

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA ELETRICA
DEPARTAMENTO DE SISTEMAS E CONTROLE DE ENERGIA

O Fenômeno de Cintilação Luminosa
"Efeito Flicker"
Medição e Análise

Alexandre Rocco

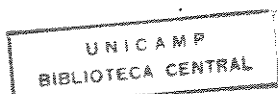
*Este exemplar corresponde a revisão
final da Tese defendida por Alexandre
Rocco e aprovada pela Comissão
Julgadora em 1.º de julho de 1988.
Sigmar M. Deckmann*

ORIENTADOR

Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia Elétrica da Universidade
Estadual de Campinas - UNICAMP,
como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Mestre em
Engenharia.

Junho 1988



Dedico este trabalho a
minha esposa, Carolina
meus filhos, Alexandre

Arthur

Daniel

AGRADECIMENTOS

- A FAPESP Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento deste projeto;
- Ao Prof. Dr. Sigmar Maurer Deckmann, Chefe do Departamento de Sistemas e Controle de Energia da Faculdade de Engenharia Elétrica da UNICAMP, pela irrestrita dedicação na orientação dada em todas as fases da elaboração deste trabalho;
- Ao Eng. Reynaldo Maffei, Diretor de Operação da ELETROPAULO, pelo incondicional apoio para o desenvolvimento deste trabalho;
- Aos Engs. José Alceu Brasil Falleiros, Superintendente de Estudos e Planejamento, Hélio Alves de Brito, Chefe do Departamento de Estudos do Sistema, e Lauro Penteado Siciliano, Chefe da Divisão de Estudos dos Sub-Sistemas da ELETROPAULO, pelo incentivo e orientação para que este trabalho fosse realizado, atendendo aos interesses da empresa e do setor elétrico nacional;
- Aos Engs. José Antonio Rodrigues, Superintendente Regional de Operação e Manutenção-Interior, e Carlos Fernando Negrão Stucchi, Chefe do Departamento de Operação e Manutenção-Baixada Santista da ELETROPAULO, pela compreensão e colaboração para que este trabalho pudesse vir a ser concluído;
- Aos Engs. Oscar Sei-Iti Komukai, da CESP, João Bosco, da ESCELSA, e Márcio Noronha, da CEMIG, pela participação e colaboração nos testes de campo e para que os mesmos fossem realizados, atendendo aos interesses daquelas empresas e das pesquisas envolvidas;
- Aos Engs. Nelson Falcão, do CGEE Alsthan, e Antonio Silva, da ASEA (Suécia), pela colaboração com o desenvolvimento do assunto a nível nacional;
- Ao Eng. Alexandre Garcia Massaud, da ELETROBRÁS, Coordenador do GTEE-GCOI, e aos colegas do Sub-grupo de Cargas Especiais, pelas críticas e discussões técnicas que muito contribuíram para a elaboração deste trabalho;
- Aos colegas do Departamento e Estudos do Sistema da ELETROPAULO, pelo incentivo e cooperação para com a realização deste trabalho;
- A Sra. Carla Deckmann, pelos cuidados no serviço de datilografia.

RESUMO

Neste trabalho, o efeito de cintilação luminosa, resultado de sucessivos impactos sobre sistemas de energia elétrica que suprem cargas industriais variáveis e especiais, é analisado através das metodologias disponíveis para a pré determinação de tais efeitos, na fase de planejamento.

Para a fase operacional do sistema, é considerada a utilização de uma metodologia padronizada a nível internacional para a medição do fenômeno. Para isso, foi implementado um protótipo de medidor e ensaiado através de testes específicos de laboratório e de campo, sendo os resultados discutidos nos capítulos finais.

ABSTRACT

In this work, the lamp flicker effect, resulting from successive industrial load changes is analysed by considering the available methodologies for the impact pre determination, in the planning phase of electric power systems and industrial supply installations. For the system operational phase, the use of an internationally unified methodology to quantify such effects is considered. Therefore, a prototype measuring equipment was implemented and tested through laboratory and field testings. The results obtained are presented in the final chapters.

INDICE

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO	1
Capítulo 2 - INFLUENCIA DE CARGAS VARIÁVEIS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTENCIA	3
2.1 - Flutuação de Tensão	3
2.2 - Cargas Variáveis	7
Capítulo 3 - "LAMP FLICKER" - EFEITO DE CINTILAÇÃO LUMINOSA ..	13
3.1 - Caracterização do Efeito de Cintilação Luminosa .	13
3.2 - Modulação da Tensão	13
3.3 - Sensibilidade Visual	15
3.4 - Influência da Inércia Térmica de Filamentos	16
Capítulo 4 - MÉTODOS ANALÍTICOS DE PRÉ-DETERMINAÇÃO DO EFEITO DE CINTILAÇÃO LUMINOSA	18
4.1 - Método Inglês	19
4.1.1 - Bases Experimentais do Método	19
4.1.2 - Metodologia Aplicada à Instalação com um único Forno a Arco	23
4.1.3 - Metodologia Aplicada à Instalação Multi-Fornos ..	24
4.1.4 - Metodologia Aplicada à Composição de Efeitos de Fornos a Arco Supridos em Diferentes Pontos do Sistema Elétrico	27
4.2 - Método Francês	29
4.2.1 - Bases Experimentais do Método	29
4.2.2 - Método de Pré-Determinação	31
Capítulo 5 - METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	41
5.1 - Método Inglês de Medição	41
5.1.1 - Diagrama Funcional do Medidor Inglês	41
5.2 - Método Francês de Medição	43
5.2.1 - Diagrama Funcional do Medidor Francês	43
5.3 - Método Internacional de Medição	45
5.3.1 - Premissas para a Quantificação do Fenômeno	47
Capítulo 6 - IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DO MEDIDOR PADRAO INTERNACIONAL - UIE	60
6.1 - Processador Analógico	61
6.1.1 - Adaptador do Sinal Medido	64
6.1.2 - Demodulação	64
6.1.3 - Filtro de Ponderação	64
6.1.4 - Sinal Quadrático Médio	68
6.1.5 - Doses Unitárias	70

6.2	-	Processador Digital	70
6.2.1	-	Conversor A/D	71
6.2.2	-	Sistema Computacional	73
6.2.3	-	Processamento Digital	73
6.2.4	-	Análise Estatística	78
Capítulo 7 - TESTES DE LABORATÓRIO			81
7.1	-	Convergência do Regulador de Tensão de Entrada ..	81
7.2	-	Filtro de Ponderação	82
7.2.1	-	Teste de Calibração	82
7.2.2	-	Testes de Validação	84
7.3	-	Desempenho Estático do Conversor Análogo-Digital A/D	85
7.4	-	Desempenho Dinâmico do Conversor Análogo-Digital A/D	88
Capítulo 8 - ENSAIOS DE CAMPO			89
8.1	-	CASO 1: Medições no Ponto de Acoplamento Comum para Rede de 138 kV Suprindo um único Forno a Arco	89
8.1.1	-	Medições Efetuadas - Resultados Obtidos	93
8.1.2	-	Análise dos Resultados Obtidos - Caso 1	99
8.2	-	CASO 2: Medições para Instalação Compensada através de Compensador Estático do Tipo Capacitor Chaveável	100
8.2.1	-	Medições Efetuadas - Resultados Obtidos no Ponto 1	102
8.2.2	-	Medições Efetuadas - Resultados Obtidos no Ponto 2	107
8.2.3	-	Análise dos Resultados Obtidos - Caso 2	109
8.3	-	CASO 3: Medições para Diversos Pontos de um Sistema Supridor de Fornos a Arco	110
8.3.1	-	Medições Efetuadas através do Método das Doses - Resultados Obtidos	112
8.3.2	-	Medições Efetuadas através do Método da Função de Probabilidade Cumulativa - Resultados Obtidos	133
8.3.3	-	Análise dos Resultados Obtidos - Caso 3	143
Capítulo 9 - CONCLUSÕES			144

Apêndices:

A - Aplicação Numérica do Método Inglês de Pré-Determinação para Instalações Multi-Fornos no Mesmo Barramento.....	146
B - Aplicação Numérica do Cálculo do Nível de Variação de Tensão Considerando-se a Operação de Fornos Localizados em Pontos Distantes do Sistema Elétrico.....	148
C - Aplicação de Metodologia Francesa.....	151
D - Resultados Obtidos nas Medições do Caso 1.....	153
E - Resultados Obtidos nas Medições do Caso 2.....	159
F - Resultados Obtidos nas Medições do Caso 3.....	164
G - Fotos do Protótipo Implementado.....	175
Referências Bibliográficas	180

RELAÇÃO DE FIGURAS

Capítulo 2:

2.1 - Equivalente Thévenin do Sistema de Suprimento	4
2.2 - Diagrama Fasorial para o Sistema de Suprimento	4
2.3 - Circuito Monofásico Equivalente de Suprimento a um Forno a Arco	7
2.4 - Circuito Equivalente de Thévenin de Suprimento a um Forno a Arco	8
2.5 - Característica de Operação de Fornos Elétricos a Arco .	10

Capítulo 3:

3.1 - Tensão com Modulação Senoidal	14
3.2 - Limiar de Percepção do "Flicker"	15
3.3 - Efeito de Pequenas Variações de Tensão sobre o Filamento de Lâmpadas Incandescentes	17

Capítulo 4:

4.1 - Testes de Efeito "Flicker" sobre Seres Humanos	19
4.2 - Flutuação de Tensão	20
4.3 - Curva de Distribuição Normal	21
4.4 - Probabilidade de um certo valor x ser ultrapassado	21
4.5 - Função Probabilidade Cumulativa	22
4.6 - Função Probabilidade Cumulativa Complementar	22
4.7 - Fator de Extensão c versus b	26
4.8 - Diagrama Esquemático - Fornos em Pontos Distantes	27
4.9 - Diagrama Esquemático - Fornos em Pontos Distantes Equivalentes	28
4.10 - Curva de Ponderação	30
4.11 - Diagrama Típico de Variação de Potência Reativa	33
4.12 - Probabilidade Cumulativa e Histograma para K	35

Capítulo 5:

5.1 - Diagrama de Blocos do Medidor de Flutuação de Tensão causada por Fornos a Arco - "ERA Meter"	42
5.2 - Diagrama de Blocos do Medidor (EdF)	43
5.3 - Doses Toleráveis de "Flicker" - Curva Limite	45
5.4 - Diagrama Funcional do Medidor UIE	46
5.5 - Curva de Resposta Normalizada do Filtro de Ponderação para a Banda de Frequência Especificada	52
5.6 - Nível de "Flicker" como uma Função do Tempo	53
5.7 - Função de Probabilidade Cumulativa a partir da Classificação Correspondente à Fig. 5.5	54
5.8 - FPC's para Dois Tipos de Formas de Onda	54
5.9 - Curva IEC 555/3	56
5.10 - IEC e Pst = 1	57

Capítulo 6:

6.1 - Processador Analógico Implementado	62
6.2 - Diagrama Funcional para o Processador Analógico	63
6.3 - Estrutura do Filtro de Ponderação	64
6.4 - Característica G(f) do Filtro de Ponderação	65
6.5 - Sinal Quadrático e Quadrático Médio para Entrada Senoidal 8,8 Hz	69
6.6 - Registro Temporal das Doses para "Flicker" Constante ..	70
6.7 - Circuito Conversor A/D	71
6.8 - Circuito de Seleção de Porta do Conversor	72
6.9 - Amostragem Direta do Sinal	74
6.10 - Amostragem e Classificação em Níveis	75
6.11 - Amostragem, Integração e Análise de Dados	76
6.12 - Amostragem Direta do Sinal	77
6.13 - Classificação em Níveis da Função Seno	77
6.14 - Análise Estatística do "Flicker" Senoidal	78

Capítulo 7:

7.1 - Esquema para Teste do Regulador Automático de Ganho ...	81
7.2 - Respostas do Regulador	82
7.3 - Esquema para a Calibração	83
7.4 - Resposta em Freqüência para Filtro de Ponderação	83
7.5 - Esquema para Testes de Validação	84
7.6 - Curvas Comparativas de Limiar de Sensibilidade	84
7.7 - Calibração do Conversor A/D	85
7.8 - Característica Estática do Conversor A/D	87
7.9 - Característica Dinâmica do Conversor A/D	88

Capítulo 8:

8.1 - Sistema Supridor ao Consumidor COFAVI	90
8.2 - Doses Unitárias	92
8.3 a 8.17 - Resultados Obtidos nas 3 Séries de Medição	93
8.18 - Sistema Supridor ao Consumidor Mendes Júnior ..	101
8.19 a 8.36 - Resultados Obtidos nas 4 Séries de Medição	102
8.37 - Sistema Supridor ao Consumidor VIBASA	111
8.38 a 8.52 - Resultados Obtidos em 3 Séries de Medição Ponto 1 - VIBASA	112
8.53 a 8.67 - Resultados Obtidos em 3 Séries de Medição Ponto 2 - Estação Terminal de Taubaté	118
8.68 a 8.77 - Resultados Obtidos em 2 Séries de Medição Ponto 3 - Estação Taubaté	124
8.78 a 8.91 - Resultados Obtidos em 2 Séries de Medição Ponto 4 - Estação de Campos do Jordão	128

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo analisar o problema de cintilação luminosa ("lamp flicker") com base nos critérios analíticos de pré-determinação existentes e avaliar a metodologia de medição de tal efeito segundo a proposta para unificação de critérios, recomendada pela União Internacional de Eletrotermia (UIE).

Os métodos analíticos de pré-determinação são aplicáveis nas fases de planejamento dos sistemas elétricos de potência e de planejamento da operação, utilizando dados de projeto das futuras cargas potencialmente causadoras do efeito de cintilação luminosa.

Para a quantificação do efeito de uma carga variável sobre o sistema elétrico de potência supridor na fase de operação existem diferentes metodologias de medição, baseadas em experiências distintas e sugerindo critérios de aceitação diferentes. Todas se propõem a analisar o efeito causado pelas variações da tensão sobre o sistema de iluminação, especialmente nas lâmpadas incandescentes.

Mais recentemente, chegou-se a um consenso internacional com base na experiência de diversos países que operam grandes blocos de cargas utilizando processos eletrotérmicos, estabelecendo-se assim um padrão funcional para um sistema analógico-digital de medição que incorpora pelo menos dois importantes critérios de avaliação do efeito de cintilação luminosa.

Um protótipo de medidor com base em tal recomendação foi implementado, e suas características funcionais serão descritas neste trabalho.

No Capítulo 2 é apresentado o problema da variação de tensão no sistema elétrico, bem como características operativas das cargas que contribuem de maneira mais incisiva para tal problema.

No Capítulo 3 concentra-se a atenção no problema específico de cintilação luminosa ou efeito "lamp flicker", sua origem e quantificação.

No Capítulo 4 são discutidas as linhas básicas das metodologias mais usuais aplicáveis a estudos analíticos de pré-determinação do problema.

O Capítulo 5 descreve as metodologias de medição (avaliação do fenômeno "flicker" com base em critérios analíticos) e introduz as bases da metodologia internacional proposta.

No Capítulo 6 abordam-se as características funcionais do protótipo de medidor implementado, descrevendo-se sequencialmente as etapas do tratamento dado ao sinal de tensão a ser avaliado.

Os Capítulos 7 e 8 resumem a experiência obtida nos testes de validação do protótipo do medidor, tanto em laboratório, com sinal de "flicker" simulado, como em campo, em instalações com fornos a arco em operação.

Destaca-se ainda o interesse prático e acadêmico do assunto, já que enquanto consumidores reclamam dos efeitos desagradáveis de cintilação observados em diferentes pontos do sistema elétrico, exigindo por conseguinte, melhor qualidade do serviço prestado pelas concessionárias, as próprias concessionárias procuram investir nas soluções para o problema, seja através de métodos de mitigação do fenômeno por compensação reativa, seja por reforços no sistema elétrico através da construção de linhas ou instalação de transformadores de potência. Tais compromissos inferem diretamente na necessidade de adaptar e pesquisar métodos de medição e de pré-determinação que permitam quantificar o problema de modo efetivo, adequando melhor a relação custo x benefício para que tais investimentos assegurem níveis satisfatórios da qualidade de serviço.

CAPÍTULO 2

INFLUENCIA DE CARGAS VARIÁVEIS NA OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

Cargas industriais com ciclos variáveis, supridas através de redes de transmissão ou distribuição podem provocar flutuações de tensão, cuja intensidade e frequência dependem tanto das características da carga quanto do sistema supridor. Tais influências serão descritas a seguir, já que nos métodos analíticos de pré-determinação do efeito de cintilação luminosa esta análise será considerada.

O assunto é apresentado visando especificamente o cálculo da flutuação de tensão em pontos do sistema nos quais se manifestam os efeitos dos impactos das cargas variáveis.

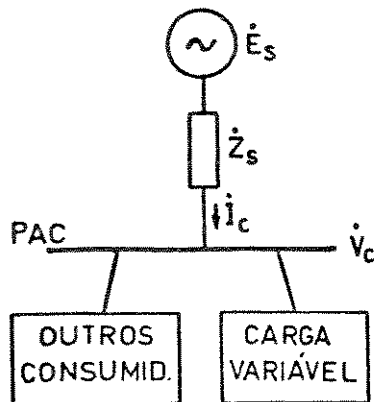
Com relação aos diversos tipos de cargas variáveis, a maior ênfase é dada aos fornos a arco elétrico, muito utilizados em processos siderúrgicos. Apresenta-se o modelo elétrico utilizado para tal carga, considerando a sua interação com o sistema supridor, além das características operativas próprias, sob o aspecto da influência do ponto de operação e implicações no sistema supridor.

São ainda abordados sumariamente neste capítulo aspectos gerais de outros tipos de cargas causadoras de flutuações de tensão que, embora de menor potência, estão mais difundidas pelo sistema, como, por exemplo, os motores industriais, e cargas de impacto, como laminadores siderúrgicos.

2.1 - Flutuação de Tensão

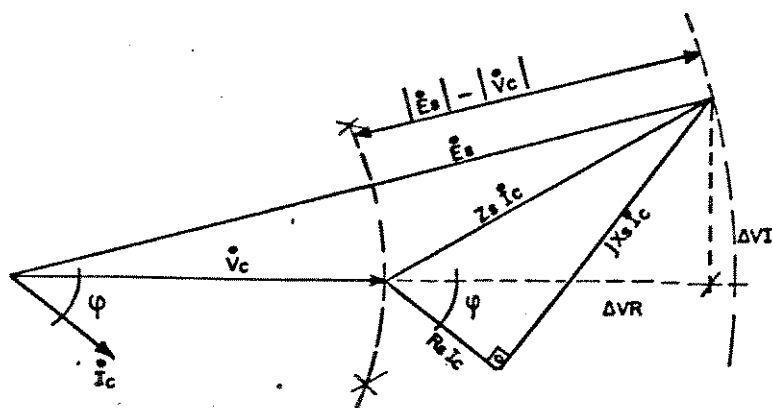
Considere-se o equivalente de Thévenin do sistema de suprimento em um ponto onde consumidores sensíveis ao efeito de cintilação possam estar eletricamente acoplados à carga variável sob análise (Fig. 2.1). Este ponto é conceitualmente definido como Ponto de Acoplamento Comum (PAC), com o objetivo de evidenciar o impacto que a carga exerce sobre consumidores próximos.

Um Diagrama Fasorial de Tensão pode então ser construído, tendo como referência a tensão \dot{V}_c no PAC (Fig. 2.2)..



PAC - Ponto de Acoplamento Comum
 \dot{E}_s - Tensão de Suprimento
 \dot{V}_c - Tensão no PAC
 \dot{i}_c - Corrente de Carga
 $P_c + jQ_c$ - Potência Aparente Absorvida pela Carga

Fig. 2.1 - Equivalente Thévenin do Sistema de Suprimento.



φ - ângulo correspondente ao fator de potência de carga.
 ΔVR - queda de tensão real
 ΔVI - queda de tensão imaginária

Fig. 2.2 - Diagrama Fasorial para o Sistema de Suprimento.

A queda de tensão no PAC é dada pela relação fasorial:

$$\Delta \dot{V} = Z_s \dot{i}_c = (R_s + jX_s) \frac{(P_c - jQ_c)}{\dot{V}_c} \quad (2.1)$$

que pode ser decomposta em parte real ΔVR e imaginária ΔVI :

$$\Delta VR = \frac{R_s P_c + X_s Q_c}{V_c} \quad (2.2)$$

$$\Delta VI = \frac{X_s P_c - R_s Q_c}{V_c} \quad (2.3)$$

Para sistemas de suprimento usuais, a abertura angular entre \dot{E}_s e \dot{V}_s dificilmente ultrapassa 10° , podendo-se aproximar ΔVR pela diferença das magnitudes das tensões:

$$\Delta VR \approx |\dot{E}_s| - |\dot{V}_c| \quad (2.4)$$

e ΔVI (pu) pela abertura angular (rd) entre as duas tensões:

$$\Delta VI \approx \angle \dot{E}_s - \angle \dot{V}_c \quad (2.5)$$

Essas aproximações permitem, em última análise, simplificar os cálculos das variáveis complexas do cálculo fasorial.

Considerando que a magnitude da tensão do sistema, E_s , permanece fixa, as variações da magnitude da tensão no PAC podem ser relacionadas diretamente com as variações da carga através da expressão (2.6), obtida de (2.2):

$$\Delta VPAC \approx \frac{R_s \Delta P_c + X_s \Delta Q_c}{VPAC} \quad (2.6)$$

e, para pequenas variações em torno de $VPAC = 1$ pu, resulta

$$\Delta VPAC \approx R_s \Delta P_c + X_s \Delta Q_c \quad (2.7)$$

Nos casos em que tanto o sistema quanto a carga forem altamente reativos, tem-se ainda que $R_s \cdot \Delta P_c \ll X_s \cdot \Delta Q_c$, ou seja:

$$\Delta VPAC \approx X_s \Delta Q_c \quad (2.8)$$

Para tais casos, esta última expressão (2.8) indica que a variação de tensão é causada essencialmente pela variação reativa da carga. Este conceito será revisto nos itens em que o comportamento da carga for analisado.

Um outro conceito importante é o que quantifica a rigidez elétrica de uma dada barra de suprimento, ou seja, o nível de curto-circuito da barra ou do PAC, dado por:

$$S_{cc} = \frac{E_s^2}{R_s - jX_s} \quad (2.9)$$

Uma vez que se supõe E_s constante, a rigidez elétrica cresce com a diminuição da impedância equivalente do sistema $\dot{Z}_s = R_s + jX_s$. Em um sistema predominantemente reativo, resulta:

$$|S_{cc}| \approx \frac{E_s^2}{X_s} \quad (2.10)$$

Substituindo (2.10) em (2.8) e considerando $E_s \approx 1$ pu, obtemos

$$\Delta VPAC \approx \frac{\Delta Q_c}{|S_{cc}|} \quad (2.11)$$

indicando que a variação da tensão no PAC corresponde aproximadamente à variação reativa da carga em unidades da potência de curto local.

Este conceito mostra que uma solução possível para se limitar variações de tensão em um dado PAC consiste em elevar o nível de curto-circuito do sistema naquele ponto, ou seja, aumentar a rigidez elétrica daquela barra.

Qualquer carga variável pode, em princípio, provocar flutuações de tensão. No entanto, as cargas com ciclos de operação excepcionalmente severos, como fornos a arco, laminadores, compressores e bombas, sistemas de tração elétrica, bate-estacas, compensadores estáticos, etc., comumente designadas como cargas especiais, são as principais causadoras de flutuação de tensão, particularmente associadas com o efeito de cintilação luminosa. O termo Flutuação de Tensão será utilizado neste texto para exprimir pequenas variações aleatórias de tensão, em torno do valor de regime da tensão de suprimento do PAC. Não são consideradas as variações lentas de tensão capazes de sensibilizar os mecanismos de regulação de tensão.

As flutuações de tensão responsáveis pelo problema da cintilação luminosa têm amplitude bastante reduzida, inferior a 1% da tensão nominal a 60 Hz e são tanto mais intensas quanto menos rígida for a barra no PAC, pois dependem inversamente do nível de curto-circuito da barra em questão.

A expressão (2.11), na verdade, relaciona a variação reativa de uma dada carga com o nível de curto-circuito do sistema no PAC. Essa variação de potência reativa da carga, para efeito de análise de flutuações de tensão, é, em geral, própria das características operacionais da carga, que de forma acíclica solicita do sistema a potência reativa variável. A expressão (2.6), por sua vez, representa também a influência da carga ativa sobre a variação da tensão, e deve ser considerada quando a parcela $R_s \cdot \Delta P_c$ se torna comparável a $X_s \cdot \Delta Q_c$.

2.2 - Cargas Variáveis

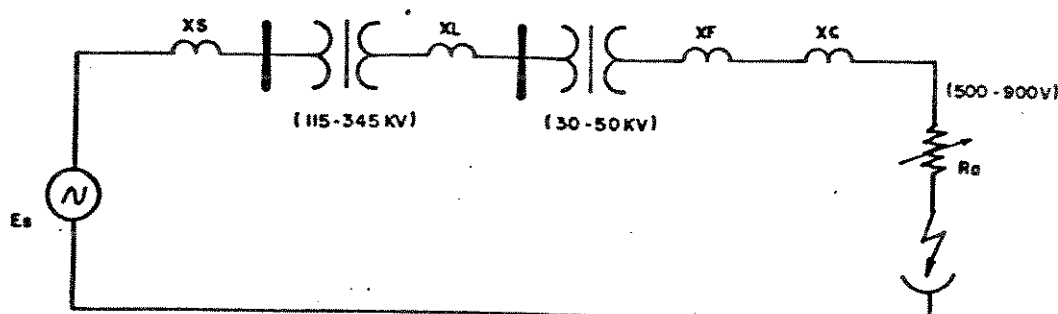
A- Fornos Elétricos a Arco

A redução da sucata de ferro através de processos eletrotérmicos, para a obtenção do aço, é feita por fornos elétricos a arco, diretos ou submersos. Tais fornos apresentam um comportamento bastante severo em termos de variações de carga para o sistema elétrico, em função do comportamento aleatório do arco elétrico durante o processo de redução.

Em termos físicos, o arco elétrico pode ser representado como uma resistência variável por fase no circuito equivalente.

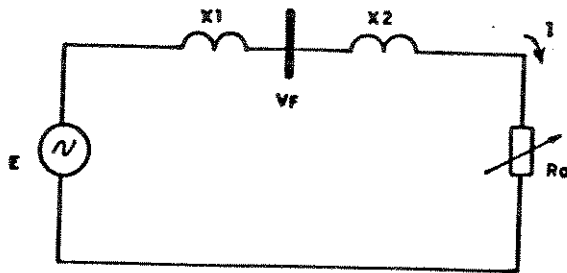
Consideram-se ainda no circuito todas as reatâncias X em série com o arco que incluem a reatância dos cabos de alimentação dos eletrodos, do transformador do forno, do transformador de entrada do consumidor e a reatância de curto-circuito da rede de suprimento.

