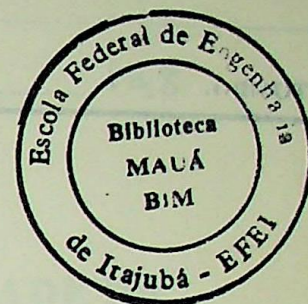


TESE

831

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

EFEI



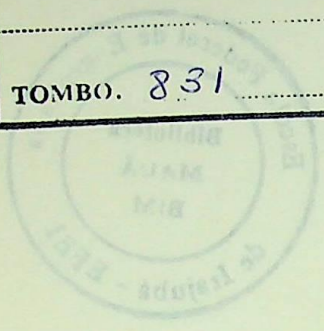
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA
TENSÃO SOB O ENFOQUE DO FENÔMENO "FLICKER"**

JOSÉ MARIA DE CARVALHO FILHO

Itajubá, fevereiro de 1996

CLASS. 621.316:621.3.015.004.15(043.2)
CUTTER. C 331a
TOMBO. 831



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA
TENSÃO DO ENFOQUE DO FENÔMENO DE PULSOS

JOSE MARIA DE CARVALHO FILHO

Juiz de Fora, fevereiro de 1995

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
EFEI

**ANÁLISE E QUANTIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA
TENSÃO SOB O ENFOQUE DO FENÔMENO “FLICKER”**

JOSÉ MARIA DE CARVALHO FILHO

Dissertação apresentada à Escola Federal de Engenharia de Itajubá como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR : José Carlos de Oliveira, Dr. (UFU)

CO-ORIENTADOR : Manoel Eduardo M. Negrisoli, Dr. (EFEI)

Itajubá, fevereiro de 1996



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

A N E X O I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada por Portaria nº 016 de 08.01.96, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: "Análise e Quantificação da Qualidade da Tensão sob o Enfoque do Fenômeno Flicker" apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Sistemas de Potência, satisfeitas as demais exigências regimentais, a José Maria de Carvalho Filho.

Itajubá, 02 de Fevereiro de 1996.

Profa. Francisca Aparecida de Camargo Pires
1ª Examinador - UNICAMP

Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrisoni
2ª Examinador - EFEI

Prof. José Carlos de Oliveira
3ª Examinador - UFU - Orientador



Ministério da Educação e do Desporto
 ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
 Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

A N E X O I I

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação "Análise e Quantificação da Qualidade da Tensão sob o Enfoque do Fenômeno Flicker"

Autor: José Maria de Carvalho Filho

JULGAMENTO

EXAMINADORES	CONCEITO	RUBRICA
1º	A ⁺	<i>FACPires</i>
2º	A ⁺	<i>[assinatura]</i>
3º	A ⁺	<i>[assinatura]</i>
4º	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX	XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

Resultado Médio: Conceito A⁺, ou seja, aprovado com distinção

Observações: _____

Itajubá, 02 de Fevereiro de 1996.

FACPires

Profa. Francisca Aparecida de Camargo Pires
 1º Examinador - UNICAMP

[assinatura]
 Prof. Manoel Eduardo Miranda Negrisola
 2º Examinador - FFEI

[assinatura]
 Prof. José Carlos de Oliveira
 3º Examinador - UFU - Orientador

À minha esposa Elisete, pelo constante apoio, e
às minhas filhas Elisa e Marina, pelas horas
ausentes.

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, pois sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais, que trabalharam muito para me oferecer condições para estudar e buscar ser alguém na vida.

À J P Eletric, representada pelo seu Diretor-Presidente, Engenheiro Ademir Carnevalli Guimarães, por ter me tornado possível cursar a pós-graduação, concomitantemente com as atividades profissionais na empresa.

Ao professor Dr. José Carlos de Oliveira, meu mais profundo agradecimento pela confiança depositada, pela orientação segura, pelo incentivo, por ter se apresentado como um ombro amigo nos momentos mais difíceis e por fim, pela abdicção de várias horas de lazer em Itajubá, em prol da realização deste trabalho.

À EFEI pela oportunidade oferecida.

Aos funcionários da PPG pelos esclarecimentos e prestatividade durante a realização deste trabalho.

RESUMO

A Qualidade da Tensão é, hoje, um dos fatores mais importantes para a avaliação do padrão de Qualidade de suprimento elétrico. Dentro deste contexto, surge esta dissertação, que tem como objetivos: apresentar os principais itens de avaliação da Qualidade da Tensão, dando enfoque ao efeito "Flicker"; conceituar e rever as principais metodologias mais difundidas, internacionalmente, para quantificação deste fenômeno; realizar uma análise comparativa entre os dois analisadores de cintilação desenvolvidos no Brasil; e por fim, aplicar e comparar os Métodos Britânico, Francês e Padrão-UIE a partir dos resultados de uma medição de campo, realizada numa indústria siderúrgica típica, onde se encontram instalados fornos a arco de grande porte e um complexo de laminação, utilizando-se o analisador de cintilação desenvolvido pela Universidade Federal de Uberlândia.

ABSTRACT

The Voltage Quality is presently one of the most important factor of the evaluation of the power supply quality. In this scenario, this dissertation discuss the main itens of the evaluation of the power supply quality, focusing the Flicker effect. It also defines and reviews the main methods widely accepted internationaly for quantifying the Flicker and performs a comparative analysis between two flickermeters developed in Brazil.Finally, this work applies and compares the British, the French and the UIE Methods to the results obtained from a test in the field, performed in a typical steel industry, where large arc furnaces are installed in a lamination site, using the flickermeter developed by the Federal University at Uberlândia.

SUMÁRIO

	Pág.
AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
SUMÁRIO	iv
CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	
1.1 - Considerações Gerais	001
1.2 - O Estado da Arte	002
1.3 - Estrutura da Dissertação	004
CAPÍTULO II - ASPECTOS GERAIS SOBRE A QUALIDADE DA TENSÃO	
2.1 - Considerações Iniciais	006
2.2 - Itens para Avaliação da Qualidade da Tensão	007
2.2.1 - Interrupções	008
2.2.2 - Harmônicos	009
2.2.3 - Variações de Tensão	009
2.2.3.1 - Longa Duração	010
2.2.3.2 - Curta Duração ou Temporárias	010
2.2.3.3 - Transitórias	012
2.2.3.4 - Aleatórias e Repetitivas	014
2.2.4 - "Flicker"	014
2.3 - Principais Cargas Vulneráveis a Distúrbios de Tensão	015
2.4 - Normalizações e Recomendações Aplicáveis	016
2.4.1 - Interrupções	017

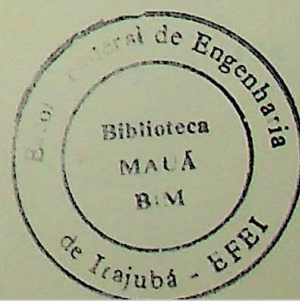
2.4.2 - Variações de Tensão de Longa Duração	017
2.4.3 - Variações de Tensão de Curta Duração e Transitórias	017
2.4.4 - Harmônicos	018
2.4.5 - 'Flicker'	018
2.5 - Considerações Finais	019

CAPÍTULO III - FLUTUAÇÕES DE TENSÃO E CARGAS PERTURBADORAS

3.1 - Considerações Iniciais	020
3.2 - Conceituação do Problema	021
3.3 - Principais Cargas Perturbadoras	022
3.3.1 - Fornos a Arco	022
3.3.2 - Laminadores	029
3.3.3 - Máquinas Elétricas de Solda	031
3.3.4 - Motores Acionando Cargas Cíclicas	034
3.3.5 - Outras Cargas	036
3.4 - Efeitos das Flutuações de Tensão	036
3.5 - Considerações Finais	037

CAPÍTULO IV - O EFEITO "FLICKER"-FUNDAMENTOS E QUANTIFICAÇÃO

4.1 - Considerações Iniciais	038
4.2 - Aspectos Gerais sobre o Efeito "Flicker"	039
4.3 - Métodos para Avaliação do Efeito "Flicker"	044
4.3.1 - Método Britânico	045
4.3.2 - Método Francês	050
4.3.3 - Método Padrão UIE	056
4.4 - Considerações Finais	065



CAPÍTULO V - INSTRUMENTOS NACIONAIS DE MEDIÇÃO DE “FLICKER”

5.1 - Considerações Iniciais	066
5.2 - Analisador de Cintilação- UNICAMP	067
5.3 - Analisador de Cintilação- UFU	074
5.4 - Análise Comparativa entre os Analisadores de Cintilação	086
5.5 - Considerações Finais	090

CAPÍTULO VI - APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS E UM EXEMPLO DE MEDIÇÃO

6.1 - Considerações Iniciais	092
6.2 - Aplicação de Critérios	093
6.2.1 - Histórico	093
6.2.2 - Locais de Avaliação Segundo o Método Padrão	097
6.2.3 - Responsabilidades	097
6.2.4 - Tolerância e Flexibilidade	098
6.3 -Um exemplo de Medição	099
6.3.1 - Características do Sistema Consumidor	099
6.3.2 - Medições Realizadas	100
6.3.2.1 - Medição 1	102
6.3.2.2 - Medição 1A	107
6.3.2.3 - Medição 2	112
6.3.2.4 - Medição 3	117
6.3.2.5 - Medição 4	122
6.3.2.6 - Medição 5	127
6.4 - Análise dos Resultados	132
6.5 - Considerações Finais	137

CAPÍTULO VII - CONCLUSÕES GERAIS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145
-----------------------------------	------------

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

Dentre as principais áreas de investigação voltadas para o avanço da Engenharia Elétrica, uma das mais expressivas, nos dias atuais, envolve as questões vinculadas à Qualidade da Energia.

O crescente interesse pelo tema, tanto pelas concessionárias de energia como pelos consumidores deve-se, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos elétricos e eletrônicos, hoje largamente utilizados nos diversos segmentos de atividade, seja na área industrial, seja na área comercial.

O fato é que, com o desenvolvimento da eletrônica de potência e da microeletrônica, os sistemas estão deixando de ser eletromecânicos e se transformando em sistemas eletroeletrônicos. Esta transformação, por um lado, tem contribuído para o uso mais eficiente da energia elétrica; colocando à disposição da sociedade aparelhos que proporcionam maior conforto e melhor qualidade de vida; por outro, deixando os equipamentos atuais mais sensíveis e vulneráveis às variações da Qualidade da Energia, do que aqueles utilizados no passado.

Em contrapartida, a proliferação de cargas como: os fornos a arco, laminadores, máquinas de solda e da eletrônica de potência aplicada nos diversos segmentos de atividade, têm aumentado a quantidade das cargas perturbadoras e, como consequência, deteriorado a qualidade da energia no sistema supridor com: desequilíbrios, distorção da onda da tensão e

oscilações de tensão, sendo que estes distúrbios podem se manifestar de forma isolada ou conjunta.

Somado a isto e a exemplo do que ocorre a nível mundial, a sociedade brasileira tem aumentado suas exigências quanto à melhoria da qualidade de qualquer produto ou serviço ao qual ela tem acesso, sendo que a energia elétrica não foge à regra.

Dos diferentes aspectos a serem investigados, o item - Qualidade da Tensão - apresenta destacada importância, já que os distúrbios de tensão são diversificados, apresentam causas e efeitos distintos e podem ser gerados tanto no sistema fornecedor como no sistema consumidor de energia elétrica.

Muito embora se reconheça que, até a presente data, não exista regulamentação própria sobre a matéria, a importância do tema não deixa dúvidas que, num futuro próximo, deverão ser editadas no Brasil, normas sobre os níveis mínimos de qualidade a serem observados no sistema elétrico.

É dentro deste contexto que este trabalho está inserido, visto que suas metas estão voltadas, inicialmente, para apresentar do ponto de vista qualitativo, os itens mais importantes para avaliação da Qualidade da Tensão e, por fim, apresentar os métodos mais utilizados para a quantificação da Qualidade da Tensão frente às oscilações de tensão de baixa frequência, responsáveis pelo aparecimento do fenômeno de cintilação luminosa, mais conhecido como efeito "Flicker".

1.2 O Estado da Arte

A nível mundial, os países da Europa [1] e o Canadá [2] têm investido em pesquisas e monitoração da Qualidade da Tensão, além de procurar definir limites para os diversos distúrbios pertinentes à matéria.

A normalização européia [1] estabelece limites máximos para variação da freqüência, variação da tensão de longa duração, severidade do efeito "Flicker", desequilíbrios e harmônicos. Para outros distúrbios como: quedas de tensão, sobretensões temporárias e interrupções, não há definições prévias quanto aos níveis desejados.

No Brasil, as principais concessionárias de energia elétrica como a ELETROPAULO, CEMIG e COPEL, juntamente com os órgãos coordenadores da ELETROBRÁS, têm investido em programas de controle da qualidade da tensão de suprimento, quanto à distorção harmônica, desequilíbrios e flutuações de tensão [3] [4] [5].

As flutuações de tensão, tema principal deste trabalho, por provocar o incômodo visual ou fenômeno "Flicker", despertou, nos últimos anos, interesse de vários pesquisadores a nível mundial.

A sua análise envolve técnicas matemáticas complexas, exigindo tratamentos estatísticos elaborados e determinação do espectro de freqüências das flutuações de tensão.

Diferentes países, como é o caso da França [6] [7] [8], Grã-Bretanha [6] [9] e mesmo a União Internacional de Eletrotermia-UIE [10] [11], apresentaram métodos de análise e instrumentos de medição do fenômeno "Flicker". Ressalta-se ainda que outros países, como a Alemanha e o Japão, também desenvolveram seus próprios métodos e equipamentos, contudo não obtiveram aceitação a nível mundial como os demais [12].

Neste particular, constata-se um grande estrangulamento da tecnologia nacional, pois a maioria dos instrumentos disponíveis para as aplicações aqui destacadas são importados. No Brasil, somente duas instituições, a UNICAMP [6] e a UFU [12] [13], desenvolveram equipamentos destinados a medição do "Flicker". O instrumento da UNICAMP tem sido utilizado por duas concessionárias de energia, a CEMIG e a ELETROPAULO, e o da UFU ainda se encontra em fase de protótipo.

Assim, devido às necessidades impostas pelo controle de qualidade do suprimento elétrico, aliadas às dificuldades existentes quanto à disponibilidade de metodologia e de instrumentação nacional voltadas à medição de “Flicker”, torna-se clara a necessidade premente de busca de soluções próprias para a melhoria da Qualidade da Tensão no sistema elétrico brasileiro.

1.3 Estrutura da Dissertação

Tomando-se como base as constatações verificadas nos itens precedentes, surge esta dissertação, que muito embora não seja a única na área [6] [12] [13], tem como objetivos rever, aplicar e comparar as metodologias associadas à quantificação da qualidade da tensão à luz do efeito “Flicker”, a partir de um exemplo de medição de campo, utilizando-se o equipamento desenvolvido pela Universidade Federal de Uberlândia.

Para cumprir os objetivos pretendidos, esta dissertação está assim estruturada:

- **Capítulo II** - Devido ao grande interesse pelo assunto, na atualidade, este capítulo apresenta os principais itens de avaliação da Qualidade da Tensão, as normalizações e recomendações nacionais aplicáveis, e procura situar o leitor ao tipo de distúrbio que será abordado no decorrer desta dissertação.

- **Capítulo III** - Este capítulo oferece uma contribuição didática ao tema principal, procurando conceituar o problema da flutuação da tensão decorrente da demanda variável de potência reativa e apresentando as principais cargas perturbadoras.

- **Capítulo IV** - Trata da conceituação física e dos principais métodos utilizados, internacionalmente, para a quantificação do fenômeno “Flicker”.

- **Capítulo V** - Descreve os princípios básicos de “hardware” e “software”, dos instrumentos destinados à medição do “Flicker”, desenvolvidos pela UNICAMP e UFU. Também é realizada uma análise comparativa entre os dois analisadores de cintilação.

- **Capítulo VI** - Realiza-se, neste capítulo, um histórico dos últimos onze anos, dos limites aplicados no Brasil para os distúrbios de flutuação de tensão. Apresenta-se um conjunto de medições executadas nas instalações de um grande consumidor industrial, utilizando-se o analisador de cintilação desenvolvido pela UFU e finalmente procede-se a uma análise comparativa dos resultados, de acordo com cada método de análise, ou seja, Britânico, Francês e Padrão-UIE.

- **Capítulo VII** - Finalmente, são apresentadas as principais conclusões desta dissertação e sugestões para desenvolvimentos futuros.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GERAIS SOBRE A QUALIDADE DA TENSÃO

2.1 Considerações Iniciais

Os primeiros sistemas elétricos de potência eram extremamente simples, de pequeno porte e apresentavam uma característica muito particular que, nos dias de hoje, é cada vez mais difícil de ser encontrada — a geração localizava-se junto à sua própria carga. O mecanismo básico de controle de tensão consistia apenas na regulação do nível de tensão nos terminais das máquinas geradoras, bem como na compatibilização do montante de geração com a demanda da carga.

O aparecimento de grandes consumidores industriais utilizando sofisticados processos produtivos, somado ao escasseamento das fontes de energia locais, forçaram os planejadores dos sistemas de potência a expandir e a distanciar a geração dos centros consumidores. Por conseguinte, grandes blocos de geração e centros de carga passaram a ser interligados através de longas linhas de transmissão. Como consequência, o controle de tensão tornou-se complexo em função dos mais variados distúrbios a que o sistema pode ser submetido, destacando-se: incidência de descargas atmosféricas nas linhas de transmissão e subestações, ocorrência de curto-circuitos, chaveamento de equipamentos, perda de cargas e de interligações, etc.

Os distúrbios citados geram transitórios no sistema elétrico sob a forma de sobretensões, subtensões, sobrecorrentes, oscilações de tensão e frequência, comprometendo a qualidade e continuidade no suprimento de energia elétrica aos consumidores.

Somado a isto, a busca de uma melhor qualidade de vida por parte de nossa sociedade, vem acompanhada de uma cobrança cada vez maior, nos aspectos referentes à forma de onda e à variação de tensão de suprimento, o que vem aumentar o nível de responsabilidade das empresas fornecedoras de energia.

Importante é destacar a premência de controle da qualidade de tensão, lembrando-se que o sistema elétrico é constantemente submetido às mais variadas perturbações e que as cargas são extremamente dinâmicas e diversificadas, exigindo potências ativa e reativa variáveis no tempo, forçando o sistema supridor a uma constante readaptação.

Dentro deste contexto, este capítulo tem como objetivo analisar, em caráter introdutório, os seguintes tópicos:

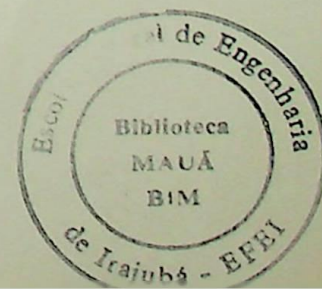
- Apresentar os itens mais importantes de avaliação da Qualidade da Tensão, envolvendo aspectos de regime permanente, curta duração e transitórios;
- Apresentar os limites e recomendações nacionais aplicáveis a cada item abordado;
- Destacar, dentre os diversos distúrbios de tensão, aquele que será o objetivo central deste trabalho.

2.2 Itens para Avaliação da Qualidade da Tensão

Do ponto de vista teórico, uma descrição da Qualidade da Tensão é a forma de onda senoidal e pura, sem alterações na amplitude, forma de onda e frequência, emanando de uma fonte de capacidade infinita e impedância zero [14].

Do ponto de vista prático, qualquer desvio dos parâmetros acima, além de determinados limites de tolerância, caracteriza-se como um problema envolvendo Qualidade da Tensão.

Dentro deste contexto, nos itens que se seguem, serão descritos os principais distúrbios que degradam a tensão de suprimento elétrico [14] [15] [16].



2.2.1 Interrupções

Do ponto de vista do consumidor, a interrupção é caracterizada pela descontinuidade no recebimento da energia elétrica, representada por uma queda de tensão de 100% de seu valor nominal, conforme ilustrado na figura-2.1.

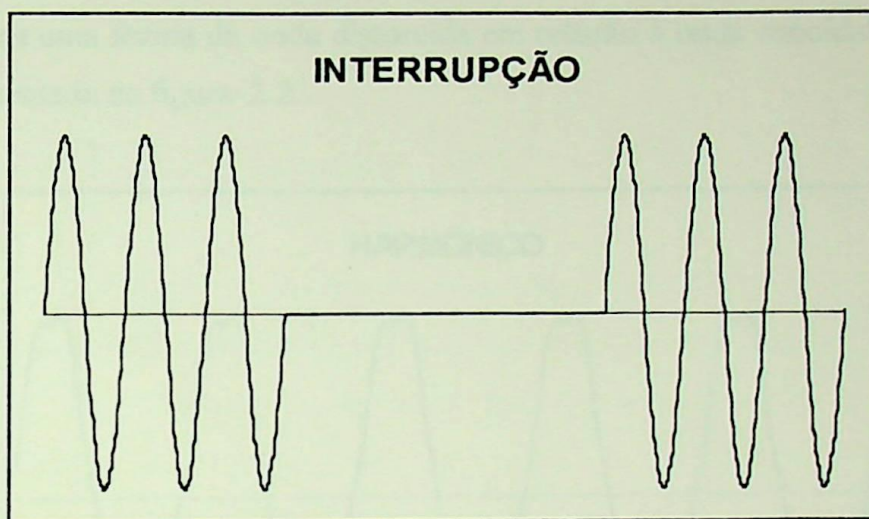


Figura-2.1- Interrupção

As interrupções podem ser classificadas em três tipos, conforme mostra a tabela-2.1

[14].

Classificação das interrupções	Duração
Momentânea	menor que dois segundos
Temporária	de 2 segundos a 3 minutos
Sustentada	acima de 3 minutos

Tabela-2.1- Classificação das interrupções

2.2.2 Harmônicos

Harmônicos são componentes de um sinal com frequência múltipla da fundamental, cada qual apresentando determinada amplitude e fase. São gerados pela operação de cargas não lineares tais como: retificadores, inversores, fornos a arco, máquinas de solda e reatores saturados, dentre outras. A combinação da onda fundamental com os componentes harmônicos, gera uma forma de onda distorcida em relação à onda senoidal pura, conforme ilustração apresentada na figura-2.2.

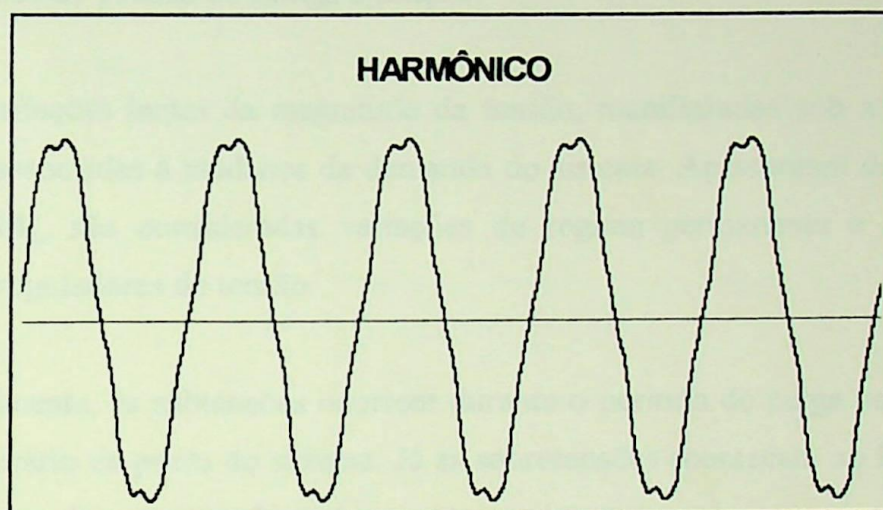


Figura-2.2 -Harmônicos

2.2.3 Variações de Tensão

Destacam-se quatro tipos básicos de causas de variação de tensão no sistema elétrico, a saber:

- Alteração da demanda do sistema;
- Ocorrências de descargas atmosféricas e chaveamentos;
- Ocorrências de curto-circuitos; déficits e superávits de geração;
- Operação de grandes consumidores com cargas especiais.

Em função das causas, as variações de tensão podem ser classificadas em:

- Longa duração;
- Curta duração ou temporárias;
- Transitórias;
- Aleatórias , repetitivas e esporádicas.

2.2.3.1 Variações de Tensão de Longa Duração

São variações lentas da magnitude da tensão, manifestadas sob a forma de sub e sobretensões, associadas à mudança da demanda do sistema. Apresentam duração superior a 1 minuto [14], são consideradas variações de regime permanente e são capazes de sensibilizar os reguladores de tensão.

Normalmente, as subtensões ocorrem durante o período de carga pesada, como por exemplo, no horário de ponta do sistema. Já as sobretensões acontecem no horário de carga leve, normalmente durante a madrugada.

2.2.3.2 Variações de Tensão de Curta Duração ou Temporárias

As variações de tensão de curta duração podem ser agrupadas em “voltage sags” e “voltage swells”.

“Voltage sag” consiste na redução da magnitude da tensão com duração típica de 0,5 ciclos a 1 minuto [14], provocada pela ocorrência de curto-circuitos em algum ponto do sistema ou devido à entrada de blocos de carga ou partida de motores de grande porte.

Já “voltage swell” é um estado de sobretensão, representado pelo acréscimo da magnitude da onda de tensão, com duração de 0,5 ciclos a 1 minuto [14], devido à

ocorrência de faltas para a terra e perdas bruscas de carga nos terminais de linha ou geradores.

As figuras 2.3 e 2.4, respectivamente, ilustram a situação de “voltage sags” e “voltage swells”

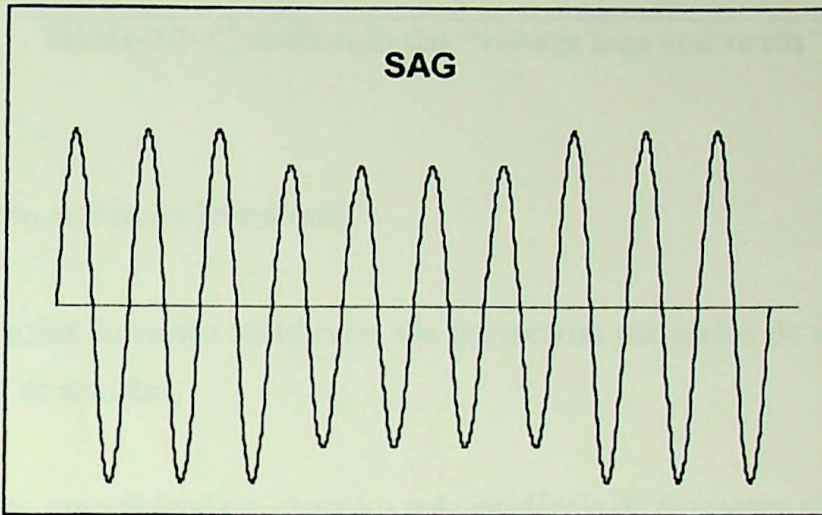


Figura-2.3- “Voltage Sags”

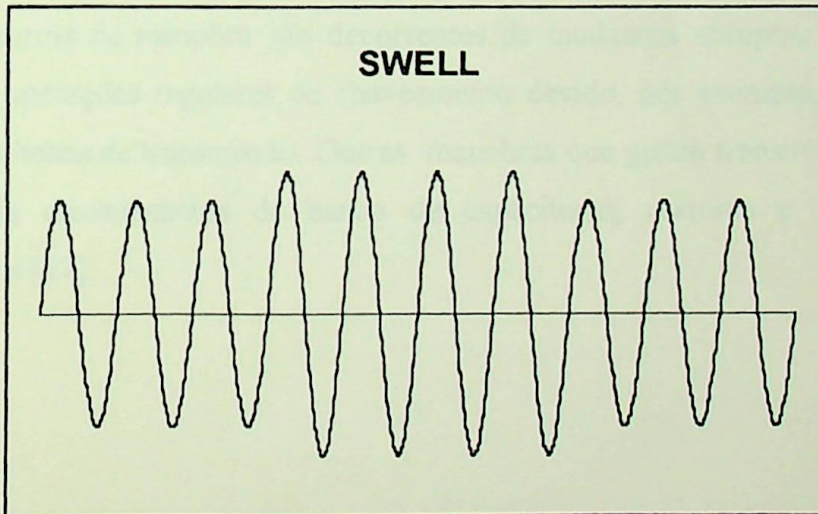


Figura-2.4 -”Voltage swells”

“Voltage sags e swells” podem ser classificadas em função do tempo de duração conforme a tabela-2.2 [14].

Classificação das “voltage sags and swells”	Tempo de duração
Instantâneos	0,5 a 30 ciclos (0,5 s)
Momentâneos	0,5 a 3 s
Temporários	3s a 1 minuto

Tabela-2.2- Classificação das “voltage sags and swells”

2.2.3.3 Variações de Tensão Transitórias

As variações de tensão transitórias são provocadas por surtos de tensão de origem atmosférica ou de manobra.

Os surtos atmosféricos são causados pela incidência de descargas atmosféricas sobre as linhas de transmissão, linhas de distribuição ou subestações [17] e se propagam pelo sistema atingindo equipamentos e consumidores.

Já os surtos de manobra são decorrentes de mudanças abruptas na rede elétrica, resultantes de operações regulares de chaveamento devido, por exemplo, à energização e religamento de linhas de transmissão. Outras manobras que geram transitórios de tensão no sistema são os chaveamentos de banco de capacitores, reatores e energização de transformadores [17].

A figura-2.5 ilustra a ocorrência de um transitório superposto a uma onda senoidal.

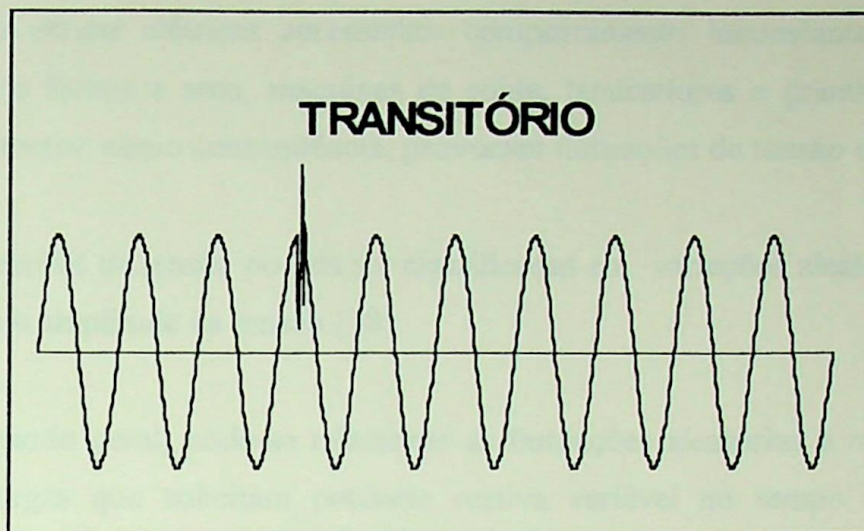


Figura-2.5- Transitório

A título de ilustração, a figura-2.6 sintetiza as características dos surtos de tensão de origem atmosférica e de manobra, bem como as sobretensões temporárias ou de curta duração, em termos de valores típicos de amplitude e tempo de duração [17].

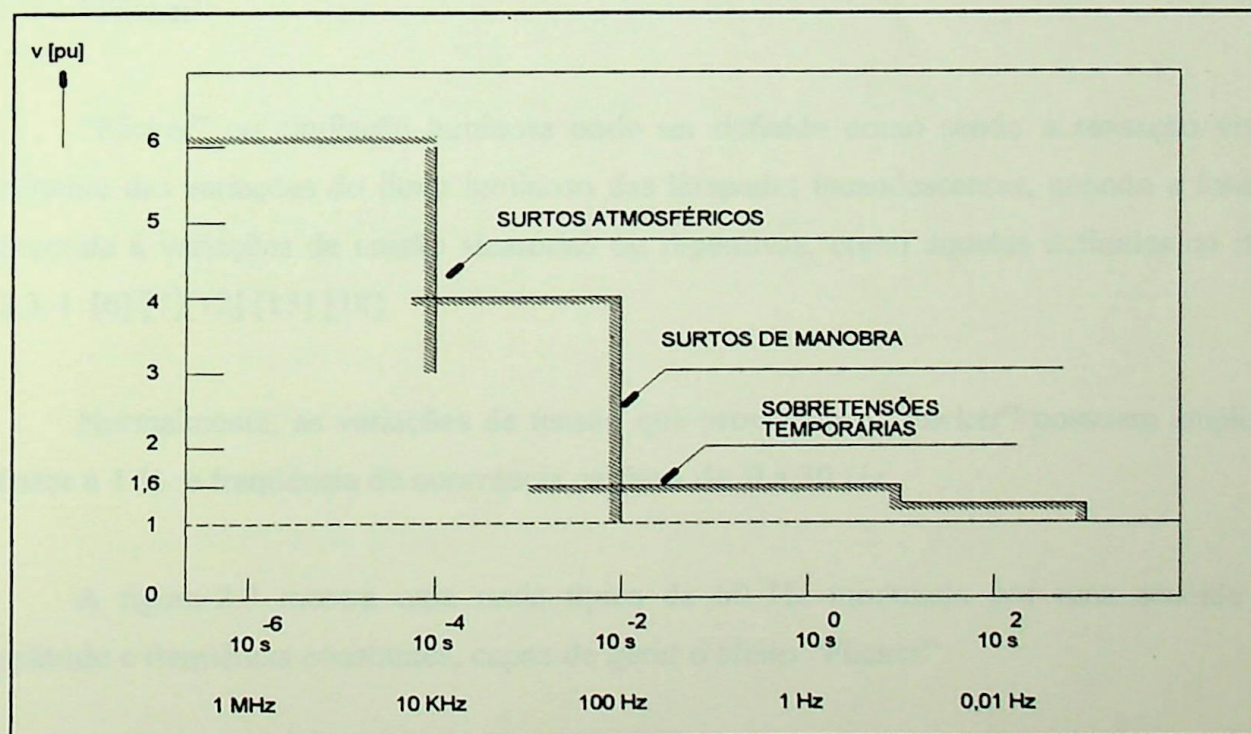


Figura-2.6- Síntese dos tipos de sobretensões



2.2.3.4 Variações de Tensão Aleatórias e Repetitivas

Algumas cargas elétricas apresentam comportamento inconstante destacando-se, dentre outras, os fornos a arco, máquinas de solda, laminadores e grandes motores com partidas intermitentes; como consequência, provocam flutuações de tensão no sistema.

As flutuações de tensão podem ser classificadas em variações aleatórias, repetitivas ou esporádicas na amplitude da tensão [18].

De um modo geral, pode-se relacionar as flutuações aleatórias e repetitivas com a operação de cargas que solicitam potência reativa variável no tempo e as flutuações esporádicas com manobras de cargas [18].

Em função da frequência de ocorrência e da amplitude destas flutuações de tensão, elas podem provocar o Efeito “Flicker”.

2.2.4 “Flicker”

“Flicker” ou cintilação luminosa pode ser definido como sendo a sensação visual resultante das variações do fluxo luminoso das lâmpadas incandescentes, quando a fonte é submetida à variações de tensão aleatórias ou repetitivas, como aquelas definidas no item 2.2.3.4 [6] [7][12] [13] [18].

Normalmente, as variações de tensão que provocam o “Flicker” possuem amplitude inferior a 1 % e frequência de ocorrência na faixa de 0 a 30 Hz.

A figura-2.7 mostra uma onda típica de 60 Hz modulada por uma senóide de amplitude e frequência constantes, capaz de gerar o efeito “Flicker”.

