Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; -Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos.	-Operação simétrica; -Dispositivos de compensação.
Nível CC	-Operação ideal de retificadores de meia-onda, etc.	-Saturação de transformadores; -Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramentos e de outros conectores.	
Harmônicos	-Cargas não-lineares	-Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; -Danificação de capacitores, etc. -Erros em medidores de energia.	-Filtros; -Transformadores isoladores.
Interharmônicos	-Conversores estáticos de potência; -Cicloconversores; -Motores de indução; -Equipamentos a arco, etc.	-Interferência na transmissão de sinais "carrier"; -Indução de "flicker" visual no "display" de equipamentos.	
"Notching"	-Equipamentos de eletrônica de potência.	-Redução da vida útil de equipamentos eletrônicos.	-Aterramento das instalações; -Filtros.
Ruídos	-Chaveamento de equip. eletrônicos de potência; -Radiações eletromagnéticas.	-Distúrbios em equip. eletrônicos (computadores e controladores programáveis).	-Sistemas estáticos de compensação de reativos; -Capacitores série.
Oscilações de Tensão	-Cargas intermitentes; -Fornos a arco; -Partida de motores.	-"Flicker"; -Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; -Queda de rendimento de equipamentos elétricos; -Interferência nos sistemas de proteção.	
Variação na Frequência do Sistema Elétrico	-Perda de geração, perda de linhas de transmissão, etc.	-Pode causar danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc.	

Dentre os vários efeitos citados encontram-se as flutuações de tensão, as quais afetam significativamente os indicadores da qualidade da energia. O termo **flutuação de tensão** refere-se à variação da envoltória desta grandeza a 60 Hz. Tal envoltória conduz, dentre outros efeitos, a sensação que é experimentada pelo sistema visual humano quando submetido a variações do fluxo luminoso, originando o fenômeno *flicker*. As características do nível instantâneo de *flicker* dependem do porte e do tipo da carga causadora do distúrbio. A variação na amplitude da tensão pode ocorrer gradualmente, como no caso de um forno a arco, ou repentinamente, como na partida de um motor. Ela pode aparecer periódica ou randomicamente dependendo da fonte geradora.

As flutuações de tensão, produzidas por uma carga ligada a um sistema elétrico, propagam-se através do mesmo e atingem pontos distantes do local onde a carga está ligada, podendo, desta forma, afetar muitos consumidores. Estas oscilações, como já referido, podem causar variação do fluxo luminoso emitido, principalmente pelas lâmpadas incandescentes. Tal efeito, quando em baixa frequência, (< 25 Hz), pode se tornar um sério problema se ultrapassar o limiar de perceptibilidade do olho humano.

Reconhecendo-se estes aspectos, o ONS formou um grupo de trabalho, do qual foi originado o **Subgrupo de Flutuação de Tensão** [2], cujo plano de ação consiste da definição dos seguintes fatores:

- Procedimentos para medição dos indicadores, que serão utilizados para avaliar a qualidade da tensão quanto a flutuação de tensão.
- Campanha de medição para diagnóstico da situação atual e maiores subsídios para a definição dos limites.
- Valores limites para os indicadores.
- Rateio de responsabilidades na manutenção da qualidade da tensão quanto as flutuação de tensão.

Através da análise do plano de ação anteriormente mencionado pode-se concluir que, um dos objetivos do mesmo é identificar a forma (atenuadas ou amplificadas) com que ocorrem as propagações das oscilações de tensão nos sistemas elétricos.

De fato, poder-se-ia considerar intuitivo que, o nível da oscilação é reduzido à medida que os barramentos apresentam maiores níveis de curto-circuito [3]. Porém, inúmeros trabalhos de medição em campo e laboratório [4], [5], [6] investigam como ocorre a propagação das flutuações de tensão quando as mesmas percorrem os sistemas no sentido de maiores para menores níveis de curto circuito. Neste particular, as experiências de campo têm mostrado alguns resultados que se apresentam, à primeira vista, surpreendentes. Devido a isto, investigações sobre os mecanismos e parâmetros de influência que determinam o comportamento da propagação das flutuações de tensão devem constituir-se em motivos para estudos mais detalhados. É neste sentido que se insere a presente proposta.

1.2 – OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Face ao exposto na seção anterior, esta dissertação tem como principais objetivos:

- Fazer uma rápida abordagem sobre as origens e os tipos de flutuações de tensão;
- Levantar as formas de se calcular os níveis de variações de tensão;
- Conceituar o fenômeno denominado por *Flicker*, bem como apresentar o principal método utilizado para quantificá-lo;

- Relacionar e tecer breves comentários a respeito das normas e recomendações nacionais e internacionais destinadas à limitação das flutuações de tensão;
- Investigar os mecanismos que regem os processos de transferência, das oscilações de tensão, ao longo dos sistemas elétricos;
- Implementar um modelo de carga geradora de flutuações de tensão, responsáveis pelo aparecimento do efeito *flicker*, no simulador SABER e, efetuar estudos de um arranjo típico a fim de analisar o desempenho do modelo implementado;
- Comprovar, baseando-se em simulações computacionais, a influência das características de um sistema elétrico de potência sobre possíveis alterações (atenuações/amplificações) das oscilações de tensão, à medida que estas se propagam pelo mesmo.

1.3 – A ESTRUTURA DA TESE

Para alcançar os objetivos propostos, os desenvolvimentos e contribuições deste trabalho serão tratados em cinco capítulos, além do presente, de caráter introdutório, conforme a descrição a seguir:

- **CAPÍTULO II – CONCEITUAÇÃO E CÁLCULO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO**

Neste capítulo são apresentados os conceitos iniciais relativos ao estudo das flutuações de tensão. Dentro deste contexto, é mostrada a metodologia clássica para o cálculo de tais distúrbios na tensão. Além disso, as principais cargas causadoras do fenômeno aqui estudado são apresentadas, a fim de que se possa compreendê-lo melhor.

- **CAPÍTULO III – O EFEITO *FLICKER***

Reconhecendo-se que o fenômeno *flicker* é o efeito mais discutido causado pelas flutuações de tensão, este capítulo tem como objetivo a conceituação física deste distúrbio e do principal método utilizado para a quantificação do mesmo. Além disto, são apresentados estudos recentes sobre o comportamento de diversos tipos de lâmpadas quando submetidas às oscilações de tensão e, também, de forma resumida, as principais recomendações nacionais e internacionais usadas para o controle deste item de qualidade.

- **CAPÍTULO IV - PROPAGAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO**

Este capítulo é dedicado à identificação das características próprias dos sistemas elétricos responsáveis pela atenuação/amplificação das flutuações de tensão. Tal identificação consiste de resultados de medições, obtidos de referências bibliográficas, e de simulações computacionais. Vale ressaltar

que, utilizando-se de sistemas testes, as medições efetuadas em laboratório e os estudos computacionais, almejaram avaliar os efeitos isolados de cada fator capaz de afetar a propagação das flutuações de tensão.

Além disso, neste capítulo são apresentados os vários coeficientes utilizados para quantificar a propagação das oscilações de tensão, quais sejam: coeficiente de transferência (α) e coeficiente de atenuação de *flicker* (β).

• CAPÍTULO V - SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

O objetivo fundamental deste capítulo é de investigar computacionalmente a influência das características de um sistema elétrico de potência, na atenuação das flutuações de tensão. Para tanto, serão efetuadas simulações computacionais utilizando um complexo elétrico típico, o qual permite a variação dos diversos parâmetros responsáveis por tais atenuações. Assim, uma vez que tais estudos computacionais serão efetuados através do simulador SABER, neste capítulo serão fornecidas, ainda, algumas informações referentes a esta plataforma.

Deve-se ressaltar que, para a execução das referidas simulações envolvendo geração e propagação de flutuações de tensão, foi necessário o desenvolvimento de um *template* representativo de uma carga variável, responsável pela geração deste fenômeno. Nesse sentido, este capítulo apresenta, ainda, um detalhamento sobre o processo de implementação de tal modelo na plataforma computacional utilizada.

• **CAPÍTULO VI - CONCLUSÕES GERAIS**

Muito embora ao final de cada capítulo serem tecidas algumas considerações finais, este capítulo terá como objetivo apresentar as discussões e principais conclusões desta dissertação. Além disso, serão ressaltadas questões associadas às contribuições efetivas deste trabalho, bem como as propostas para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II

CONCEITUAÇÃO E CÁLCULO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

2.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme ressaltado no Capítulo I, um importante indicador da qualidade de energia elétrica (QEE) fornecida aos consumidores é a constância do valor eficaz da tensão de alimentação. Isso porque, a maior parte das cargas elétricas são previstas para operarem sob condições de tensão nominal constante, e a não obediência desta característica pode comprometer, desde serviços que utilizam eletrodomésticos, até processos industriais mais sofisticados. Na prática, manter a tensão constante ao longo do ciclo diário constitui-se em uma meta muito difícil de ser atingida. Isto se deve às seguintes razões:

- As correntes elétricas circulando na rede provocam quedas de tensão proporcionais às impedâncias série das linhas de transmissão e distribuição e, ainda, dos transformadores;
- As cargas variáveis ou intermitentes tendem a modular a corrente, provocando flutuações correspondentes na tensão de alimentação;
- Os dispositivos de controle de tensão não conseguem eliminar totalmente as variações de tensão, devido aos atrasos de resposta dos mesmos.

De um modo geral, os problemas enfrentados por um sistema elétrico, no que diz respeito as flutuações de tensão, são causados por cargas

industriais. As intensidades e frequências destas variações de tensão dependem tanto das características da carga quanto do sistema de alimentação.

As principais cargas industriais causadoras de flutuações de tensão são: as máquinas de solda, os laminadores e os fornos a arco. Estas cargas, usualmente, fornecem um bom retorno financeiro à concessionária de energia. Contudo, em muitos casos, as mesmas provocam distúrbios e geram reclamações no que diz respeito à precariedade de funcionamento de equipamentos e eletrodomésticos. Nestas circunstâncias, a concessionária de energia é acionada no sentido de resolver o impasse entre os consumidores, quais sejam, os geradores do distúrbio, que proporcionam um rendimento considerável, e aqueles que estão experimentando os problemas. Havendo necessidade, medidas mitigadoras para as flutuações de tensão, que resultem no atendimento dos limites aceitáveis de acordo com a legislação vigente [3], devem ser implementadas. Contribuindo pois neste contexto, este capítulo tem por objetivo:

- Caracterizar as variações de tensão;
- Apresentar uma síntese das principais cargas elétricas causadoras das variações de tensão;
- Revisar a metodologia clássica para o cálculo das flutuações de tensão;
- Analisar os principais impactos produzidos pelas oscilações de tensão;
- Apresentar os principais fatores que afetam as variações de tensão e as estratégias utilizadas para atenuar as mesmas.

2.2 – CARACTERIZAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO

De um modo geral, no que diz respeito às variações do valor eficaz da tensão, a figura 2.1 [7] mostra um resumo da terminologia aplicável aos diferentes fenômenos existentes. Vale lembrar que a duração do fenômeno origina, ainda, subdivisões, para uma melhor caracterização dos efeitos.

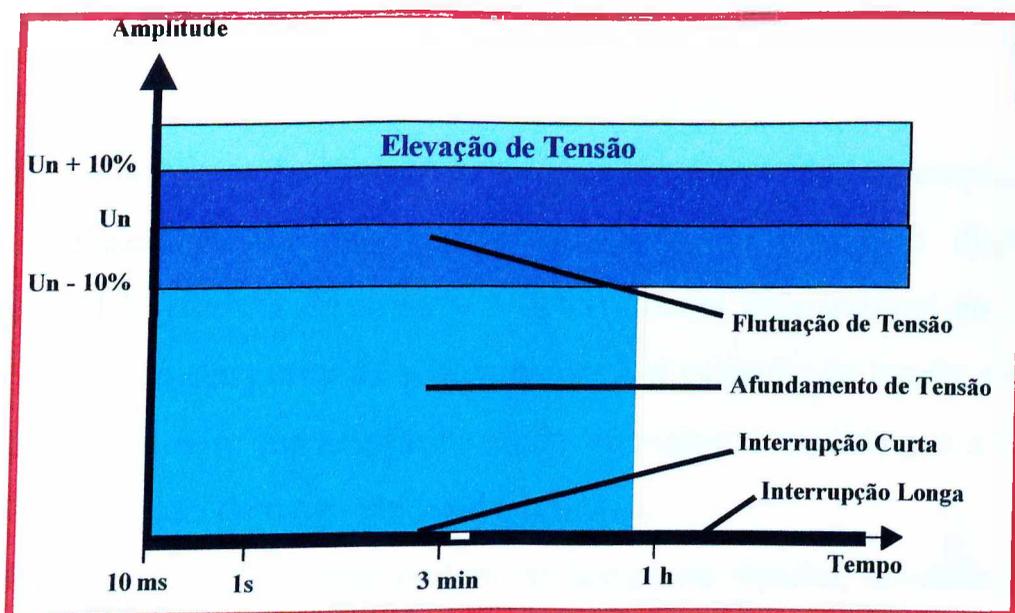


Figura 2.1 – Características dos fenômenos causados pela variação do valor eficaz da tensão.

Enfocando, exclusivamente a questão das flutuações de tensão, ressalta-se que em um sistema elétrico, tal grandeza varia sob a influência de qualquer um dos três componentes indicados na figura 2.2.

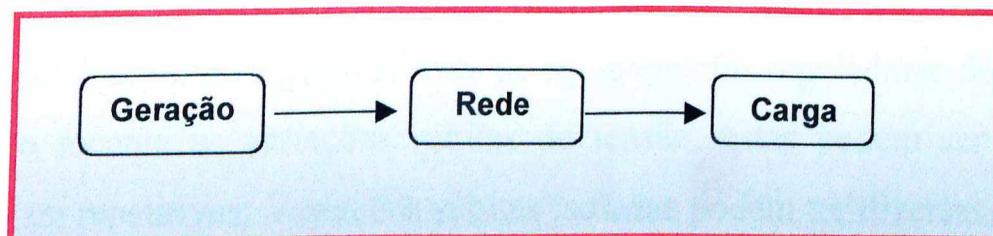


Figura 2.2 - Componentes de um sistema elétrico.

A influência dos componentes, mostrados na figura anterior, sobre a variação da tensão no sistema elétrico ocorre uma vez que:

- A **geração** segue ou antecipa as variações de carga, afim de manter um equilíbrio entre a geração e o consumo;
- A **rede elétrica** tem a sua topologia variada sempre que acontece uma manobra de chaveamento e/ou falta;
- A **carga** pode ter o seu valor alterado, de acordo com o regime de trabalho.

Na ocorrência de variações na carga, tema este contemplado pela presente dissertação, a conseqüente flutuação de tensão é diretamente proporcional à potência da mesma, e inversamente proporcional ao nível de curto-circuito no seu ponto de acoplamento. Tal variação de tensão afeta toda a rede elétrica, porém sua amplitude tende a diminuir à medida que a distância ao ponto de ligação da carga chaveada aumenta.

As oscilações de tensão podem ser lentas ou rápidas, dependendo se a variação da carga suprida pela rede ocorre de forma progressiva ou abrupta, respectivamente. O limite entre variações lentas e rápidas é difícil de ser estabelecido, todavia, pode estar situado na faixa compreendida entre poucos segundos e um minuto.

As amplitudes das variações lentas, geralmente, não excedem a 5 ou 8% da tensão nominal. Estas variações, em princípio, não afetam o funcionamento da maioria dos equipamentos elétricos, uma vez que as mesmas podem ser corrigidas através de equipamentos reguladores de tensão.

No tocante às variações súbitas de tensão, estas podem ser do tipo isoladas ou repetitivas. Variações súbitas isoladas podem ter diversas origens, a saber:

- Nos **consumidores** – devido à conexão ou ao desligamento de grandes cargas e/ou partida de grandes motores;
- Nas **redes** – como consequência de faltas e/ou perda de parte do sistema de transmissão ou distribuição.

As variações súbitas de tensão do tipo repetitivas são chamadas flutuações de tensão. Estas são causadas devido a operação de cargas como máquinas de solda, fornos a arco, britadores, etc. A figura 2.3 [8] mostra os diversos tipos de flutuações de tensão e suas classificações.

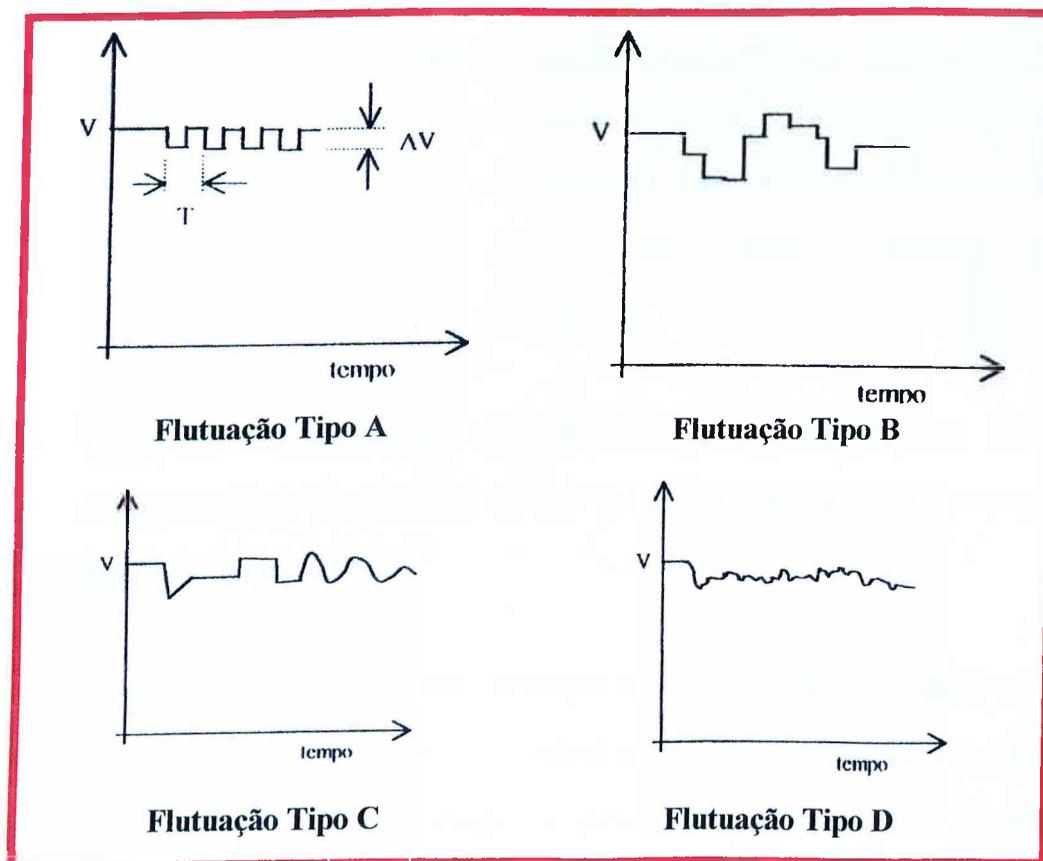


Figura 2.3 - Tipos de flutuações de tensão.

- **Tipo A**: Neste grupo se enquadram as variações de tensão retangulares e periódicas com amplitude (ΔV) constante, por exemplo, aquelas provocadas pelo funcionamento de máquinas de solda à resistência.
- **Tipo B**: Este conjunto compreende uma série de flutuações irregulares de tensão cuja amplitude máxima pode ou não ser identificada. Estas podem ser produzidas pela entrada e saída de cargas por etapas: como elevadores, laminadores e prensas.
- **Tipo C**: São flutuações compostas por uma série irregular de variações de formas diversas. Neste caso não se define a forma nem o período da variação, que pode ser brusca (retangular), em rampa (triangular) ou oscilatória (senoidal). Este caso permite combinar os efeitos de diferentes cargas, tais como: motores, prensas, compressores, bombas e elevadores.
- **Tipo D**: Constitui-se de uma série de flutuações de tensão randômicas e contínuas, como é o caso daquelas provocadas por fornos a arco.

As variações de tensão repetitivas são as responsáveis pelo aparecimento do fenômeno *flicker* nas lâmpadas. Normalmente, as amplitudes destas variações são muito pequenas, menores que 10%, e por esse motivo a operação dos equipamentos ligados à rede, via de regra, não é afetada. Todavia, as mesmas acarretam um incômodo fisiológico na visão devido à variação do fluxo luminoso emitido, principalmente, pelas lâmpadas incandescentes.

2.3 - PRINCIPAIS CARGAS PERTURBADORAS

A seguir são feitas algumas considerações sobre as principais cargas que, inseridas numa rede elétrica, são passíveis de causar os efeitos de oscilação de tensão aqui discutidos. Ressalta-se que, os componentes de sistemas apresentados são aqueles mais freqüentemente encontrados no parque fabril e cujas potências são expressivas em relação à maioria dos dispositivos elétricos.

2.3.1 - Fornos a Arco Elétrico

Um forno a arco elétrico (FAE) é uma carga que causa diversas perturbações no ponto de acoplamento comum (PAC) [9]. Os mesmos tornaram-se importantes ferramentas na produção de aço e de outros materiais ferrosos. Além disso, constituem-se num dos principais equipamentos na indústria siderúrgica mundial.

Sob o ponto de vista da qualidade de energia, os fornos a arco são as cargas mais problemáticas dos sistemas elétricos de potência devido, principalmente, às suas características fortemente não-lineares e assimétricas. Um outro fator agravante da operação de fornos a arco é o elevado montante de energia reativa requerido pelos mesmos o qual é, ainda, variante no tempo. A conseqüência disso é a ocorrência de uma grande variação de tensão nos barramentos adjacentes ao forno. De um modo geral, o impacto da operação deste equipamento na qualidade da energia dos sistemas elétricos de suprimento é caracterizado por:

- Flutuações de tensão e *flicker*;
- Harmônicas e interharmônicas;
- Desbalanços.

Todas as grandezas elétricas associadas aos fornos a arco elétrico exibem fortes e rápidas variações estocásticas com o tempo. Dependendo da potência do FAE e da capacidade de curto-circuito do sistema que alimenta o mesmo, podem ocorrer no ponto de acoplamento comum (PAC) flutuações de tensão de baixa frequência (0,1 até 30Hz). Isto pode resultar em um nível de *flicker* intolerável nas áreas adjacentes à instalação do forno.

Como exemplo das perturbações produzidas por um FAE, a figura 2.4 mostra perfis trifásicos das tensões fase-neutro no barramento de 138 kV do alimentador geral de uma indústria siderúrgica típica [10].

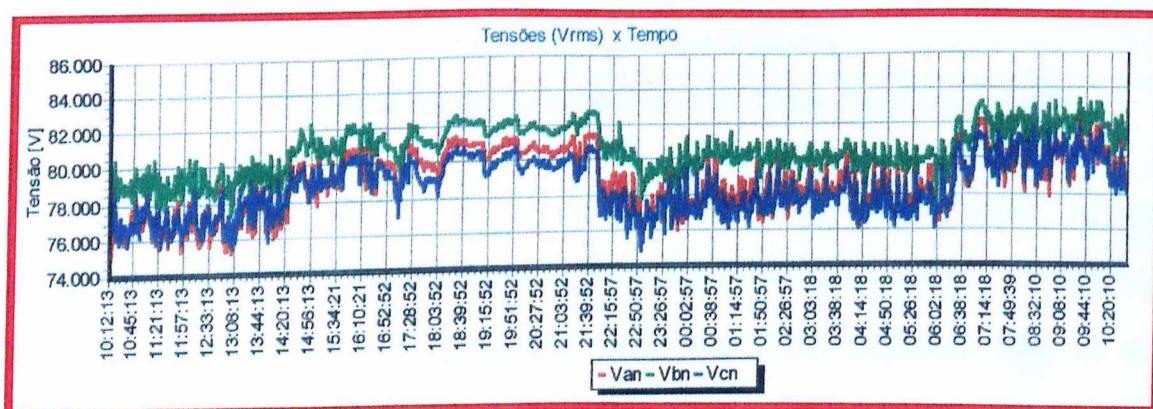


Figura 2.4 – Tensões medidas em um barramento que alimenta um forno a arco.

Sabe-se que, as variações de tensão, em sua maioria, são conseqüências de alterações da energia reativa. Em condições normais, a potência reativa do forno a arco varia muito mais rapidamente que a potência ativa, apesar de ambas experimentarem altas variações durante o período de operação do forno. Nesse contexto, a figura 2.5 [10] ilustra o comportamento dessas grandezas, durante o período de refino de um FAE.

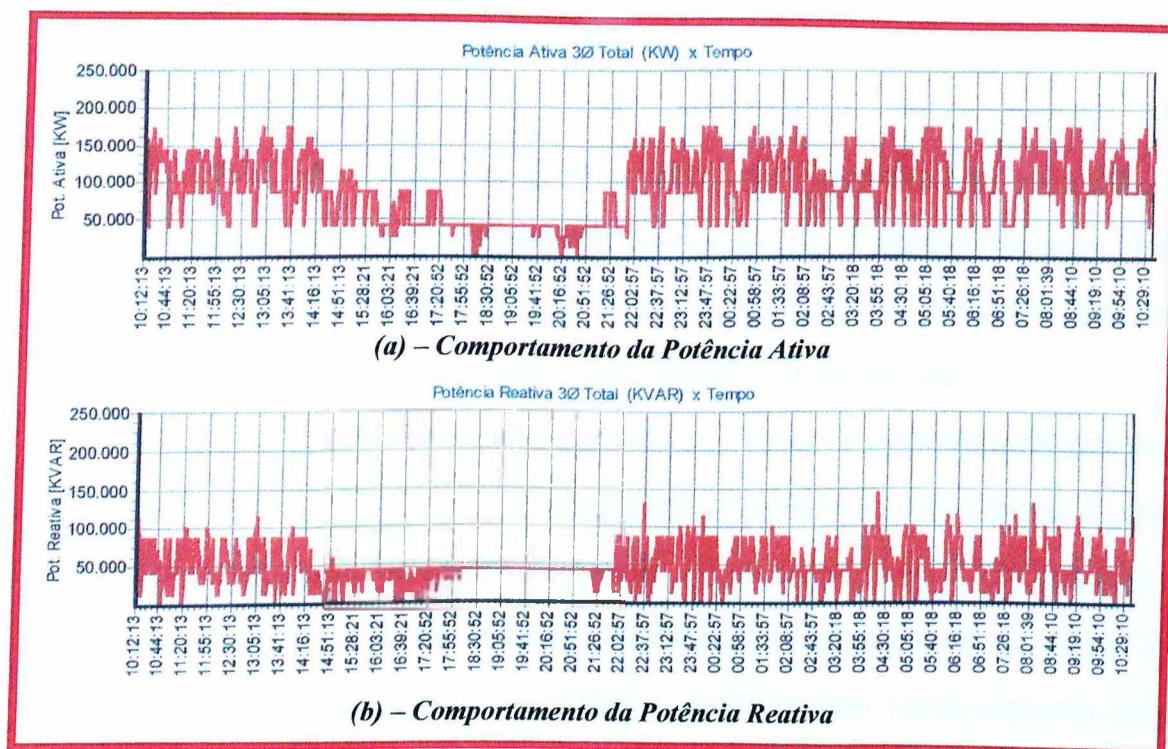


Figura 2.5 – Variação da potência ativa e reativa de um forno a arco elétrico.

Basicamente, são três os tipos de FAE existentes, a saber: fornos a arco direto, fornos a arco-resistência e fornos a arco indireto [11]. A figura 2.6 apresenta os arranjos típicos para tais variações deste equipamento, os quais são detalhados na seqüência.

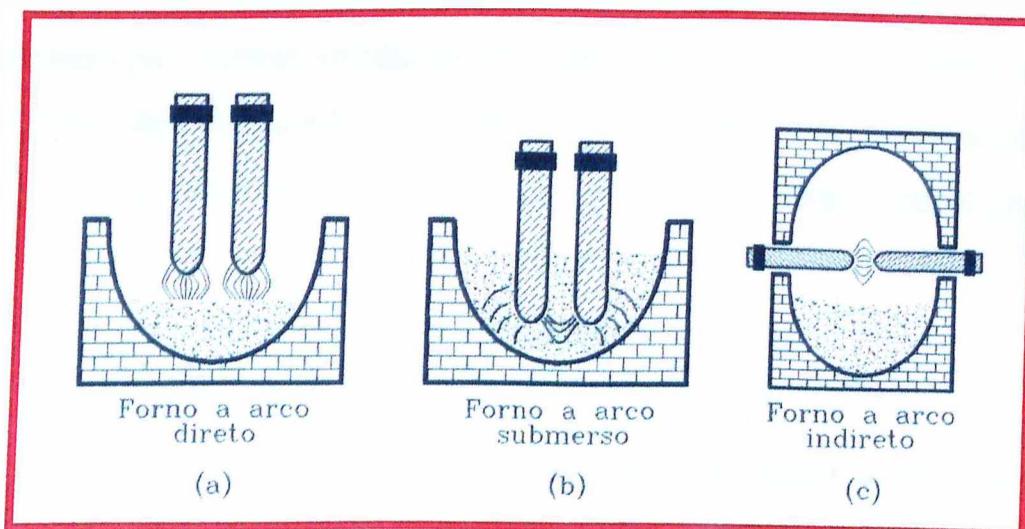


Figura 2.6 – Tipos de fornos a arco elétrico.

a) Fornos a arco direto (arco descoberto)

Geralmente, os fornos a arco direto são empregados na fusão de minérios de ferro ou sucatas para a produção de lingotes de aço. Estes últimos, após serem laminados, são transformados em produtos de larga aplicação na indústria da construção civil, naval, mecânica, etc..

Quanto aos seus aspectos construtivos, estes equipamentos possuem uma carcaça (crisol) cilíndrica com um fundo abaulado e uma tampa, os quais são revestidos internamente com tijolos de sílica (refratário). Tal estrutura é apoiada sobre um suporte de ferro e resfriada por circulação de água. Em relação aos eletrodos, estes são de grafite e posicionados verticalmente acima do material a ser fundido, daí o motivo pelo qual são também conhecidos por forno a arco descoberto. Normalmente, estes equipamentos são basculantes, de modo que, a escória é descarregada por meio de uma porta de escoamento posterior e o produto fundido através de uma passagem de escoamento anterior mais baixa.

Ainda, os fornos a arco direto são trifásicos e têm seus eletrodos conectados eletricamente ao sistema através de placas condutoras de cobre, pressionadas por morsas solidárias aos braços móveis. Os movimentos destas articulações são executados por meio de servomotores, comandados por reguladores automáticos de corrente ou de impedância de arco constante.

b) Fornos a arco-resistência (arco submerso)

Estes dispositivos também são chamados de forno a arco submerso devido ao fato do arco ocorrer sob a carga de material a ser fundido. Além disso, são conhecidos por fornos de redução, por fazerem uso de reações químicas de mesmo nome.

Quanto às suas aplicações, este tipo de equipamento é usado para a produção de ligas de ferro, tais como: ferro-silício, ferro-cromo, ferro-manganês, etc..

No tocante ao aspecto construtivo, o mais difundido é o trifásico cujos eletrodos, de carvão amorfo ou do tipo auto-cozimento, são dispostos em forma de um triângulo equilátero. Estes terminais utilizam um sistema de suspensão com arganéis e freios a fita *Weasdon*, que proporcionam um deslizamento, a fim de compensar os seus desgastes. Para este tipo de forno, a carcaça possui forma circular.

O contato elétrico com a rede é feito através de placas condutoras comprimidas pelo anel prensa-placas contra os eletrodos.

c) Fornos a arco indireto (arco radiante)

Os fornos a arco indireto apresentam pequenas dimensões e são usados para a fusão de metais não ferrosos ou de pequenas quantidades de gusa ou aço. Estes fornos são menos comuns que aqueles a arco direto e os de arco-resistência. Neste caso, o arco elétrico se dá entre os eletrodos os quais estão posicionados horizontalmente acima da carga e o calor é transmitido por irradiação direta do arco ou indireta devido às reflexões nas paredes. A regulação de corrente, normalmente constante, é feita aproximando ou afastando os eletrodos.

2.3.2 - Máquinas de Solda Elétrica

Nas últimas décadas, as máquinas de solda elétrica têm sido bastante empregadas, junto à tecnologia da construção metálica. Esses equipamentos realizam a soldagem, a qual consiste da união de duas ou mais peças

metálicas através de fenômenos elétricos. Neste processo, emprega-se a energia elétrica com o objetivo de obter o calor necessário para a fusão dos elementos metálicos. Dentre os métodos de soldagem existentes destacam-se [11]:

- Soldagem a Arco;
- Soldagem a Resistência.

O primeiro tipo de soldagem faz uso do calor produzido pelo arco estabelecido entre o eletrodo e o elemento metálico a ser soldado. Já a soldagem a resistência é obtida comprimindo-se as partes a serem soldadas, através das quais faz-se circular uma corrente elétrica de intensidade tal que, juntamente com a resistência do ponto de contato, provoca o aquecimento necessário à união das mesmas. Enquanto que a soldagem a arco envolve essencialmente um único período de aquecimento, a soldagem a resistência requer ciclos de frequências de trabalho de até 10 Hz. Em ambos os casos, o controle da máquina de solda pode ser automático ou manual. Com relação aos aspectos elétricos, elas podem ser monofásicas, trifásicas, de frequências variáveis ou do tipo armazenadoras de energia.

A qualidade da solda de uma junta é determinada, entre outros fatores, pela manutenção do controle de calor (corrente constante). Portanto, a ocorrência de variações da tensão de suprimento pode provocar falhas durante o processo de soldagem. Este fato é muito provável de ocorrer quando várias máquinas de solda operam fora de sincronismo.

O grande desenvolvimento dos componentes a estado sólido, bem como dos conversores que os utilizam, tem tornado os métodos clássicos de soldagem ultrapassados. Não obstante este fato, deve-se ressaltar que, as máquinas de solda mais comumente encontradas ainda empregam tais métodos clássicos, uma vez que estes implicam em menores custos.

As máquinas de solda modernas, como ilustrado na figura 2.7, estão associadas a controles eletrônicos refinados.

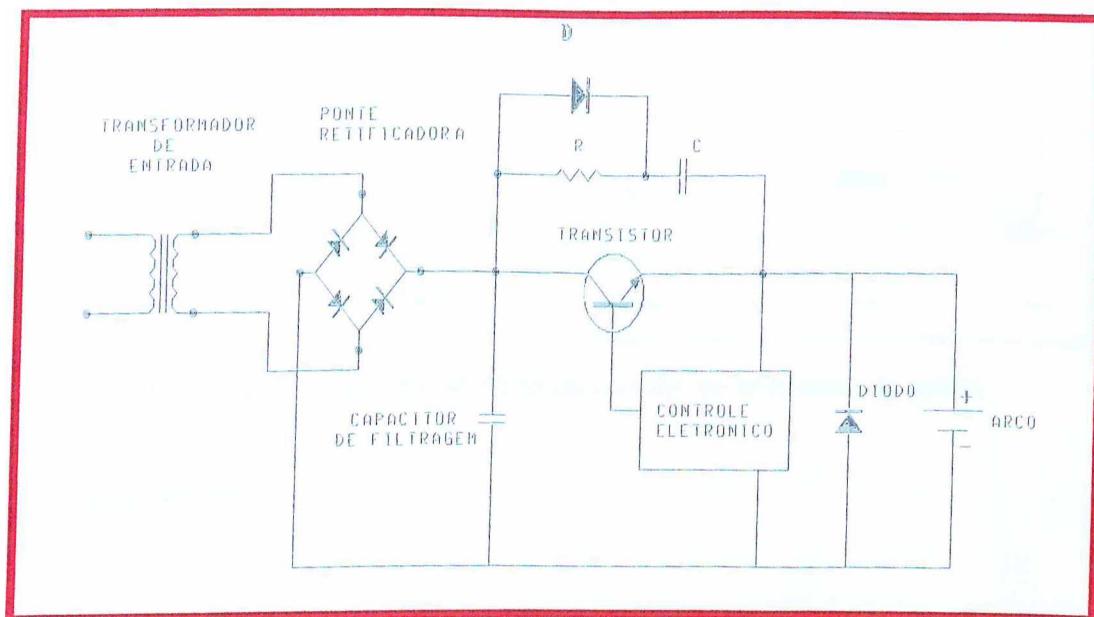


Figura 2.7 – Circuito elétrico de uma máquina de solda elétrica.