Em geral, pode-se ignorar todas as resistências, exceto a do arco.



- XS - Reatância Equivalente do Sistema
- XL - Reatância do Transformador Principal
- XF - Reatância do Transformador do Forno
- XC - Reatância dos Cabos e outros Aparatos
- Ra - Resistência do Arco Elétrico

Fig. 2.3 - Circuito Monofásico Equivalente de Suprimento a um Forno a Arco



- E - Tensão de Circuito Aberto
 X1 - Reatância Equivalente do Sistema
 X2 - Somatória das Reatâncias em Série com o Arco
 Ra - Resistência Variável do Arco Elétrico

Fig. 2.4 - Circuito Equivalente de Thévenin de Suprimento de um Forno a Arco.

Alguns parâmetros deste circuito são controlados, como, por exemplo, o comprimento do arco elétrico e, conseqüentemente, a tensão de arco, através do movimento dos eletrodos. A tensão E é também ajustável através da mudança de derivações do transformador do forno.

Para o circuito equivalente acima, a máxima potência que pode ser transferida para a carga é dada por:

$$P_{\max} = \frac{E^2}{2X} \quad \text{por fase.} \quad (2.12)$$

O valor de Ra para a condição de máxima potência é:

$$R_a = X = X_1 + X_2 \quad (2.13)$$

A corrente correspondente à potência máxima é:

$$I = \frac{E}{\sqrt{2} X} \quad (2.14)$$

Nesta condição, a queda de tensão sobre a resistência de arco é igual à queda de tensão sobre a reatância total X, e vale:

$$\text{Varc} = \frac{E}{\sqrt{2}} \approx 0,7E \quad (2.15)$$

Os gráficos (Fig. 2.5) mostram as variações de potência do forno e outras grandezas quando Ra varia. Nestas figuras, assume-se a não-variação dos TAP's do transformador do forno, que tem as seguintes características [8]:

- Tensão de linha (rms) = 700 V
- Reatância total X = 4,04 MOhm
- Reatâncias internas do consumidor X2 = 3,23 MOhm
- Reatância equivalente do sistema X1 = 0,81 MOhm

A experiência de operação com fornos a arco direto mostra que uma estabilidade satisfatória do arco é obtida para o ponto de máxima potência. Para correntes menores que IPmax, o fator de potência é mais elevado, mas o arco é menos estável e a potência é menor. Por outro lado, uma alta corrente origina um baixo fator de potência e baixa potência, implicando em utilização anti-econômica do forno. Tais fatos implicam na vantagem da operação do forno em torno do ponto de Pmax.

Em termos operativos, um fator importante a ser considerado é o desgaste do refratário dos fornos, que, em geral, aumenta com o comprimento do arco, o qual, por sua vez, é proporcional à tensão do arco Varc.

Uma equação aproximada da tensão do arco em função do comprimento do arco é dada por:

$$\text{Varc} = K \cdot \text{larc} + 40 \text{ Vrms} \quad (2.16)$$

onde:

$$K = 11,5 \text{ V/cm}$$

larc --> comprimento do arco

Para o ponto de máxima potência, considerando (2.15) e (2.12), tem-se:

$$\text{Varc} = \frac{E}{\sqrt{2}} = \sqrt{P_{\text{max}} \cdot X} \quad (2.17)$$

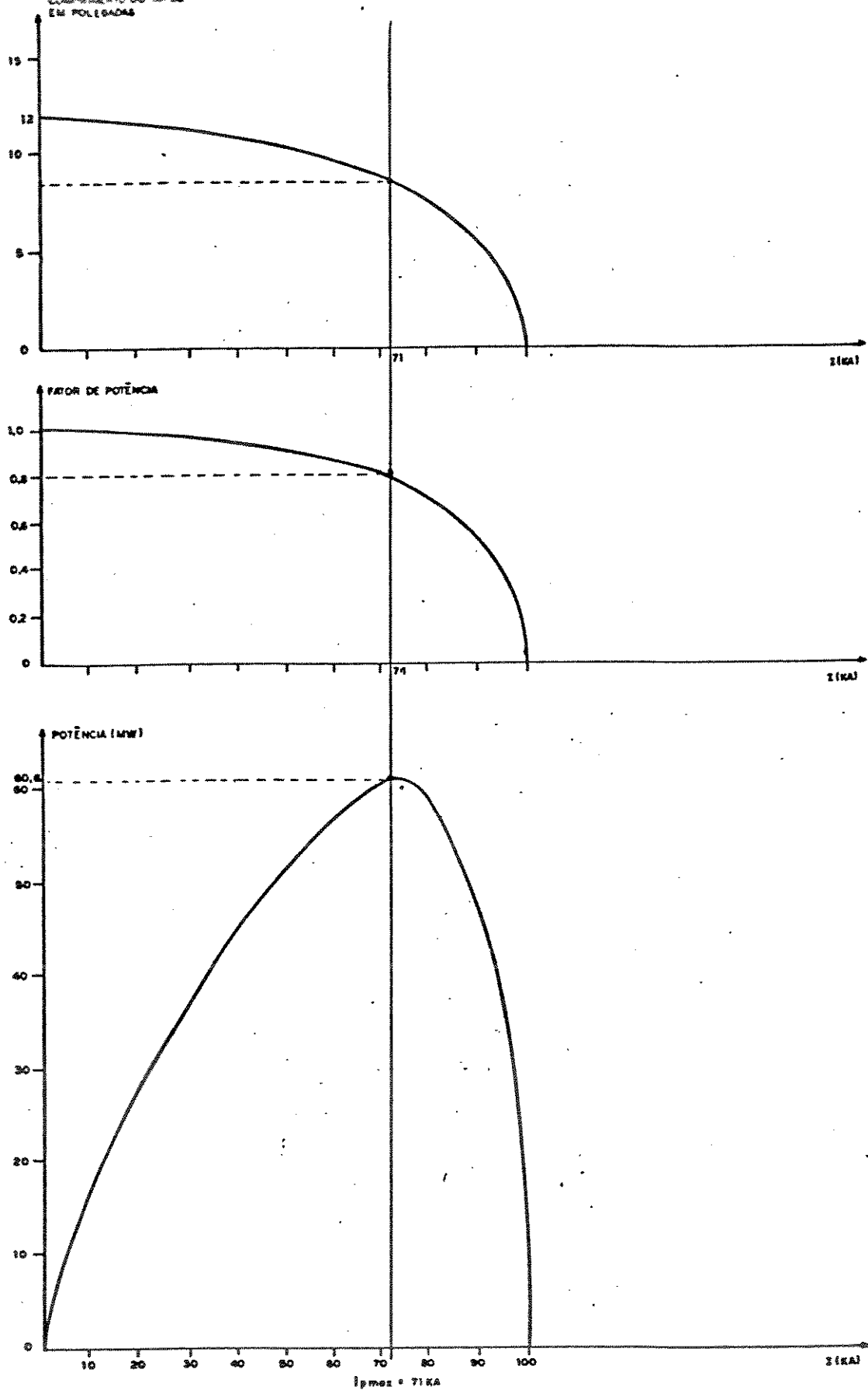


Fig. 2.5 - Característica de Operação de Fornos Elétricos a Arco

Logo, para permitir a operação em máxima potência, a reatância X deve satisfazer a condição:

$$X \leq \frac{V_{\text{arc(max)}}^2}{P_{\text{max}}} = \frac{E^2}{2 P_{\text{max}}} \quad (2.18)$$

Se X exceder este valor, a tensão de arco aumenta, podendo criar instabilidade de condução. Tal fato implica na limitação do comprimento do arco e, conseqüentemente, da tensão do arco [35].

Uma solução para o problema, ou seja, operação em torno do ponto de Pmax com arco não muito longo, de modo a não prejudicar o refratário, é manter a reatância X tão baixa quanto possível, o que pode ser obtido reduzindo-se X1 e X2 (reforçando-se o sistema supridor), ou melhorando o fator de potência por injeção local dos reativos necessários para a operação do forno, com isso aliviando a queda de tensão na rede de suprimento. Esta última solução exige o controle rápido de grandes níveis de potência reativa - da ordem da potência do forno. Os modernos Reatores Controlados por Tiristores (RTC) têm sido utilizados com sucesso nesta aplicação [11].

B - Laminadores Siderúrgicos

Outro tipo de carga variável, com ciclos bem definidos, são os laminadores siderúrgicos empregados na indústria do aço, do alumínio e de outras ligas metálicas.

Este tipo de equipamento geralmente apresenta um conjunto de motores DC alimentados através de conversores CA/CC, que executam a movimentação do trem de laminação e o desbaste da peça, com tempos de etapa bem definidos e regulares.

Os impactos da peça a ser laminada produzem na rede elétrica variações de tensão, ocasionadas pela variação do torque exigido dos grandes motores do complexo de laminação, podendo gerar níveis intoleráveis de flutuação de tensão na rede.

C - Partida de Motores

Por razões de custo, eficiência e confiabilidade, motores elétricos comerciais requerem em geral correntes de partida várias vezes maiores que sua corrente nominal, para produzir suficiente torque de partida. Tais correntes de partida, eventualmente dependendo da rigidez da barra de suprimento do sistema, podem ocasionar flutuações de tensão e, conseqüentemente, o efeito de cintilação luminosa durante o ciclo de operação.

Sob este aspecto, três classes de motores podem ser identificadas:

- 1 - Motores monofásicos, comumente utilizados em residências e pequenos comércios.
- 2 - Motores polifásicos supridos por redes de distribuição secundárias, utilizados em geral em grandes centros comerciais e instalações prediais.
- 3 - Grandes motores trifásicos, supridos por redes primárias de distribuição, utilizados em instalações industriais.

O primeiro tipo de motores não é, em geral, considerado muito problemático em termos de efeitos de corrente de partida, que, mesmo sendo proporcionalmente mais elevada, permite dimensionar o sistema de distribuição 110/220 V para absorver tais impactos.

Quanto ao segundo tipo de motores, são considerados fontes potenciais do efeito de cintilação luminosa em redes de distribuição. Em muitos casos, alguns motores são usados em áreas de alta concentração de carga e os circuitos de potência são correspondentemente grandes. Em alguns casos, todavia, o tamanho do motor não está adequado à capacidade do sistema supridor. Em geral, utilizam-se mecanismos do tipo resistores de pré-inserção, de modo a restringir a corrente de partida de forma adequada aos níveis permissíveis de flutuação de tensão.

No terceiro caso, em que grandes motores são supridos por circuitos primários de distribuição em redes industriais, admitem-se maiores variações de tensão devido à maior inércia das máquinas, que por si só restringe a frequência de partidas e paradas.

Correntes de partida para motores de indução ou síncronos variam em geral entre 5 e 10 vezes a corrente nominal a plena carga, dependendo do tipo de enrolamento e das condições de partida (com ou sem carga), produzindo um impacto severo sobre a tensão de suprimento.

D - Motores de Carga Cíclica

Este tipo de carga é associado usualmente com compressores, bombas e refrigeradores. A carga do motor varia ciclicamente com cada solicitação de potência, produzindo uma correspondente variação da corrente de linha. Assim, pequenas variações de tensão devem ser analisadas quando ocorrem na faixa de frequência considerada crítica em termos de cintilação luminosa, como será visto no capítulo a seguir.

CAPÍTULO 3

"LAMP-FLICKER" - O EFEITO DE CINTILAÇÃO LUMINOSA

Conforme apresentado no Capítulo 2, flutuações de tensão associadas com ciclos de cargas variáveis, constituem-se em causa da ocorrência do efeito de cintilação luminosa. Lâmpadas de filamento (incandescentes) são consideradas universalmente como os melhores sensores para a avaliação desse fenômeno, embora diversos outros equipamentos sejam sensíveis às variações da tensão, tais como eletrodomésticos, instrumentação eletrônica, sistemas de computação e sistemas de controle de processos industriais em geral.

Neste capítulo são discutidos os aspectos do relacionamento entre as variações de tensão e os limiares de percepção visual das alterações na luminosidade emitida por lâmpadas incandescentes alimentadas com essa tensão variável. Através desse relacionamento, serão estabelecidos os métodos e critérios de avaliação do nível de cintilação observado em um sistema elétrico.

Utilizando os conceitos de modulação de tensão e da gradação da percepção do olho humano às variações de luminosidade em função da frequência, chega-se à definição quantitativa do efeito observado.

Sob o aspecto de padronização para avaliação do fenômeno, também neste trabalho se adotou a lâmpada de filamento como referência para a quantificação da cintilação luminosa, sendo portanto necessário analisar a influência da inércia térmica dos filamentos nas variações da luminosidade produzida.

3.1 - Caracterização do Efeito de Cintilação Luminosa

Cintilação luminosa é o efeito subjetivo associado à percepção do olho humano às variações de intensidade luminosa, devido a flutuações de tensão aplicadas ao filamento de lâmpadas.

A variação luminosa é decorrente da variação de energia elétrica dissipada pela lâmpada e, portanto, acompanha as variações na amplitude da tensão de alimentação. A resposta do sistema olho-cérebro humano limita a sensibilidade visual a uma faixa espectral de 0-30 Hz, de forma que as variações na frequência da rede (50-60 Hz) já não são percebidas.

O efeito da variação da amplitude da tensão de alimentação, ou seja, da flutuação da tensão, pode ser analisado através do princípio da modulação de sinais.

3.2 - Modulação da Tensão

A Fig. 3.1 mostra uma tensão alternada, cuja amplitude é modulada por um sinal senoidal:

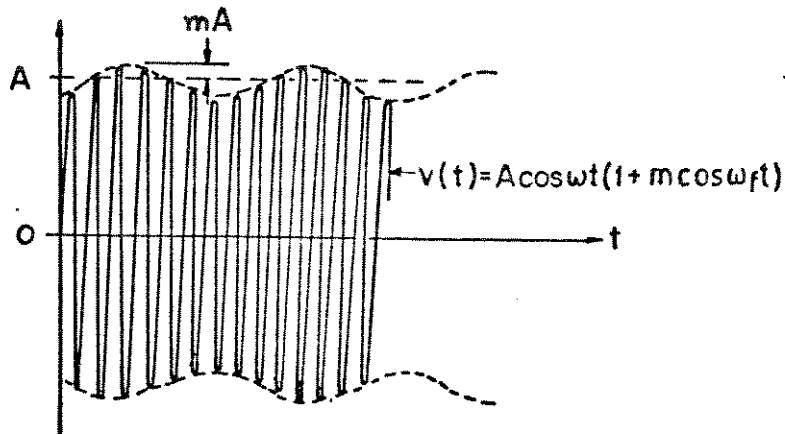


Fig. 3.1 - Tensão com Modulação Senoidal

De acordo com o princípio de modulação, a tensão modulada ou portadora vale:

$$V = A \cos wt \quad (3.1)$$

enquanto que o sinal modulador vale:

$$V_m = mA \cos w_f t \triangleq \Delta V \cos w_f t \quad (3.2)$$

onde m é chamado índice de modulação e w_f a frequência modulante.

A variação percentual da tensão pode ser expressa em valor de pico ou RMS, como sendo:

$$\frac{\Delta V(\%) }{V} = \frac{\Delta V_{rms}(\%) }{V_{rms}} = \frac{mA}{A} \times 100 = m(\%) \quad (3.3)$$

ou seja, a variação percentual da tensão corresponde ao índice percentual de modulação.

No caso real de "flicker", o sinal modulante não é senoidal com frequência constante e amplitude constante, mas sim aleatório em termos de amplitude e frequência.

3.3 - Sensibilidade Visual

A percepção da variação luminosa devido à flutuação de tensão depende do nível de sensibilidade visual, verificado experimentalmente. Alguns métodos de análise não consideram tal sensibilidade, o que implica em critérios distintos para tais análises.

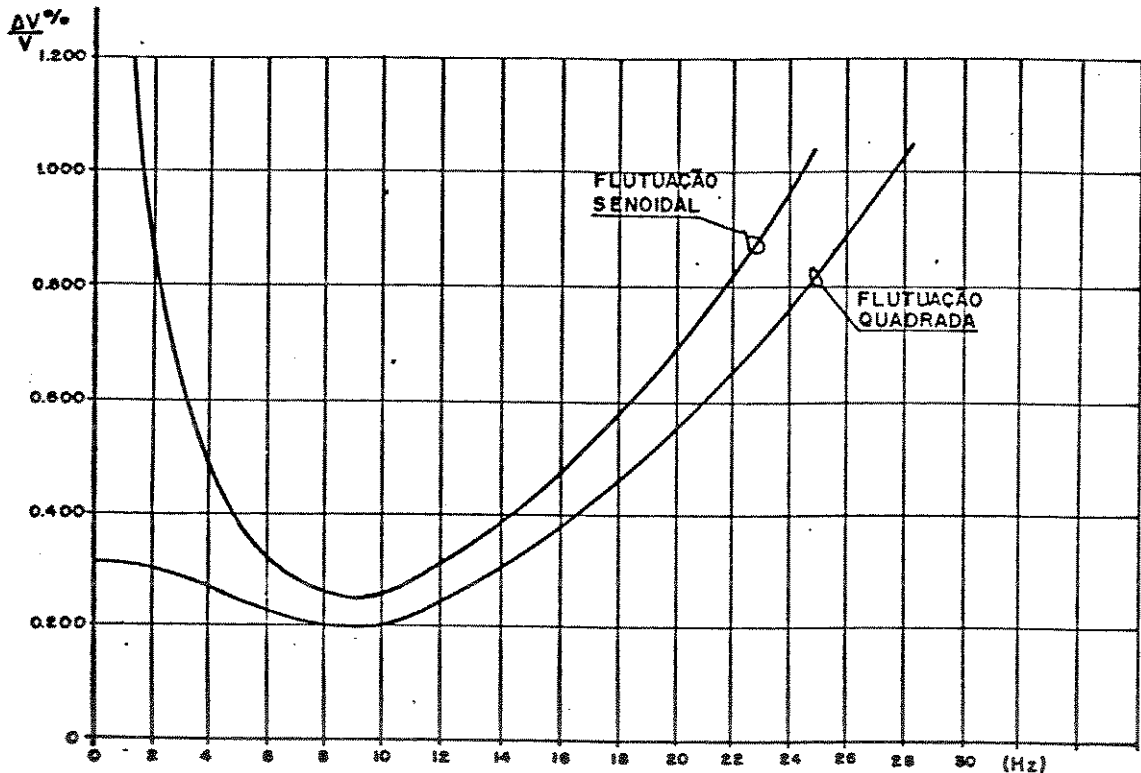


Fig. 3.2 - Limiar de Percepção do "Flicker"

Através de séries de ensaios, constatou-se que a sensibilidade é maior para variações bruscas. Padronizaram-se então, para fins de calibração de medidas, duas curvas representando o limiar de percepção visual para flutuações senoidais e de onda quadrada, mostradas na Fig. 3.2.

Verifica-se pelas curvas que variações bruscas de 0,3% são perceptíveis mesmo para intervalos grandes de tempo. As variações graduais permitem a acomodação visual e, portanto, não provocam o mesmo nível de irritação visual.

3.4 - Influência da Inércia Térmica de Filamentos

O filamento metálico de lâmpadas incandescentes é aquecido pela passagem da corrente elétrica, a uma temperatura selecionada por um compromisso entre a maior luminosidade de saída possível e a vida útil do equipamento.

O olho humano atua como um sensor da luz emitida pela lâmpada aplicando um mecanismo de filtragem ajustado para uma distribuição espectral de intensidade, conforme apresentado no item anterior.

Quando uma lâmpada é operada na tensão nominal, estabelece-se um regime para potência e corrente em que a temperatura da resistência do filamento é função do material do filamento. Nesta situação é irradiada luz visível e um substancial montante de calor.

Quando a tensão de operação oscila entre valores de mais ou menos 0,5%, por exemplo, existe um curto intervalo de tempo de transição, de alguns ciclos de 60 Hz, para que uma nova condição de regime seja estabelecida. O efeito de mudanças de valor de regime em lâmpadas de filamentos típicos é mostrado pela Fig. 3.3. Os dados são baseados em lâmpadas de 40, 60 e 100 watts, 120 V (110 e 220 V dão resultados semelhantes)[22].

A Fig. 3.3 mostra ainda que, para variações de tensão de +0,5%, a resistência do filamento, que varia com a temperatura, oscila na faixa de $\pm 0,25$ %. A potência (watts) da lâmpada varia de mais ou menos 0,76 %. Se a resistência se mantivesse constante, a potência deveria variar de mais ou menos 1 %, como apontado na Figura. A maior variação acontece para a luz emitida pela lâmpada, na faixa de $\pm 1,75$ %.

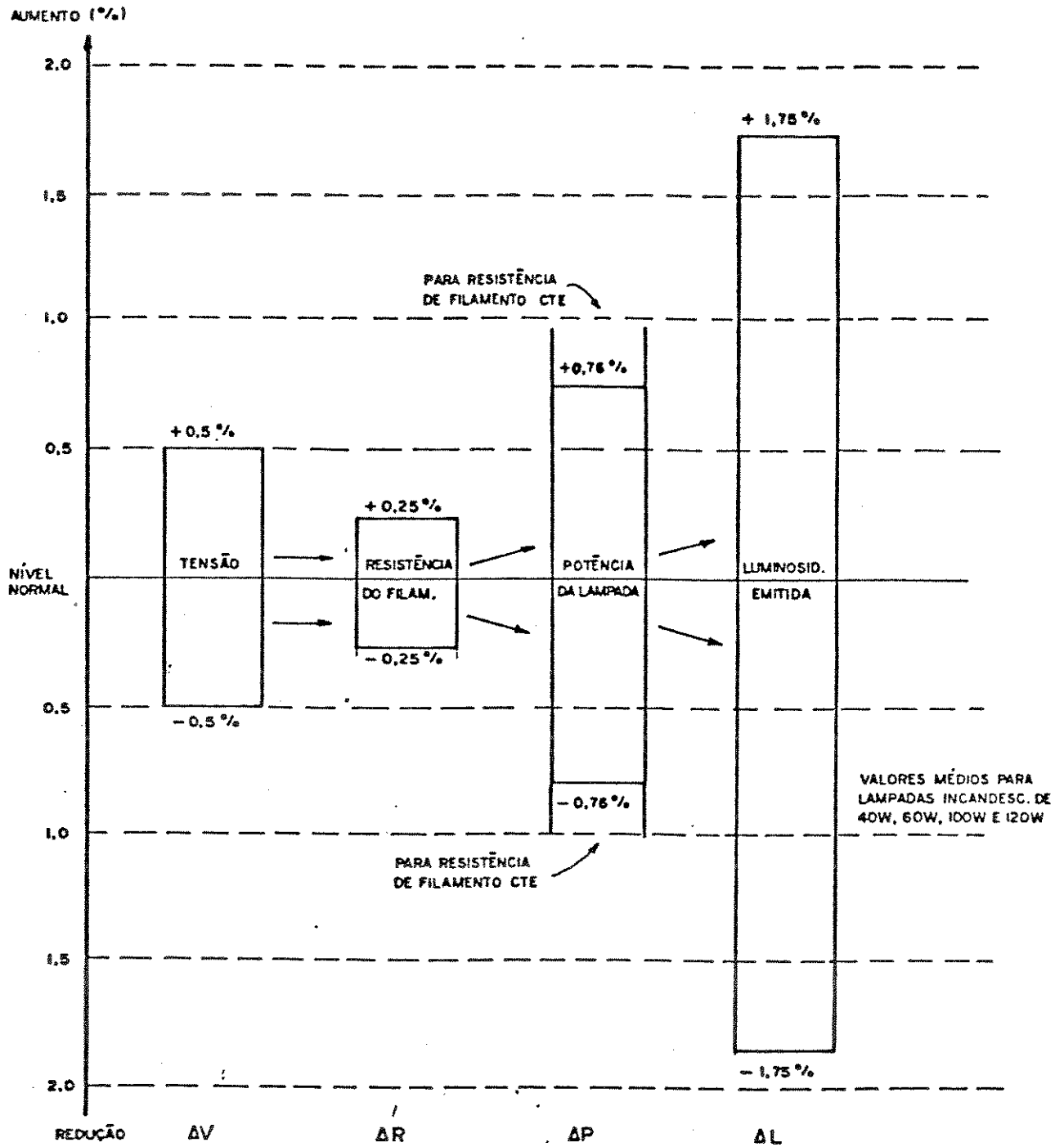


Fig. 3.3 - Efeito de Pequenas Variações de Tensão sobre o Filamento de Lâmpadas Incandescentes

CAPÍTULO 4

MÉTODOS ANALÍTICOS DE PRÉ-DETERMINAÇÃO DO EFEITO DE CINTILAÇÃO LUMINOSA

Nas últimas duas décadas, muitos critérios analíticos de pré-determinação do efeito de cintilação luminosa foram propostos nos países altamente industrializados, cujas concessionárias de energia elétrica tiveram sensíveis aumentos de aplicação de cargas variáveis por consumidores de grande porte. Fornos elétricos a arco foram, sem dúvida, as que ocuparam um importante segmento do mercado das empresas concessionárias daqueles países, em função mesmo das políticas de incentivo à utilização de processos eletrotérmicos em substituição aos derivados de petróleo, cada vez mais escassos e caros.

Entre os métodos mais difundidos a nível internacional estão o inglês, proposto pela "Electrical Research Association" (ERA) [5] e o francês, através da "Electricité de France" (EdF) [2]. Tais métodos propõem critérios distintos para cálculos de pré-determinação do efeito que uma dada carga (forno a arco) poderia ocasionar no sistema quando entrasse em operação, sendo portanto bastante difundidos a nível de planejamento do sistema, com grande antecedência de entrada de carga, e de planejamento de operação, já em uma fase imediatamente anterior à entrada em operação da referida carga.

Conforme já comentado no início deste trabalho, todos os métodos tiveram como base a experiência operativa de empresas concessionárias dos respectivos países, sendo que numa fase posterior tornou-se inevitável a concepção de sistemas de medição que pudessem quantificar tal efeito de cintilação luminosa, à luz dos referidos critérios. Foi então que alguns sistemas foram concebidos, mesmo a nível de protótipo, mantendo-se a fidelidade aos critérios analíticos acima mencionados.

Nos anos 80, uma comissão de representantes da maioria destes países através da UIE, União Internacional de Eletrotermia, decidiu pela unificação de tais critérios de medição, propondo os blocos funcionais de um sistema que contemplasse tal consenso internacional. Este protótipo será descrito nos itens posteriores, em detalhes.

Nos itens que se seguem serão descritos os dois critérios de pré-determinação acima colocados, que serviram de base para o protótipo internacional.