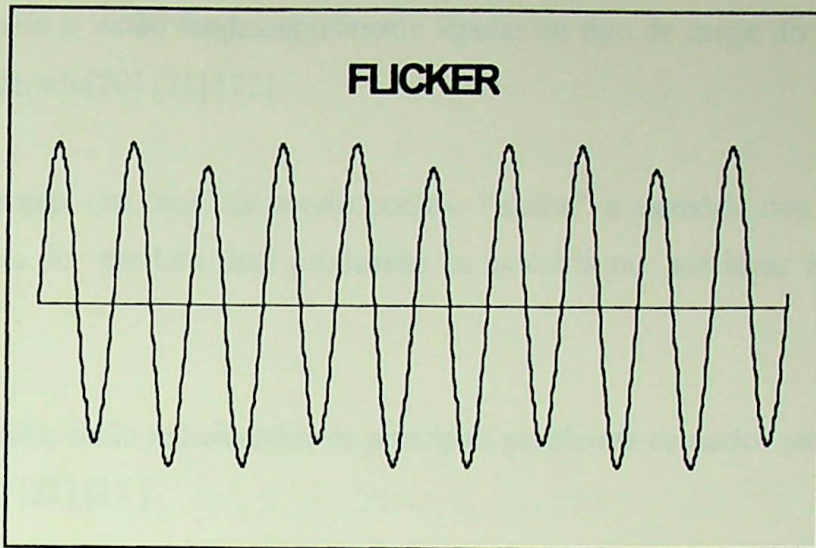


Figura-2.7- "Flicker"

2.3 Principais Cargas Vulneráveis a Distúrbios de Tensão

Com o crescimento da indústria de microeletrônicos, tem-se observado o aumento da vulnerabilidade dos equipamentos a distúrbios de qualidade da tensão [14] [16].

Dentre os equipamentos mais atingidos destacam-se [14] [16] [19]:

- Aparelhos residenciais como: vídeo cassete, relógio digital, e TV;
- Aparelhos de uso hospitalar;
- Computadores;
- Equipamentos de processamento de dados;
- Acionamentos de motores microprocessados;
- Controladores de processos-PLC's.
- Máquinas rotativas e banco de capacitores

As conseqüências, devido aos problemas de qualidade da tensão, são as mais variadas possíveis e estão fundamentalmente ligadas ao tipo de carga do consumidor e ao distúrbio considerado [20] [21] [22].

Por exemplo; um “sag” de tensão poderá “alterar” a memória dos PLC’s mudando as especificações do produto final produzido na indústria ou até levar à parada total de motores [14].

Em seguida, serão relacionados os principais problemas causados pelos distúrbios de tensão [14] [21] [22] [23]:

- Transtornos e incômodos aos consumidores residenciais;
- Queima e mau funcionamento de equipamentos eletrônicos;
- Interferências em sistemas de comunicação;
- Aquecimento de motores, geradores e banco de capacitores;
- Perdas de produção na indústria cujo processo produtivo esteja baseado em sofisticados sistemas eletrônicos de controle, envolvendo a aplicação de controladores lógicos programáveis (PLC’s), microcomputadores, sensores e transdutores eletrônicos;
- Prejuízos diversos nos setores comerciais, principalmente nas áreas ligadas a processamento de dados, setor bancário e gráficas de impressão;
- Perdas financeiras: de um lado, o consumidor que deixou de produzir; de outro, a concessionária que deixou de faturar a parcela correspondente à energia não fornecida.

2.4 Normalizações e Recomendações Aplicáveis

Após ter apresentado as principais causas, características e efeitos dos distúrbios envolvendo a Qualidade da Tensão, este item tem como objetivo informar o leitor sobre normalizações e recomendações nacionais aplicáveis a cada distúrbio abordado. No caso em

que não houver limite estabelecido no Brasil, será apresentado aquele mais utilizado internacionalmente.

Vale esclarecer que não é objetivo deste trabalho apresentar os limites existentes para cada item abordado; o que se pretende é tão somente informar o leitor da existência ou não de legislação ou recomendações aplicáveis.

2.4.1 Interrupções

No Brasil, as interrupções são normalizadas pela Portaria 046 do DNAEE [14] e são avaliadas pelos índices de continuidade de fornecimento, ou seja, índices de frequência e duração (FEC e DEC).

2.4.2 Variações de Tensão de Longa Duração

Os sistemas supridores devem atender os limites estabelecidos pela Portaria 047 do DNAEE [14], que define os limites de variação de tensão de regime permanente no ponto de entrega de energia ao consumidor.

2.4.3 Variações de Tensão de Curta Duração e Transitórias

A nível internacional, tem-se utilizado a Zona de Qualidade de Energia recomendada pelo IEEE 446-1987 [2] [19]. Esta região foi concebida como um guia para os fabricantes de equipamentos e sugere que os componentes elétricos e eletrônicos devem ser projetados para suportar as perturbações que se situam dentro da área delimitada da figura-2.8.

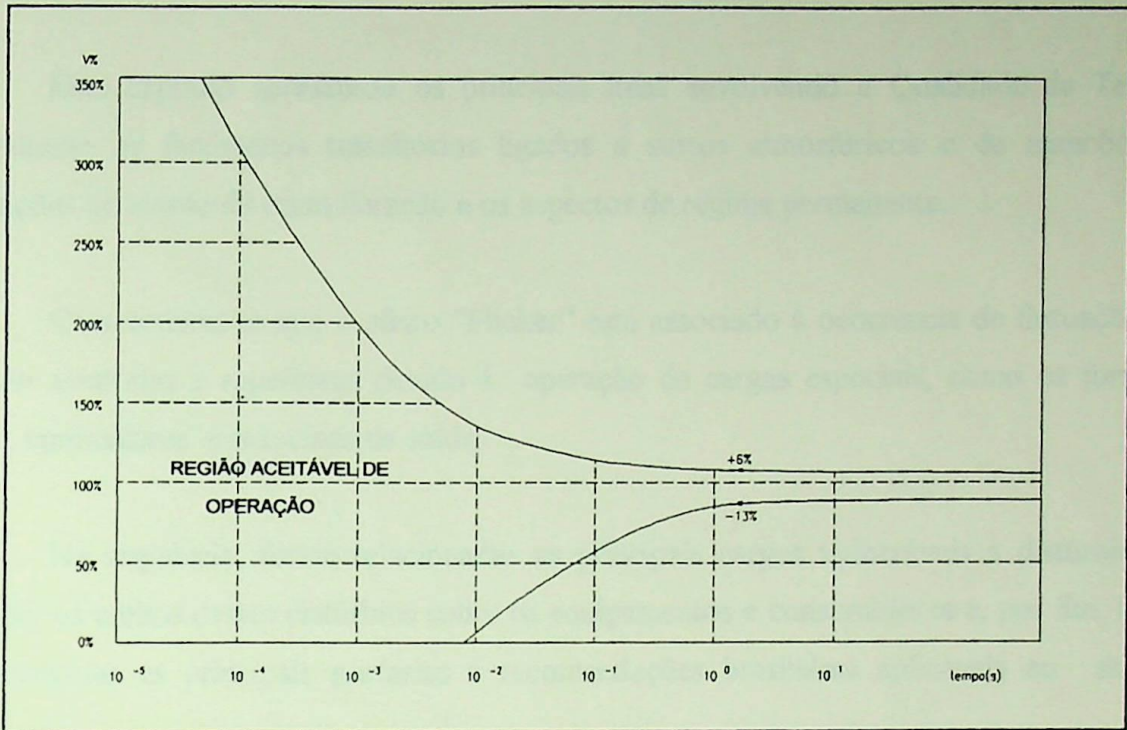


Figura-2.8- Zona de Qualidade de Energia IEEE-446-1987

2.4.4 Harmônicos

No Brasil, os limites de fator de distorção total de tensão, tensões e correntes harmônicas individuais são definidos pelo documento intitulado: “Critérios e Procedimentos para Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais” [24], com tensão igual ou superior a 13,8 KV; o local de avaliação é no ponto de entrega de energia na instalação do consumidor.

2.4.5 “Flicker”

Por ser este o tema principal desta dissertação, os limites aplicáveis serão abordados, detalhadamente, nos Capítulos IV e VI.

2.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os principais itens envolvendo a Qualidade da Tensão, abordando os fenômenos transitórios ligados a surtos atmosféricos e de manobra, as variações de tensão de curta duração e os aspectos de regime permanente.

Caracterizou-se que o efeito “Flicker” está associado à ocorrência de flutuações de tensão aleatórias e repetitivas devido à operação de cargas especiais, como os fornos a arco, laminadores e máquinas de solda.

Na seqüência, foram relacionadas as principais cargas vulneráveis a distúrbios de tensão, os efeitos destes distúrbios sobre os equipamentos e consumidores e, por fim, foram apresentadas as principais portarias e recomendações brasileiras aplicáveis ao assunto enfocado.

Finalmente, pode-se considerar que este capítulo tenha apresentado uma primeira contribuição didática, por ter organizado e sintetizado, muito embora de forma superficial, os diversos aspectos envolvendo a Qualidade da Tensão.

CAPÍTULO III

FLUTUAÇÕES DE TENSÃO E CARGAS PERTURBADORAS

3.1 Considerações Iniciais

Com o desenvolvimento econômico do país, surgiram complexos industriais em que as cargas conhecidas como cargas perturbadoras assumiram níveis significativos.

Enquadram-se aí, as indústrias que utilizam, em seus processos produtivos, os fornos a arco, os laminadores e as máquinas de solda, destacando-se as usinas siderúrgicas, as montadoras de automóveis e as fábricas de autopeças.

A alimentação destes consumidores significa, para as concessionárias de energia elétrica, uma carga economicamente atrativa. Em contrapartida, representa para o sistema supridor, uma fonte permanente de distúrbios sob a forma de harmônicos, desequilíbrios e flutuações de tensão.

As flutuações de tensão estão relacionadas com as variações bruscas e intermitentes de demanda de potência reativa da carga e caracterizam-se como uma má qualidade da tensão, tornando-se um problema que afeta tanto a indústria poluidora como a concessionária, já que estas perturbações poderão se propagar pelo sistema supridor e atingir outros consumidores, sejam industriais, comerciais ou residenciais.

Dentro deste quadro, este capítulo tem como objetivo abordar, do ponto de vista didático, os seguintes aspectos:

- Conceituar o problema da flutuação de tensão associado à operação de cargas variáveis;
- Apresentar as principais cargas perturbadoras existentes;
- Apresentar os principais efeitos das flutuações de tensão.

3.2 Conceituação do Problema

Cargas industriais com ciclos variáveis, supridas através de redes de transmissão ou de distribuição com baixo nível de curto-circuito, podem provocar flutuações de tensão tanto no sistema do consumidor como no sistema da concessionária.

O termo - "Flutuação de Tensão" - é normalmente utilizado para exprimir pequenas variações regulares ou irregulares de tensão, em torno do valor de regime permanente da tensão de suprimento [6] [12].

Matematicamente, pode-se demonstrar que as variações de tensão são causadas essencialmente pela variação da demanda da potência reativa da carga, conforme mostrado na equação 3.1 [6] [12].

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta Q}{S_{cc}} \quad (3.1)$$

onde:

. ΔQ - Variação da demanda da potência reativa da carga;

. S_{cc} - Potência de curto-circuito do sistema;

. ΔV - Variação da tensão.

Da equação 3.1, pode-se concluir que as Flutuações de Tensão serão tão menores quanto maior for a rigidez elétrica da barra no ponto sob análise. Em outras palavras, quanto maior for o nível de curto-circuito de um determinado barramento, menos sensível este será para as imposições das cargas perturbadoras.

As Flutuações de Tensão podem ser classificadas em flutuações aleatórias, repetitivas ou esporádicas na amplitude da tensão [18].

A tabela-3.1 apresenta alguns tipos de carga mais comumente relacionados com as flutuações de tensão citadas, bem como a faixa de frequência de ocorrência [18].

Flutuações de tensão	Tipos de carga	Frequência de ocorrência
Aleatórias	Fornos a arco	$f > 1\text{Hz}$
Repetitivas	Laminadores Máquinas de solda	$0,000278 < f \leq 1\text{ Hz}$
Esporádicas	Partida de motores	$f \leq 0,000278\text{ Hz}$

Tabela-3.1- Classificação das Flutuações de Tensão em Função da Carga e da Frequência de Ocorrência

Em relação aos efeitos nocivos destas Flutuações de Tensão, podem-se associar as variações de caráter aleatório e as de caráter repetitivo ao fenômeno “Flicker” [18].

3.3 Principais Cargas Perturbadoras

A seguir, algumas considerações sobre as principais cargas que, conectadas a uma rede elétrica, são passíveis de causar distúrbios.

Os equipamentos apresentados são aqueles mais frequentemente encontrados e cujas potências são expressivas em relação à maioria dos dispositivos elétricos.

3.3.1 Fornos a Arco

Os Fornos a Arco são largamente empregados nas instalações industriais destinadas à fusão de ferro, aço, cobre, latão, bronze e outras ligas metálicas. São assim denominados



por utilizarem as propriedades do arco elétrico para produzirem a fusão dos metais dentro de uma cuba isolada, termicamente, por material refratário.

O Forno a Arco, também conhecido por reator metalúrgico, surgiu no começo do século, mais precisamente no ano de 1904, concebido pelo Francês Héroult. Ele é, sobretudo, uma das mais expressivas fontes causadoras de flutuações de tensão nos sistemas de potência [12][13]. A operação dos fornos, principalmente no período de fusão, impõe ao sistema supridor, além das variações irregulares da corrente de carga, responsáveis pelas flutuações de tensão, níveis consideráveis de distorção harmônica e baixo fator de potência.

Os Fornos a Arco podem ser constituídos de três diferentes tipos [12]:

- Arco direto;
- Arco submerso ou arco-resistência;
- Arco indireto.

Para cada um dos tipos de fornos citados, a transmissão do calor chega até a carga de forma específica. No Forno a Arco Direto, o próprio arco é o responsável pela transferência da energia térmica diretamente para o material da carga. No caso de Forno a Arco Submerso, o material é aquecido como consequência da passagem da corrente elétrica através de sua massa, resultando em elevadas perdas Joule. Finalmente, no Forno a Arco Indireto, o calor é transferido através de fenômenos de irradiação e convecção.

3.3.1.1 Fornos a Arco Direto (Arco Descoberto) [12] [13]

Os Fornos a Arco Direto são mais empregados na fusão de minérios de ferro ou sucatas para a produção de lingotes de aço que serão laminados, transformando-se em produtos de larga aplicação na construção civil, naval, mecânica, etc.

Geralmente são trifásicos, com a carcaça cilíndrica com o fundo abaulado e tampa, revestidos internamente com tijolos de sílica (refratário), apoiados sobre um suporte de ferro e resfriados por circulação de água.

Os eletrodos são, na sua maioria, de grafite, posicionados verticalmente e conectados eletricamente ao sistema através de placas condutoras de cobre, pressionadas por morsas solidárias aos braços móveis, cujos movimentos são executados por meio de servomotores, comandados por reguladores automáticos de corrente ou de impedância de arco constante.

Normalmente, os Fornos a Arco Direto, 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.

3.3.1.2 Fornos a Arco-Resistência (Arco Submerso) [12] [13]

Os Fornos a Arco-Resistência são também chamados de Arco Submerso porque o arco permanece sob a carga de material a ser fundido.

Estes fornos são muito usados para a produção de ligas de ferro (ferro-silício, ferro-cromo, ferro-manganês, etc.) e utilizam-se de reações químicas de redução. Por este motivo são também conhecidos como Fornos de Redução.

Quanto ao aspecto construtivo, o mais difundido é o trifásico com os eletrodos dispostos em triângulo equilátero com a carcaça circular. O contato elétrico com o sistema é feito através de placas condutoras comprimidas pelo anel prensa-placas contra os eletrodos que são, normalmente, de carvão amorfo.

Este tipo de forno, praticamente, não provoca distúrbios no sistema alimentador.

3.3.1.3 Fornos a Arco Indireto (Arco Radiante) [12][13]

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 não são tão difundidos quanto os fornos a arco direto e os de arco-resistência. O arco elétrico se

dá entre os eletrodos, os quais estão sempre posicionados, horizontalmente, acima da carga e o calor é transmitido por irradiação direta do arco ou indireta devido às reflexões nas paredes.

Tanto pela sua potência como pela sua maneira de operar, mantendo constante o arco formado entre os eletrodos, este tipo de forno não provoca distúrbios substanciais no sistema de suprimento.

A figura 3.1 ilustra os três tipos de fornos a arco citados anteriormente.

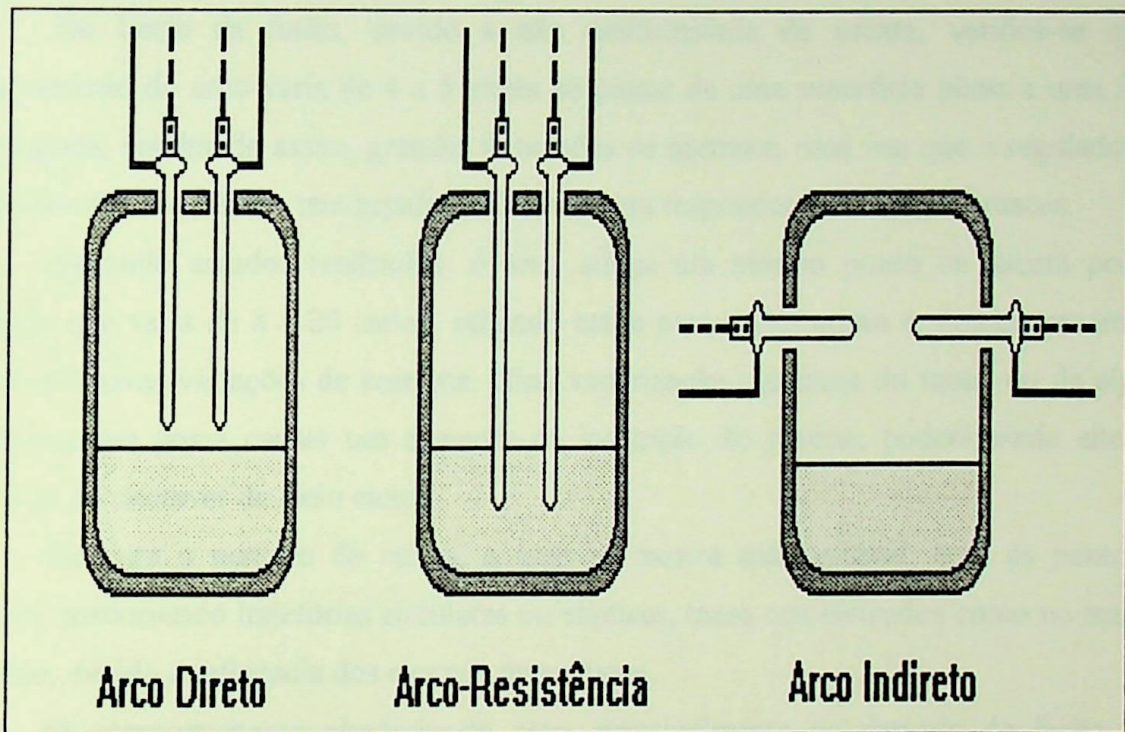


Figura 3.1 - Tipos de Fornos Elétricos a Arco

Considerando os três tipos de fornos a arco, o mais comum, no tocante à utilização industrial, é o forno a arco direto; os desenvolvimentos que se seguem descrevem sua operação.

3.3.1.4 Operação dos Fornos a Arco Direto [12][13]

Os Fornos a Arco Direto operam em ciclos que se iniciam com o seu carregamento e subsequente ignição do arco elétrico e terminam com a corrida do metal fundido, quando se reinicia o processo.

A ignição do arco ocorre quando a tensão se eleva acima de certo valor durante meio ciclo. No final do ciclo, quando há uma diminuição da tensão o arco se extingue, ocorrendo, em seguida, a ignição no sentido contrário.

Durante o ciclo de operação do forno, observam-se, claramente, duas fases distintas: o período de fusão e o período de refino.

No início da fusão, devido a não uniformidade da sucata, verifica-se que o comprimento do arco varia de 4 a 5 vezes ao passar de uma superfície plana a uma forma pontiaguda, resultando assim, grandes flutuações de corrente, uma vez que o regulador dos eletrodos dos fornos não tem rapidez suficiente para responder à mudanças bruscas.

Segundo estudos realizados, o arco atinge um mesmo ponto na sucata por um período que varia de 8 a 20 ciclos, saltando então para outro ponto e, conseqüentemente, causando novas variações de corrente. Uma vaporização repentina do metal ou de alguma impureza que possa causar um aumento da ionização do plasma, poderá ainda alterar a corrente no decorrer de meio ciclo.

Durante o período de refino, o arco se mostra mais estável, com os pontos de contato percorrendo trajetórias circulares ou elípticas, tanto nos eletrodos como no material fundido, devido à influência dos campos magnéticos.

O comportamento aleatório do arco, principalmente no período de fusão, gera variações apreciáveis de corrente, provocando variações tanto da potência ativa como reativa.

A título de ilustração, a figura 3.2 mostra uma curva de desempenho típica, obtida a partir de um forno trifásico de 20 MVA, corrente por eletrodo de 26,8 kA e tensão de alimentação de 430 V [12] [13].

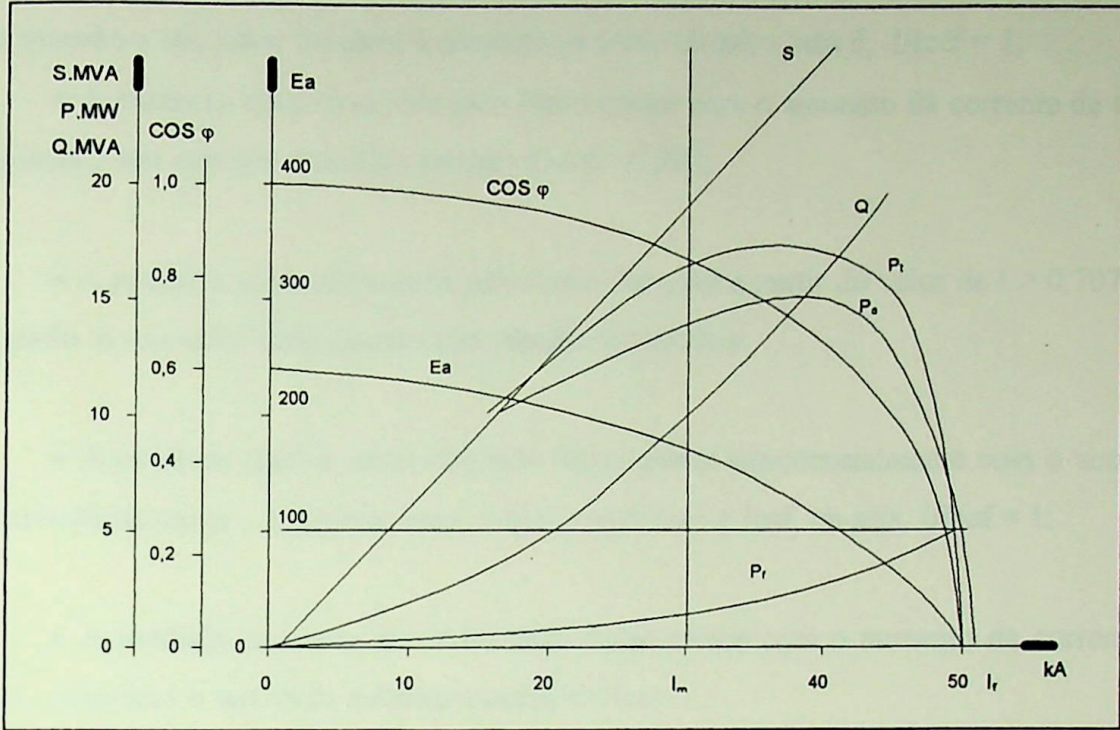


Figura 3.2 - Curvas Características de Operação de um Forno a Arco

Na figura-3.2:

P_t - Potência ativa total fornecida ao circuito

P_a - Potência ativa do arco

Q - Potência reativa do circuito

S - Potência aparente do circuito

P_f - Potência ativa de perdas

$\cos \phi$ - Fator de potência do circuito

I - Corrente de carga do forno

I_{ccf} - Corrente de curto-circuito do forno

Com base nas curvas da figura 3.2, podem ser feitas várias considerações sobre as características operativas dos Fornos a Arco:

- O fator de potência diminui quando a corrente de carga do forno cresce, sendo nulo quando o seu valor for igual à corrente de curto-circuito, isto é; $I/I_{ccf} = 1$;
- A potência ativa absorvida pelo forno cresce com o aumento da corrente de carga, atingindo o seu máximo quando a relação $I/I_{ccf} = 0,707$;
- A potência ativa consumida pelo forno decresce a partir do valor de $I > 0,707 I_{ccf}$, atingindo o seu valor nulo quando esta relação for unitária;
- A potência reativa absorvida pelo forno cresce exponencialmente com o aumento da corrente de carga, atingindo valor máximo quando $I = I_{ccf}$, ou seja, $I/I_{ccf} = 1$;
- A potência aparente absorvida pelo forno cresce com o aumento da corrente de carga, atingindo o seu valor máximo quando $I = I_{cc}$;

A estabilidade satisfatória do arco é obtida para o ponto de máxima potência. Para correntes menores que I_m (vide figura 3.2), o fator de potência é mais elevado, porém o arco é mais instável e a potência é menor. Por outro lado, uma alta corrente origina um baixo fator de potência e baixa potência; isto implica numa utilização antieconômica do forno; em vista disso, conclui-se que é vantajoso operar o forno em torno de $P_a \text{ máx}$.

Os Fornos a Arco são usualmente designados para operar com fator de potência da ordem de 0,6 a 0,8 indutivo [13] de forma que o arco não seja extinto a cada passagem da corrente por zero, mas sim, que exista uma tensão de restabelecimento no momento da extinção para manter a eficiência do processo.

A figura 3.3 mostra o comportamento do valor eficaz da tensão em uma barra na qual estão conectados dois fornos a arco, ambos do tipo arco direto, com potências de 24/30 e 32/38 MVA, durante um período de 5 segundos [13].

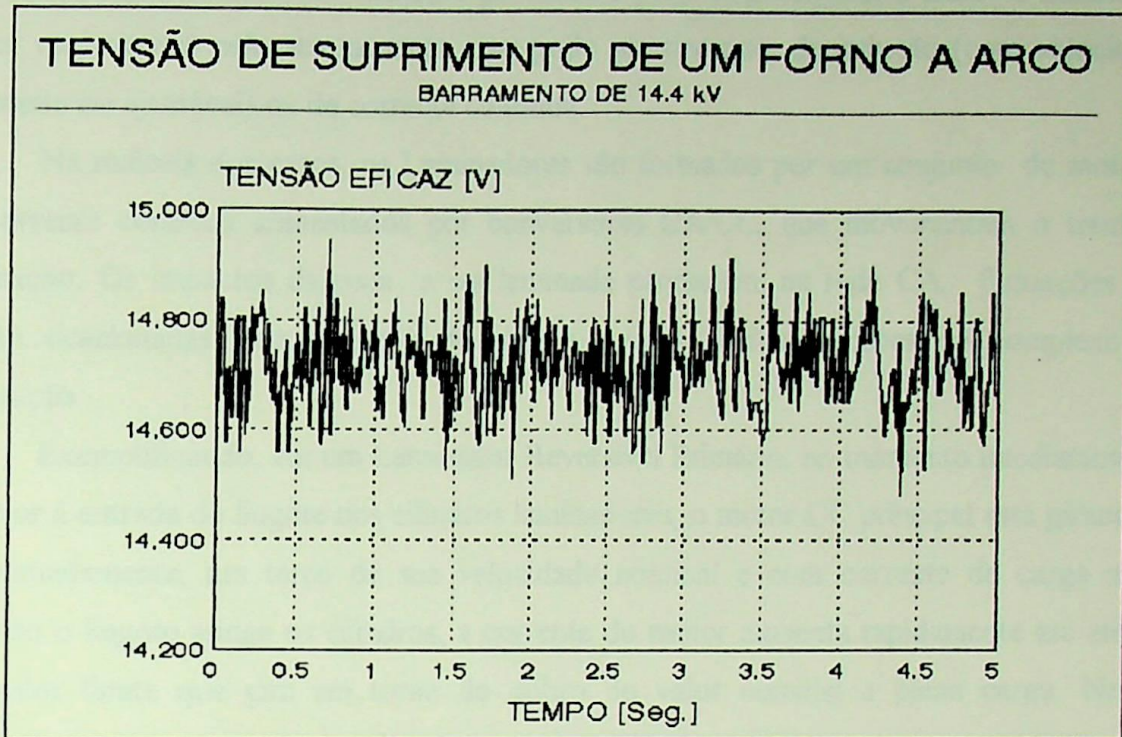


Figura 3.3 - Comportamento da Tensão de Suprimento de um Forno a Arco

As oscilações de tensão mostradas na figura 3.3 são de caráter aleatório e dependem de diversos fatores tais como: etapa de funcionamento do forno, características físico-químicas do material a ser fundido e nível de curto-circuito do barramento.

3.3.2 Laminadores [13]

Os Laminadores são empregados na indústria do aço, do alumínio e de outras ligas metálicas. Eles são responsáveis pelo processo de formatação do material fundido, dando à peça as dimensões finais, previamente definidas. Sua operação é caracterizada por uma movimentação do trem de laminação e o desbaste da peça, com tempos de processo bem definidos e regulares. Daí a sua classificação como carga que gera flutuações repetitivas de tensão.

A potência requerida por um Laminador depende: do tipo de metal a ser laminado, do volume de material a ser deslocado em um dado tempo, da temperatura do metal durante

a laminação e, finalmente do tamanho do cilindro [13]. A partir destes dados é definido o motor responsável pelo acionamento, que pode ser síncrono, de indução (com velocidade constante ou ajustável) ou de corrente contínua.

Na maioria dos casos, os Laminadores são formados por um conjunto de motores de corrente contínua alimentados por conversores CA/CC, que movimentam o trem de laminação. Os impactos da peça a ser laminada produzem, na rede CA, flutuações de tensão ocasionadas pela variação de torque, exigido pelos motores do complexo de laminação.

Exemplificando, em um Laminador Reversível Primário, no momento imediatamente anterior à entrada do lingote nos cilindros laminadores, o motor CC principal está girando a aproximadamente, um terço de sua velocidade nominal e com corrente de carga nula. Quando o lingote atinge os cilindros, a corrente do motor aumenta rapidamente até atingir um valor limite que gira em torno do dobro do valor nominal a plena carga. Nestas condições o fator de potência é igual a aproximadamente 0.3; de modo que o motor estará absorvendo energia predominantemente reativa. Em certas instalações são encontradas variações da ordem de 50 MVA_r ou mais, em intervalos de tempo de 100 ms [25].

Estas bruscas solicitações de reativos, associadas às constantes reversões dos motores, causam consideráveis flutuações de tensão que, na maioria das vezes, ultrapassam os limites recomendados. A figura 3.4 mostra o comportamento do valor eficaz da tensão no barramento de suprimento de um Laminador, durante um período de 5 segundos [13].

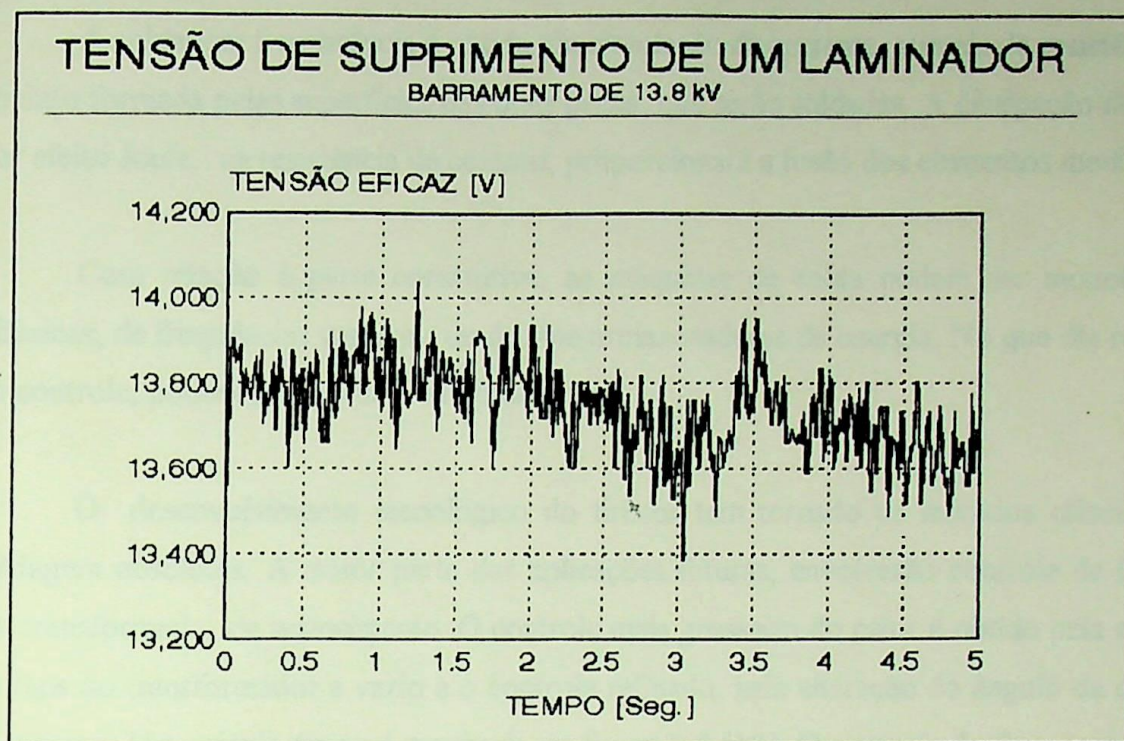


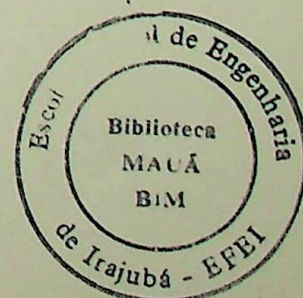
Figura 3.4 - Comportamento da Tensão de Suprimento de um Laminador

3.3.3 Máquinas Elétricas de Solda [12] [13]

As Máquinas Elétricas de Solda têm sido bastante empregadas junto à tecnologia da construção metálica nos últimos decênios. Elas proporcionam a união de duas ou mais peças metálicas utilizando fenômenos elétricos para a obtenção de calor. Dentre os métodos de soldagem destacam-se:

- Soldagem a Arco ;
- Soldagem a Resistência.

A soldagem a arco, também conhecida como solda a ponto, utiliza-se do calor produzido com o arco voltaico que se estabelece entre um eletrodo apropriado e o elemento metálico a ser soldado.



A soldagem à resistência é obtida via circulação de corrente, através da resistência de contato formada pelas superfícies das duas peças que serão soldadas. A dissipação de calor, por efeito Joule, na resistência de contato, proporcionará a fusão dos elementos metálicos.

Com relação à parte construtiva, as máquinas de solda podem ser monofásicas, trifásicas, de frequências variáveis ou do tipo armazenadoras de energia. No que diz respeito ao controle, podem ser manuais ou automáticas.

O desenvolvimento tecnológico do tiristor tem tornado os métodos clássicos de soldagem obsoletos. A maior parte das aplicações futuras, envolverão controle de fase de um transformador de aquecimento. O controle mais grosseiro do calor é obtido pela seleção de taps do transformador a vazio e o controle refinado, pela alteração do ângulo de disparo do tiristor. Um arranjo típico é mostrado na figura 3.5 [13]. O controle da fase permite um aquecimento inicial rápido pela emissão do primeiro pulso de gatilho adiantado, proporcionando um pulso inicial de corrente mais largo. A figura 3.6 [13] ilustra a forma de onda típica da corrente no início do período de aquecimento. O período de aquecimento pode ser da ordem de 8 ciclos.