O controle grosso da corrente (calor da soldagem) é feito por seleção de taps de um transformador em vazio, e o ajuste fino (corrente constante) é obtido por meio de conversores estáticos com alta frequência de chaveamento. O funcionamento destes dispositivos provoca o aparecimento de flutuações de tensão.

A figura 2.8 apresenta as formas de onda da tensão na entrada e saída da máquina de solda mostrada na figura 2.7.

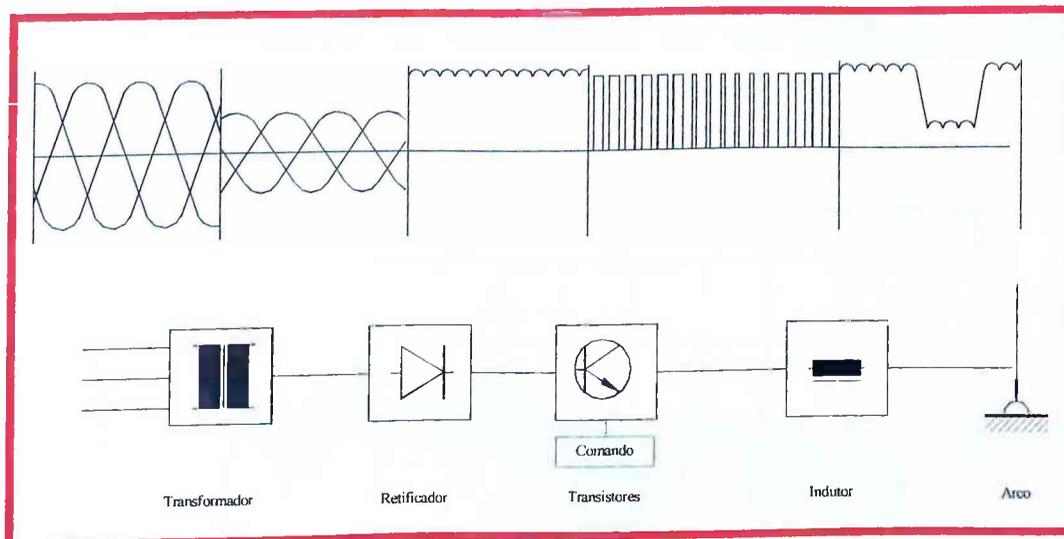


Figura 2.8 – Formas de onda da tensão na máquina de solda.

2.3.3 – Laminadores

Os laminadores são empregados na indústria do aço, do alumínio e de outras ligas metálicas.

Geralmente, estes dispositivos são formados por grandes motores de corrente contínua alimentados por conversores CA/CC. A sua operação é caracterizada por uma movimentação do trem de laminação e o desbaste da peça a ser laminada, onde as etapas possuem durações bem definidas e regulares.

Os impactos causados na rede CA de suprimento são provenientes das variações das potências requeridas pelos motores, somadas às características das pontes conversoras. Todas as vezes que o laminador inverte a movimentação do trem de laminação, ocorrem grandes mudanças na demanda da potência deste conjunto, em intervalos de tempo de poucos ciclos. Isto é, usualmente, acompanhado por um período de aceleração de até 100 ms.

Portanto, os impactos produzidos pela laminação sobre a rede elétrica, são na forma de variações de tensão. Um exemplo de tais oscilações é apresentado na figura 2.9 [12], que mostra o comportamento do valor eficaz

da tensão no barramento de alimentação de um laminador, durante 5 segundos.

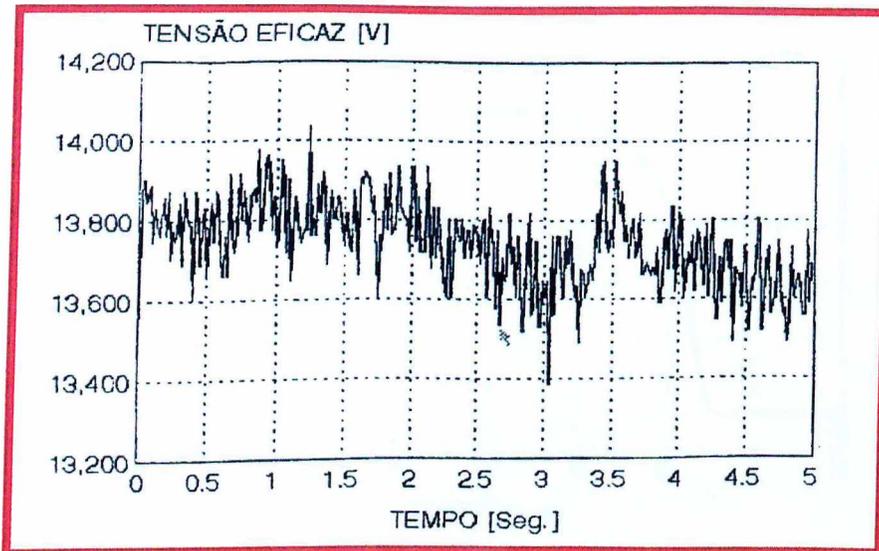


Figura 2.9 – Valor eficaz da tensão no barramento de suprimento de um laminador.

Estas flutuações são oriundas das alterações do torque exigido pelos grandes motores empregados no referido processo.

2.3.4 - Partida de Motores

A maioria das cargas industriais é acionada por motores elétricos, os quais apresentam uma particularidade durante a partida, qual seja, exigem do sistema de alimentação uma corrente transitória várias vezes maior que aquela de regime permanente. Estas correntes, dependendo da “rigidez elétrica” do barramento de suprimento, podem ocasionar flutuações de tensão e, conseqüentemente, o efeito de cintilação luminosa pode ocorrer quando da manifestação destes fenômenos de forma repetitiva.

É importante ressaltar que motores trabalhando em regime intermitente, como é o caso de, elevadores, guindastes, martelos mecânicos, etc., acentuam as flutuações de tensão. A figura 2.10 [12] mostra o valor eficaz da corrente e

da tensão durante a partida de um motor de 970 kVA, conectado a um barramento de 3,3 kV.

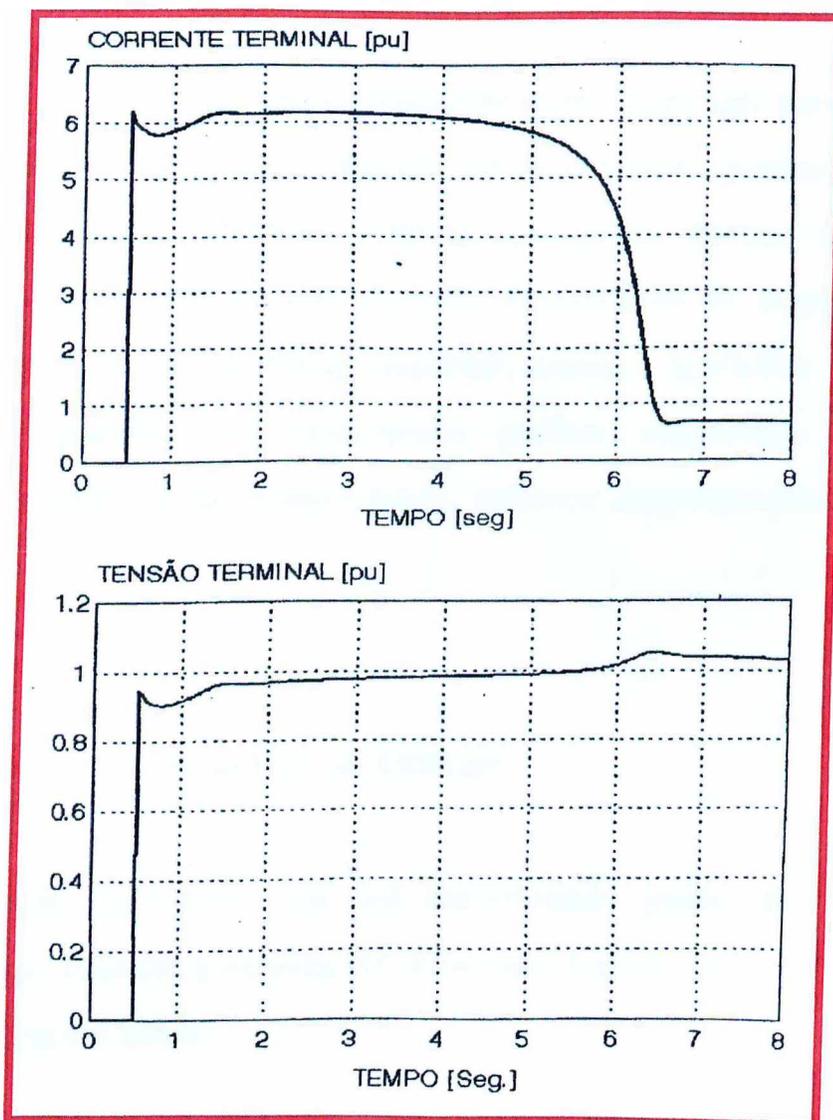


Figura 2.10 – Valor eficaz da corrente e tensão durante a partida de um motor de indução trifásico.

Da figura anterior verifica-se que, a tensão e a corrente, durante a partida do motor, sofrem consideráveis oscilações até a estabilização.

Existem métodos eletromecânicos e eletrônicos para executar a partida de grandes motores, visando reduzir os efeitos da corrente transitória de partida. Com a adoção destes métodos, a partida dos motores não deve representar motivos para maiores preocupações. Entretanto, nem sempre isto ocorre e é comum encontrar problemas de oscilações de tensão em níveis

superiores aos permitidos.

2.3.5 - Outras Cargas

Existem, ainda, outras cargas bastantes específicas, que também podem ocasionar variações de tensão, desequilíbrios e outros efeitos danosos à qualidade da energia elétrica. Alguns exemplos destas cargas são: aceleradores de partículas de alta energia, dispositivos de tração em áreas remotas, máquinas com bobinas supercondutoras, aparelhos de raio-x, tomógrafos e aparelhos de ressonância nuclear magnética. Devido às aplicações mais específicas destas cargas, torna-se desnecessário detalhá-las neste trabalho.

2.4 - CÁLCULO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

A flutuação de tensão, em um determinado ponto de um sistema elétrico, pode ser calculada através de diferentes formas [13]. Na sequência, são descritas algumas delas.

2.4.1 – Circuito Equivalente de Thévenin

Esta metodologia baseia-se na obtenção do circuito equivalente de Thévenin do sistema de suprimento, em relação ao ponto focado. Normalmente, tal ponto corresponde ao local de acoplamento entre a concessionária e a carga elétrica a ser suprida (PAC), onde os consumidores sensíveis ao efeito de flutuações de tensão estão eletricamente acoplados à carga perturbadora. Esta situação é mostrada na figura 2.11.

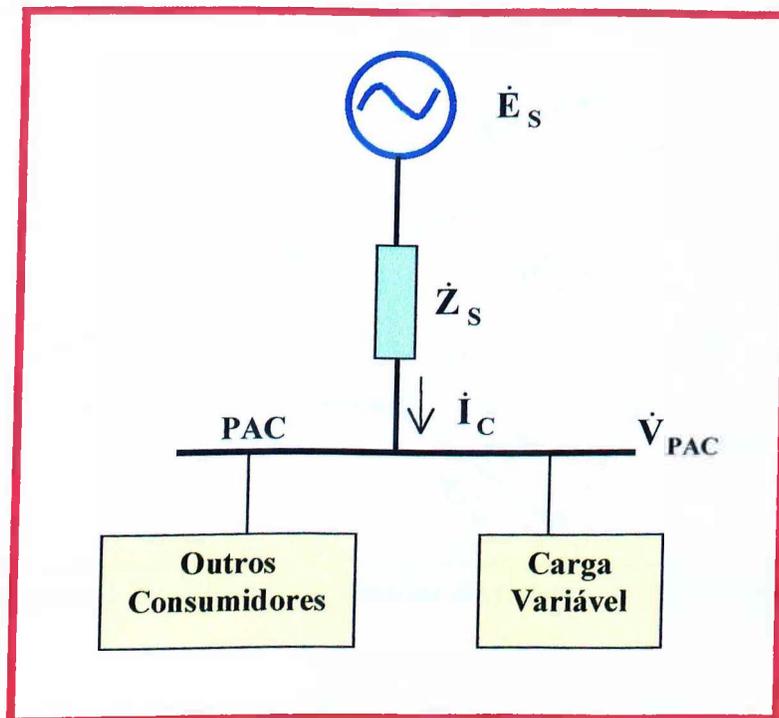


Figura 2.11 – Equivalente de Thévenin do sistema de suprimento.

Da figura 2.11 tem-se:

\dot{E}_s – Tensão de suprimento;

\dot{Z}_s – Impedância equivalente do sistema de suprimento (onde:

$$\dot{Z}_s = R_s + jX_s);$$

\dot{I}_c – Corrente da carga;

\dot{V}_{PAC} – Tensão no PAC.

O diagrama fasorial de tensão correspondente à figura 2.11, tomando como referência a tensão \dot{V}_{PAC} , pode ser observado na figura 2.12.

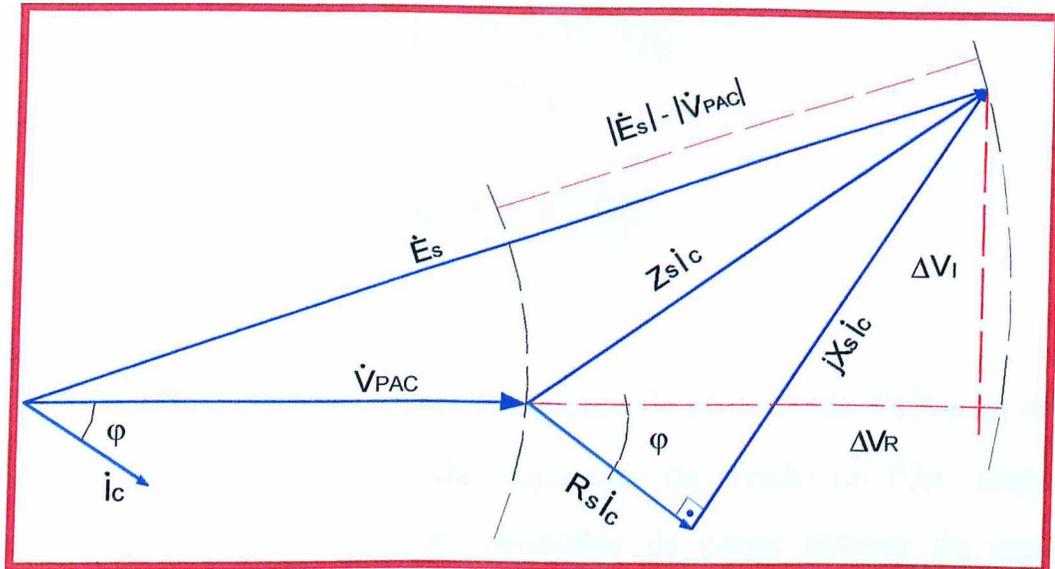


Figura 2.12 – Diagrama fasorial do sistema de suprimento.

No diagrama da figura 2.12 tem-se:

- φ – Ângulo correspondente ao fator de potência da carga;
- ΔV_R – Parcela real da queda de tensão;
- ΔV_I – Parcela imaginária da queda de tensão.

A queda de tensão no PAC é dada pela equação fasorial 2.1

$$\Delta \dot{V}_{PAC} = \dot{Z}_S \cdot \dot{I}_C = (R_S + jX_S) \cdot \frac{(P_C - jQ_C)}{V_{PAC}} \quad (2.1)$$

Onde:

- $\Delta \dot{V}_{PAC}$ – Queda de tensão no PAC
- P_C – Potência ativa da carga;
- Q_C – Potência reativa da carga.

A equação (2.1) pode ser decomposta numa componente real ΔV_R e outra imaginária ΔV_I , como mostram as equações 2.2 e 2.3, respectivamente.

$$\Delta V_R = \frac{R_S \cdot P_C + X_S \cdot Q_C}{V_{PAC}} \quad (2.2)$$

$$\Delta V_I = \frac{X_S \cdot P_C - R_S \cdot Q_C}{V_{PAC}} \quad (2.3)$$

Admitindo-se que a tensão equivalente do circuito de Thévenin seja \dot{E}_S e permaneça fixa, as variações da magnitude da tensão no PAC podem ser diretamente relacionadas com as variações da carga através da expressão (2.4), resultante de (2.2):

$$\Delta V_{PAC} \cong \frac{R_S \cdot \Delta P_C + X_S \cdot \Delta Q_C}{V_{PAC}} \quad (2.4)$$

Para pequenas variações em torno de $V_{PAC} = 1$ p.u, tem-se:

$$\Delta V_{PAC} \cong R_S \cdot \Delta P_C + X_S \cdot \Delta Q_C \quad (2.5)$$

Em determinadas situações, onde, tanto a impedância do sistema supridor quanto da carga são altamente reativas, tem-se que:

$$R_S \cdot \Delta P_C \ll X_S \cdot \Delta Q_C \quad (2.6)$$

Logo:

$$\Delta V_{PAC} \cong X_S \cdot \Delta Q_C \quad (2.7)$$

Da expressão (2.7) pode-se concluir que, a flutuação de tensão é causada essencialmente pela variação da potência reativa da carga.

2.4.2 – Nível de Curto-Circuito

Outra forma de se analisar a flutuação de tensão é através da quantificação da “rigidez elétrica” do barramento de suprimento, ou seja, do nível de curto-circuito do PAC. Assim, considerando a figura 2.11, pode-se calcular tal potência de curto-circuito através da expressão a seguir:

$$S_{CC} = \dot{E}_s \cdot \dot{I}_{CC}^* = \frac{\dot{E}_s^2}{R_s - jX_s} \quad (2.8)$$

Onde:

S_{CC} – Potência de curto-circuito no PAC;

\dot{I}_{CC}^* – Conjugado da corrente de curto-circuito no PAC;

A equação (2.8) pode ser simplificada, caso o sistema em estudo seja essencialmente reativo. Nestas condições:

$$|S_{CC}| \cong \frac{E_s^2}{X_s} \quad (2.9)$$

Substituindo a equação (2.9) na (2.7) e considerando que $E_s = 1$ p.u., obtém-se:

$$\Delta V_{PAC} \cong \frac{\Delta Q_C}{|S_{CC}|} \quad (2.10)$$

Da expressão (2.10) conclui-se que, as flutuações de tensão no PAC serão tanto menores, quanto maior for o nível de curto-circuito do sistema

naquele ponto. Em outras palavras, quanto maior for o nível de curto-circuito de um determinado barramento, menos sensível este será a problemas oriundos das denominadas cargas perturbadoras.

2.5 – OS IMPACTOS PROVOCADOS PELAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

A operação de sistemas elétricos, nos quais encontram-se inseridas cargas perturbadoras, como aquelas citadas anteriormente, pode resultar num perfil de tensão como o do oscilograma hipotético ilustrado na figura 2.13 [8].

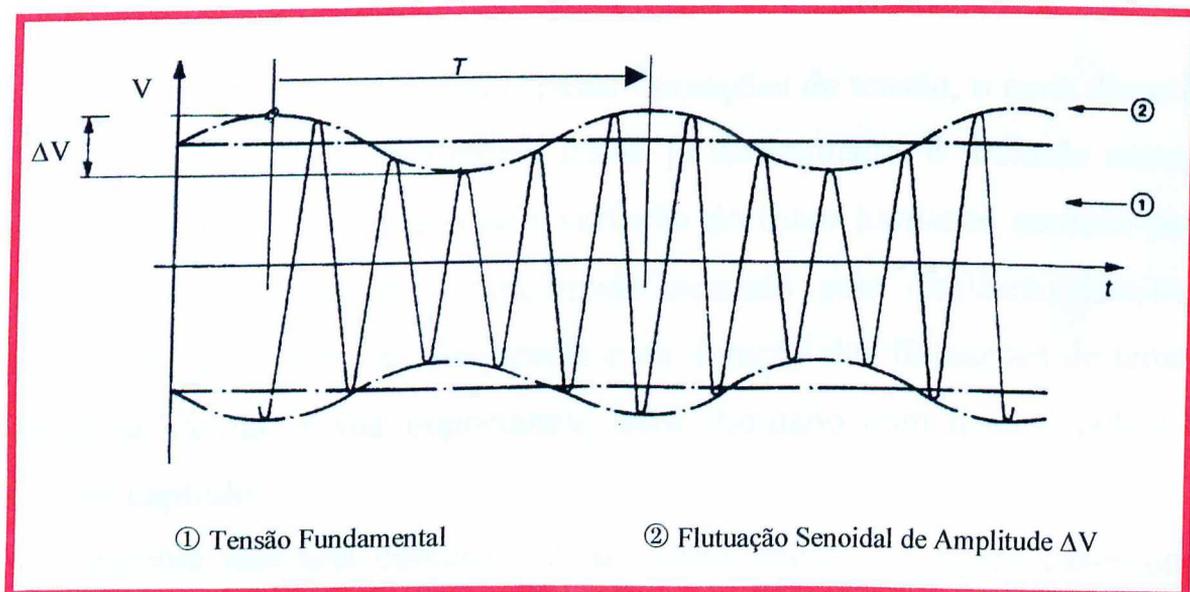


Figura 2.13 - Forma de onda da tensão com modulação senoidal.

Conforme mostra a figura acima, a tensão fundamental encontra-se modulada por um sinal de baixa frequência (ω_f) e de amplitude ΔV . Deve-se ressaltar que, a composição ilustrada no oscilograma mostra uma situação bastante favorável, onde uma única frequência de modulação está presente. Todavia, para situações práticas, a referida composição é bem mais complexa,

pois a modulação será formada por uma onda aleatória determinada pela carga perturbadora.

Como consequência de um suprimento elétrico cuja tensão possui as características ilustradas na figura 2.13, tem-se observado a manifestação de efeitos como:

- *Flicker* ou cintilação luminosa;
- Queda no rendimento de equipamentos elétricos;
- Oscilação de potência e do torque de motores elétricos;
- Interferência nos sistemas de proteção;
- Etc.

Dos impactos provocados pelas flutuações de tensão, o mais discutido é o efeito *flicker*. Este fenômeno, como já mencionado, é definido como o desconforto visual provocado pela variação do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas. A intensidade do incômodo causado pela cintilação luminosa depende da amplitude, da frequência e da duração das flutuações de tensão. Este tema, devido a sua importância, será abordado com mais detalhes no próximo capítulo.

Embora não seja comum, tem-se conhecimento de alguns casos onde flutuações da tensão têm causado o mal funcionamento de motores elétricos. Como exemplo disto, pode-se citar os seguintes fatos ocorridos durante o funcionamento de máquinas elétrica em locais próximos ao circuito de alimentação de cargas perturbadoras [7]:

- O motor que realizava o processo de trabalho de uma tecelagem teve sua velocidade reduzida e, como consequência, o tecido produzido por esta indústria não atendeu aos padrões estabelecidos.

- Os motores que acionavam a prensa de uma indústria tiveram suas velocidades alteradas e os tubos plásticos produzidos por esta fábrica tiveram seus diâmetros alterados.

A referência [7] registra, ainda, distúrbios causados aos espectadores de aparelhos de televisão, os quais foram creditados às flutuações de tensão. Estas perturbações dificilmente modificam a imagem dos televisores, contudo, produzem efeitos no fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas das salas onde os aparelhos de TV estão ligados. Este fato leva os telespectadores a experimentar grandes incômodos.

2.6 – FATORES QUE INFLUENCIAM AS VARIAÇÕES DE TENSÃO

Alguns fatores podem influir nas flutuações de tensão causadas pelas cargas variáveis. Dentre estes encontram-se a relação de curto-circuito, a taxa de variação da corrente e a frequência da flutuação de tensão, detalhados na seqüência.

a) Relação de curto-circuito (R_{CC})

Esta grandeza consiste da razão entre a potência de curto-circuito (S_{CC}), disponível no local onde a carga geradora do distúrbio está ligada, e a potência nominal da carga (S_C).

$$R_{CC} = \frac{S_{CC}}{S_C} \quad (2.12)$$

Nos casos onde a $R_{CC} \geq 50$ as flutuações de tensão, via de regra, não causam problemas de oscilações nos sistemas elétricos. A experiência com fornos a arco tem demonstrado que, se a relação de curto-circuito ficar abaixo de 50, os problemas de *flicker* são bastantes prováveis de ocorrer [14]. A figura 2.14 apresenta as condições de emissão de *flicker* em função da relação de curto-circuito e da potência do forno a arco.

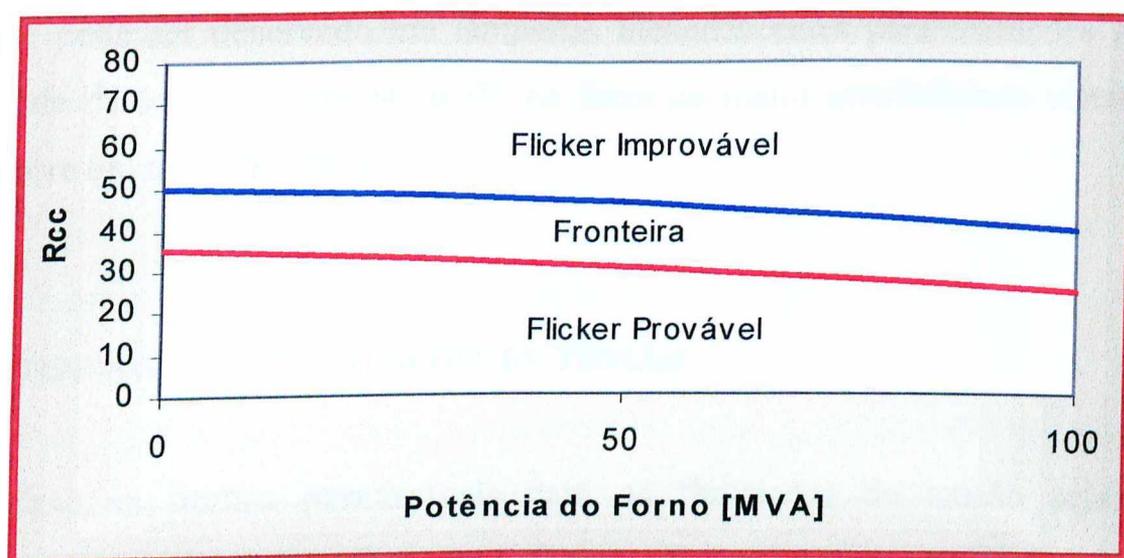


Figura 2.14 Condição de emissão de flicker.

b) Taxa de variação da corrente

A taxa de variação da corrente de linha (di/dt) é o fator que define a queda de tensão sobre as indutâncias série. Portanto, é a responsável pela amplitude das flutuações de tensão. Assim sendo, essa é uma variável que assume extrema importância no uso de conversores eletrônicos, uma vez que estes operam normalmente chaveando corrente.

c) Freqüência da flutuação de tensão

As freqüências das variações de tensão definem o tipo de fenômeno que pode ser excitado. Flutuações na faixa de 0,2 a 2Hz, podem provocar oscilações eletromecânicas. No intervalo até 25Hz podem causar o fenômeno da cintilação luminosa e na faixa entre 15 e 30Hz podem excitar modos de ressonância subsíncrona. Destes efeitos, o mais comum é o da cintilação, uma vez que pode ser observado em lâmpadas incandescentes para variações da amplitude da tensão de apenas 0,3% na faixa de maior sensibilidade visual, que ocorre em torno de 10Hz.

2.7 - ATENUAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

Caso os limites permissíveis para as flutuações de tensão sejam ultrapassados deve-se escolher uma forma adequada para atenuação das mesmas. A escolha da solução mais adequada deve levar em consideração os seguintes aspectos:

- O impacto que as oscilações podem causar em outros consumidores ligados ao sistema elétrico;
- O custo da solução empregada.

Quando possível, a análise do impacto causado por uma carga deve ser efetuada durante o planejamento da instalação da mesma. Em geral, à medida que se aumenta a potência da carga variável, os problemas causados pelas flutuações são incrementados. Em decorrência disto, o custo da solução pode, também, se elevar. Algumas das propostas para se reduzir as flutuações de tensão, a níveis aceitáveis, são abordadas na sequência. Deve-se ressaltar,

todavia, que entre as alternativas disponíveis, a solução aparentemente mais simples e eficaz pode se mostrar anti-econômica, ou vice-versa.

2.7.1 - Redução da Potência da Carga Perturbadora

A solução através da redução da potência solicitada pela carga perturbadora é, normalmente, utilizada como um recurso provisório, enquanto outras providências estão sendo tomadas. Isto porque, esta medida poderá incorrer em redução no faturamento, face à redução da capacidade de produção.

2.7.2 - Fortalecimento do Sistema Supridor

Esta estratégia consiste do aumento do nível de curto-circuito no PAC e pode ser efetuada através das seguintes operações:

- Aumento do número de condutores do alimentador e/ou ampliação da seção transversal do mesmo, afim de reduzir a impedância série;
- Elevação do nível de tensão no PAC, reduzindo, assim, a corrente de linha;
- Redução da reatância equivalente do alimentador através de compensação série capacitiva ou outra forma;
- Instalação de um dispositivo compensador que supra eventuais necessidades de potência reativa, tanto capacitiva quanto indutiva.

As quatro alternativas supra citadas representam soluções tecnicamente simples, porém envolvem elevados custos. No caso da primeira proposta, o custo principal está no aumento ou na troca do número de condutores

existentes. Com relação à segunda opção, o alto investimento envolvido está associado ao maior nível de isolamento requerido. A terceira alternativa implica em gastos relacionados com os sistemas de proteção, os quais devem ser adequados à presença do capacitor série. Além disso, deve-se avaliar, cuidadosamente, a possibilidade de ressonância série. Finalmente, na última proposição encontram-se os valores associados aos onerosos compensadores síncronos, os quais, ainda, demandarão cuidados especiais para a sua operação e manutenção.

2.7.3 - Instalação de Equipamento Regulador de Tensão

A instalação de dispositivos reguladores, equipados com controles adequados e capazes de responder às variações de tensão impostas, caracteriza uma outra forma de redução das referidas flutuações. Neste caso, utiliza-se o princípio da realimentação do erro, resultante da comparação da grandeza a ser controlada com uma referência desejada.

Essa abordagem, utilizando os princípios de controle moderno, permite combinar técnicas de processamento analógica e digital para obter sistemas de compensação rápidos e precisos, a custos cada vez mais acessíveis.

Entre as alternativas de redução das flutuações de tensão, através da instalação de reguladores, tem-se:

- Capacitor Chaveado por Tiristores (CCT);
- Reator Controlado por Tiristores (RCT);
- Soluções Mistas: compensação série e paralela,
- Etc.

Além de prover o controle da tensão, o capacitor chaveado por tiristores tem sido usado, principalmente, devido à sua capacidade de corrigir o fator de

potência, que normalmente é baixo (0,7-0,8) em instalações de fornos a arco. No entanto, o CCT é limitado quanto à sua velocidade de resposta, necessária durante os transitório de chaveamento. Como a corrente solicitada pelo capacitor é proporcional à taxa de variação da tensão, o chaveamento do mesmo deve se dar quando a tensão da rede for próxima aquela de pré-carga do capacitor.

Com relação ao reator controlado por tiristores, este permite tempos de resposta menores que meio ciclo, o que lhe confere uma capacidade maior de compensar as variações rápidas da carga, responsáveis pelo efeito de cintilação. No entanto, por produzir descontinuidade de condução de corrente, introduz harmônicas, cujas magnitudes variam com o ângulo de condução dos tiristores. Em conseqüência disso, o RCT torna-se uma fonte de distorção harmônica, requerendo filtros sintonizados ou, ainda, configurações com maior número de tiristores (pontes CC de 12 ou 24 pulsos), a fim de reduzir o nível das distorções harmônicas produzidas. Outra desvantagem do RCT é que, devido à sua característica indutiva, não contribui para a correção do fator de potência. Isto faz com que a instalação continue requerendo a inserção de capacitores fixos em paralelo, caso haja necessidade.

Para aumentar a eficácia dos compensadores *shunt* (RCT ou CCT), sem ampliar as desvantagens apresentadas, tem-se adotado uma solução mista, que consiste em combinar as compensações paralela e série. Esta solução, no entanto, requer uma capacidade de curto-circuito suficiente, no início do alimentador sobre o qual se pretende fazer a compensação série. Caso contrário, além desta compensação não ser efetiva, as variações da tensão poderão se propagar com mais intensidade para outros pontos do sistema. A vantagem da solução mista pode ser traduzida na redução da capacidade do compensador *shunt*, uma vez que parte das variações é absorvida pela compensação série.

Como exemplo de um equipamento que emprega tal solução mista, pode-se citar o Controlador de Fluxo de Potência Avançado – UPFC (*Unified Power Flow Controller*). Este equipamento, que se enquadra na categoria dos compensadores estáticos avançados por fazer uso de fontes de tensão controlada baseada em pontes inversoras a GTO, provê compensação série e paralela simultaneamente. A compensação de reativos efetuada pelo UPFC ocorre através da monitoração da tensão do barramento CA. Este princípio de funcionamento proporciona, dentre outras características, a correção das flutuações de tensão, objeto deste trabalho [15].

Em síntese, a tabela 2.1 [16] apresenta a comparação entre as vantagens e desvantagens dos principais métodos usados para atenuar as flutuações de tensão.

Tabela 2.1 - Vantagens e desvantagens dos métodos usados para atenuar flutuações de tensão.

Objetivo	Quando se aplica	Vantagens	Desvantagens
Aumentar a capacidade dos condutores	Alimentador próprio	Fácil aplicação, permite expansão	Custo dos condutores
Aumentar o nível de tensão	Disponibilidade local	Fácil execução, aumenta a capacidade	Custo do isolamento
Compensação série	Alimentador longo	Ação eficaz	Risco de ressonância e sobretensões
Compensação síncrona	Geração própria	Aumenta a autonomia	Custo de instalação, operação e manutenção
Capacitor chaveado por tiristores	Insuficiência de reativos	Não produz distorções, corrige o fator de potência	Resposta lenta, rico de ressonâncias
Capacitor controlado por tiristores	Reativos disponíveis	Atua com rapidez e precisão	Produz harmônicos e reduz o fator de potência
Compensação série/paralela	Alimentador longo/forno de grande capacidade	Combina a ação série eficaz com capacidade shunt reduzida	Coordenar dois tipos de compensação
Reator de núcleo saturado	Cargas de pequeno e médio porte	Ação automática	Perdas de adicionais, produz harmônicos e baixo fator de potência

2.8 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo, de caráter didático, procurou apresentar aspectos gerais sobre a conceituação das flutuações de tensão e os princípios de funcionamento das principais cargas geradoras deste tipo de distúrbio.

Foram mostrados de forma sucinta, procedimentos analíticos para o cálculo das oscilações de tensão num determinado ponto de um sistema elétrico. Como já é classicamente conhecido, as expressões obtidas evidenciaram que as flutuações são altamente influenciadas pela potência reativa da carga e pelas reatâncias indutivas do sistema supridor.