4.1 - Método Inglês - ERA (Electrical Research Association)

O método inglês estabeleceu em abril de 1960, para todas as empresas concessionárias de energia elétrica da Grã-Bretanha, uma metodologia única para análise e pré-determinação do efeito de cintilação luminosa, causado por fornos a arco. Em julho de 1970 foi publicado o documento "Engineering Recommendation - P/7-2", com esclarecimentos da metodologia, o qual serviu como base para o estabelecimento de limites e critérios no Brasil [7].

4.1.1 - Bases Experimentais do Método

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

- a - idade da pessoa exposta;
- b - tempo de exposição;
- c - intensidade do fenômeno;
- d - níveis de reclamação (quantidade de reclamantes);
- e - irritabilidade das pessoas expostas;
- f - outros.

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 elétricos a arco.

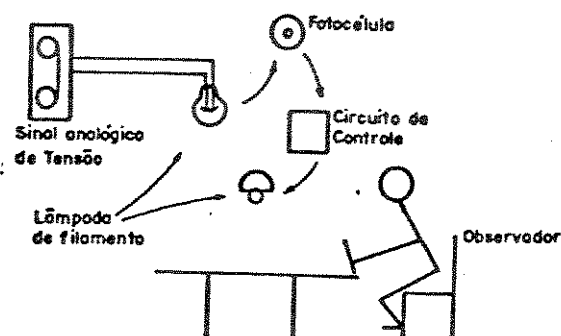


Fig. 4.1 - Testes de Efeito "Flicker" sobre seres humanos

Desse modo, o observador ficou sujeito a condições próximas às reais do campo, sendo que era disponível um sistema de controle de intensidade do efeito.

Flutuação de Tensão

O conceito de flutuação de tensão já foi tratado no Capítulo 3; entretanto, recorre-se à Fig. 4.2 com o objetivo de definir matematicamente tal conceito, que será abordado na metodologia inglesa.

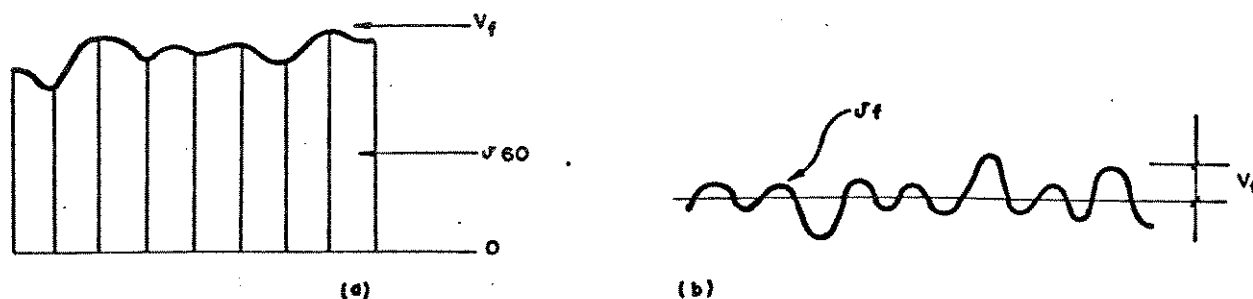


Fig. 4.2 - Flutuação de Tensão

O valor instantâneo v_{60} de tensão de 60 Hz é modulado por um sinal randômico (flutuação de tensão) v_f . Tal modulação pode ser tratada separadamente, conforme a Fig. 4.2 (b), sendo que para períodos de tempo de minutos esta flutuação de tensão v_f pode ser expressa pelos valores eficazes (Rms) da onda aleatória. A estes valores eficazes (Rms) atribui-se a simbologia V_f . Por questões de conveniência, tanto v_f quanto V_f são expressos em porcentagem do valor eficaz de tensão de 60 Hz.

Resultados de Testes

Considerando-se o parâmetro V_f (valor eficaz da tensão de flutuação durante curtos intervalos de tempo), foram realizados os testes acima descritos, objetivando a verificação das diferentes reações das pessoas submetidas a tais testes em função dos níveis de V_f .

Após uma série de ensaios, foram obtidos resultados que caracterizaram a reação das pessoas ao fenômeno em função de sua intensidade, conforme a tabela a seguir:

V_f (%)	Reação
0,20	apenas perceptível (não incomoda)
0,25	óbvio, claramente perceptível (não incomoda)
0,30	desconfortável ou intolerável
>0,30	intolerável

Para correlacionar os níveis de flutuação de tensão com o tempo que as pessoas estariam expostas ao fenômeno, utilizou-se o conceito da função de probabilidade cumulativa "FPC".

Análise Estatística

Considera-se que os valores de Vf obtidos para curtos intervalos de tempo, por exemplo 1 minuto, apresentam uma distribuição aproximadamente normal (Gaussiana), obtendo-se a Função de Probabilidade Cumulativa (FPC) a partir da integração da função de distribuição de probabilidade.

Na Fig. 4.3 aponta-se a probabilidade de ocorrência $P(X_1)$ de um valor genérico ($V_f = X_1$) para uma distribuição normal de média (μ) e desvio padrão (σ).

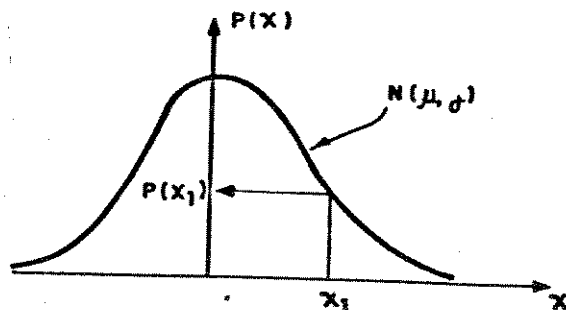


Fig. 4.3 - Curva de Distribuição Normal

A Fig. 4.4 mostra a probabilidade deste mesmo valor (X_1) não ser ultrapassado, ou seja $P(X < X_1)$, cujo valor é dado pela área abaixo da curva.

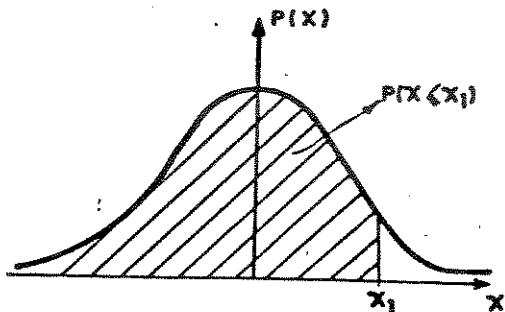


Fig. 4.4 - Probabilidade de um Certo Valor Não Ser Ultrapassado

Tal probabilidade pode ser expressa pela curva da função de probabilidade cumulativa (FPC), em que os valores de X são correlacionados à probabilidade dos mesmos não serem ultrapassados, Fig. 4.5. A função complementar ($1 - FPC$) indica a probabilidade de que os valores de X ultrapassem o valor especificado X_1 .

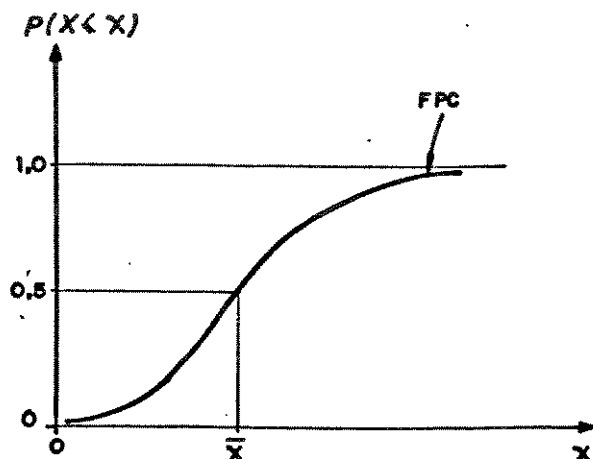


Fig. 4.5 - Função Probabilidade Cumulativa

A Fig. 4.6 apresenta a função de probabilidade complementar para o caso de um conjunto de valores de V_f s, amostrados em intervalos regulares de tempo Δt , sendo que \bar{V}_f corresponde ao valor médio obtido para o conjunto dos valores amostrados. Uma vez que a amostragem é realizada em intervalos regulares de tempo, pode-se interpretar as funções de probabilidade cumulativas como curvas de duração e expressar os eventos através de porcentagem do tempo de observação. Assim a função de probabilidade complementar ($1 - FPC$) expressa a proporção do tempo em que valores discretos de V_f são ultrapassados.

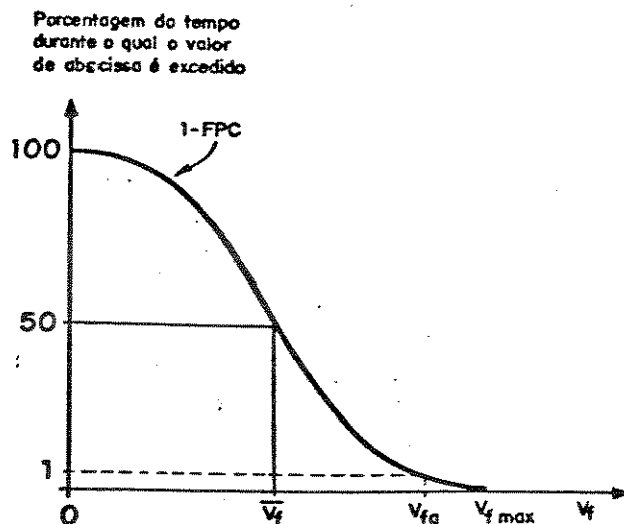


Fig. 4.6 - Função Probabilidade Cumulativa Complementar

Em termos de regulamentação, estabeleceu-se que o valor de $V_f = 0,25\%$ não deve ser ultrapassado por mais de 1% do tempo total de operação do forno, tempo que pode ser considerado como sendo o de um ciclo de operação, ou de vários ciclos consecutivos que totalizem, por exemplo, 24 horas. Este valor recebeu a denominação de "Gauge-point Voltage" - V_{fg} .

Para sistemas de tensão superior a 138 kV, adotou-se como limite o valor de Vfg = 0,20%, em função da possibilidade da existência de diversas fontes poluidoras contribuindo para o aumento de intensidade do efeito nos sistemas de tensões superiores, além da necessidade de maior controle do fenômeno em função da área sob influência.

4.1.2 - Metodologia Aplicada à Instalação de um Único Forno a Arco

A pré-determinação do valor de Vfg baseia-se essencialmente no conhecimento do nível de curto-circuito local, das características elétricas do forno e do regime de operação do mesmo.

Experiências mostraram que as magnitudes das flutuações de corrente que causam o efeito "flicker" são relacionadas à potência de curto-circuito dos fornos quando os eletrodos são mergulhados no material fundido, considerando o transformador do forno operando na posição do "TAP" de tensão máxima. Em casos práticos, a potência máxima de curto-circuito pode ser obtida por testes ou por cálculo. Assim, se a potência de curto-circuito do forno é Sf (MVA), e a potência de curto-circuito no ponto de acoplamento do forno a arco com outros consumidores for Scc (MVA), então o nível da queda de tensão no ponto de acoplamento comum pode ser dado por:

$$\Delta V = \frac{Sf}{Scc} \times 100 (\%) \quad (4.1)$$

A quantidade ΔV (%) corresponde à queda de tensão na condição de curto-circuito do forno acima descrita. A quantidade Sf pode ser calculada com base em dados característicos do forno e das instalações do mesmo. Assim sendo, considerando-se Xa como a reatância do forno na base 100 MVA, Xs a reatância do sistema também na base 100 MVA e Xb a reatância entre o ponto onde se pretende calcular a queda de tensão ΔV e o forno, incluindo todas as transformações intermediárias, também na base (100 MVA), e tensão de alimentação 1 pu, resulta:

$$Sf = \frac{100}{Xa+Xb+Xs} \text{ (MVA)} \quad (4.2)$$

De acordo com (4.1), o valor ΔV é um valor bem determinado analiticamente. Para obter o quantificador de "flicker" Vfg, valor estatístico que envolve a consideração de parâmetros característicos da operação e do tipo de forno em estudo, definiu-se um fator empírico que contempla tais características de natureza aleatória.

Tal fator é denominado fator de severidade "Ks" e o relacionamento de Vfg com ΔV é dado por:

$$Vfg = Ks\Delta V$$

(4.3)

O valor Ks considera variáveis tais como tipo de sucata utilizada, característica de projeto do forno, modos de operação, etc. A faixa típica de valores de Ks situa-se entre 0,09 e 0,15, com valor médio de 0,12.

Em termos de limites, o valor correspondente para queda de tensão ΔV , considerando Ks = 0,12 (médio) e Vfg = 0,25% para Vn \leq 138 kV e Vfg = 0,2% para Vn > 138 kV seria:

$$\begin{aligned} \Delta V &= 2\% \text{ para } Vn \leq 138 \text{ kV} \\ \Delta V &= 1,6\% \text{ para } Vn > 138 \text{ kV,} \end{aligned}$$

sendo que tais limites podem ainda ser apresentados sob a forma:

$$\begin{aligned} Scc &\geq 50 \text{ Sf para } Vn \leq 138 \text{ kV} \\ Scc &> 63 \text{ Sf para } Vn > 138 \text{ kV} \end{aligned}$$

4.1.3 - Metodologia Aplicada à Instalação Multifornos [7]

Conforme descrito anteriormente, a flutuação de tensão pode ser analisada graficamente em termos de probabilidade percentual de um determinado nível de ΔV ser ultrapassado. As Figuras 4.5 e 4.6 mostram esta forma de análise através da curva de função de probabilidade cumulativa (FPC).

A premissa básica desta metodologia considera que fornos a arco apresentam aproximadamente funções de probabilidade cumulativas (FPC's) semelhantes, sendo que as diferenças entre os fornos aparecem nos valores de Vfg, associado a 1% de probabilidade de ocorrência.

Considere-se, arbitrariamente, uma FPC com Vfg = 1% como uma distribuição de referência, já que a análise de instalação multifornos busca a verificação da variação relativa do valor do Vfg total da instalação quando do acréscimo de um ou mais fornos no mesmo ponto da rede elétrica.

Pode-se calcular os valores de Vfg para, por exemplo, três fornos, tendo como base o valor de referência Vfg1 = 1pu. Assim:

$$Vfg \ 1 = \frac{Vfg1}{Vfg1} = 1pu$$

$$Vfg \ 2 = \frac{Vfg2}{Vfg1}$$

$$Vfg \ 3 = \frac{Vfg3}{Vfg1}$$

(4.4)

O problema da combinação de várias FPC's pode ser resolvido utilizando-se uma aproximação matemática. Tal processo consiste em definir uma curva de FPC de referência em termos de um valor chamado momento estatístico. Assim, sendo

$$x = Vf^2$$

$$F(x) = \text{FPC de } Vf^2$$

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad (\text{densidade de distribuição de } Vf^2)$$

O momento estatístico é definido matematicamente por:

$$M = \int x f(x) dx \quad (4.5)$$

Para o caso de 3 fornos, os momentos podem ser calculados por:

$$\begin{aligned} M1 &= 0,1638 \sum_i Vf_i^2 \\ M2 &= 0,0485 \sum_i Vf_i^4 \\ M3 &= 0,0239 \sum_i Vf_i^6 \end{aligned} \quad (4.6)$$

sendo \overline{Vf}_i o valor de Vf do forno i referido, com $Vf_1 = 1,0$.

Em seguida calcula-se o número b que relaciona $M2$ com $M3$ através de:

$$b = \frac{M3^2}{M2^2} \quad (4.7)$$

O passo seguinte é a obtenção do fator de distensão c , através do gráfico abaixo:

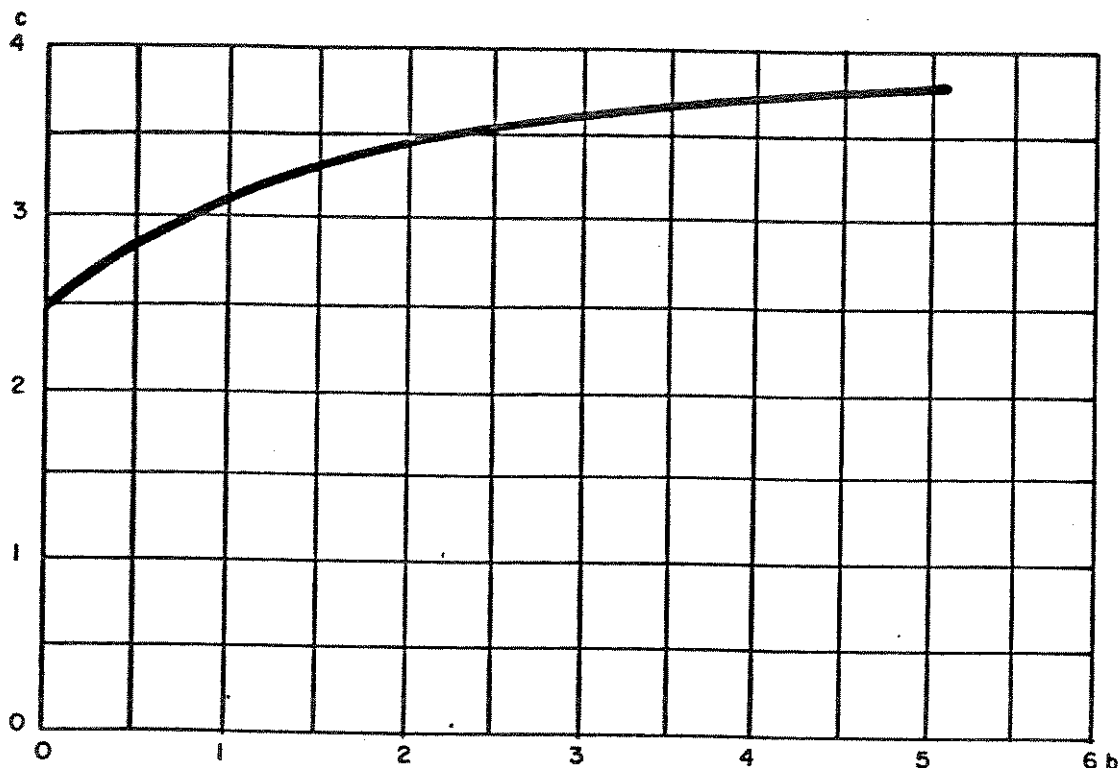


Fig. 4.7 - Fator de distensão c versus b

Finalmente, o padrão de variação de tensão resultante, expresso em pu do valor de V_{fg} é calculado por:

$$\overline{\overline{V_{fgr}}} = \sqrt{V_{M1} + c \sqrt{V_{M2}}} \quad (4.8)$$

O valor absoluto de V_{fgr} é então determinado por:

$$V_{fgr} = \overline{\overline{V_{fgr}}} * V_{fgl} \quad (4.9)$$

- Método de Jenkin

O método de Jenkin consiste numa fórmula empírica para cálculo do valor V_{fgr} para instalações multifornos, fornecendo resultados com erros de $\pm 1\%$ para instalações com menos de 6 fornos e de $\pm 3,5\%$ para instalações de 6 a 8 fornos.

$$V_{fg} = \frac{98 + N}{100} \sqrt[4]{\sum_{i=1}^4 (V_{fqi})^4} \quad (4.10)$$

onde N é o número de fornos.

Tal fórmula evidencia o fato de que em instalações onde um forno tem potência igual a duas vezes ou mais a potência de cada um dos outros a presença destes últimos pode ser simplesmente ignorada.

4.1.4 - Metodologia Aplicada à Composição de Efeitos de Fornos a Arco Supridos em Diferentes Pontos do Sistema Elétrico

Caso existam fornos localizados em diferentes pontos do sistema elétrico, a variação de tensão em um determinado ponto pode ser calculado a partir das impedâncias de transferência entre este ponto e os pontos de origem dos distúrbios.

Assim, o efeito de um distúrbio que se transfere de um ponto para outro do sistema pode ser calculado através de um fator que é o quociente da impedância de transferência entre os dois pontos pela impedância própria no ponto de distúrbio. Ou seja, considerando Z_{ab} a impedância de transferência entre o ponto do sistema, objeto de estudo, e o ponto onde está localizado o forno, e Z_{bb} a impedância própria no ponto do distúrbio (forno), tem-se:

$$cd = \frac{Z_{ab}}{Z_{bb}}, \text{ sendo } cd \text{ designado "coeficiente de distúrbio"}$$

Para exemplificar, suponha-se que exista um forno instalado no ponto A e outro no ponto B, e que os padrões de variação de tensão (V_{fg} 's) destes fornos sejam, respectivamente, $V_{fg}(A)$ e $V_{fg}(B)$.

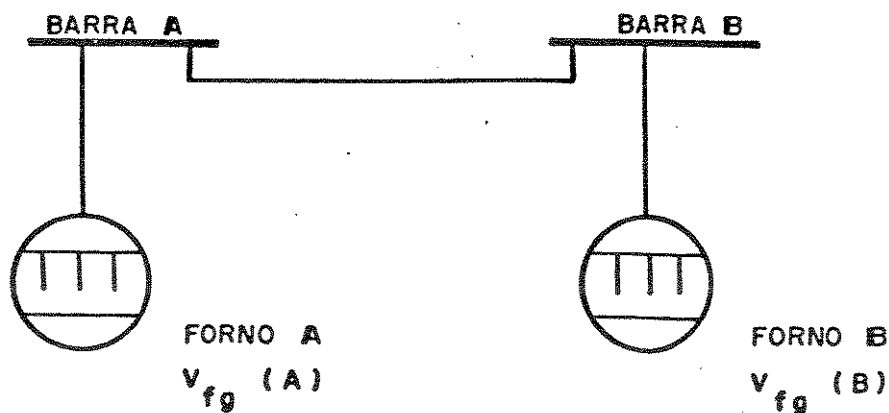


Fig. 4.8 - Diagrama Esquemático - Fornos em Pontos Distantes

A submatriz da matriz Zbus do sistema para os barramentos A e B é:

$$Z_{bus} = \begin{bmatrix} Z_{AA} & Z_{AB} \\ Z_{BA} & Z_{BB} \end{bmatrix}$$

Para se determinar, por exemplo, o padrão de variação de tensão V_{fg} resultante no ponto A, deve-se inicialmente calcular o padrão de variação de tensão do forno instalado em B, referido à barra A:

$$V'_{fg} (B) = V_{fg} (B) \cdot cd \quad (4.11)$$

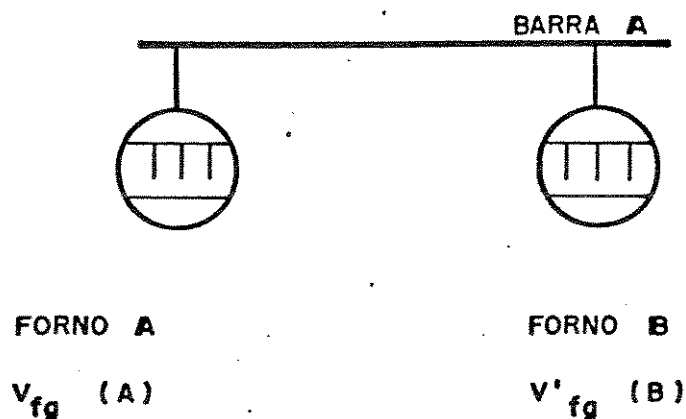


Fig. 4.9 - Diagrama Esquemático - Fornos em Pontos Distantes Equivalentes

Os Apêndices A e B ilustram o exposto através de exemplos numéricos.

4.2 - O Método Francês

O trabalho elaborado por P. Meynaud para a União Internacional de Eletrotermia - UIE [4] resume a metodologia francesa para análise de perturbação de tensão (efeito "flicker") em pontos quaisquer de uma rede elétrica. Tal metodologia baseou-se em uma série de experimentos e hipóteses confirmadas através de ensaios em redes.

4.2.1 - Bases Experimentais do Método

O método baseia-se no princípio de que as sensações fisiológicas devidas ao fenômeno "flicker" dependem das seguintes grandezas:

- 1 - amplitude da flutuação de tensão;
- 2 - frequência que caracteriza a forma de onda das flutuações de tensão;
- 3 - duração da perturbação,

sendo que, para a frequência base de 50 Hz (França), verificou-se que a máxima sensibilidade ocorre quando a frequência de modulação está em torno de 10 Hz. Para tanto, o método prevê a ponderação dos valores de flutuação de tensão através da curva de ponderação em frequência (Fig. 4.10) que, analiticamente, pode ser expressa por:

$$a_{10} = \sqrt{\sum_i a_i^2 g_i^2} \quad (4.12)$$

onde:

- a_{10} - amplitude equivalente para frequência de máxima sensibilidade (10 Hz);
- a_i - amplitude de modulação na frequência f_i ;
- g_i - coeficiente de ponderação correspondente a f_i .

O conceito de "dose de flicker", que se exprime em $(\%)^2$ minuto, considera a variação instantânea de tensão ponderada pela frequência, acumulada durante um determinado período de tempo. Tal conceito pode ser comparável à variação de energia consumida por uma lâmpada num intervalo de tempo pré-estabelecido, já que este integra o valor quadrático da amplitude de tensão no tempo, através da expressão:

$$G = \int_0^T (a_{10})^2 dt \quad (4.13)$$

onde:

G - dose de "flicker" por minuto;
T - 1 minuto;
a₁₀ - amplitude equivalente ponderada

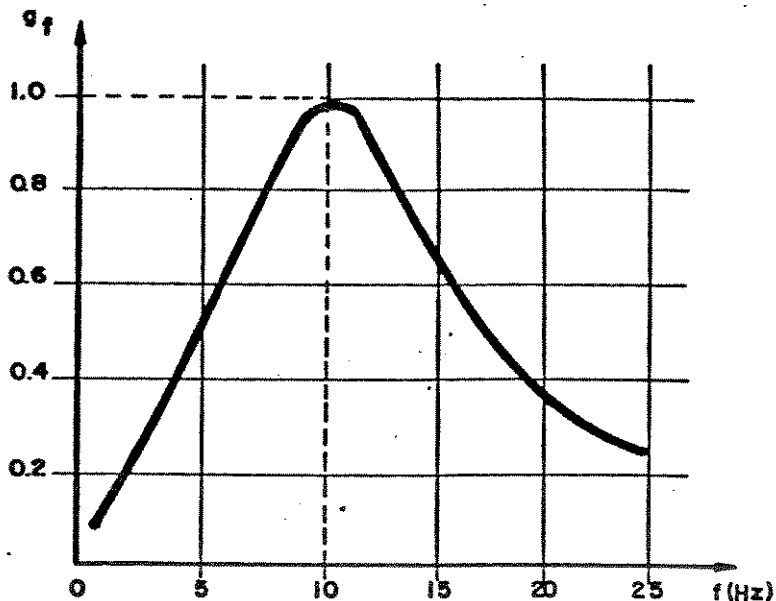


Fig. 4.10 - Curva de Ponderação

Ainda sob o ponto de vista analítico, no caso em que um determinado forno a arco é alimentado por uma rede cuja potência de curto-circuito pode ser vista como o inverso de uma reatância pura, a queda de tensão verificada em um ponto qualquer do sistema pode ser expressa diretamente pela equação 2.11 (Capítulo 2):

$$\frac{\Delta V}{PAC} \approx \frac{\Delta Q}{|S_{cc}|} \quad (4.14)$$

Tal expressão pode ser escrita ainda

$$\frac{\Delta V}{PAC} \approx \frac{\Delta Q}{V_n \cdot I_{cc}} \quad (4.15)$$

onde: V_n - tensão nominal eficaz do sistema;
 I_{cc} - corrente de curto-circuito.