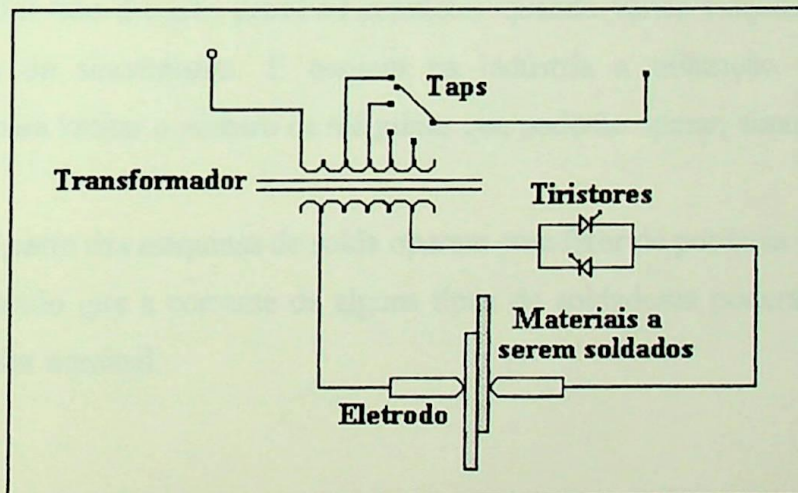


Figura 3.5 - Máquina de Solda Controlada a Tiristores

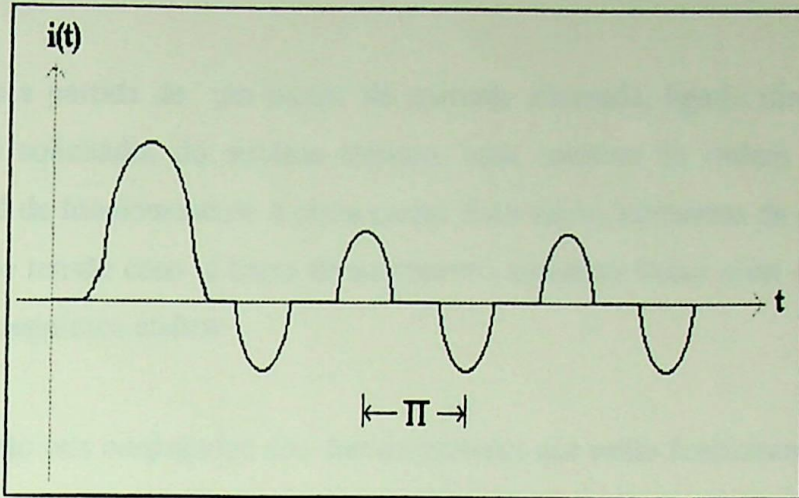


Figura 3.6 - Forma de Onda Típica de Corrente de uma Máquina de Solda

Enquanto que a soldagem a arco envolve, essencialmente, um único período de aquecimento, a soldagem à resistência requer ciclos de frequência de trabalho até 10 Hz.

A qualidade da solda é determinada pela manutenção do controle de calor. Portanto, a ocorrência de variações da tensão de suprimento pode provocar falhas durante o processo de soldagem. Tal fato é muito provável acontecer quando várias máquinas de solda estão operando fora de sincronismo. É comum na indústria a utilização de controladores programáveis para limitar o número de máquinas que poderão operar, simultaneamente.

Grande parte das máquinas de solda operam com fator de potência em torno de 0,3 a 0,4 indutivo, sendo que a corrente de alguns tipos de soldadores poderá atingir de 3 a 4 vezes o seu valor nominal.

3.3.4 Motores Acionando Cargas Cíclicas

Durante a partida de um motor de corrente alternada, ligado diretamente à fonte alimentadora é solicitado, do sistema elétrico, uma corrente da ordem de seis vezes a corrente normal de funcionamento a plena carga. Este súbito acréscimo de corrente provoca grande queda de tensão caso a barra de suprimento apresente baixo nível de curto-circuito, acarretando os seguintes efeitos:

- Redução nos conjugados dos demais motores que estão funcionando, uma vez que o conjugado de um motor é diretamente proporcional ao quadrado da tensão disponível em seus terminais;
- Dificuldade de aceleração do motor que está partindo;
- Flutuações de tensão em função do ciclo de operação da carga acionada, ou seja, do número de partidas do equipamento num determinado intervalo de tempo.

A título de ilustração, as figuras 3.7 e 3.8 mostram, respectivamente, a corrente e a tensão durante a partida de um motor de 970 kW, conectado a uma barra de 3,3 kV, obtido por simulação [13].

Verifica-se que o motor é energizado no instante $t = 0,50$ s, a corrente de partida chega a ser superior a 6 pu e o tempo total de partida é de aproximadamente 6s.

Outro aspecto importante a ser observado é que a tensão da barra chega a cerca de 0,90 pu no instante inicial da partida e se estabiliza em um valor acima de 1 pu; portanto, o sistema é submetido a uma queda de tensão superior a 10 %.

A situação se agrava quando se trata de motores de carga cíclica tais como: compressores, bombas, refrigeradores, guindastes, martelos mecânicos que, por consequência, acentuam a periodicidade das flutuações de tensão.

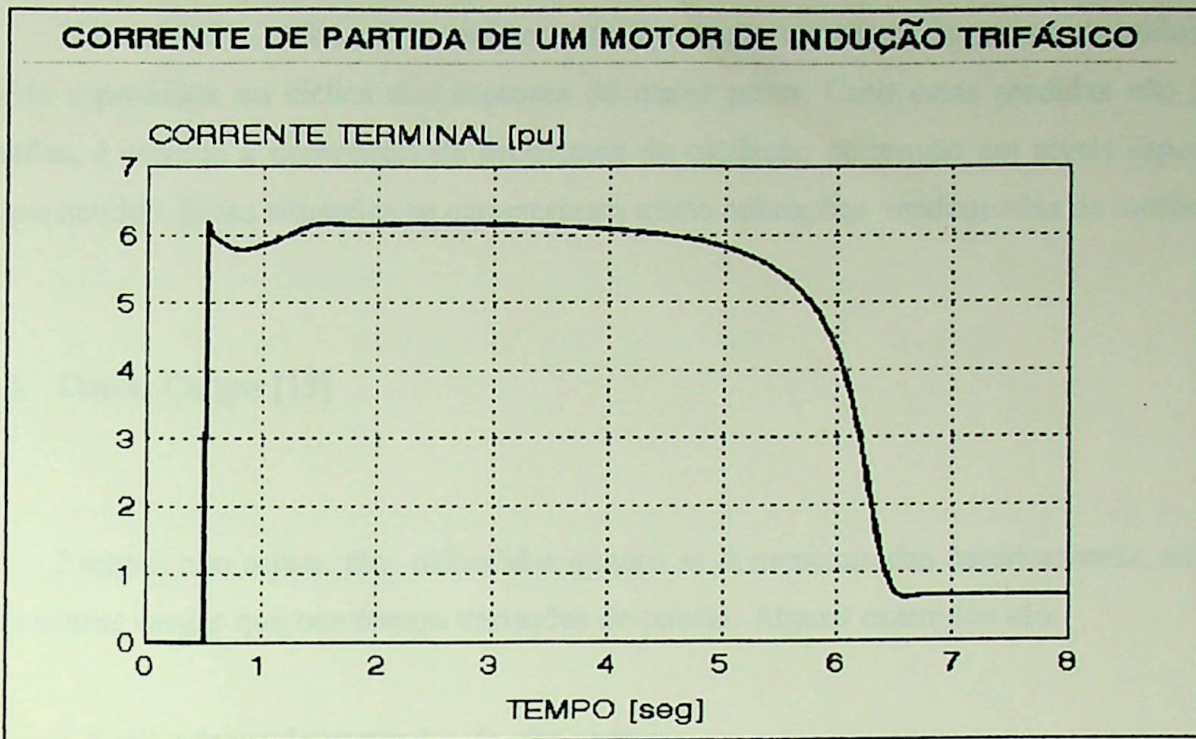


Figura 3.7- Corrente Terminal Durante a Partida de Um Motor de 970 KW

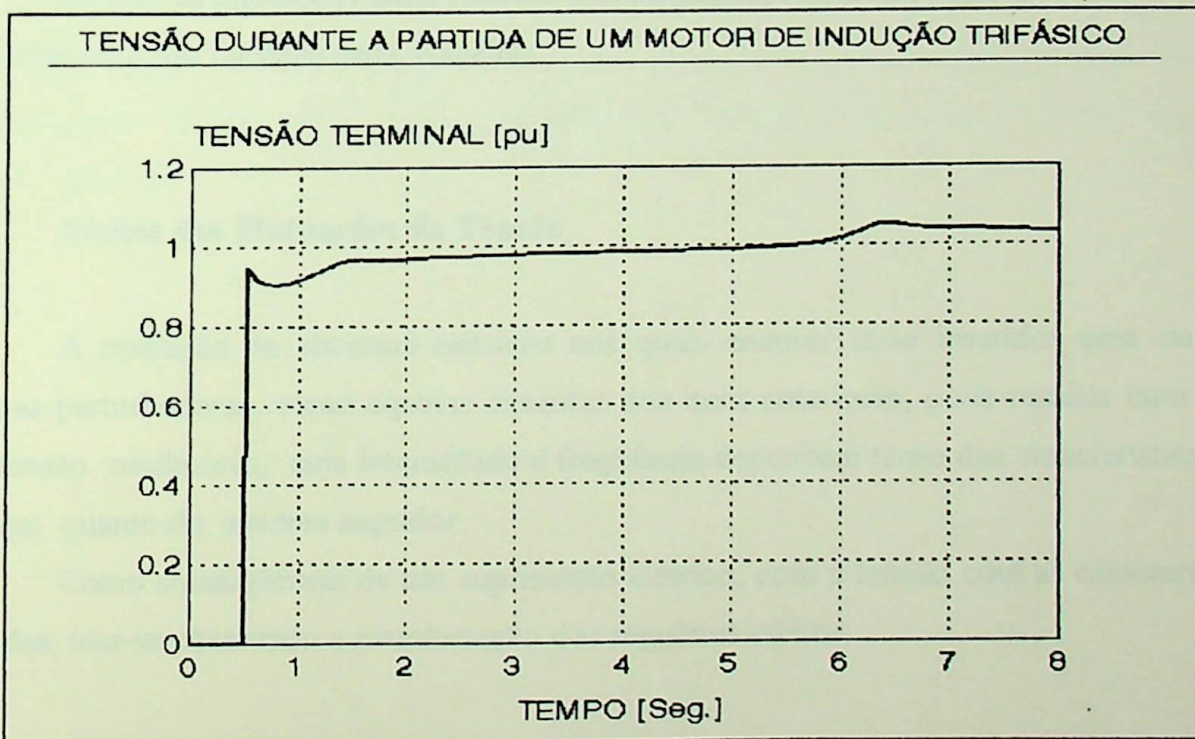


Figura 3.8 - Tensão Terminal Durante a Partida de Um Motor de 970 KW

Naturalmente, existem mecanismos de prevenção contra os impactos causados pela partida esporádica ou cíclica dos motores de maior porte. Caso estas medidas não sejam tomadas, é comum a ocorrência de problemas de oscilação de tensão em níveis superiores aos permitidos. Estas situações se caracterizam como aplicações inadequadas de motores.

3.3.5 Outras Cargas [13]

Embora não sejam tão difundidas quanto as já mencionadas anteriormente, existem ainda outras cargas que ocasionam variações de tensão. Alguns exemplos são:

- Aceleradores de partículas de alta energia;
- Aparelhos de raio X.

Devido às aplicações mais restritas das cargas supracitadas, julga-se desnecessário o detalhamento das mesmas neste trabalho.

3.4 Efeitos das Flutuações da Tensão

A operação de sistemas elétricos nos quais encontram-se inseridos uma ou mais cargas perturbadoras, como aquelas descritas nos itens anteriores, pode resultar num perfil de tensão oscilatório, cuja intensidade e frequência dependem tanto das características das cargas quanto do sistema supridor.

Como consequência de um suprimento elétrico, com a tensão com as características citadas, tem-se observado a manifestação dos seguintes efeitos:

- Oscilações de potência e de torque dos motores elétricos;
- Interferência em sistemas de instrumentação eletrônica, equipamentos de processamento de dados e sistemas de controle de processos industriais;

- Interferência em aparelhos residenciais como :vídeos , relógios digitais e TV's;
- Redução da velocidade de fusão e da produtividade dos fornos a arco;
- Aumento do custo para aquisição dos equipamentos, em função do acréscimo da faixa de tolerância da variação da tensão;
- Falhas ou comprometimento da qualidade do processo de soldagem;
- Desconforto visual provocado pela cintilação luminosa das lâmpadas, principalmente as incandescentes.

Deve-se ressaltar que nos capítulos que se seguem, será abordado, especificamente, o Fenômeno Cintilação Luminosa ou "Flicker".

3.5 Considerações Finais

Este capítulo, com característica introdutória e didática, conceituou o problema de flutuação de tensão associado à operação de cargas variáveis, apresentou uma descrição das principais cargas perturbadoras e, finalmente, citou os principais efeitos decorrentes das flutuações de tensão, ressaltando-se o fenômeno "Flicker", que será o objetivo principal desta dissertação.



CAPÍTULO IV

O EFEITO "FLICKER" - FUNDAMENTOS E QUANTIFICAÇÃO

4.1 Considerações Iniciais

O controle da qualidade de serviço prestada por uma concessionária de energia elétrica possui, hoje, significado bem mais amplo do que garantir o nível de tensão e continuidade de suprimento, dentro dos padrões estabelecidos pela legislação vigente. A sofisticação do parque industrial brasileiro, associada à busca de uma melhor qualidade de vida de nossa sociedade, vem acompanhada de uma cobrança cada vez maior quanto aos aspectos relativos à Qualidade da Tensão, abordados no Capítulo-II.

Dos itens de avaliação da Qualidade da Tensão, o efeito "Flicker" apresenta destacada importância, uma vez que as pesquisas mostraram que, seu efeito sobre as pessoas, pode se manifestar sob a forma de incômodo visual, irritação, perda de concentração e nos casos extremos, sob a forma de problemas neurológicos.

Neste sentido, este capítulo tem como meta abordar os seguintes tópicos:

- Conceituar o fenômeno "Flicker", sua natureza e seus efeitos;
- Descrever os principais métodos de quantificação mais difundidos a nível internacional;
- Apresentar os limites nacionais e internacionais voltados à regulamentação da matéria.

4.2 Aspectos Gerais Sobre o Efeito "Flicker"

A operação de cargas perturbadoras como aquelas citadas no capítulo anterior, de forma conjunta ou isolada, pode resultar num perfil de tensões como o oscilograma hipotético ilustrado na figura 4.1. Conforme pode ser observado, a tensão fundamental encontra-se modulada por um sinal de tensão de baixa frequência.

Deve-se ressaltar que a composição apresentada na figura 4.1 está associada à uma única frequência de modulação; todavia, para situações reais, a composição é mais complexa, pois a modulação será formada por uma onda aleatória em amplitude e frequência, conforme determina a característica de operação da carga perturbadora [12].

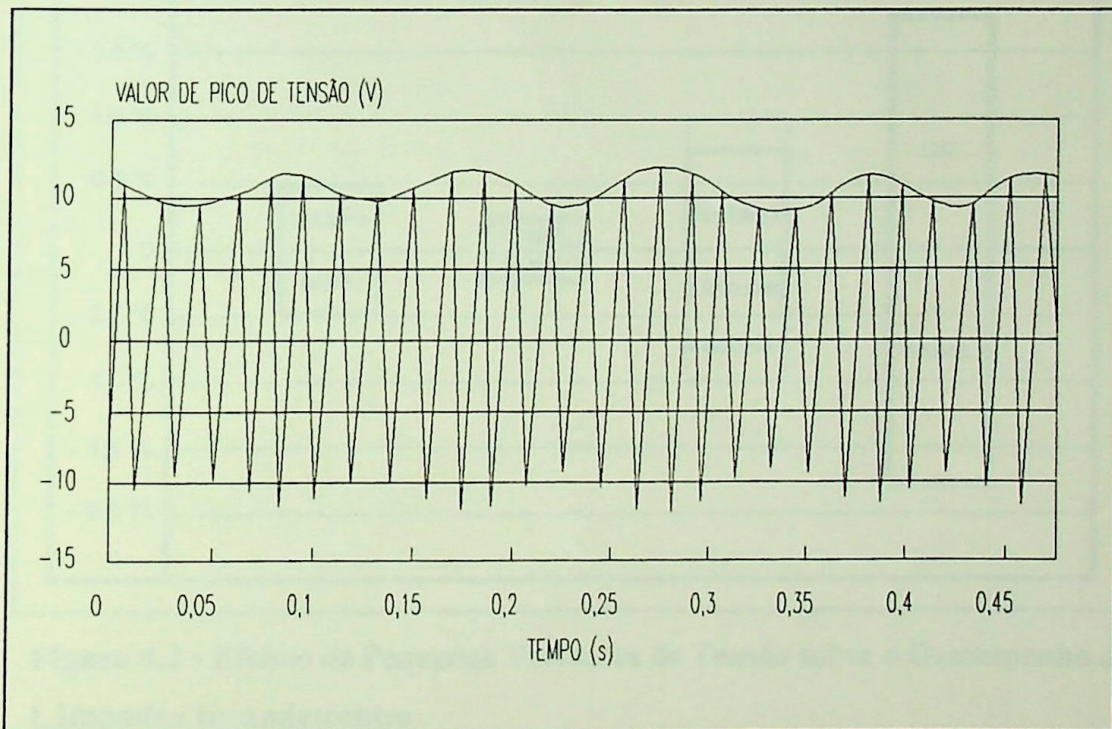


Figura 4.1 - Forma de Onda de Tensão com Modulação Senoidal

Como consequência de um suprimento elétrico com uma tensão com as características ilustradas na figura 4.1, tem-se observado a manifestação de diversos efeitos, conforme destacado no item 3.4, do capítulo anterior.

No entanto, o comportamento das lâmpadas incandescentes tem se mostrado como um dos efeitos mais significativos, já que a variação luminosa é decorrente da variação da energia dissipada pela lâmpada e, portanto, acompanha as variações de amplitude e frequência da tensão de alimentação.

A figura 4.2 dá uma indicação sobre o inter-relacionamento existente entre as variações de tensão e a intensidade luminosa apresentada pelas lâmpadas incandescentes de 120 V e potências de 100, 60 e 40 W; comportamentos semelhantes também foram obtidos para lâmpadas de 220 V [6] [12].

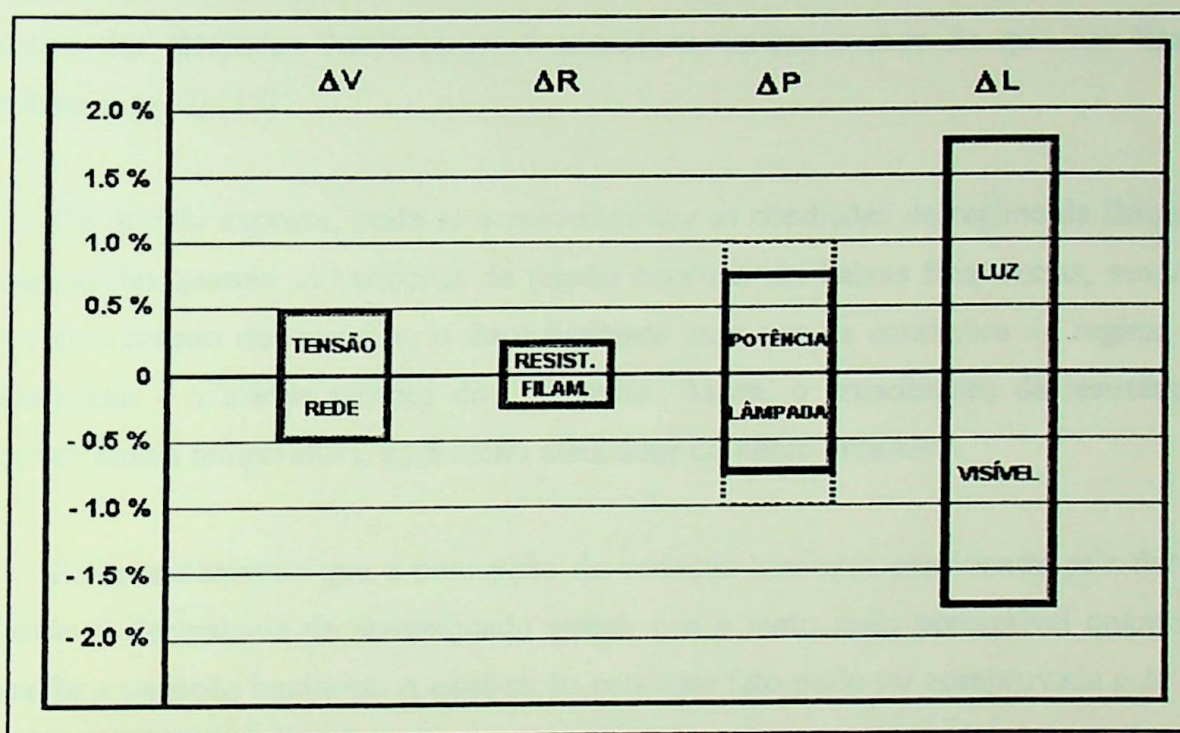


Figura 4.2 - Efeitos de Pequenas Variações de Tensão sobre o Desempenho de Lâmpadas Incandescentes.

Analisando a figura 4.2, observa-se que, para variações de tensão de $\pm 0,5\%$, a resistência do filamentos, que varia com a temperatura, oscila na faixa de $\pm 0,25\%$. A potência da lâmpada varia de $\pm 0,75\%$ e caso a resistência permanecesse constante, a variação da potência deveria variar $\pm 1,0\%$. Finalmente, constata-se que a variação mais significativa é a do fluxo luminoso que oscila em $\pm 1,75\%$.

Embora o fluxo luminoso mude exponencialmente com a magnitude da tensão de operação, a relação torna-se praticamente linear numa região de pequenas variações. Nesta condição, ou seja, para pequenos níveis de oscilação da tensão tem-se, portanto, uma amplificação do efeito da variação da tensão sobre o fluxo luminoso [6].

Enquanto que as lâmpadas incandescentes sofrem grande influência da flutuação de tensão, as lâmpadas fluorescentes também são afetadas, porém, em menor intensidade. Investigações realizadas com vários tipos de lâmpadas fluorescentes submetidas a variações de tensão de $\pm 0,5\%$, mostraram que o fluxo luminoso variou entre $\pm 0,4\%$ e $\pm 0,9\%$; desta forma, concluiu-se que, para uma mesma variação de tensão, a variação do fluxo luminoso resultante nas lâmpadas fluorescentes é consideravelmente menor do que nas lâmpadas incandescentes [6] [12].

Do que foi exposto, pode-se acrescentar que as condições de regime da lâmpada só são alcançadas quando as variações de tensão ocorrem em baixas frequências, sendo que, com o crescimento das mesmas, o fator limitante para que as condições de regime sejam restabelecidas é a inércia térmica do filamento. Assim, o crescimento da resistência do filamento, com a temperatura, atua como atenuador do efeito "Flicker".

Pode-se constatar que a percepção da variação luminosa ocasionada pela flutuação de tensão é dependente da sensibilidade visual, que é tanto mais perceptível quanto mais brusca for a variação luminosa. A explicação para este fato pode ser comprovada pela figura 4.3, que mostra duas curvas representativas do limiar de percepção visual para flutuações senoidais e de onda quadrada [26].

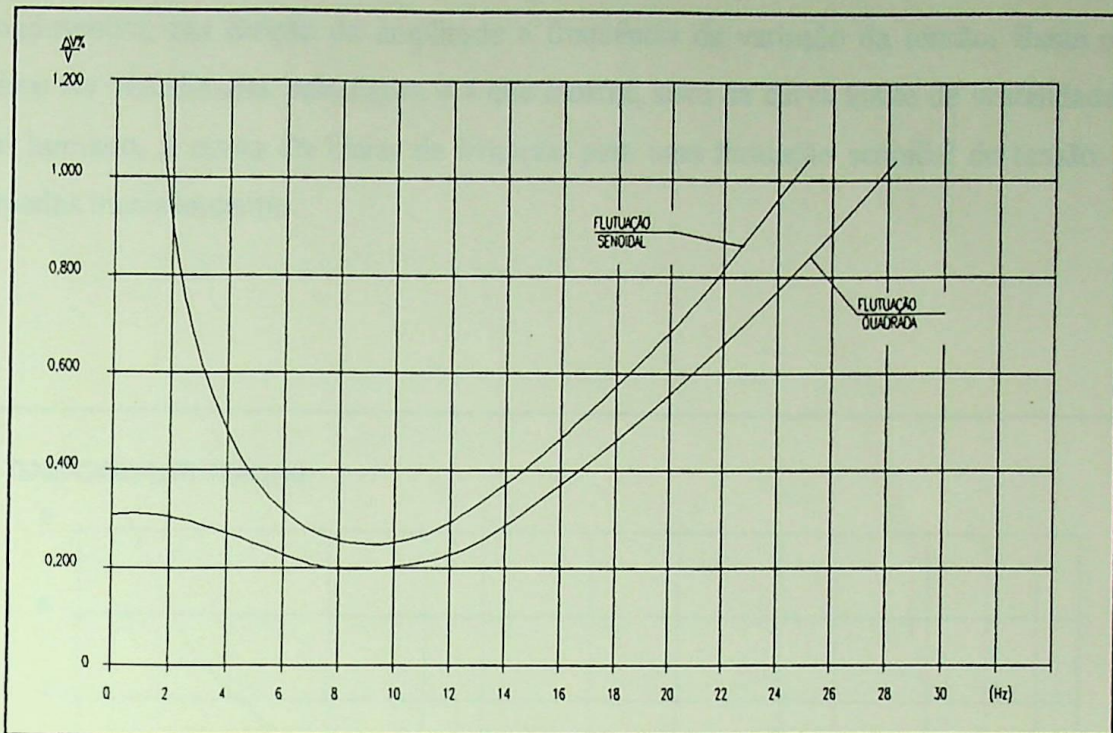


Figura 4.3 - Limiar da Percepção Visual para Flutuações de Tensão Associadas a Ondas Senoidal e Quadrada.

Os resultados mostrados na figura 4.3 e complementados pela figura 4.4, indicam que as variações bruscas de 0,3% da tensão nominal são perceptíveis, mesmo para intervalos de tempo relativamente grandes. Todavia, para as variações graduais, o que ocorre é uma acomodação visual, provocando, assim, um nível de irritação de menor intensidade e tolerável pelo ser humano.

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 o limite além do qual as referidas flutuações se tornem 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, do módulo e da frequência da tensão de flutuação.

Após observações sistemáticas efetuadas com um número grande de pessoas, foi possível traçar curvas de distúrbios da tensão de alimentação de uma lâmpada

incandescente, em função da amplitude e freqüência da variação da tensão. Essas curvas podem ser visualizadas pela figura 4.4 que mostra, além da curva limite de visibilidade pelo olho humano, a curva do limiar de irritação para uma flutuação senoidal de tensão sobre lâmpadas incandescentes.

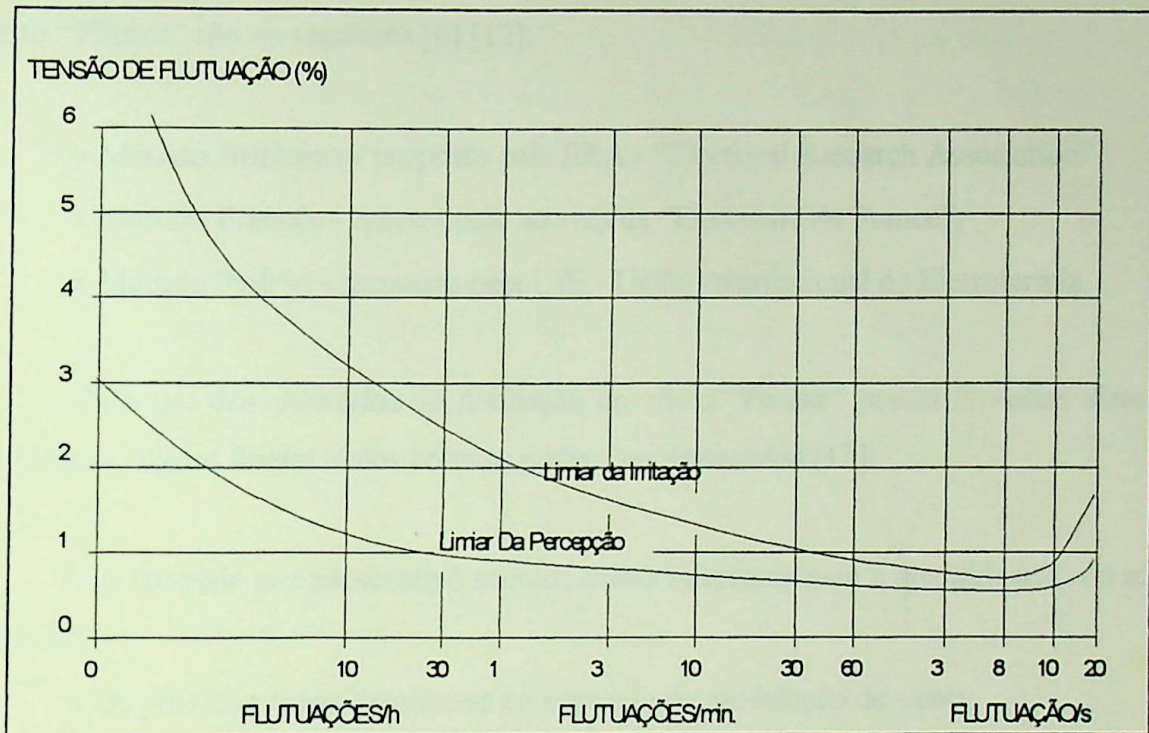


Figura 4.4 - Curvas Limites de Visibilidade e Irritação do Olho Humano devido à Flutuações de Tensão sobre Lâmpadas Incandescentes.

As figuras 4.3 e 4.4 informam que o incômodo máximo se verifica para uma freqüência na faixa de 8 a 10 variações por segundo, ou seja, de 8 à 10 Hz.

Do exposto, conclui-se que o efeito "Flicker" ou Cintilação Luminosa, caracteriza-se por ser um efeito subjetivo, associado à perceptibilidade do olho humano a variações de intensidade luminosa provocadas por flutuações da tensão de suprimento sobre sistemas de iluminação.

As variações luminosas são percebidas pelo olho humano quando ocorrem numa faixa de frequência compreendida entre 0 e 25 Hz.

4.3 Métodos para a Avaliação do Efeito "Flicker"

Os Métodos de Medição mais difundidos, a nível internacional, para a avaliação do efeito "Flicker" são os seguintes [6] [12]:

- Método Britânico - proposto pela ERA - "Electrical Research Association";
- Método Francês - apresentado através da "Electricité de France";
- Método Padrão - proposto pela UIE - União Internacional de Eletrotermia.

Cada um dos Métodos de Avaliação do efeito "Flicker" possui filosofias distintas, no entanto, alguns fundamentos comuns podem ser destacados [13]:

- A lâmpada incandescente é adotada como referência para a quantificação do efeito "Flicker";
- 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;
- Os métodos, Francês e Padrão, valorizam as frequências críticas existentes no sinal modulante, causadoras de maior incômodo ao olho humano.

A seguir, uma descrição detalhada das principais metodologias empregadas na quantificação do fenômeno de cintilação luminosa.

4.3.1 Método Britânico

O Método Britânico foi estabelecido em abril de 1960, pela "Electrical Research Association" - ERA, a todas as concessionárias de energia elétrica da Grã-Bretanha. A ERA propunha uma metodologia para a análise e pré-determinação do efeito "flicker", através do documento "Engineering Recommendations" P-7/1, que estabelecia limites máximos para as perturbações no sistema de energia elétrica, provenientes da operação de fornos elétricos a arco no que se refere ao efeito "Flicker". Em julho de 1970, o Conselho de Eletricidade Britânico publicou o documento "Engineering Recommendations" P-7/2, aprimorado em relação ao primeiro e que serviu como base para o estabelecimento dos limites e critérios no Brasil [12].

O Método teve origem em diversos experimentos de laboratório, no sentido de reproduzir o efeito da cintilação luminosa sobre as pessoas, de modo a contemplar uma gama bastante ampla de variáveis que poderiam afetar a percepção do efeito, tais como [6]:

- Idade das pessoas expostas;
- Tempo de exposição;
- Intensidade do fenômeno;
- Níveis de reclamação;
- Irritabilidade das pessoas expostas.

Tais testes foram preparados em lugares com iluminação artificial (lâmpadas incandescentes), onde pessoas eram convidadas a ler artigos, livros, etc; a iluminação foi, então, variada eletronicamente com base em dados previamente gravados em medições de condições reais, impostas por fornos a arco [6].

Desta forma, o observador ficou sujeito à condições próximas às reais do campo, sendo que era disponível um sistema de controle de intensidade do efeito [6].

A Metodologia Britânica baseia-se no princípio da modulação de sinal, ou seja, a onda de 60 Hz é modulada por um sinal aleatório chamado de tensão de flutuação v_f . Este



o sinal é o responsável pelo incômodo visual sobre o ser humano. A figura 4.5 apresenta o valor eficaz da onda de tensão modulada a cada ciclo e a correspondente tensão de flutuação v_f , ou sinal modulador que é a envoltória da onda de 60 Hz, tratado em separado.

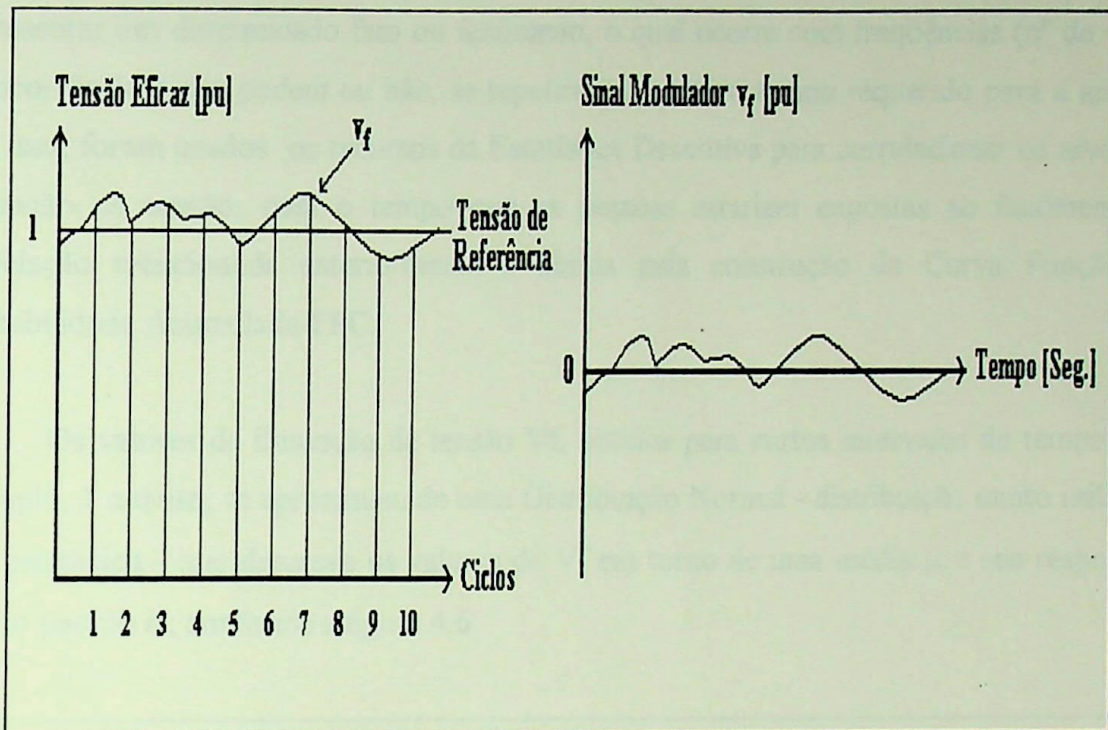


Figura 4.5 - Ilustração da Modulação de Tensão

Através de vários testes em laboratórios, na Inglaterra, chegou-se a uma medida consistente do sinal modulador v_f , ao se obter o seu valor eficaz para intervalos de tempo de 1 minuto. Este valor é representado pela variável V_f , sendo, geralmente, expresso em porcentagem do valor eficaz da tensão de suprimento de 60 Hz.