Os impactos causados pelas oscilações de tensão foram, então, apresentados juntamente com alguns exemplos de casos reais encontrados nas referências bibliográficas. Além disso, relatou-se os diversos fatores que podem influir nos impactos de uma carga sobre as flutuações de tensão.

Por fim, mostrou-se algumas técnicas utilizadas para atenuar tais distúrbios na tensão, quando as mesmas atingem limites superiores aos recomendados e causam perturbações nos sistemas elétricos.

CAPÍTULO III

O EFEITO FLICKER

3.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O fenômeno *flicker* ou da cintilação luminosa é definido como uma variação do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas. Tais oscilações devem ser perceptíveis ao sistema visual humano e são produzidas por repetitivas alterações da tensão [17].

A cintilação luminosa está diretamente relacionada com a sensibilidade e reação de cada pessoa. Este efeito só pode ser estudado com bases estatísticas, considerando o resultado de experimentos realizados e fundamentados na fisiologia da visão humana, a qual trata o conjunto olho/cérebro como um sistema neuro-fisiológico complexo e não linear. A intensidade do incômodo causado pela cintilação luminosa depende da amplitude, da frequência e da duração das flutuações de tensão.

Desde muito tempo, as companhias fornecedoras de energia elétrica têm verificado que as flutuações de tensão causadas por cargas variáveis ocasionam alterações nos nível de iluminação das lâmpadas incandescentes e, sob certas condições, ocorrem reclamações por parte dos consumidores ligados à rede de baixa tensão [18].

As lâmpadas são, sem dúvida, os equipamentos mais sensíveis às flutuações de tensão, se comparadas com outros equipamentos como: televisores, computadores ou conversores a estado sólido. Além disso, resultados de estudos e testes mostram que as incandescentes são mais

vulneráveis às flutuações de tensão em comparação com outros tipos de lâmpadas [7]. Isto se deve ao fato destas terem seu projeto altamente condicionado a limitações de eficiência e vida útil. Assim, pouco pode ser feito para diminuir a sensibilidade às flutuações de tensão.

Reconhecendo que um sistema elétrico pode, sob certas condições, apresentar a sua tensão eficaz com um perfil oscilatório, as concessionárias de energia estabelecem critérios e procedimentos que possam avaliar a qualidade de serviço quanto ao nível de flutuação de tensão. Estes procedimentos passam pelo controle das perturbações causadas pelas cargas em operação, bem como pela quantificação do impacto da instalação ou da ampliação de cargas que venham a causar variações da tensão. Com base nestas recomendações, torna-se possível o estabelecimento de medidas corretivas tanto para sistemas já em operação, como também para aqueles ainda em fase de planejamento.

Tendo em vista o exposto e que o efeito *flicker* apresenta-se como o principal distúrbio causado pelas flutuações de tensão, este capítulo tem por meta apresentar as seguintes contribuições:

- Conceituar o fenômeno *flicker*, destacando a sua natureza e consequências;
- Abordar os principais métodos de avaliação da cintilação luminosa;
- Apresentar os critérios nacionais e internacionais mais relevantes à regulamentação da matéria.

3.2 - O EFEITO FLICKER

Como dito anteriormente, o comportamento anormal das lâmpadas incandescentes tem se mostrado como o efeito mais significativo decorrente das flutuações de tensão, tendo em vista os impactos provocados sobre o sistema nervoso dos seres humanos. O filamento metálico deste tipo de lâmpada, como se sabe, é aquecido pela passagem da corrente elétrica, o que provoca a emissão de luz. Assim, a oscilação luminosa será uma função das variações presentes na tensão de suprimento. O olho humano atua como sensor da luz emitida pela lâmpada e experimenta situações de conforto a desconforto visual, conforme determina a referida tensão.

A figura 3.1 apresenta o inter-relacionamento entre as variações de tensão e o fluxo luminoso emitido por lâmpadas incandescentes. Os resultados desta figura mostram o desempenho de lâmpadas de potências de 40, 60 e 100 W com tensão nominal igual a 110 V. Deve-se ressaltar que, comportamentos semelhantes foram também obtidos para lâmpadas de 220 V [13].

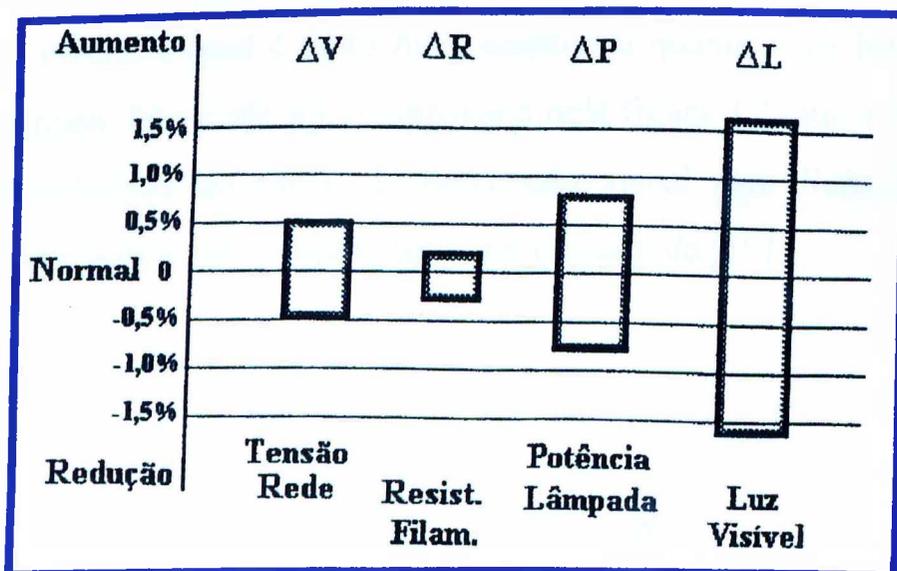


Figura 3.1 - Efeitos de pequenas variações de tensão sobre o desempenho das lâmpadas incandescentes.

Analisando-se a figura 3.1 observa-se que, para variações de tensão de $\pm 0,5\%$, a resistência do filamento oscila na faixa de $\pm 0,25\%$, a potência da lâmpada varia de $\pm 0,75\%$ e, caracterizando uma alteração mais significativa, o fluxo luminoso oscila em $1,75\%$.

Enquanto que as lâmpadas incandescentes sofrem grandes influências das flutuações de tensão, mostrando-se sensíveis às mesmas, as fluorescentes são afetadas em menor intensidade. Tal afirmativa se deve ao fato de que, algumas investigações realizadas com vários tipos de lâmpadas fluorescentes submetidas a oscilações de tensão de $\pm 0,5\%$, mostram que o fluxo luminoso varia entre $\pm 0,4\%$ e $\pm 0,9\%$.

Pode-se ainda acrescentar que, as condições de *flicker* só são alcançadas quando as variações de tensão ocorrem em baixas frequências. Isso porque, para altas frequências de oscilação, a inércia térmica do filamento torna-se um fator limitante para as condições de variação de luminosidade. Assim sendo, o aumento da resistência do filamento com a temperatura, serve como amortecimento parcial do efeito *flicker*.

Além da constatação acima, pode-se ainda verificar que a percepção da variação luminosa ocasionada pela flutuação de tensão é dependente da sensibilidade visual, a qual é tanto mais acentuada quanto mais brusca for a variação luminosa. Isto pode ser comprovado pela figura 3.2, que mostra duas curvas representativas do limiar de percepção visual para flutuações com diferentes modulações, quais sejam, senoidal e quadrada [19].

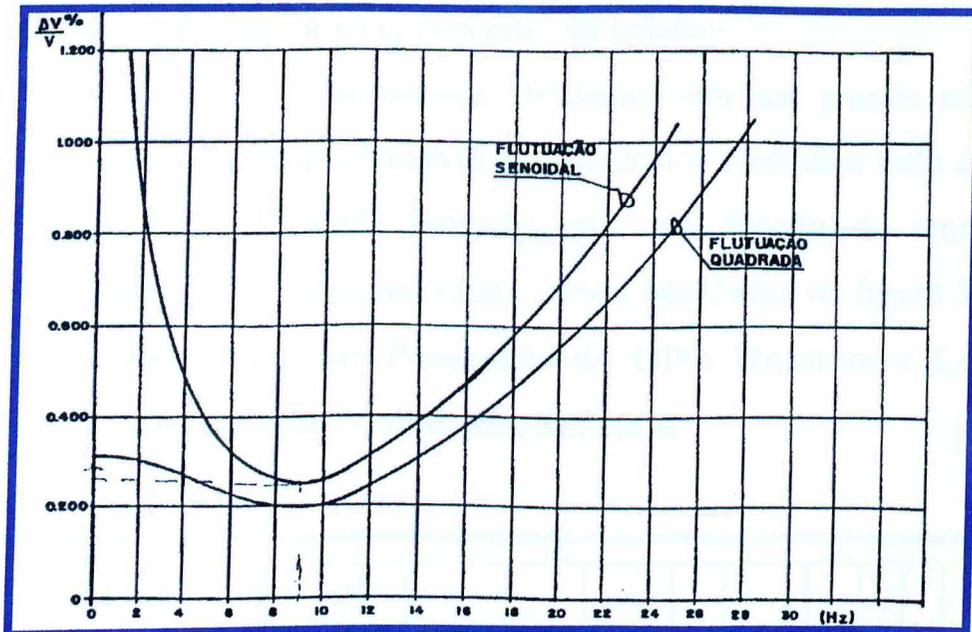


Figura 3.2 - Limiar da percepção visual para flutuações de tensão associadas às modulações senoidal e quadrada.

Os resultados mostrados na figura 3.2 indicam que, o limiar de percepção humana relativo às oscilações de tensão com modulação quadrada, é inferior àquele referente às variações com modulação senoidal. Isso se justifica pois, para as variações graduais (senoidais), o que ocorre é uma acomodação visual, provocando, assim, um nível de incômodo de menor intensidade e tolerável pelo ser humano. Além disso, verifica-se que, para ambos os tipos de modulação, as menores amplitudes de variação de tensão perceptíveis possuem frequências na faixa entre 8 e 10 Hz. À medida que a frequência das oscilações aumenta são necessárias maiores variações na amplitude da tensão nominal para que as mesmas sejam notadas.

O fenômeno fisiológico induzido, no olho humano, pela flutuação do fluxo luminoso provoca um incômodo que varia de um indivíduo para outro. Baseando-se nisso é que, não se consegue definir com exatidão um critério geral e rigoroso que possa estabelecer um limite, além do qual as referidas flutuações se tornam irritantes. Entretanto, verificou-se que o incômodo visual sobre o olho humano depende, ao mesmo tempo, da amplitude e da frequência

da variação do fluxo luminoso e, portanto, da tensão.

Após observações sistemáticas efetuadas com um grande número de pessoas, foi possível traçar as curvas de distúrbios causados pela tensão de alimentação de uma lâmpada incandescente em função da amplitude e frequência de variação da mesma. Essas curvas são dadas na figura 3.3 [12] e denominadas por: **Limiar de Percepção do Olho Humano** e **Limiar de Irritação para Tensão com Modulação Senoidal**.

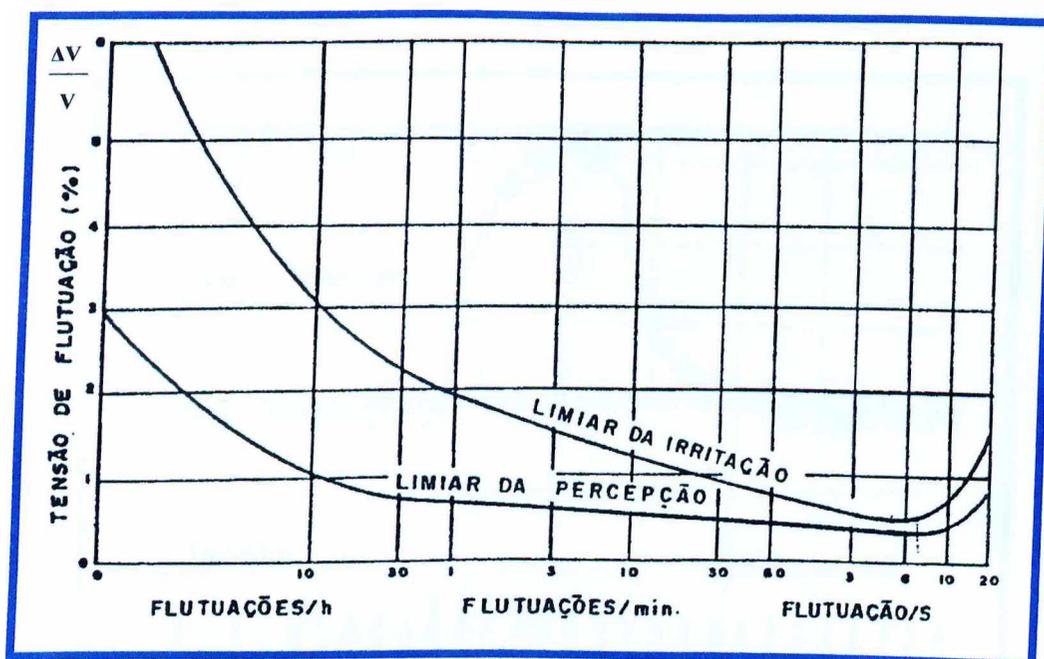


Figura 3.3 - Curvas limites de visibilidade e irritação do olho humano devido às flutuações de tensão sobre lâmpadas incandescentes.

Assim como constatado através da figura 3.2, a figura 3.3 indica que o incômodo máximo se verifica para uma frequência na faixa de 8 a 10 Hz.

Do exposto conclui-se que, o *flicker* ou cintilação luminosa, caracteriza-se por ser um efeito subjetivo, associado à perceptibilidade do olho humano às variações de intensidade luminosa provocadas por flutuações da tensão de fornecimento sobre sistemas de iluminação. Ainda, as variações luminosas são percebidas pelo olho humano quando ocorrem numa faixa de frequências compreendidas entre 0 e 30Hz.

3.3 – SENSIBILIDADE DE DIVERSOS TIPOS DE LÂMPADAS ÀS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

Conforme observado anteriormente, as lâmpadas incandescentes quando submetidas a flutuações de tensão, amplificam as oscilações da luz emitida por elas. Esta amplificação é denominada por fator de ganho, o qual é definido como a relação entre as variações de fluxo luminoso e de tensão. A questão é fisicamente ilustrada pela figura 3.4 [7].

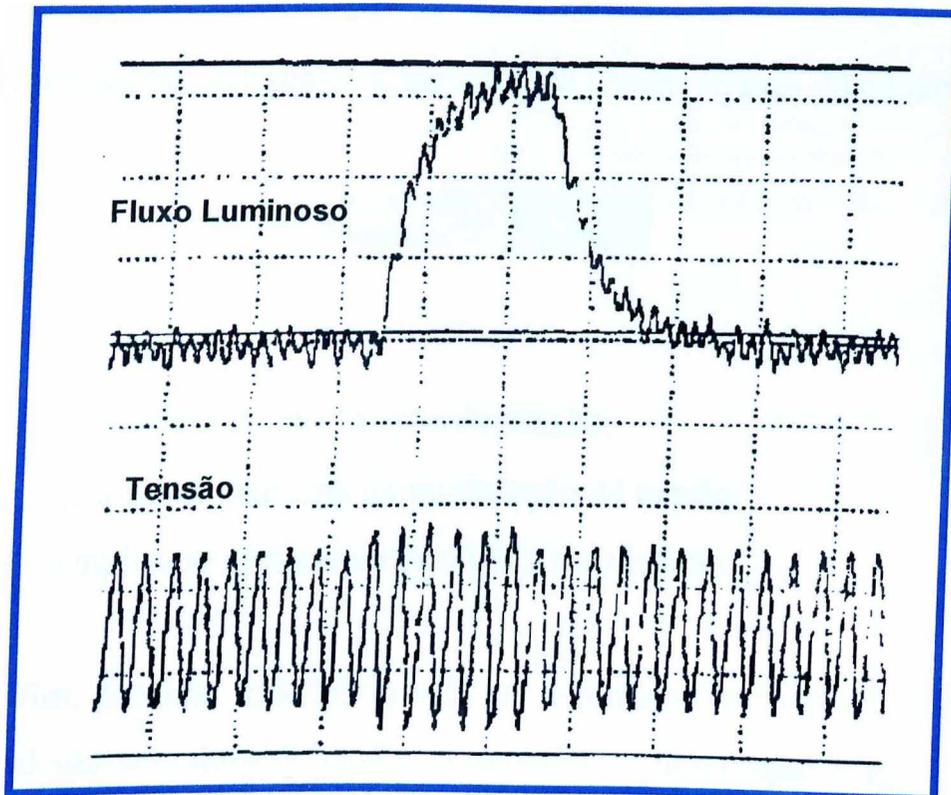


Figura 3.4 - Variação do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas incandescentes em função da flutuação da tensão.

O procedimento para cálculo do fator de ganho (FG) tem início colocando-se dentro de uma câmara escura a lâmpada a ser testada. Através do controle da amplitude e da frequência das flutuações da tensão de alimentação do dispositivo sob ensaio, mede-se o fluxo luminoso emitido pela lâmpada usando-se um fotômetro, calibrado para simular o olho humano. A

partir dos valores medidos, a variação da luz emitida é calculada através da equação (3.1).

$$\Delta RI = RI_{\max} - RI_{\min} \quad (3.1)$$

Onde:

ΔRI - Variação do fluxo luminoso emitido pela lâmpada sob teste;

RI_{\max} - Fluxo luminoso máximo emitido pela lâmpada sob ensaio;

RI_{\min} - Fluxo luminoso mínimo emitido pela lâmpada sob ensaio.

Na sequência, calcula-se a variação da tensão através da equação 3.2.

$$\Delta V = V_{\text{RMSmax}} - V_{\text{RMSmin}} \quad (3.2)$$

Onde:

ΔV - Amplitude da modulação da tensão;

V_{RMSmax} - Amplitude máxima da modulação da tensão;

V_{RMSmin} - Amplitude mínima da modulação da tensão.

Por fim, fazendo uso das grandezas calculadas através das expressões 3.1 e 3.2 calcula-se o fator de ganho, utilizando-se da equação 3.3.

$$FG = \frac{\Delta RI\%}{\Delta V\%} \quad (3.3)$$

No caso da variação relativa do fluxo luminoso ser maior que a variação percentual da flutuação de tensão diz-se que, a lâmpada tem um efeito ampliador da cintilação luminosa ou um fator de ganho maior que a unidade.

A figura 3.5 [7] compara os fatores de ganho das lâmpadas incandescentes (120V e 230V) e das fluorescentes eletrônicas.

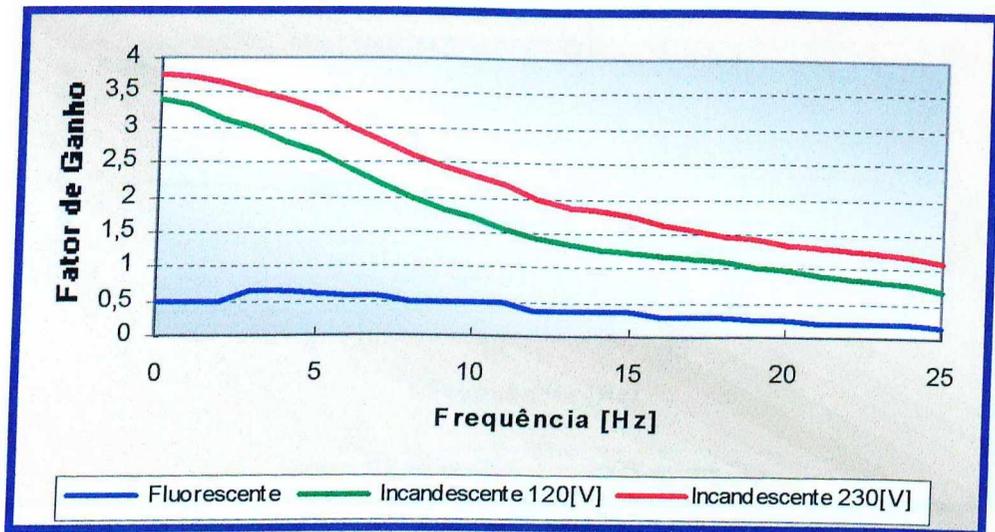


Figura 3.5 – Fator de ganho das lâmpadas incandescentes de 120V, 230V e fluorescentes eletrônicas.

Da figura acima verifica-se que, o ganho das lâmpadas incandescentes diminui para as altas frequências de modulação, devido à inércia térmica do filamento. Além disso, uma vez que a lâmpada de 230V possui um filamento mais fino, seu FG é maior se comparado com a de 120V. Devido a isso, a lâmpada de maior tensão nominal produz um maior nível de flicker. Já as lâmpadas fluorescentes eletrônicas apresentam FG praticamente constante e menor que a unidade, o que faz com que elas praticamente não exibam o efeito da cintilação.

Similarmente, quando as flutuações acontecem gradualmente (modulação senoidal) ao invés de instantaneamente (modulação retangular) diferentes respostas em flicker são observadas.

O uso de *dimmers* em lâmpadas incandescentes aumenta substancialmente a susceptibilidade destas luminárias às flutuações de tensão[20]. A figura 3.6 mostra o comportamento do fator de ganho de uma lâmpada incandescente para diversas posições do *dimmer* eletrônico. Deve-se

ressaltar que, a posição de 0% equivale ao comportamento da lâmpada sem a presença deste dispositivo.

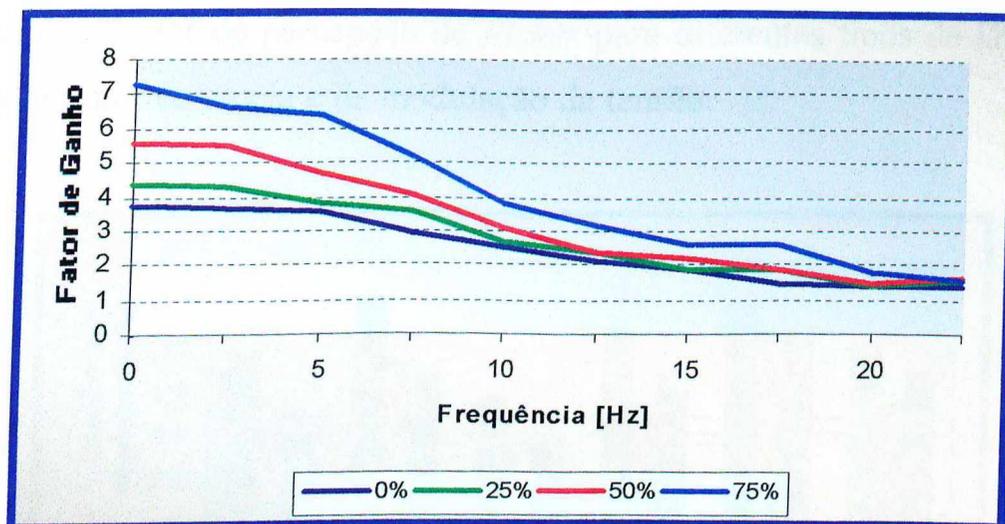


Figura 3.6 – Fator de ganho das lâmpadas incandescentes de 60W.

A partir da figura anterior constata-se que, o FG varia com a frequência da modulação e com a posição do *dimmer*, sendo que, a maior intensidade de *flicker* ocorre quando tal dispositivo está posicionado em 75%.

Testes recentes têm demonstrado que o aparecimento de cintilação luminosa em lâmpadas fluorescentes pode acontecer devido a:

- Harmônicos de amplitude variável;
- Inter-harmônicos;
- Harmônicos de fase variável;
- Chaveadores de onda.

Todavia, tais causas se enquadram em um outro campo para estudos do fenômeno da cintilação, o qual não será abordado em detalhes neste trabalho.

Os testes, cujos resultados estão mostrados nas figuras 3.7 e 3.8, extraídos da referência [7], foram realizados com o objetivo de conhecer a

performance de uma variedade de diferentes tipos de modernas lâmpadas eletrônicas.

A figura 3.7 mostra o resultado de um ensaio realizado a fim de comparar o limiar de percepção de *flicker* para diferentes tipos de lâmpadas, em função da frequência e da modulação da tensão.

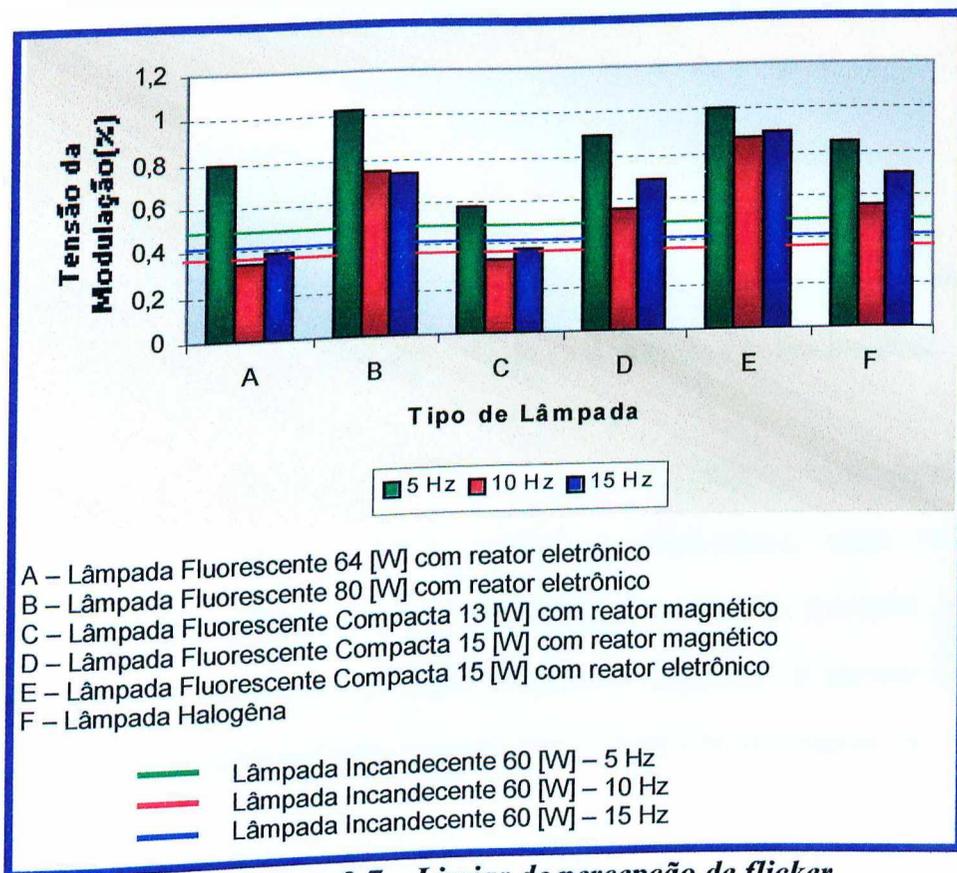


Figura 3.7 – Limiar de percepção de flicker.

Na figura 3.7 pode-se observar que, o limiar de percepção de todas as lâmpadas testadas depende da frequência de modulação da tensão, e quase todos têm valores superiores aos da lâmpada incandescente de 60W.

A figura 3.8 mostra a variação do fator de ganho, em 8Hz, de 23 diferentes modelos de lâmpadas fluorescentes compactas (CFL). Os modelos F e Q possuem reator magnético, já os demais são do tipo reator eletrônico.

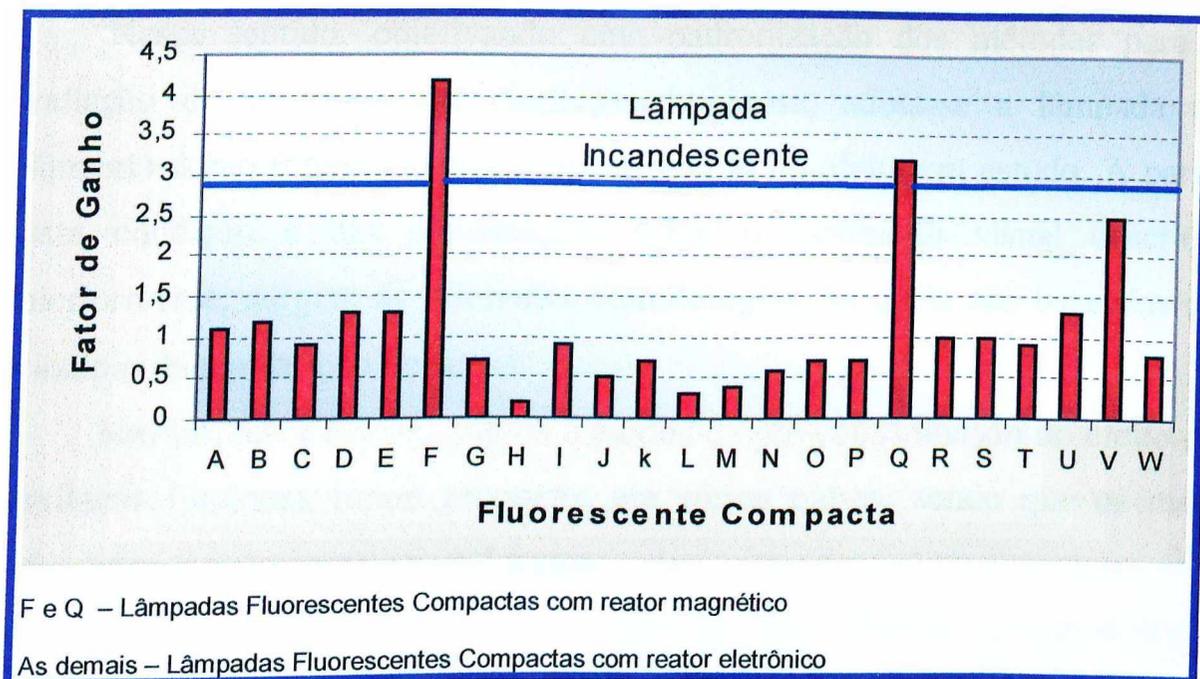


Figura 3.8 – Fator de ganho de diversas lâmpadas fluorescentes.

Da figura 3.8 pode-se verificar que, as luminárias que fazem uso de reator eletrônico apresentam uma melhor *performance*, uma vez que as mesmas apresentam baixo FG se comparadas com as de modelo F e Q. Na mesma figura, percebe-se que o fator de ganho das CFL é menor que aquele referente a uma lâmpada incandescente, que é aproximadamente de 2,85.

3.4 – MEDIÇÃO DE FLICKER

A proliferação dos equipamentos causadores de flutuações de tensão, responsáveis pelo aparecimento do efeito *flicker*, e as preocupações crescentes com seus efeitos trazem a necessidade de se estabelecer métodos e normas para medição e avaliação deste fenômeno, a fim de que exista uma convivência harmoniosa entre os equipamentos perturbadores e aqueles sensíveis às perturbações de tensão.

Nesse sentido, objetivando uma padronização dos métodos para a avaliação do fenômeno de cintilação luminosa, adota-se a lâmpada de filamento como referência para a quantificação do efeito em estudo. A partir desta condição e das constatações sobre o incômodo visual descritas anteriormente, surgem as diferentes metodologias, as quais são baseadas no princípio da modulação de sinais.

Nas últimas décadas, muitos métodos de pré-determinação do efeito de cintilação luminosa foram propostos em vários países, sendo que os mais difundidos a nível internacional foram:

- **Método Britânico** – proposto pela ERA – “*Electrical Research Association*” [21]
- **Método Francês** – apresentado pela “*Electricité de France*” [22];
- **Método Padrão ou Internacional** – proposto pela UIE – “*União Internacional de Eletrotermia*” [23] e aceito pela IEC – “*International Electrotechnical Commission*”.

As diferentes estratégias de avaliação do efeito *flicker* possuem filosofias distintas, porém, alguns fundamentos comuns podem ser destacados:

- A lâmpada de filamento, devido às características anteriormente discutidas, é adotada como referência para a quantificação do referido efeito;
- Os procedimentos baseiam-se no princípio de modulação de sinais;
- Os métodos Britânico e Padrão utilizam teorias estatísticas, considerando o caráter aleatório das flutuações de tensão.

A proposta francesa e aquela denominada por Padrão valorizam as frequências críticas existentes no sinal modulante, as quais são causadoras de maior incômodo ao olho humano.

Os métodos Britânico e Francês encontram-se amplamente detalhados nas referências [11] e [12] e, como estão praticamente em desuso, não serão detalhados neste trabalho.

Outros países, como Alemanha e Japão, também possuem suas próprias metodologias, porém, nenhuma delas apresenta, na atualidade, uma aceitação internacional tão expressiva quanto o método Padrão. Levando este fato em consideração é que, a seguir, apresenta-se em detalhes a metodologia desenvolvida pelo mesmo.

3.4.1 - Método Padrão UIE

Em julho de 1982 foi publicado pela União Internacional de Eletrotermia – UIE o estudo "*UIE Flickermeter - Functional and Design Specifications*" [23] e que, mais tarde, passou a se constituir na metodologia recomendada internacionalmente pela *IEC - International Electrotechnical Commission*. Até essa época existiam diferentes formas de avaliar o efeito da cintilação luminosa, provocada pelas cargas elétricas variáveis.

A necessidade de uma padronização internacional tornou-se evidente com o surgimento dos primeiros compensadores estáticos tiristorizados tipo RCT – Reatores Controlados por Tiristores e CCT – Capacitores Chaveados por Tiristores. Tais equipamentos destinados à compensação de reativos, que começaram a surgir nos anos 70, possuem também um alto potencial para a redução do efeito *flicker*. Porém, devido às diferentes normas vigentes nos países da Europa, Ásia e América, resultados e benefícios distintos eram

apurados quando se tratava de quantificar a eficácia desses compensadores estáticos.

Por essa razão a UIE, através do seu comitê de estudo de distúrbios, promoveu, a partir de 1980, um levantamento dos principais métodos [23] utilizados para quantificar o nível de *flicker*, apontando as vantagens e desvantagens de cada um deles e, ainda, elaborou a proposta que foi publicada em 1982.