Logo,

$$\Delta V \approx \frac{\Delta Q}{2} = \frac{x_s \Delta Q}{2 V_n} \quad (4.16)$$

onde: x_s - reatância de curto-circuito do sistema supridor.

Desta forma, o método francês exprime a flutuação de tensão a_{10} por:

$$a_{10} = \sqrt{\sum_i g_i^2 \left| \frac{x_s \Delta Q_i}{2 V_n} \right|^2} \quad (4.17)$$

e a dose unitária de "flicker" por:

$$G = \int_0^T \sum_i g_i^2 \left| \frac{x_s \Delta Q_i}{2 V_n} \right|^2 dt \quad (4.18)$$

onde: x_s - reatância de curto-circuito da rede de suprimento;
 ΔQ_i - amplitude da variação de potência reativa na frequência f_i , instantânea;
 T - tempo de integração (1 minuto).

4.2.2 - Método de Pré-Determinação

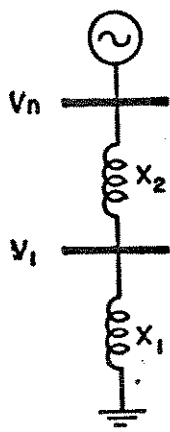
Generalidades

Após vários anos de medições de doses de "flicker" em redes supridoras de fornos a arco, obteve-se uma razoável quantidade de informações recursivas, que permitiram adotar uma relação simples, possibilitando a pré-determinação das doses de "flicker" com base em dados típicos de equipamentos (fornos a arco), susceptíveis à imposição de tais fenômenos sobre a rede elétrica.

Para tanto, foi elaborada uma tabela, onde estão previstos dados típicos de instalação, tais como características elétricas de redes de alimentação de fornos a arco, de seus transformadores de alimentação, bem como resultados de medições de doses de "flicker".

Princípios Gerais

A seguir serão apresentados os princípios gerais de aplicação do Método Francês para um Ponto de Acoplamento Comum com tensão V_1 . De uma maneira geral, a queda de tensão obtida em um ponto qualquer de uma rede pode ser analisado da seguinte forma:



sendo:

$$V_1 = V_n \frac{X_1}{X_1 + X_2} \quad (4.19)$$

Para o caso de um forno a arco, a dose de "flicker" pode ser expressa por:

$$G = \int_0^T \sum_i g_i \left| \frac{X_1 \Delta Q_i}{V_n} \right|^2 dt \quad (4.20)$$

sendo ΔQ_i expresso por:

$$\Delta Q_i = \frac{V_n}{X_1 + X_2} \cdot B_i, \text{ com } 0 \leq B_i \leq 1 \quad (4.21)$$

B_i é a relação entre a amplitude de flutuação de potência reativa na frequência f_i e a potência reativa correspondente a um curto-circuito trifásico no forno a arco, (ΔQ_{max}).

De onde se obtém:

$$G = \left| \frac{X_1}{X_1 + X_2} \right|^2 \int_0^T \sum_i g_i^2 B_i^2 dt \quad (4.22)$$

Chamando-se:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \sum_i g_i^2 B_i^2 dt = K^2 \quad (4.23)$$

vem:

$$G = T K^2 \left| \frac{X_1}{X_1 + X_2} \right|^2 \quad (4.24)$$

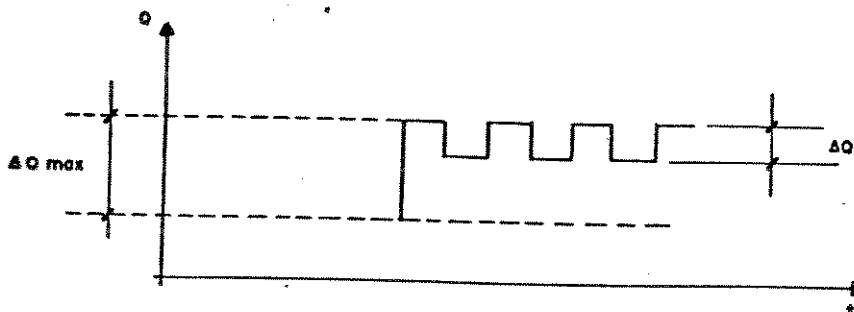


Fig. 4.11 - Diagrama Típico de Variação de Potência Reativa

A experiência mostrou que este coeficiente K para um valor de T correspondente a períodos de fusão inferiores a 30 minutos não apresenta muita diferença quaisquer que sejam os fornos. A dispersão verificada para os valores de K é devida a variações do espectro "amplitude-frequência" das flutuações de tensão produzidas pelos fornos.

De modo semelhante ao fator de severidade K_s adotado pelo método inglês, este fator K corresponde para o método francês a um coeficiente de proporcionalidade entre a amplitude da queda de tensão máxima, provocada por um curto-circuito trifásico no forno a arco e a amplitude de modulação senoidal equivalente à frequência fo.

Considerando as diferenças de duração de fusão das primeiras cargas de fornos a arco, que provocam variações mais ou menos rápidas das curvas de doses de "flicker", o coeficiente K é calculado para duas situações, correspondentes respectivamente ao décimo e ao décimo-quinto minutos. O valor do coeficiente K corresponde, então, ao valor médio dos dois instantes (10- e 15- minutos).

$$K = \frac{K_{10} + K_{15}}{2} \quad (4.25)$$

Aplicação do Método

Partindo-se dos 50 casos relacionados na Tabela (1), pode-se obter valores médios para K₁₀ e K₁₅, quais sejam:

$$\overline{K_{10}} = 11,50$$

$$\overline{K_{15}} = 11,05$$

$$\text{sendo } \overline{K} = \frac{\overline{K_{10}} + \overline{K_{15}}}{2} = 11,25 \quad (4.26)$$

Tal valor de $\overline{K} = 11,25$ corresponde a um desvio relativo $\sigma = 2$.

Observação: Este coeficiente \overline{K} é determinado a partir dos 50 casos relacionados na Tabela acima citada, sem distinção entre os diferentes tipos de fornos considerados. Esta maneira de proceder apresenta algumas restrições, já que 3 categorias de fornos podem ser distinguidas na totalidade da Tabela (1), a saber:

- fornos pequenos, de 1 a 12 toneladas (1 a 8 MVA), tipo U.H.P. (Ultra High Power) ou não: 19 casos;

$$\overline{K} = 10,28 \text{ ---> } = 1,57$$

- fornos grandes não U.H.P., a partir de 20 toneladas: 9 casos;

$$\overline{K} = 12,44 \text{ ---> } = 1,16$$

- fornos grandes do tipo U.H.P. a partir de 20 toneladas: 22 casos.

$$\overline{K} = 11,66 \text{ ---> } = 2,34$$

As dispersões dos valores dos coeficientes em fornos de \bar{K} são, evidentemente, aliadas às hipóteses feitas quanto às estimativas das características dos fornos e da rede. Estas estimativas conduzem a desvios encontrados nos valores calculados através da formulação:

$$\frac{\Delta v}{v} (fo)\% = \bar{K} \frac{X1}{X1 + X2} \quad (4.27)$$

A Fig. 4.12 apresenta um histograma dos 50 valores de \bar{K} correspondentes a 50 situações dos fornos estudados e a curva de distribuição de probabilidade cumulativa destes mesmos 50 valores do parâmetro K. [31]

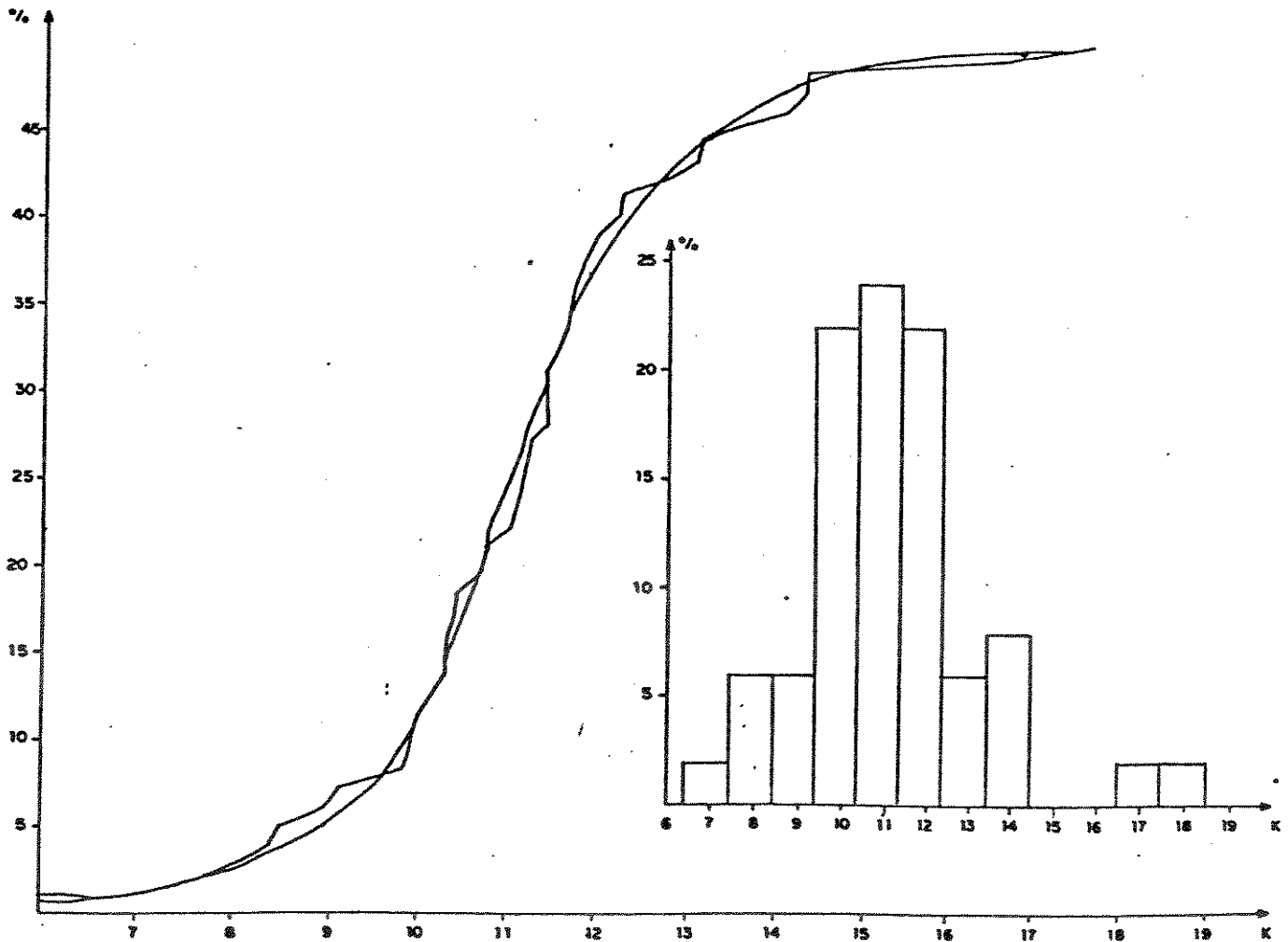
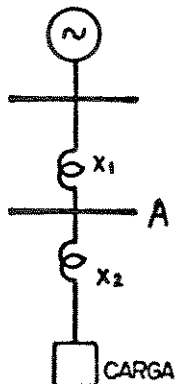


Fig. 4.12 - Probabilidade Cumulativa e Histograma Para K

Valor Limite

Para um ponto A de uma rede pode-se correlacionar os valores das reatâncias a montante (X_1) e a jusante (X_2) deste ponto com valores-limite, para que flutuações de tensão não sejam incômodas.



Considerando-se o limite habitualmente utilizado como dose de "flicker" admissível para 1 minuto:

$$G_0 = 0,09\% \text{ }^2 \cdot \text{minuto}$$

ou

$$G_0/T = 0,09\% \text{ }^2 \cdot \text{minuto/minuto},$$

que, em última análise, corresponde a uma variação de tensão admissível na frequência de maior sensibilidade do olho humano $f_0 = 10 \text{ Hz}$, de

$$\frac{\Delta V}{V} (f_0)\% = 0,03\%$$

pode-se, a partir do valor médio de K , calcular o mínimo valor para a relação X_2/X_1 , através de:

$$G = T \bar{K}^2 \left| \frac{X_1}{X_1 + X_2} \right|^2 = G_0 \quad (4.28)$$

Para $T = 1$ minuto e $\bar{K} = 11,25$, tem-se que

$$\frac{X_2}{X_1} > 36$$

ou seja, para $G_0 = 0,09\%$, tem-se $X_2 = 36 \cdot X_1$.

Análise de Instalações para Fins de Planejamento

1 - Dose de "flicker" imposta por um forno a arco numa rede onde ponto sob análise (PAC) esteja entre duas reatâncias X_1 e X_2 .

Seja:

$$\frac{G}{T} = \frac{-2}{K} \left| \frac{X_1}{X_1 + X_2} \right|^2 \rightarrow \frac{G}{T} = (11,25)^2 \left| \frac{X_1}{X_1 + X_2} \right|^2$$

$$\frac{G}{T} = 127 \left| \frac{X_1}{X_1 + X_2} \right|^2 \quad (4.29)$$

2 - Potência de curto-circuito mínima para se instalar um forno a arco.

Para que a implantação de um forno a arco possa se efetuar sem riscos de perturbação, a condição $X_2/X_1 > 36$ deve ser respeitada, sendo

$$S_{cc} = \frac{V_n^2}{X_1} \quad \text{para o ponto A (PAC), tem-se}$$

$$S_{cmin} = \frac{36 V_n^2}{X_2} \quad \text{ou} \quad S_{cc} > \frac{36 V_n^2}{X_2}$$

3 - Potência de curto-circuito máxima admissível para um forno a arco:

Para $\frac{X2}{X1} \geq 36$, tem-se:

$$Pccf = \frac{Vn^2}{X2}, \text{ onde } Pccfmax = \frac{Vn^2}{36.X1}, \text{ ou ainda}$$

$$Pccf \leq \frac{Vn^2}{36.X1} \quad (4.30)$$

Utilização da Tabela

A Tabela apresenta as seguintes características para as instalações:

- 1 - Características dos fornos a arco; capacidade em toneladas e potência do transformador do forno em MVA.
- 2 - Valores de:
 - X1 - reatância a montante do PAC;
 - X2 - reatância a jusante do PAC;
 - Xf - reatância total do forno a arco, incluindo conexões em baixa tensão, transformadores do forno, etc.
- 3 - Valores das doses de "flicker" acumuladas, medidas ao décimo e ao décimo-quinze minutos, G10 e G15 em (% minuto).
- 4 - Os valores correspondentes calculados para os coeficientes

$$K10 = \frac{X1 + X2}{X1} \sqrt{\frac{G10}{10}} \quad \text{e} \quad K15 = \frac{X1 + X2}{X1} \sqrt{\frac{G15}{15}}$$

$$5 - \text{O valor do coeficiente } k = \frac{K10 + K15}{2}$$

Nr. de ordem	Capacidade do forno ton - MVA	Sec-Vn MVA-KV	X1	X2	Xf	G10 2 (x) min	G15 2 (x) min	K10	K15	k	ΔV --- Vmed %	ΔV --- Vcalc %
01	5-3,3	100-30	5,59	103,6	107,8	3,814	4,63	12,51	11,59	12,10	0,423	0,552
02	5-3,3	155-30	4,536	103,6	107,8	1,772	2,47	10,50	10,12	10,31	0,413	0,452
03	1-1,125	50-15	2,502	83,163	83,163	0,41	0,51	7,53	6,57	7,00	0,403	0,311
04	1-1,125	50-15	2,502	83,163	83,163	0,30	1,20	10,23	10,23	10,24	0,403	0,311
05	1-1,125	110-1	1,943	83,163	83,163	0,27	0,41	7,62	7,67	7,5	0,405	0,263
06	1-1,125	110-1	1,943	83,163	83,163	0,43	0,30	10,10	10,71	10,41	0,220	0,243
07	3,5-2,5	220-63	17,787	683,177	683,177	1,022	1,53	11,52	11,10	11,30	0,212	0,207
08	3,5-2,5	120-63	10,021	683,177	683,177	4,514	5,73	11,50	10,23	10,39	0,210	0,657
09	3,5-2,5	160-63	30,016	683,177	683,177	1,25	2,33	9,55	8,53	9,12	0,214	0,508
10	3,5-2,5	47-15	4,220	32,514	2,300	14,513	1,69	9,28	8,53	8,53	1,142	1,44
11	12-4,4	63-10,5	1,333	15,122	15,122	6,70	13,75	11,52	11,53	11,57	0,237	0,912
12	2-1,5	63-10,5	1,333	15,226	15,226	4,60	6,57	6,78	6,27	6,53	0,237	0,502
13	3-3	63-10,5	1,333	15,229	15,229	7,0	12,44	11,13	11,25	11,25	0,232	0,504
14	3-3	93-10,5	1,333	15,229	5,269	7,0	11,15	10,00	7,75	10,42	0,232	0,804
15	60-20,5	73-110	17,219	259,026	217,875	5,55	7,15	11,5	11,71	11,16	0,210	0,727
16	10-8	380-63	11,118	232,45	200,824	2,925	4,4	11,57	11,55	11,75	0,241	0,514
17	4-3,3	360-63	11,118	462,931	462,931	0,75	1,14	11,59	11,75	11,72	0,273	0,704
18	20-7	82-5	48,185	210,619	216,619	74,65	8,243	15,01	13,72	14,17	2,173	2,051
19	60-18	124-10	0,695	1,977	1,977	140	202	12,52	12,67	12,50	3,705	3,204
20	60-22	200-15	1,129	3,605	3,605	71,428	50,62	11,20	10,32	10,75	2,757	2,653
21	80-20	420-63	9,45	66,213	65,893	15	19	12,47	10,45	11,53	1,173	1,105
22	60-31,2	1560-63	2,607	80,769	75,449	1,14	1,64	10,55	10,34	10,45	0,234	0,36
23	60-31,2	1100-63	3,712	80,769	75,449	1,5	2,1	8,65	8,56	8,51	0,211	0,504
24	60-31,2	550-63	4,304	80,769	75,449	2,5	4,2	9,82	10,59	10,10	0,215	0,574
25	3,5-2,2	110-20	3,63	80,377	80,377	2,05	2,54	10,50	9,52	10,01	0,253	0,337
26	3,5-2,2	110-20	3,63	82,545	82,545	2,3	3,26	11,33	11,24	11,31	0,475	0,475
27	2,5-2,2	53-15	4,254	47,086	47,086	7,831	9,89	10,83	9,91	10,37	0,25	0,523
28	40-17	420-63	9,45	113,13	112,33	8	10	11,60	10,59	11,10	0,255	0,259
29	80-30	420-63	9,45	64,05	63,25	25	28	12,30	10,63	11,46	1,474	1,449
30	80-30	860-63	4,6	68,89	63,25	3,2	6,25	11,75	10,31	11,03	0,205	0,705
31	60-38	3515-150	6,399	254,445	223,125	0,88	1,17	12,09	11,38	11,74	0,208	0,276
32	60-38	3515-150	6,399	289,832	258,512	0,65	0,79	11,80	10,62	11,21	0,242	0,243
33	60-38	4400-150	5,114	256,253	223,125	0,55	0,74	11,58	11,35	11,57	0,223	1,221
34	60-38	2354-150	9,557	254,445	223,125	0,92	1,19	8,38	7,78	8,08	0,232	0,408
35	3-3,3	140-15	1,80	29,108	29,108	6,085	9,489	13,40	13,66	13,52	0,283	0,656
36	3-3,3	140-15	1,80	35,654	35,684	2,382	3,812	10,16	10,50	10,33	0,496	0,541
37	40-20	86-20	0,513	15,005	15,005	0,69	1	9,86	9,70	9,78	0,26	0,373
38	60-28	497-63	7,934	41,328	30,662	45,532	75,8	13,18	13,05	13,11	2,198	1,825
39	60-28	750-63	5,732	43,580	30,662	23,617	34,5	13,22	13,05	13,14	1,527	1,31
40	60-38	915-63	4,377	41,328	30,662	19,43	27,4	14,55	14,11	14,33	1,373	1,079
41	60-38	2050-63	2,125	43,580	30,662	3,373	4,73	12,49	12,08	12,28	0,571	0,524
42	80-20	1050-63	2,172	85,916	65,787	1,487	1,87	14,97	13,71	14,34	0,269	0,278
43	100-77	4200-220	12,054	40,485	467,455	0,62	0,346	9,91	9,99	9,95	0,25	0,283
44	100-77	3220-220	9,516	47,245	467,455	0,259	0,6	9,59	10,13	9,66	0,195	0,223
45	40-6	91-63	36,7	30,31	300,31	14,533	24,143	11,13	11,75	11,47	1,237	1,215
46	40-6	91-63	36,7	30,31	300,31	17,35	25,512	12,21	12,33	12,27	1,223	1,215
47	20-18	237-20	1,5	9,208	9,203	53,23	79,01	1,67	17,34	17,91	2,331	1,481
48	20-18	205-20	1,405	9,203	8,203	25,25	35,28	1,60	11,58	11,73	1,531	1,492
49	20-18	2220-220	17,204	1235,592	1235,592	0,503	0,812	17,05	16,39	16,72	0,237	0,16
50	20-18	2000-220	13,615	1235,592	1235,592	0,297	0,425	11,61	11,34	11,9	0,170	0,167

TABELA [31]

- 6 - A amplitude da modulação de tensão equivalente a f_0 (Hz), calculado a partir dos valores medidos para as doses de "flicker" G10 e G15 (%).

$$\Delta V \text{ medido} = \frac{\Delta V}{V} (f_0)\% = \frac{\sqrt{\frac{G10}{10}} + \sqrt{\frac{G15}{15}}}{2}$$

- 7 - A mesma amplitude de modulação de tensão equivalente a (f_0) , calculado diretamente a partir de estimação do valor médio \bar{K} sobre os 50 casos.

$$\bar{K} = \frac{\sum K}{50}$$

$$\Delta V \text{ calculado} = \frac{\Delta V}{V} (f_0)\% = \bar{K} \frac{X1}{X1 + X2}$$

- 8 - O desvio relativo (%) entre os dois valores acima:

$$\frac{\Delta V \text{ medido} - \Delta V \text{ calculado}}{\Delta V \text{ medido}} \times 100$$

Observações sobre os Métodos de Pré-Determinação

- Método Francês

O método apresenta-se como um recurso satisfatório para a pré-determinação dos efeitos causados por uma instalação (forno a arco) sobre qualquer ponto de acoplamento comum de uma rede de suprimento.

Toda filosofia do critério é embasada em dados de medição de campo, que considera uma larga experiência de ensaios sobre uma gama de características de instalações, o que permitiu a elaboração de um método adequado às áreas de planejamento de operação das empresas de energia elétrica.

O limite estabelecido leva em conta experiências feitas com relação à sensibilidade ao fenômeno, levando em consideração um dado importante, que seria a frequência das variações de amplitude de tensão, correlacionada à sensibilidade visual. O parâmetro tempo também é considerado, uma vez que o fenômeno passa a ser mais ou menos irritante em função do tempo de exposição.

- Método Inglês

O método inglês de pré-determinação é centrado no conceito da variação do valor eficaz da envoltória de tensão por minuto, independentemente da conceituação da correlação sensibilidade visual x frequência de variação. Tal método considera a experiência de medições de campo e testes de observação visual para determinação dos limites e introduz conceitos estatísticos para avaliação do fenômeno durante longos períodos de tempo.

Comparação entre os Métodos

Ambos os métodos oferecem recursos adequados para avaliação dos efeitos que uma dada carga, causadora do efeito de cintilação luminosa, poderá ocasionar em um ponto do sistema elétrico comum, em termos de suprimento a outras cargas.

Entretanto, os dois métodos consideram experiências realizadas em medições de campo e sensibilidade de pessoas ao fenômeno naqueles países, o que implica na necessidade de adequação aos sistemas no Brasil em termos de limites, para que se possa avaliar quanto restritiva se torna a aplicação de tais critérios em termos de Brasil.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIAS DE MEDIÇÃO

Os métodos de medição inglês e francês, descritos neste Capítulo, precederam o método internacional e foram desenvolvidos de forma independente, com base em experiências de campo e laboratório e conduzidos de forma a considerar as diversas características do fenômeno descritas nos Capítulos anteriores.

O método internacional propõe a uniformização dos critérios de medição, oferecendo duas opções distintas de análise do fenômeno, a partir do sinal de "flicker" instantâneo, sendo um decorrente do método francês de análise e o outro do método inglês.

Todos os métodos de medição apresentam recursos de avaliação do fenômeno de flutuação de tensão ou de variação da luminosidade emitida por lâmpadas incandescentes, através da medição direta de variações de tensão em pontos do sistema elétrico onde se deseja quantificar o fenômeno. De modo geral, tais sistemas de medição englobam módulos de aquisição do sinal de tensão, modulação e filtragem para adequação do sinal a ser avaliado, análise direta ou estatística e gravação de resultados.

5.1 - Método Inglês de Medição [5]

As leituras obtidas pelo medidor desenvolvido pelo "ERA - Electricity Research Association", da Inglaterra, tiveram como objetivo identificar a severidade dos impactos de variações de tensão impostas por fornos a arco sobre sistemas elétricos, através da avaliação de seus efeitos sobre lâmpadas de filamento.

Assim, tal medidor foi denominado "Medidor de Flutuações de Tensão Causadas por Fornos a Arco", de modo a identificar explicitamente o tipo de carga a ser avaliado, não permitindo portanto aplicações de maior abrangência.

5.1.1 - Diagrama Funcional do Medidor Inglês

O medidor detecta o valor eficaz da forma de onda da flutuação de tensão, sendo que o sinal de tensão medido é submetido a uma filtragem para remoção de harmônicos da forma de onda de suprimento 60 ou 50 Hz (europeu), já que tais componentes não causam, ou contribuem para, o efeito de cintilação luminosa. Este filtro de harmônicos tem uma banda passante substancialmente plana na faixa entre 25 e 75 Hz, para não afetar as bandas laterais causadas pela modulação de onda de 50 Hz para frequências acima de 25 Hz. A atenuação é mais acentuada para frequências superiores a 150 Hz.