Como resultado das pesquisas citadas, constatou-se que uma flutuação de tensão (V_f %) na faixa de 0,20 - 0,25 %, resulta num incômodo perceptível, porém, tolerável; para valores maiores ou iguais a 0,30 %, o desconforto visual apresenta-se intolerável.

No entanto, a obtenção destes limites de flutuação de tensão não é suficiente para se avaliar o efeito "Flicker", uma vez que o mesmo é caracterizado por comportamento

aleatório. Sendo assim, a análise estatística é a melhor e mais abrangente forma de interpretação de tais fenômenos.

Da teoria estatística, as Curvas de Distribuição de Frequências são formas de se representar um determinado fato ou fenômeno, o qual ocorre com frequências (n° de vezes de ocorrências) que podem ou não, se repetirem durante o tempo requerido para a análise. Por isso, foram usados os recursos da Estatística Descritiva para correlacionar os níveis de flutuação de tensão, com o tempo que as pessoas estariam expostas ao fenômeno. A correlação mencionada anteriormente é obtida pela construção da Curva Função de Probabilidade Acumulada-FPC.

Os valores de flutuação de tensão V_f , obtidos para curtos intervalos de tempo, por exemplo, 1 minuto, se aproximam de uma Distribuição Normal - distribuição muito utilizada em estatística - que descreve os valores de V_f em torno de uma média μ e seu respectivo desvio padrão σ , conforme a figura 4.6.

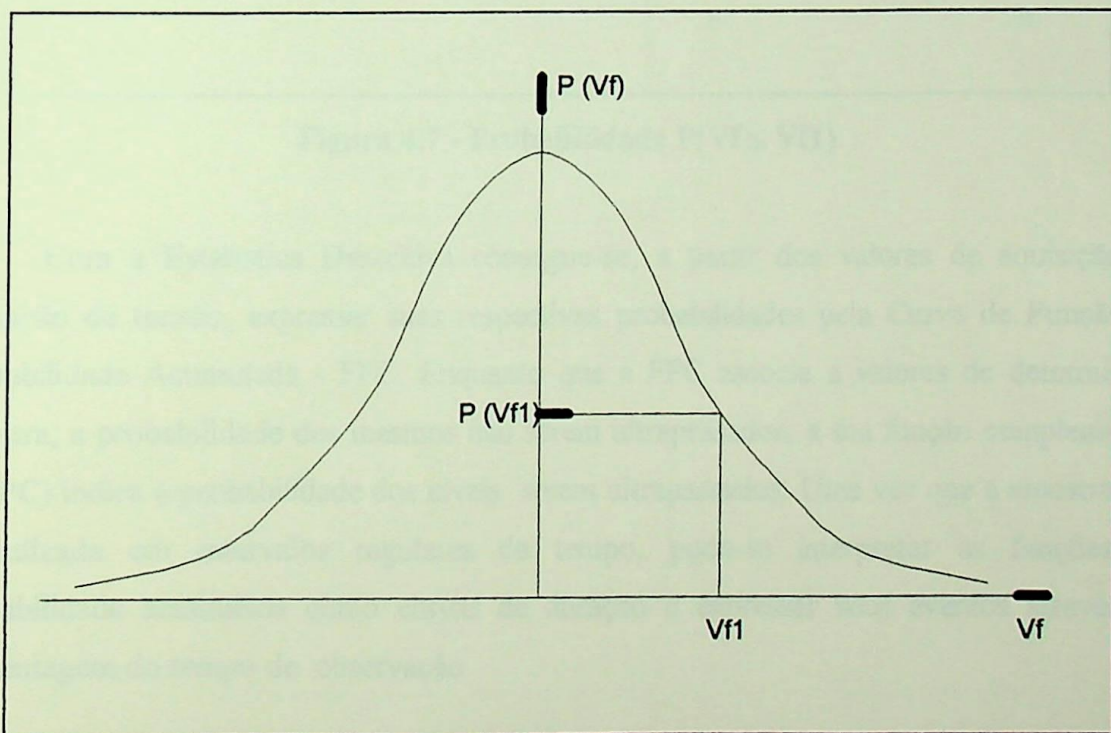


Figura 4.6 - Curva de Distribuição Normal definindo o comportamento dos valores de V_f

Com a distribuição Normal pode-se determinar a probabilidade de um determinado valor genérico $Vf1$ não ser ultrapassado. Para tanto, a probabilidade $P(Vf \leq Vf1)$ pode ser obtida através da determinação da área delimitada pela curva de distribuição $f(x)$ no intervalo $[-\infty, Vf1]$, de acordo com a figura 4.7.

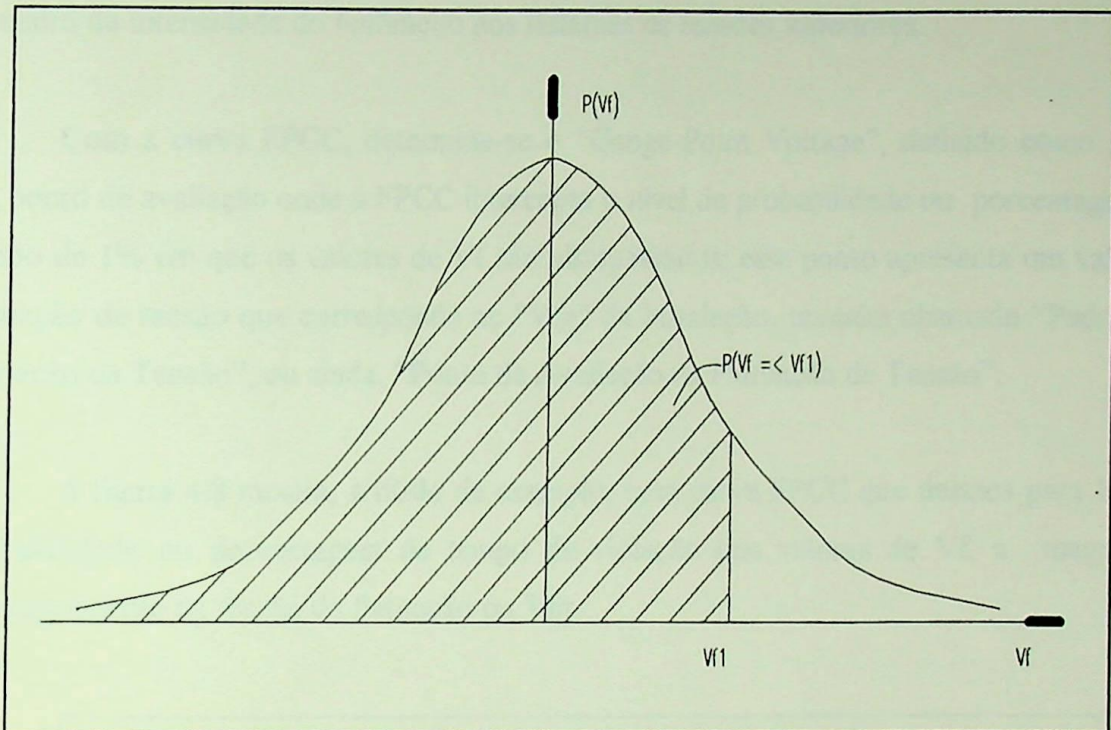


Figura 4.7 - Probabilidade $P(Vf \leq Vf1)$

Com a Estatística Descritiva consegue-se, a partir dos valores de aquisição de flutuação de tensão, expressar suas respectivas probabilidades pela Curva de Função de Probabilidade Acumulada - FPC. Enquanto que a FPC associa a valores de determinada amostra, a probabilidade dos mesmos não serem ultrapassados, a sua função complementar (1-FPC) indica a probabilidade dos níveis serem ultrapassados. Uma vez que a amostragem é realizada em intervalos regulares de tempo, pode-se interpretar as funções de probabilidade acumulada como curvas de duração e expressar seus eventos através de porcentagem do tempo de observação.

Quanto aos limites aceitáveis pelo Método Britânico foi estabelecido e regulamentado que, uma vez obtida a curva FPCC, o valor da flutuação de tensão Vf deverá

ser menor ou igual a 0,25% da tensão tomada como referência, para 1% do tempo total de operação da carga nos sistemas que apresentam tensões menores ou iguais a 138 kV.

Para sistemas com tensão superior a 138 kV adotou-se limite mais rígido (0,20%), em função da possibilidade da existência de diversas fontes poluidoras, contribuindo para o aumento da intensidade do fenômeno nos sistemas de tensões superiores.

Com a curva FPCC, determina-se o "Gauge-Point Voltage", definido como sendo um ponto de avaliação onde a FPCC intercepta o nível de probabilidade ou porcentagem de tempo de 1% em que os valores de V_f são ultrapassados; esse ponto apresenta um valor de flutuação de tensão que corresponde ao " V_{fg} " da instalação, também chamado "Padrão de Variação da Tensão", ou ainda, "Ponto de Avaliação da Flutuação de Tensão".

A figura 4.8 mostra, a título de exemplo, uma curva FPCC que destaca para 1% de probabilidade ou porcentagem de tempo de violação dos valores de V_f , a magnitude correspondente da tensão de flutuação ou V_{fg} .

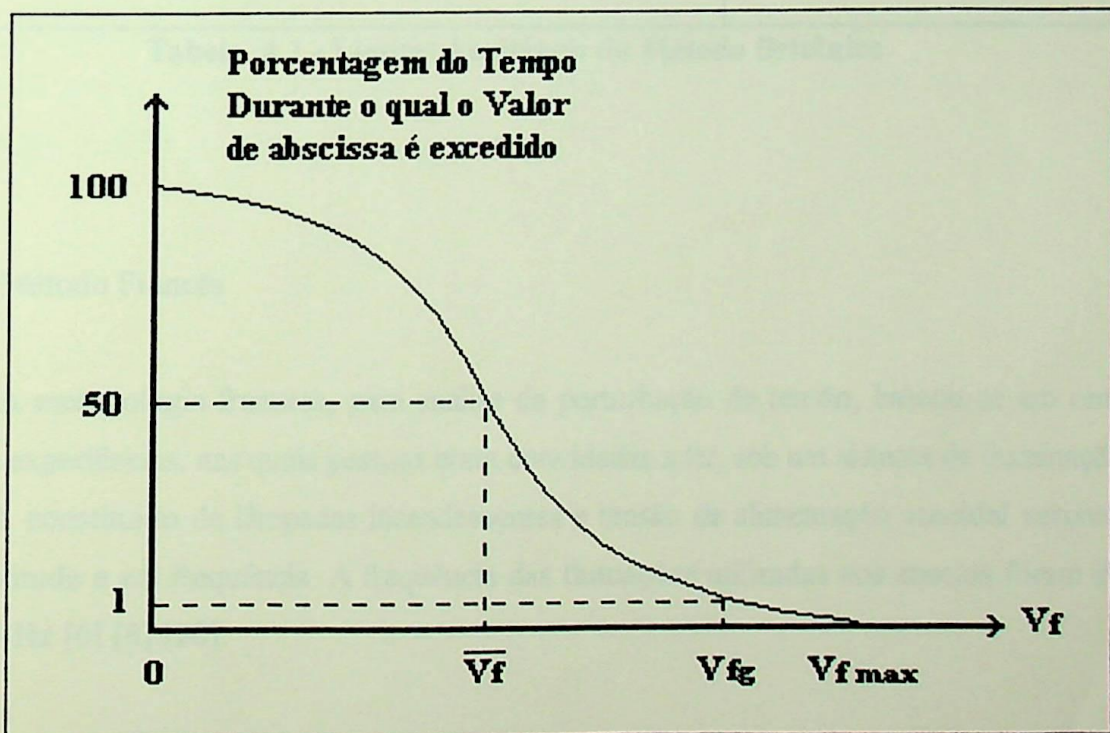


Figura 4.8 - Curva Função de Probabilidade Acumulada Complementar (FPCC)

Além da avaliação da tensão de flutuação V_{fg} , deve-se atentar, também, para os limites e queda de tensão ΔV_f que o método estabelece em concordância com a tensão nominal do sistema. Os limites de ΔV_f são : 2 % da tensão nominal, para sistemas de tensão nominal menores ou iguais a 138 kV; 1,6 % da tensão nominal, para sistemas com tensão nominal maiores que 138 kV.

Finalmente, a tabela 4.1 engloba todas as condições necessárias para se avaliar o efeito "Flicker", segundo o método Britânico.

LIMITES ACEITÁVEIS DO MÉTODO BRITÂNICO		
Tensão Nominal	Queda de Tensão	"Gauge-Point Voltage"
$\leq 138 \text{ kV}$	$\leq 2 \%$	$\leq 0.25 \%$
$> 138 \text{ kV}$	$\leq 1.6 \%$	$\leq 0.20 \%$

Tabela 4.1 - Limites Aceitáveis do Método Britânico

4.3.2 Método Francês

A metodologia francesa, para análise da perturbação de tensão, baseou-se em uma série de experiências, nas quais pessoas eram convidadas a ler, sob um sistema de iluminação artificial, constituído de lâmpadas incandescentes e tensão de alimentação senoidal variável em amplitude e em frequência. A frequência das flutuações utilizadas nos ensaios foram de 0,1 a 25 Hz [6] [8] [20].

O conjunto de resultados fornecidos por estes ensaios pode ser assim resumido [8]:

- A sensação de incômodo sentida por um observador médio é função do quadrado da amplitude da flutuação de tensão e de sua duração;
- Com amplitude constante, o maior incômodo visual é sentido quando a frequência de flutuação é próxima de 10 Hz;
- Existe um início de perceptibilidade, abaixo do qual o Flicker não é visível. O limiar de tolerância corresponde à amplitude da flutuação de tensão de 0,30 % , com frequência igual a 10 Hz.
- A superposição de várias flutuações senoidais com amplitudes e frequências distintas, desde que ponderadas convenientemente, conduz à mesma sensação de incômodo equivalente à flutuação senoidal de 10 Hz com uma determinada amplitude.

Portanto, com base nestes resultados, o Método Francês realiza a ponderação dos valores de flutuação de tensão, de modo que se obtenham um efeito equivalente de qualquer frequência entre 0,5 a 25 Hz, para uma frequência de 10 Hz. Para tanto, o método propõe a utilização da Curva de Ponderação em Frequência ou Curva de Sensibilidade Visual do "Flicker" mostrada na figura 4.9. Conforme ilustrado, a frequência de 10 Hz, a que mais sensibiliza o olho humano, é tomada como referência, possuindo, portanto, coeficiente de ponderação unitário.

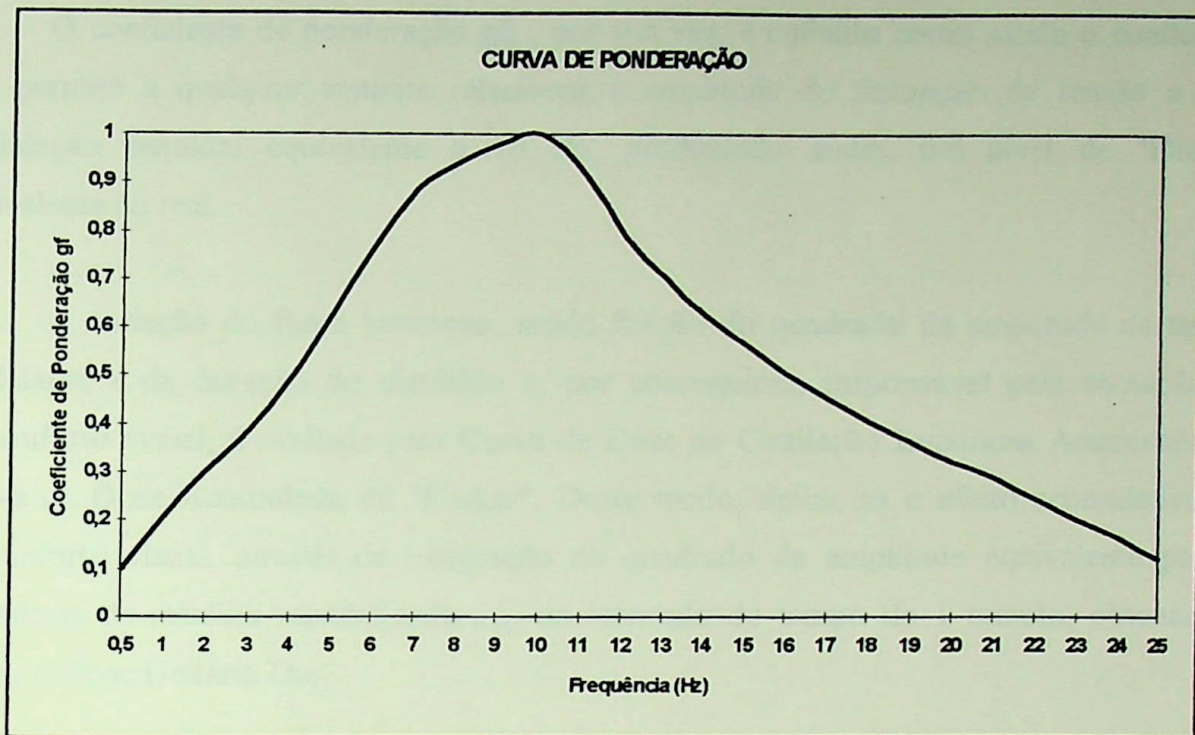


Figura 4.9 - Curva de Ponderação em Frequência

Através da Curva de Ponderação obtém-se a amplitude equivalente para a frequência de máxima sensibilidade, expressa, analiticamente por:

$$a_{10} = \sqrt{\sum_{i=0,5}^{25} a_i^2 \cdot gf_i^2} \quad (4.1)$$

onde:

a_{10} - Amplitude equivalente para frequência de máxima sensibilidade (10 Hz);

a_i - Amplitude da flutuação de tensão na frequência f_i ;

gf_i - Coeficiente de ponderação correspondente a f_i .

A expressão (4.1) pode ser melhor interpretada como a resultante de várias amplitudes de flutuação de tensão moduladas numa frequência f_i correspondente e ponderadas segundo um coeficiente gf_i , de forma que se obtenha uma amplitude modulante equivalente à frequência crítica, ou seja, 10 Hz.

O coeficiente de ponderação gf_i , por sua vez, é definido como sendo o coeficiente que permite a qualquer instante relacionar a amplitude de flutuação de tensão a uma modulação senoidal equivalente a 10 Hz, produzindo assim, um nível de "Flicker" equivalente ao real.

A variação do fluxo luminoso, sendo função do quadrado da amplitude da tensão modulante e da duração do distúrbio e, por conseguinte, responsável pela sensação de desconforto visual, é avaliada pela Curva de Dose de Cintilação Luminosa Acumulada ou Curva de Dose Acumulada de "Flicker". Deste modo, define-se o efeito acumulativo do desconforto visual, através da integração do quadrado da amplitude equivalente para a frequência de máxima sensibilidade a_{10} no intervalo de tempo de 1 minuto, obtendo-se, assim, a Dose Unitária Du_i .

A expressão (4.2) mostra como se determina a dose unitária Du_i :

$$Du_i = \int_0^{T=1\text{min}} (a_{10})^2 \cdot dt \quad (4.2)$$

onde:

Du_i - Dose Unitária de Cintilação

a_{10}^2 - Nível Instantâneo de Cintilação.

A dose unitária de cintilação representa, portanto, o valor acumulado durante um minuto da sensação instantânea média, associada à variação luminosa. Tal conceito pode ser comparável à variação de energia consumida por uma lâmpada, num intervalo preestabelecido.



Quanto aos limites aceitáveis pelo Método Francês, a percepção visual correspondente a uma dose unitária, tem como limiar de tolerância assumido: $\Delta V\% = 0,3\%$. Esse valor, convertido em unidades de cintilação, corresponde a $0,09 (\%)^2 \times \text{min}$.

Para exemplificar, a figura 4.10 mostra as doses unitárias obtidas para uma determinada medição hipotética e o limiar de tolerância. Observa-se que no quinto minuto o limiar de tolerância foi ultrapassado.

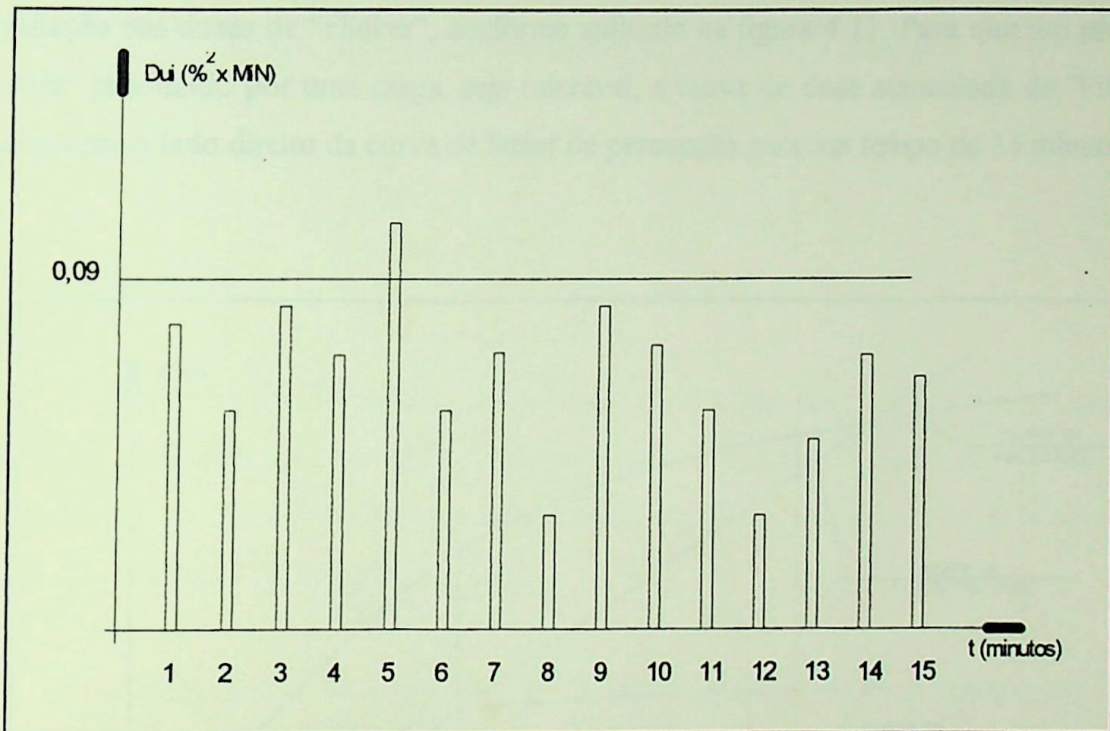


Figura 4.10 - Curva de Dose Unitária de "Flicker"

Com relação a aceitabilidade de uma instalação devido ao nível de cintilação produzido, recomenda-se analisar o comportamento das doses unitárias durante um período de 15 minutos consecutivos. Desta forma, o limite para aceitação de uma instalação é realizado pelo somatório das doses unitárias, num intervalo de tempo de 15 minutos, de acordo com a expressão (4.3):

$$G(t) = \sum_{i=1}^{15} Du_i \leq 15 \cdot 0,09 = 1,35 (\%)^2 \cdot \text{min.} \quad (4.3)$$

onde:

G(t) - Curva de Dose Acumulada de "Flicker"

Du_i - Dose Unitária

De acordo com pesquisas realizadas na França, estabeleceu-se uma curva limite para a avaliação das doses de "Flicker", conforme indicado na figura 4.11. Para que um nível de "Flicker" produzido por uma carga, seja tolerável, a curva de dose acumulada de "Flicker" deve ocupar o lado direito da curva de limiar de percepção para um tempo de 15 minutos:

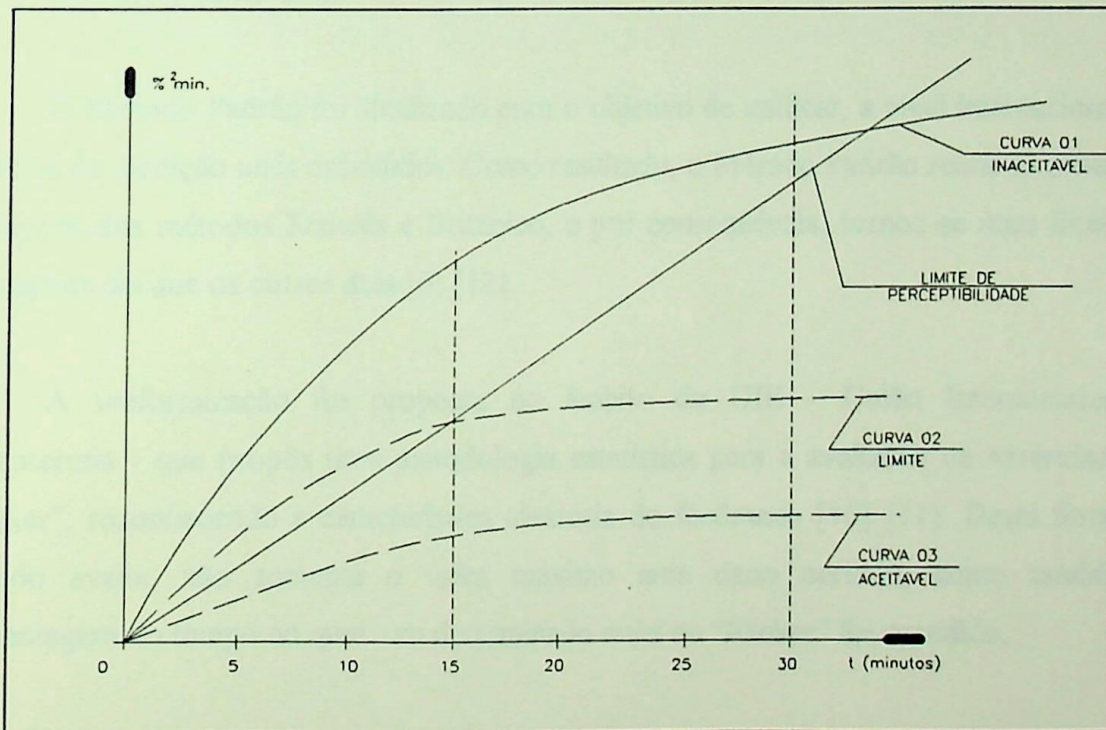


Figura 4.11 - Curva de Dose Acumulada de "Flicker"

Finalmente, a tabela 4.2, resume os limites aceitáveis para se avaliar a cintilação luminosa, segundo o Método Francês:

LIMIARES DE TOLERÂNCIA DO MÉTODO FRANCÊS	
Dose Unitária (1 minuto)	Dose Acumulada (15 minutos)
$\leq 0.09 (\%)^2 \times \text{min.}$	$\leq 1.35 (\%)^2 \times \text{min.}$

Tabela 4.2 - Limites Aceitáveis do Método Francês

4.3.3 Método Padrão UIE

O Método Padrão foi idealizado com o objetivo de unificar, a nível internacional, os critérios de medição mais difundidos. Como resultado, o Método Padrão reúne as principais vantagens dos métodos Francês e Britânico, e por consequência, tornou-se mais flexível e abrangente do que os outros dois [6] [12].

A uniformização foi proposta no âmbito da UIE - União Internacional de Eletrotermia - que propôs uma metodologia estatística para a avaliação da severidade de "Flicker", reconhecendo a característica aleatória do fenômeno [10] [11]. Desta forma, o método avalia, não somente o valor máximo num dado período, como também a porcentagem do tempo no qual um determinado nível de "Flicker" foi excedido.

Para a realização da análise estatística, deve-se correlacionar os níveis de "Flicker" e as correspondentes porcentagens de tempo de duração. Deste modo, os níveis instantâneos de "Flicker" (a_{10}^2) são classificados, ou seja, são organizados de forma a obter a distribuição de frequências da amostra e, por conseguinte, a correspondente Curva Função de Probabilidade Acumulada - FPC (em pu). Esta construção pode ser, também, designada

por porcentagem de tempo não excedido para os níveis instantâneos de "Flicker". Logo, pode-se dizer que o procedimento adotado para a obtenção dos níveis instantâneos de "Flicker" e sua distribuição de frequências englobam, respectivamente, o Método Francês e o Método Britânico; pelo Método Francês, através do cálculo das doses, tem-se o nível de "Flicker" instantâneo e pelo Método Britânico, com levantamento das Curvas de Função de Probabilidade Acumulada - FPC e sua complementar, obtém-se, respectivamente, os níveis que não foram ultrapassados e aqueles que foram excedidos durante uma determinada porcentagem de tempo do período de observação.

Se todas as curvas FPC's seguissem o mesmo tipo de distribuição, como a Gaussiana, por exemplo, a severidade do efeito "Flicker" seria perfeitamente caracterizada através dos parâmetros média e desvio padrão. Entretanto, esta situação não corresponde à realidade. Verificou-se que, dependendo do tipo de distúrbio, as curvas FPC's obtidas, apresentam-se sensivelmente diferentes. A figura 4.12 mostra a forma da FPC obtida para dois tipos distintos de flutuações: enquanto a curva (A) descreve um sinal de tensão com uma flutuação a cada 2 segundos, a curva (B) ilustra a FPC obtida para um sinal representativo da partida de um motor [10] [13]:

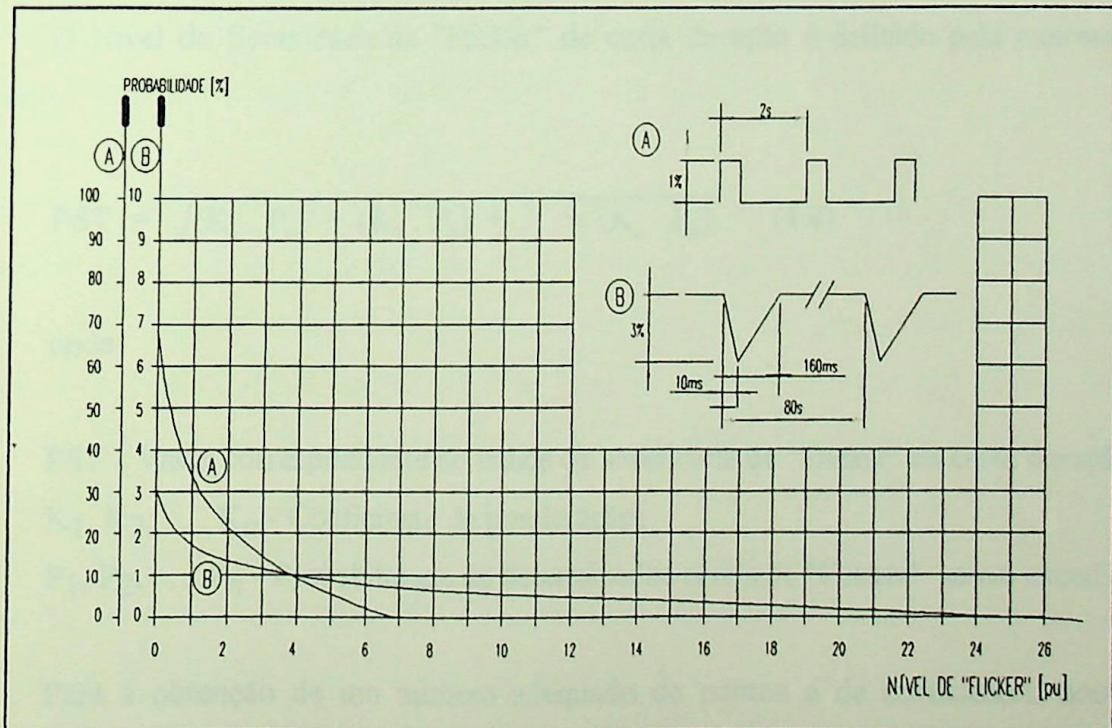


Figura 4.12- FPC 's para Dois Tipos de Formas de Onda

Pelo que foi apresentado em relação às FPC 's, no tocante às diferenças entre os resultados para cada tipo de distúrbio, constata-se a necessidade do estabelecimento de um único critério que quantifique a severidade de "Flicker", independentemente da forma do distúrbio. Esse critério, de acordo com o Método Padrão UIE [10], baseia-se na conversão da curva FPC em um índice representativo da severidade de "Flicker". Para tal, o procedimento adotado pela UIE, foi o desenvolvimento de um algoritmo que avaliasse a curva FPC em múltiplos pontos. Assim, este processo requer o cálculo de duas variáveis, a saber :

- PST - Índice de Severidade de "Flicker" pelo Método de Curta Duração ou "Short-Term Probability".

- PLT - Índice de Severidade de "Flicker" pelo Método de Longa Duração ou "Long-Term Probability".

4.3.3.1 Avaliação do Nível de "Flicker" através do PST

O Nível de Severidade de "Flicker" de curta duração é definido pela expressão a seguir:

$$PST = \sqrt{(K_1 \cdot P_1) + (K_2 \cdot P_2) + \dots + (K_n \cdot P_n)} \quad (4.4)$$

onde:

PST - Valor correspondente ao índice de severidade de "Flicker" de curta duração;

K_1, K_2, \dots, K_n - Coeficiente de ponderação;

P_1, P_2, \dots, P_n - Probabilidade de determinados níveis de "Flicker" serem excedidos.

Para a obtenção de um número adequado de pontos e de coeficientes, houve a necessidade de se resolver equações múltiplas, relacionando a severidade de "Flicker" com

as várias curvas FPC's. Analisados os resultados, verificou-se que uma solução equilibrada foi alcançada com a aplicação de 5 níveis probabilísticos, conforme o que segue:

- P0,1 - Nível excedido por 0,1% do período de observação;
- P1 - Nível excedido por 1% do período de observação;
- P3 - Nível excedido por 3% do período de observação;
- P10 - Nível excedido por 10% do período de observação;
- P50 - Nível excedido por 50% do período de observação.

O ponto de avaliação correspondente a 50% reflete o nível médio de "Flicker", fornecendo uma indicação geral da magnitude do distúrbio. Os demais pontos de avaliação caminham em direção ao final da escala de probabilidade (*FPCC*), objetivando ponderar de maneira apropriada os níveis mais elevados de flutuação, causadores de maior incômodo ao olho humano.

Observa-se que, o máximo nível de "Flicker" constatado durante o intervalo analisado, não é incluído nos níveis probabilísticos utilizados, descartando-se, assim, eventuais picos esporádicos. A escolha do ponto de avaliação correspondente a 0,1% fornece uma resposta adequada na análise deste tipo de evento.

Uma vez estabelecidos os pontos de avaliação, o próximo passo consiste na determinação do tempo dispensado para a avaliação do índice de severidade de "Flicker" de curta duração. Embora as cargas perturbadoras possuam diferentes ciclos de operação, o tempo de análise deve ser independente da fonte de distúrbio considerada. Desta maneira, faz-se necessário considerar, novamente, o fenômeno fisiológico induzido no olho humano, na determinação do intervalo médio de tempo que melhor caracterize o efeito "Flicker". Através de testes de percepção realizados em seres humanos e suas reações ao fenômeno de cintilação luminosa, estipulou-se o período de 10 minutos que, embora possa ser considerado longo para a pessoa exposta ao distúrbio, evita a super-valorização de picos esporádicos e ainda permite caracterizar, detalhadamente, distúrbios procedentes de equipamentos com ciclos de carga distintos.

Os valores P0,1, P1, P3, P10 e P50 são obtidos da curva complementar da FPC, ou seja, da curva 1-FPC no período de 10 minutos, consistindo dos níveis que foram excedidos em 0,1%, 1%, 3%, 10% e 50%, respectivamente.

Com relação aos valores obtidos para os coeficientes K_i , estes foram determinados a partir da curva recomendada pelo documento IEC 555-3 - Curva de Severidade Unitária [27] mostrada na figura 4.13, a qual, baseada em investigações de sensibilidade do olho humano, correlaciona a variação de tensão com variações retangulares de tensão, por minuto, para a obtenção de PST igual a 1.