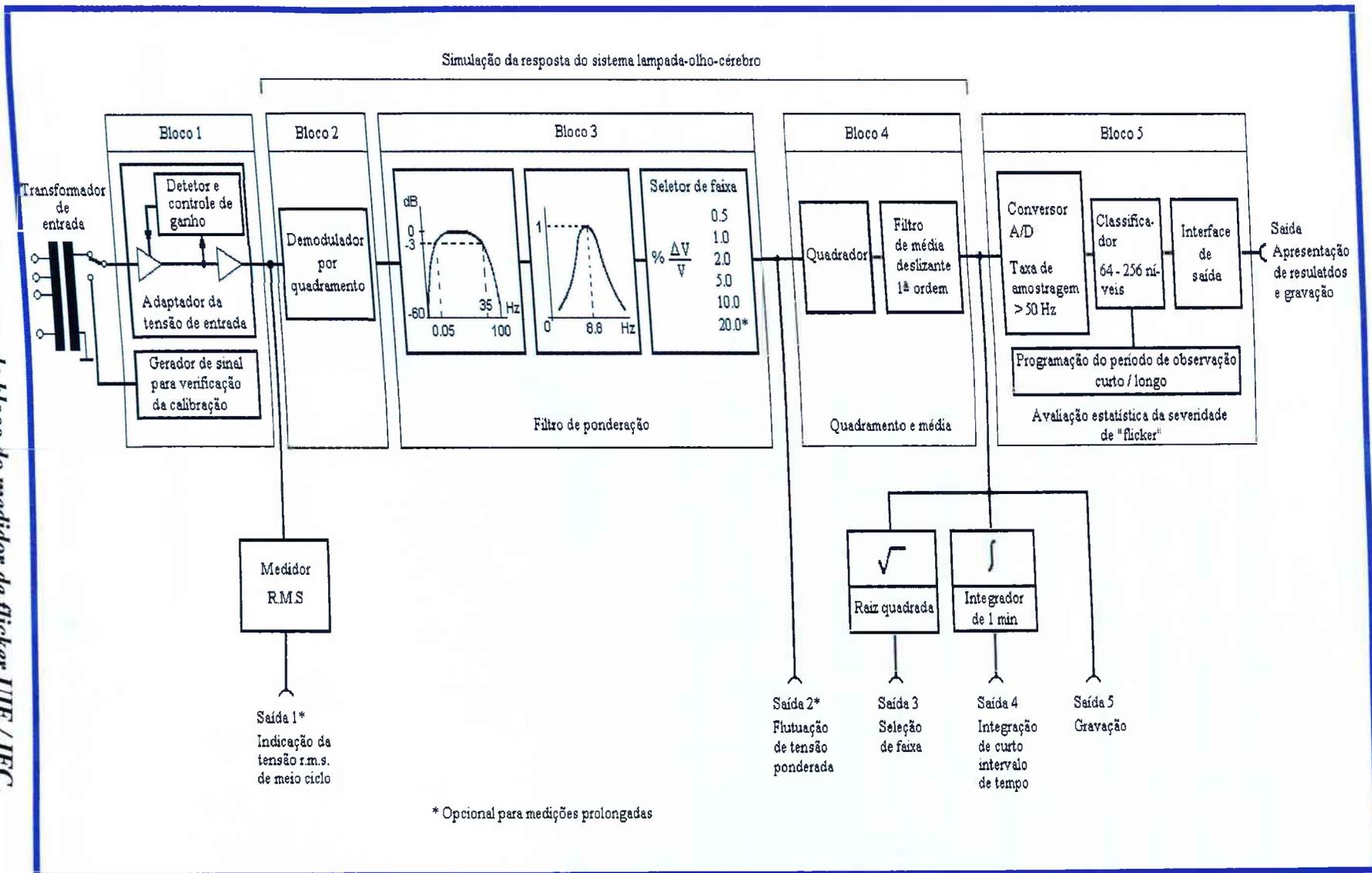
Quando essa nova metodologia foi elaborada, buscando agregar as características essenciais dos diversos métodos em vigor na época, tomou-se o cuidado de sugerir que cada país fizesse uma implementação própria desse processo para que pudessem ser comparados os resultados apurados em cada local. Vários testes comparativos foram realizados em 1983 e 1984, [24], [25], mostrando coerência suficiente para validar a nova proposta, que passou a ser adotada pela IEC em 1986 [26]. Tal estratégia, obtida por um consenso internacional, foi denominado por Método Padrão ou Internacional.

A metodologia internacional UIE / IEC realiza a avaliação da cintilação luminosa a partir das flutuações de tensão da rede fazendo uso do medidor de *flicker* mostrado na figura 3.9 [27]. Tal equipamento é capaz de simular o sistema lâmpada/olho/cérebro e, assim, avaliar o mal estar fisiológico causado a um observador humano submetido às variações do fluxo luminoso.

O medidor de *flicker* mostrado na figura 3.9 é formado por cinco estágios, a saber:

- **Estágio 1:** Adaptação da tensão de entrada;
- **Estágio 2:** Demodulação do sinal adaptado;
- **Estágio 3:** Ponderação em frequência;
- **Estágio 4:** Média quadrática;
- **Estágio 5:** Tratamento Estatístico.

Figura 3.9 - Diagrama de bloco do medidor de flicker UIE / IEC.



3.4.1.1 Estágio 1: Adaptação da tensão de entrada

Uma vez que existem diferentes níveis padronizados para alimentação em baixa tensão, torna-se necessário normalizar as variações de tensão e expressá-las em termos percentuais da tensão de referência. Isso permite, entre outras vantagens, comparar diretamente os efeitos das mesmas variações relativas, observadas em diferentes níveis de tensão.

O bloco de adaptação da tensão de entrada, previsto no diagrama da figura 3.9, efetua a normalização desta grandeza medida, tomando-se como base o valor obtido através de um processador de média móvel com tempo de acomodação de 1 minuto. Isto significa que, as variações lentas, cujo tempo de acomodação seja maior que 1 minuto, não contribuem para o cálculo de *flicker*. No caso das oscilações mais rápidas, estas são expressas em termos percentuais da tensão da referência móvel, como mostra a equação 3.4

$$\Delta V\% = \frac{V - V_{ref}}{V_{ref}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

Onde :

$\Delta V\%$ – Variação percentual da tensão;

V – Tensão atual da rede;

V_{ref} – Tensão de referência do último minuto.

3.4.1.2 Estágio 2: Demodulação do sinal adaptado

Depois de normalizado pela referência móvel, o sinal de tensão é demodulado para extrair o sinal modulante, responsável pelas flutuações em questão. Uma vez que a modulação não é efetivamente perfeita, devido à

assimetria das variações dos ciclos positivos e negativos da onda portadora de 50/60Hz, sugere-se que a demodulação seja realizada através de quadramento do sinal. Esse processo de conversão simula a forma como são produzidas as variações do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas incandescentes, sujeitas às flutuações da tensão.

Para ilustrar o processo de demodulação, considere-se uma onda modulada senoidalmente, representada pela função mostrada na equação 3.5.

$$v(t) = V_p \cdot \cos(\omega_p t) [1 + m \cdot \cos(\omega_m t)] \quad (3.5)$$

Onde:

- $v(t)$ = Tensão instantânea modulada;
- V_p = Tensão de pico da portadora sem modulação;
- ω_p = Frequência da onda portadora;
- ω_m = Frequência da onda modulante;
- m = Índice de modulação ($0 \leq m \leq 1$).

Elevando-se ao quadrado o sinal de tensão modulado, tem-se como resultado a expressão apresentada na equação 3.6.

$$v^2(t) = \frac{V_p^2}{2} (1 + \cos(2\omega_p t) [1 + 2m \cos(\omega_m t) + m^2 \cos^2(\omega_m t)]) \quad (3.6)$$

Onde:

- $\frac{V_p^2}{2}$ = Valor médio;
- $\frac{V_p^2}{2} \cos(2\omega_p t)$ = Termo de dupla frequência;

$$2m \frac{V_p^2}{2} \cos(\omega_m t) = \text{Termo modulante.}$$

Os demais termos da equação (3.6) tornam-se desprezíveis para valores de modulação abaixo de 3%. Eliminando-se o nível médio e a dupla frequência da portadora através de filtragem, resulta como sinal filtrado a equação 3.7 a seguir:

$$v_f(t) = mV_p^2 \cos(\omega_m t) \quad (3.7)$$

Onde:

$v_f(t)$ – Sinal modulante.

Dividindo a equação 3.7 pela amplitude da portadora resulta na expressão 3.8, que expressa o sinal modulante normalizado.

$$\Delta v(t) = \frac{v_f(t)}{V_p} = mV_p \cos(\omega_m t) \quad (3.8)$$

Deve-se observar que mV_p representa a amplitude do sinal modulante, o qual corresponde à metade da variação da amplitude da tensão.

3.4.1.3 Estágio 3: Ponderação em frequência

Após demodular e filtrar os níveis médios (CC) e a dupla frequência ($2\omega_p$), o sinal remanescente é ponderado através de um filtro que representa a sensibilidade visual às variações luminosas emitidas por uma lâmpada

incandescente padrão de 230V/60W, usada como referência pela UIE para o sistema europeu. A curva de ponderação utilizada está mostrada na figura 3.10, e representa a sensibilidade média dos observadores submetidos ao fenômeno da cintilação, produzida de forma controlada em laboratório.

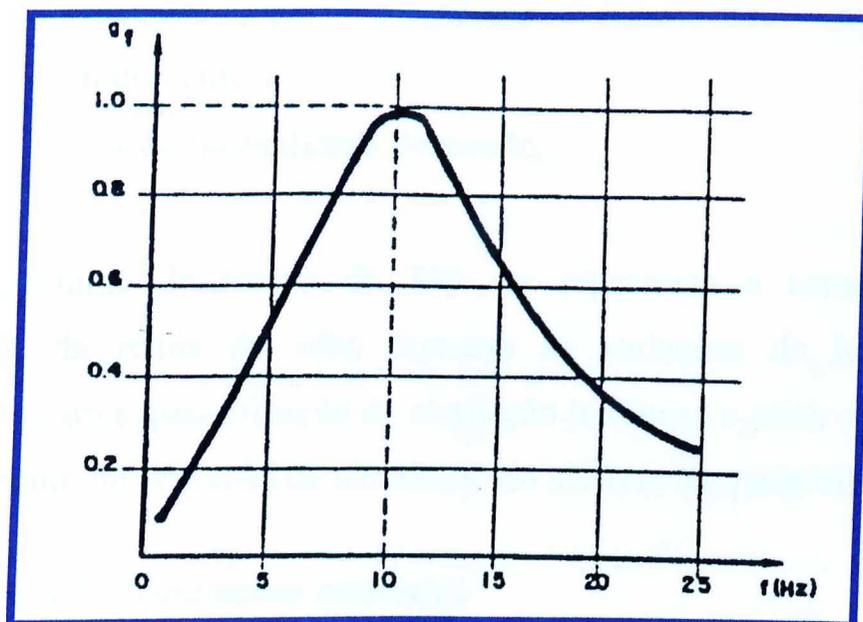


Figura 3.10 Curva de ponderação para lâmpada incandescente 230V/60W.

Na figura acima, a curva está normalizada para a frequência de maior sensibilidade (8,8 Hz). Para frequências próximas de zero ou acima de 30Hz os níveis de sensibilidade de *flicker* tornam-se praticamente desprezíveis.

3.4.1.4 Estágio 4: Média quadrática

Para simular o processo não linear de conversão das flutuações de tensão em variação da energia luminosa percebida pelo olho humano, calcula-se o valor quadrático médio das flutuações ponderadas. O sinal resultante dessa média é designado como sensação instantânea de *flicker* S_f , expresso pela equação 3.9.

$$S_f = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [a_f \cdot \Delta v(t)]^2 dt \quad (3.9)$$

Onde :

T = Constante de tempo para média móvel (t=300ms);

a_f = Ponderação em frequência dependendo da lâmpada incandescente;

Δv(t) = Flutuação normalizada de tensão.

A constante de tempo de 300 ms representa a característica de acomodação da retina do olho humano às variações de luminosidade. Justifica-se assim a quantificação da cintilação luminosa a partir das variações de tensão como um processo de simulação do sistema lâmpada/olho/cérebro.

3.4.1.5 Estágio 5: Tratamento estatístico

A grandeza sensação instantânea de *flicker* S_f assume a forma de um sinal positivo e variável, que tende para zero quando a tensão de entrada (50/60Hz) possui amplitude constante. Devido ao ganho unitário do filtro de ponderação em torno de 8,8 Hz, as flutuações nessa frequência não são atenuadas e portanto produzem cintilação luminosa máxima. Para as demais frequências as variações de tensão são atenuadas em diferentes graus, dependendo do número de ocorrências dos eventos. Como, na prática, as variações de tensão podem variar tanto em amplitude como em frequência, a sensação instantânea S_f varia aleatoriamente, requerendo um tratamento estatístico para sua análise.

O tratamento estatístico consiste em obter o histograma dos níveis de ocorrência de S_f, a partir do qual se calcula a curva ou Função de Probabilidade Cumulativa - FPC [12]. A partir dos valores dessa curva são

calculados os indicadores de *flicker* de curta duração (P_{ST}) e de longa duração (P_{LT}) cujos valores serão usados para avaliar a severidade do *flicker* analisado. Uma abordagem detalhada a respeito do cálculo destes índices é efetuada na sequência.

A) Indicador de *Flicker* de Curta Duração (*short term probability*) - P_{ST}

Como descrito anteriormente este indicador é usado para avaliar a severidade de *flicker* e, conforme seja o seu valor, classificá-la como perceptível ou intolerável.

O P_{ST} é determinado, como mostrado na figura 3.9, a partir do sinal da tensão calculando-se o valor da sensação instantânea de *flicker* (S_f). Esta grandeza é tratada estatisticamente para produzir a curva de probabilidade acumulativa (FPC) dos níveis observados durante um dado intervalo de tempo. Estes níveis são necessários para a solução da equação 3.10:

$$P_{ST} = \sqrt{k_{50} \cdot P_{50} + k_{10} \cdot P_{10} + k_3 \cdot P_3 + k_1 \cdot P_1 + k_{0.1} \cdot P_{0.1}} \quad (3.10)$$

Onde:

- $k_{50}, k_{10}, k_3, k_1, k_{0.1}$ = coeficientes de ponderação, cujos valores são dados na tabela 3.1;
- $P_{0,1}$ = nível de sensação de flicker excedido por 0,1% do período de observação;
- P_1 = nível de sensação de flicker excedido por 1 % do período de observação;
- P_3 = nível de sensação de flicker excedido por 3 % do período de observação;
- P_{10} = nível de sensação de flicker excedido por 10 %

P_{50} = nível de sensação de flicker excedido por 50 % do período de observação;

Tabela 3.1 – Valores dos Coeficientes de Ponderação.

Coeficientes de Ponderação	Valores
$K_{0,1}$	0,0314
K_1	0,0525
K_3	0,0657
K_{10}	0,28
K_{50}	0,08

O tempo para avaliação de *flicker* de curta duração é fixado em 10 minutos. Para se chegar a este valor médio de intervalo de tempo foram realizados testes de percepção ao fenômeno da cintilação luminosa em seres humanos, considerando o ciclo de trabalho das principais cargas causadoras deste distúrbio.

A avaliação da severidade do nível de *flicker* pelo método de curta duração é, adequadamente, empregada quando se realiza a análise de distúrbios causados por fontes individuais. Quando da existência de várias fontes de perturbação, ou cargas com longos e variáveis ciclos, torna-se necessária e conveniente uma análise criteriosa através do índice de severidade de *flicker* de longa duração ou P_{LT} .

B) Indicador de *Flicker* de Longa Duração (*long term probability*) - P_{LT}

O indicador de severidade de *flicker* de longa duração P_{LT} é derivado do índice P_{ST} e expresso por:

$$P_{LT} = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (P_{ST\ i})^3} \quad (3.11)$$

Conforme descrito no item anterior, este método é empregado quando o distúrbio é provocado por várias fontes, ou mesmo quando as cargas possuem ciclos de trabalho longos e variáveis, como é o caso dos fornos a arco. Nestes casos, o tempo requerido para a quantificação do nível de *flicker*, segundo a avaliação pelo P_{LT} , foi estipulado em 2 horas.

C) Valores Limites para P_{ST} e P_{LT}

O estabelecimento de um valor limite para o indicador de *flicker* de curta duração consiste do resultado de testes em laboratório, nos quais uma proporção substancial de observadores mostraram-se sensíveis a um P_{ST} igual a 1.

A Figura 3.11 apresenta em função das variações relativas da tensão $\Delta V/ V$ (%) e do número variações por minuto, as seguintes curvas:

- **Curva 1** - Limiar de percepção visual para modulação senoidal;
- **Curva 2** - Limiar de percepção visual para modulação quadrada;
- **Curva 3** - Limite $P_{ST}=1$ pu para lâmpada 230V/60W segundo IEC;
- **Curva 4** - Limite $P_{ST}=1$ pu estipulado pelo método proposto pela UIE.

As curvas 1 e 2 apresentam, respectivamente, os limiares de percepção de flicker para modulação senoidal e quadrada. Assim, da figura 3.11 observa-se que a curva 3, obtida para o $P_{ST} = 1pu$, representa o limite tolerável de irritação visual para flutuações retangulares e está bem acima do limiar de percepção para modulação quadrada. Os pontos marcados como curva 4 correspondem à curva de Severidade Unitária, em que o $P_{ST} = 1pu$, corrigida no intervalo entre 0,1 e 1 flutuações por minuto, para determinar de maneira realística o nível de flicker neste intervalo.

As curvas onde o $P_{ST} = 1pu$ foram levantadas, tomando como referência apenas as características das lâmpadas incandescentes de 230V/60W, por serem estas as mais utilizadas na Europa. Com isso, tornou-se difícil aplicar essa metodologia em outros países, como o Japão que utiliza tensão secundária de 100V e países da América (EUA, Brasil, etc.) que utilizam tensão secundária fase-neutro de 120V e 127V.

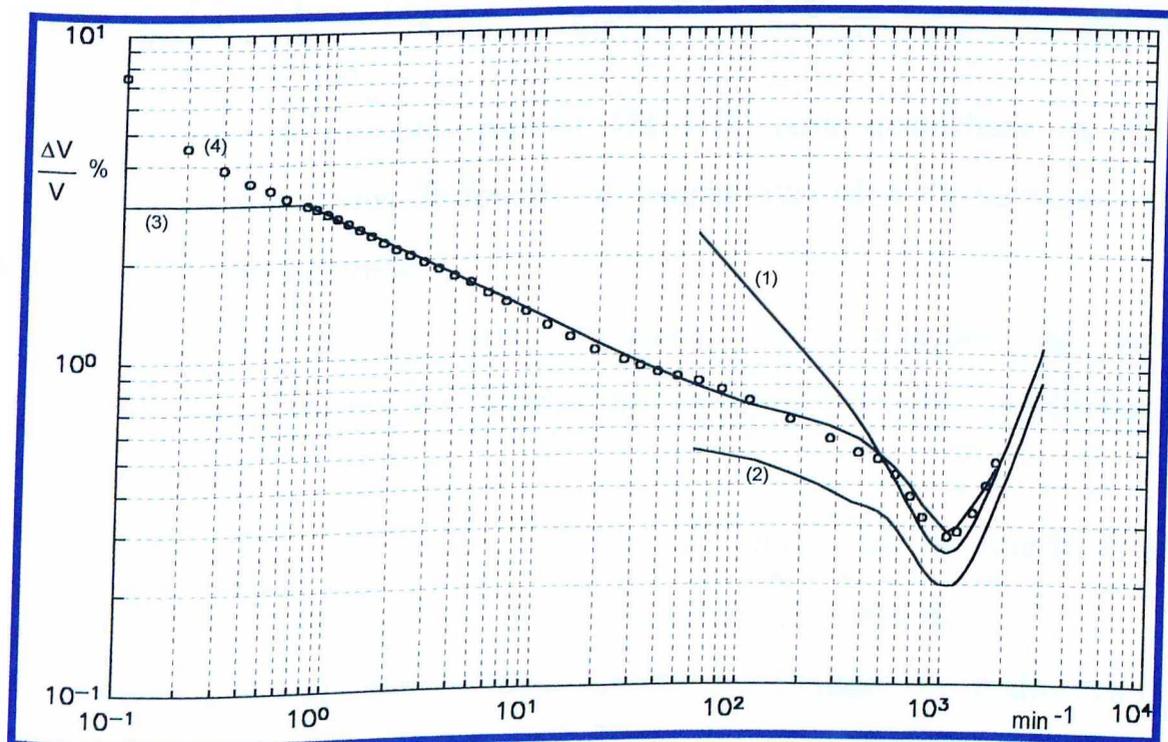


Figura 3.11 – Curvas de Limiar de Percepção de Flicker e $P_{ST}=1$.

Em 1995 foi proposta uma curva correspondente de $P_{ST}=1pu$ para as lâmpadas incandescentes de 60W/120V. As curvas de referência de $P_{ST}=1pu$ para 230V e 120V são mostrados na figura 3.12 [28], onde pode-se notar que as lâmpadas de 230V são mais sensíveis às flutuações de tensão.

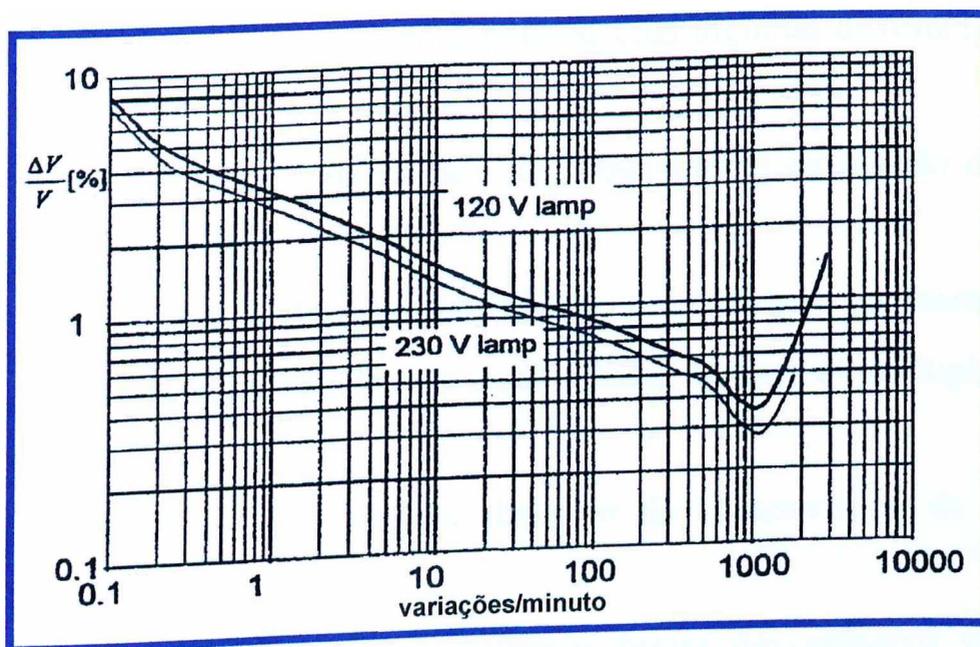


Figura 3.12 – Curvas de $P_{ST}=1$ para Variações Retangulares

A adoção do método padrão IEC/UIE para quantificar os efeitos causados pelas flutuações de tensão, apresenta uma série de vantagens [29], dentre as quais destacam-se:

- Pode ser usada para monitorar as flutuações de tensão simultaneamente em termos das amplitudes e das frequências das variações;
- Permite analisar diferentes tipos de flutuações de tensão e seus efeitos em termos da cintilação luminosa provocada;
- Pode ser implementada digitalmente, resultando em medidores com boa precisão numérica;
- Realiza medições de curta e de longa duração;
- Incorpora o tratamento estatístico na análise das variações aleatórias;

- Permite verificar diretamente os limites recomendados;
- Concentra os resultados em um simples valor numérico (P_{ST} ou P_{LT}) a cada intervalo de observação.

Muito embora as vantagens apresentadas por esta metodologia de análise sejam de grande importância, pode-se citar algumas desvantagens, tais como:

- Não pode ser usada na fase de planejamento de ligação de cargas perturbadoras;
- Não vincula as flutuações de tensão com o instante da ocorrência;
- Dificulta a divisão de responsabilidades no caso de múltiplas fontes perturbadoras;
- A calibração do medidor depende da característica da lâmpada padrão.

É importante salientar que nenhuma dessas desvantagens se mostra capaz de desmerecer a aplicação da metodologia, mesmo nos caso de fontes múltiplas de distúrbios, e ainda, o fato de se poder realizar as medições locais com monitoração contínua e automática sobre longos períodos de tempo, tem permitido resolver satisfatoriamente todos os problemas relacionados com cintilação luminosa.

3.5 – NORMAS PARA MEDIÇÃO E AVALIAÇÃO DE *FLICKER*

A cintilação luminosa é um distúrbio muito especial, devido ao fato de estar relacionada aos equipamentos conectados aos barramentos de baixa tensão e ligados entre fase e neutro. Isto resulta em dois pontos específicos de grande importância no que diz respeito à normatização de *flicker*:

- Na definição dos limites de emissão e compatibilidade deste fenômeno, deve-se levar em conta que o mesmo só ocorre nos sistemas de baixa tensão;
- Em redes elétricas que não alimentam cargas sensíveis, pode-se adotar limites mais flexíveis ($P_{ST} > 1$ para as redes industriais) para o nível de *flicker*, ou até mesmo ignorá-los.

Existem inúmeras normas e padrões para medir e avaliar o fenômeno *flicker*. A seguir é feito um breve relato das mais aceitas internacionalmente e dos padrões em uso e estudo no Brasil.

3.5.1 - IEC 61000-4-15 Standard on Flicker Measurement

A IEC 61000-4-15 [27], baseia-se no documento UIE – *Flicker Measurement and Evaluation*, e é aplicado somente para redes de 230V/50Hz.

Esta norma descreve o princípio de funcionamento do instrumento de avaliação da cintilação proposto pela IEC e, ainda, fornece informações para o projeto de medidores de *flicker* analógicos e digitais. Todavia, o presente documento não fornece limites para os indicadores de severidade deste fenômeno.

3.5.2 - IEC 61000-3-3 Electromagnetic Compatibility (EMC)

A presente norma é uma versão revisada da IEC 60555-3 e fornece os limites para flutuações de tensão e cintilação luminosa aplicáveis aos equipamentos com corrente nominal menor ou igual a 16A, supridos em sistemas de baixa tensão (BT). Além disso, a IEC 61000-3-3 [30] determina que os medidores de *flicker*, usados para avaliar a irritação causada pela

variação do fluxo luminoso, sejam projetados de acordo com a norma IEC 60868.

Os limites estabelecidos por esta norma, no tocante aos indicadores de *flicker*, encontram-se relacionados a seguir:

- O valor do P_{ST} não poderá ser maior que 1,0 pu;
- O valor do P_{LT} não poderá ser maior que 0,65 pu;
- A variação relativa da tensão, em estado permanente, não deve exceder a 3%.

3.5.3 - IEC 61000-3-5 *Electromagnetic Compatibility (EMC)*

A IEC 61000-3-5 [31] limita as flutuações de tensão e cintilação luminosa em sistemas de suprimento em baixa tensão para equipamentos com corrente nominal maior que 16A. Ademais, este documento descreve as condições dos testes de impacto na tensão, causados por cargas alimentadas em BT e que absorvem correntes superiores a 16A.

3.5.4 - IEC 61000-3-7 *Electromagnetic Compatibility (EMC)*

Nesta norma são estabelecidos limites de flutuações de tensão e cintilação para equipamentos conectados em sistemas de suprimento em média (MT) e alta tensão (AT).

A IEC 61000-3-7 [32] define as condições de operação das cargas conectadas à rede de média tensão, as quais são as causadoras das flutuações capazes de provocar o fenômeno *flicker* em baixa tensão.

Os limites estabelecidos por esta norma são mostrados na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Limites de P_{ST} e P_{LT}

Níveis Admitidos		
Indicadores	Média Tensão	Alta e Extra Alta Tensão
P_{ST}	0,9	0,8
P_{LT}	0,7	0,6

3.5.5 - CENELEC EN 50160 “Characteristics of Voltage Supplied by the Electrical Distribution Network”

Este padrão [7], que contém as condições legais aplicáveis aos sistemas de distribuição de energia elétrica da Europa, divide-se em três partes, a saber:

- Definições de termos técnicos;
- Características das fontes de baixa tensão;
- Características das fontes de média tensão.

Este documento fixa valor apenas para o P_{LT} , que não deve ser maior que 1,0pu.

3.5.6 - Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais – GCOI/SCEL/CECE

Uma primeira versão deste documento, emitida em 1984, fornece critérios e procedimentos, a serem usados no Brasil, para o atendimento a consumidores com cargas especiais.

Em 1997 uma nova versão [3], em uso atualmente, foi publicada em substituição à anterior. No Capítulo III deste documento, referente às flutuações de tensão, são adotados os princípios recomendados pela UIE/IEC

para avaliação do nível de cintilação de curto e longo prazos. Ainda, são estabelecidos os limites globais e por consumidor para os indicadores de *flicker*, os quais são mostrados nas tabelas 3.3 e 3.4, respectivamente.

Os limites globais são valores máximos estabelecidos para os níveis de *flicker* associada às flutuações de tensão, em qualquer barra do sistema, causadas pela operação conjunta de todos os consumidores. Tais limites, servem como garantia da qualidade da tensão fornecida a todos os consumidores.

Já os limites por consumidor, dados na tabela 3.4, são valores máximos dos níveis de *flicker* associados às flutuações de tensão provocadas por um único consumidor.

Tabela 3.3 - Limites globais dos indicadores de flicker.

Indicadores	V < 69kV	V ≥ 69kV
P _{ST}	1pu	0,8pu
P _{LT}	0,8pu	0,6pu

Tabela 3.4 - Limites dos indicadores de flicker por consumidor.

Indicadores	V < 69kV	V ≥ 69kV
P _{ST}	0,8pu	0,5pu
P _{LT}	0,5pu	0,4pu

Segundo este documento, os limites de perturbação por consumidor podem ser violados, em alguns casos, a critério da concessionária com base em uma análise técnico econômica. A violação dos limites de perturbação globais só pode acontecer em caráter temporário e em casos excepcionais.

3.5.7 - Limites Estabelecidos em outros Países

Devido ao incômodo causado pelo *flicker*, muitos estudos têm sido realizados em diferentes países, no sentido de definir uma metodologia internacional para a medição deste fenômeno, porém, ainda persistem divergências quanto aos limites a serem fixados como aceitáveis para os indicadores de *flicker*.

Após o estabelecimento das curvas de referência para lâmpadas incandescentes de 120V e 230V, que são as mais comumente utilizadas e mais sensíveis ao fenômeno, passou-se a discutir a aplicação da metodologia de medição em média e alta tensão. Nesses níveis mais altos de tensão é que se encontram conectadas as cargas industriais variáveis de porte significativo e, portanto, as potenciais fontes das flutuações de tensão causadoras da cintilação nas lâmpadas alimentadas em baixa tensão.

A base das discussões reside na diferente maneira de encarar a propagação do fenômeno na rede. Há uma linha de argumentação que defende que as flutuações de tensão devam ser tanto mais restritas quanto mais alto o nível de tensão, a fim de evitar que essas variações se propaguem e possam causar interferências em outros agentes, ou processos alimentados pela rede elétrica.

O outro conjunto de argumentos faz uso do fato de que o próprio sistema introduz atenuação das flutuações de tensão e que, portanto, o risco de ocorrerem interferências remotas diminui com a propagação através da rede.

Como resultado dessas duas linhas de argumentação não se chegou a um consenso sobre como fixar os limites para as flutuações de tensão em médias e altas tensões. Essa divergência fica explícita, analisando-se os valores adotados como limite do valor de P_{ST} e P_{LT} em diversos países, conforme mostra a tabela 3.5 [29].

Tabela 3.5 - Limites de P_{ST} e P_{LT} adotados em vários países.

Norma País	Limite do P_{ST}			Limite do P_{LT}		
	BT	MT	AT	BT	MT	AT
Africa do Sul	1,0	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8
Bélgica	1,0	1,0	0,8	0,74	0,74	0,58
Itália	1,0	1,0	0,85	0,74	0,74	0,62
Reino Unido	1,0	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6
França	1,0	1,0	0,8	0,74	0,74	0,58
Espanha	1,0	1,0	0,79	0,74	0,74	0,58
Alemanha	1,0	0,9	0,8	0,74	0,67	0,58

3.5.8 - Limites a Serem Estabelecidos no Brasil

A nova realidade do setor elétrico brasileiro, iniciada a partir de 1995 através da aprovação de leis federais, tornou-se necessária para garantir o crescimento dos demais setores de produção nacional, que utilizam a energia elétrica como insumo básico. Para isso, foram tomadas uma série de medidas de reestruturação, entre elas a criação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que funciona como o órgão regulador do sistema elétrico brasileiro, e do Operador Nacional do Sistema (ONS), responsável pela operação da rede elétrica.

Estes órgãos têm realizado trabalhos a fim de estabelecer limites, a serem usados no Brasil, para as flutuações de tensão e para os indicadores de níveis de *flicker*.

3.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Partindo do princípio que o efeito *flicker* é um dos mais freqüentes distúrbio provocados pelas flutuações de tensão este capítulo apresentou, sua conceituação, enfocando seus efeitos e dando atenção especial aos motivos físicos que o norteiam.

Prosseguindo, foram apresentados os resultados de recentes estudos sobre o comportamento do fluxo luminoso emitido por diversos tipos de lâmpadas, quando submetidas às flutuações de tensão. Estes estudos foram realizados com o objetivo de conhecer o comportamento das lâmpadas modernas e, principalmente, fornecer algumas ferramentas para que os dispositivos apresentem baixo fator de ganho. Dessa forma, os consumidores serão poupados dos efeitos provocados pelo fenômeno *flicker*.

O método de medição de cintilação luminosa, intitulado Padrão, proposto pela UIE em 1982 e hoje aceito internacionalmente, foi apresentado de maneira detalhada através do diagrama de blocos do medidor utilizado pelo mesmo. Outros métodos de medição foram citados sem grandes detalhes, a título de informação.

Finalmente, foram apresentadas as principais normas internacionais usadas para a medição e avaliação de *flicker* e ficou claro que não existe um consenso quanto aos limites estabelecidos por elas. Mostrou-se também, de forma resumida, o documento “Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”, usado no Brasil para definir os valores para os indicadores de cintilação. Por não se tratar de uma norma os valores estabelecidos neste documento funcionam como indicativos e não como níveis de exigência.

CAPÍTULO IV

PROPAGAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

4.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A maioria das cargas elétricas responsáveis pelo aparecimento das flutuações de tensão é trifásica e alimentada por sistemas de média (MT) ou alta tensão (AT). A natureza trifásica, e o princípio de funcionamento destes dispositivos, fazem com que as variações de tensão produzidas por eles sejam trifásicas e desequilibradas. Tal afirmativa é ilustrada na figura 4.1, a qual apresenta os perfis das tensões RMS fase-neutro num barramento de 138kV, representando um ponto de acoplamento de uma indústria siderúrgica típica.

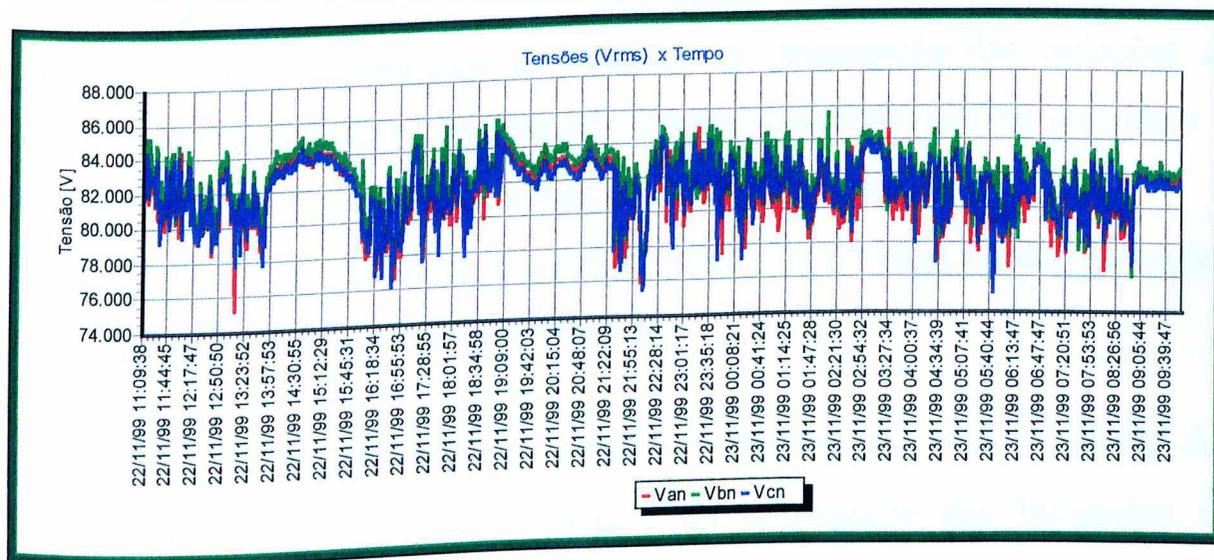


Figura 4.1 - Perfis das tensões RMS fase-neutro num barramento de 138kV.