O demodulador é formado por uma ponte retificadora de onda completa. A saída do retificador contém não somente as frequências de modulação, mas também a retificação de meia onda de 50 Hz. Isto contém componentes DC e múltiplos de 100 Hz assim como pequenos componentes múltiplos de 50 Hz causados pelo desbalanço do retificador. Tais componentes são removidos pelo filtro demodulador, que é um filtro passa-baixas com frequência de corte de 27 Hz, restando então as componentes de modulação que sensibilizam o olho humano através da variação luminosa.

Esta forma de onda de modulação é medida, então, através de um medidor de valor eficaz ("Rms-meter"). A flutuação tem uma forma de onda irregular e um medidor com constante de tempo de 100 milisegundos é usado para estabelecer uma leitura média desse valor eficaz.

Um gravador possibilita o registro das leituras em intervalos de 1 minuto. Os valores eficazes da envoltória ou da forma de onda da flutuação de tensão V_f gravados a cada minuto são utilizados como amostras para a obtenção da Função de Probabilidade Cumulativa (FPC). Tal curva "FPC" do método inglês apresenta os valores de V_f em função da percentagem de tempo durante o qual os valores são excedidos, Fig. 4.5 e 4.6 (Capítulo 4).

O ponto de medição (V_{fg}) identifica o valor de V_f que é ultrapassado durante 1% do tempo total de análise. Caso esse valor medido ultrapasse o limite permitido, a instalação poderá ser reprovada.

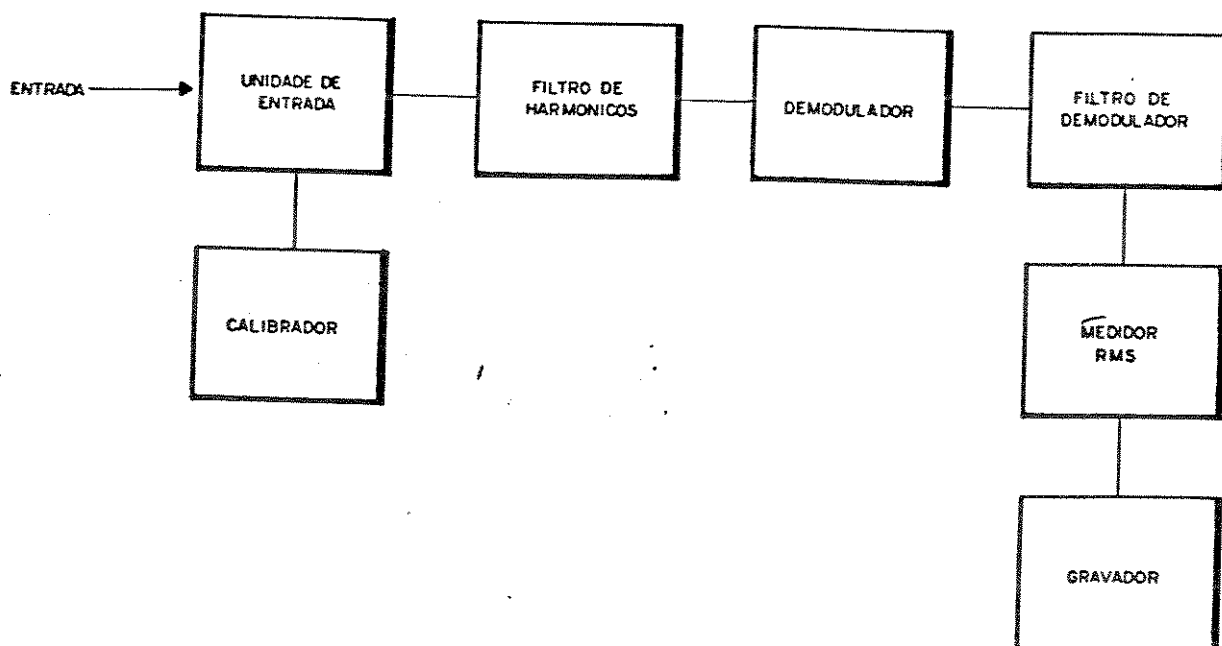


Fig. 5.1 - Diagrama de Blocos do Medidor de Flutuação de Tensão Causada por Fornos a Arco - "ERA Meter"

5.2 - Método Francês de Medição

A metodologia francesa de medição de "flicker" procura a obtenção de um valor indicativo do nível de perturbação que uma carga variável provoca sobre o sistema de iluminação.(3)

Em conformidade com o critério de pré-determinação do efeito, a metodologia francesa possibilita o acesso a valores de flutuações ponderadas na frequência sem, contudo, utilizar-se de análises estatísticas "on-line" mais elaboradas.

Os valores obtidos durante o processo de medição dão origem à imagem gráfica no tempo das doses de "flicker" por minuto, permitindo análises durante longos períodos, através da monitoração direta do comportamento da carga variável, minuto a minuto, mesmo em pontos remotos do sistema supridor.

5.2.1 - Diagrama Funcional do Medidor Francês

Funcionalmente o medidor proposto pode ser apresentado por uma seqüência de blocos que estabelecem um tratamento contínuo para o sinal analógico de tensão medido, conforme a Fig. 5.2 [31].

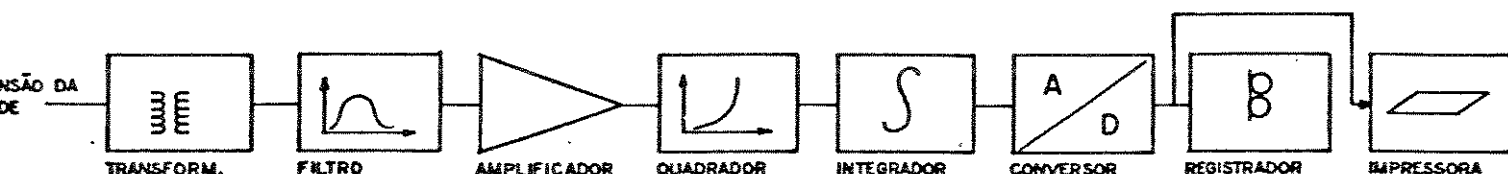


Fig. 5.2 - Diagrama de Blocos do Medidor (EdF)

Bloco 1 - Circuito de entrada, que compreende um transformador e um demodulador

- Este bloco tem a função de adaptar convenientemente o sinal de tensão a ser medido para o tratamento proposto através dos demais blocos, nivelando e demodulando-o para a obtenção de envoltória do nível de tensão (af).

Bloco 2 - Filtro de ponderação

- O filtro de ponderação, conformado de acordo com a resposta de sensibilidade do olho humano (Fig. 4.10), permite a adequação do sinal demodulado em função das frequências de maior ou menor sensibilidade. A característica de ponderação é normalizada para a frequência de 10 Hz que tem ganho $g_f = 1$.

$$a_{10} = g_f a_f$$

Bloco 3 - Amplificador linear

Permite amplificar o sinal ponderado por frequência.

Bloco 4 - Dispositivo quadrador

- Neste bloco o sinal é multiplicado analogicamente por ele mesmo, a fim de se obter o sinal instantâneo de "flicker", que considera o valor quadrático do sinal ponderado em frequência $(a_{10})^2$.

Bloco 5 - Integrador

- Na última fase de tratamento analógico do sinal, este é integrado no intervalo de 1 minuto, tempo previamente estabelecido para o cálculo das doses unitárias de "flicker".

$$G = \int_0^T (a_{10})^2 dt$$

Bloco 6 - Conversor A/D

- O conversor A/D permite algumas facilidades de ordem prática para que se possa registrar no bloco seguinte, em fitas magnéticas, os valores das doses unitárias obtidas no bloco anterior.

Bloco 7 - Registrador

- O registrador magnético permite que se acumulem os valores de doses unitárias para que posteriormente sejam traçadas curvas de doses de "flicker" em função do tempo, comparando-as com os limites, conforme mostra a Fig. 5.3.

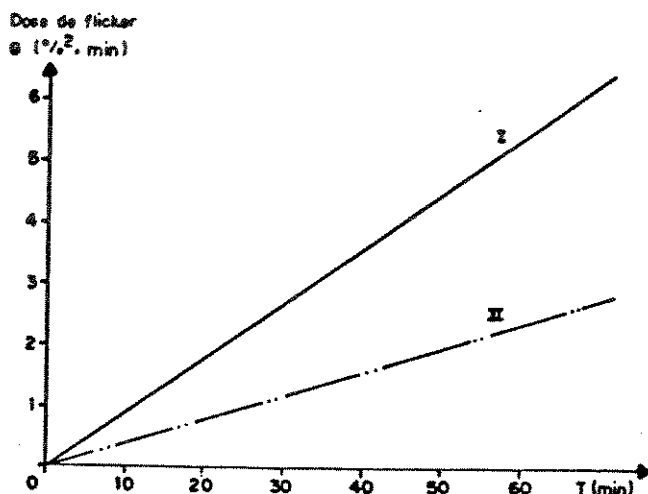


Fig. 5.3 - Doses Toleráveis de "Flicker" - Curva Limite
 I - limite (flutuação de tensão a 10 Hz, de amplitude constante de 0,3%)
 II - flutuação de tensão a 10 Hz, de amplitude constante de 0,2%

5.3 - Medidor de "Flicker" Padrão Internacional

Com base nas diversas metodologias para quantificação do fenômeno, foi proposta, em 1980, uma metodologia única com o objetivo da uniformização, a nível internacional, dos critérios de medição. Tal uniformização foi proposta no âmbito da (UIE) União Internacional de Eletrotermia, com as seguintes características [10]:

a - Indicação do valor instantâneo de "flicker".

O instrumento idealizado deve prever a possibilidade de se detectar valores instantâneos de "flicker".

b - Forma de onda da flutuação de tensão.

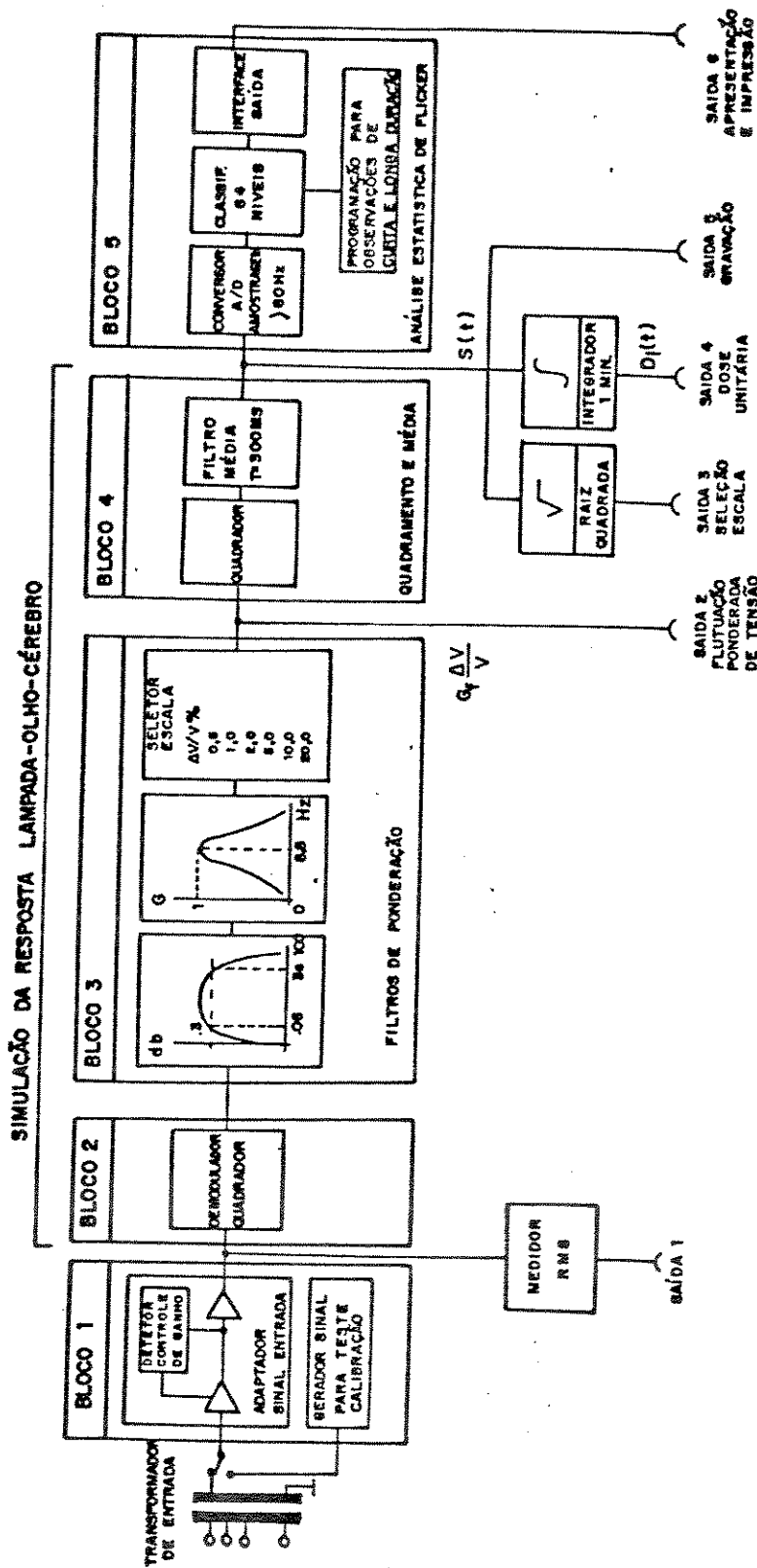
O instrumento deve quantificar o fenômeno "flicker" independente da forma de onda de tensão medida.

c - Gravação do "flicker" medido por longos períodos.

O instrumento deve estar apto a analisar o valor instantâneo do "flicker" durante longos períodos.

d - Faixa de frequência.

O instrumento deve medir flutuações de tensão na faixa de frequência de 0,5 a 25/30 Hz.



OPCIONAL PARA MEDIÇÕES ESTENDIDAS

Fig. 5.4 - Diagrama Funcional do Medidor UIE

e - Portabilidade.

O instrumento deve ser portátil.

f - Calibração

O instrumento deve prever um sistema de auto-teste.

g - Resultados.

Os resultados das medições devem ser indicados através de um valor numérico para comparação com valores admissíveis.

h - Avaliação estatística.

Deve ser prevista a possibilidade de avaliações estatísticas durante períodos de tempo de interesse.

5.3.1 - Premissas para a Quantificação do Fenômeno

A - Simulação da interação lâmpada-olho-cérebro

Conforme mencionado anteriormente, a sensação do efeito "flicker" depende das variações da luminosidade de lâmpadas sujeitas a flutuações da tensão de suprimento. O medidor de "flicker" tem que relacionar flutuações de tensão com a sensação fisiológica que um observador representativo irá experimentar. Isto requer a idealização de um modelo para a interação entre lâmpada, olho e cérebro, que detecte a amplitude da flutuação de tensão e a converta a um nível correspondente à sensação de percepção.

Um problema fundamental é que a percepção visual depende da iluminação média, o que exige algumas simplificações para se chegar a valores práticos.

Uma consideração importante para este ponto é que em redes de distribuição a tensão é regulada de forma a não exceder $\pm 10\%$ do nominal. Esta regulação é lenta, pois depende dos tempos de resposta de comutadores de transformadores, que requerem várias dezenas de segundos para realizar uma operação.

Por outro lado, o olho humano tem também uma capacidade de adaptação para uma variação do brilho de fundo de um ambiente, através da mudança da abertura da pupila e outros meios. Esta adaptação é mais rápida do que a regulação da tensão. No caso do "flicker", interessam apenas as rápidas variações de tensão, sendo que testes de subjetividade indicam que pequenas flutuações de tensão já são perceptíveis.

Sabe-se que a intensidade do brilho de lâmpadas incandescentes é uma função exponencial do valor RMS da tensão de suprimento do tipo:

$$\frac{J}{J_n} = \left(\frac{V}{V_n} \right)^\gamma \quad (5.1)$$

onde: γ - varia tipicamente de 3,4 a 3,8

V_n - tensão nominal da lâmpada

J_n - sensação correspondente da intensidade da luz

Para pequenas mudanças na tensão, a resposta relativa da lâmpada pode ser expressa por:

$$\frac{\Delta J}{J_n} \approx \gamma \cdot \frac{\Delta V}{V_n} \quad (5.2)$$

onde γ é considerado constante com a tensão.

Isto mostra que o quantificador de saída do medidor de "flicker" pode ser expresso por $\Delta V/V$ (variação relativa de tensão), onde V é a tensão eficaz média da tensão de suprimento durante um certo intervalo de tempo.

B - O adaptador da tensão de entrada

O medidor de "flicker" deve detectar as variações de tensão a partir da tensão de suprimento.

Através de um bloco analógico, com ajuste automático de ganho para o valor médio da tensão de entrada, com uma constante de tempo relativamente longa, de forma que as flutuações de tensão na faixa de frequências de interesse possam ser identificadas, adapta-se a tensão de entrada tomando como referência o valor médio da tensão de entrada devidamente escalonado com um valor interno de referência de forma a transformar a amplitude absoluta da flutuação de tensão em variações relativas.

A constante de tempo para o adaptador de tensão é estabelecida em 1 minuto, tempo este considerado suficiente para a atuação dos reguladores de tensão.

C - Simulação da lâmpada

O bloco seguinte refere-se à simulação da resposta de lâmpadas de filamento em função de diferentes frequências de flutuações de tensão.

A luminosidade de saída das lâmpadas de filamento depende da temperatura do filamento. A variação na luz emitida pela lâmpada pela variação de tensão depende da subsequente variação da temperatura do filamento. Esta variação da luz emitida tem uma característica exponencial dependendo das propriedades de dissipação de calor da lâmpada, sendo a constante de tempo proporcional à capacidade térmica do filamento, e inversamente proporcional à taxa de perdas por aquecimento.

Constantes de tempo típicas para lâmpadas de 230 V variam entre 13 e 33 ms.

A resposta da lâmpada pode ser descrita pela expressão:

$$\frac{\Delta J}{J} = \gamma \frac{\Delta V}{V} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + w^2 \zeta^2}} \quad (5.3)$$

onde: w = frequência da oscilação da tensão
 ζ = constante de tempo da lâmpada

D - Demodulador Quadrático

Conforme visto anteriormente, 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.

O medidor de "flicker" faz a demodulação da tensão variável de 60 Hz, e restringe o sinal demodulado à faixa de percepção do fenômeno (0,5 a 30 Hz) através de filtragem. Pelo fato de que tal modulação tem como portadora um sinal de apenas 60 Hz, a utilização de circuitos demoduladores usados em sinais de altas frequências é impraticável. Em função disso, é recomendada a utilização de um demodulador quadrático, descrito matematicamente como segue:

Seja o sinal modulado representado pela expressão:

$$v(t) = A \cos wt (1 + m \cos wft), \quad (5.4)$$

onde $v = A \cos \omega t$ = tensão modulada ou portadora
 ω = frequência da portadora (60 Hz)
 A = amplitude da portadora
 $V_m = m A \cos \omega t$ = tensão modulante
 ω_f = frequência da modulante (0-30 Hz)
 m = índice de modulação (0-1%)

A tensão V_d quadrática vale:

$$V_d(t) = \frac{A^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) + \frac{A^2}{2} \left(1 + \frac{m^2}{2}\right) \cos^2 \omega t + A m \cos^2 \omega t \cos \omega t$$

$$+ \frac{A m^2}{4} \cos^2 \omega t \cos^2 \omega t + m A \cos^2 \omega t + \frac{m A^2}{4} \cos^2 \omega t \quad (5.5)$$

Suprimindo-se, através de filtros, o nível DC e as componentes de frequência maiores ou iguais a ω , resulta:

$$V_f(t) = m A \cos \omega t + \frac{m A^2}{4} \cos^2 \omega t \quad (5.6)$$

Considerando que as variações da tensão são da ordem de 1% ($m = 0,01$), o termo quadrático em m pode ser desprezado, resultando o sinal modulante multiplicado pela amplitude da portadora:

$$V_f(t) = m A \cos \omega t = A V_m(t) \quad (5.7)$$

A equação (5.7) indica que a tensão modulante pode ser expressa pela variação relativa seguinte:

$$V_m\% = \frac{V_f(t)}{A} \times 100 \quad (5.8)$$

E - Filtro demodulador

Como a faixa máxima de sensibilidade do medidor de "flicker" em termos de variação de tensão relativa é de 0,5%, e a resolução deve ser de 1% da faixa, a atenuação da componente de 100 ou 120 Hz (dobro de frequência 50 ou 60 Hz) deve ser da ordem de 90 dB. Esta atenuação pode ser obtida considerando-se os efeitos combinados dos filtros de demodulação e de ponderação, que serão discutidos mais adiante.

Um filtro de Butterworth passa-baixa de 6ª ordem com frequência de corte de 35 Hz, dá uma atenuação de 55 dB para 100 Hz que, adicionado aos 37 dB provenientes do filtro de ponderação, atende ao requerido.

Para melhorar a resolução e minimizar as imperfeições que inevitavelmente ocorrem no demodulador, é possível incluir-se também no projeto um filtro de alto Q, sintonizado para 100 ou 120 Hz.

A supressão do nível DC é obtida por um filtro de 1ª ordem passa-alta, com frequência de corte de 0,05 Hz.

F - 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.

De acordo com o padrão internacional, a especificação do filtro de ponderação deve basear-se em uma função de transferência com os seguintes parâmetros:

$$F(s) = \frac{K w_1 s}{s^2 + 2\lambda s + w_1^2} \cdot \frac{1 + s/w_2}{(1 + s/w_3)(1 + s/w_4)} \quad (5.9)$$

sendo que o primeiro termo do produto corresponde a um filtro passa-faixa de 2ª ordem, e o segundo termo a uma rede de compensação com um zero e dois polos.

A determinação dos parâmetros foi feita por procedimentos de estimação do espectro, resultando no mínimo desvio quadrático médio para a banda especificada [13].

A Fig. 5.4 apresenta a resposta obtida e os valores dos parâmetros.

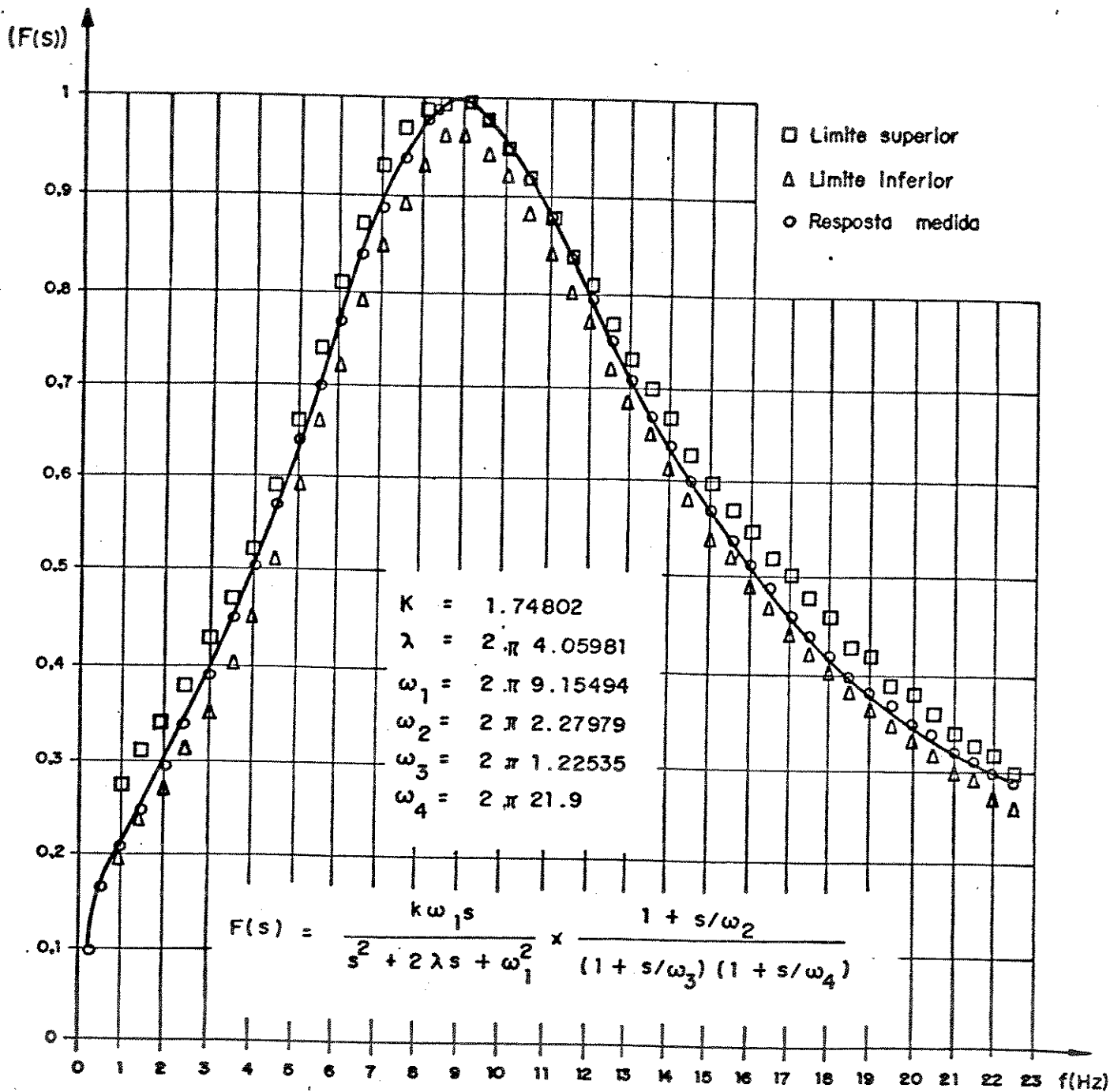


Fig. 5.5 - Curva de Resposta Normalizada do Filtro de Ponderação para a Banda de Freqüência Especificada

G - Avaliação estatística

O medidor de "flicker" padrão internacional monitora a ocorrência do "flicker" em unidades de perceptibilidade, o que torna necessário um método para avaliar e apresentar o nível de severidade para tipos de flutuação cíclica e acíclica.

Considerando o fato de que o medidor simula o processo de percepção visual fisiológica, ele deve dar uma fiel indicação da reação de um observador a qualquer tipo de "flicker", independentemente da fonte de distúrbio.

De maneira geral, é desejável ter-se um único método para avaliação do "flicker" para distúrbios gerados por vários tipos de equipamentos.

É claro que o incômodo visual deve ser avaliado num período de tempo de duração significativa. Entretanto, devido à natureza randômica do fenômeno, a fixação deste período de tempo não é simples.

Na avaliação estatística deve-se obter não somente o valor máximo num dado período, mas também a porcentagem de tempo no qual um determinado nível de "flicker" foi excedido.

Tal avaliação estatística requer a construção de uma tabela de nível de tensão de "flicker" e a correspondente porcentagem de tempo de duração no período de observação.