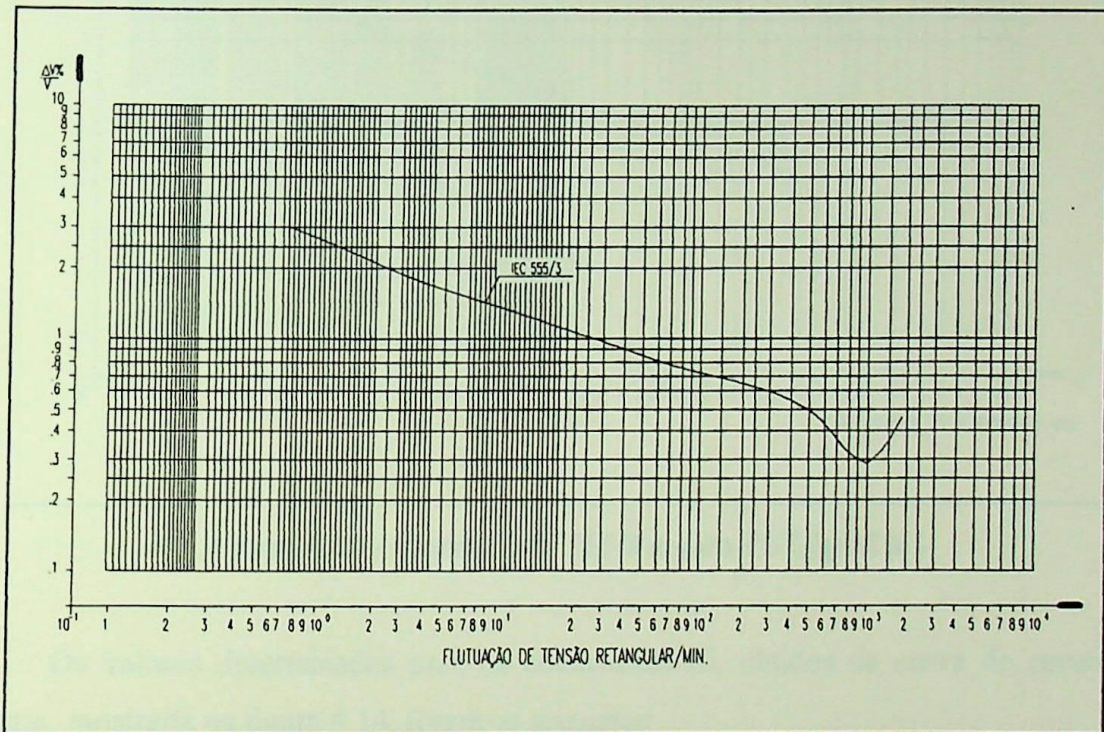


Figura-4.13- Curva IEC-555/3

Os resultados obtidos foram plotados na figura 4.14, superpondo-se a curva obtida com a aplicação do algoritmo de conversão para PST =1 e a curva IEC-553/3 tomada como referência, corrigida no intervalo entre 0,1 e 1 flutuações por minuto.

Simplificadamente, a conversão da curva FPC, em um índice representativo da severidade do incômodo visual para um período de 10 minutos, é determinada de modo que

o valor de PST seja igual a 1 para todos os valores de variação de tensão expressos pela curva IEC 555-3. O estabelecimento de um valor limite para PST foi resultante de testes em laboratório; verificou-se que uma proporção substancial de observadores mostrou-se sensível ao "Flicker" para PST igual a 1.

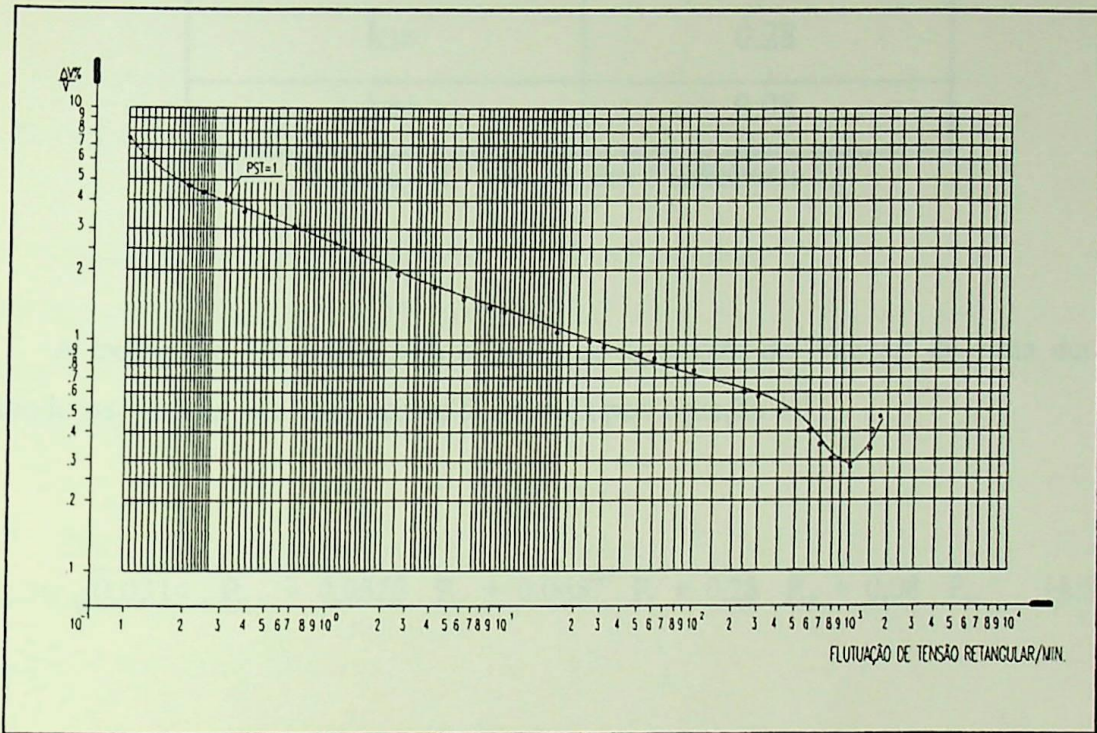


Figura 4.14 - Curvas IEC 555/3 e para PST igual a 1

Os valores determinados para os coeficientes K_i , obtidos da curva de severidade unitária, mostrada na figura 4.14, foram os seguintes:

Coefficientes de Ponderação	Valor
k _{0.1}	0.0314
k ₁	0.0525
k ₃	0.0657
k ₁₀	0.28
k ₅₀	0.08

Tabela 4.4 - Valores dos Coeficientes K_i

A expressão resultante para o índice de severidade de "Flicker" de curta duração, incluindo os valores dos coeficientes K_i, é dada pela equação 4.5.

$$PST = \sqrt{0,0314 \cdot P_{0,1} + 0,0525 \cdot P_1 + 0,0657 \cdot P_3 + 0,28 \cdot P_{10} + 0,08 \cdot P_{50}} \quad (4.5)$$

4.3.3.2 Avaliação do Nível de "Flicker" através do PLT

A avaliação da severidade no nível "Flicker" pelo método de curta duração é empregada, adequadamente, quando se realiza a análise de distúrbio causados por fontes individuais. Quando da existência de várias fontes de distúrbio 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 - PLT [6].[10].

O índice de severidade de "Flicker" de longa a duração - PLT- mais utilizado, é derivado do parâmetro PST, a partir do cálculo da raiz cúbica dos valores de PST cúbicos, expresso pela equação 4.6.

$$PLT = \left(\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} (PST_i)^3 \right)^{1/3} \quad (4.6)$$

Conforme já citado, este método é empregado quando o distúrbio é provocado por várias fontes como máquinas de solda e motores; também, quando as fontes possuem longos e variáveis ciclos de carga, como por exemplo, os fornos a arco.

O tempo requerido para a quantificação do nível de "Flicker", segundo a avaliação pelo PLT, foi estipulado para cada 2 horas de operação de carga.

Quanto aos limites aceitáveis do Método Padrão UIE, as tabelas 4.5 e 4.6 apresentam os limites de severidade de "Flicker" (PST e PLT) global e por consumidor, propostos pela Comissão de Estudos de Cargas Especiais (CECE) do SCEL - GCOI, de modo a atender às recomendações da UIE [10].

O limite de severidade de "Flicker" global deve ser aplicado para se avaliar as flutuações de tensão em qualquer barra do sistema, causadas pela operação conjunta de todos os consumidores [24].

Já o limite por consumidor deve ser aplicado para se avaliar as flutuações de tensão provocadas por um único consumidor no ponto de entrega [24].

Os valores limites de PST e PLT foram obtidos através de ensaio de campo em que foram avaliadas as reações de consumidores expostos ao efeito "Flicker". Portanto, os níveis de severidade de "Flicker" indicados nas tabelas devem ser interpretados como índices de compatibilidade; isto significa que, na ocorrência de valores superiores aos recomendados, é provável que surjam reclamações dos consumidores.

LIMITE DE SEVERIDADE DE "FLICKER" - GLOBAL		
Tensão Nominal	PST	PLT
< 69 kV	1.0	0.8
≥ 69 kV	0.8	0.6

Tabela 4.5 - Limites de Severidade de "Flicker" Global

LIMITE DE SEVERIDADE DE "FLICKER" - POR CONSUMIDOR		
Tensão Nominal	PST	PLT
< 69 kV	0.6	0.5
≥ 69 kV	0.5	0.4

Tabela 4.6 - Limites de Severidade de "Flicker" por Consumidor

Os limites encontrados na tabela 4.6 foram determinados a partir dos valores globais de severidade de "Flicker", considerando-se um nível de saturação igual a 80% dos limites globais e admitindo-se a soma quadrática para os níveis de severidade de "Flicker" de duas fontes diferentes. Todavia, nos casos em que os níveis de severidade de "Flicker" preexistentes no ponto de entrega, forem superiores ao nível de saturação adotado, ou seja, 80% dos limites globais, os limites da tabela 4.6 não se aplicam e, dessa forma, fica a critério da concessionária o estabelecimento dos limites de severidade de "Flicker" por consumidor [24].



4.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a conceituação do efeito "Flicker", o princípio da modulação da tensão aplicada à quantificação do fenômeno, os limites de sensibilidade visual à cintilação luminosa e a influência da inércia térmica dos filamentos, no desempenho das lâmpadas incandescentes, frente às flutuações de tensão.

Na seqüência, efetuou-se uma descrição dos métodos de análise do efeito "Flicker" mais difundidos a nível internacional, destacando-se os Métodos Britânico, Francês e Padrão UIE.

Constatou-se que cada método apresenta um modo diferente de interpretar e quantificar o efeito "Flicker", a saber:

- O método Britânico foi desenvolvido para estabelecer limites máximos para as perturbações no sistema de energia elétrica, provenientes da operação de fornos a arco e é baseado numa metodologia estatística de análise.
- O método Francês é de aplicação mais ampla no que se refere às cargas perturbadoras e está baseado na metodologia de cálculo das doses unitárias (período de 1 minuto) e doses acumuladas (período de 15 minutos)
- O método Padrão é fruto de uma unificação, a nível mundial, proposta pela UIE, que reúne as principais vantagens oferecidas pelos métodos Britânico e Francês. Pode ser aplicado a qualquer ponto da rede elétrica, independente da carga perturbadora e da forma do distúrbio. O método propõe a avaliação da severidade do "Flicker" através dos índices PST(período de avaliação de 10 minutos) e PLT (período de avaliação de 2 horas).

ser menor ou igual a 0,25% da tensão tomada como referência, para 1% do tempo total de operação da carga nos sistemas que apresentam tensões menores ou iguais a 138 kV.

Para sistemas com tensão superior a 138 kV adotou-se limite mais rígido (0,20%), em função da possibilidade da existência de diversas fontes poluidoras, contribuindo para o aumento da intensidade do fenômeno nos sistemas de tensões superiores.

Com a curva FPCC, determina-se o "Gauge-Point Voltage", definido como sendo um ponto de avaliação onde a FPCC intercepta o nível de probabilidade ou porcentagem de tempo de 1% em que os valores de V_f são ultrapassados; esse ponto apresenta um valor de flutuação de tensão que corresponde ao " V_{fg} " da instalação, também chamado "Padrão de Variação da Tensão", ou ainda, "Ponto de Avaliação da Flutuação de Tensão".

A figura 4.8 mostra, a título de exemplo, uma curva FPCC que destaca para 1% de probabilidade ou porcentagem de tempo de violação dos valores de V_f , a magnitude correspondente da tensão de flutuação ou V_{fg} .

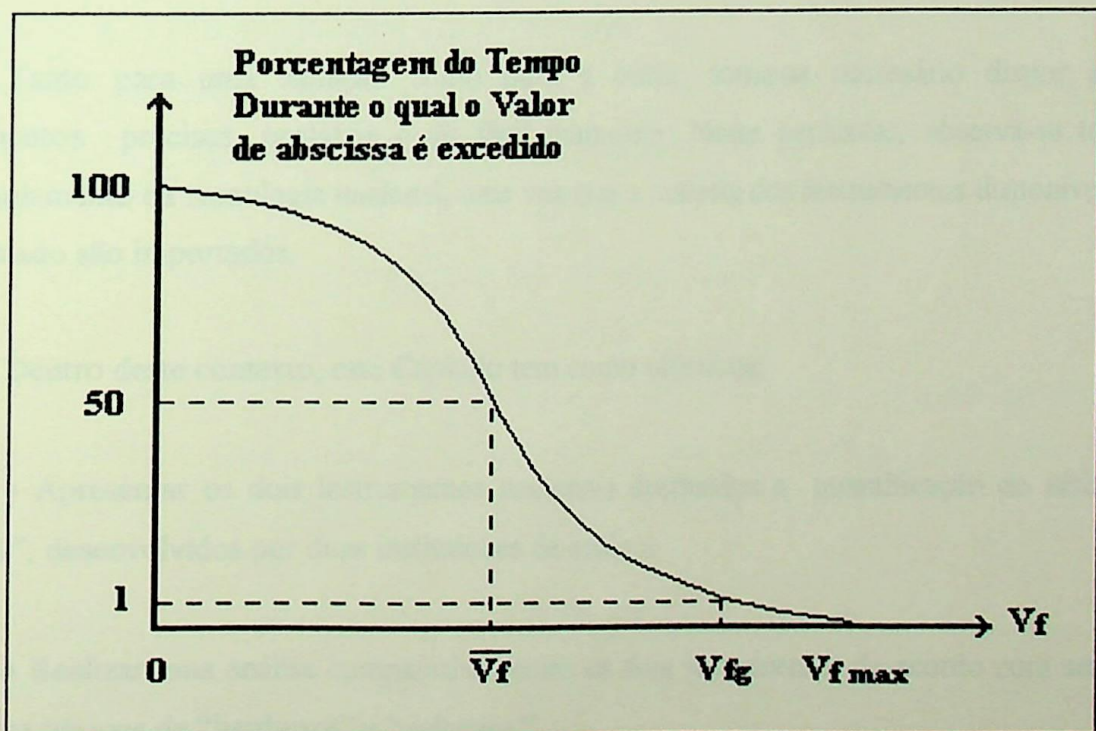


Figura 4.8 - Curva Função de Probabilidade Acumulativa Complementar (FPCC)

CAPÍTULO V

INSTRUMENTOS NACIONAIS DE MEDIÇÃO DE "FLICKER"

5.1 Considerações Iniciais

A realização de medições é uma atividade essencial para se determinar o nível de flutuação de tensão do sistema elétrico, devido à operação de cargas perturbadoras instaladas no sistema como um todo ou num determinado consumidor. Normalmente, as medições são conduzidas em duas frentes: a primeira, de caráter preventivo, tem como objetivo identificar problemas em potencial; a segunda, de caráter corretivo, está voltada para o atendimento de reclamações dos consumidores, onde a perturbação é quantificada para comparação com os limites recomendados e conseqüente adoção de medidas corretivas, quando necessário.

Tanto para uma situação como para a outra, torna-se necessário dispor de instrumentos precisos, portáteis e de fácil manuseio. Neste particular, observa-se um estrangulamento da tecnologia nacional, uma vez que a maioria dos instrumentos disponíveis no mercado são importados.

Dentro deste contexto, este Capítulo tem como objetivos:

- Apresentar os dois instrumentos nacionais destinados a quantificação do efeito "Flicker", desenvolvidos por duas instituições de ensino;
- Realizar uma análise comparativa entre os dois instrumentos de acordo com seus princípios básicos de "hardware" e "software".

5.2 Analisador de Cintilação-UNICAMP

Com base na metodologia proposta pela União Internacional de Eletrotermia-UIE [11], a UNICAMP desenvolveu, em 1988, um protótipo destinado à medição do efeito de cintilação luminosa [6] [28] [29], o qual tem sido utilizado atualmente por duas grandes concessionárias de energia elétrica no Brasil: a ELETROPAULO e a CEMIG [29] [30].

A seguir serão apresentadas as principais características do equipamento:

5.2.1 Estrutura Geral do Analisador de Cintilação- UNICAMP[6] [28] [29] [30]

As características funcionais do medidor foram subdivididas em cinco blocos, conforme figura 5.1, e de acordo com a proposta da UIE, contemplando as principais fases de processamento do sinal, a saber:

- Bloco 1- Adaptador de Sinal de Entrada e Circuito de Calibração;
- Bloco 2- Demodulador Quadrático;
- Bloco 3- Filtros passa-faixa e de Ponderação;
- Bloco 4- Quadrador e Filtro de Média;
- Bloco 5- Conversor Analógico/Digital e Análise Estatística.

O medidor pode ser subdividido em dois módulos funcionais:

- Unidade de processamento analógico de flutuação de tensão, onde são previstas todas as funções a nível analógico para tratamento do sinal medido. A unidade de processamento analógico corresponde aos Blocos de 1 a 4 da figura-5.1.

- Unidade de processamento digital das amostras de "Flicker", fase em que se previu desde a conversão A/D até o tratamento estatístico feito através de um microcomputador. Esta unidade corresponde ao Bloco 5 da figura-5.1.

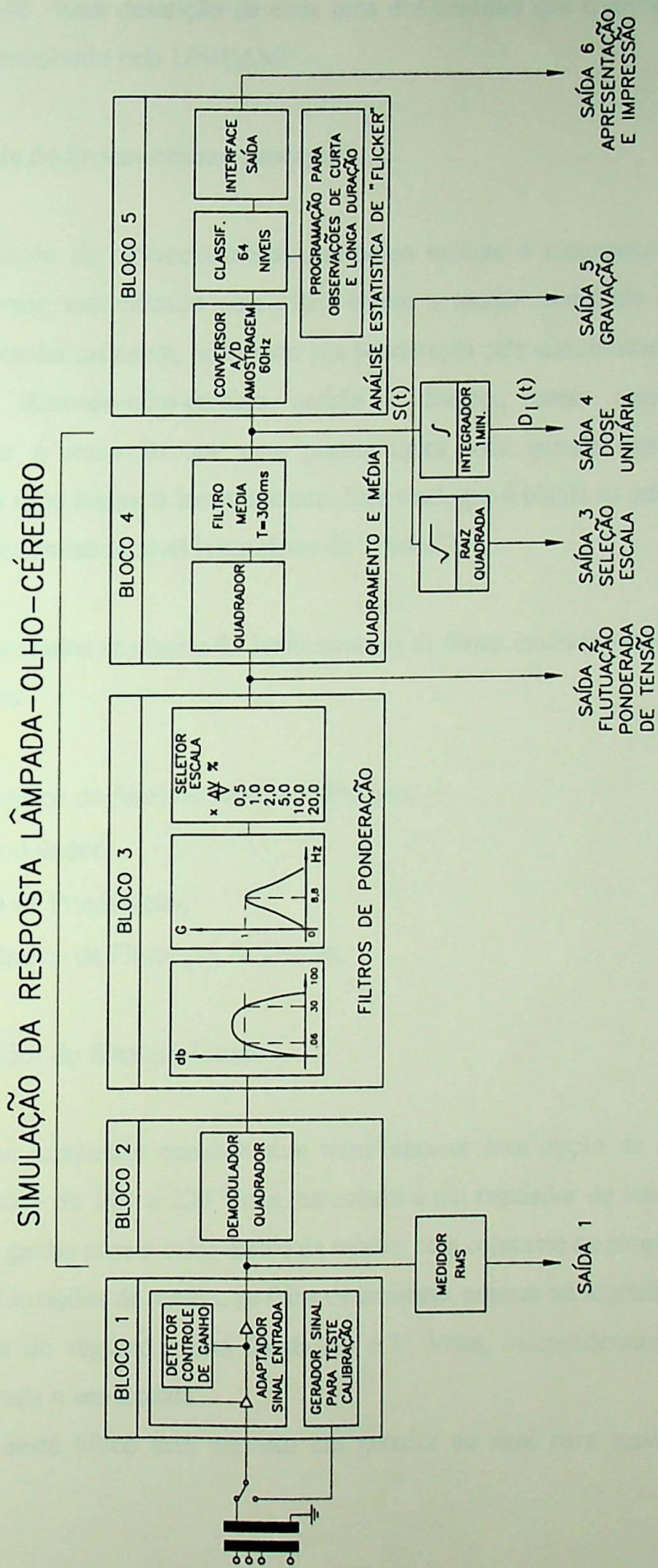


FIGURA 5.1 - ESQUEMA FUNCIONAL DO MEDIDOR UIE



Segue-se uma descrição de cada uma das unidades que compõe o analisador de cintilação desenvolvido pela UNICAMP.

5.2.2 Unidade de Processamento Analógico

A Unidade de Processamento Analógico executa o tratamento da tensão a ser medida conforme especificado pela UIE, obtém a tensão modulante representativa da flutuação de tensão existente, realizando sua ponderação pela característica de sensibilidade do conjunto lâmpada-olho-cérebro padrão e fornece, como resultado, um sinal correspondente à sensação que uma pessoa típica teria quando exposta à cintilação provocada por uma lâmpada incandescente. Este sinal, que é obtido na saída do Bloco 4 da figura-5.1, é denominado nível instantâneo de "Flicker".

O processador analógico foi implementado de forma modular sendo constituído das seguintes partes:

- Adaptador do Sinal de Tensão de Entrada;
- Demodulador;
- Filtro de Ponderação;
- Quadrador da Flutuação de Tensão;

5.2.2.1 Adaptador do Sinal de Tensão

O bloco adaptador consiste num transformador com opção de entrada direta de sinais nas tensões de 110 e 220 Vrms, associado a um regulador de tensão com controle automático de ganho para o valor médio da tensão, com constante de tempo de 1 minuto, de modo que as flutuações de tensão, na faixa de interesse, possam ser identificadas

A saída do regulador está fixada em 6,73 Vrms, independentemente do nível da tensão de entrada a ser medida.

Ainda neste bloco está previsto um gerador de sinal para teste e calibração do equipamento.

5.2.2.2 Demodulador

O sinal a ser processado pelo medidor de "Flicker" é a variação relativa da tensão de suprimento, que pode ser vista como uma modulação superposta a uma portadora de 60 Hz.

Como parte do tratamento do sinal, o medidor faz a demodulação da tensão variável de 60 Hz e restringe o sinal demodulado à faixa de percepção do fenômeno, ou seja, de 0,5 a 30 Hz, através de filtragem. Portanto, o nível CC e frequências superiores a 30 Hz são suprimidos por intermédio de filtros adequados.

O procedimento utilizado para executar a demodulação do sinal de entrada segue a recomendação da UIE, ou seja, demodulação através do quadramento do sinal por multiplicação analógica.

5.2.2.3 Filtro de Ponderação

Para levar em conta a seletividade do olho humano em relação à faixa de frequência das variações de tensão, utiliza-se um Filtro de Ponderação cuja função de transferência é padronizada pela UIE e que apresenta, como resposta, a curva mostrada na figura 4.9, Capítulo IV.

5.2.2.4 Quadrador da Flutuação de Tensão

O sinal demodulado, filtrado e ponderado, é quadrado através de um multiplicador analógico para produzir o valor de "Flicker" instantâneo.

5.2.2.5 Saídas analógicas

As saídas analógicas sugeridas pela UIE para aumentar a flexibilidade do medidor também são apresentadas na Figura-5.1, discriminando-se:

- Saída 1- Tensão Eficaz de Entrada;
- Saída 2- Flutuação de Tensão Ponderada pela Frequência;
- Saída 3- Valor Eficaz da Flutuação de Tensão Ponderada;
- Saída 4- Dose Unitária do Flicker;
- Saída 5- Flutuação Ponderada Quadrática Média, ou Nível Instantâneo de "Flicker".

Ressalta-se que a dose unitária é obtida através da integração analógica do sinal quadrático médio ou "Flicker" instantâneo, durante intervalos de 1 minuto.

5.2.3 Unidade de Processamento Digital

A unidade de processamento digital é composta por um conversor A/D, um microcomputador, vídeo, mini impressora e uma unidade de disco.

O conversor A/D recebe o sinal manipulado pela unidade analógica e converte-o em valores digitais que são armazenados na memória do computador, processados digitalmente para obter-se os valores finais de interesse, armazenados em disquete e apresentados na tela e em impressora.

O processamento do sinal e a forma utilizada na conversão A/D são realizados por um programa computacional, podendo-se optar pelo método das doses ou pelo método dos níveis.

O processador digital de "Flicker" é aplicado ao sinal de saída do Bloco 4 da figura-5.1 do processador analógico, que corresponde ao valor de "Flicker" instantâneo.

O equipamento não permite quantificar de forma simultânea o efeito de cintilação luminosa pelos Métodos Francês e Padrão.

Para o Método Francês ou das doses, o tempo de medição é escolhido pelo usuário entre 30 minutos e 4 horas contínuas, sendo que cada dose corresponde ao valor médio do

"Flicker" obtido em 1 minuto de amostragem na taxa de 300 amostras /segundo. Como saídas gráficas para este método de análise o equipamento oferece:

- Dose Unitária de "Flicker";
- Dose Acumulada de "Flicker";
- Curva FPC da Dose Unitária.

Já para o método dos níveis, o tempo de medição é delimitado entre 1 e 30 horas, a critério do operador, sendo que para cada 10 minutos são avaliados estatisticamente cerca de 60 mil valores de "Flicker", o que corresponde a uma taxa de amostragem de 100 amostras/ segundo.

Os resultados gráficos apresentados para o método Padrão são:

- Índice de Severidade da Curta Duração-PST
- Índice de Severidade de Longa Duração-PLT

A figura-5.2 apresenta o fluxograma descritivo do analisador de cintilação da UNICAMP.

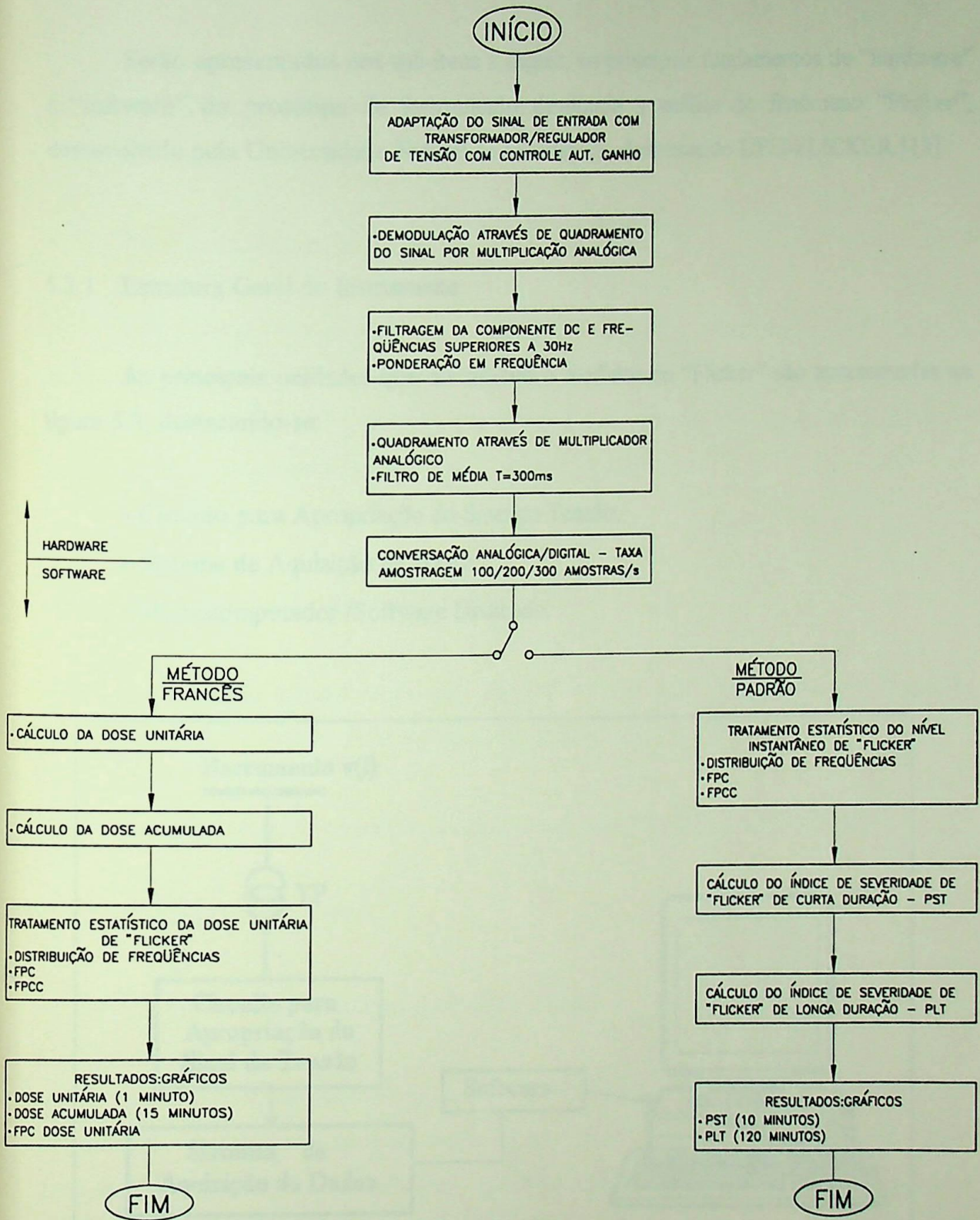


Figura-5.2 -Fluxograma Descritivo do Analisador de Cintilação da UNICAMP



5.3 Analisador de Cintilação-UFU [12] [13]

Serão apresentados nos sub-itens a seguir, os principais fundamentos de "hardware" e "software" do protótipo de instrumento destinado à análise do fenômeno "Flicker", desenvolvido pela Universidade Federal de Uberlândia, denominado UFU-FLICKER [13].

5.3.1 Estrutura Geral do Instrumento

As principais unidades que constituem o medidor de "Flicker" são apresentadas na figura 5.3, destacando-se:

- Circuito para Apropriação do Sinal de Tensão;
- Sistema de Aquisição de Dados;
- Microcomputador /Software Dedicado.

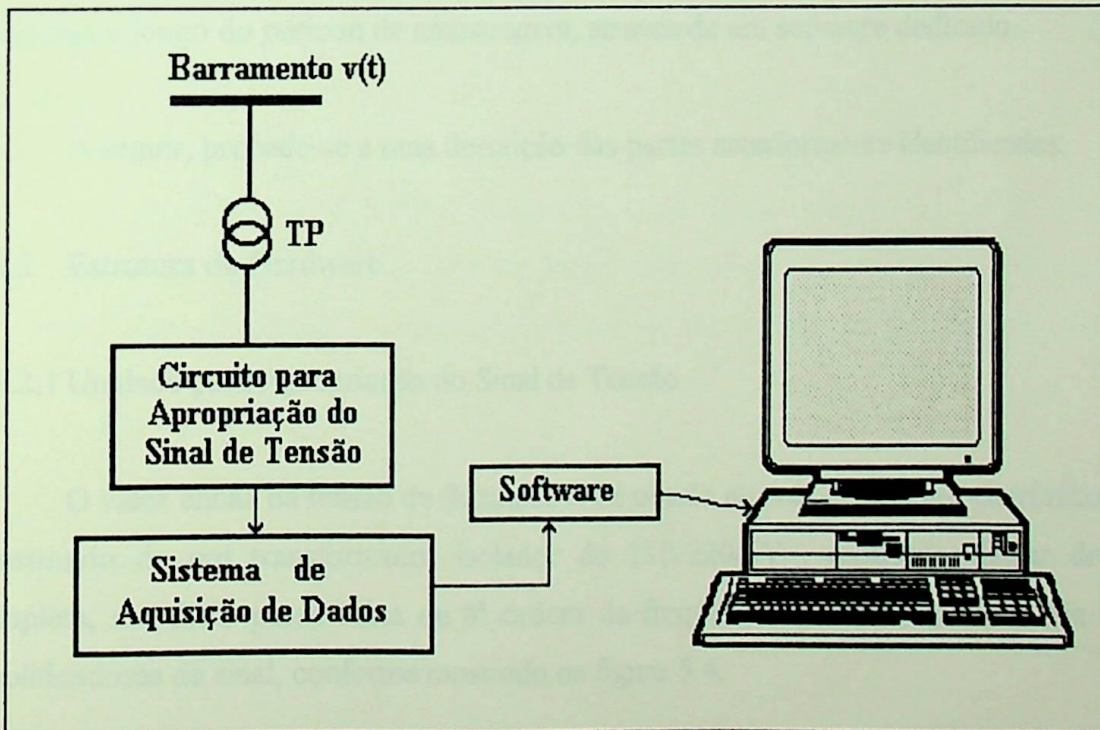


Figura 5.3 - Estrutura Física Geral do Medidor de "Flicker"

5.3.1.1 Circuito de Apropriação de Sinal

No circuito de apropriação de sinal estão inseridos os circuitos eletrônicos que têm, por função, obter o valor eficaz da tensão que será encaminhada ao sistema de aquisição de dados.

5.3.1.2 Sistema de Aquisição de Dados

Esta unidade tem por objetivo, digitalizar, armazenar e transferir o valor eficaz da tensão para cada ciclo da frequência de 60 Hz, para o microcomputador. Deve-se destacar que o procedimento de se armazenar o valor eficaz em lugar do valor instantâneo da tensão proporciona um aumento substancial no período de amostragem.

5.3.1.3 Microcomputador/Software Dedicado

Esta unidade quantifica o efeito "Flicker" a partir da informação do sinal de tensão recebida ao longo do período de amostragem, através de um software dedicado.

A seguir, procede-se a uma descrição das partes anteriormente identificadas:

5.3.2 Estrutura do Hardware

5.3.2.1 Unidade para Apropriação do Sinal de Tensão

O valor eficaz da tensão de flutuação V_f é obtido através do circuito eletrônico constituído de um transformador isolador de 110-220/6V, retificador linear de onda completa, um filtro passa-baixa de 8ª ordem de frequência de corte f_0 de 30 Hz e dois amplificadores de sinal, conforme mostrado na figura 5.4.