As flutuações de tensão são geradas, via de regra, nos sistemas de AT e MT, conforme a tensão de alimentação da carga causadora do distúrbio, e propagam-se pelo sistema de potência atingindo os circuitos de extra-alta

(EAT) e, por conseguinte, os de baixa tensão (BT). Desta forma, o conhecimento dos mecanismos desta propagação, é uma questão importante no que diz respeito ao estabelecimento dos limites permissíveis para tais distúrbios, em todos os níveis de tensão.

Dentro das expectativas normais, espera-se que as flutuações de tensão sejam atenuadas à medida que se propagam pelo sistema elétrico. Quando as oscilações de tensão se deslocam no sentido carga-fonte, a referida atenuação é esperada face ao aumento da potência de curto-circuito, ao longo do percurso. Porém em alguns trechos dos sistemas de potência a propagação das flutuações ocorre, a partir da fonte de suprimento, no sentido do fluxo de potência. Nestas condições pode-se constatar a manifestação de atenuação ou amplificação das oscilações de tensão. Esta é uma situação oposta a afirmativa anterior, porém, como já dito, pode ser encontrada nos sistemas reais. A identificação dos fatores responsáveis por tal ocorrência será o principal objetivo do presente capítulo.

A figura 4.2 [33] apresenta uma interpretação física para o fenômeno supra mencionado, mostrando os sentidos de propagação das variações de tensão e suas respectivas atenuações. Nesta ilustração não se considera a presença da amplificação das oscilações de tensão ou do *flicker*.

Tendo em vista os fatos citados a respeito da propagação das flutuações de tensão, este capítulo tem como objetivo:

- Definir e estabelecer as equações matemáticas para o cálculo dos coeficientes usados na análise da propagação das flutuações de tensão, quais sejam: coeficiente de transferência e de atenuação das flutuações de tensão e, desta forma, do fenômeno *flicker*;
- Investigar os fatores que definem a atenuação, ou mesmo a amplificação das flutuações de tensão.

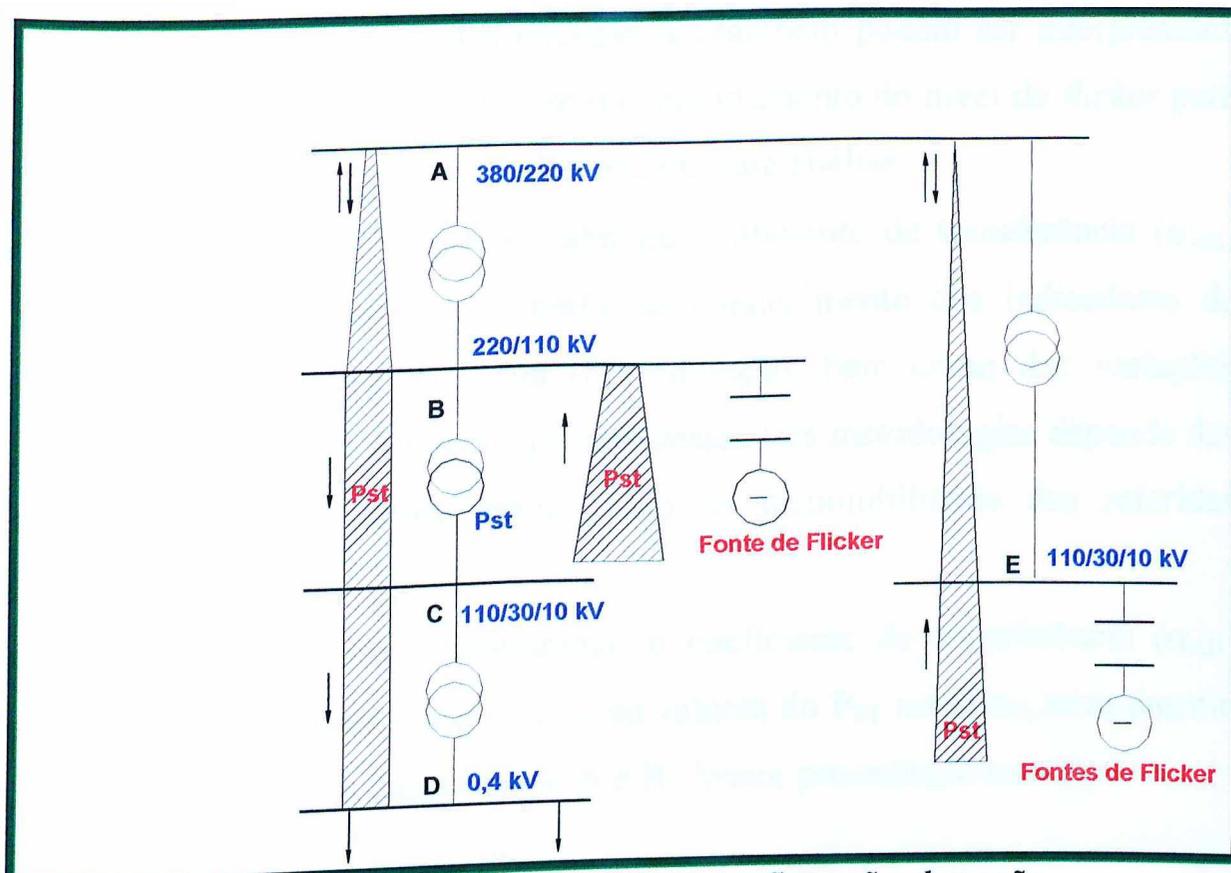


Figura 4.2 – Sentido da propagação das flutuações de tensão.

4.2 – COEFICIENTES UTILIZADOS PARA QUANTIFICAR A PROPAGAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

A forma encontrada para expressar o comportamento das flutuações de tensão entre dois barramentos A e B foi através da utilização de uma variável representativa do efeito, aqui denominada por *Coefficiente de Transferência* (α_{AB}). De modo similar, quando da necessidade de se correlacionar os níveis das flutuações encontradas em um mesmo barramento, para duas situações diferentes de funcionamento, optou-se pelo emprego de uma outra variável, a qual recebeu a designação de *Coefficiente de Atenuação* (β_{ij}), sendo i e j indicadores dos dois casos considerados.

Por razões óbvias, estes coeficientes também podem ser interpretados como sendo aqueles que expressam o comportamento do nível de *flicker* para as condições e/ou barramentos selecionados para análise.

Do exposto, segue que o valor do coeficiente de transferência (α_{AB}) pode então ser quantificado a partir do conhecimento dos indicadores de *flicker*, de curta (P_{ST}) ou longa (P_{LT}) duração, bem como das variações percentuais de tensão. A opção por uma dessas três metodologias depende das características do sistema, assim como da disponibilidade das referidas grandezas medidas.

Como uma primeira estratégia, o coeficiente de transferência (α_{AB}) pode ser calculado pela relação entre os valores do P_{ST} medidos, num mesmo instante de tempo, nos barramentos A e B. Assim procedendo tem-se:

$$\alpha_{AB} = \frac{P_{ST}(B)}{P_{ST}(A)} \quad (4.1)$$

Onde:

- α_{AB} – Coeficiente de transferência de *flicker* entre os pontos A e B;
- $P_{ST}(B)$ – Indicador de *flicker* de curta duração, medido no ponto B, num determinado período de tempo;
- $P_{ST}(A)$ – Indicador de *flicker* de curta duração, medido no ponto A, no mesmo período de tempo em que é medido o $P_{ST}(B)$.

Por definição, o indicador de *flicker* (P_{ST}), está intimamente relacionado com uma determinada variação relativa de tensão. Assim sendo, a segunda alternativa para se calcular o α_{AB} é baseada na relação entre os valores medidos, nos pontos A e B, das variações percentuais de tensão, como mostra a equação 4.2.

$$\alpha_{AB} = \frac{\Delta V_B / V_B}{\Delta V_A / V_A} \quad (4.2)$$

Onde:

ΔV_B – Amplitude da flutuação da tensão no ponto B;

V_B – Tensão no ponto B;

ΔV_A – Amplitude da flutuação da tensão no ponto A;

V_A – Tensão no ponto A.

Através de medições, a referência [4] mostra que o coeficiente de transferência pode ser expresso, ainda, na forma dos indicadores de *flicker* de longa duração (P_{LT}), medidos nos pontos A e B. Assim procedendo, como um terceiro método para o cálculo do α_{AB} , obtém-se a expressão a seguir:

$$\alpha_{AB} = \frac{P_{LT}(B)}{P_{LT}(A)} \quad (4.3)$$

Onde:

$P_{LT}(B)$ – Indicador de *flicker* de longa duração, medido no ponto B, num determinado intervalo de tempo;

$P_{LT}(A)$ – Indicador de *flicker* de longa duração, medido no ponto A, no mesmo intervalo de tempo em que é medido o $P_{LT}(B)$.

Conforme anteriormente estabelecido, uma outra forma de se expressar a questão da atenuação e/ou amplificação das flutuações de tensão está em se correlacionar, para um mesmo ponto ou barramento elétrico, os níveis de *flicker* ou das oscilações de tensão, comparando-se os valores encontrados nas

duas situações distintas de funcionamento. Nestas circunstâncias, poder-se-ia utilizar da equação 4.4. A formulação esclarece que o cálculo está sendo processado para um barramento genérico A e a comparação é estabelecida entre um caso estudado i e outro j ,

$$\beta_{ij} = \left(1 - \frac{\Delta V_j / V_j}{\Delta V_i / V_i} \right) \times 100 \quad (4.4)$$

ou pela equação 4.5, que consiste da relação entre os valores do P_{ST} medidos, num mesmo instante de tempo.

$$\beta_{ij} = \left(\frac{P_{STi} - P_{STj}}{P_{STi}} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

Onde:

- β_{ij} – Coeficiente de atenuação de *flicker* entre as condições i e j ;
- P_{STi} – Indicador de flicker de curta duração para a condição de operação i ;
- P_{STj} – Indicador de flicker de longa duração para a condição de operação j .

Cabe ressaltar que para valores de $\beta_{ij} < 0$, as flutuações de tensão apresentam-se amplificadas.

4.3 - FATORES QUE INFLUENCIAM NA PROPAGAÇÃO DAS FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

Sabe-se que, as flutuações de tensão são geradas, na maioria dos casos, nos sistemas de MT e AT, e que o principal impacto causado por elas é a cintilação luminosa, o que ocorre apenas nas redes de BT. Por este motivo, mais uma vez, reforça-se a tese sobre a necessidade do conhecimento do fenômeno da propagação das flutuações de tensão.

O assunto não é absolutamente novo, visto que o mesmo já foi explorado por algumas referências, a exemplo da [4], [5], [6] e [34]. Sintetizando as principais constatações destes documentos, pode-se reconhecer como fatores responsáveis por tais alterações nos níveis de flutuações de tensão os seguintes itens:

- Nível de curto-circuito;
- Efeito das cargas rotativas;
- Saturação dos transformadores;
- Tipo de ligação dos transformadores.

Tendo em vista que a inclusão dos efeitos resistivos dos componentes elétricos que perfazem um complexo de transmissão ou distribuição não foram considerados nas referências consultadas, e que estes podem também contribuir para completar a abrangência dos estudos, a incorporação das resistências de cabos, linhas, transformadores, etc. e suas variações são também incluídas nas simulações.

Na sequência, é feita uma abordagem detalhada sobre a forma como cada um dos referidos fatores influenciam na propagação das oscilações de tensão.

4.3.1 – Nível de Curto-Circuito

O conhecimento da configuração do sistema elétrico na condição normal de operação, permite que sejam levantados os níveis de curto-circuito em todos os pontos do mesmo e, com isso, sejam estimadas as atenuações das flutuações de tensão no sentido da propagação carga-fonte. De acordo com a referência [4], estas atenuações, ditas naturais, podem ser calculadas através do equivalente de Thevenin do sistema onde a carga variável está inserida, como mostra a figura 4.3.

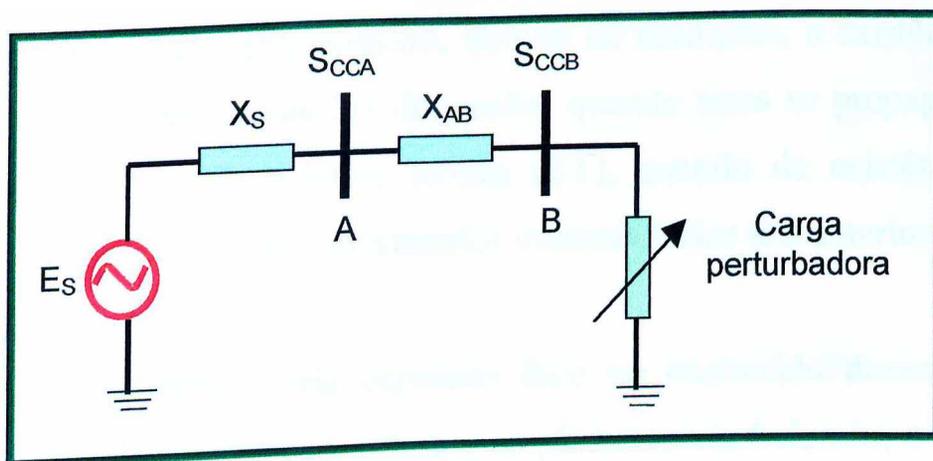


Figura 4.3 - Circuito equivalente de Thevenin de um sistema alimentando carga variável.

De acordo com a figura 4.3, a flutuação de tensão na barra A, em decorrência da variação da corrente na carga, pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$\Delta V_A = \frac{X_S}{X_S + X_{AB}} \Delta V_B \cong \frac{S_{CCB}}{S_{CCA}} \Delta V_B \quad [\text{pu}] \quad (4.6)$$

Onde:

S_{CCA} - Potência de curto-circuito no ponto A;

S_{CCB} - Potência de curto-circuito no ponto B;

- X_S - Reatância equivalente do sistema supridor;
 X_{AB} - Reatância equivalente entre os pontos A e B.

A equação 4.6 mostra que, a atenuação natural no sentido carga-fonte pode ser estimada pela relação inversa dos níveis de curto-circuito entre os pontos considerados, ou seja, quanto maior a S_{CC} de um determinado ponto do sistema elétrico, menor a oscilação da tensão no mesmo.

4.3.2 – Cargas Rotativas

As referências [4] e [5] mostram, através de medições, a existência de um efeito atenuador das flutuações de tensão, quando estas se propagam no sentido da alta (AT) para a baixa tensão (BT), quando da existência de motores elétricos inseridos nos barramentos intermediários aos anteriores, isto é, na média tensão (MT).

Este comportamento seria esperado face ao conhecido desempenho dinâmico das máquinas rotativas. Como é amplamente estabelecido, a inércia mecânica e elétrica dos dispositivos rotativos impedem uma súbita transferência dos mais diversos tipos de distúrbios que possam resultar em alterações da operação de máquinas síncronas ou assíncronas e correspondentes barramentos aos quais se encontram conectadas. O tema é amplo e merecedor de profundas investigações, quando, por exemplo, se considera o funcionamento dos sistemas elétricos frente a oscilações de tensão e a presença de motores.

A figura 4.4, extraída da referência [4] ilustra o citado comportamento.

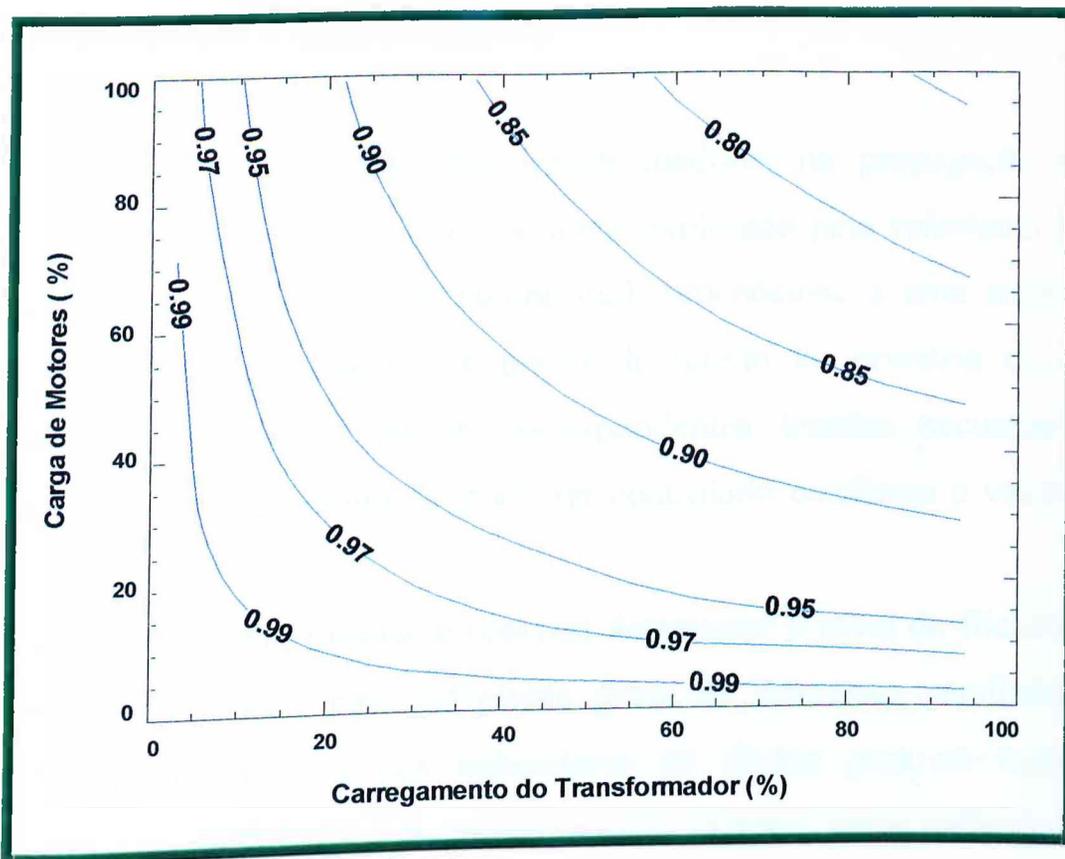


Figura 4.4 - Coeficiente de transferência de flicker.

A partir da figura anterior, pode-se verificar que quanto maior for a carga correspondente a motores, menor será o coeficiente de transferência de flicker de AT para MT, o que comprova o efeito atenuador das máquinas girantes, sobre as flutuações de tensão.

Ainda, observando-se a figura 4.4 constata-se que, o coeficiente de transferência tende para 1, ou seja, a flutuação de tensão existente no primário do transformador é totalmente transferida para o secundário, quando:

- A carga total do transformador é baixa;
- O percentual de motores na carga do transformador tende para zero.

4.3.3 – Saturação dos Transformadores

A influência da saturação dos transformadores na propagação das flutuações de tensão constituiu-se em assunto explorado pela referência [6]. Empregando-se um arranjo físico laboratorial, procedeu-se a uma série de medições aplicando-se variações regulares de tensão ao primário de um transformador e verificando-se as correspondentes tensões secundárias. Naturalmente, o nível de saturação pôde ser controlado conforme o valor da tensão empregada no teste.

Assim procedendo, tornou-se possível determinar o nível de flicker ou das flutuações de tensão, para diferentes graus de saturação, medindo-se simultaneamente os valores dos indicadores de flicker para as tensões primária (V_p) e secundária (V_s) do transformador. O instrumento utilizado foi um medidor digital, calibrado segundo a metodologia recomendada pela IEC [25].

A figura 4.5 mostra os valores dos coeficientes de atenuação obtidos no ensaio. Vale lembrar que tais coeficientes foram obtidos através da equação 4.1. Na figura verifica-se que, o coeficiente de atenuação aumenta com nível da tensão aplicada no primário, ou seja, com o nível da saturação.

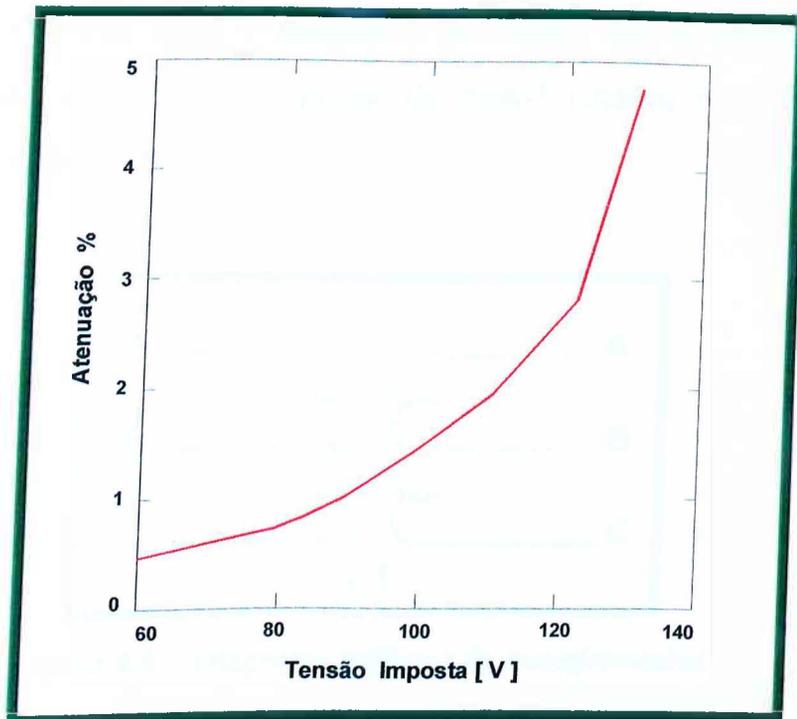


Figura 4.5 – Atenuação imposta pela saturação do transformador

4.3.4 – Tipo de Ligação dos Transformadores

Dependendo da tensão aplicada e do tipo de ligação dos enrolamentos do primário e do secundário de um transformador, as tensões transformadas/transferidas por este dispositivo obedecem aos seguintes critérios:

- Em transformadores ligados em Y-Y ou Δ - Δ , as tensões transferidas de um lado para o outro possuem os mesmos ângulos e os módulos proporcionais à relação dos números de espiras dos enrolamentos primário e secundário.
- Em transformadores ligados em Y- Δ ou Δ -Y as tensões transferidas de um lado para o outro são defasadas, mantendo-se os módulos determinados pela relação de transformação. Para a grande maioria dos casos, o ângulo entre tais tensões é de 30° .

Tomando-se por base o diagrama da figura 4.6, o exemplo a seguir mostra a influência do tipo de ligação do transformador na propagação das flutuações de tensão.

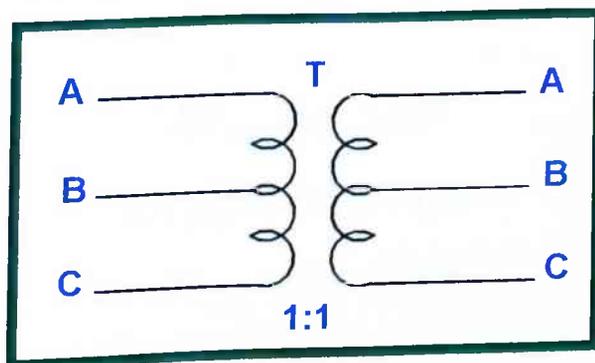


Figura 4.6 – Diagrama trifásico do transformador.

Designando por:

$\Delta V_{ABp}\%$ – Flutuação percentual da tensão entre as fases A e B no primário;

$\Delta V_{BCp}\%$ – Flutuação percentual da tensão entre as fases B e C no primário;

$\Delta V_{CAp}\%$ – Flutuação percentual da tensão entre as fases C e A no primário;

$\Delta V_{ABs}\%$ – Flutuação percentual da tensão entre as fases A e B no secundário;

$\Delta V_{BCs}\%$ – Flutuação percentual da tensão entre as fases B e C no secundário;

$\Delta V_{CA s}\%$ – Flutuação percentual da tensão entre as fases C e A no secundário.

Utilizando tal simbologia e supondo que as flutuações de tensão presentes no primário do transformador sejam equilibradas e tenham os valores numéricos a seguir:

$$\Delta V_{ABp}\% = 5 \angle 0^\circ$$

$$\Delta V_{BCp}\% = 5 \angle -120^\circ$$

$$\Delta V_{CBp} \% = 5 \angle 120^\circ$$

Caso o transformador esteja conectado em Y-Y ou Δ - Δ , as oscilações transferidas para o secundário são:

$$\Delta V_{ABs} \% = 5 \angle 0^\circ$$

$$\Delta V_{BCs} \% = 5 \angle -120^\circ$$

$$\Delta V_{CA_s} \% = 5 \angle 120^\circ$$

Por outro lado, conforme mencionado, caso o transformador seja ligado em Y- Δ ou Δ -Y, as flutuações transferidas para o secundário são:

$$\Delta V_{ABs} \% = 5 \angle 30^\circ$$

$$\Delta V_{BCs} \% = 5 \angle -90^\circ$$

$$\Delta V_{CA_s} \% = 5 \angle 150^\circ$$

Do exposto conclui-se que, uma vez que as flutuações de tensão aplicadas ao transformador são equilibradas, as mesmas não sofrem atenuações ao se propagarem entre os enrolamentos deste equipamento, qualquer que seja o seu tipo de ligação.

Por outro lado, considerando que as oscilações de tensão presentes no primário sejam desequilibradas, hipótese esta que representa a realidade para a maioria das cargas perturbadoras, tem-se:

$$\Delta V_{ABp} \% = 7,00 \angle 14,63^\circ$$

$$\Delta V_{BCp} \% = 6,14 \angle -143,14^\circ$$

$$\Delta V_{CAp} \% = 2,66 \angle 134,05^\circ$$

É importante reconhecer que, uma rede elétrica desequilibrada pode, de um modo geral, apresentar componentes simétricas de seqüência negativa e zero superpostas à de seqüência positiva. Todavia, a impossibilidade de circulação das correntes de seqüência zero ao longo das redes de média tensão e alta tensão resultam, via de regra, na manifestação mais pronunciada da componente de seqüência negativa. Em vista deste fato, as considerações a seguir, focalizam tão apenas a presença da componente de seqüência negativa superposta à seqüência positiva.

As flutuações de tensão desequilibradas, fornecidas anteriormente, apresentam as componentes de seqüência dadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Componentes de seqüência das flutuações de tensão desequilibradas, no primário.

Componentes de Seqüência Positiva	Componentes de Seqüência Negativa
$\Delta V_{ABp1} \% = 5 \angle 0^\circ$	$\Delta V_{ABp2} \% = 2,5 \angle 45^\circ$
$\Delta V_{BCp1} \% = 5 \angle -120^\circ$	$\Delta V_{BCp2} \% = 2,5 \angle 165^\circ$
$\Delta V_{CAp1} \% = 5 \angle 120^\circ$	$\Delta V_{CAp2} \% = 2,5 \angle -75^\circ$

Na tabela 4.1 pode-se observar que, as componentes de seqüência positiva e negativa se comportam como flutuações de tensão equilibradas. Assim sendo, ao se propagarem pelo transformador, tais componentes de seqüência apresentam no secundário valores dependentes do tipo de ligação dos enrolamentos deste equipamento, o que é mostrado na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Componentes de seqüência das flutuações de tensão desequilibradas, no secundário.

Ligação do Transformador	Componentes de Seqüência Positiva	Componentes de Seqüência Negativa
Y-Y	$\Delta V_{ABs1} \% = 5 \angle 0^\circ$	$\Delta V_{ABp2} \% = 2,5 \angle 45^\circ$
Ou	$\Delta V_{BCs1} \% = 5 \angle -120^\circ$	$\Delta V_{Bp2} \% = 2,5 \angle 165^\circ$
Δ - Δ	$\Delta V_{CA s1} \% = 5 \angle 120^\circ$	$\Delta V_{Cp2} \% = 2,5 \angle -75^\circ$
Y- Δ	$\Delta V_{ABs1} \% = 5 \angle 30^\circ$	$\Delta V_{ABs2} \% = 2,5 \angle 15^\circ$
Ou	$\Delta V_{BCs1} \% = 5 \angle -90^\circ$	$\Delta V_{BCs2} \% = 2,5 \angle 135^\circ$
Δ -Y	$\Delta V_{CA s1} \% = 5 \angle 150^\circ$	$\Delta V_{CA s2} \% = 2,5 \angle -105^\circ$

As flutuações de tensão resultantes no secundário, são encontradas a partir da composição dos valores dados na tabela 4.2. Desse modo, para o caso do transformador ligado em Y-Y ou Δ - Δ tem-se:

$$\Delta V_{ABs} \% = 7,00 \angle 14,63^\circ$$

$$\Delta V_{BCs} \% = 6,14 \angle -143,14^\circ$$

$$\Delta V_{CA s} \% = 2,66 \angle 134,05^\circ$$

Caso o transformador esteja ligado em Y- Δ ou Δ -Y tem-se no secundário:

$$\Delta V_{ABs} \% = 7,44 \angle 25^\circ$$

$$\Delta V_{BCs} \% = 3,38 \angle -118,67^\circ$$

$$\Delta V_{CA s} \% = 4,98 \angle 179,02^\circ$$

Analisando os valores encontrados para as flutuações de tensão no secundário pode-se concluir que:

- As oscilações de tensão desequilibradas, ao se propagarem através de um transformador ligado em Y-Y ou Δ - Δ , não experimentam, por conta das conexões, qualquer atenuação ou ampliação. É válido também dizer que, estas são transferidas por meio da relação de espiras, tal como ocorreu para as oscilações equilibradas.
- Por outro lado, a transferência destas flutuações através dos transformadores ligados em Y- Δ ou Δ -Y ocorre de modo distinto ao anterior. Tais oscilações, para o presente caso, se apresentaram atenuadas para uma fase e amplificada para as duas outras. Todavia, é importante destacar que o número e as fases que sofrem ampliações ou atenuações dependem das características do desequilíbrio presente nas oscilações.

A título de melhor ilustrar o comportamento das flutuações de tensão transferidas através dos enrolamentos de um transformador, foram efetuados alguns estudos computacionais utilizando o simulador SABER. Para tanto, fez-se uso do sistema teste mostrado na figura 4.7.

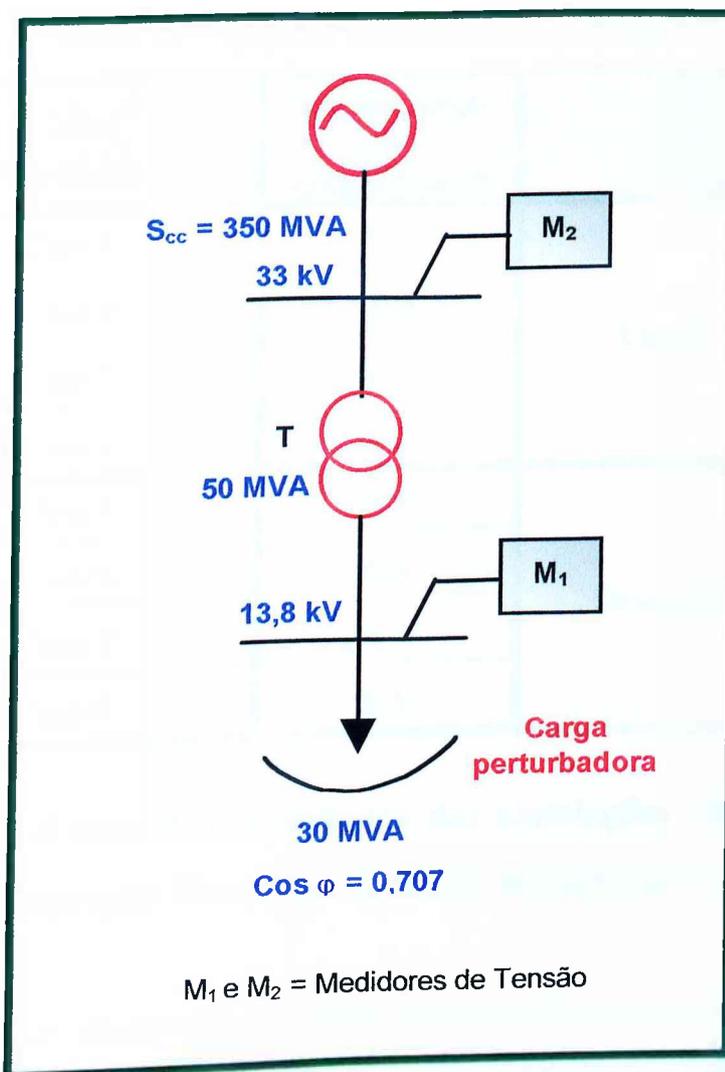


Figura 4.7 – Diagrama unifilar do circuito simulado.

Os estudos envolvendo o sistema teste, consistiram de simulações em que a carga perturbadora, com características equilibrada ou desequilibrada, operasse em regime permanente. Ainda, a fim de verificar apenas a influência do tipo de ligação do transformador situado entre a carga e o PAC, considerou-se a impedância percentual do mesmo aproximadamente nula. De posse dessas considerações, foram simulados alguns casos os quais se encontram resumidos na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Quadro resumo dos casos simulados.

Casos Simulados	Tipo de Ligação do Transformador	Tipo de Carga
Caso 1	Y-Y	Equilibrada
Caso 2	Δ - Δ	
Caso 3	Y- Δ	
Caso 4	Δ -Y	
Caso 5	Y-Y	Desequilibrada
Caso 6	Δ - Δ	
Caso 7	Y- Δ	
Caso 8	Δ -Y	

A tabela 4.4 mostra os resultados das simulações realizadas, para os casos em que a carga gera flutuações de tensão equilibradas (Casos 1-4).

Tabela 4.4 - Resultados das simulações para flutuações de tensão equilibradas.

Flutuação de Tensão no Medidor M_1	Tipo de Ligação do Transformador	Flutuação de tensão no medidor M_2
$\Delta V_{AB} \% = 3,57 \angle 149,34^\circ$	Y-Y	$\Delta V_{AB} \% = 3,57 \angle 149,34^\circ$
$\Delta V_{BC} \% = 3,57 \angle 29,34^\circ$	ou	$\Delta V_{BC} \% = 3,57 \angle 29,34^\circ$
$\Delta V_{CA} \% = 3,57 \angle -90,66^\circ$	Δ - Δ	$\Delta V_{CA} \% = 3,57 \angle -90,66^\circ$
$\Delta V_{AB} \% = 3,57 \angle 119,34^\circ$	Y- Δ	$\Delta V_{AB} \% = 3,57 \angle 149,34^\circ$
$\Delta V_{BC} \% = 3,57 \angle -0,66^\circ$	ou	$\Delta V_{BC} \% = 3,57 \angle 29,34^\circ$
$\Delta V_{CA} \% = 3,57 \angle -120,66^\circ$	Δ -Y	$\Delta V_{CA} \% = 3,57 \angle -90,66^\circ$

Na tabela 4.4 pode-se observar que as flutuações de tensão registradas pelo medidor M_2 são iguais em todos os casos. Isto comprova que as

flutuações de tensão equilibradas são transferidas pelo transformador sem que suas amplitudes relativas sejam alteradas, com a modificação do tipo de ligação.

Os resultados das simulações, para os casos em que a carga da figura 4.8 gera flutuações de tensão desequilibradas, são mostrados na tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Resultados das simulações para flutuações de tensão desequilibradas.