Para tanto, são classificados inicialmente os níveis de "flicker" instantâneos, obtendo-se a distribuição de frequência e, posteriormente, a partir desta distribuição, obtém-se uma tabela correspondente à função de probabilidade cumulativa (FPC).

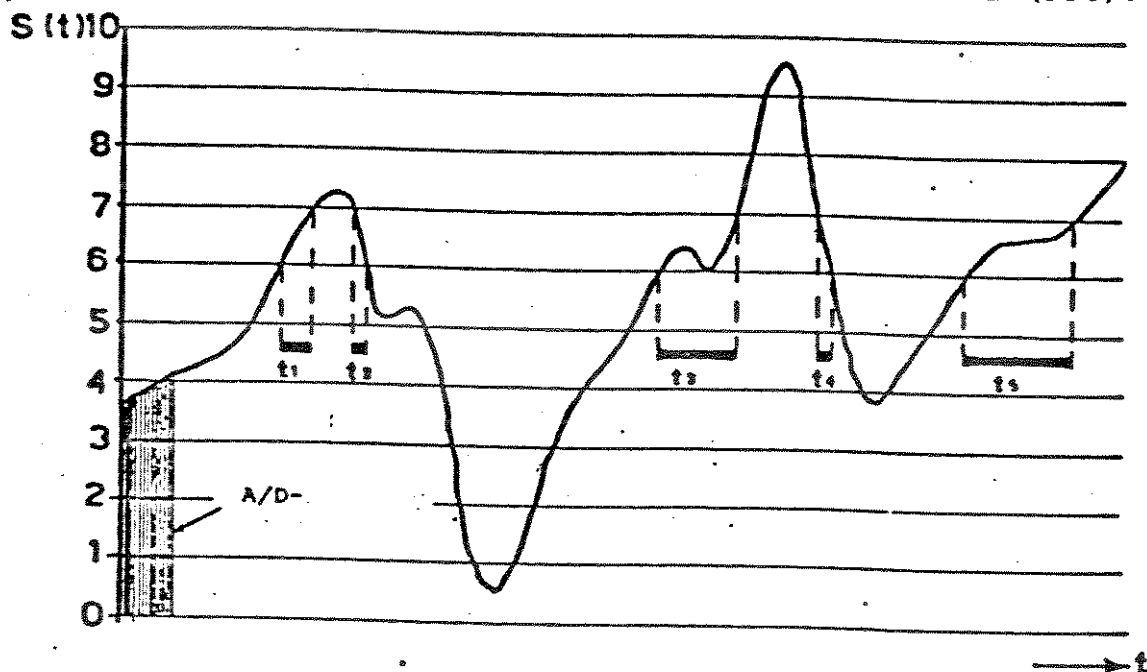


Fig. 5.6 - Nível de "Flicker" como uma Função do Tempo

Obs: O sinal permanece no nível 7 no tempo $T7 = \sum t_i, i = 1,5$ correspondente ao tempo em que o sinal é superior ao nível 6.

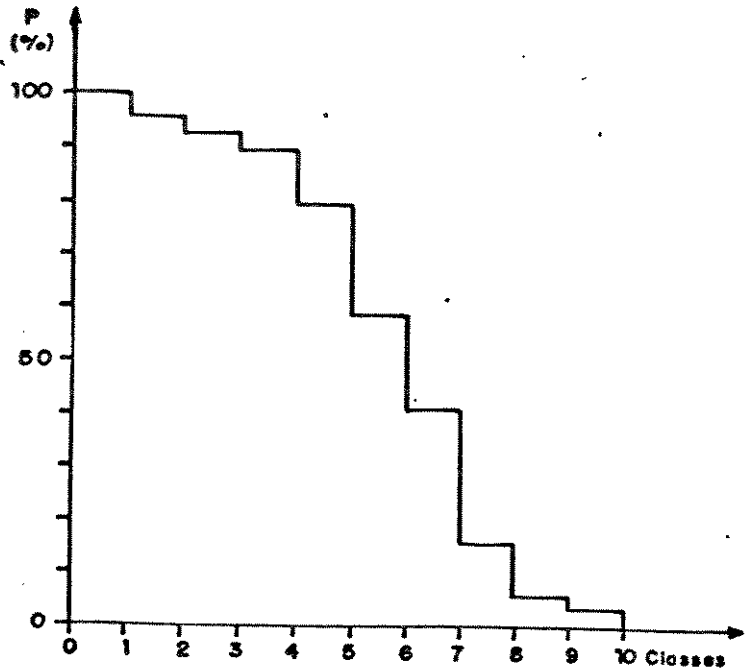


Fig.5.7 - Função de Probabilidade Cumulativa a partir da Classificação Correspondente à Fig. 5.5

As figuras a seguir mostram curvas de FPC's obtidas para dois tipos de distúrbios. Pode-se verificar que as curvas são sensivelmente diferentes, o que implica na necessidade de se estabelecer um critério para quantificar a severidade do fenômeno "flicker" que considere qualquer tipo de distúrbio.

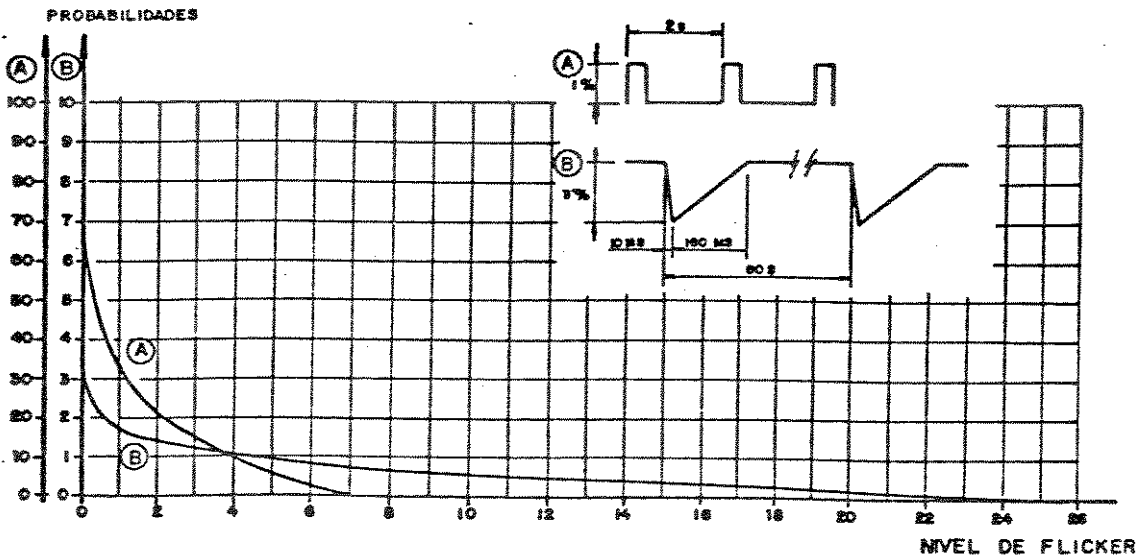


Fig. 5.8 - FPC's para Dois Tipos de Formas de Onda

Se a curva da FPC seguir o tipo de distribuição normal, por exemplo, ela pode ser caracterizada por alguns parâmetros como média e desvio padrão. Caso isto não ocorra, um algoritmo mais elaborado deve ser considerado.

No caso do medidor padrão internacional, decidiu-se por um algoritmo que contemple várias formas de FPC's [26].

$$P_{st} = \sqrt{K_1 P_1 + K_2 P_2 + \dots K_n P_n} \quad (5.10)$$

onde: P_{st} é o valor de severidade do "flicker short-term"
 K_1, K_2, \dots, K_n são coeficientes de ponderação,
 P_1, P_2, \dots, P_n são as probabilidades de determinados níveis de "flicker" serem excedidos.

Para se obter um número adequado de pontos e seus coeficientes apropriados foi necessário resolver equações múltiplas, relacionando a unidade de severidade de "flicker" com diversas curvas de FPC's.

Verificou-se que a utilização de 5 níveis probabilísticos conduz a uma solução considerada equilibrada:

- $P_{0,1}$ - nível excedido por 0,1% do período de observação;
- P_1 - nível excedido por 1% do período de observação;
- P_3 - nível excedido por 3% do período de observação;
- P_{10} - nível excedido por 10% do período de observação;
- P_{50} - nível excedido por 50% do período de observação.

Através deste critério, considera-se que o nível máximo de "flicker" observado durante o período analisado não é considerado, para que não penalize demais a avaliação, sendo tomado como um pico isolado de curta duração.

O nível P_{50} , referente ao nível de "flicker" que é excedido por 50 % do tempo ou nível médio, fornece uma boa indicação da ordem de magnitude do distúrbio. Os outros pontos são tomados para ponderar de modo apropriado os níveis mais elevados do distúrbio.

A determinação do período de observação mais conveniente deve ser feito de acordo com o ciclo de carga do equipamento origem do distúrbio. Entretanto, alguns esforços têm sido feitos para se encontrar uma regra comum, independente da fonte específica do distúrbio considerada.

Para cumprir este objetivo, é necessário considerar a percepção do fenômeno e os resultados de testes de percepção em

seres humanos, a fim de que se possa determinar qual intervalo de tempo deve ser mais significativo para representar a reação do observador médio para uma larga faixa de características de "flicker".

O intervalo básico de 10 minutos tem sido considerado suficientemente longo para permitir que um indivíduo inconsciente do problema, quando sujeito ao fenômeno, possa noticiar o distúrbio e sua persistência, e é suficientemente curto para permitir uma detalhada avaliação do distúrbio para um equipamento com um longo ciclo de carga.

H - Avaliação da severidade do "flicker" pelo método "short-term"

Na utilização de um algoritmo multi-pontos adequado, um outro problema que deve ser resolvido é o relacionamento da avaliação multi-pontos com a severidade do "flicker".

Um número limite deve ser utilizado para correlacionar a severidade do "flicker" com a curva não-linear de Probabilidade Cumulativa (FPC).

O documento IEC - 555/3 propõe uma curva baseada em investigações de sensibilidade do olho humano, que correlaciona variação de tensão com variações retangulares de tensão por minuto (Fig. 5.9).

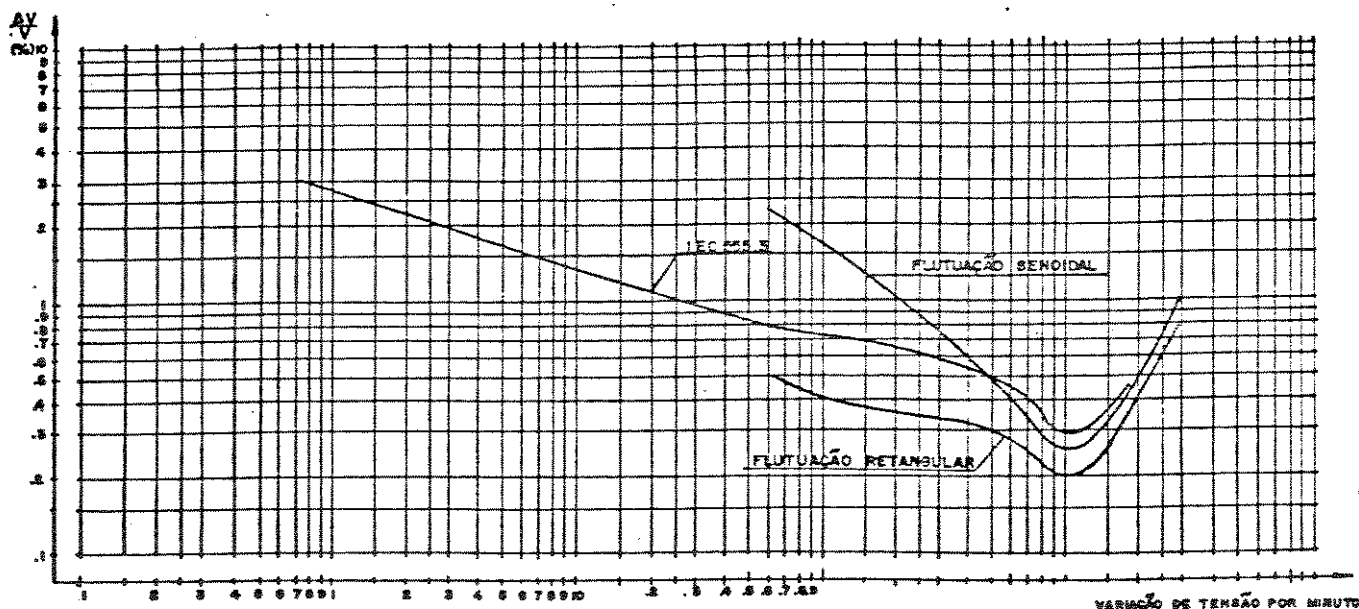


Fig. 5.9 - Curva IEC 555/3

Com base em tal curva, foi então determinado um algoritmo multi-pontos, sendo os resultados testados a partir de sucessivas medições de resposta subjetiva do olho humano.

Os valores obtidos para os coeficientes K_i foram os seguintes:

- K_1 para níveis superiores a 0,1% = 0,0314
- K_2 para níveis superiores a 1% = 0,0525
- K_3 para níveis superiores a 3% = 0,0657
- K_4 para níveis superiores a 10% = 0,28
- K_5 para níveis superiores a 50% = 0,08

Para o intervalo de 10 minutos, a severidade do "flicker" é expressa pela equação abaixo, onde Pst significa "Short-Term Probability".

$$Pst = \sqrt{0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_{50}} \quad (5.1)$$

Para checar a precisão da severidade do "flicker", o algoritmo multi-pontos foi usado para avaliar cada nível-limite na tabela IEC para o período de 10 minutos. Os resultados são apresentados na Tabela a seguir, considerando variações retangulares de tensão.

A comparação foi feita entre os valores-limite de variação relativa de tensão $\Delta V/V(\%)$, em função do número de variações por minuto e a variação relativa de tensão $\Delta V/V(\%)$, necessária para a obtenção de $Pst = 1$ através do algoritmo multi-pontos acima, para o correspondente número de variações de tensão por minuto no intervalo de 10 minutos. Os resultados foram plotados na Fig. 5.10, superpondo-se as curvas de resultados obtidos para $Pst = 1$ e a IEC-555/3.

O estabelecimento de um valor-limite para Pst deve levar em conta o fato de que, em testes de laboratório, uma proporção substancial de observadores reportou o incômodo de "flicker" quando $Pst = 1$.

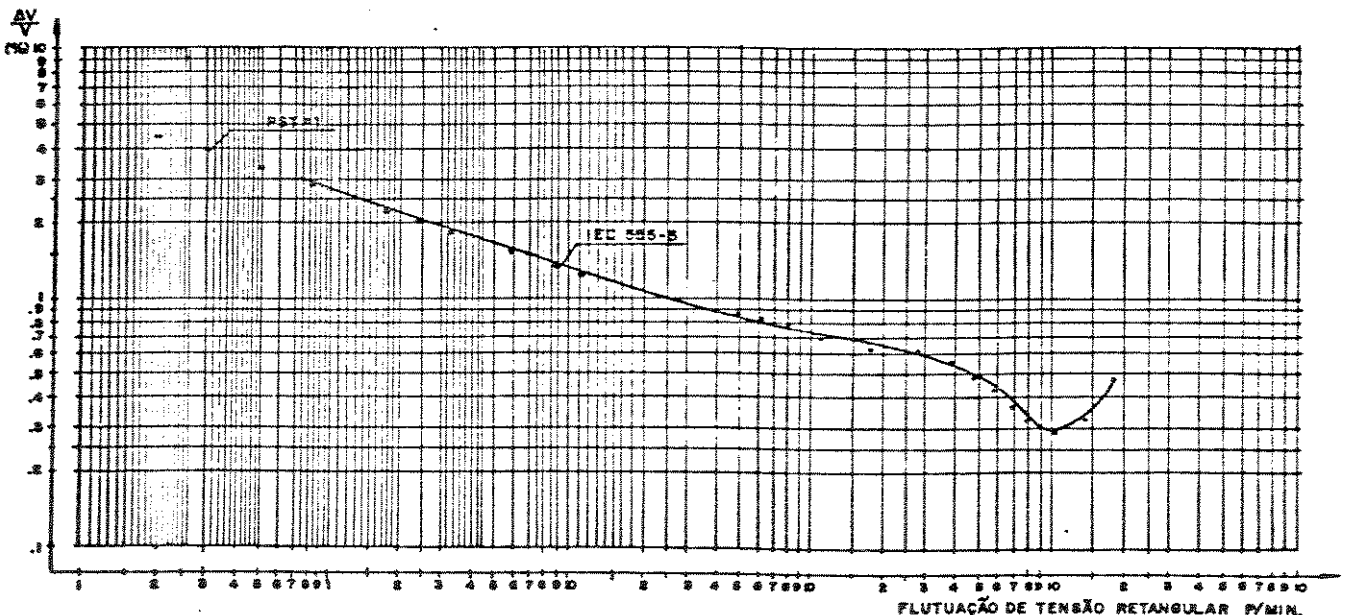


Fig. 5.10 - IEC 553 e $Pst = 1$

TABELA COMPARATIVA
entre Variações Relativas de Tensão $\Delta V/V$ e a Unidade de
Severidade de "Flicker" (Pst = 1)
para Várias Frequências de Variações de Tensão.

Variações de tensão p/minuto	Variação relativa de tensão % (IEC-555/3)	Variação relativa de tensão (%) p/ a unidade de severidade de flicker	Diferença (%)
0,1	3,0	7,46	148,7
0,2	3,0	4,52	50,7
0,3	3,0	3,88	29,3
0,4	3,0	3,52	17,3
0,5	3,0	3,34	11,3
0,6	3,0	3,14	4,7
0,76	3,0	2,97	- 1,0
0,84	2,90	2,90	0,0
0,95	2,80	2,79	- 0,3
1,06	2,70	2,70	0,0
1,20	2,60	2,60	0,0
1,36	2,50	2,49	- 0,4
1,55	2,40	2,38	- 0,8
1,78	2,30	2,26	- 1,7
2,05	2,20	2,16	- 1,8
2,39	2,10	2,07	- 1,4
2,79	2,00	1,97	- 1,5
3,29	1,90	1,88	- 1,0
3,92	1,80	1,78	- 1,1
4,71	1,70	1,70	0,0
5,72	1,60	1,57	- 1,9
7,04	1,50	1,47	- 2,0
8,79	1,40	1,37	- 2,1
11,16	1,30	1,24	- 4,6
14,44	1,20	1,14	- 5,0
19,10	1,10	1,04	- 5,5
26,60	1,00	0,97	- 3,0
32,00	0,95	0,93	- 2,1
39,00	0,90	0,89	- 1,1
48,70	0,85	0,86	+ 1,2
61,80	0,80	0,83	+ 3,8
80,50	0,75	0,78	+ 4,0
110,00	0,70	0,72	+ 2,9
175,00	0,65	0,63	- 3,1
275,00	0,60	0,55	- 8,3
380,00	0,55	0,50	- 9,1
475,00	0,50	0,48	- 4,0
580,00	0,45	0,43	- 4,4
690,00	0,40	0,37	- 7,5
795,00	0,35	0,32	- 8,6
1052,00	0,29	0,28	- 1,1
1180,00	0,30	0,29	- 3,3
1400,00	0,35	0,33	- 5,7
1620,00	0,40	0,40	0,0
1800,00	0,45	0,47	+ 4,4

I - Avaliação da severidade do "flicker" pelo método "long-term"

O período de 10 minutos no qual se baseia o método de avaliação "short-term" (Pst) é adequado para análise dos distúrbios causados por fontes individuais. Nos casos em que o efeito combinado de várias fontes de distúrbios deve ser analisado, como máquinas de solda e motores, ou em casos onde existam longos e variáveis ciclos de carga (fornos a arco), torna-se necessário um critério para longos períodos (Plt).

Este critério pode ser aplicado através de 4 diferentes metodologias [12]:

- 1 - Análise multi-ponto, baseada na curva de Função de Probabilidade Cumulativa (FPC) para níveis instantâneos de "flicker", acumulados por longos períodos;
- 2 - Uso do Pst sobre longos períodos acumulados;
- 3 - "Gauge-point" da distribuição cumulativa de valores de Pst;
- 4 - Uso da raiz quadrada dos valores de Pst cúbicos:

$$Plt = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Psti)^3}{N}} \quad (5.12)$$

Estas diferentes alternativas têm sua aplicabilidade restrita às seguintes condições:

- 1 - O primeiro método prevê que o estágio de leitura e classificação se mantenha em serviço por longos períodos de observação.
- 2 - No segundo método, o efeito de grandes, mas não frequentes distúrbios será muito atenuado no resultado global para longos períodos.
- 3 - Possibilita a análise para uma única saída Pst.
- 4 - Este método de avaliação deve ser ainda checado para situações conhecidas em termos de reclamações de consumidores sobre o problema.

Conclui-se, portanto, que os métodos 1 e 2 têm a desvantagem de requerer a retenção de todos os níveis medidos no classificador durante o período de testes. O método 3, baseado no "gauge-point", é limitado com relação à consideração de grandes distúrbios, porém pouco frequentes, e o método 4 mostra-se interessante para novas investigações.

CAPITULO 6

IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO DO MEDIDOR PADRÃO INTERNACIONAL - UIE

Com base na metodologia proposta pela União Internacional de Eletrotermia - UIE, descrita no capítulo anterior, foram estabelecidas as características funcionais de um medidor, visando à sua implementação a partir de tais características.

O esquema básico proposto em [10] foi dividido em cinco blocos, contemplando as principais fases de processamento específicas, 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 e seletor de ganho.
- Bloco 4 - Quadrador e filtro de média.
- Bloco 5 - Conversor A/D e análise estatística.

A flutuação de tensão é obtida através de demodulação, restrita à faixa de percepção (0,05 a 30 Hz), e ponderada pela curva de sensibilidade visual. O sinal médio quadrático correspondente pode ser analisado de várias maneiras: pelo valor RMS, pelas doses unitárias integradas a cada minuto, ou processando estatisticamente amostras digitalizadas através de um conversor A/D.

As saídas recomendadas para aumentar a flexibilidade do medidor são:

- Saída 1 - Tensão RMS para meio ciclo de tensão de entrada V_0 .
- Saída 2 - Flutuação ponderada de tensão $(G\Delta V)$
- Saída 3 - Valor RMS da flutuação ponderada $\sqrt{(G\Delta V)^2}$
- Saída 4 - Dose unitária de "flicker" $\int_{1\text{min}} \frac{1}{(G\Delta V)^2}$
- Saída 5 - Flutuação ponderada quadrática média $(G\Delta V)^2$

O processamento estatístico, segundo o método UIE, consiste basicamente das seguintes etapas:

- 1 - Conversão análogo-digital do sinal quadrático médio.

- 2 - Classificação das amostras por níveis (mínimo de 64 níveis, correspondentes à conversão digital de 6 bits).
- 3 - Cálculo da Função de Probabilidade Cumulativa (FPC).
- 4 - Verificação da probabilidade de ultrapassagem dos níveis toleráveis.

A seguir será descrito o equipamento implementado com base nas características funcionais recomendadas. Tal equipamento, implementado a nível de protótipo, pode ser subdividido em dois grandes blocos, quais sejam:

1 - PROCESSADOR ANALÓGICO de flutuação de tensão, onde são previstas todas as funções a nível analógico para tratamento do sinal medido;

2 - PROCESSADOR DIGITAL das amostras de "flicker", fase em que se previu desde a conversão A/D até o tratamento estatístico feito através de um microcomputador, permitindo ainda a utilização de recursos periféricos, como gravador "cassette", impressora e monitor de vídeo.

6.1 - Processador Analógico

O processador analógico foi implementado na forma modular, resultando os seguintes módulos:

Módulo 1 - Contém a fonte de alimentação simétrica e regulada em $\pm 15V$, com entrada AC de 110/220 Vrms. Sua função é alimentar os circuitos dos demais módulos do processador analógico.

Módulo 2 - Contém o adaptador de tensão da rede, baseado em um regulador com CAG, para definir a referência para o sinal do medidor.

Módulo 3 - Contém o circuito demodulador (tipo quadrador e os filtros passa-baixa, para eliminação da frequência dupla devida ao multiplicador do demodulador.

Módulo 4 - Contém o filtro de ponderação para a curva de sensibilidade visual e o seletor de ganhos.

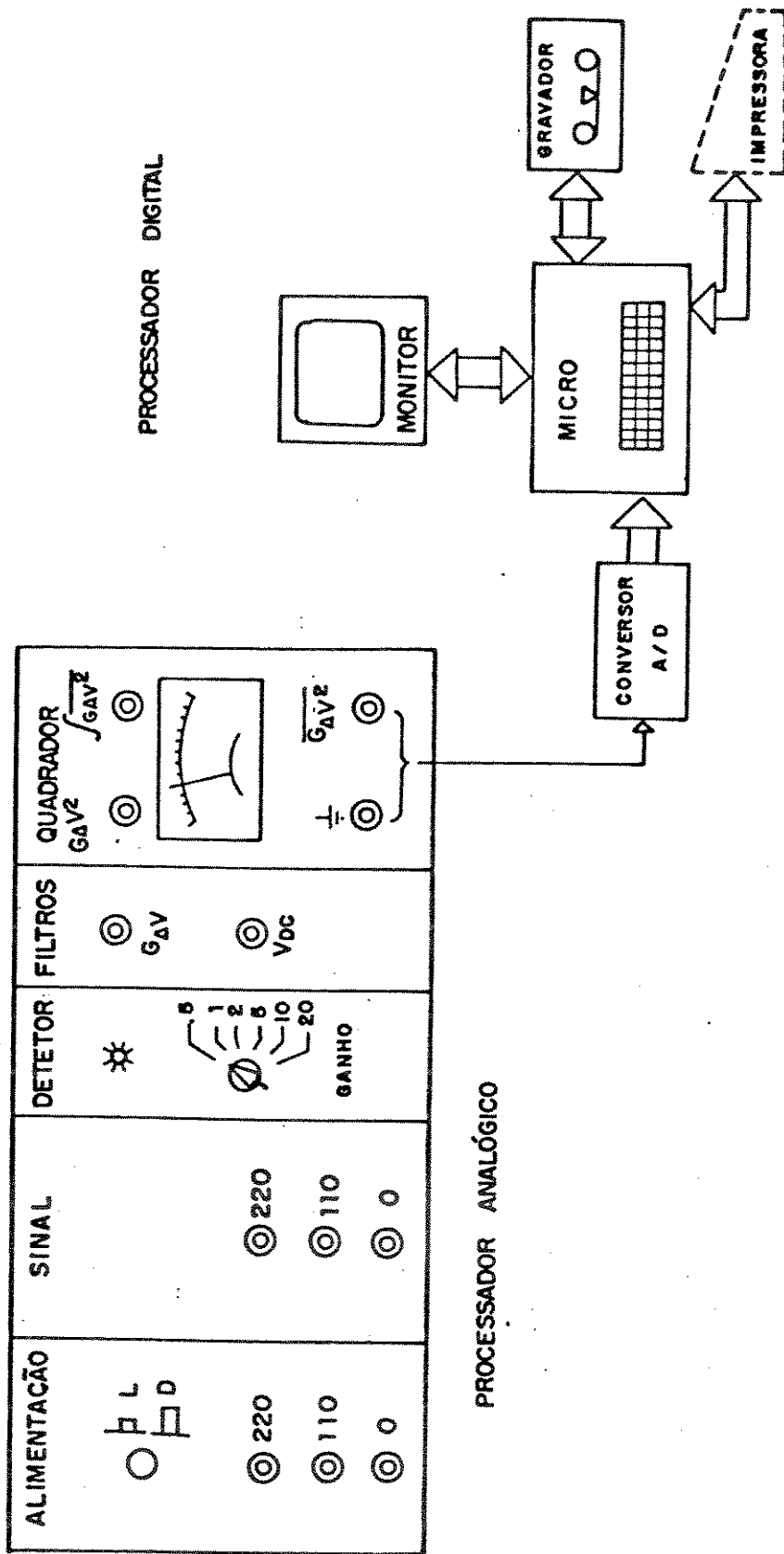


Fig. 6.1 - Processador Analógico Implementado

Módulo 5 - Contém o quadrador da flutuação de tensão ponderada, o filtro de média e um integrador analógico de 1 minuto, com reinicialização automática, para o registro das doses unitárias.