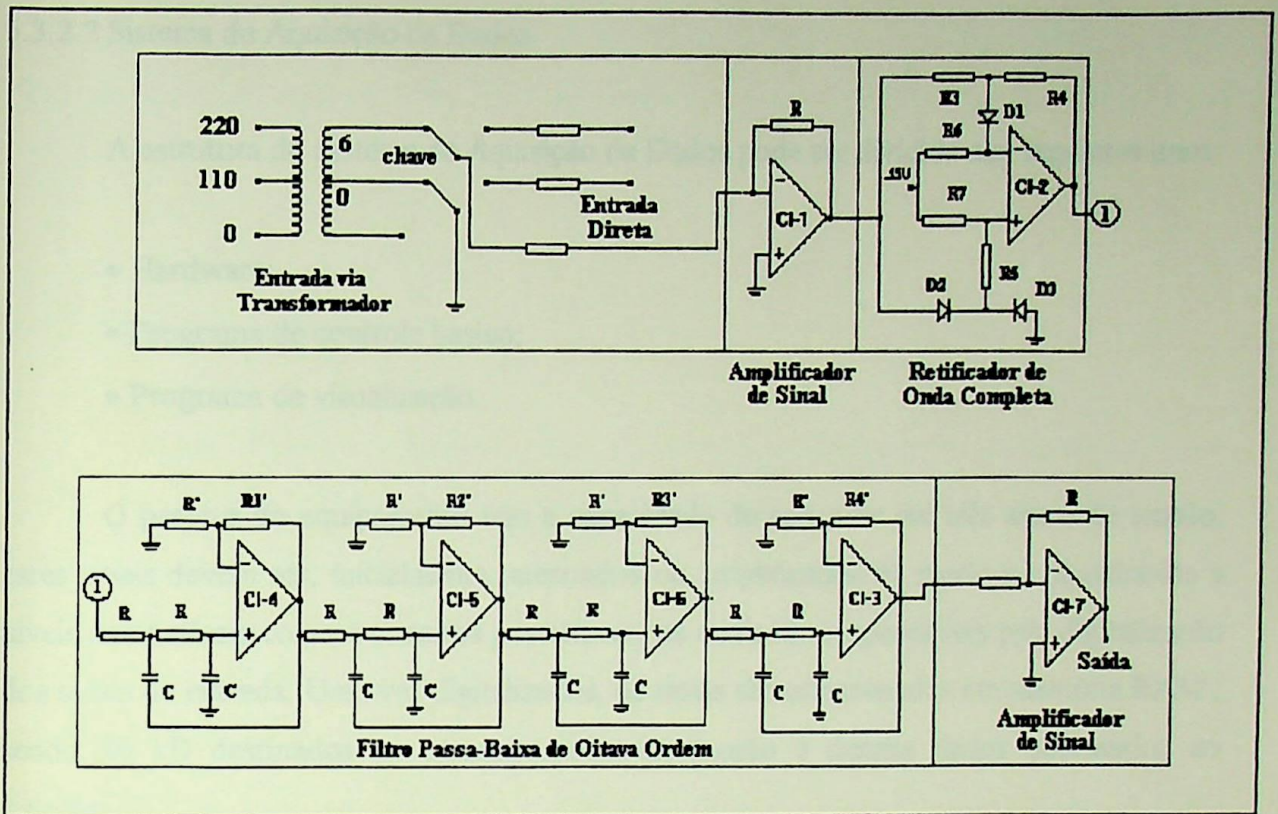


Figura 5.4 - Circuito de Apropriação do Sinal de Tensão

O retificador linear tem a função de fornecer um sinal retificado de onda completa proporcional ao valor do sinal de entrada, de forma que sua saída forneça o valor eficaz da tensão de flutuação V_f .

O sinal retificado é, então, filtrado por um Filtro Passa-baixa de 8ª ordem de frequência de corte f_0 de 30 Hz, de maneira que seu terminal apresente um sinal contínuo CC, porém com uma faixa de frequência limitada de 0 a 30 Hz que é a faixa de ocorrência do fenômeno "Flicker".

O instrumento também é provido de uma entrada direta que deve ser utilizada apenas para a amostragem de sinais isolados e de baixa amplitude, como por exemplo, aqueles oriundos de um gerador de funções para testes e ajustes

Após apropriado, o sinal de tensão está apto a ser armazenado pelo Sistema de Aquisição de Dados.

5.3.2.2 Sistema de Aquisição de Dados

A estrutura do Sistema de Aquisição de Dados pode ser dividida nos seguintes itens:

- Hardware;
- Programa de controle básico;
- Programa de visualização.

O projeto do equipamento tem a capacidade de amostrar até três sinais de tensão; estes sinais devem ser, inicialmente, atenuados ou amplificados de modo a enquadrá-los a níveis compatíveis com os circuitos posteriores, os quais são responsáveis pela digitalização dos sinais de entrada. Uma vez digitalizados, os sinais são armazenados em memória RAM, sendo 96 kB destinados ao armazenamento de tensão e demais dados necessários ao sistema.

Para a análise do "Flicker" são armazenados apenas um ponto por ciclo, correspondente ao valor eficaz da tensão.

O protótipo desenvolvido executa a aquisição de tensão em apenas uma fase do sistema, com capacidade máxima de tempo de amostragem de 27 minutos, devido à limitação atual da placa de aquisição de dados.

Após a amostragem, digitalização e armazenamento do sinal em memória RAM, ocorre a gravação de todos os pontos do sinal em disco magnético. A seqüência dos procedimentos referentes à inicialização das amostras até a gravação em disco magnético é gerenciada por um "software" específico.

Quanto ao Programa de Controle Básico, este é responsável pelo processo de digitalização dos sinais, atuando diretamente nos circuitos eletrônicos do Sistema de Aquisição de Dados obtendo, como resultado final, um arquivo contendo os dados provenientes da digitalização

Já o programa de visualização tem o objetivo de mostrar os sinais digitalizados pela placa de aquisição, através do monitor do microcomputador, de forma que o usuário possa analisar o comportamento dos sinais armazenados.

5.3.3 Estrutura do Software

A etapa subsequente à digitalização consiste no armazenamento e transferência dos dados para arquivos, no microcomputador; posteriormente, cabe a um programa computacional, a função de realizar a leitura dos dados, organizá-los e manipulá-los de forma a obter os resultados para fins de avaliação. Com esta finalidade utiliza-se um programa computacional destinado a quantificação dos níveis de "Flicker", segundo os métodos Britânico, Francês e Padrão. O programa foi desenvolvido em linguagem "C", designado "FLICKER", e oferece ao usuário instruções na forma de "janelas" que facilitam sua manipulação.

A estrutura geral do software pode ser compreendida através da seqüência de tarefas enumeradas a seguir :

5.3.3.1 Entrada de Dados

Os Dados de Entrada, necessários ao processamento do programa FLICKER, são os seguintes:

- Arquivo de Dados: O arquivo (binário) gerado pelo Sistema de Aquisição de Dados é passado como argumento para a execução do programa.
- Método de Análise: Britânico - Francês - Padrão UIE;
- Número de Fases: Monofásico - Trifásico;

Embora o programa FLICKER seja trifásico, o protótipo do instrumento só permite executar medições monofásicas, em função de restrições do Circuito de Apropriação do Sinal de Tensão, o qual constitui-se, atualmente, em unidade monofásica.

- Fase(s): $V_a - V_b - V_c$;

Este dado é lido no arquivo de dados. Caso o mesmo seja trifásico, o usuário poderá, se preferir, realizar uma análise monofásica.

- Tempo de Análise: O tempo total de análise também é obtido a partir do arquivo de dados e está limitado, atualmente, em 27 minutos.

- Obtenção do Sinal: Sistema de Aquisição de Dados ou Simulação através do "software" GERA.

Esta informação é automaticamente identificada de acordo com o arquivo de dados analisado.

- Entrada do Circuito de Apropriação do Sinal: 110 V - 220 V

Quando o arquivo é oriundo de uma simulação, esta opção é automaticamente desabilitada.

- Tensão Nominal: Fornecida pelo usuário.

- Tensão de Referência: Valor Médio (calculado pelo programa FLICKER) ou Valor fornecido pelo usuário;

- Relação de Transformação do TP: Fornecida pelo usuário.

5.3.3.2 Organização dos Dados

A primeira tarefa do "software" consiste na Organização dos Dados correspondentes ao oscilograma da envoltória da oscilação de tensão recebida do Sistema de Aquisição de Dados, tabulando- os na seqüência de chegada no tempo.

5.3.3.3 Obtenção do Sinal Modulador

As informações arquivadas, que correspondem a relação $V_f = \text{função (tempo)}$, devem ser apropriadas aos cálculos que se seguirão. Para tanto, torna-se necessário a obtenção da variação $\Delta V \%$, que é definida por :

$$\Delta V\% = \frac{V_f - V_{ref}}{V_{ref}} \cdot 100 \quad (5.1)$$

onde:

V_f - Valor eficaz da tensão amostrada para um determinado ciclo ;

V_{ref} - Valor eficaz da tensão de referência, definida pelo usuário.

Assim procedendo, obtém-se um novo arquivo de dados que relaciona $\Delta V\% = \text{função (tempo)}$.

Verifica-se, neste ponto, a importância da escolha pelo operador da tensão de referência que, conforme pode ser visualizado pela equação (5.1), define a amplitude relativa do sinal modulador, responsável pelo efeito "Flicker". Reconhecendo este fato, o protótipo desenvolvido calcula o valor médio do sinal de tensão no período aquisitado e deixa a critério do usuário a sua utilização como valor de referência.

5.3.3.4 Aplicação da Transformada Discreta de Fourier (DFT)

Aplicando-se a técnica conhecida por DFT ("Discret Fourier Transform") à função obtida, conforme item anterior, torna-se possível determinar o espectro de frequências e correspondentes amplitudes das tensões presentes na variação de tensão já normalizada. É conveniente ressaltar que a DFT é aplicada a cada intervalo de 1 segundo, de forma seqüencial, para todo o período de amostragem e, ao término dos cálculos, os resultados obtidos são empregados de acordo com as exigências de cada método de análise e quantificação do efeito "Flicker".

5.3.3.5 Escolha do Método de Análise

Estando as informações necessárias ao cálculo do "Flicker" armazenadas e preparadas, a próxima etapa consiste na definição do método a ser utilizado para a quantificação do efeito. O equipamento desenvolvido considera três hipóteses:

- Método Britânico

A partir dos resultados obtidos da DFT, procede-se o cálculo do valor eficaz da oscilação de tensão para cada "janela" de 1 segundo, considerando a componente contínua e as frequências de 1 a 25 Hz.

As variações de tensão expressas em valor eficaz são, então, ordenadas na forma crescente e classificadas em níveis ou classes de tensão.

Posteriormente, executa-se um tratamento estatístico da amostra, determina-se a distribuição de frequências e calcula-se a curva de frequência relativa acumulada (FPC) e a curva de frequência relativa acumulada complementar (FPCC).

Os pontos que formam as curvas FPC e FPCC estão associados aos pontos médios de suas respectivas classes ou níveis de tensão. Os pontos médios, por sua vez, são calculados simplesmente pela média aritmética do limite inferior e superior de cada classe.

A avaliação final do nível de "Flicker", segundo o Método Britânico, exige que a probabilidade ou porcentagem de tempo que uma determinada variação de tensão, não ultrapasse 1% do tempo total de análise. Esta probabilidade ou porcentagem de tempo é obtida por meio de uma interpolação linear da FPCC.

Os resultados gráficos apresentados são:

- Ocorrência percentual das variações de tensão (distribuição de frequências);
- Curva FPC;
- Curva FPCC.

- Método Francês

A partir dos resultados da DFT para a oscilação de tensão, a cada intervalo de 1 segundo, executa-se a ponderação das amplitudes em função da frequência, na faixa de 1 a 25 Hz, conforme figura 4.9, Capítulo IV, e obtém-se os níveis instantâneos de cintilação (a_{10}^2).

A tarefa subsequente consiste na determinação da Curva de Dose Unitária, ou seja, são somados para cada período de 1 minuto, os valores dos níveis instantâneos de cintilação.

De posse dos dados provenientes da Curva de Dose Unitária calcula-se a Curva de Dose Acumulada. Esta curva é determinada pelo valor acumulado da dose unitária ao final de 15 minutos de análise.

Os resultados gráficos apresentados são:

- Dose Unitária de "Flicker";
- Dose Acumulada de "Flicker";
- Curva de evolução da dose acumulada de "Flicker".

- Método Padrão - UIE

Uma vez obtidos os resultados fornecidos pela DFT, determina-se o nível instantâneo de cintilação (a_{10}^2). Vale lembrar que o cálculo deste nível requer a ponderação das amplitudes de flutuação (sinal modulador), de acordo com a frequência. Na seqüência, é realizado o tratamento estatístico do referido nível, a fim de se obter as curvas de distribuição de frequências. Observa-se que, nesta etapa, reúnem-se procedimentos dos Métodos Francês e Britânico, evidentemente, com as devidas adaptações.

A partir da Curva de Frequência Relativa Acumulada Complementar (FPCC), são obtidos os valores correspondentes aos cinco níveis probabilísticos que definem o cálculo do PST, devidamente ponderados, conforme a equação 4.5. Este procedimento é repetido para cada minuto do sinal amostrado. De posse destes valores obtém-se, para cada 15 minutos de análise, o correspondente PLT.

É importante destacar que o método utilizado no cálculo do PLT envolve avaliações ponderadas em virtude do tempo, isto é, caso o período de amostragem seja inferior a 15 minutos, automaticamente a rotina computacional adapta-se ao tempo disponível. Este fato acontece, por exemplo, nos arquivos gerados pelo Sistema de Aquisição de Dados, que possuem um período total de amostragem de 27 minutos. No cálculo do PLT são utilizados os primeiros 15 minutos e os 12 minutos subsequentes; entretanto, não há necessidade de se efetuar qualquer correção para o último intervalo, diferentemente do cálculo da dose Acumulada (Método Francês) que estabelece um somatório simples.

As saídas gráficas oferecidas pelo programa são:

- Índice de Severidade de "Flicker" de curta duração-PST (Global e por Consumidor)
- Índice de Severidade de "Flicker" de longa duração-PLT(Global e por Consumidor)

A figura 5.5 apresenta o fluxograma descritivo do analisador de cintilação desenvolvido pela UFU.



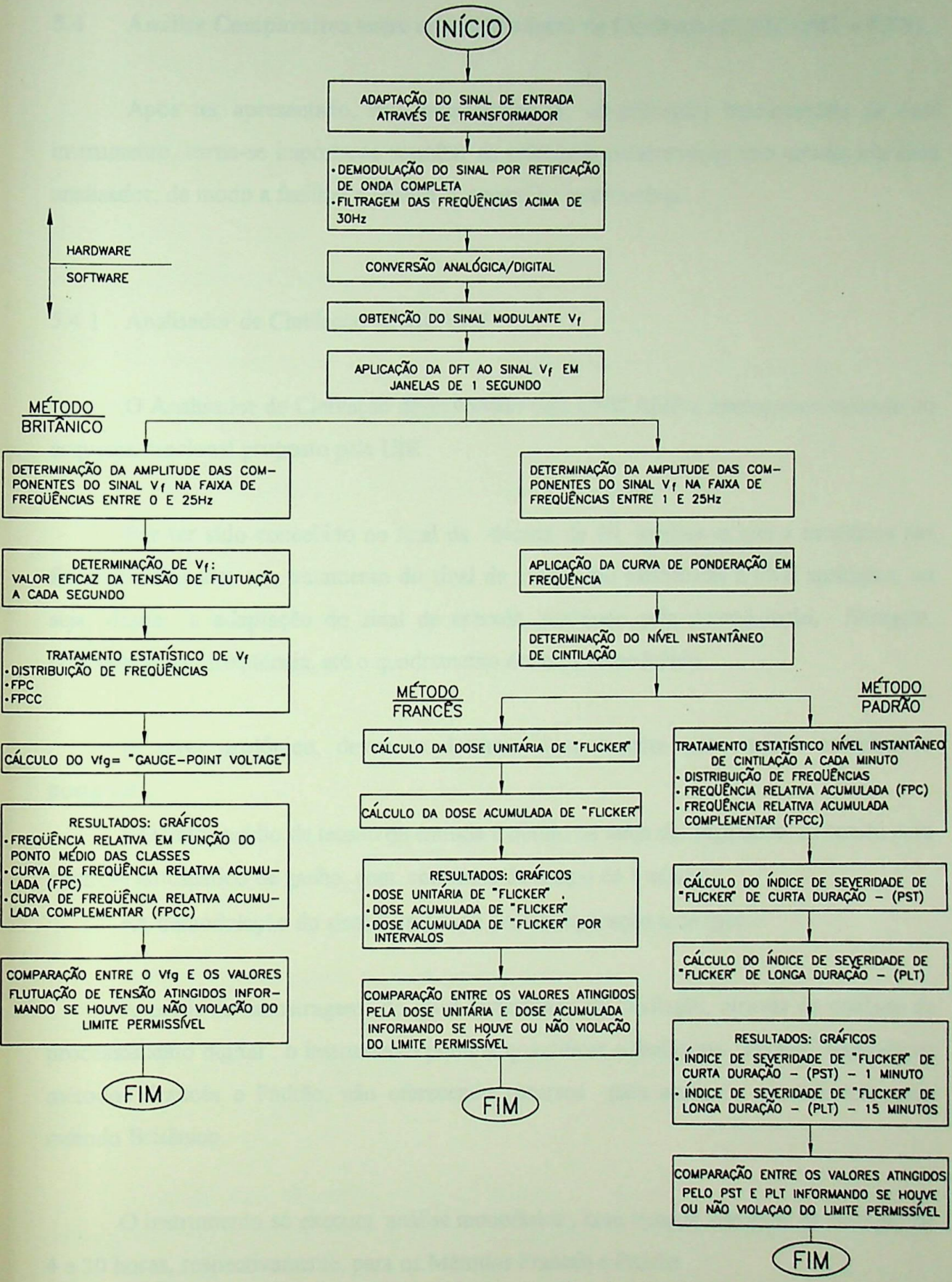


Figura-5.5 - Fluxograma Descritivo do Analisador de Cintilação da UFU

5.4 Análise Comparativa entre os Analisadores de Cintilação (UNICAMP e UFU)

Após ter apresentado, nos itens anteriores, os princípios fundamentais de cada instrumento, torna-se importante ressaltar as principais características encontradas em cada analisador, de modo a facilitar a análise comparativa entre ambos.

5.4.1 Analisador de Cintilação -UNICAMP

O Analisador de Cintilação desenvolvido pela UNICAMP é inteiramente baseado no esquema funcional proposto pela UIE .

Por ter sido concebido no final da década de 80, verifica-se que a totalidade das funções destinadas ao tratamento do sinal de tensão são executadas a nível analógico, ou seja, desde a adaptação do sinal de entrada, passando pela demodulação, filtragem, ponderação em frequência, até o quadramento do sinal demodulado.

A nível analógico, devem-se destacar duas funções para análise comparativa posterior:

- O valor médio de tensão de entrada é obtido da saída do regulador de tensão com controle automático de ganho, com constante de tempo de 1 minuto;
- A demodulação do sinal é realizada por multiplicação analógica.

A partir da amostragem do nível instantâneo de cintilação, através da unidade de processamento digital , o instrumento permite quantificar o fenômeno "Flicker" segundo os métodos Francês e Padrão, não oferecendo recursos para análise e quantificação pelo método Britânico.

O instrumento só executa análise monofásica , com tempos máximos de medição de 4 e 30 horas, respectivamente, para os Métodos Francês e Padrão.

O equipamento não permite a análise de uma mesma amostragem de sinal pelos métodos das doses e dos níveis, ou seja, no início da medição o usuário deve optar por um dos métodos (Francês ou Padrão). Este fato constitui-se em uma das limitações do instrumento.

5.4.2 Analisador de Cintilação-UFU

Por ter sido concebido recentemente, a maioria das funções destinadas ao tratamento do sinal são desenvolvidas utilizando-se modernas técnicas digitais.

A nível analógico, estão previstas as seguintes funções:

- Adaptação do Sinal de Entrada ;
- Demodulação do Sinal através de Retificação de Onda Completa;
- Filtragem das Freqüências Superiores a 30 Hz.

A nível digital, são realizadas as seguintes etapas:

- Obtenção do Sinal Modulante, com opção de se utilizar o valor médio da tensão para o período total de medição;
- Aplicação da DFT ao sinal modulante em janelas de 1 segundo;
- Aplicação da Curva de Ponderação em Freqüência para os Métodos Francês e Padrão;
- Demais cálculos necessários à quantificação do efeito "Flicker" pelos métodos Britânico, Francês e Padrão.

A versão atual do equipamento só permite a análise monofásica, com tempo de medição máximo de 27 minutos, em função da limitação da placa do sistema de aquisição de dados.

O instrumento permite, para uma mesma amostragem de sinal, a quantificação do efeito "Flicker" pelos três métodos de análise citados, o que se constitui em uma das principais características do equipamento por possibilitar a confrontação mútua dos resultados.

Em relação ao que está estabelecido nas três metodologias descritas no Capítulo IV constata-se as seguintes divergências:

- O Método Britânico determina que seja calculado o valor eficaz do sinal modulador a cada intervalo de 1 minuto. Já o protótipo calcula o valor eficaz em intervalos de 1 segundo.

- O Método Francês define que seja executada a ponderação pela frequência na faixa de 0,5 a 25 Hz sendo que o UFUFLICKER considera as frequências de 1 a 25 Hz.

- O Método Padrão recomenda que o índice PST deve ser calculado a cada intervalo de 10 minutos e o UFUFLICKER calcula a cada intervalo de 1 minuto. Com relação ao índice PLT, a UIE sugere intervalos de 2 horas, ou melhor, 120 minutos, e o protótipo calcula em intervalos de 15 minutos. Portanto, espera-se que os resultados oferecidos pelo UFUFLICKER sejam mais penalizadores, uma vez que as variações de tensão de grande amplitude, porém esporádicas, serão mais valorizadas nos intervalos de 1 minuto do que nos intervalos de 10 minutos para o indicador PST. Análise semelhante pode ser executada para o PLT uma vez que é calculado a partir do PST.

5.4.3 Análise Comparativa entre os Analisadores de Cintilação

A tabela-5.1 sintetiza as principais diferenças encontradas nos dois instrumentos para as principais fases de processamento do sinal.

Fases de processamento do sinal	Analizador de cintilação UNICAMP	Analizador de cintilação UFU
Adaptação do sinal de entrada	Transformador/regulador com CAG	Transformador isolador
Demodulação	Multiplicação analógica	Retificação de onda completa
Filtragem de componentes acima de 30 Hz	sim	sim
Filtragem da componente DC	sim	não
Ponderação em frequência	sim -hardware	sim-software
Quadramento da flutuação de tensão ponderada em freq.	sim-hardware	sim-software
Conversão A/D	Amostragem do sinal instantâneo de "Flicker"	Amostragem do valor eficaz da tensão a cada ciclo
Obtenção do sinal de referência	Hardware-Regulador de tensão com CAG com constante de tempo de 1 m	Software-Qualquer valor de ref. a critério do usuário, inclusive o valor médio
Aplicação da DFT	não	sim
Avaliação Método Britânico	não	sim
Avaliação Método Francês	sim-com tratamento estatístico da dose unitária	sim, porém sem tratamento estatístico da dose unitária
Avaliação Método Padrão	PST-10 minutos PLT-120 minutos	PST-1 minuto PLT-15 minutos
Tempo de medição	Método Francês- 4hs Método Padrão- 30 hs	Todos os métodos: 27 minutos
Análise de uma mesma medição pelos 3 métodos	não	sim
Análise trifásica	não	não- limitação do hardware

Tabela-5.1 - Comparação entre os Analisadores UNICAMP e UFU

5.4.4 Sugestões para melhoria do UFUFLICKER

Com base nas análises desenvolvidas nos itens precedentes, são feitas as seguintes sugestões para melhoria do UFUFLICKER:

- Implementar no software o cálculo do valor médio da tensão a cada intervalo de 1 minuto e deixar a cargo do usuário a sua utilização ou não. A expectativa é que a utilização do valor médio da tensão para todo o período de amostragem, como é feito atualmente, poderá comprometer os resultados.
- Implementar análise estatística para as doses unitárias de "Flicker" com opção de saída gráfica para a distribuição de frequência, curvas FPC e FPCC.
- Aumentar a capacidade da placa do sistema de aquisição de dados para permitir medições prolongadas para o mínimo de 2 horas, que é o tempo requerido para obtenção do PLT, segundo o método Padrão. O ideal é que as medições sejam realizadas durante 1 semana, continuamente, conforme está sendo sugerido pela normalização Européia [1].
- Modificar o software para calcular o PST para intervalos de 10 minutos e o PLT para 120 minutos.

5.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os princípios básicos de funcionamento, tanto a nível de hardware como software, dos analisadores de cintilação desenvolvidos por duas grandes instituições de ensino e pesquisa no Brasil, a UNICAMP e a UFU.

Constatou-se que o equipamento da UNICAMP, executa, a nível analógico, a totalidade das funções destinadas ao tratamento do sinal de tensão. Para quantificação do efeito "Flicker", o instrumento oferece os métodos Francês e Padrão.

Já o equipamento desenvolvido pela UFU, ainda a nível de protótipo, apresenta a maioria das funções utilizando modernas técnicas digitais de processamento de sinal. O equipamento possibilita a análise do "Flicker" pelos métodos Britânico, Francês e Padrão.

Constatou-se que o UFUFLICKER apresenta algumas divergências em relação à metodologia original proposta pelos três métodos enfocados no Capítulo IV. Como solução para estas divergências apresentou-se um conjunto de sugestões para melhorias.

Este capítulo representa substancial contribuição ao assunto principal desta dissertação, por ter apresentado e comparado os dois instrumentos desenvolvidos no Brasil para medição de "Flicker", num momento em que se rediscute o padrão mínimo desejado de qualidade de suprimento elétrico.

CAPÍTULO VI

APLICAÇÃO DE CRITÉRIOS E UM EXEMPLO DE MEDIÇÃO

6.1 Considerações Iniciais

No Capítulo IV foram apresentados e entendidos os princípios associados aos diferentes métodos difundidos, internacionalmente, para a quantificação e a análise do fenômeno “Flicker”.

No Capítulo V foram postos em evidência os dois instrumentos de medição de “Flicker” desenvolvidos por duas instituições de ensino e pesquisa no Brasil.

Dando prosseguimento ao trabalho, o presente Capítulo tem como objetivos:

- Realizar um histórico dos limites aplicados, nos últimos onze anos, no Brasil, para os distúrbios de flutuação de tensão;
- Apresentar os resultados de um conjunto de medições de “Flicker” realizadas numa unidade industrial, utilizando-se o equipamento desenvolvido pela UFU;
- Realizar análise comparativa dos resultados obtidos à luz das três diferentes metodologias aplicadas.

6.2 Aplicação de Critérios

6.2.1 Histórico

Historicamente, no Brasil, podem-se destacar três fases distintas de aplicação de limites para flutuações de tensão:

6.2.1.1 Período de 1984 a 1989

Distinguiram-se dois tipos de flutuação de tensão: a primeira, associada à operação de fornos a arco e a segunda devido à operação de outras cargas, tais como: laminadores, máquinas de solda, partida de motores, etc...[31].

Os limites estabelecidos foram:

- Flutuações de Tensão causadas pela operação de fornos a arco.

Os limites são aqueles definidos pelo método Britânico, conforme tabela 6.1 e já amplamente discutidos no Capítulo IV.

LIMITES ACEITÁVEIS DO MÉTODO BRITÂNICO		
Tensão Nominal	Queda de Tensão	"Gauge-Point Voltage"
≤ 138 kV	≤ 2 %	≤ 0.25 %
> 138 kV	≤ 1.6 %	≤ 0.20 %

Tabela 6.1 - Limites Aceitáveis do Método Britânico

- Flutuações causadas pela operação de outras cargas

Para flutuações de tensão com frequência menor ou igual a 100 variações por minuto ($f < 1,67$ Hz), determinou-se a utilização da equação 6.1.

$$\Delta V = \frac{15}{3 + \sqrt{f}} \quad (6.1)$$

onde:

- $\Delta V\%$ -Variação da tensão admissível em % da tensão nominal de fornecimento, limitado a 5 %;
- f - Número de variações na tensão, causadas pelo consumidor, por minuto.

Para determinação do valor de f , deve ser considerado que um ciclo completo da envoltória que expressa a variação ocasionada na tensão compreende duas variações na tensão: uma corresponde à queda e a outra à elevação [31].

Para flutuações de tensão com frequência superior a 100 variações por minuto ($f > 1,67$ Hz) deve prevalecer o critério do método Britânico.

6.2.1.2 Período de 1989 a 1993

Os conceitos de variações de tensão aleatórias, repetitivas e esporádicas foram introduzidos utilizando-se os seguintes limites [18]:

- Variações Aleatórias de Tensão ($f > 1$ Hz)

Foram estabelecidos como limites, os critérios adotados pelo método Francês, de acordo com a tabela 6.2.

LIMITES DO MÉTODO FRANCÊS	
Dose Unitária (1 minuto)	Dose Acumulada (15 minutos)
$\leq 0.09 (\%)^2 \times \text{min.}$	$\leq 1.35 (\%)^2 \times \text{min.}$

Tabela 6.2 - Limites Aceitáveis do Método Francês

- Variações Repetitivas de Tensão ($0,000278 < f \leq 1 \text{ Hz}$)

As Variações Repetitivas de tensão foram limitadas em amplitude, em função da frequência de ocorrência da variação da tensão, conforme expressão 6.2.

$$\Delta V < A f^B \quad (6.2)$$

onde:

- $A = 1,6 \%$
- $B = - 0,28$
- f - Frequência de ocorrência em variações por minuto

- Variações Esporádicas de Tensão ($f \leq 0,000278 \text{ 1Hz}$)

Foram limitadas em 5% da tensão nominal no ponto de entrega.

6.2.1.3 A partir de 1993

Definiram-se duas classes de variação de tensão em função da frequência [24]:

- Frequência superior ou igual a 9 variações/ hora ($f \geq 0,0025$ Hz)

Nesta faixa de frequência devem ser aplicados os limites definidos pelo método Padrão, conforme tabelas 6.3 e 6.4, independentemente da fonte causadora das flutuações de tensão.

LIMITE DE SEVERIDADE DE "FLICKER" - GLOBAL		
Tensão Nominal	PST	PLT
< 69 kV	1.0	0.8
≥ 69 kV	0.8	0.6

Tabela 6.3 - Limites de Severidade de "Flicker" Global

LIMITE DE SEVERIDADE DE "FLICKER" - POR CONSUMIDOR		
Tensão Nominal	PST	PLT
< 69 kV	0.6	0.5
≥ 69 kV	0.5	0.4

Tabela 6.4 - Limites de Severidade de "Flicker" por Consumidor

- Frequência abaixo de 9 variações/hora ($f < 0,0025$ Hz)

Deverá ser respeitado o limite de variação de tensão de 5%, tradicionalmente adotado no Sistema Elétrico Brasileiro. Este limite não está relacionado ao efeito "Flicker" e sim à necessidade de se evitarem tensões excessivamente baixas no sistema [24].

6.2.2 Locais de avaliação segundo o Método Padrão [24]

6.2.2.1 Limites Globais

São aplicados em qualquer barra do sistema da concessionária. Consideram os valores máximos estabelecidos para a severidade de “Flicker” associados às flutuações de tensão causadas pela operação conjunta de todos os consumidores [24].

6.2.2.2 Limites por Consumidor

Normalmente são avaliados no ponto de entrega que é o ponto de conexão entre o sistema elétrico da concessionária e a instalação do consumidor. Consideram os valores máximos de severidade de “Flicker” associados às flutuações de tensão provocadas por um único consumidor [24].

6.2.3 Responsabilidades [24]

O controle das flutuações de tensão nos sistemas elétricos é de interesse de todas as partes envolvidas: as concessionárias, os consumidores com cargas especiais, os consumidores em geral, os fabricantes dos equipamentos causadores das flutuações de tensão e os fabricantes de equipamentos sensíveis a elas.

Para permitir uma convivência harmoniosa entre equipamentos causadores e equipamentos susceptíveis às flutuações de tensão, é necessário que seja convencionado um nível de compatibilidade e que sejam definidas as responsabilidades das partes envolvidas.

- Concessionárias de Energia: Monitorar e garantir que as flutuações de tensão do sistema atendam aos níveis de compatibilidade estabelecidos, seja arcando com medidas mitigadoras ou exigindo que os consumidores de cargas especiais instalem equipamentos de compensação;

- Consumidores de Cargas Especiais: Atender aos critérios aplicados pelas concessionárias, projetar e instalar equipamentos de compensação, caso necessário;
- Fabricantes em geral: Desenvolver equipamentos de forma coerente com o nível de compatibilidade convencionado, sejam os equipamentos geradores das flutuações de tensão ou os equipamentos susceptíveis a elas;
- Consumidores em geral: Auxiliar a concessionária no controle das perturbações, informando e reclamando sobre a ocorrência das mesmas.

6.2.4 Tolerância e flexibilidade [24]

Os limites de severidade de "Flicker", por consumidor, podem ser violados em alguns casos, a critério da concessionária, com base em uma análise técnico-econômica.

A violação dos limites globais de severidade de "Flicker" só deve ser aceita em caráter temporário e em casos excepcionais, como; indisponibilidade de equipamentos de compensação ou contingências.

Por outro lado, nos casos em que os níveis de severidade de "Flicker" pré-existent no ponto de entrega, verificados através de medições, forem superiores a 80% dos limites globais, limites de severidade de "Flicker", por consumidor, inferiores aos valores expressos na tabela 6.4, poderão ser estabelecidos pela concessionária.



6.3 Um Exemplo de Medição

Este item tem como objetivo apresentar os resultados de um conjunto de medições efetuadas em um sistema elétrico real, utilizando-se o instrumento desenvolvido pela UFU, para que, posteriormente, seja executada uma análise comparativa entre os resultados obtidos de acordo com cada método.

As medições foram realizadas numa indústria siderúrgica típica, onde se encontram instalados fornos a arco de grande capacidade, laminadores e demais cargas frequentemente encontradas numa instalação industrial.

As medições foram conduzidas de modo a monitorar as condições reais encontradas durante a operação normal da instalação, ou seja, contemplando situações em que as cargas perturbadoras se encontravam paradas, em início de operação e em operação a plena carga.

6.3.1 Características do Sistema Consumidor

Conforme já citado, as medições foram realizadas numa indústria siderúrgica, de grande porte, cujo diagrama unifilar é apresentado na figura 6.1

Características principais da planta industrial:

- Tensão de recebimento da concessionária: 230 kV
- Tensão de distribuição primária interna: 13,8 kV
- Potência dos transformadores principais: 3 unidades de 20/25 MVA- 230/13,8 kV, sendo que dois transformadores alimentam os fornos a arco e o terceiro o complexo de laminação e as demais cargas.
- Potência dos fornos a arco:
 - Forno-A :24/30 MVA
 - Forno-B :12,5/16MVA

• Forno-C :32/38 MVA

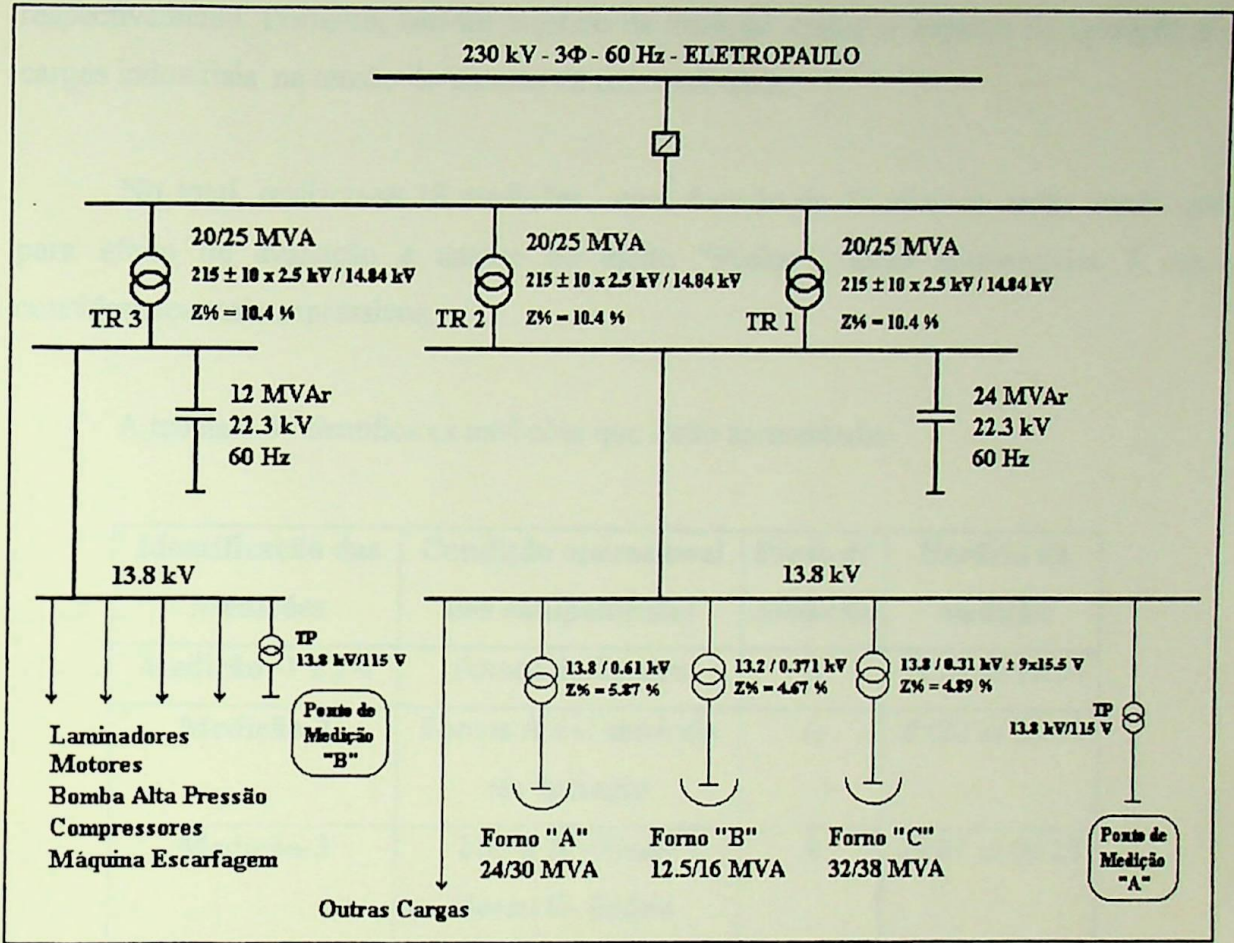


Figura 6.1 - Diagrama Unifilar Simplificado e Apresentação dos Pontos de Medição

Em função da alta demanda dos fornos, a empresa utiliza como, critério operacional, a operação simultânea de apenas dois fornos. A operação conjunta dos três fornos só é permitida se somente um forno estiver no período de fusão e os outros dois na fase de refino ou oxidação.