Flutuação de tensão no medidor M_1	Tipo de Ligação do Transformador	Flutuação de tensão no medidor M_2
$\Delta V_{AB} \% = 3,74 \angle 121,14^\circ$	Y-Y	$\Delta V_{AB} \% = 3,74 \angle 121,14^\circ$
$\Delta V_{BC} \% = 2,75 \angle 45,84^\circ$	ou	$\Delta V_{BC} \% = 2,75 \angle 45,84^\circ$
$\Delta V_{CA} \% = 5,26 \angle -90,97^\circ$	Δ - Δ	$\Delta V_{CA} \% = 5,26 \angle -90,97^\circ$
$\Delta V_{AB} \% = 3,74 \angle 91,13^\circ$	Y- Δ	$\Delta V_{AB} \% = 2,29 \angle 134,24^\circ$
$\Delta V_{BC} \% = 2,75 \angle 15,84^\circ$	ou	$\Delta V_{BC} \% = 4,25 \angle 44^\circ$
$\Delta V_{CA} \% = 5,26 \angle -120,97^\circ$	Δ -Y	$\Delta V_{CA} \% = 5,10 \angle -107,73^\circ$

No tocante a transferência das flutuações desequilibradas, pode-se, mais uma vez constatar, a partir da tabela 4.5 que:

- Quando o transformador tem seus enrolamentos ligados em Y-Y ou Δ - Δ , estas oscilações de tensão não experimentam qualquer atenuação ou ampliação ao se propagarem através deste equipamento.
- Nos transformadores ligados em Y- Δ ou Δ -Y tais flutuações são atenuadas em uma fase e ampliadas nas outras duas.

4.3.5 – A Resistência dos Condutores.

A figura 4.8 mostra o diagrama unifilar de um sistema elétrico genérico, no qual a carga é suprida através de uma impedância equivalente vista entre a mesma e a fonte.

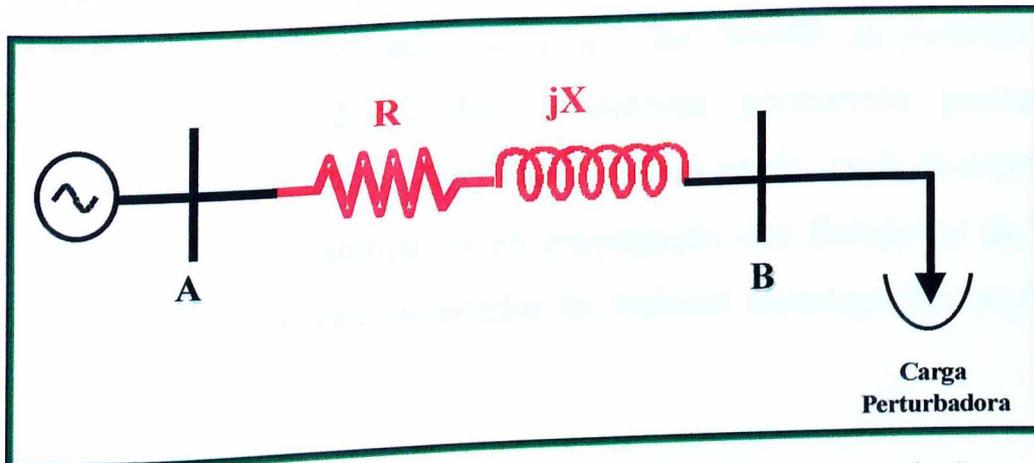


Figura 4.8 – Diagrama unifilar do circuito utilizado na simulação.

Observando-se o circuito equivalente anterior, a flutuação da tensão no barramento A pode ser expressa através da equação 4.7:

$$\Delta V_A = \Delta V_B - (R + jX) \cdot \Delta I_C \quad (4.7)$$

Onde:

- ΔV_A – Flutuação da tensão no barramento A;
- ΔV_B – Flutuação da tensão no barramento B;
- R – Resistência do condutor que liga os barramentos A e B;
- X – Reatância do condutor que liga os barramentos A e B;
- ΔI_C – Flutuação da corrente solicitada pela carga.

Observando a equação 4.7 pode-se verificar que as flutuações de tensão ao longo de um sistema de potência dependem da oscilação da corrente solicitada e da flutuação de tensão gerada pela carga perturbadora, no seu ponto de acoplamento com o circuito, e ainda da indutância e da resistência dos condutores. Para as oscilações em baixas frequências o valor da reatância dos condutores torna-se insignificante. Assim sendo, este parâmetro não deve acarretar maiores efeitos nas oscilações de tensão e correspondente propagação. Já a resistência dos condutores permanece praticamente constante com a diminuição da frequência. Assim sendo, pode-se esperar que estas exerçam um efeito atenuador na propagação das flutuações de tensão. Por este motivo, o tema será merecedor de maiores investigações no capítulo V.

4.4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou um estudo detalhado a respeito da propagação das flutuações de tensão em um sistema elétrico. A fim de que se possa quantificar o comportamento dessas oscilações ao se deslocarem entre dois pontos, A e B, foi definido o Coeficiente de Transferência de *Flicker* (α). Este índice pode ser calculado a partir do valor do indicador de cintilação luminosa de curta (P_{ST}) ou longa (P_{LT}) duração ou, ainda, através da amplitude percentual da modulação de tensão nestes pontos. Além do índice, α foi definido também o coeficiente de atenuação de *flicker* (β), utilizado para avaliar o comportamento do sistema sobre diferentes condições de funcionamento.

Em seguida, fundamentando-se em referências bibliográficas, foram tecidos comentários sobre fatores de influência, responsáveis por fenômenos de atenuação ou amplificação das oscilações de tensão, à medida que estas se propagam pelos sistemas elétricos, bem como, mostrados os resultados de medições de campo e laboratório.

A potência de curto-circuito, como seria esperado, constituiu-se num parâmetro que atua de forma decisiva no processo de atenuação das propagações das flutuações de tensão.

A presença de motores, face ao seu comportamento dinâmico, proporciona um efeito de atenuação para as oscilações de tensão. Desta forma, onde tais máquinas se fazem presentes, há de se esperar uma atenuação dos fenômenos aqui enfocados.

Em relação à saturação, a única referência encontrada relata sobre a importância de se considerar tal efeito. A fundamentação apresentada encontra-se apoiada em estudos laboratoriais empregando-se um transformador monofásico.

Caracterizando a principal contribuição do presente capítulo, foram realizados trabalhos analíticos e simulações computacionais, para investigar a influência do tipo de ligação do transformador na propagação das variações de tensão. Desses estudos pode-se constatar que, para as flutuações equilibradas de tensão, o tipo de conexão das bobinas do transformador não exerce qualquer influência na propagação das oscilações. Por outro lado, quando tais oscilações apresentam-se desequilibradas, podem ocorrer atenuações ou ampliações das mesmas ao serem transferidas de um lado para outro, apenas, nos transformadores com ligação Y- Δ ou Δ -Y.

Quanto ao último fator considerado, destaca-se a presença das resistências dos componentes que perfazem os complexos elétricos. Neste particular não se encontrou qualquer menção bibliográfica sobre o assunto, muito embora o reconhecimento que as mesmas possam também contribuir para o fenômeno da propagação sob consideração.

Muito embora as constatações anteriores, é importante observar que todos os fatores de influência mencionados serão considerados em maiores detalhes no capítulo V.

CAPÍTULO V

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

5.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Nos capítulos anteriores, foram apresentados os conceitos teóricos a respeito da geração, do cálculo e da propagação das flutuações de tensão ao longo de um sistema elétrico. Além disso, foram apresentados estudos [4], [5], [34], realizados por meio de medições e simulações, que indicam fatores responsáveis pela atenuação das oscilações de tensão, quando as mesmas deslocam-se entre dois pontos quaisquer do sistema. Neste sentido, mostrou-se que a influência do aumento do nível de curto-circuito, a presença de motores elétricos, a saturação e o tipo de ligação dos enrolamentos dos transformadores são fatores preponderantes sobre o fenômeno aqui enfocado.

Diante disso, este capítulo tem por meta analisar um sistema elétrico de potência típico e real, a fim de se verificar a influência de cada um dos fatores já citados sobre a propagação das flutuações de tensão. Ainda, com o propósito de completar este estudo, será investigada, também, a contribuição da resistência dos cabos sobre o mesmo fenômeno, como mostrado no capítulo IV. Para tanto, serão efetuadas simulações computacionais utilizando a plataforma SABER, cujas características serão abordadas posteriormente.

5.2 – ESTRATÉGIAS DE ESTUDO

A análise da influência do nível de curto-circuito, dos motores elétricos, da saturação e do tipo de ligação dos enrolamentos dos transformadores e da resistência dos condutores sobre a propagação das flutuações de tensão, é um assunto que vem, já de muito tempo, merecendo investigações. No sentido de contribuir com tais pesquisas e, assim, atingir os objetivos propostos, optou-se pela realização de simulações computacionais, através das quais pode-se obter resultados preditivos com grande flexibilidade, visto que a alternativa computacional oferece as mais diferentes possibilidades de mudança dos parâmetros de um sistema elétrico.

Os simuladores atualmente disponíveis no mercado empregam diferentes técnicas de processamento, quais sejam: aquelas baseadas no domínio da frequência e outras baseadas no domínio do tempo. Na condução deste trabalho utiliza-se um *software* denominado SABER que emprega técnicas no domínio do tempo. Esta escolha se fundamentou no fato de que, as flutuações de tensão são melhor visualizadas neste tipo de processamento, uma vez que, as mesmas estão diretamente relacionadas às variações do valor rms da tensão em função do tempo.

Como principais características do simulador SABER pode-se citar:

- Possibilita a representação de equipamentos/sistema através da conexão física dos componentes;
- Dispõe de uma biblioteca padrão, além disto, pode-se gerar estruturas próprias denominadas por *templates*;
- Possui elevados recursos de processamento, com diversos métodos de integração numérica;
- Permite a modelagem de equipamentos elétricos ou mecânicos através de suas equações diferenciais;

- Efetua o processamento das curvas obtidas, uma vez encerrado processo de simulação, através das análises de Fourier, análise de ruídos, etc.;
- Apresenta flexibilidade, versatilidade e riqueza de recursos gráficos.

Diversas dissertações que antecederam a esta, foram responsáveis pela inclusão de novos componentes à biblioteca do simulador SABER. Vale ressaltar porém que, para a realização deste trabalho fez-se necessário desenvolver um *template* representativa de uma carga geradora de flutuações de tensão e incluí-la na referida biblioteca. Esta nova ferramenta de trabalhos recebeu a designação de *Carga_Flicker*, sendo que esta será merecedora de maiores detalhamentos no item que se segue.

5.3 – MODELAGEM DA CARGA GERADORA DE FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

Conforme anteriormente citado, a inclusão da carga geradora de flutuações de tensão na biblioteca do simulador SABER se deu através da geração de um *template* denominada *Carga_Flicker*.

O princípio básico de funcionamento do *template* *Carga_Flicker* consiste em simular uma carga que absorva uma corrente variável, com características tais que acarretem nos terminais de conexão da mesma uma flutuação de tensão, cuja modulação seja senoidal. Dessa forma, a fim de ocasionar tal oscilação na corrente, este *template* calcula as correspondentes potências ativa e reativa variáveis, através das equações 5.1 e 5.2, respectivamente.

$$P = P_0 + \sum_{f_i=1}^{25} P_{f_i} \cos(2\pi f_i t) \quad (5.1)$$

$$Q = Q_0 + \sum_{f_i=1}^{25} Q_{f_i} \cos(2\pi f_i t) \quad (5.2)$$

Onde:

- P – Potência ativa total absorvida pelo *template* “Carga_Flicker”;
- Q – Potência reativa total absorvida pelo *template* “Carga_Flicker”;
- P₀ – Parcela da potência ativa absorvida pelo *template* “Carga_Flicker” na frequência fundamental;
- Q₀ – Parcela da potência reativa absorvida pelo *template* “Carga_Flicker” na frequência fundamental;
- P_{f_i} – Parcela da potência ativa absorvida pelo *template* “Carga_Flicker” em uma determinada frequência f_i;
- Q_{f_i} – Parcela da potência reativa absorvida pelo *template* “Carga_Flicker” em uma determinada frequência f_i;
- f_i – Frequência desejada para a modulação da tensão no barramento de conexão da carga perturbadora. Neste caso, considerou-se aquelas encontradas na faixa entre 1 e 25Hz, pois são estas as responsáveis pelo fenômeno *flicker*.

Vale ressaltar que, a amplitude da flutuação de tensão no barramento de conexão depende do valor das parcelas das potências ativa (P_{f_i}) e reativa (Q_{f_i}), consumidas pela carga em uma determinada frequência f_i.

5.4 – SISTEMA SIMULADO

A fim de se atingir os objetivos propostos neste capítulo, será analisado um sistema elétrico que representa uma síntese de um complexo elétrico real, cujo diagrama unifilar é mostrado na figura 5.1.

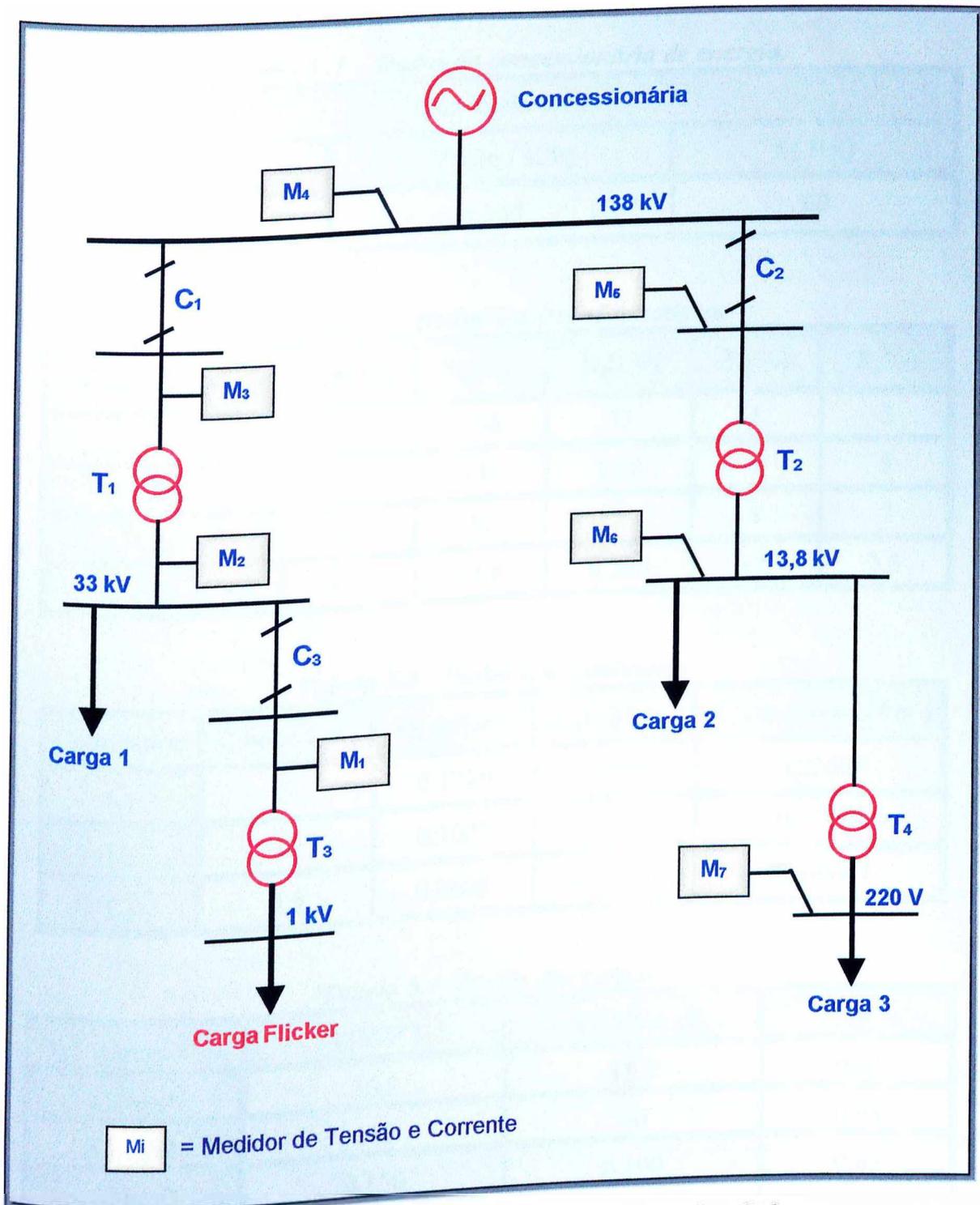


Figura 5.1 – Diagrama unifilar do sistema simulado

Com relação à figura anterior, deve-se observar que a variação do valor rms da tensão ao longo do sistema é provocada por uma carga geradora de flutuações de tensão, cuja representação é feita pelo *template* Carga_Flicker, descrita na seção anterior. Os demais componentes são representados através de suas respectivas equações diferenciais e/ou conexão física dos elementos, cujos parâmetros encontram-se dispostos nas tabelas a seguir.

Tabela 5.1 – Dados da concessionária de energia.

Concessionária		
Scc (MVA)	Vnom (KV)	f (Hz)
1500	138	60

Tabela 5.2 - Dados dos transformadores.

Transformadores	S_n (MVA)	V_p (kV)	V_s (kV)	R(%)	X(%)
T ₁	120	138	33	1	5
T ₂	150	138	13,8	1	5
T ₃	40	33	1	1	7
T ₄	0,3	13,8	0,220	1,5	3,5

Tabela 5.3 - Dados dos condutores.

Condutores	Comp(km)	R(Ω /km)	X_L (Ω /km)	X_c (megaohm/km)
C ₁	5	0,1280	0,36986	0,22093
C ₂	10	0,1037	0,36187	0,21587
C ₃	0,5	0,0628	0,20800	0,009007

Tabela 5.4 -Dados das cargas.

Carga	P(MW)	Q(MVAr)	fp
Carga1	36,8	15,7	0,92
Carga2	100	40	0,93
Carga3	0,150	0,100	0,83
Carga_Flicker	21	21	0,71

5.5 – CASOS ESTUDADOS

Uma vez selecionado o sistema elétrico a ser estudado, e seus respectivos componentes, faz-se necessário estabelecer as várias situações às quais o sistema será submetido, a fim de se investigar quais fatores são responsáveis pela atenuação das flutuações de tensão.

A tabela 5.5 indica os vários casos estudados, seus objetivos e as características impostas ao sistema da figura 5.1 durante as simulações.

Tabela 5.5 – Situações simuladas.

CASOS	OBJETIVOS	CARACTERÍSTICAS
CASO 1	Prover o caso base para a determinação das condições iniciais para os estudos.	Os elementos do diagrama unifilar assumem os valores apresentados nas tabelas 3.1 a 3.5, os transformadores são lineares ligados conforme o esquema mostrado na figura 5.1 e a Carga_Flicker se apresenta como constante em termos de consumo de potências, ou seja, não provoca flutuações de tensão.
CASO 2	Constatar o efeito do aumento da potência de curto-circuito	Todos os elementos do diagrama unifilar simulado apresentam-se como no Caso 1, à exceção da Carga_Flicker que gera tensões equilibradas moduladas por ondas senoidais com frequência de 5, 10 e 20HZ.
CASO 3	Avaliar o papel da resistências dos cabos	As resistências assumem os seguintes valores: zero, R (resistência nominal do cabo), $2xR$ e $4xR$. A Carga_Flicker gera flutuações equilibradas de tensão com frequência de 5, 10 e 20Hz.
CASO 4	Verificar a influência do tipo de ligação dos enrolamentos dos transformadores	As resistências dos cabos permanecem iguais às do Caso 1, e os transformadores têm suas ligações variadas entre Y-Y, Δ - Δ , Y- Δ e Δ -Y. Nesta análise a Carga_Flicker, gerando flutuações de tensão em frequências de 5, 10 e 20Hz, é simulada de duas maneiras, quais sejam: equilibrada e desequilibrada com diferentes graus de desbalanço.
CASO 5	Avaliar o efeito da saturação dos transformadores	Todos os parâmetros da simulação são assumidos iguais aos do Caso 1, incluindo apenas diferentes níveis de saturação aos transformadores e a Carga_Flicker gera flutuações de tensão de 5, 10 e 20Hz.
CASO 6	Verificar a influência dos motores	Os parâmetros da simulação permanecem nas mesmas condições do Caso 1, entretanto, a Carga_Flicker gera flutuações de tensão de 5, 10 e 20Hz e parte da carga 2 é substituída por motores de indução.

Como estratégia para a análise dos resultados será empregado o seguinte procedimento:

- Após serem executadas as simulações no domínio do tempo, coleta-se a forma de onda da tensão de linha, registrada pelo medidor conectado no ponto de interesse;
- A partir da forma de onda de tensão supra citada, calcula-se a transformada de Fourier, para um período de um minuto, donde são extraídas as amplitudes da componente de 60 Hz (V_{60}) e da onda moduladora (ΔV_m);
- De posse de ambas as amplitudes, determina-se o valor de $\Delta V\%$ através da equação (Capítulo III), rescrita em 5.3.

$$\Delta V\% = \frac{\Delta V_m}{V_{60}} \times 100 \quad (5.3)$$

- O valor do coeficiente de transferência (α) é calculado através da equação 5.4:

$$\alpha_{AB} = \left(\frac{\Delta V_B\%}{\Delta V_A\%} \right) \quad (5.4)$$

Onde:

- α_{AB} – Coeficiente de transferência entre dois pontos, A e B;
- $\Delta V_A\%$ – Amplitude percentual da flutuação da tensão no ponto A;
- $\Delta V_B\%$ – Amplitude percentual da flutuação da tensão no ponto B.

- O valor do coeficiente de atenuação (β_A) é calculado através da equação 5.5:

$$\beta = \left(1 - \frac{\Delta V_j\%}{\Delta V_i\%} \right) \times 100 \quad (5.5)$$

Onde:

- β – Coeficiente de atenuação entre duas condições diferentes, em um determinado ponto, as quais foram submetidas o sistema elétrico em estudo;
- $\Delta V_i\%$ – Amplitude percentual da flutuação de tensão no ponto monitorado, quando o sistema elétrico está submetido a condição i;
- $\Delta V_j\%$ – Amplitude percentual da flutuação de tensão no mesmo ponto monitorado na condição j, quando o sistema elétrico está submetido a condição j.

Nas simulações onde são consideradas flutuações equilibradas de tensão, a análise dos resultados é feita utilizando o valor de $\Delta V\%$ ou α de, apenas, uma das tensões de linha, uma vez que nas outras tais indicadores apresentam os mesmos valores. Por outro lado, nos casos em que as oscilações se apresentam desequilibradas, as análises são efetuadas para as três tensões de linha.

Como mostrado na tabela 5.5, todas as flutuações de tensão geradas nas simulações são senoidais com frequência de 5 Hz, 10 Hz ou 20 Hz, a fim de se avaliar, também, a influência da frequência de modulação no comportamento dos dispositivos testados. As figuras 5.2, 5.3 e 5.4, ilustram formas de onda de tensões moduladas pelas frequências de 5 Hz, 10 Hz e 20 Hz, respectivamente.

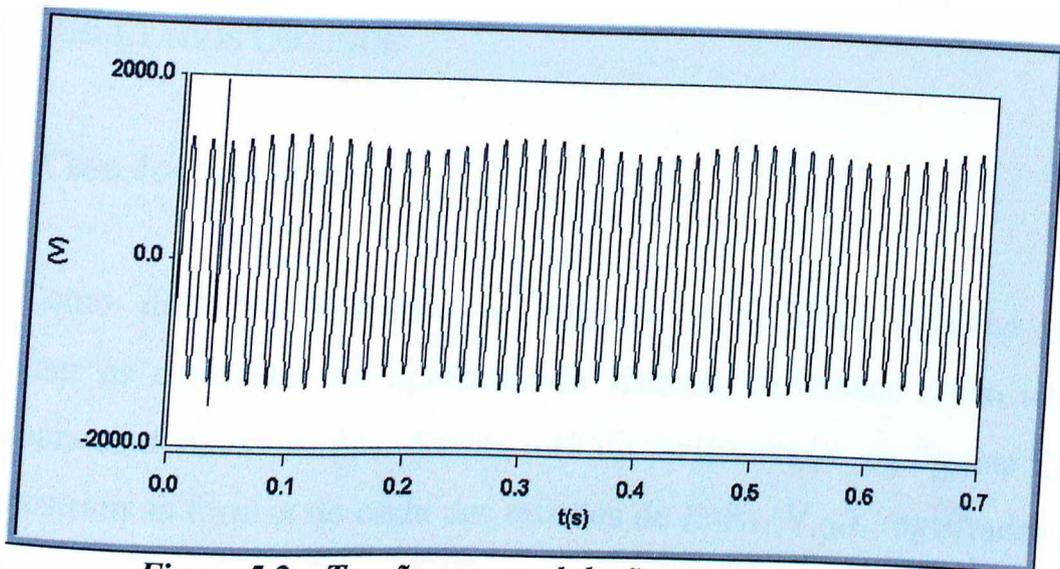


Figura 5.2 – Tensão com modulação senoidal de 5 Hz

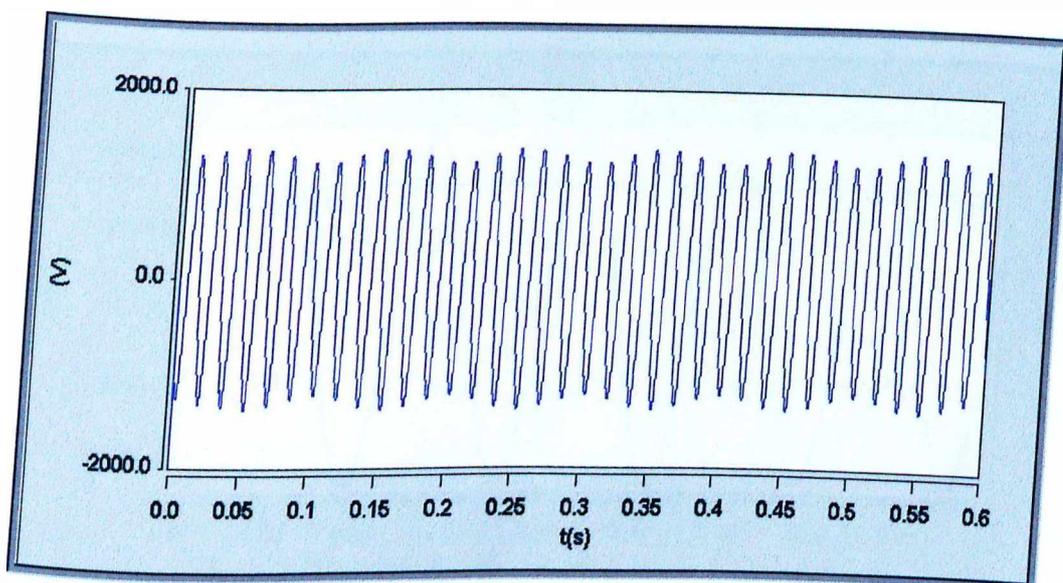


Figura 5.3 – Tensão com modulação senoidal de 10 Hz

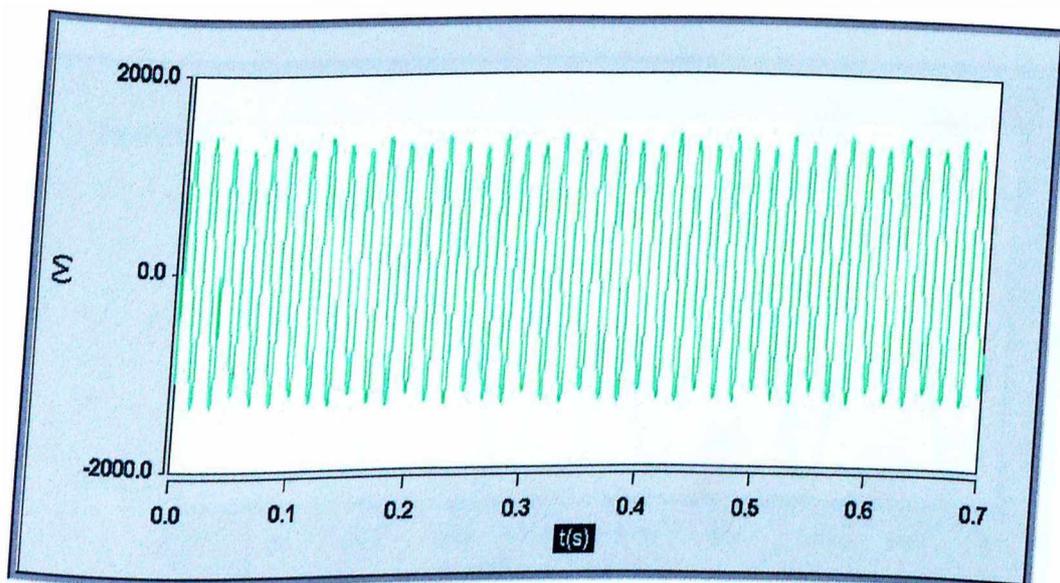


Figura 5.4 – Tensão com modulação senoidal de 20 Hz

5.6 – RESULTADOS OBTIDOS

5.6.1 - Caso 1: Caso base

Como dito anteriormente, o objetivo deste caso consiste em se determinar as condições de operação do sistema, utilizadas como situação inicial para os demais estudos. Assim, a título de ilustração, as figuras 5.5, 5.6 e 5.7 mostram as formas de onda das tensões de linha (V_{AB}), registradas pelos medidores M_2 , M_4 e M_7 (figura 5.1), respectivamente.

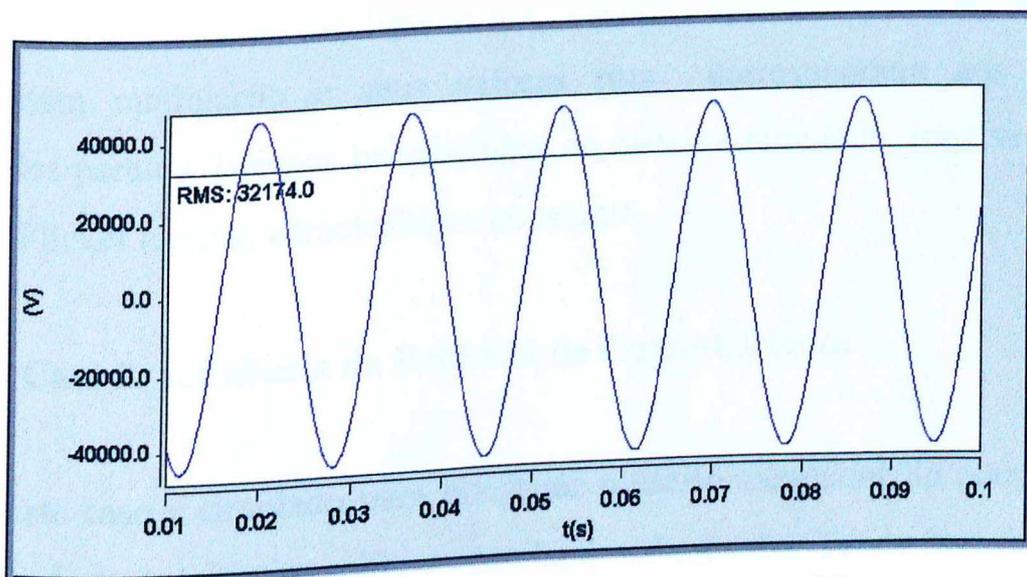


Figura 5.5 - Tensão registrada pelo medidor M_2 .

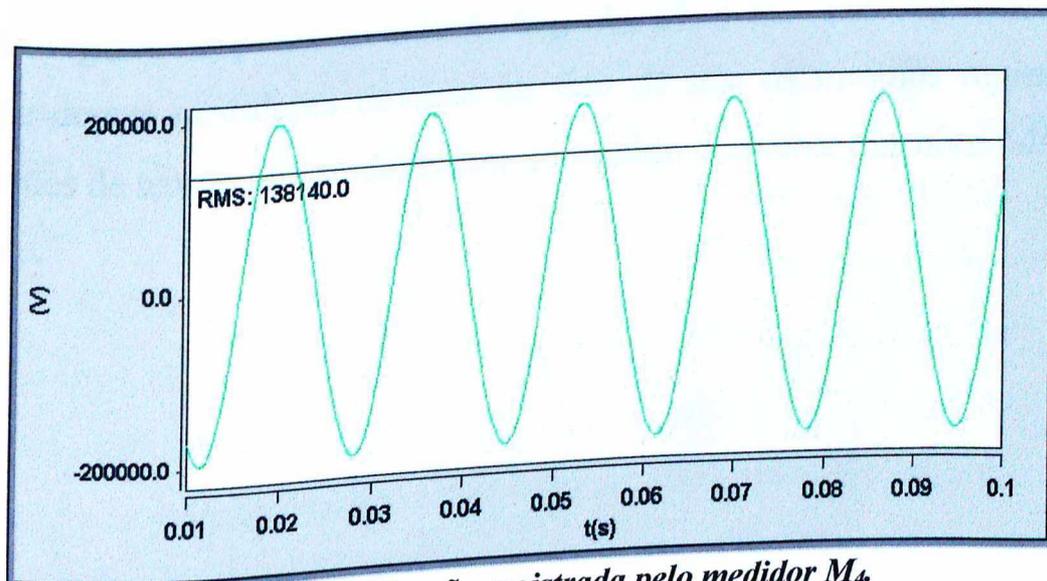


Figura 5.6 - Tensão registrada pelo medidor M_4 .

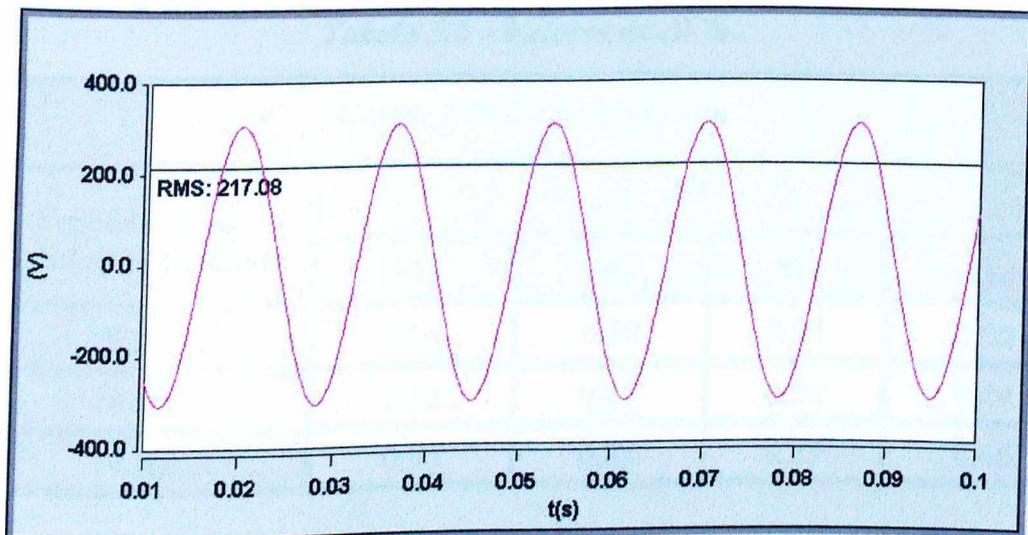


Figura 5.7 - Tensão registrada pelo medidor M₇.

Pode-se observar nas figuras 5.5, 5.6 e 5.7 que as formas de onda não apresentam modulação e seus valores rms correspondem aos valores esperados para os diversos barramentos do sistema simulado, uma vez que a Carga_Flicker assume característica constante.