A Fig. 6.2 apresenta o diagrama funcional para o processador analógico, configurado a partir da definição dos módulos acima:

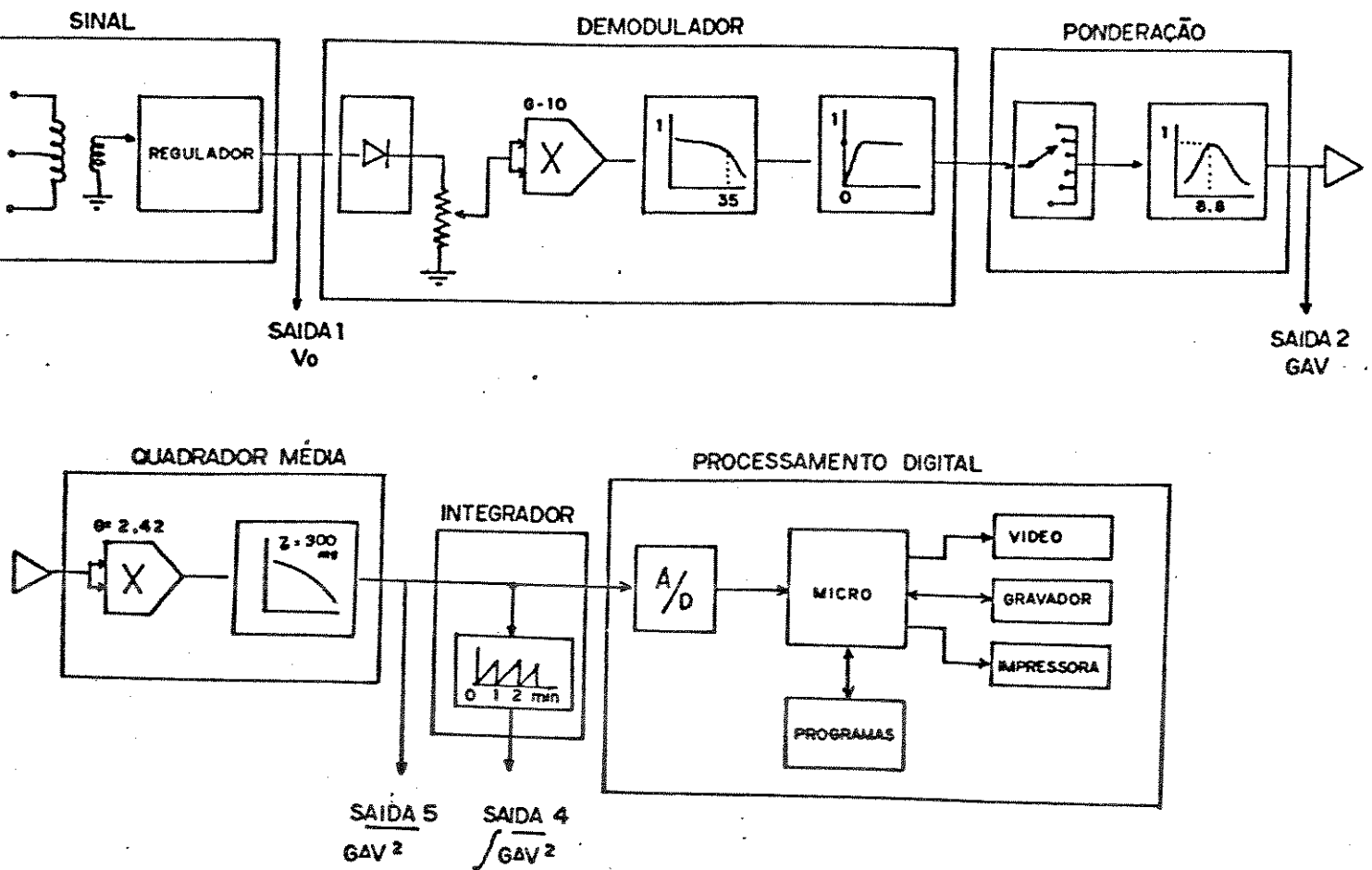


Fig. 6.2 - Diagrama Funcional para o Processador Analógico

6.1.1 - Adaptador do Sinal Medido

O bloco adaptador consiste num transformador com opção de entrada direta de sinais de tensão nas faixas de 60 a 150 e 150 a 250 Vrms, contemplando os níveis comumente obtidos de transformadores de potencial de medição de consumidores supridos em tensão de subtransmissão ou transmissão, e que são convenientemente adaptados à entrada através do regulador de tensão, que ajusta automaticamente o nível médio de tensão a ser medido como referência para o sinal.

A saída secundária do transformador está fixada em 6,73 Vrms, independentemente do nível do sinal de entrada a ser medido nas faixas previstas.

6.1.2 - Demodulação

A demodulação do sinal de entrada segue o procedimento estabelecido pela UIE, ou seja, demodulação através do quadramento do sinal por multiplicação analógica.

A demodulação utilizando multiplicador é baseada na análise já apresentada no Capítulo 5 deste trabalho. A presença do regulador com CAG permite obter as variações de tensão em valores percentuais da tensão de referência, segundo a equação (5.8).

6.1.3 - Filtro de Ponderação

O filtro de ponderação tem como função de transferência aquela recomendada através da referência "UIE", equação (5.9).

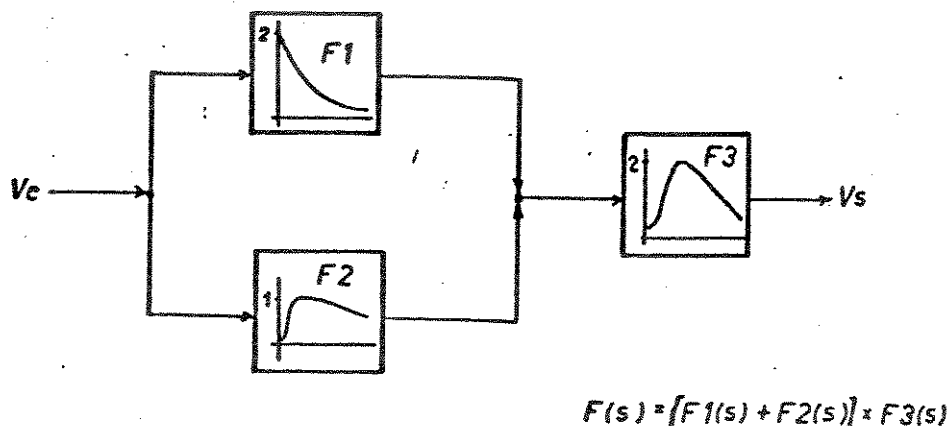


Fig. 6.3 - Estrutura do Filtro de Ponderação

A implementação, partindo da função de transferência estabelecida, foi feita utilizando-se uma estrutura contendo dois filtros ativos passa-faixa e um filtro ativo passa-baixa, associados de acordo com a Fig. 6.3 [14].

A função de transferência $F(s)$ é então dada por:

$$F(s) = [F_1(s) + F_2(s)] \times F_3(s) \quad (6.1)$$

A característica $G(f) = |V_s|/|V_e|$ do filtro implementado é mostrada na Fig. 6.4, sendo que, de acordo com o especificado, o ganho máximo corresponde a 8,8 Hz.

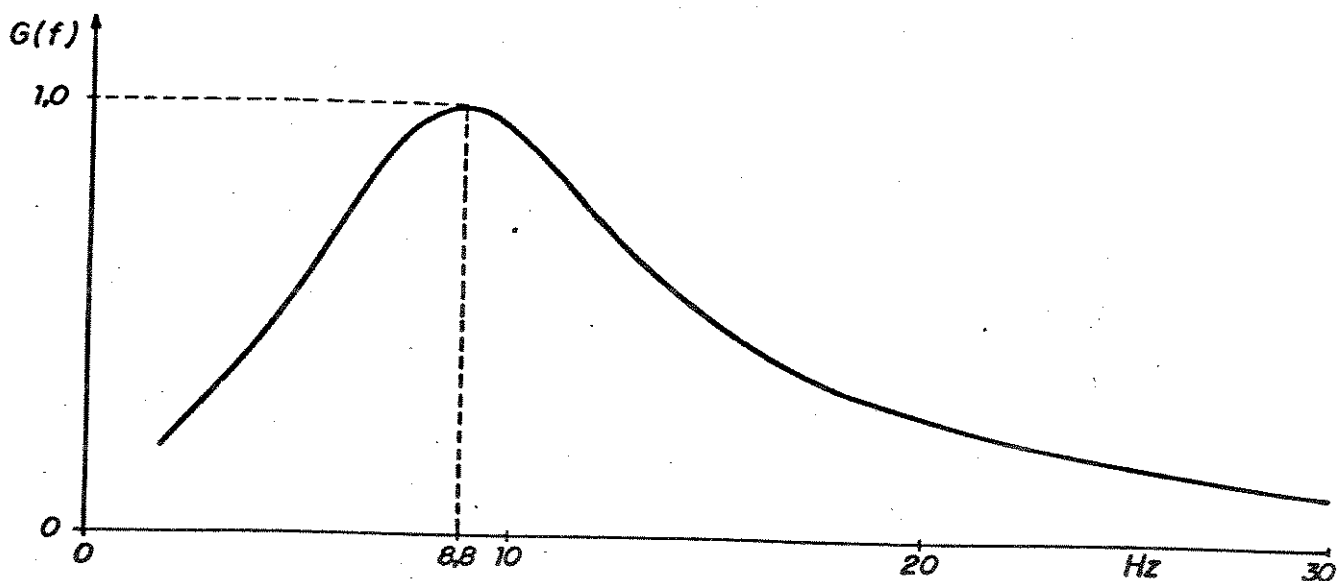


Fig. 6.4 - Característica $G(f)$ do Filtro de Ponderação

A implementação dos filtros foi feita conforme se segue:

Filtro F1: Filtro ativo Passa-Faixa

$$F_1 = \frac{K \omega_l s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_l^2} = \frac{G B s}{s^2 + B s + \omega_o^2} \quad (6.2)$$

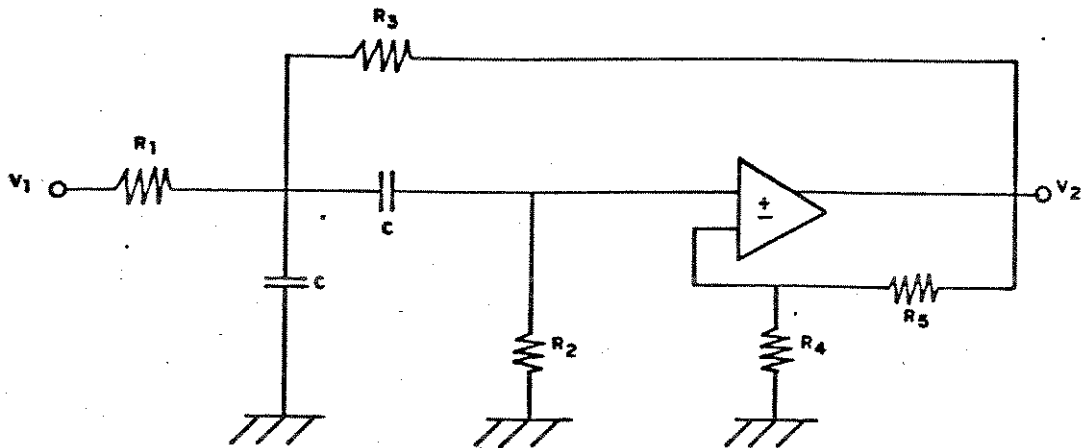
onde

$$B = \frac{1}{C} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} + \frac{1 - \mu}{R_3} \right] \text{ Banda de Passagem} \quad (6.3)$$

$$\omega_0^2 = \frac{1}{R_2 C^2} \left[\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right] \text{ Freqüência Base} \quad (6.4)$$

$$G = \frac{\mu}{R_1 C B} \quad \mu = 1 + \frac{R_5}{R_4} \quad \text{Ganho} \quad (6.5)$$

Circuito:



FILTRO F1 - FILTRO ATIVO PASSA-FAIXA

Filtro F2: Filtro ativo Passa-Baixa

$$F_2 = \frac{2 \omega_3 \omega_4}{s^2 + (\omega_3 + \omega_4)s + \omega_3 \omega_4} = \frac{G b_0}{s^2 + b_1 s + b_0} \quad (6.6)$$

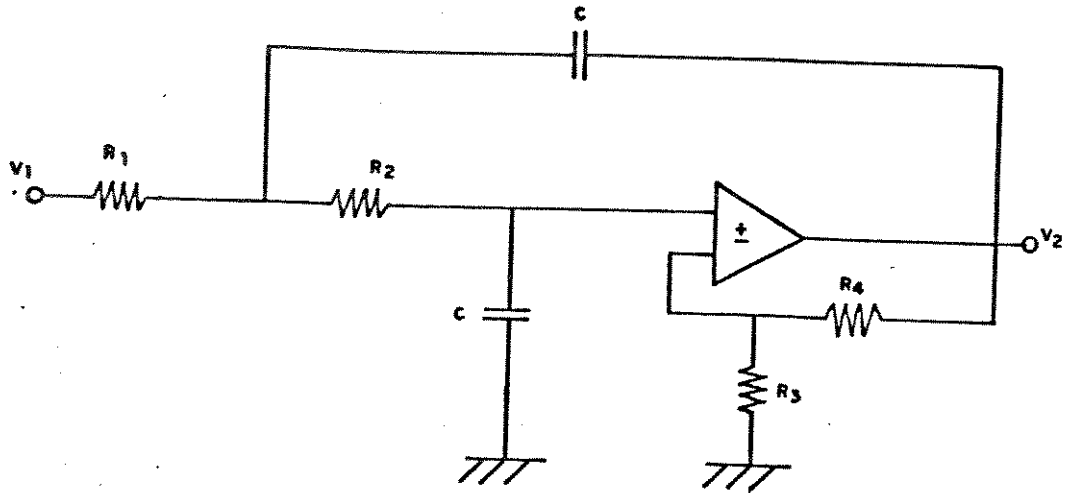
onde:

$$b_0 = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C} \quad (6.7)$$

$$b_1 = \frac{1}{R_2 C_1} (1 + \mu) + \frac{1}{R_1 C} + \frac{1}{R_2 C}$$

$$G = \mu = 1 + \frac{R4}{R3} \quad (6.9)$$

Circuito:



FILTRO F2 - FILTRO ATIVO PASSA - BAIXA

Filtro F3: Filtro ativo Passa-Faixa

$$F3 = \frac{\frac{w3 w4}{2} s}{s^2 + (w3 + w4)s + w3 w4} = \frac{G B s}{s^2 + B s + w0} \quad (6.10)$$

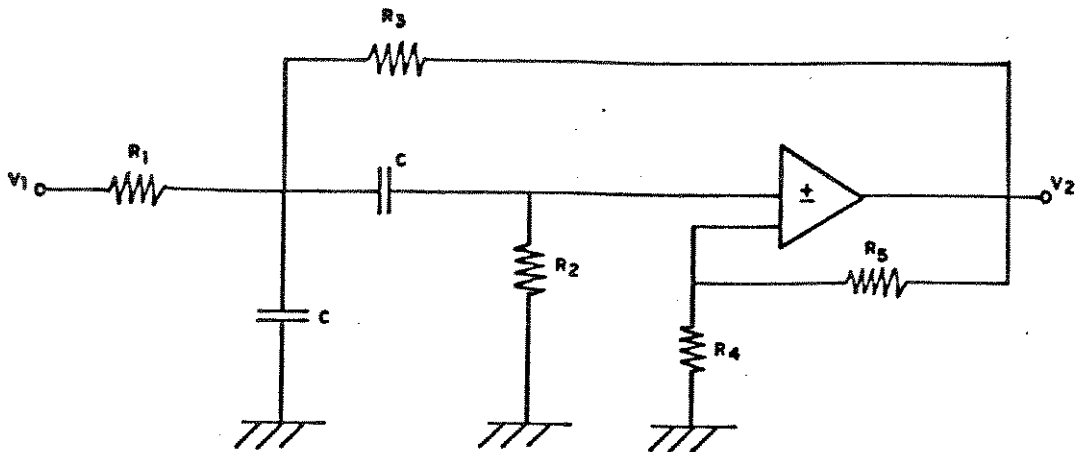
onde:

$$B = \frac{1}{C} \left[\frac{1}{R1} + \frac{2}{R2} + \frac{1 - \mu}{R3} \right] \quad (6.11)$$

$$w0 = \frac{1}{R2 C} \left[\frac{1}{R1} + \frac{1}{R3} \right] \quad (6.12)$$

$$G = \frac{\mu}{R1 C B} \quad \mu = 1 + \frac{R5}{R4} \quad (6.13)$$

Circuito:



FILTRO F3 - FILTRO ATIVO PASSA - FAIXA

6.1.4 - Sinal Quadrático Médio

O sinal demodulado, filtrado e ponderado, correspondente à saída 2 ($G\Delta V$) do medidor, é quadrado através de um multiplicador analógico para produzir um valor eficaz equivalente, dado por:

$$V_{ef}^2 = \frac{1}{2} (G\Delta V)^2 \quad (6.14)$$

A média do valor quadrático é obtida através de um filtro RC com constante de tempo recomendada de 300 ms. Uma vez que o sinal $G\Delta V$ não é periódico, essa média é flutuante.

A constante de 300 ms representa 3 ciclos de 10 Hz, que corresponde aproximadamente à frequência de maior sensibilidade visual, e é assumido como tempo satisfatório para a obtenção da média flutuante.

Por se tratar de um sinal aleatório, o multiplicador adotado nesse estágio é de 4 quadrantes (circuito integrado linear padrão), ajustado para ter ganho $K = 2,42$. Dessa forma, a saída média para a entrada senoidal, com valor de pico unitário, vale:

$$\frac{1}{2} (G\Delta V)^2 = \frac{K^2 V_m^2}{2} = \frac{2,42^2 \times 1}{2} = 1,21 \quad (6.15)$$

Esse ajuste foi escolhido basicamente por duas razões:

- 1 - Nessas condições $(\overline{\Delta V})^2$, ou seja, a saída 5, fornece diretamente o valor quadrático da variação da tensão da rede para "flicker" senoidal de 8,8 Hz e 1% da amplitude 110 Vrms. Para conferir:

$$\Delta V\% = 1\% \times 110 = 1,1 \text{ Vrms} \rightarrow (\Delta V\%)^2 = 1,21 = (\overline{\Delta V})^2$$

- 2 - Com o ajuste do conversor A/D a seguir descrito para 12 mV/nível de conversão, resulta nível 100 para a tensão de 1,21 V. Dessa forma, 1% de flutuação de tensão da rede corresponde ao nível 100 do conversor de 8 bits para o sinal $(\overline{\Delta V})$.

A Fig. 6.5 mostra o sinal quadrático e quadrático médio para uma entrada senoidal.

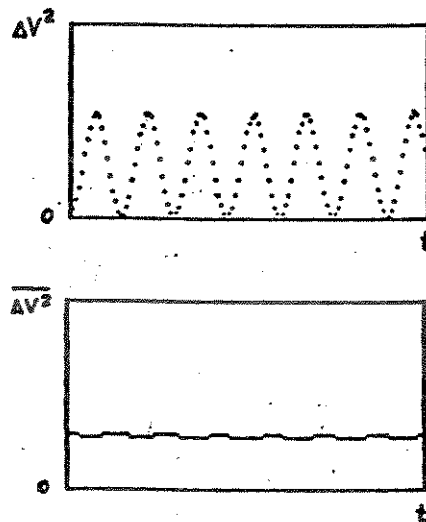


Fig. 6.5 - Sinal Quadrático e Quadrático Médio para Entrada Senoidal 8,8 Hz.

6.1.5 - Dose Unitária

A dose unitária é obtida através da integração analógica do sinal quadrático médio durante intervalos de 1 minuto. Como indicado na Fig. 6.6, a integração é realizada através da carga lenta e de um capacitor de baixas perdas. Um temporizador produz os pulsos de descarga do capacitor a cada minuto através de um FET ligado em paralelo com o capacitor. No caso de uma flutuação de rampas uniformes, zeradas a cada minuto. A Fig. 6.6 mostra a resposta obtida para "flicker" senoidal constante.

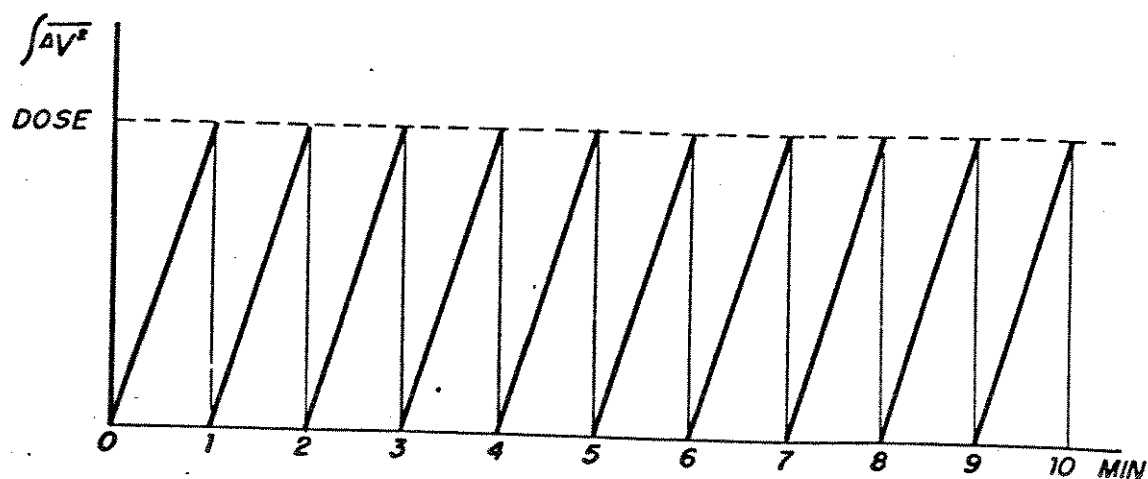


Fig. 6.6 - Registro Temporal das Doses para "Flicker" Constante

6.2 - Processador Digital

Para a realização do tratamento estatístico previsto no critério internacional de análise do fenômeno de "flicker", bem como para o armazenamento dos dados referentes às medições efetuadas, que em geral demandam tempos relativamente grandes, com conseqüente número elevado de dados, foi implementado um processador análogo-digital a partir de uma interface análogo-digital A/D e de um microcomputador.

Este processador digital de "flicker" é aplicado à saída do processador analógico correspondente ao valor de "flicker" médio instantâneo $(\overline{G\Delta V})^2$, sendo o conversor A/D de 8 bits implementado a partir de componentes (CI's) disponíveis no mercado, conforme descrito a seguir.

6.2.1 - Conversor A/D

O conversor análogo-digital do sinal de "flicker" instantâneo foi implementado conforme a Fig. 6.7.

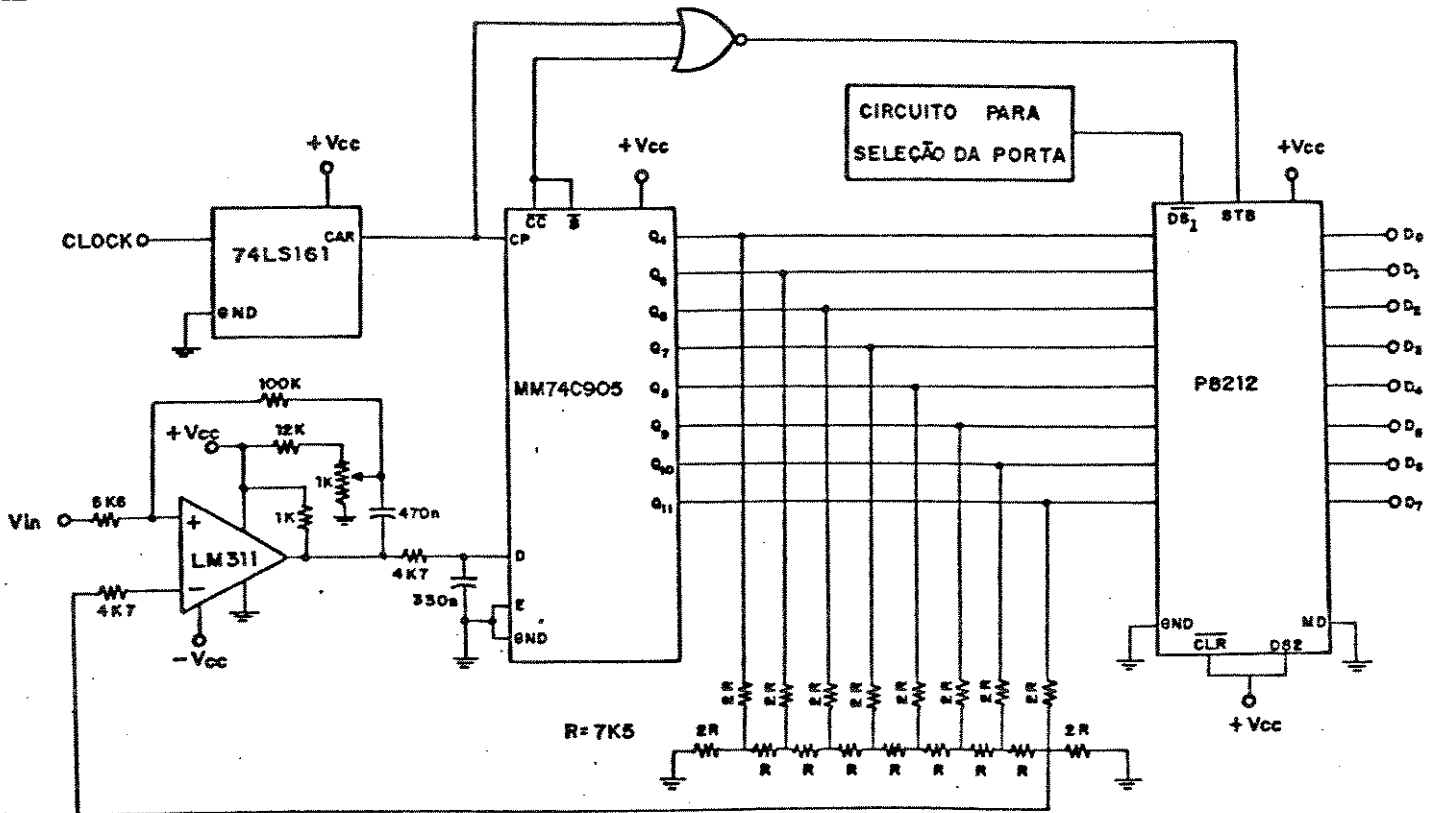


Fig. 6.7 - Circuito Conversor A/D

Partiu-se de um conversor de aproximações sucessivas de 12 bits, dos quais se utilizaram apenas os 8 bits mais significativos. O processo de conversão é clássico, utilizando uma rede $R - 2R$ e um comparador para realimentação [36].