6.3.2 Medições Realizadas

As medições foram realizadas a nível de 13,8 kV nos pontos identificados como A e B no diagrama da figura 6.1. Os sinais de tensão foram obtidos a partir do secundário dos transformadores de potencial de 13,8/0,115 kV existentes.

A escolha dos pontos A e B teve como objetivo monitorar as flutuações de tensão internas da indústria, causadas pela operação dos fornos a arco e laminadores, respectivamente. Portanto, não foi objetivo da medição avaliar o impacto da operação das cargas industriais na tensão do sistema da concessionária.

No total, realizou-se 18 medições, com duração de 27 minutos cada, sendo que, para efeito de avaliação e análise do efeito "Flicker", serão apresentados 5 casos considerados mais expressivos.

A tabela 6.5 identifica as medições que serão apresentadas.

Identificação das Medições	Condição operacional dos equipamentos	Ponto de Medição	Horário da medição
Medição -1 e 1A	Fornos desligados	A	19:27 às 19:54
Medição-2	Fornos A e C entrando em operação	A	20:22 às 20:49
Medição-3	Forno A - Fusão Forno C- Refino	A	09:01 às 09:28
Medição-4	Forno A - Refino Forno C-Oxidação	A	21:32 às 21:59
Medição-5	Laminador em operação	B	16:40 às 17:07

Tabela- 6.5- Identificação das medições

6.3.2.1 Medição-1

a-Condição operacional: Fornos a arco desligados

b-Comentário: Utilizou-se no processamento o valor nominal da tensão da barra, ou seja, 13,8 kV.

c-Resultados: Conforme as figuras 6.2.1 a 6.2.8

d-Análises:

- Muito embora o sistema estivesse operando sem carga, verifica-se que há superação dos limites estabelecidos pelos métodos Britânico e Francês sendo que, para este último, em menor escala;

- As variações de tensão verificadas segundo o método Britânico estão no intervalo compreendido entre de 5,32 e 7,48 %, e com valor médio de 6,8 %, portanto, bem superior ao valor admissível pelo método que é de 0,25 %;

- Os limites definidos pelo Método Padrão não foram excedidos.

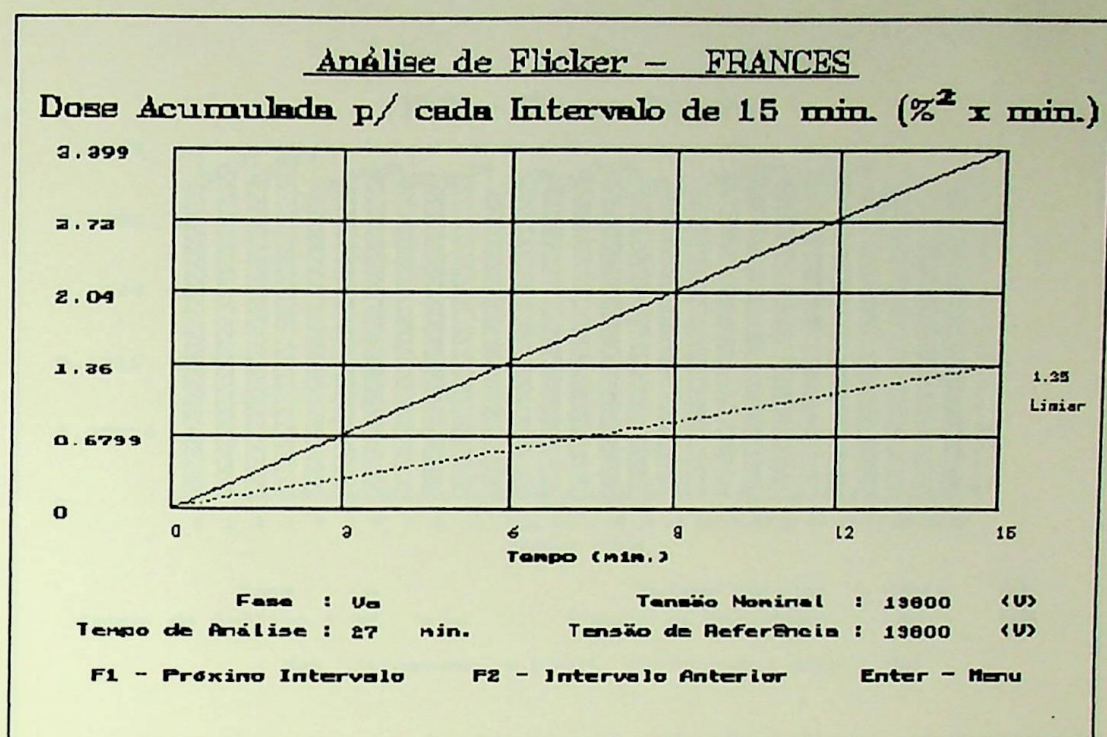


Figura-6.2.5

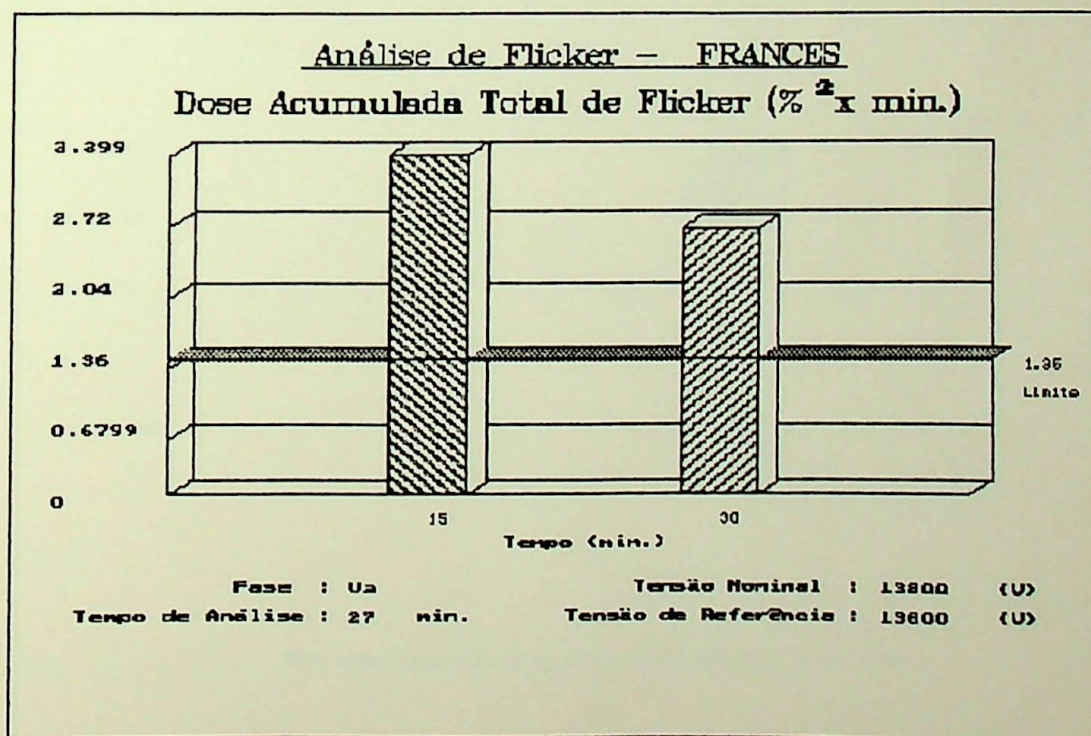


Figura-6.2.6

6.3.2.2 Medição-1A

a-Condição Operacional: Fornos a arco desligados.

b-Comentário: Utilizou-se no processamento o valor eficaz médio da tensão calculado pelo instrumento , ou seja, 14,72 kV.

c-Resultados: Conforme as figuras 6.3.1 a 6.3.8.

d-Análises:

- Após a utilização do valor eficaz médio da tensão como valor de referência, observa-se que as variações de tensão reduzem-se, substancialmente, em relação aos resultados apresentados na Medição-1. Esta afirmativa pode ser comprovada consultando-se os novos resultados obtidos, onde se verifica que o valor médio da variação da tensão sofre redução de 6,8% para 0,80 %. Este fato mostra a importância da escolha correta da tensão de referência para execução das avaliações e análises;

- Embora o sistema continue reprovado de acordo com o Método Britânico, comprova-se que este método considera os deslocamentos contínuos da tensão para a quantificação do efeito “Flicker”;

- Verifica-se que o deslocamento citado não interfere, significativamente, nos resultados decorrentes das análises pelos outros métodos, seja o Francês ou o Padrão;

- Independente da tensão de referência adotada para a medição 1 ou 1A, o sistema continua reprovado pelo método Francês;

- Pelo método Padrão as variações de tensão se mantêm dentro dos valores admissíveis;

- Pelo que foi exposto anteriormente, será utilizado, para as medições que se seguem, o valor médio da tensão calculado pelo UFUFLICKER.

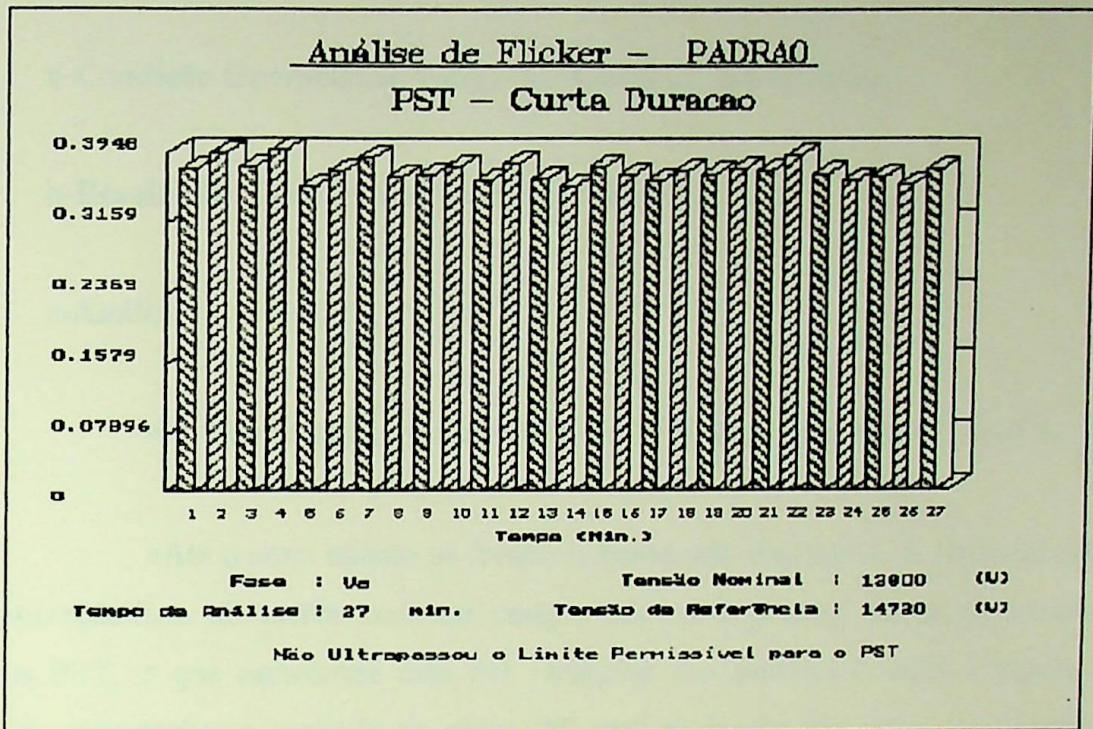


Figura-6.3.7

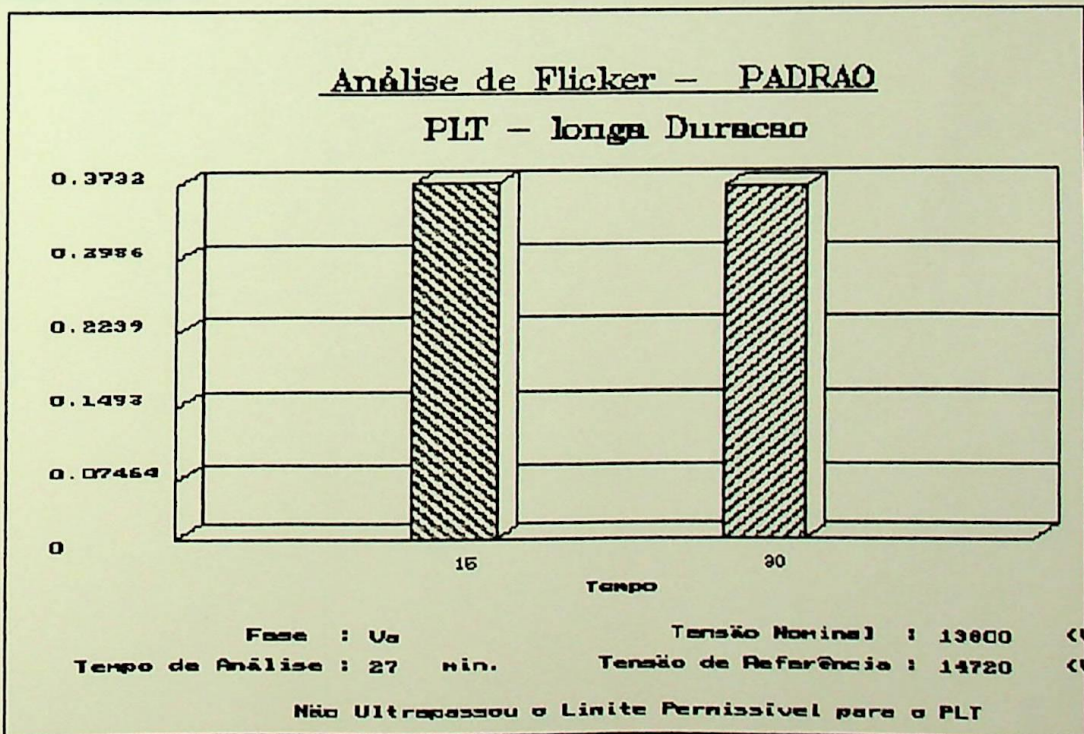


Figura -6.3.8

6.3.2.3 Medição-2

a-Condição Operacional: Fornos A e C entrando em operação.

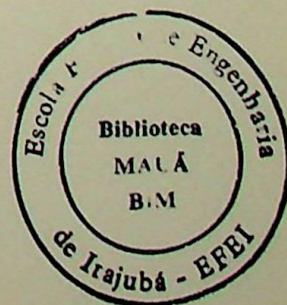
b-Resultados: Conforme as figuras 6.4.1 a 6.4.8.

c-Análises:

- O valor médio da variação de tensão é de, aproximadamente, 3,40 %;

- Até o nono minuto os fornos se encontram desligados. A partir daí entram em operação. Esta afirmativa pode ser comprovada pelos gráficos das doses unitárias e índices PST, o que caracteriza uma das vantagens dos métodos Francês e Padrão por permitir acompanhar a evolução do efeito "Flicker" em função dos ciclos de operação da carga;

- Os limites de "Flicker" permissíveis foram ultrapassados para qualquer dos métodos utilizados.



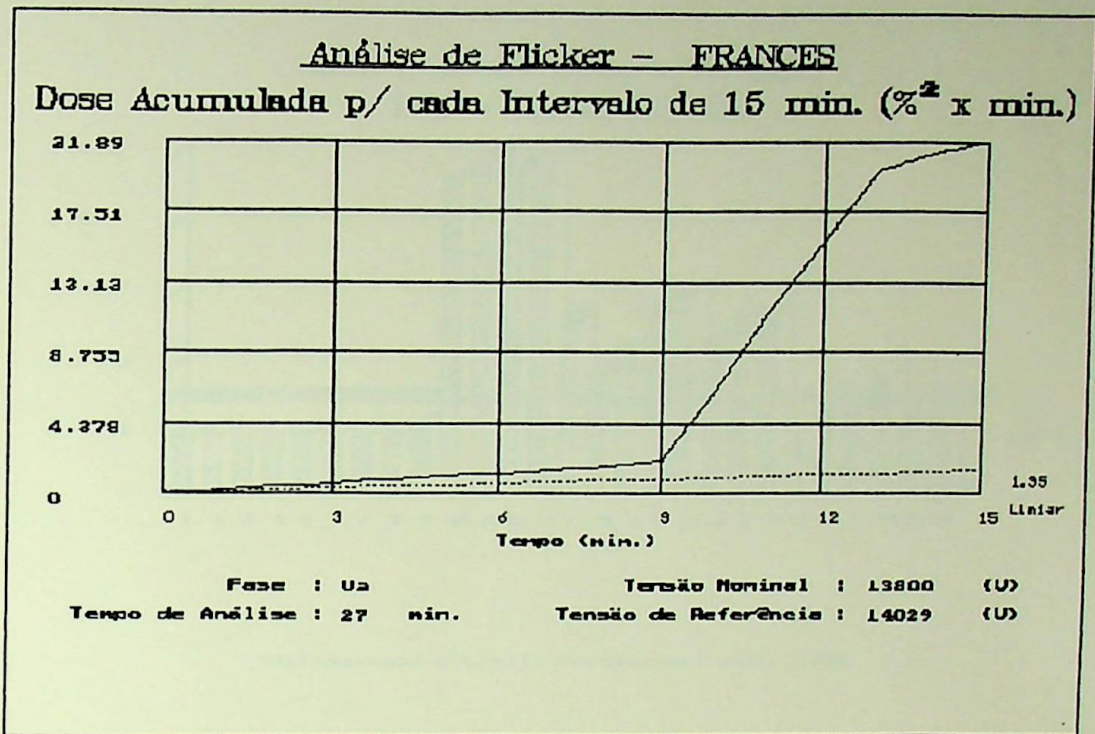


Figura-6.4.5

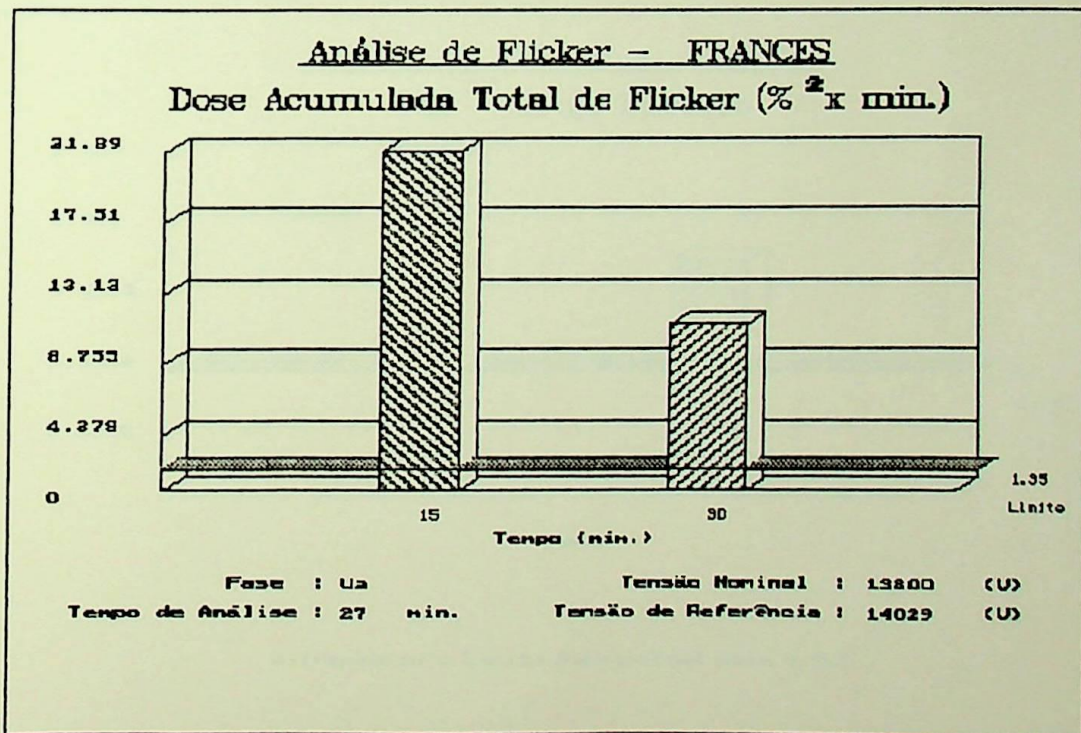


Figura-6.4.6

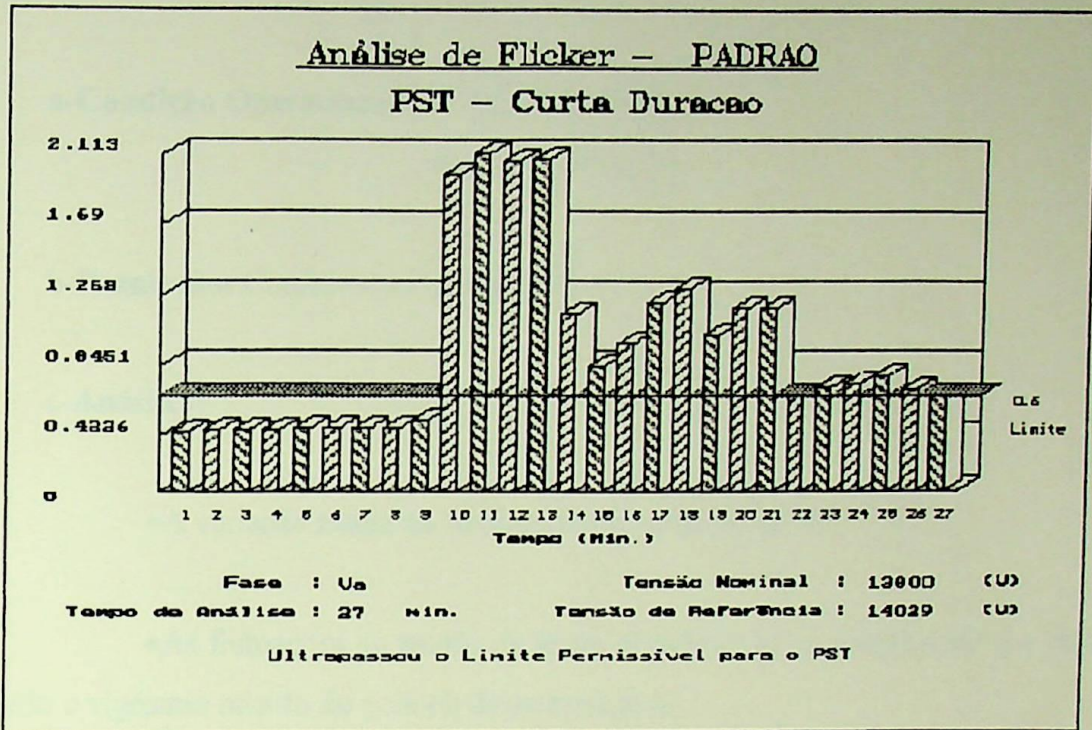


Figura-6.4.7

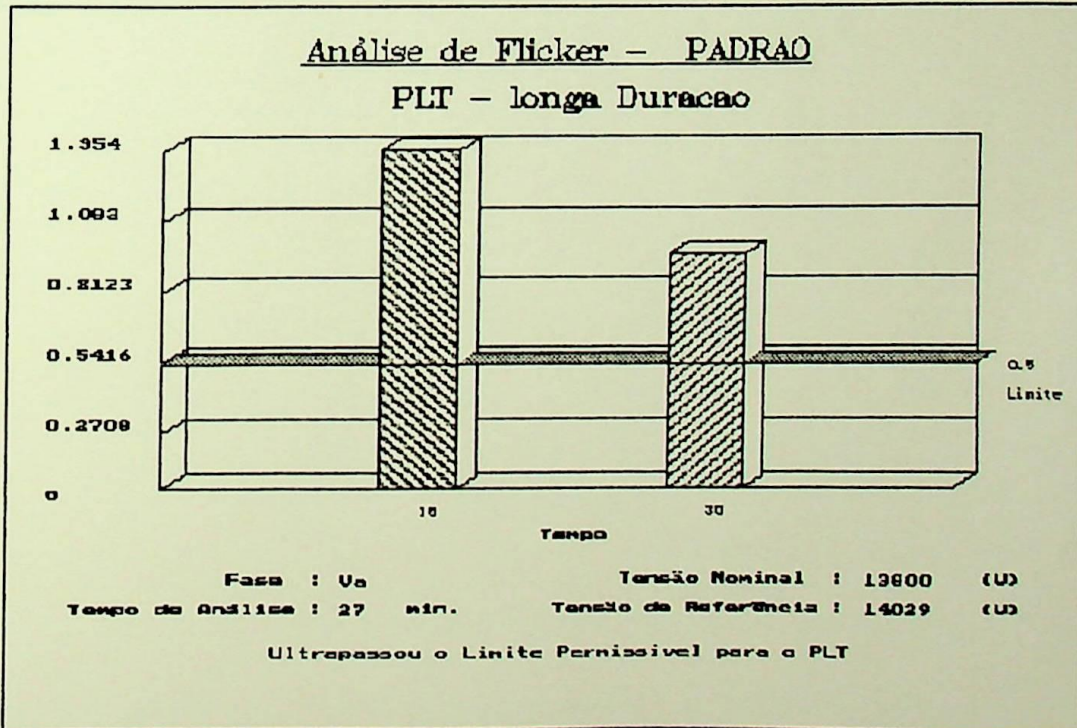


Figura-6.4.8

6.3.2.4 Medição-3

a-Condição Operacional: •Forno A em fusão
•Forno C em refino

b-Resultados: Conforme as figuras 6.5.1 a 6.5.8.

c-Análises:

- A variação média da tensão está em torno de 2,33%;
- As flutuações de tensão de maior amplitude se concentram entre o décimo segundo e vigésimo minuto do período de amostragem;
- Os limites de “Flicker” foram superados para qualquer um dos métodos de análise.

6.3.2.5 Medição-4

- a-Condição Operacional:**
- Forno A em refino
 - Forno C em oxidação

b-Resultados: Conforme as figuras 6.6.1 a 6.6.8.

c-Análises:

- A variação média da tensão ficou em torno de 2,89 %;
- Os valores de “Flicker” ultrapassaram os limites estabelecidos por qualquer um dos métodos de análise.

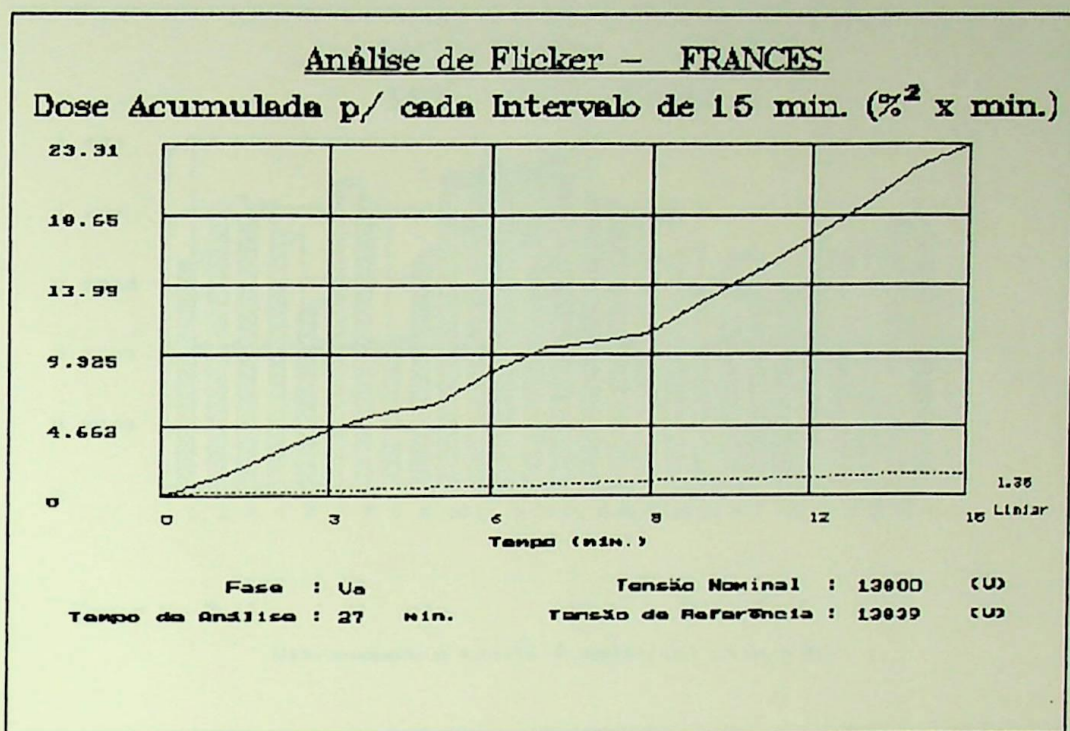


Figura-6.6.5

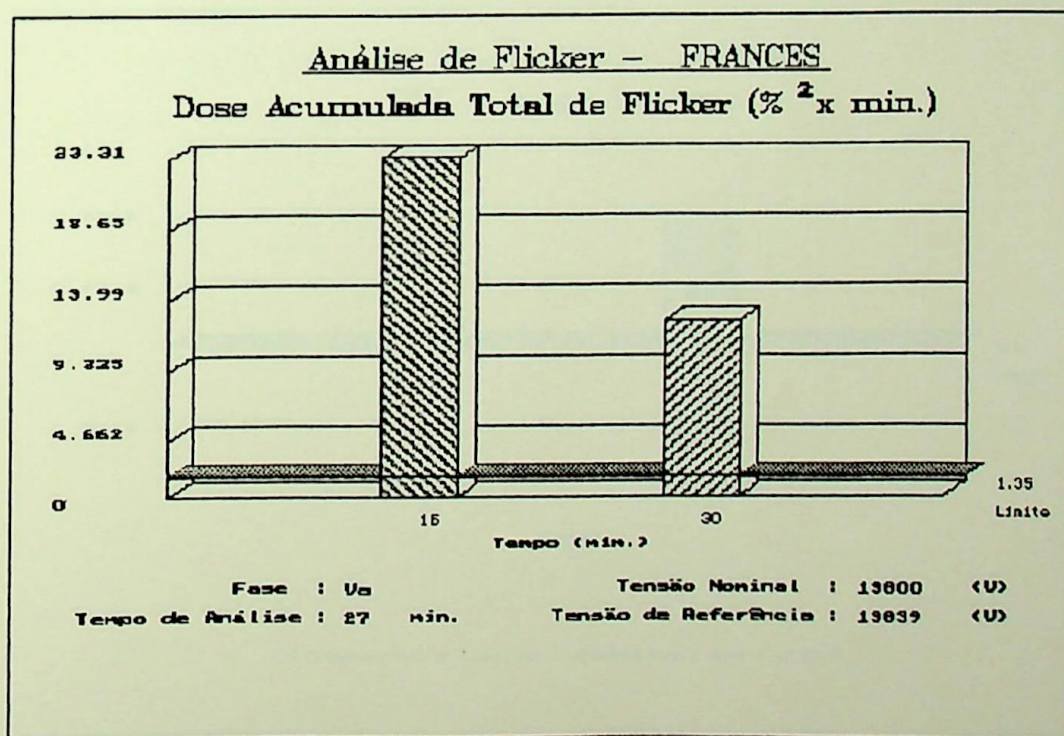


Figura-6.6.6

6.3.2.6 Medição-5

a-Condição Operacional: Laminadores em operação

b-Resultados: Conforme as figuras 6.7.1 a 6.7.8.

c-Análises:

- As variações médias de tensão estão em torno de 0,97 %;
- As amplitudes das variações de tensão possuem valores inferiores do que aqueles verificados no barramento dos fornos a arco;
- Os laminadores provocam flutuações de tensão regulares, comprovadas pelos valores, praticamente constantes, para as doses unitárias e indicador PST;
- As flutuações de tensão encontradas no barramento estão acima dos limites definidos segundo os métodos Britânico e Francês;
- O método Padrão não teve nenhum de seus limites excedidos.