5.6.2 – Caso 2: Influência da Potência de Curto-Circuito

Este caso é simulado para constatar o efeito atenuador do aumento da potência de curto-circuito sobre as oscilações de tensão. Tendo isso em vista, a tabela 5.6 e a figura 5.8 apresentam os valores de $\Delta V\%$ obtidos a partir das tensões registradas pelos medidores M₁, M₂, M₃ e M₄. Vale salientar que, a escolha desses medidores deve-se ao fato de que os mesmos registram as flutuações de tensão que se deslocam no sentido crescente dos níveis de curto-circuito.

Tabela 5.6 – Valores de $\Delta V\%$.

Carga_Flicker Equilibrada				
Frequência da modulação da tensão	$\Delta V\%$			
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
5 Hz	1,04	0,88	0,57	0,50
10 Hz	1,02	0,87	0,56	0,49
20 Hz	0,96	0,82	0,53	0,46

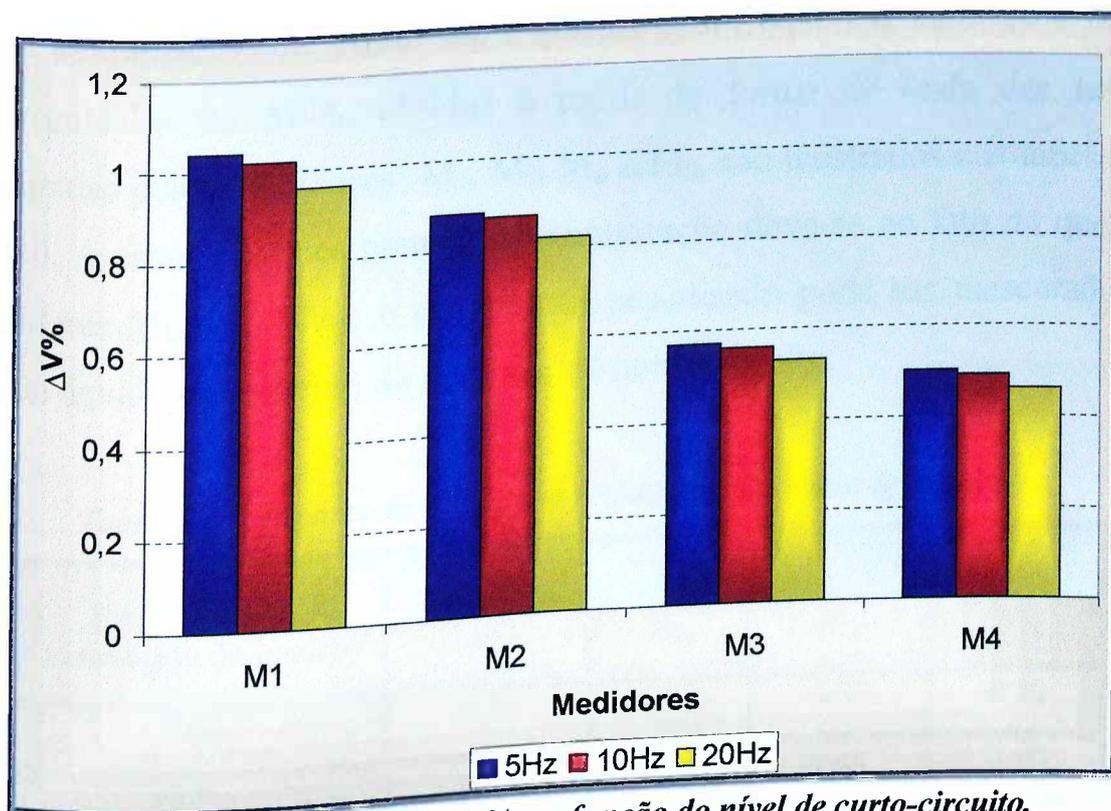


Figura 5.8 – Valores de $\Delta V\%$ em função do nível de curto-circuito.

Da tabela 5.6 e da figura 5.8, como demonstrado no item 4.3.1, observa-se que, $\Delta V\%$ diminui com o aumento do nível de curto-circuito, para todas as frequências de modulação da tensão. Ainda, calculando-se, através da equação 5.4, o valor do coeficiente de transferência (α_{14}) entre os barramentos onde estão ligados os medidores M₁ e M₄, tem-se que, as flutuações de tensão sofrem uma atenuação de aproximadamente 52%, para qualquer que seja a frequência da onda moduladora. Assim, pode-se dizer que, como esperado, o

aumento do nível de curto-circuito atenua as flutuações de tensão, igualmente para todas as frequências.

5.6.3 – Caso 3: Influência da Resistência dos Cabos

Nesta situação avalia-se o efeito da resistência dos cabos na propagação das oscilações de tensão. Para esta simulação os condutores do diagrama unifilar assumem quatro diferentes valores de resistência, mostrados na tabela 5.5, e as flutuações de tensão são impostas com frequência de 5, 10 e 20 Hz. Os resultados de $\Delta V\%$, obtidos a partir da forma de onda das tensões registradas pelos medidores M_4 , M_5 , M_6 e M_7 , são mostrados nas tabelas 5.7 à 5.10. A escolha destes pontos de monitoração deve-se ao fato de que, nos medidores M_1 , M_2 e M_3 , o efeito aqui pesquisado pode ser mascarado por aquele devido ao aumento da potência de curto-circuito.

Tabela 5.7 – Valores de $\Delta V\%$ para resistência dos cabos iguais a zero.

Frequência da modulação da tensão	$\Delta V\%$			
	M_4	M_5	M_6	M_7
5 Hz	0,50	0,50	0,50	0,50
10 Hz	0,49	0,49	0,49	0,49
20 Hz	0,46	0,46	0,46	0,46

Tabela 5.8 – Valores de $\Delta V\%$ para resistência dos cabos iguais as nominais.

Frequência da modulação da tensão	$\Delta V\%$			
	M_4	M_5	M_6	M_7
5 Hz	0,50	0,50	0,50	0,50
10 Hz	0,49	0,49	0,49	0,49
20 Hz	0,46	0,46	0,46	0,46

Tabela 5.9 – Valores de $\Delta V\%$ para resistência dos cabos iguais a duas vezes as nominais.

Frequência da modulação da tensão	$\Delta V\%$			
	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
5 Hz	0,51	0,51	0,51	0,51
10 Hz	0,49	0,49	0,49	0,49
20 Hz	0,46	0,46	0,46	0,46

Tabela 5.10 – Valores de $\Delta V\%$ para resistência dos cabos iguais a quatro vezes as nominais.

Frequência da modulação da tensão	$\Delta V\%$			
	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
5 Hz	0,51	0,51	0,51	0,51
10 Hz	0,50	0,50	0,50	0,50
20 Hz	0,47	0,47	0,47	0,47

Das tabelas 5.7, 5.8, 5.9 e 5.10 pode-se concluir que, a resistência dos condutores não exerce qualquer influência apreciável na propagação das oscilações de tensão, independente da frequência de modulação, uma vez que, para cada uma das situações testadas os valores de $\Delta V\%$, apresentam-se praticamente iguais em todos os medidores.

5.6.4 – Caso 4: Influência do Tipo de Ligação dos Transformadores

Com o intuito de investigar a influência do tipo de ligação dos enrolamentos dos transformadores sobre a propagação das flutuações de tensão, este caso, como já previsto na tabela 5.5, simula oscilações de tensão equilibradas e desequilibradas com frequência de 5, 10 e 20 Hz. Ainda, os

transformadores escolhidos para as análises assumem as ligações Y-Y, Δ - Δ , Y- Δ e Δ -Y.

Após uma criteriosa análise dos resultados obtidos em diversas simulações verificou-se que, para os transformadores T_1 e T_3 , nos quais as flutuações se propagam no sentido do aumento do nível de curto-circuito, o efeito estudado neste caso não pôde ser devidamente observado, face à forte atenuação produzida pelo aumento da potência de curto-circuito. Assim sendo, uma melhor constatação a respeito deste caso torna-se possível, através da avaliação das tensões registradas pelos medidores ligados aos barramentos primário e secundário dos transformadores T_2 e T_4 , uma vez que, nestes as flutuações de tensão se propagam no sentido inverso ao aumento do nível de curto-circuito.

A tabela 5.11 mostra os valores de $\Delta V\%$ calculados no primário e no secundário de T_2 , para todos os tipos de ligação dos seus enrolamentos, quando a Carga_Flicker gera oscilações equilibradas de tensão.

Tabela 5.11 – Valores de $\Delta V\%$ no primário (M_5) e no secundário (M_6) do transformador T_2 .

Carga_Flicker Equilibrada			
Ligação dos enrolamentos do transformador	Frequência da modulação da tensão	$\Delta V\%$	
		M_5	M_6
Y - Y	5 Hz	0,50	0,50
Δ - Δ	10 Hz	0,49	0,49
Δ - Y	20 Hz	0,46	0,46
Y - Δ			

Na tabela 5.11, observa-se que os valores de $\Delta V\%$ no primário e no secundário são iguais, para qualquer que seja a ligação dos enrolamentos do

transformador e a frequência da onda moduladora da tensão. Assim, confirmando as conclusões extraídas no capítulo IV, verifica-se que, o tipo de ligação do transformador não exerce qualquer influência na propagação da *flutuações equilibradas de tensão*.

A fim de gerar flutuações desequilibradas de tensão, a Carga_Flicker foi simulada, como em todos os casos, ligada em delta, porém, absorvendo da rede correntes de linha desequilibradas. Este desequilíbrio é conseguido através de diferentes valores de potência aparente para cada uma das fases da Carga_Flicker.

O nível de desequilíbrio das potências, responsável pelos desbalanços nas flutuações de tensão, pode ser calculado através da equação 5.6.

$$D = \frac{\Delta S}{S_M} \times 100 \quad (5.6)$$

Onde:

- D – Fator de desequilíbrio das potências;
- S_M – Potência aparente monofásica média solicitada pela carga e dada por: $[S_M = (S_{AB} + S_{BC} + S_{CA})/3]$
- ΔS – Diferença entre as potências aparentes monofásicas máxima e mínima solicitada pela carga, dada pela equação 5.7.

$$\Delta S = S_{MAX} - S_{MIN} \quad (5.7)$$

Onde:

- S_{Max} – Potência aparente monofásica máxima solicitada pela carga;
- S_{Min} – Potência aparente monofásica mínima solicitada pela carga.

Na tabela 5.12 são mostrados os valores das amplitudes percentuais das flutuações desequilibradas de tensão relativas ao primário e ao secundário do transformador T_2 . Para este caso, o grau de desequilíbrio de potências utilizado foi de 52,36%. Devido ao fato de tais flutuações se apresentarem desequilibradas, na tabela supra citada são apresentadas as amplitudes percentuais das oscilações de tensão entre todas as fases, quais sejam:

- $\Delta V_{AB} \%$ = Amplitude percentual da onda moduladora da tensão entre as fases A e B;
- $\Delta V_{BC} \%$ = Amplitude percentual da onda moduladora da tensão entre as fases B e C;
- $\Delta V_{CA} \%$ = Amplitude percentual da onda moduladora da tensão entre as fases C e A.

Tabela 5.12 – Valores de $\Delta V\%$ no primário (M_5) e no secundário (M_6) do transformador T_2 , quando ligado em Y-Y, Δ - Δ

Carga_Flicker Desequilibrada (D = 52,36%)							
Ligação dos enrolamentos do transformador	Frequência da modulação da tensão	M_5			M_6		
		$\Delta V_{AB} \%$	$\Delta V_{BC} \%$	$\Delta V_{CA} \%$	$\Delta V_{AB} \%$	$\Delta V_{BC} \%$	$\Delta V_{CA} \%$
Y - Y Ou $\Delta - \Delta$	5 Hz	0,75	0,54	0,51	0,75	0,54	0,51
	10 Hz	0,74	0,53	0,51	0,74	0,53	0,51
	20 Hz	0,70	0,50	0,49	0,70	0,50	0,49

A título de ilustração, a figura 5.9 apresenta graficamente os valores da tabela 5.12.

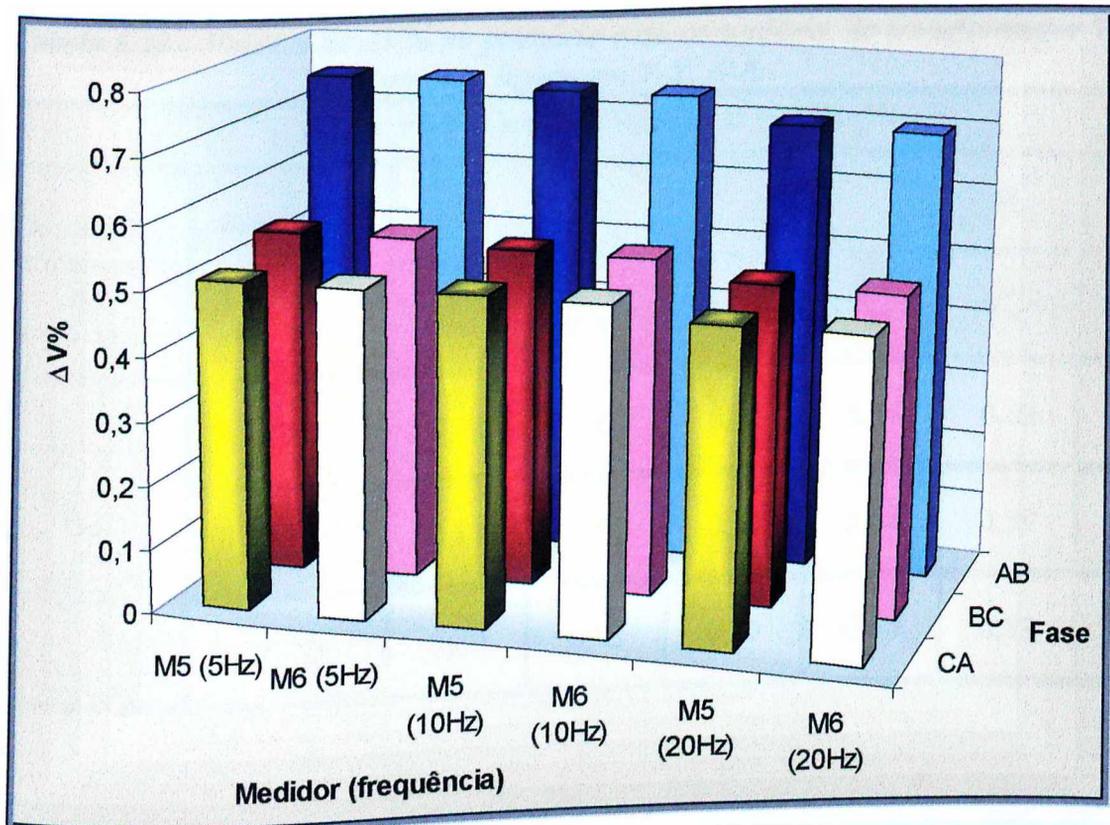


Figura 5.9 – Comportamento de $\Delta V\%$ no primário (M_5) e no secundário (M_6) do transformador T_2 , quando ligado em Y-Y, Δ - Δ

Na tabela 5.12 e na figura 5.9, através da comparação dos valores registrados por M5 e M6 em cada uma das linhas, verifica-se que, os transformadores ligados em Y-Y ou Δ - Δ não provocam qualquer alteração das flutuações desequilibradas de tensão que se propagam através dos mesmos. Esta constatação é válida para qualquer valor da frequência de modulação. Adicionalmente, face ao desequilíbrio imposto para as potências, constata-se que as oscilações de tensão também indicam acentuados níveis de desbalanços.

A tabela 5.13 juntamente com a figura 5.10 apresentam os resultados obtidos através da simulação com a Carga_Flicker apresentando desequilíbrio entre as potências de 120,46%.

Tabela 5.13 – Valores de $\Delta V\%$ no primário e no secundário do transformador T_2 , quando ligado em Y-Y, Δ - Δ

Carga Flicker Desequilibrada (D = 120,46%)							
Ligação dos enrolamentos do transformador	Frequência da modulação da tensão	M ₅			M ₆		
		$\Delta V_{AB}\%$	$\Delta V_{BC}\%$	$\Delta V_{CA}\%$	$\Delta V_{AB}\%$	$\Delta V_{BC}\%$	$\Delta V_{CA}\%$
Y - Y Ou	5 Hz	0,66	0,62	0,31	0,66	0,62	0,31
	10 Hz	0,64	0,59	0,31	0,64	0,59	0,31
$\Delta - \Delta$	20 Hz	0,60	0,53	0,32	0,60	0,53	0,32

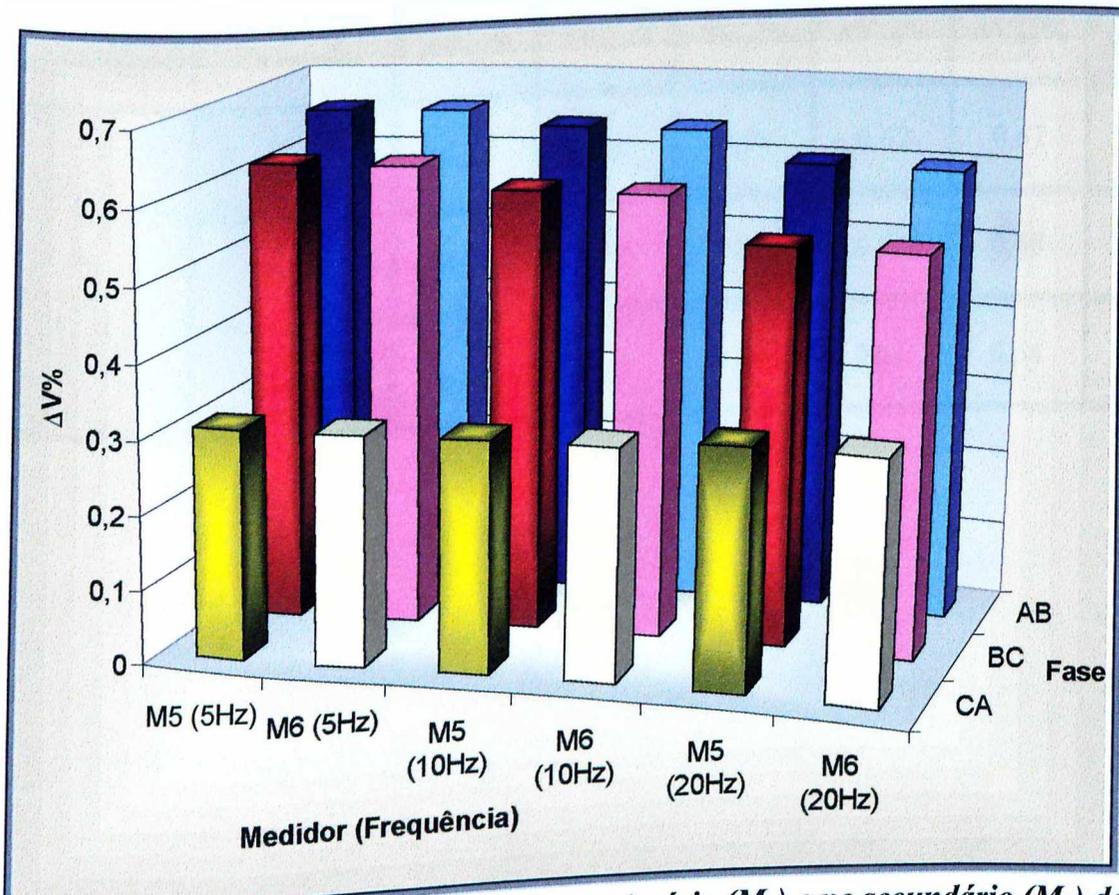


Figura 5.10 – Comportamento de $\Delta V\%$ no primário (M₅) e no secundário (M₆) do transformador T_2 , quando ligado em Y-Y, Δ - Δ .

Da análise dos resultados apresentados na tabela 5.13 e na figura 5.10 pode-se concluir que, o grau do desequilíbrio, mesmo se acentuado, continua não exercendo influência na propagação das flutuações desequilibradas de tensão através dos transformadores ligados em Y-Y e Δ - Δ .

Os valores de $\Delta V\%$, relativos às simulações nas quais T_2 apresenta-se ligado em Y- Δ e Δ -Y e as flutuações de tensão estão desequilibradas em 52,36%, são mostrados na tabela 5.14 e na figura 5.11.

Tabela 5.14 – Valores de $\Delta V\%$ no primário (M_5) e no secundário (M_6) do transformador T_2 , quando ligado em Y- Δ e Δ -Y.

Carga_Flicker Desequilibrada (D = 52,36%)							
Ligação dos enrolamentos do transformador	Frequência da modulação da tensão	M_5			M_6		
		$\Delta V_{AB}\%$	$\Delta V_{BC}\%$	$\Delta V_{CA}\%$	$\Delta V_{AB}\%$	$\Delta V_{BC}\%$	$\Delta V_{CA}\%$
Y - Δ ou Δ - Y	5 Hz	0,75	0,54	0,51	0,67	0,67	0,43
	10 Hz	0,74	0,53	0,51	0,66	0,68	0,42
	20 Hz	0,70	0,50	0,49	0,63	0,64	0,40

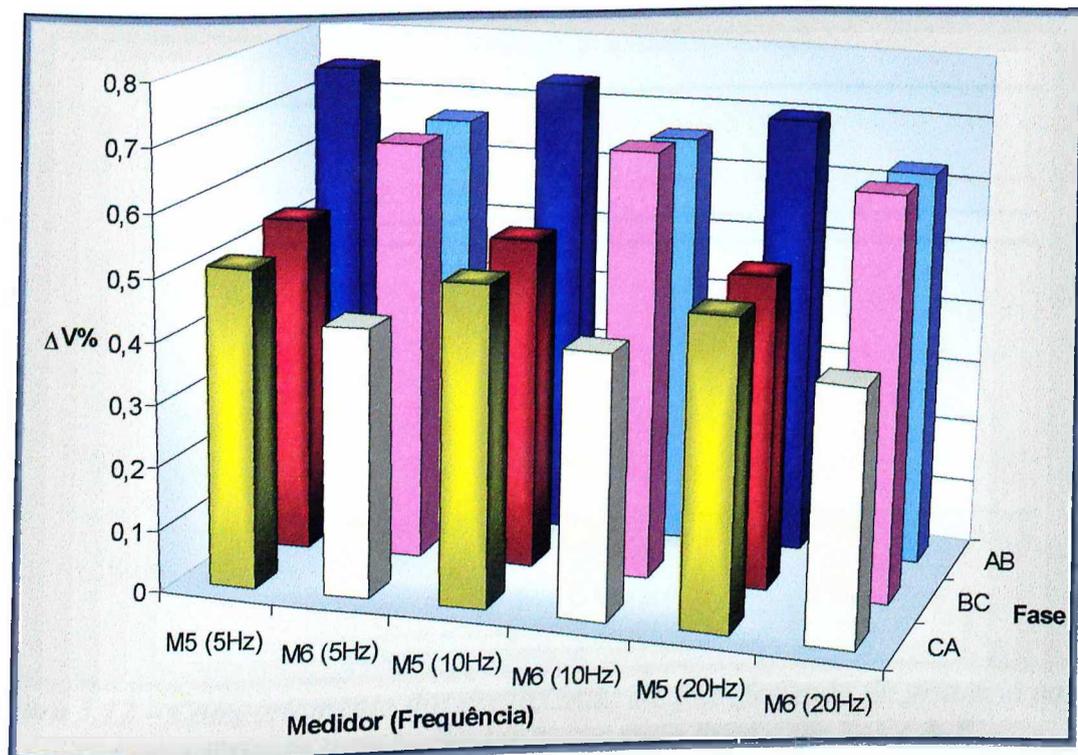


Figura 5.11 – Comportamento de $\Delta V\%$ no primário (M_5) e no secundário (M_6) do transformador T_2 , quando ligado em $Y-\Delta$ e $\Delta-Y$.

Da tabela 5.14 reproduzida graficamente na figura 5.11 observa-se que, para cada frequência estudada, os valores de flutuação de tensão encontrados nos medidores M_5 e M_6 são diferentes. Assim sendo, para que se possa avaliar melhor a propagação destas oscilações através do transformador T_2 , a tabela 5.15 e a figura 5.12 apresentam os coeficientes de transferência, calculados a partir da tabela 5.14.

Tabela 5.15 – Valores dos coeficientes de transferência do primário para o secundário do transformador T_2 , quando ligado em $Y-\Delta$ e $\Delta-Y$.

Carga_Flicker Desequilibrada ($D = 52,36$)				
Ligação dos enrolamentos do transformador	Frequência de modulação da tensão	Coeficiente de transferência (α)		
		AB	BC	CA
Y - Δ Ou $\Delta - Y$	5 Hz	0,89	1,24	0,84
	10 Hz	0,89	1,28	0,82
	20 Hz	0,90	1,28	0,81

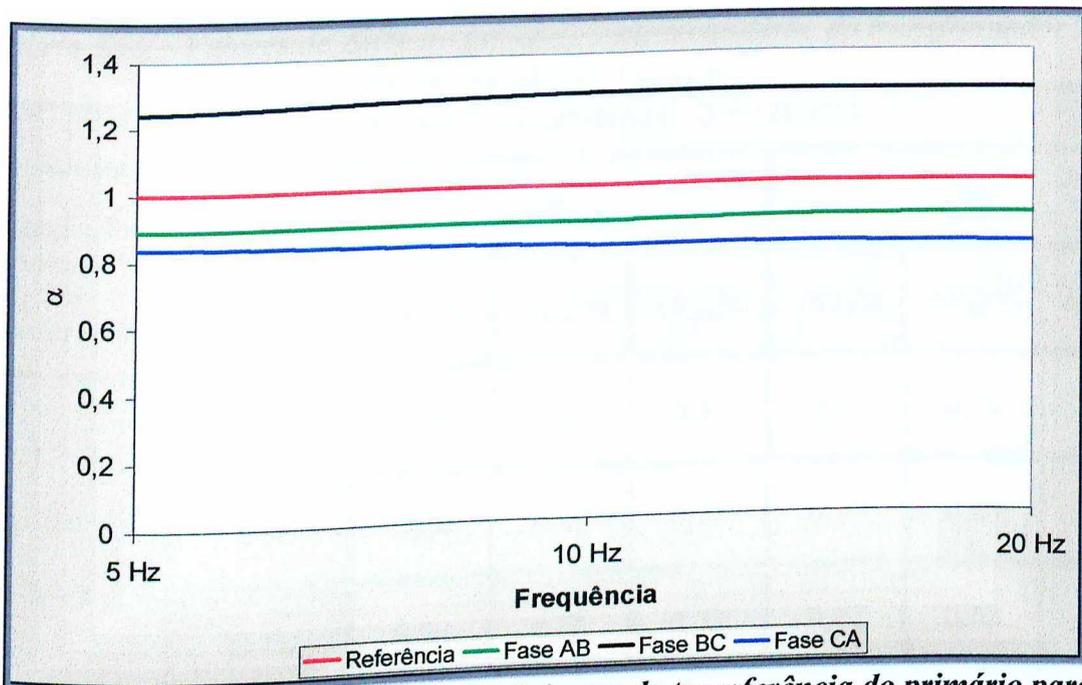


Figura 5.12 – Comportamento dos coeficientes de transferência do primário para o secundário do transformador T₂, quando ligado em Y- Δ e Δ -Y.

Os valores dos coeficientes de transferência apresentados na tabela 5.15 e na figura 5.12 mostram que, neste caso em particular, ao se propagarem através do transformador T₂, quando este está ligado em Y- Δ ou Δ -Y, as flutuações desequilibradas de tensão se mostram atenuadas nas linhas AB e CA. Já na linha BC, onde o coeficiente de transferência apresenta valores maiores que 1, assim as oscilações são amplificadas. É importante também ressaltar que, como demonstrado no item 4.3.3, o comportamento das flutuações é o mesmo para qualquer que seja a frequência da onda moduladora.

A tabela 5.16 e a figura 5.13 mostram os valores calculados de $\Delta V\%$, para a simulação onde se considera a Carga_Flicker com desequilíbrio de 120,97% e o transformador T₂ ligado em Y- Δ ou Δ -Y.

Tabela 5.16 – Valores de $\Delta V\%$ no primário e no secundário do transformador T_2 , quando ligado em Y- Δ e Δ -Y.

Carga_Flicker Desequilibrada (D = 120,97%)							
Ligação dos enrolamentos do transformador	Frequência da modulação da tensão	M_5			M_6		
		$\Delta V_{AB}\%$	$\Delta V_{BC}\%$	$\Delta V_{CA}\%$	$\Delta V_{AB}\%$	$\Delta V_{BC}\%$	$\Delta V_{CA}\%$
Y - Δ Ou Δ - Y	5 Hz	0,66	0,62	0,31	0,47	0,72	0,42
	10 Hz	0,64	0,59	0,31	0,47	0,69	0,40
	20 Hz	0,60	0,53	0,32	0,47	0,63	0,36

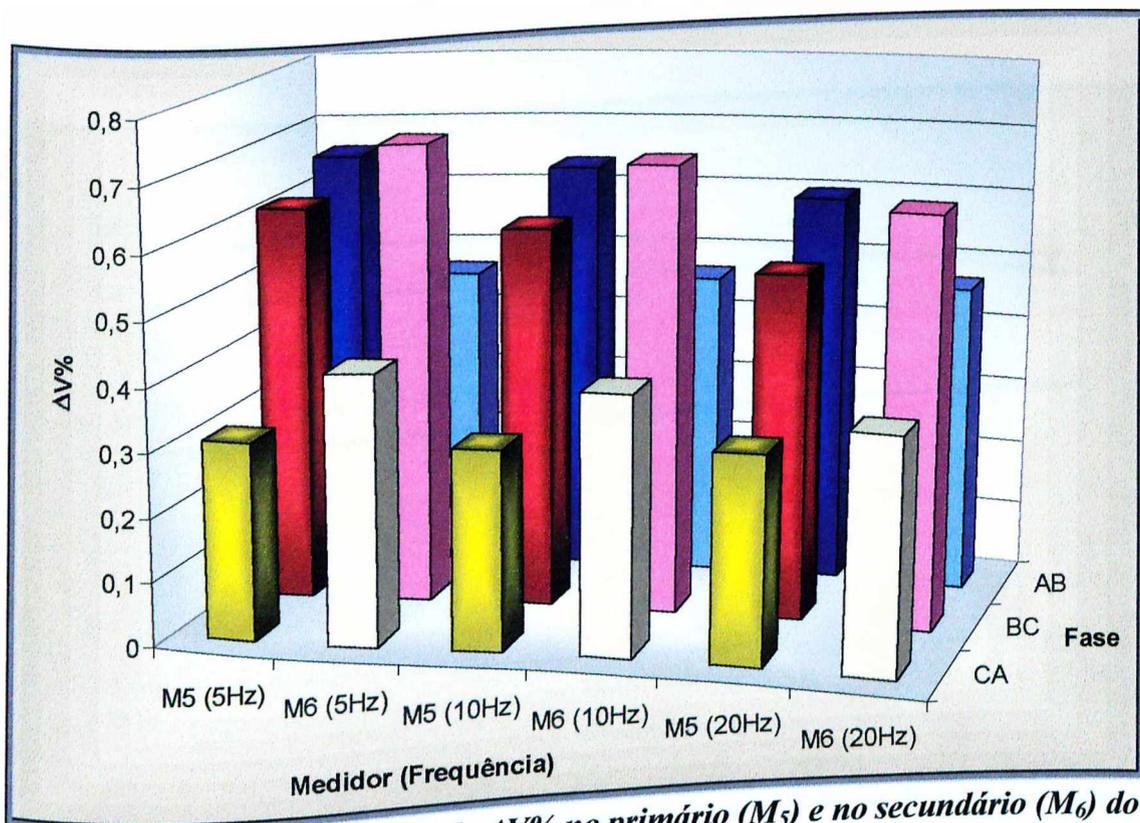


Figura 5.13 – Comportamento de $\Delta V\%$ no primário (M_5) e no secundário (M_6) do transformador T_2 , quando ligado em Y- Δ e Δ -Y.

A tabela 5.17 e a figura 5.14 mostram os coeficientes de transferência, calculados a partir da tabela 5.16, a fim de se avaliar melhor a propagação destas oscilações através do transformador T_2 .

Tabela 5.17 – Valores dos coeficientes de transferência do primário no para secundário do transformador T_2 , quando ligado em $Y-\Delta$ e $\Delta-Y$.

Carga_Flicker Desequilibrada (D = 120,97)				
Ligação dos enrolamentos do transformador	Frequência de modulação da tensão	Coeficiente de transferência (α)		
		AB	BC	CA
Y - Δ ou Δ - Y	5 Hz	0,71	1,16	1,35
	10 Hz	0,73	1,17	1,29
	20 Hz	0,78	1,19	1,12

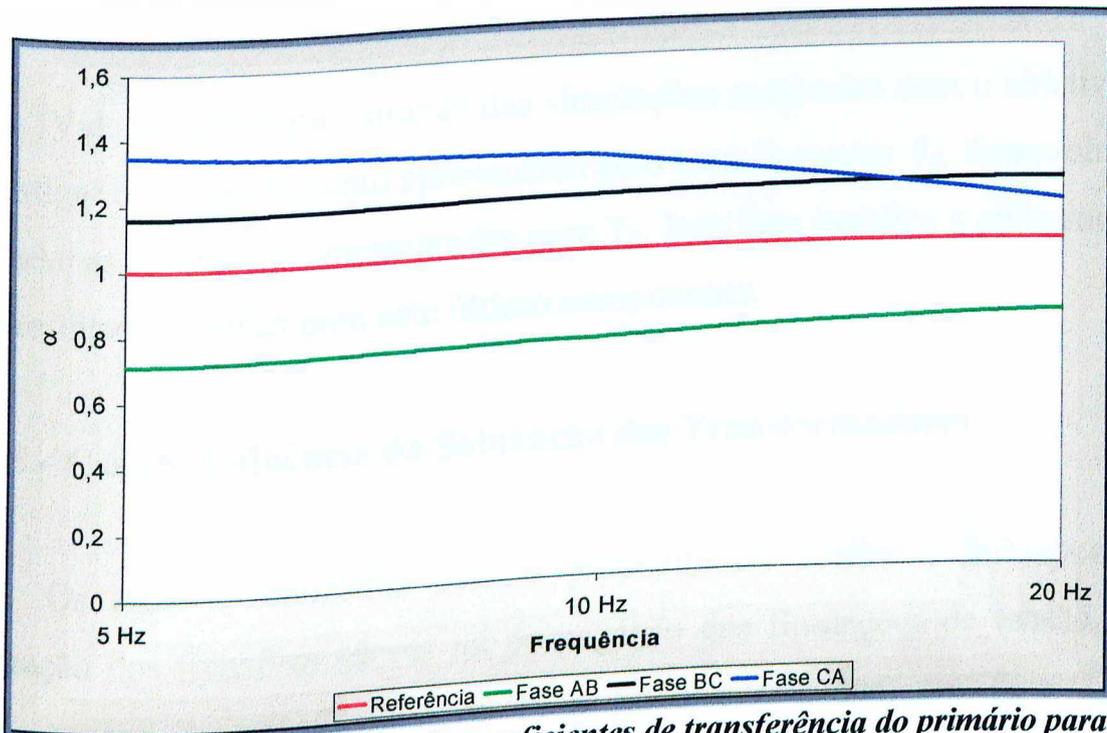


Figura 5.14 – Comportamento dos coeficientes de transferência do primário para o secundário do transformador T_2 , quando ligado em $Y-\Delta$ e $\Delta-Y$.