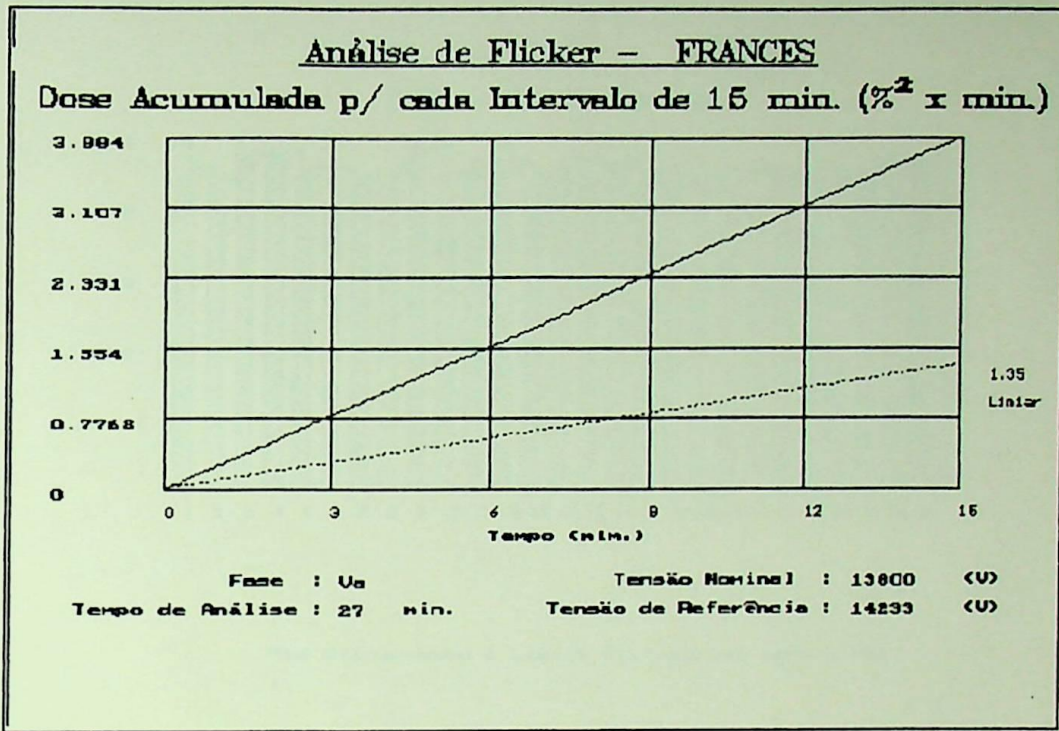


Figura-6.7.5

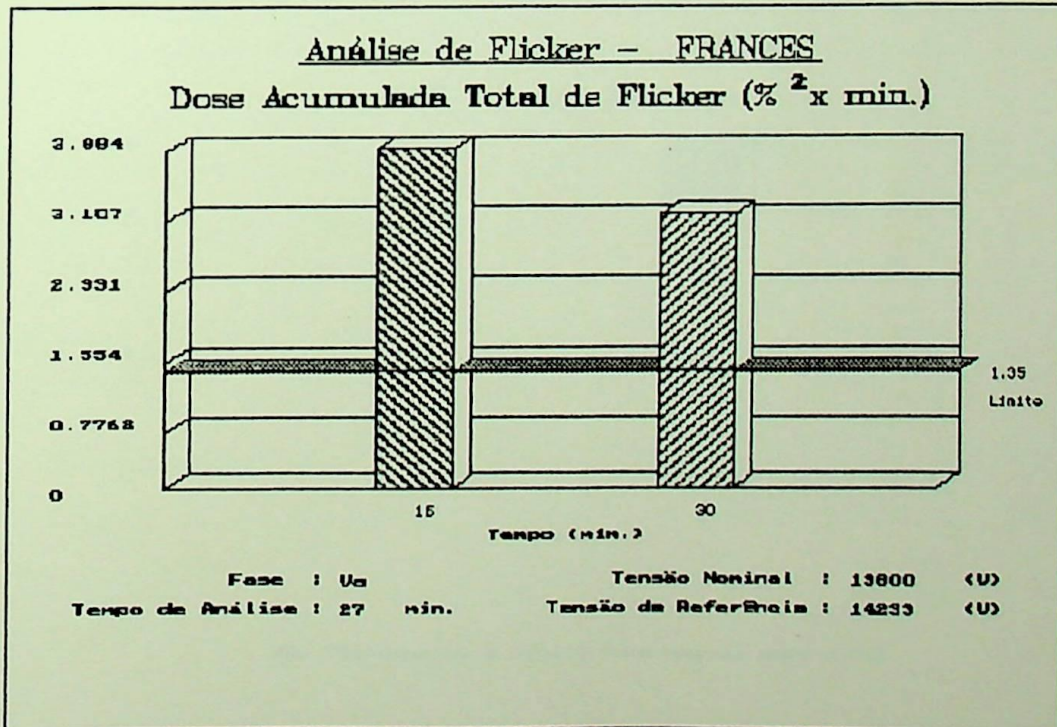


Figura-6.7.6

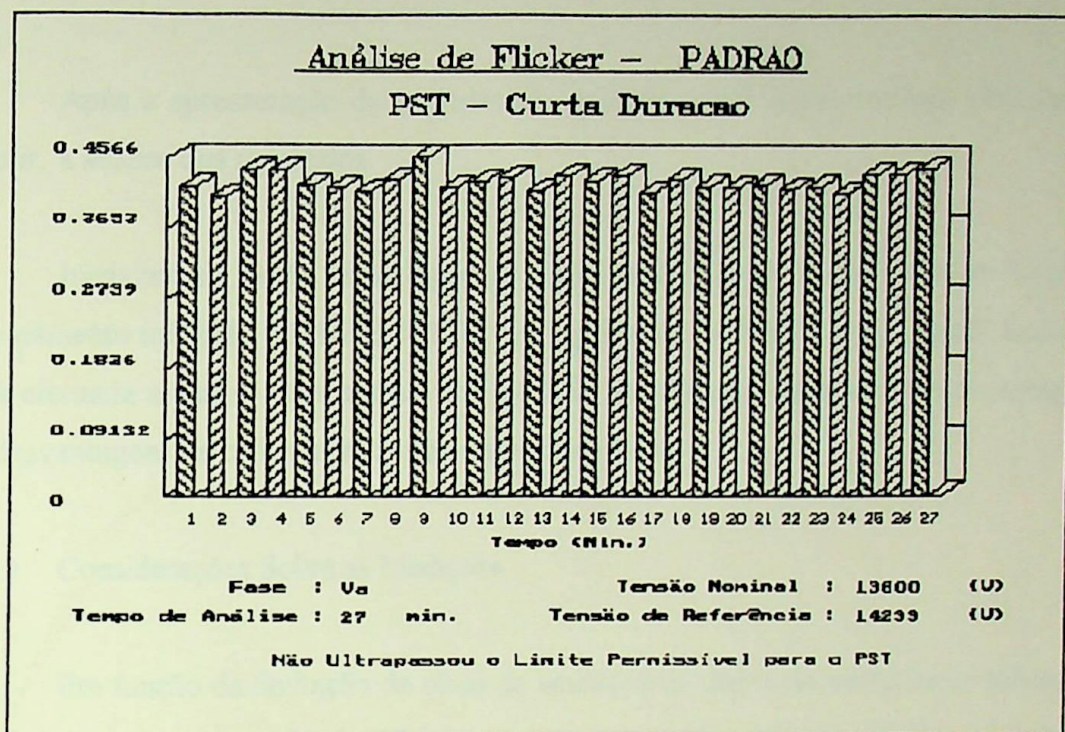


Figura-6.7.7

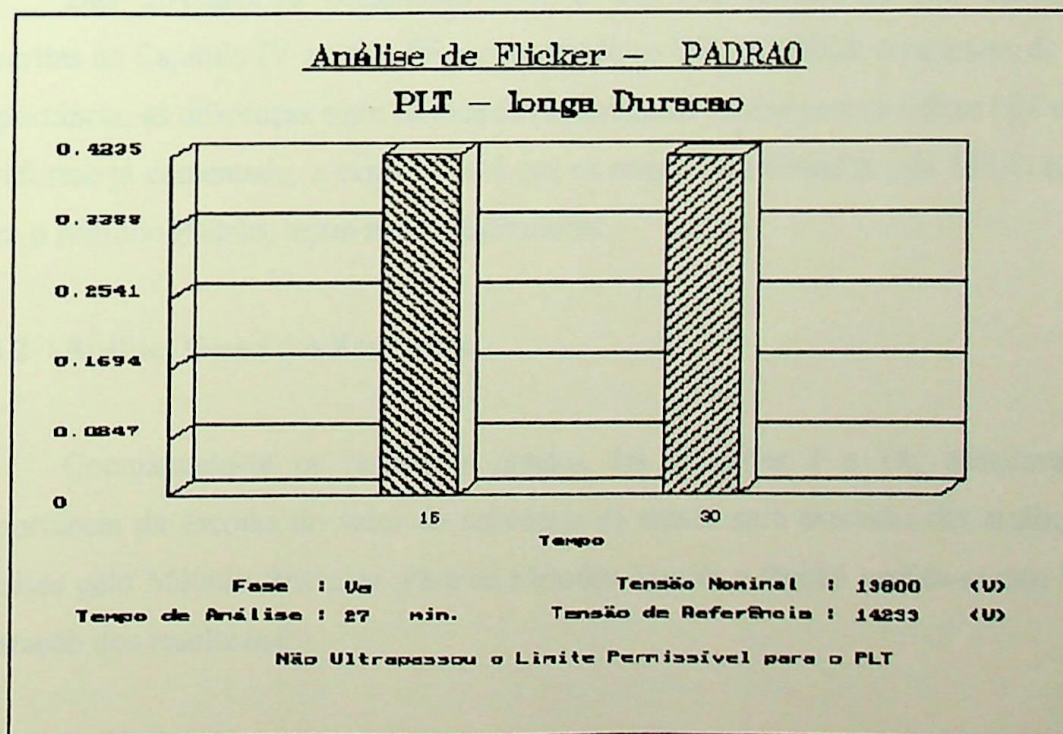


Figura-6.7.8

6.4 Análise dos Resultados

Após a apresentação do conjunto de medições mais representativas, procede-se, a seguir, a análise dos resultados.

Inicialmente, serão feitas algumas considerações sobre as medições em função do equipamento utilizado (UFUFLICKER); em seguida, as análises de ordem geral; finalmente, será efetuada a análise comparativa dos métodos de medição, destacando-se as vantagens e as desvantagens de cada um à luz dos resultados obtidos.

6.4.1 Considerações Sobre as Medições

Em função da limitação da placa de aquisição de dados do instrumento utilizado, as medições tiveram duração de 27 minutos, ao passo que, para a avaliação da instalação segundo o índice PLT do Método Padrão, a duração mínima deveria ter sido de 2 horas.

Das divergências constatadas entre o que está estabelecido nas metodologias descritas no Capítulo IV e o que foi implementado no UFUFLICKER, reputam-se, de maior importância, as diferenças entre os tempos requeridos de análise para os índices PST e PLT. Conforme já comentado, a expectativa é que os resultados oferecidos pelo UFUFLICKER para o Método Padrão, sejam mais penalizadores.

6.4.2 Análises Gerais dos Resultados

Comparando-se os resultados obtidos das Medições 1 e 1A, comprova-se a importância da escolha do valor de referência da tensão para execução das avaliações e análises pelo Método Britânico. Para os Métodos Francês e Padrão verifica-se uma ligeira alteração dos resultados.

Ao se alterar o valor de referência da tensão, observa-se que na Medição 1A a distribuição de frequências das variações de tensão se aproxima da Distribuição Normal ou Distribuição de Gauss.

A Medição 5, mostra que os laminadores geram flutuações de tensão repetitivas devido ao ciclo regular de operação destes equipamentos. Esta afirmativa pode ser comprovada pelos valores, praticamente constantes, das doses unitárias e índices PST.

As amplitudes das flutuações de tensão dos barramentos dos laminadores são inferiores as dos barramentos dos fornos a arco, conforme era de se esperar.

Os resultados de todas as medições superaram os limites definidos pelos Métodos Britânico e Francês, sendo este último em menor escala.

Os resultados das medições só não superaram os limites do Método Padrão para as condições do sistema em vazio e laminadores em operação.

6.4.3 Análise Comparativa dos Métodos de Medição

As análises dos resultados das medições apresentadas nos itens anteriores levam a crer que os Métodos Britânico e Francês são mais penalizadores do que o Método Padrão. No entanto, como ter certeza desta afirmativa, se cada método utiliza modos diferentes de interpretar e quantificar o efeito "Flicker"? Para responder a esta questão optou-se por considerar, para análise, casos hipotéticos com flutuações de tensão com frequências fixas. Desta forma, o passo seguinte consiste em determinar qual é a máxima amplitude permitida da flutuação da tensão para cada frequência considerada.

Para o Método Britânico é de conhecimento que o valor da amplitude da flutuação é independente da frequência, portanto, basta consultar a Tabela-4.1 ou 6.1 em função da classe de tensão. No caso, o valor selecionado foi de 0,25 % devido à tensão nominal ser de 13,8 KV.

Para o Método Padrão, a amplitude da flutuação da tensão é obtida da Figura 4.14, ou seja, da Curva IEC 555/3 modificada para PST igual a 1.

Finalmente, para o Método Francês, a amplitude da flutuação da tensão é calculada a partir da Curva de Ponderação em Frequência (Figura 4.9) e da equação (4.1).

Como resultado destas considerações, obteve-se a Figura 6.3, que mostra $\Delta V\%$ em função da frequência na faixa de 2 a 22 Hz para os três métodos.

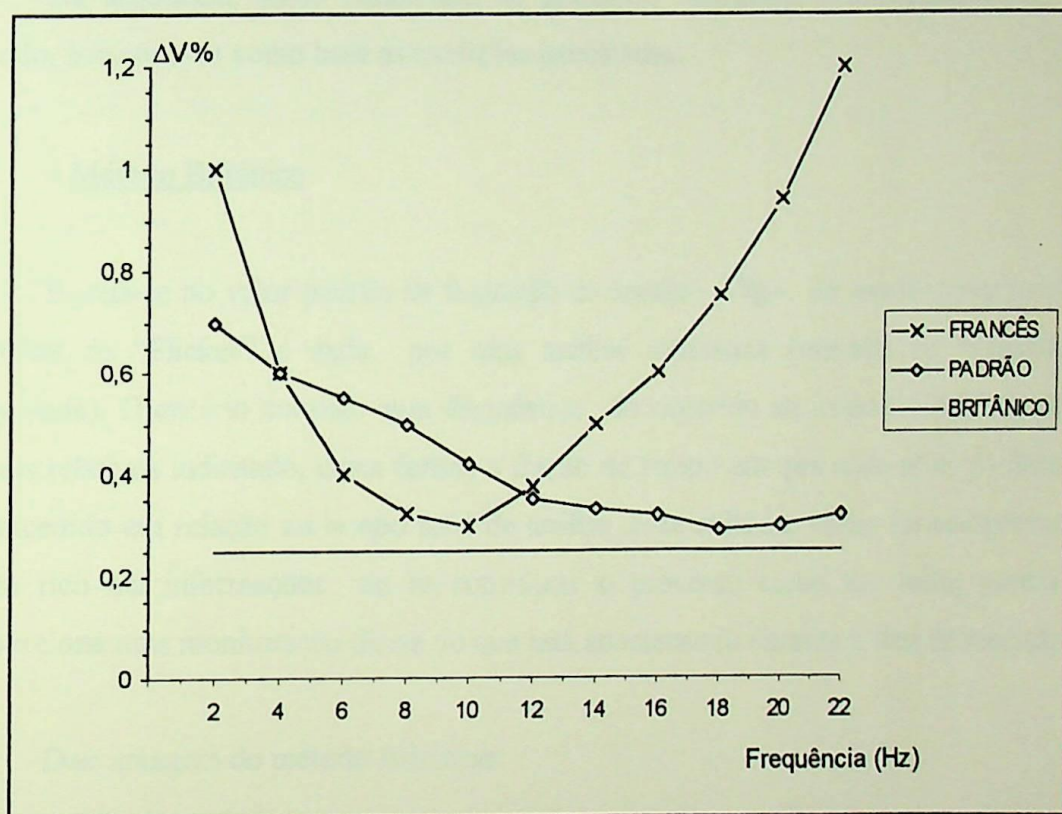


Figura- 6.3 -Amplitude das Flutuações de Tensão com Frequência Constante

Consultando a Figura 6.3, são estas as conclusões:

- O Método Britânico é o mais penalizador entre todos;
- O Método Francês é o segundo mais penalizador, na faixa de frequência entre 4 e 12 Hz;

- O Método Padrão é o menos penalizador entre as frequências de 4 a 12 Hz e o segundo mais penalizador para frequências abaixo de 4 Hz e acima de 12 Hz.
- A menor amplitude verificada para o Método Francês ocorre na frequência de 10 Hz (0,30%) e para o Padrão em torno de 17 Hz (0,29%).

Estas análises justificam os resultados das medições e levam a concluir que as flutuações de tensão medidas estão, predominantemente, na faixa de 4 a 12Hz.

Na seqüência, serão ressaltadas as principais vantagens e desvantagens de cada método, tomando-se como base as medições executadas.

• Método Britânico

Baseia-se no valor padrão da flutuação de tensão - Vfg - de modo que a avaliação do nível de "Flicker" é dada por uma análise estatística (método da probabilidade acumulada). O critério consiste num diagnóstico do ocorrido no intervalo de medição em termos relativos indicando, desta forma, a fração de tempo em que cada nível de flutuação foi excedido em relação ao tempo total de análise. Este método, como foi comprovado, é muito rico em informações ao se considerar o processo como um todo, porém não proporciona uma monitoração direta do que está acontecendo durante a fase de medição.

Desvantagem do método Britânico:

- Não adota nenhuma distinção ou ponderação para as frequências das oscilações de tensão; desta forma, flutuações com diferentes frequências mas com amplitudes idênticas conduzem a um mesmo resultado;
- Considera o deslocamento contínuo da tensão, ou seja, se o sistema estiver operando com subtensão ou sobretensão contínua, acima de 0,25 %, o método reprova a instalação;

- Apresenta diagnóstico penalizador, haja visto que para 100 % das medições realizadas, as flutuações de tensão encontradas estão acima dos limites estabelecidos, inclusive para a condição do sistema operando a vazio.

- Método Francês

Apoia-se no cálculo das doses acumuladas de "Flicker" requerendo, preliminarmente, o cálculo das doses unitárias através do registro da evolução da carga, minuto a minuto, e por conseguinte, para cada intervalo de 15 minutos. Permite, assim, além de um monitoramento mais detalhado sobre a amostra, a comparação direta com os limites de tolerância de variação luminosa referentes às doses unitárias e às acumuladas.

A vantagem do método é que executa a ponderação em frequência das flutuações de tensão e não considera o deslocamento contínuo da tensão medida em relação à tensão de referência.

Uma desvantagem é não utilizar nenhum tratamento estatístico na determinação das doses de "Flicker"; assim, variações esporádicas de tensão, com amplitudes significativas, podem elevar substancialmente as doses unitárias de "Flicker".

O método Francês, embora menos penalizador do que o método Britânico, justamente pela ponderação em frequência das flutuações de tensão, é também bastante rígido. Pode-se verificar que para todas as medições realizadas, inclusive para operação do sistema em vazio, as flutuações de tensão estão acima dos limites estabelecidos pelo Método Francês.

- Método Padrão UIE

O método Padrão incorpora as principais vantagens dos Métodos Britânico e Francês, uma vez que a forma com que os dados de uma determinada amostra de flutuação

de tensão são manipulados, se assemelham às etapas referentes aos métodos Britânico e Francês, no tocante à análise estatística e à ponderação em frequência, respectivamente.

Os resultados obtidos pelo método Padrão são mais favoráveis à instalação se comparados aos resultados oferecidos pelos Métodos Britânico e Francês; isto porque as flutuações de tensão devido à operação dos laminadores e para a condição a vazio, não superam os limites estabelecidos pelo Método Padrão, ao contrário do que ocorreu para os outros métodos.

6.5 Considerações Finais

Inicialmente, este Capítulo realizou um histórico dos limites e critérios aplicados no Brasil, nos últimos onze anos, para os distúrbios de flutuação de tensão. O que se pode concluir é que o país não tem investido em pesquisas em busca de metodologia própria para a quantificação do fenômeno e tem, tão somente, se limitado a "copiar" o que está sendo aplicado no exterior.

Na seqüência, apresentou-se um conjunto de medições realizadas com o UFUFLICKER, nas instalações de um grande consumidor industrial, onde se encontram três fornos a arco e um complexo de laminação.

Tomando por base os resultados obtidos, procedeu-se à análise comparativa entre os três métodos de medição. As principais conclusões são as que se seguem:

- O método Britânico é o mais penalizador de todos; não adota nenhuma ponderação para as frequências das oscilações de tensão e considera a componente contínua para a quantificação do "Flicker".

- O método Francês é o segundo mais penalizador para frequências de oscilação de tensão situadas entre 4 e 12 Hz; a principal desvantagem do método é não incluir nenhum procedimento estatístico para cálculo das doses unitárias e acumuladas.

- O método Padrão apresenta resultados mais favoráveis à instalação, ou seja, menos penalizadores dependendo da faixa de incidência das frequências das oscilações de tensão; este método reúne as principais vantagens dos Métodos Britânico e Francês e foi idealizado para ser aplicado a qualquer ponto da rede elétrica, independentemente da carga perturbadora e da forma do distúrbio.

Com base nas conclusões apresentadas, certamente, os Métodos Padrão e Francês são os que melhor quantificam o efeito "Flicker", sendo que o método Francês apresenta a restrição de não reconhecer o caráter aleatório das flutuações de tensão. Já o método Britânico, não quantifica adequadamente o fenômeno, por não adotar nenhuma distinção ou ponderação com a frequência da oscilação da tensão e por considerar o deslocamento contínuo como fonte de geração do "Flicker"; considera-se o método Britânico obsoleto se comparado com os demais métodos.

Finalmente, acredita-se que este Capítulo tenha oferecido mais uma contribuição ao tema, por ter realizado a confrontação mútua entre os três métodos de quantificação do "Flicker", a partir de medições de campo.



CAPÍTULO VII

CONCLUSÕES

Muito embora, ao longo desta dissertação, tenham sido apresentadas as conclusões específicas de cada capítulo, julgou-se conveniente reapresentar, de forma resumida, os principais pontos abordados bem como as contribuições oferecidas por este trabalho.

O **Capítulo II** apresentou os principais itens que devem ser considerados para avaliação da Qualidade da Tensão; dentre eles: interrupções, harmônicos, variações de tensão de longa duração, curta duração (“voltage sags and swells”), transitórios de tensão decorrentes de surtos atmosféricos e de manobra e finalmente o “Flicker”. Em seguida, foram relacionados os principais efeitos dos distúrbios de tensão sobre equipamentos e consumidores, além de informar o leitor sobre as normalizações e recomendações aplicáveis, a cada item abordado. Apesar dos itens enfocados não terem sido tratados com profundidade, pode-se considerar que este capítulo tenha oferecido uma contribuição didática ao tema - “Qualidade da Tensão”- por ter sintetizado e organizado os principais aspectos envolvendo o assunto.

O **Capítulo III**, com característica didática e introdutória ao tema principal desta dissertação, conceituou o problema de flutuação de tensão associado à demanda variável de potência reativa e procurou descrever, resumidamente, as características das principais cargas perturbadoras, tais como: fornos a arco, laminadores, máquinas de solda e motores acionando cargas cíclicas que, quando conectadas ao sistema elétrico, são passíveis de ocasionar flutuações de tensão e conseqüentemente provocar o efeito “Flicker”.

O **Capítulo IV** apresentou a conceituação do Efeito “Flicker”, o princípio da modulação do sinal de tensão aplicado à quantificação do fenômeno e os limites de sensibilidade visual à cintilação luminosa. Na seqüência, foram apresentados os três métodos

mais difundidos a nível internacional para quantificação da Qualidade da Tensão sob o enfoque do efeito “Flicker”, quais sejam, os métodos Britânico, Francês e Padrão UIE.

Verificou-se que cada um dos métodos possui filosofias distintas para quantificação do “Flicker”; no entanto, alguns fundamentos básicos são comuns aos três métodos: a lâmpada incandescente é adotada como referência para a quantificação do fenômeno e os procedimentos baseiam-se no princípio de modulação de sinais.

Constatou-se que o Método Britânico foi desenvolvido para estabelecer limites máximos para as perturbações no sistema de energia elétrica provenientes da operação de fornos a arco; é baseado numa metodologia estatística de análise.

Já o Método Francês é de aplicação mais ampla no que se refere às cargas perturbadoras e está baseado na metodologia de cálculo das doses unitárias (período de 1 minuto) e doses acumuladas (período de 15 minutos)..

Por fim, verificou-se que o Método Padrão é fruto de uma unificação a nível mundial proposta pela UIE que reúne as principais vantagens oferecidas pelos métodos Britânico e Francês. O método pode ser aplicado a qualquer ponto da rede elétrica, independente da carga perturbadora e da forma do distúrbio e propõe a avaliação da severidade do “Flicker” através dos índices PST(período de avaliação de 10 minutos) e PLT (período de avaliação de 2 horas).

O **Capítulo V** descreveu os princípios básicos de “software” e “hardware” dos analisadores de cintilação desenvolvidos pela UNICAMP e UFU. Constatou-se que o equipamento desenvolvido pela UNICAMP executa, a nível analógico, a totalidade das funções destinadas ao tratamento do sinal de tensão e que oferece como opções para quantificação do “Flicker” os métodos Francês e Padrão. Já o instrumento desenvolvido pela UFU utiliza-se de modernas técnicas digitais para o processamento de sinal e possibilita a análise do “Flicker” pelos Métodos Britânico, Francês e Padrão; isto permite a confrontação mútua dos resultados obtidos pelos três métodos de análise.

Verificou-se também que o UFUFLICKER carece de algumas melhorias, dentre as quais: aumentar a capacidade da placa do sistema de aquisição de dados, de modo a permitir a execução de medições prolongadas; adequar o cálculo dos índices PST e PLT para 10 e 120 minutos, respectivamente.

Pode-se dizer que este capítulo representa substancial contribuição ao assunto principal desta dissertação, por ter apresentado e comparado os dois instrumentos disponíveis no Brasil para medição de "Flicker", num momento em que está se rediscutindo o padrão mínimo desejado da qualidade de suprimento, no sistema elétrico brasileiro.

O **Capítulo VI** iniciou-se com um breve histórico dos limites e critérios aplicados no Brasil, nos últimos onze anos, para os distúrbios de flutuação de tensão; tratou dos locais para aplicação dos limites globais e por consumidor e, posteriormente, abordou a questão das responsabilidades, enfatizando que o controle das flutuações de tensão é de interesse de todas as partes envolvidas, sejam as concessionárias, os consumidores e os fabricantes de equipamentos. Conclui-se que o Brasil não tem investido em pesquisas visando buscar metodologias próprias e adequadas à realidade nacional para quantificação do fenômeno "Flicker" e que o expediente que tem sido utilizado é tão somente "copiar" o que está sendo aplicado no exterior.

Na seqüência, foi apresentado um conjunto de medições realizadas com o equipamento desenvolvido pela Universidade Federal de Uberlândia - UFUFlicker - na instalação de um grande consumidor industrial, onde se encontra uma amostra substancial de equipamentos perturbadores, quais sejam, fornos a arco e laminadores.

Com base nos resultados das medições procedeu-se à análise comparativa entre os três métodos de medição do "Flicker" e pôde-se chegar às seguintes conclusões:

• Método Britânico

Baseia-se no valor padrão da flutuação de tensão - Vfg - de modo que a avaliação do nível de "Flicker" é dada por uma análise estatística (método da probabilidade acumulada).

O critério consiste num diagnóstico do ocorrido no intervalo de medição em termos relativos indicando, desta forma, a fração do tempo em que cada nível de flutuação foi excedido em relação ao tempo total de análise. Este método é muito rico em informações considerando-se o processo como um todo, porém, não proporciona uma monitoração direta do que está acontecendo durante a fase de medição.

São desvantagens do método Britânico

:

- Não adota nenhuma distinção ou ponderação para as frequências das oscilações de tensão.
- Considera o deslocamento contínuo da tensão, ou seja, se o sistema estiver operando com subtensão ou sobretensão contínua acima de 0,25 %, o método reprova a instalação;
- Apresenta diagnóstico penalizador, haja visto que, para 100 % das medições realizadas, as flutuações de tensão encontradas estão acima dos limites estabelecidos, inclusive para a condição do sistema operando a vazio.

• Método Francês

Apoia-se no cálculo das doses acumuladas de "Flicker", requerendo, preliminarmente, o cálculo das doses unitárias através do registro da evolução da carga, minuto a minuto e, por conseguinte, para cada intervalo de 15 minutos. Permite, assim, além de um monitoramento mais detalhado sobre a amostra, a comparação direta com os limites de tolerância de variação luminosa referentes às doses unitárias e às doses acumuladas.

Como vantagem, destaca-se que o método executa a ponderação em frequência das flutuações de tensão e não considera o deslocamento contínuo da tensão medida em relação a tensão de referência.

Uma desvantagem do método é não utilizar nenhum tratamento estatístico na determinação das doses de "Flicker".

O método Francês, embora menos penalizador do que o método Britânico, justamente pela ponderação em frequência das flutuações de tensão, também se mostrou rígido; pois pode-se verificar que para todas as medições realizadas, inclusive para operação do sistema em vazio, as flutuações de tensão estão acima dos limites estabelecidos pelo Método Francês.

•Método Padrão UIE

O método Padrão incorpora as principais vantagens dos Métodos Britânico e Francês, uma vez que a forma com que os dados de uma determinada amostra de flutuação de tensão são manipulados, se assemelham às etapas referentes a esses dois métodos, no tocante à análise estatística e a ponderação em frequência, respectivamente.

Os resultados obtidos pelo método Padrão são mais favoráveis à instalação se comparados aos resultados oferecidos pelos Métodos Britânico e Francês, isto porque as flutuações de tensão, devido à operação dos laminadores e para a condição a vazio, não superam os limites estabelecidos pelo Método Padrão, ao contrário do que ocorre com os outros métodos.

Com base nestas constatações, concluiu-se que os Métodos Padrão e Francês são os que melhor quantificam o efeito "Flicker", sendo que o método Francês apresenta a restrição de não reconhecer o caráter aleatório das flutuações de tensão. Já o método Britânico não quantifica apropriadamente o fenômeno, por não adotar nenhuma distinção ou ponderação com a frequência da oscilação da tensão e por considerar o deslocamento contínuo como fonte de geração do "Flicker". Portanto, o método Britânico tornou-se obsoleto se comparado com os demais métodos.

Considera-se que este Capítulo tenha oferecido mais uma contribuição ao tema, por ter realizado a confrontação mútua entre os três métodos de quantificação do "Flicker" a partir de medições reais de campo.

Reconhecendo-se que o "Flicker" é um fenômeno aleatório, resultante da interação de fatores sob domínio das concessionárias e dos consumidores, como por exemplo, configuração momentânea do sistema elétrico e fatores operacionais dos equipamentos perturbadores, torna-se imperativo prolongar o período de monitoração, de modo a obter níveis representativos de "Flicker" presentes no sistema elétrico. A normalização Européia

propõe que esta monitoração seja realizada durante uma semana e, dentro deste contexto, sugere-se o desenvolvimento das seguintes pesquisas:

- Aumentar a capacidade do tempo de amostragem para uma semana (168 horas);
- Introduzir análise estatística no Método Francês, fixando que a dose acumulada de “Flicker” deverá ser igual ou menor a 1,35, para 95 % do tempo correspondente a um período de amostragem de 168 hs. Esta proposta visa eliminar a principal desvantagem do Método Francês.
- Alterar a sistemática de cálculo do índice PLT do Método Padrão, fixando que o PST calculado a cada 10 minutos deverá ser menor ou igual a 1, para 95 % do tempo correspondente a um período de amostragem também de 168 hs.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - POULSEN, S. **Monitoring Voltage Quality- European Standard, Equipment and the Danish Monitoring Programme.** 4p.
- [2] - HUGHES, B. M. Early Experiences with the Canadian National Power Quality Survey. **Transmission e Distribuição Internacional.** p.18-27, sept. / 93.
- [3] - ARRUDA, A. A. C. et all. Qualidade da Energia: Panorama no sistema elétrico Brasileiro. In: "ENCONTRO REGIONAL LATINO-AMERICANO DA CIGRÉ", 6, 28 / mai. - 1 /jun. de 1995. Foz do Iguaçu. **Anais... CIGRE,** 1995. 5p.
- [4] - _____ et all. O controle de harmônicos e flicker no sistema elétrico. **IEEE Electron .** v.2 , n. 6, set. / dez. / 91. p.29-30
- [5] - _____ et all. Sobretensões, coordenação de isolamento e interferências: Diagnóstico do estado de perturbação do sistema elétrico. In: "SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA", 11, 1991. Rio de Janeiro. **Anais... ELETROPAULO,** 1991.
- [6] - ROCCO, A. O fenômeno de cintilação luminosa "Efeito Flicker": **Medição e Análise.** Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 1988. 182p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas).
- [7] - CHANAS, M. Perturbations de tension affectant le fontionnement des réseaux: Fluctuation brusques, flicker, déséquilibres et harmoniques. **Journées d'études S.E.E.,** juin. 1978.
- [8] - MEYNAUD, P. Generalisation de la methode déstimation de la dose de flicker limite. **RGE. Revue de General L'Electric.** v.89 n. 7/8, jul. / aou. / 80. p.519-525

- [9] - ELECTRICITY COUNCIL. **Suply to arc Furnances.** In: "ENGINEERING RECOMMENDATION", pp.7/2. London. 1970.
- [10]- COMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE- **Flickermetre IEC- Evaluation de la sévérité du flicker.** IEC - 868-0: 1991-04. 43p.
- [11]- COMISSION ELECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE - **Flickermetre. - Specifications fonctionneles et conception.** IEC - 868-0:1986. 32p.
- [12]- OLIVEIRA, F. A. Uma proposta para a quantificação do efeito de cintilação luminosa - "Flicker". Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 1994. 181p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia).
- [13]- PEIXOTO, G. R. Um instrumento para a medição de "Flicker" em sistemas elétricos de potência. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 1995. 152p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Uberlândia).
- [14]- BUENO, A. F. M. SEMINÁRIO QUALIDADE DA ENERGIA EM DISTRIBUIÇÃO. Itajubá, EFEI / CEMIG. 1995.
- [15]- DOUGLAS, J. Power Quality Solutions. **IEEE Power Engineering Review**, mar. / 94 p.3 - 7.
- [16]- GUNTHER, E. W. e SAMOTYJ, M. **Overview of voltage quality from a global approach in terms of power systems.**
- [17]- D'AJUZ, A. **Transitórios elétricos e coordenação de isolamento - Aplicação em sistemas de potência de alta tensão.** Rio de Janeiro, FURNAS, Niterói, UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE/EDUFF, 1987. 435p.
- [18]- GCOI/SCEL/CECE. **Critérios e procedimentos de planejamento para o atendimento à cargas especiais.** Rio de Janeiro, ELETROBRÁS, out. / 90

- [19]- ANDERSON, L. M. e BOWES, K. The effects of power-line disturbances on consumer electronic equipment. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v.5, n.2, abr. / 90. p.1062-1064
- [20]- MEYNAUD, P. Qualite de la tension, dans le reséaux electriques creux de tension, flicker e harmôniques. **Tecniques D4260**, 12. 1990. 26p.
- [21]- CALDON, R., FAURI, M., FELLIN, L. Voltage Sag effects on Continuos Industrial Processes: **Densitizing Study for Textile Manufacture**. D13:1-D13:6.
- [22]- LAMOREE, J. et all. Voltage Sag Analysis Case Studies. **IEEE Transactions on Industry Applications**. v.30, n4, Jul. / Aug. / 94. p.1083-1088
- [23]- LIMA, A. et all. Prejuízos com problemas de qualidade em grandes consumidores. **Eletricidade Moderna**. v.23 n205, abr. / 95. p.162-168
- [24]- GCOI / SCEL / CECE. **Crítérios e procedimentos para atendimento a consumidores com cargas especiais**. Rio de Janeiro, ELETROBRÁS-GCPS-CTST. fev. / 93.
- [25]- ALVES, M. F. Variações bruscas de reativos em sistemas industriais. In: "SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 5, Recife, 1979. (RE/GSP/23-Grupo IV). **Anais...** ELETROPAULO, 1979.
- [26]- OLIVEIRA, J. C. et all. **Apostila de Cargas Elétricas Especiais**. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia- UFU, 1988. v.II.
- [27]- COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE. **Perturbations produites dans les reséaux d'alimentation par les appareils electrodomestiques et les equipements analogues**. IEC - 555-3:1982. 43p.
- [28]- DECKMANN, S. M. e ROCCO, A. Medição do efeito flicker pelo Método UIE. In: "CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA", 6, 1986, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, DEE/FEC/UNICAMP. 1986. p. 865-869.
- [29]- ARRUDA, A. A. C. et all. Medições de flicker com analisador Padrão UIE: **Experiência da ELETROPAULO**. In: "CIGRÉ", Ciudad del Leste. Paraguai, 23-27 de março de 1993. 4p.



- [30]- COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS-CEMIG / Departamento de Planejamento e Automação da Distribuição. EG/PA. **Medições de cintilação luminosa-flicker- 02111-EG/PA1-3037**, Belo Horizonte, mar. / 95 21p.
- [31]- GCOI/SCel/GTEE. **Critérios e metodologia para o atendimento a clientes com cargas especiais.** - Rel. SCEL/GTEE 03/84. Rio de Janeiro, ELETROBRÁS, Jul. / 84. 137p.

DATA / /19.....
PROC.
PED.
LIV.
RS

INVENTARIO BIM - EFEI	
DATA	Rubrica