Através da análise dos valores dos coeficientes de transferência dados na tabela 5.17, e ilustrados na figura 5.14, calculados a partir dos valores

dados na tabela 5.16, pode-se observar que, neste caso particular, ao se propagarem através do transformador T_2 , quando este está ligado em Y- Δ ou Δ -Y, as flutuações desequilibradas de tensão são atenuadas na linha AB e amplificadas nas linhas BC e CA. Este comportamento é verificado, para qualquer que seja a frequência de modulação da tensão.

Levando em consideração as análises dos coeficientes de transferência, mostrados nas tabelas 5.15 e 5.17, pode-se concluir que:

- As flutuações desequilibradas de tensão, ao serem transferidas entre os enrolamentos de um transformador ligado em Y- Δ ou Δ -Y, podem ser atenuadas ou amplificadas.
- Os níveis de atenuação ou amplificação das oscilações de tensão sofrem influência da intensidade do desequilíbrio apresentado pela carga geradora do distúrbio.

Vale salientar que, através das simulações realizadas com o objetivo de investigar o comportamento apresentado pelo transformador T_4 , foram obtidas as mesmas conclusões apresentadas para T_2 . Este fato justifica a apresentação dos resultados apenas para este último componente.

5.6.5 – Caso 5: Influência da Saturação dos Transformadores

Os estudos realizados com o propósito de avaliar a influência da saturação dos transformadores na propagação das flutuações de tensão, têm como escopo os transformadores T_2 e T_4 , uma vez que, em T_1 e T_3 , as oscilações de tensão se propagam no sentido do aumento do nível de curto-circuito.

Deve-se observar que na biblioteca do simulador SABER, os modelos disponibilizados para representar transformadores permitem uma grande

diversificação de opções, dentre as quais a possibilidade de representações lineares e não-lineares para seus correspondentes circuitos magnéticos [35]. Devido a complexidade do tema, não cabe aqui tecer-se maiores comentários sobre a matéria, a não ser a citação que uma das grandezas de definição do nível de saturação está vinculada com a indução magnética imposta ao núcleo, qual seja, a indução máxima B_{max} .

Isso posto, em primeiro lugar, é analisada a influência da saturação de cada um dos transformadores citados mantendo os demais na condição linear. Em um segundo momento, é averiguada a influência da intensidade da saturação no mesmo transformador T_2 do sistema em estudo (figura 5.1).

Na tabela 5.18 são mostrados os resultados obtidos da simulação com o transformador T_2 saturado, empregando-se $B_{max} = 1,2$ T, e os demais na condição linear.

Tabela 5.18 – Valores de $\Delta V\%$ no primário (M5) e no secundário de T_2 (M6).

Frequência da modulação da tensão	$\Delta V\%$	
	M5	M6
5 Hz	1,05	1,05
10 Hz	1,04	1,04
20 Hz	0,98	0,98

Observando-se os valores mostrados na tabela 5.18 verifica-se que, as flutuações percentuais de tensão $\Delta V\%$ são totalmente transferidas do primário (M5) para o secundário (M6) do transformador T_2 . Portanto, no caso em análise, a saturação do transformador T_2 não provocou qualquer influência na propagação das flutuações de tensão, para qualquer frequência de modulação.

Os resultados obtidos dos estudos em que são considerados níveis mais intensos de saturação do transformador T_2 , são mostrados na tabela 5.19. Para o presente caso o referido transformador foi conduzido a um nível de B_{\max} de 1,4 T.

Tabela 5.19 – Valores de ΔV no primário (M5) e no secundário (M6) de T_2 .

Frequência da modulação da tensão	$\Delta V\%$	
	M5	M6
5 Hz	1,05	1,05
10 Hz	1,02	1,02
20 Hz	0,96	0,96

Na tabela 5.19 observa-se que, os valores de $\Delta V\%$, calculados para os medidores M5 e M6, são iguais e, portanto, neste caso, também, não houve qualquer alteração das flutuações de tensão devido o efeito da saturação, para qualquer uma das frequência de modulação.

De forma análoga, as simulações referentes à saturação do transformador T_4 , levaram as mesmas conclusões referentes a T_2 , motivo pelo qual são apresentados os resultados, apenas, relativos a este último dispositivo.

5.6.6 – Caso 6: Influência dos Motores Elétricos

Como definido na tabela 5.5, este caso destina-se à investigação da influência das cargas motoras na propagação das flutuações de tensão. Para tanto, parte da Carga 2, do diagrama unifilar mostrado na figura 5.1, foi

substituída por um motor de indução de potência equivalente, como ilustra a figura 5.15.

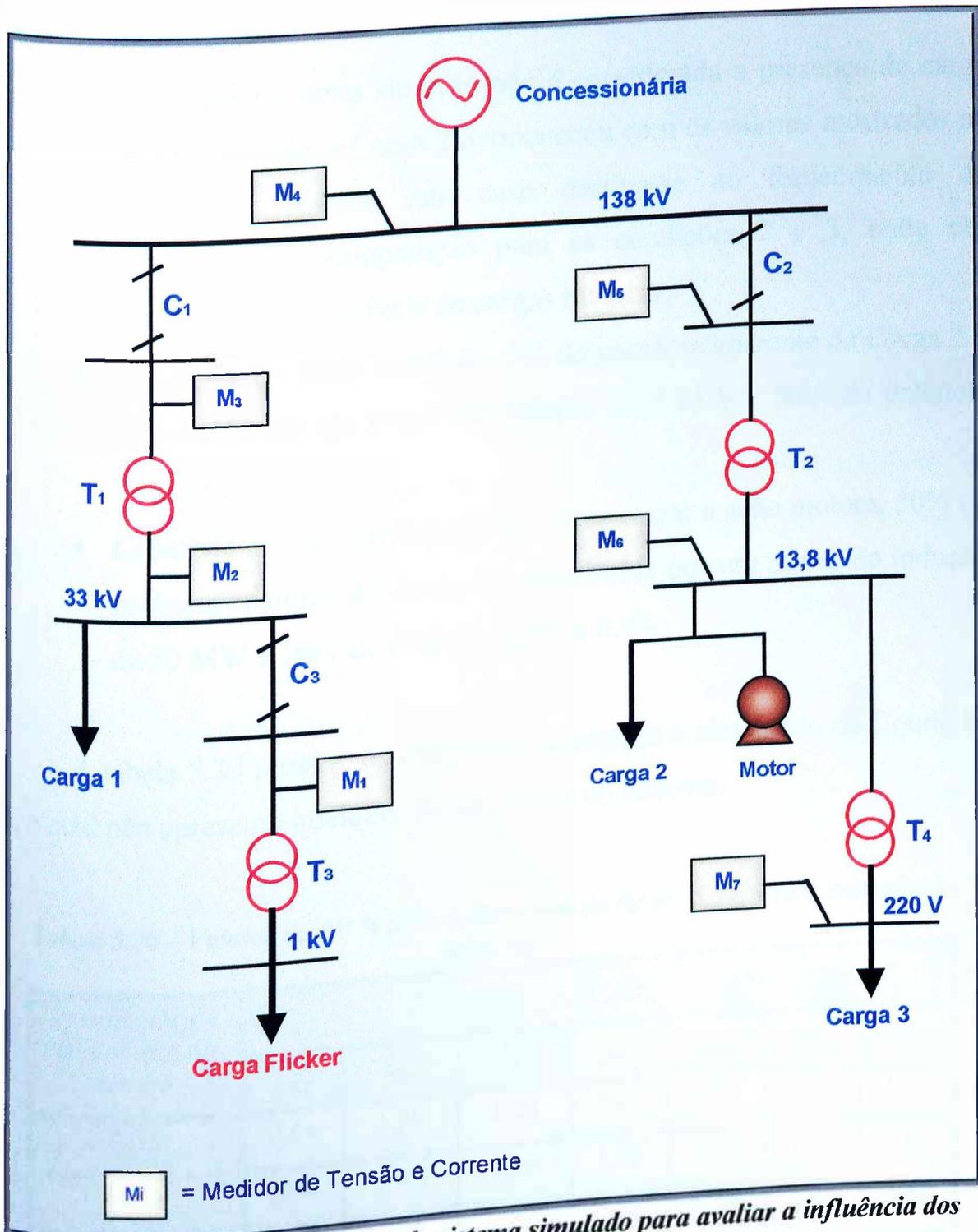


Figura 5.15 – Diagrama unifilar do sistema simulado para avaliar a influência dos motores elétricos.

Na figura 5.15, todos os elementos do diagrama unifilar assumem valores iguais aos do Caso 1 da tabela 5.5, com exceção da Carga 2 e do motor de indução. Assim sendo, as condições assumidas pela referida carga são:

- **Condição 1** - nesta situação não é considerada a presença de carga motora, ou seja, a Carga 2 permaneceu com os valores mostrados na tabela 5.4. Assim, este caso destina-se ao fornecimento de parâmetros de comparação para as condições 2 e 3, onde são considerados dois níveis de cargas motoras;
- **Condição 2** – nesta condição, 5% da potência aparente da Carga 2 é substituída por um motor de indução de 5 MW e fator de potência igual a 0,93;
- **Condição 3** – De forma a melhor caracterizar a ação motora, 50% da potência aparente da Carga 2 é substituída por um motor de indução de 50 MW e fator de potência igual a 0,93.

A tabela 5.20 mostra os resultados referentes à simulação da Condição 1, a qual não apresenta qualquer motor ligado ao sistema.

Tabela 5.20 – Valores de ΔV % para o diagrama da figura 5.14, sem a presença de motores.

Frequência de modulação da tensão	ΔV %						
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
5Hz	2,04	1,88	1,22	1,07	1,07	1,07	1,07
10Hz	2,00	1,84	1,19	1,04	1,04	1,04	1,04
20Hz	1,88	1,79	1,12	0,98	0,98	0,98	0,98

Os valores de $\Delta V\%$ para a Condição 2, quando 5% da Carga 2 é substituída por um motor de indução trifásico de 5 MW, são apresentados na tabela 5.21.

Tabela 5.21 – Valores de $\Delta V\%$ referentes à simulação do diagrama da figura 5.11, com 5% da Carga 2 substituída por motor de indução.

Frequência de modulação da tensão	$\Delta V\%$						
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
5Hz	2,03	1,87	1,21	1,06	1,06	1,06	1,06
10Hz	1,99	1,83	1,19	1,03	1,03	1,03	1,03
20Hz	1,88	1,73	1,12	0,97	0,97	0,97	0,97

Na tabela 5.22 são dados os valores das flutuações percentuais de tensão para a Condição 3, onde 50% da Carga 2 é substituída por um motor de indução de 50 MW.

Tabela 5.22 – Valores de $\Delta V\%$ referentes a simulação do diagrama da figura 5.11, com 50% da Carga 2 substituída por motor de indução.

Frequência de modulação da tensão	$\Delta V\%$						
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
5Hz	2,00	1,85	1,19	1,04	1,04	1,04	1,04
10Hz	1,97	1,82	1,16	1,01	1,01	1,01	1,01
20Hz	1,86	1,71	1,10	0,95	0,95	0,95	0,95

A fim de melhor visualizar a influência da proporção da carga rotativa sobre as flutuações de tensão do sistema simulado, são apresentados nas figuras 5.16, 5.17 e 5.18 os gráficos comparativos entre os valores de $\Delta V\%$ para as três condições de carga motora, nas frequências de 5, 10 e 20 Hz, respectivamente.

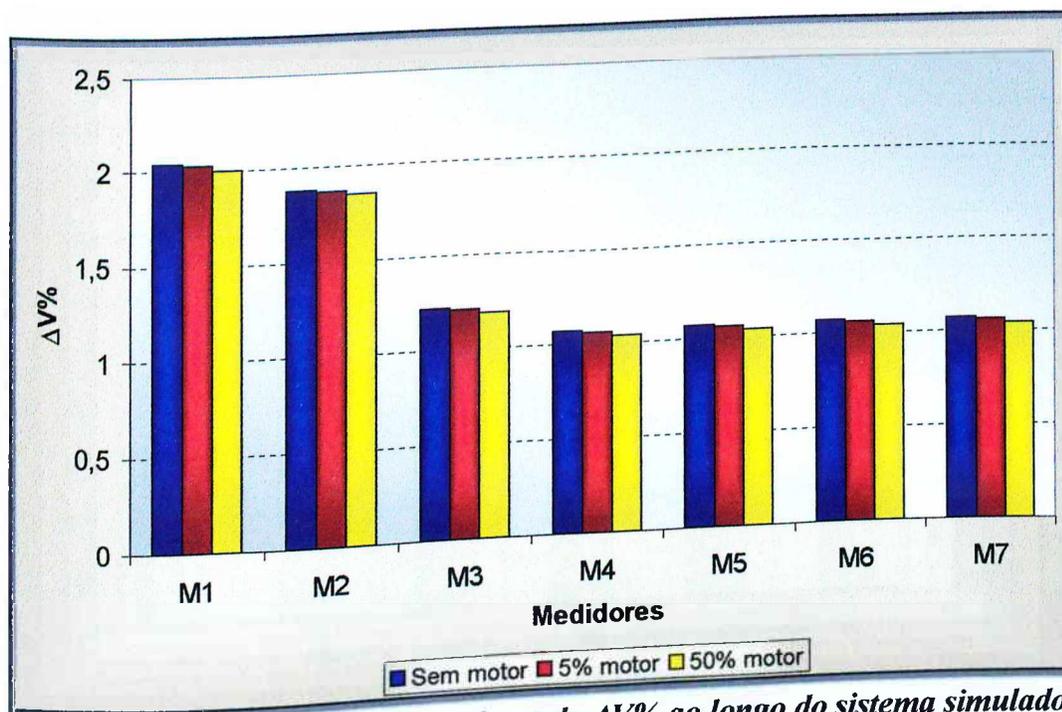


Figura 5.16 – Comparação entre os valores de $\Delta V\%$ ao longo do sistema simulado para as três condições de carga motora (5Hz).

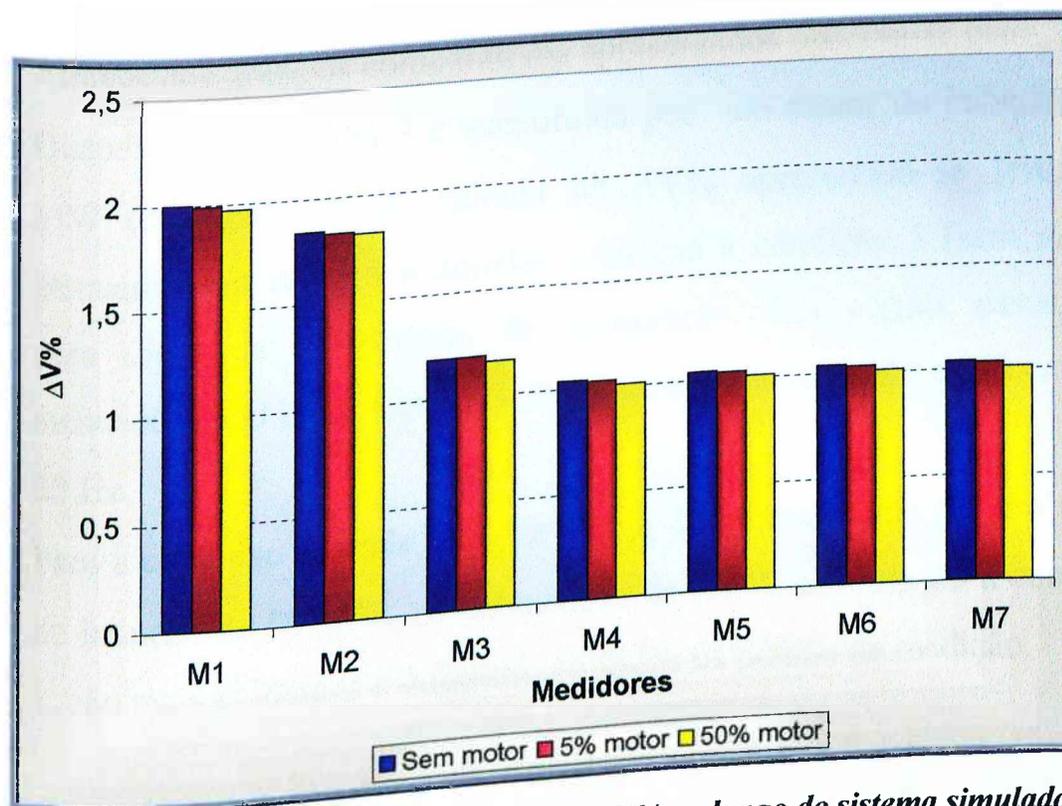


Figura 5.17 – Comparação entre os valores de $\Delta V\%$ ao longo do sistema simulado para as três condições de carga motora (10Hz).

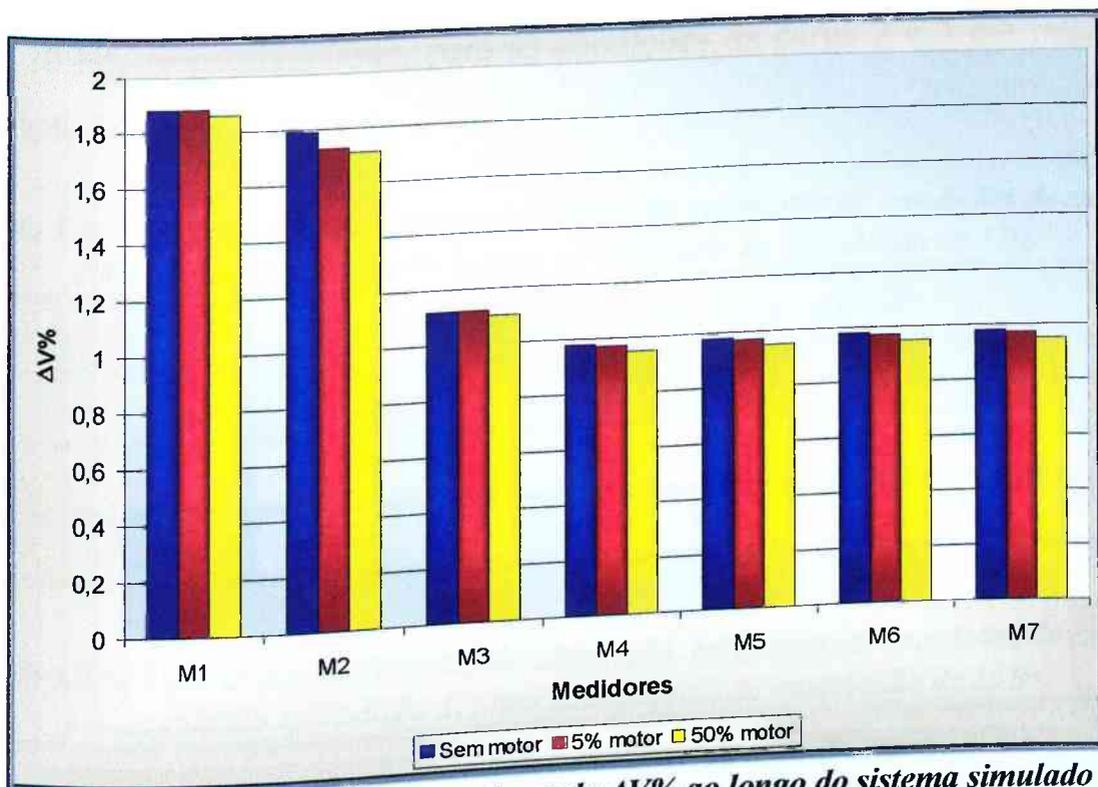


Figura 5.18 – Comparação entre os valores de $\Delta V\%$ ao longo do sistema simulado para as três condições de carga motora (20Hz).

Através dos gráficos comparativos apresentados observa-se que:

- Quando 5% da Carga 2 é substituída por um motor de indução de 5 MW (condição 2), os valores de $\Delta V\%$ apresentam-se levemente atenuados em relação a aqueles relativos à condição 1 (sem motor), para todas as frequências de modulação. Em alguns casos, tais atenuações são imperceptíveis, como nos medidores M1 e M3 em 10 e 20 Hz.
- Para a condição 3, onde 50% da Carga 2 é representada por um motor de indução de 50 MW, as atenuações de $\Delta V\%$, em relação à condição 1, são mais evidentes e ocorrem em todos os pontos de medição.

De forma complementar, as tabelas 5.23, 5.24 e 5.25 mostram, os valores dos coeficientes de atenuação das flutuações percentuais de tensão, calculados utilizando-se a equação 5.5. Vale salientar que, as tabelas referidas anteriormente apresentam os valores de β para as tensões moduladas por 5,

10 e 20 Hz, respectivamente, para as condições de carga 2 e 3 em relação à condição 1.

Tabela 5.23 – Valores dos coeficientes de atenuação referentes às condições de carga 2 e 3 em relação a condição 1, para a frequência de modulação de 5Hz.

Condição	Coeficiente de Atenuação (β)						
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
2	0,5	0,5	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
3	2,0	1,6	2,5	2,9	2,9	2,9	2,9

Tabela 5.24 – Valores dos coeficientes de atenuação referentes as condições de carga 2 e 3 em relação a condição 1, para a frequência de modulação de 10Hz.

Condições de carga em relação à condição 1	Coeficiente de Atenuação (β)						
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
2	0,55	0,55	0,00	0,97	0,97	0,97	0,97
3	1,52	1,10	2,59	2,97	2,97	2,97	2,97

Tabela 5.25 – Valores dos coeficientes de atenuação referentes as condições de carga 2 e 3 em relação a condição 1, para a frequência de modulação de 20Hz.

Condições de carga em relação à condição 1	Coeficiente de Atenuação (β)						
	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆	M ₇
2	0,0	0,0	0,0	1,03	1,03	1,03	1,03
3	1,08	1,17	1,82	3,16	3,16	3,16	3,16

Da observação das tabelas 5.23, 5.24 e 5.25 pode-se concluir que: para todas as frequências de modulação a atenuação provocada pelos motores elétricos aumenta com a elevação da potência da carga motora ligada ao sistema elétrico e da frequência da modulação.

5.7 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou de forma sucinta aspectos da plataforma SABER, utilizada nas simulações computacionais. Também, foram tecidas considerações sobre a necessidade de desenvolvimento de um modelo de carga geradora de flutuações de tensão e das características básicas de um novo recurso incorporado à biblioteca do referido simulador, o qual recebeu a designação de *template Carga_Flicker*.

Além da contribuição supra mencionada, o presente capítulo apresentou, como objetivo principal, a análise, através de simulações computacionais, de um sistema elétrico de potência típico, a fim de verificar a influência das variáveis capazes de influenciar o processo da transferência das oscilações de tensão. Em consonância com a bibliografia especializada, foram então considerados os efeitos: do nível de curto-circuito, da resistência dos condutores, da presença de motores elétricos, da saturação e do tipo de ligação dos enrolamentos dos transformadores sobre a propagação das flutuações de tensão.

A influência de cada um dos parâmetros citados foi avaliada através da comparação do valor das flutuações percentuais de tensão em diversos pontos de monitoração do sistema elétrico em análise. Também, em alguns casos, calculou-se o valor do coeficiente de transferência ou do coeficiente de atenuação a fim de quantificar esta influência.

Através de criteriosas análises dos resultados obtidos nas diversas simulações, pode-se verificar que:

- De todos os parâmetros pesquisados, o que exerce maior influência na propagação das flutuações de tensão é o nível de curto-circuito do sistema. Esta constatação, bastante previsível, veio a confirmar as demonstrações efetuadas no Capítulo IV, onde foi verificada uma

forte atenuação das oscilações de tensão com o aumento da potência de curto-circuito;

- A resistência dos condutores não produz qualquer influência significativa sobre a propagação das flutuações de tensão através do sistema;
- A influência do tipo de ligação dos enrolamentos do transformador se reflete na forma de ampliações ou atenuações das oscilações desequilibradas de tensão que se deslocam através dele. Tais efeitos, conforme previsto no capítulo IV, só acontecem quando os enrolamentos do transformador são ligados em Δ -Y ou Y- Δ . Vale salientar que, o tipo de ligação do transformador não exerce qualquer influência sobre as flutuações equilibradas de tensão que se propagam através do mesmo;
- No âmbito dos casos simulados foi verificado que, a saturação do transformador não interferiu na transferência das flutuações de tensão;
- Tendo em vista a natureza operacional dos motores, os quais, devido a sua combinada inércia elétrica/mecânica, proporcionam um efeito de aumento momentâneo do nível de curto-circuito para os barramentos e sistema onde se encontram inseridos, verificou-se que os mesmos tendem a reduzir os níveis das flutuações de tensão. Esta atenuação aumenta a medida que cresce a potência de carga motora do sistema e a frequência da modulação.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÕES

Embora se reconheça que as conclusões específicas relativas a cada capítulo já tenham, na sua maioria, sido apresentadas ao longo da dissertação, faz-se necessário uma abordagem geral do trabalho, salientando os aspectos envolvidos com as contribuições oferecidas por este, bem como, possíveis desenvolvimentos futuros, com o objetivo de aprimorar os estudos aqui realizados.

O Capítulo II procurou mostrar os conceitos iniciais necessários aos estudos das flutuações de tensão. Dentro deste contexto, apresentou uma síntese das principais cargas elétricas causadoras de impactos na tensão e revisou a metodologia clássica para a determinação analítica dos níveis de flutuações de tensão num determinado ponto de um sistema elétrico. Em seguida analisou os principais impactos produzidos pelas flutuações de tensão e, também, as principais estratégias utilizadas para atenuar as mesmas.

O capítulo III foi dedicado ao efeito *flicker*, tendo em vista que este é o mais freqüente e conhecido fenômeno provocado pelas flutuações de tensão. Inicialmente foram apresentados os fundamentos teóricos deste indicador de qualidade da energia elétrica. Especial atenção foi dedicada aos conceitos e conseqüências associados ao efeito da cintilação luminosa. Em seguida mostrou-se os resultados de estudos realizados com o objetivo de investigar a sensibilidade de diversos tipos de lâmpadas às flutuações de tensão. Neste contexto, foi mostrado a definição e a forma de calcular o fator de ganho (FG) de uma lâmpada, e ainda, gráficos através dos quais pode-se comparar, por

exemplo, o FG das lâmpadas incandescentes de 120V e 220V com o das fluorescentes eletrônicas, e também, o de diversos tipos de lâmpadas fluorescentes compactas. Finalmente, o capítulo apresentou o principal método de quantificação do *flicker* e também as bases dos critérios nacionais e internacionais mais relevantes à regulamentação do fenômeno aqui enfocado.

No capítulo IV foram considerados os principais fatores responsáveis pela atenuação/amplificação das flutuações de tensão. Dentre aqueles considerados mais significativos destacam-se: o aumento do nível de curto-circuito, as resistências elétricas dos condutores, os tipos de ligação dos enrolamentos dos transformadores, a saturação dos transformadores e, finalmente, a presença de motores elétricos ligados ao sistema. Tais análises tiveram por base resultados de estudos realizados através de simulações computacionais, testes em laboratórios e medições de campo obtidos das referências bibliográfica consultadas e citadas ao longo do texto. Adicionalmente, de forma a proporcionar um mecanismo sistematizado para quantificar os níveis de atenuação/amplificação e a transferência das flutuações de tensão, em função dos fatores de influência supra citados, foram propostas e apresentadas expressões de definição para o cálculo do que denominou por coeficientes de transferência (α) e atenuação (β). Estes indicadores foram exaustivamente empregados ao longo do capítulo seguinte para expressar o comportamento das flutuações à medida que estas se propagassem pelos sistemas elétricos.

Como última contribuição, o capítulo V procurou investigar e avaliar, através de procedimentos computacionais, os efeitos distintos dos fatores de influência anteriormente mencionados no capítulo IV. Para tanto, empregou-se um sistema elétrico de potência simplificado e representativo de uma instalação real e, a partir deste, avaliou-se computacionalmente a influência

do nível de curto-circuito, conexões dos transformadores, etc. na propagação das flutuações de tensão. Para atender a este propósito, inicialmente, foi desenvolvido um *template* representativo de uma carga geradora de oscilações de tensão. Esta carga foi denominada *Carga_Flicker* e incorporada na biblioteca do programa computacional denominado por SABER, o qual foi utilizado nas simulações realizadas na presente dissertação. Uma vez cumprida esta etapa, foram então realizados estudos de forma a constatar os efeitos do nível de curto-circuito, da resistência dos condutores, da presença de motores elétricos, da saturação e do tipo de ligação dos enrolamentos dos transformadores sobre a propagação das flutuações de tensão.

A influência de cada um dos parâmetros citados foi avaliada através da comparação do valor das flutuações percentuais de tensão em diversos pontos de monitoração do sistema elétrico em análise. Também, em alguns casos, calculou-se o valor do coeficiente de transferência ou do coeficiente de atenuação/amplificação a fim de quantificar esta influência. Dentre as principais constatações feitas para os resultados obtidos ressaltam-se:

- Conforme seria esperado, o fator que exerce maior influência na propagação das flutuações de tensão é o nível de curto-circuito do sistema;
- A resistência dos condutores não produz qualquer influência significativa sobre a propagação das flutuações de tensão através do sistema;
- O tipo de conexão dos enrolamentos do transformador se reflete na forma de ampliações ou atenuações das oscilações desequilibradas de tensão que se deslocam através dele. Tais efeitos só acontecem quando os enrolamentos do transformador são ligados em Δ -Y ou Y- Δ . Por outro lado, o tipo de ligação do transformador não influencia nas flutuações equilibradas de tensão que se propagam através do mesmo;

- Para os casos simulados foi verificado que, a saturação do transformador não interferiu na transferência das flutuações de tensão. Todavia, fica ressaltado que esta situação ficou limitada aos níveis de saturação impostos ao transformador testado;
- Tendo em vista a natureza operacional dos motores, para os barramentos e sistema onde se encontram inseridos tais dispositivos, verificou-se que os níveis das flutuações de tensão se apresentam mais atenuados. Este efeito aumenta a medida que cresce a potência de carga motora do sistema e a frequência da modulação.

Finalmente, como sugestões para futuros desenvolvimentos, acredita-se ser relevante a concentração de esforços voltados para:

- Analisar o fenômeno da propagação das flutuações de tensão quando da existência de oscilações com múltiplas frequências;
- Proceder maiores investigações sobre os efeitos da saturação na propagação das flutuações de tensão;
- Realizar estudos mais detalhados dos mecanismos que regem a influência das cargas rotativas sobre o fenômeno da propagação das oscilações de tensão;
- Consubstanciar os trabalhos teóricos com resultados experimentais, com vistas a ratificação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, R. C. et all, “Electrical Power Systems Quality”, McGraw-Hill, USA, 1996.

- [2] ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico “Procedimentos de Rede”, Módulos contendo informações para acesso, padrões de desempenho e requisitos técnicos para conexão à rede básica, Abril, 1999.

- [3] GCOI/SCEL e GCPS/CTST “Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”. Rev. 1, 11/1997.

- [4] DEJAEGER, E. et all, “Flicker Transfer Coefficients from HV to MV and LV Systems”,

- [5] DESQUILBET, G., “Propagation of Flicker Produced by an E.A.F.”, Electricité de France, September, 1995.

- [6] DECKMANN, S. M., “Estimativa de Fatores de Atenuação de Flicker na Rede”, III SBQEE, 1999, Brasília – DF.

- [7] UIE “Guide to Quality of Electrical Supply for Industrial Installations”, Part V – Flicker and Voltage Fluctuations, 1998.

- [8] IEC 555-3 “Disturbances in Supply Systems Caused by household appliances and similar electrical equipment”, Ed. 1982.

- [9] PRALAS, J. e outros, “Qualidade da Energia no Sistema de Alimentação de Fornos a Arco”. Revista Eletricidade Moderna, Página 129-133, 08/1997.
- [10] Relatório Técnico, “Análise da Qualidade da Energia Elétrica – Sistema Gerdau-Cosigua S.A.”, Activa Serviços Especiais Ltda, Agosto, 1999.
- [11] OLIVEIRA, F. A., “Uma Proposta para a Quantificação do Efeito de Cintilação Luminosa – “Flicker” – Dissertação de Mestrado, UFU, Agosto, 1994
- [12] PEIXOTO G. R., “Um Instrumento para a Medição de Flicker” – Dissertação de Mestrado, UFU, Agosto, 1995.
- [13] ROCCO, A., “O fenômeno da Cintilação Luminosa – Efeito “Flicker”. Dissertação de Mestrado, FEC/DEE, Unicamp, Junho, 1988.
- [14] MILLER, T. J. E., “Reactive Power Control in Electric Systems ”, Editora John Wiley 1982.
- [15] ZOUITI, M., SAADATE, S.. UPFC Application to Suppress Flicker in Arc Furnace Supply System. Proceeding of European Power Electronics – EPE’97. Trondheim. September 1997. Pp. 3.983-. 987.
- [16] DECKMANN, S. M., “Flutuações de Tensão na Rede Elétrica” – Relatório 1 – ANEEL, Novembro, 1999.

- [17] GIRGIS, A. A. et all, "Measurement and Prediction of Voltage Flicker Magnitude and Frequency", IEEE – Transaction on Power Delivery Vol. 5, No. 3, July, 1995.
- [18] UIE Disturbance Study Committee, "Flicker Measurements and Evaluation, 1991.
- [19] UIE Disturbance Study Committee, "Flicker Measurements and Evaluation", 1986.
- [20] HALPIN, S. M. et all, "Voltage and Lamp Flicker Issues: Should the IEEE Adopt the IEC Approach?", [online], [citado em 04/10/1999], Disponível: <http://grouper.ieee.org/groups/1453/drpaper.html>
- [21] Electricity Council, "Supply to Arc Furnaces", Engineering Recommendation, London, 1970, pp. 7/2.
- [22] UIE Disturbance Study Committee, "Arc Furnace Disturbance –State of Art", 1980.
- [23] UIE Disturbance Study Committee, "Flickermeter – Functional and Design Specifications", 1982.
- [24] "Calibration Tests on Flickermeters built by Germany, Italy and U.K." Les Ancizes Report, Jan. 1984.
- [25] Flicker Measurement Method in Japan". UIE Japanese Shadow Committee, 1984.

- [26] IEC Publication 868. "Flickermeter - Functional and design specifications". Ed. 1986.
- [27] IEC Publication 61000-4-15. "Flickermeter Functional and design specifications". Ed. 1997.
- [28] KEY, T. S. at all, "International Standards Limiting Voltage Fluctuations and Objectionable Light Flicker". PQA'97.
- [29] DECKMANN, S. M., "Flutuações de Tensão na Rede Elétrica – Indicadores de Avaliação" – Relatório Final Relatório 1 – ANEEL, Março, 2000.
- [30] IEC Standard 1000 –3 - 3 " Limitation of Voltage Fluctuation and Flicker in Low Voltage Supply Systems for Equipment with Rated Current $< 16\text{ A}$ ", CEI 1994.
- [31] IEC Standard 1000 –3 - 5 " Limitation of Voltage Fluctuation and Flicker in Low Voltage Supply Systems for Equipment with Rated Current $> 16\text{ A}$ ", CEI 1994.
- [32] IEC 1000-3-7 "Assessment of Emission Limits for Fluctuating Loads in MV and HV Power System", CEI 1996.
- [33] STADE, D at all, "Simultaneous Measurements for Analysing the Flicker Dissipation in Meshed HV Power Systems", ICHQP 98, Athens, Greece, October , 1998.

- [34] ZABALA, L. et al., "Flicker Assessment : Individual Contribution of an Arc Furnace and Flicker Transmission", CIRED, June, 1999.
- [35] DOMINGUES, E. G. "Uma Contribuição à Modelagem de Transformadores Convencionais e Especiais Utilizando o Simulador SABER" Tese de Mestrado, UFU, Agosto, 1996.

FU-00012590-7