Os pulsos do contador ("clock") são obtidos do próprio microcomputador, sendo que, uma vez que o comparador utilizado não alcança a frequência do micro (1,021 MHz), foi necessário reduzir a velocidade do conversor dividindo a frequência por 16.

$$1.021 \text{ MHz}$$

Teoricamente operando em $\frac{\text{-----}}{16} = 64 \text{ kHz}$, um ciclo

de conversão de 8 bits demora:

$$\frac{8}{64 \times 10^3} = 126 \mu\text{s}$$

ou seja, a frequência de conversão é limitada a 4 kHz.

Como a faixa de utilização se restringe à faixa de dezenas de hertz, tal frequência de conversão é plenamente satisfatória.

A saída digital do conversor é então conectada a uma porta paralela de 8 bits, compatível com o micro. A seleção desta porta a partir do micro requer um endereçamento, que foi implementado juntamente com o circuito do conversor, aproveitando o acesso disponível ao barramento de endereços do micro.

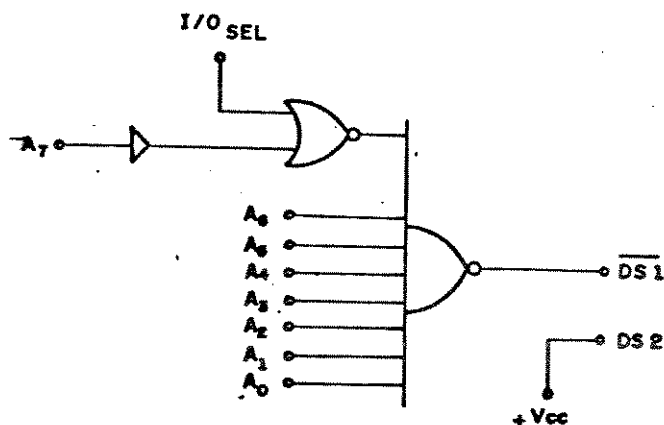


Fig. 6.8 - Circuito de Seleção de Porta do Conversor

A Fig. 6.8 apresenta o circuito para a obtenção do sinal para seleção do endereço livre hexadecimal COFF do micro.

A porta é selecionada quando DS1 = 0 e DS2 = 1. Através da ativação desse endereço, o byte mais significativo (C0) é selecionado automaticamente pelo comando I/O sel e o byte menos significativo (FF) exige que os endereços A0 até A7 estejam no nível lógico 1. Combinando as entradas através de um NAND de 8 entradas, obtém-se a saída DS1 = 0 apenas quando o endereço COFF é solicitado.

DS2 é mantido no nível lógico 1 ligando-se a +Vcc. Assim, cada vez que o micro solicitar o endereço COFF, a porta do conversor transfere o valor atualizado para o barramento de dados do micro.

O processamento completo do sinal amostrado envolve ainda um programa de leitura, cálculo e armazenamento.

6.2.2 - O Sistema Computacional

Uma vez digitalizadas pelo conversor A/D, as amostras de "flicker" são armazenadas e processadas pelo microcomputador de 8 bits.

Foi escolhido um micro da linha "Apple", de 64 Kbytes de memória, em virtude do baixo custo, aliado à facilidade de expansão. De acordo com o fabricante, pode receber diversos periféricos, tais como monitor de vídeo, monocromático ou a cores, impressora paralela, gravador de fita magnética e/ou "disc-drive", com a interface apropriada.

Dadas as condições específicas de aplicação, foi escolhida uma estrutura mínima, constando de:

- 1 Microcomputador
- 1 Monitor de Vídeo Monocromático
- 1 Gravador de Fita
- 1 Impressora

No micro escolhido, o sistema operacional está embutido e consta de um monitor para linguagem BASIC - própria para gráficos em alta resolução, e de um mini-assembler, com o qual se podem compor programas em linguagem de máquina (LM), de execução extremamente rápida. Através de comandos diretos, pode-se combinar a programação BASIC com a LM. Dessa forma, pode-se explorar as facilidades gráficas da primeira com a rapidez de processamento da segunda linguagem.

6.2.3 - Processamento Digital

O programa computacional admite 3 tipos de processamento das amostras obtidas:

- 1 - Amostragem direta do sinal;
- 2 - Amostragem e classificação em níveis;
- 3 - Amostragem, integração periódica e classificação em doses.

Para cada um dos processamentos existem saídas específicas, em forma de gráficos e listagens.

Os diagramas de blocos a seguir mostram cada processamento.

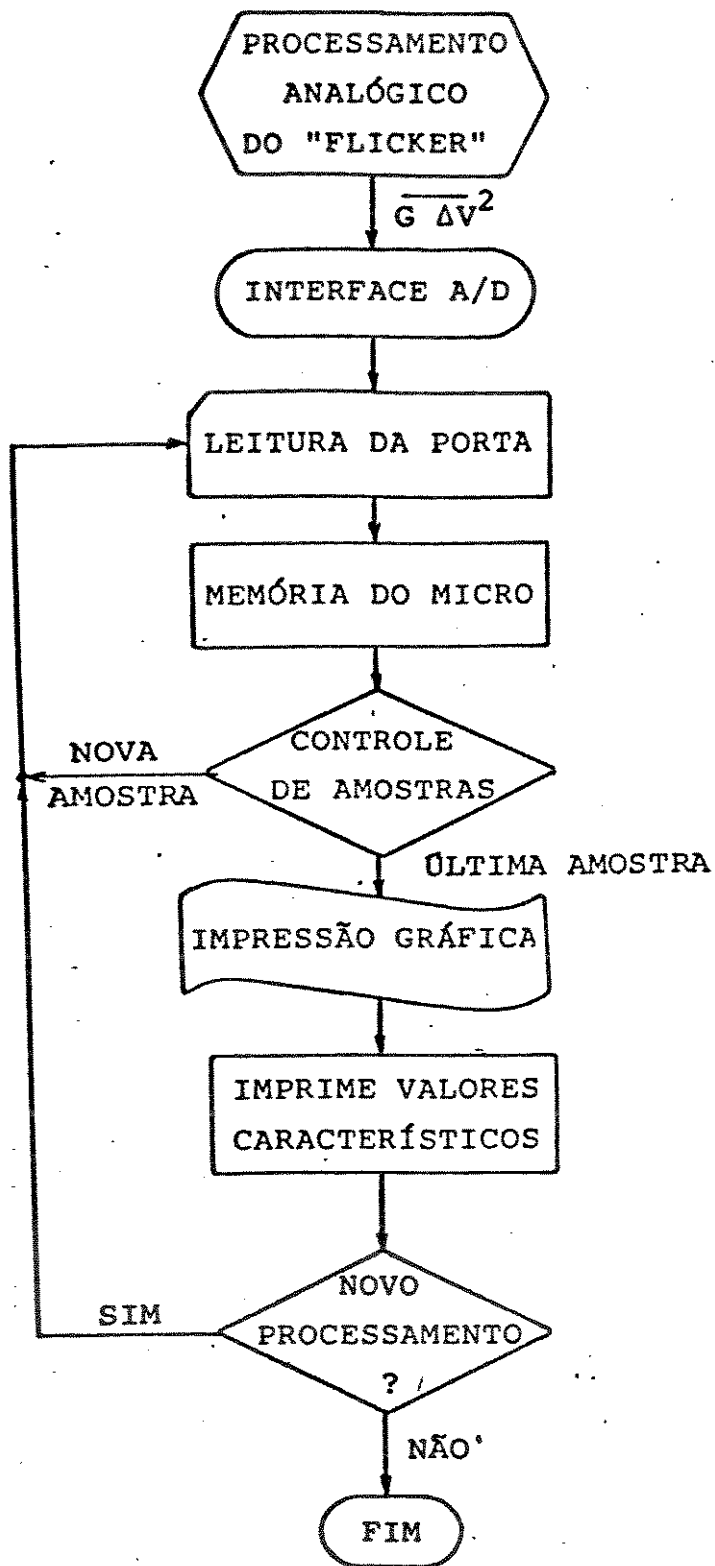


Fig. 6.9 - Amostragem Direta do Sinal

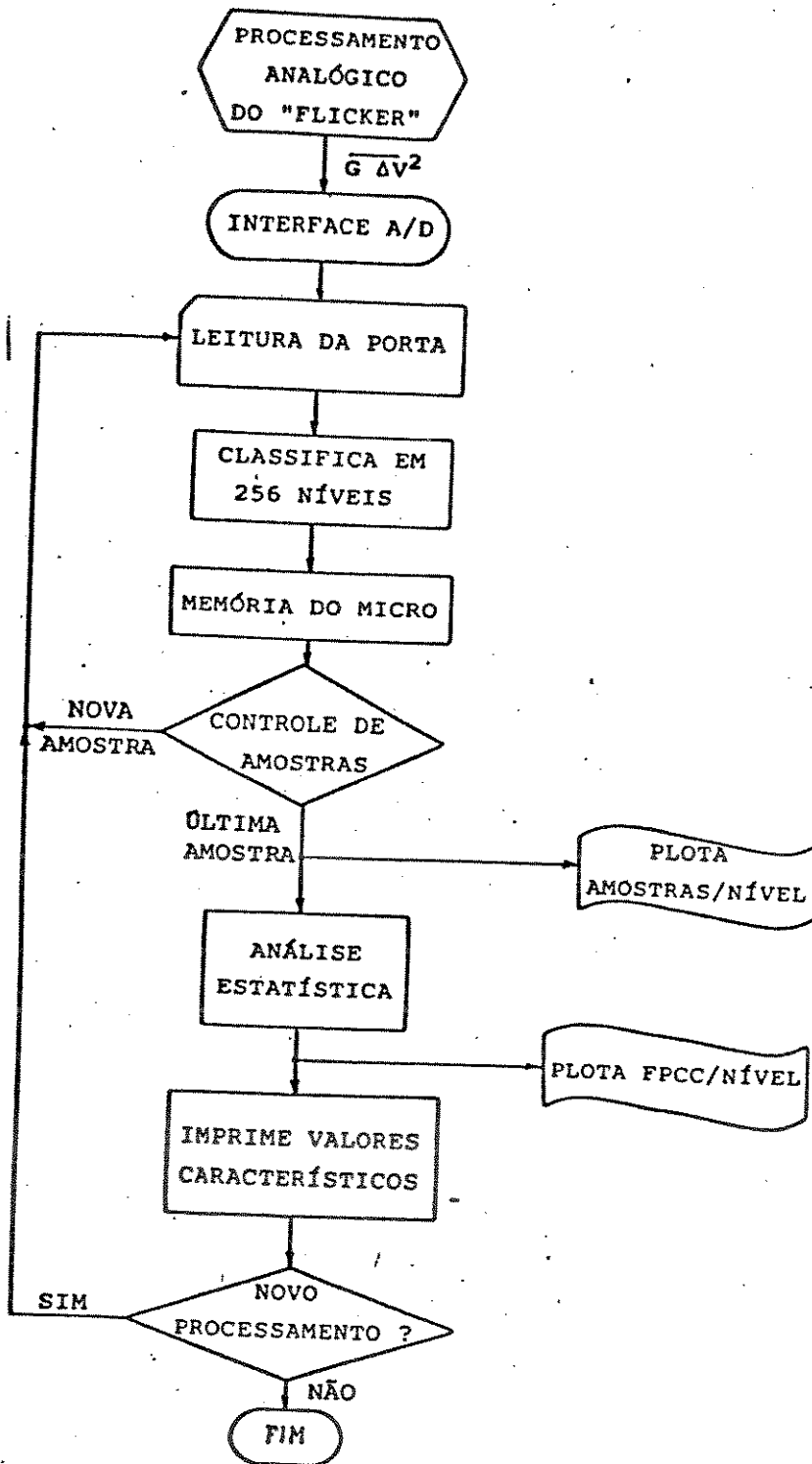


Fig. 6.10 - Amostragem e Classificação em Níveis

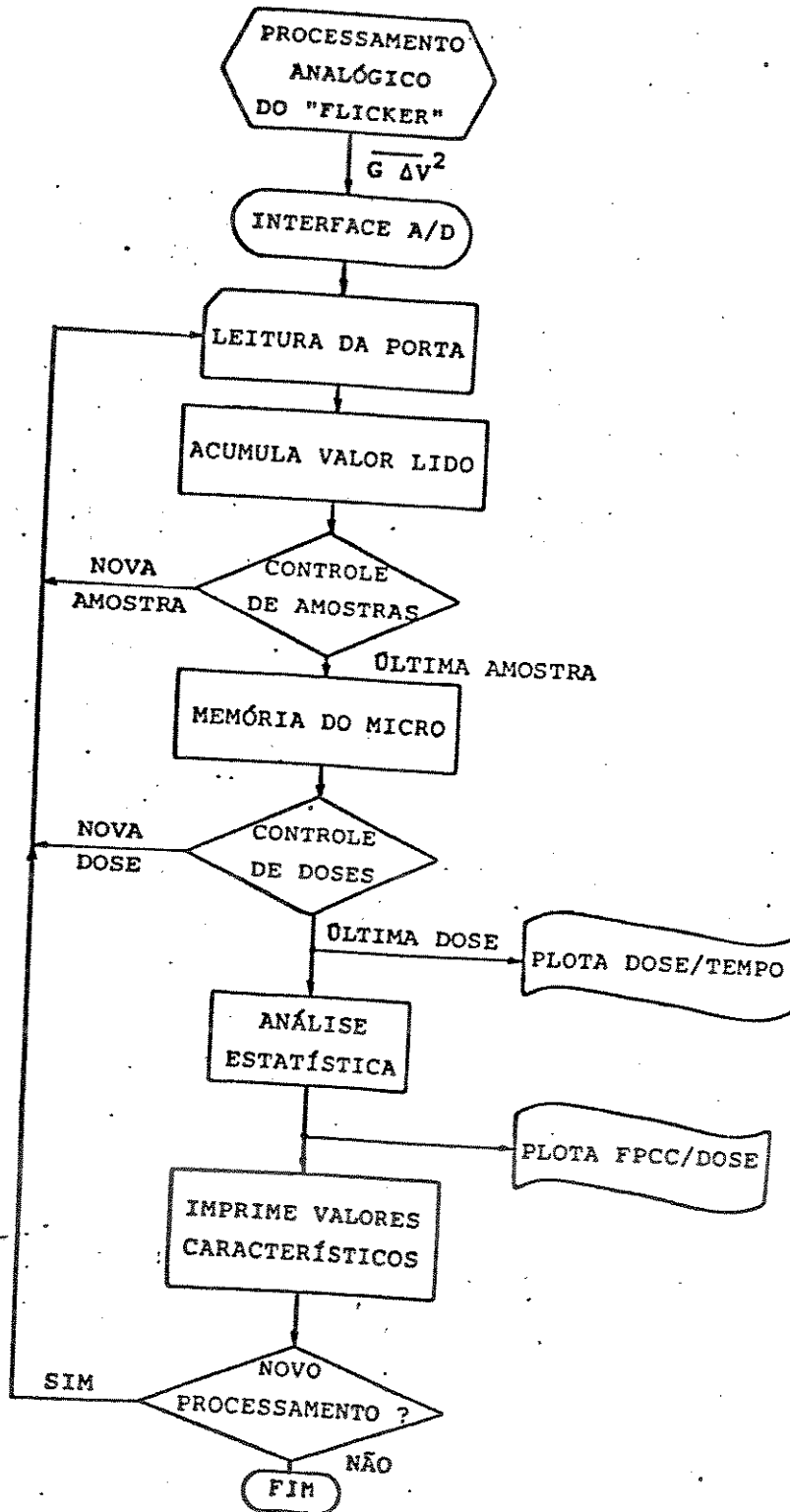


Fig. 6.11 - Amostragem, Integração e Análise de Dados

A figura abaixo mostra uma saída obtida com o primeiro tipo de processamento. Os valores característicos como média, máxima e mínima são obtidos após a análise das amostras armazenadas.

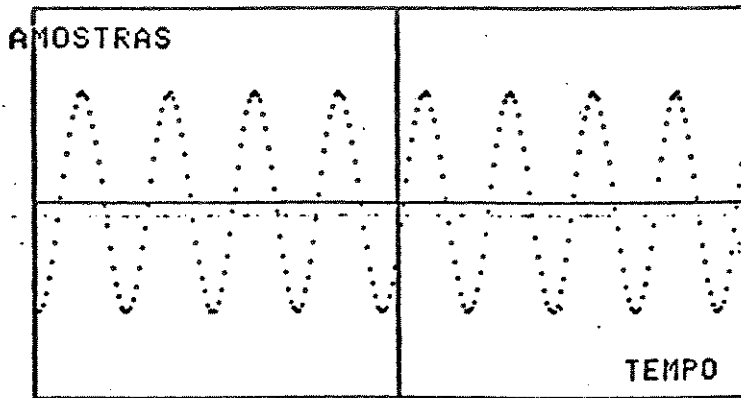


Fig. 6.12 - Amostragem Direta do Sinal

A Fig. 6.13 mostra as saídas obtidas pela segunda forma de processamento. No exemplo, o sinal processado é a senóide da Fig. 6.12. A classificação em níveis de 5000 amostras, obtidas a uma taxa de 300 amostras/segundo, resulta na curva de distribuição apresentada. Como esperado, o maior número de amostras ocorre nos níveis máximo e mínimo da senóide, que correspondem às regiões com menores derivadas (d/dt). Assim, a curva de distribuição das amostras por níveis corresponde à função de tempo de permanência/nível, a partir da qual se obtém a função probabilidade cumulativa (F.P.C.).

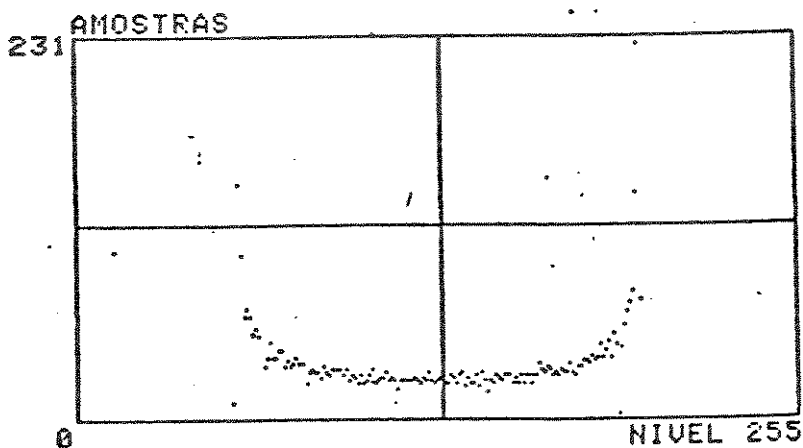


Fig. 6.13 - Classificação em Níveis da Função Seno

6.2.4 - Análise Estatística

A função de probabilidade cumulativa (F.P.C.) para o caso de amostragem discreta é definida por:

$$F.P.C.i = \sum_0^i \frac{N_i}{N_t}, \quad i = 0, n \quad (6.16)$$

onde:

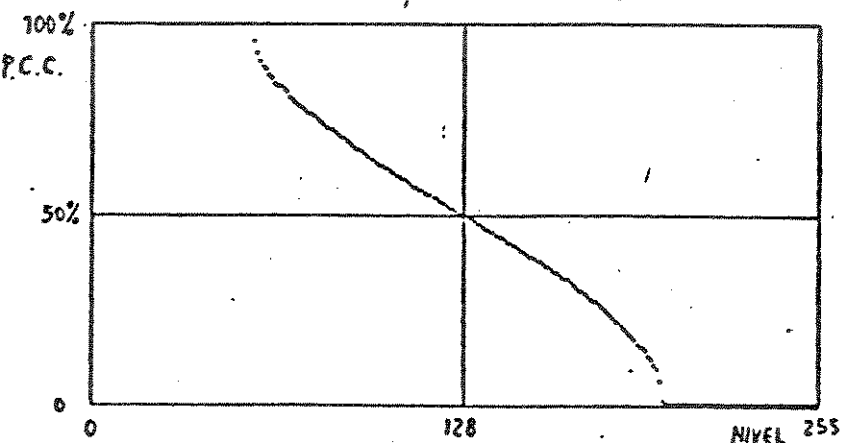
- F.P.C. - probabilidade da amostra ter valor < nível i;
- N_i - número de amostras no nível i;
- N_t - número total de amostras;
- n - número de níveis (p/ 8 bits, n = 256)

A função de probabilidade cumulativa complementar (F.P.C.C.), dada por:

$$F.P.C.C.i = 1 - F.P.C.i, \quad i = 0, n \quad (6.17)$$

representa a probabilidade de uma amostra ultrapassar um determinado nível i, ou reversamente, corresponde à fração do tempo total em que esse nível é ultrapassado. Esta análise permite o confronto dos valores obtidos nas medições com os limites pré estabelecidos, correspondentes às faixas consideradas toleráveis para o fenômeno.

A Fig. 6.14 mostra o F.P.C.C. para o sinal senoidal amostrado e classificado anteriormente. Os dados estatísticos relativos a essa curva estão listados ao lado.



Análise do "Flicker"

- Nível médio = 128
- Desvio padrão = 63,5
- Nr. de amostras = 5001
- P 0,1% = 202
- P 1% = 201
- P 3% = 200
- P 10% = 198

Fig. 6.14 - Análise Estatística do "Flicker" Senoidal

A análise estatística supõe uma distribuição normal das amostras em torno da média. Esse não é o caso para a senóide amostrada, porém a análise é válida no caso de "flicker" real.

As informações de interesse para a análise estatística são:

Valor médio μ - corresponde ao nível para o qual o F.P.C.C é igual a 0,5.

Desvio Padrão σ - corresponde, para distribuição normal, ao valor:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{NA} (N_j - \mu)^2}{NA}} \quad (6.18)$$

onde: NA - número de amostras;
 N_j - nível da amostra j ;
 μ - nível médio.

P0,1, P1, P3, P10 - correspondem aos níveis cujas probabilidades de ultrapassagem sejam 0,1%, 1%, 3% e 10%. Esses valores são utilizados para se calcular outras grandezas ligadas ao efeito "flicker", p.ex., Pst (5.11)

O terceiro tipo de processamento é similar ao segundo, porém considera a F.P.C. das doses de "flicker" em lugar dos próprios níveis amostrados. A dose de "flicker" foi definida como sendo:

$$\text{Dose } i = \int_{t_i}^{t_i + \Delta t} f(t) dt \quad (6.19)$$

onde:

$f(t)$ = sinal de "flicker" instantâneo $f(t) = \frac{1}{(G\Delta V)^2}$
 i = instante considerado;
 Δt = intervalo de tempo (Δt 1 minuto)

Uma vez que o processamento digital é baseado em amostras discretas, a dose é calculada através da somatória:

$$\text{Dose } i = \sum_{i=1}^{i+NA} f_i \quad (6.20)$$

onde: NA = número de amostras de cada intervalo i . Considerando uma taxa de amostragem de 300 A/seg, deve-se tomar 18000 amostras para cada dose de 1 minuto.

CAPITULO 7

TESTES DE LABORATÓRIO

Neste Capítulo são apresentados os testes de laboratório realizados com o protótipo do medidor objetivando a verificação do desempenho e a aferição dos diversos blocos analógicos e digitais que compõem o sistema.

Os testes tiveram como base as características recomendadas pela União Internacional de Eletrotermia, sendo que as montagens em bancada foram idealizadas para atenderem às finalidades específicas de cada teste.

As aferições foram feitas por partes e também para o conjunto desenvolvido, de modo a adequar as diversas respostas às faixas de tolerância ou aos desvios máximos especificados pela UIE.

7.1 - Convergência do Regulador da Tensão de Entrada

Os testes para verificação da convergência do circuito regulador com controle automático de ganho (CAG) consistiram na avaliação da resposta de tal circuito regulador a degraus para diferentes amplitudes de tensão. Para tanto foram plotadas as respostas obtidas na saída do regulador, conforme o esquema da Fig. 7.1 abaixo, obtendo-se a resposta de tensão x tempo apresentada na Fig. 7.2.

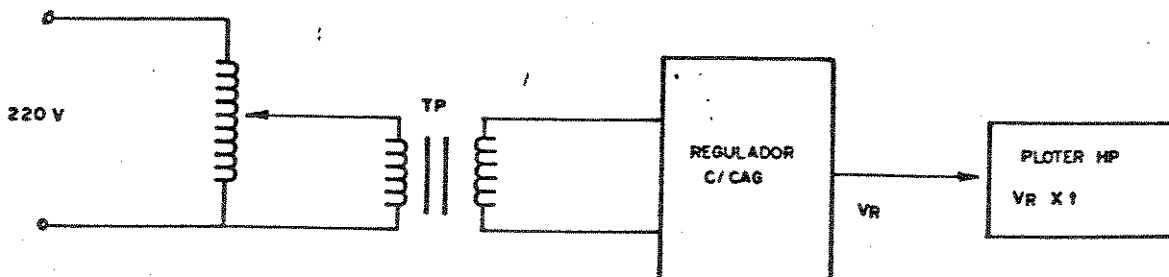


Fig. 7.1 - Esquema para Teste do Regulador

Diferentes níveis de tensão de entrada são injetados para avaliar a faixa de regulação e o tempo de resposta do regulador a essas bruscas variações.

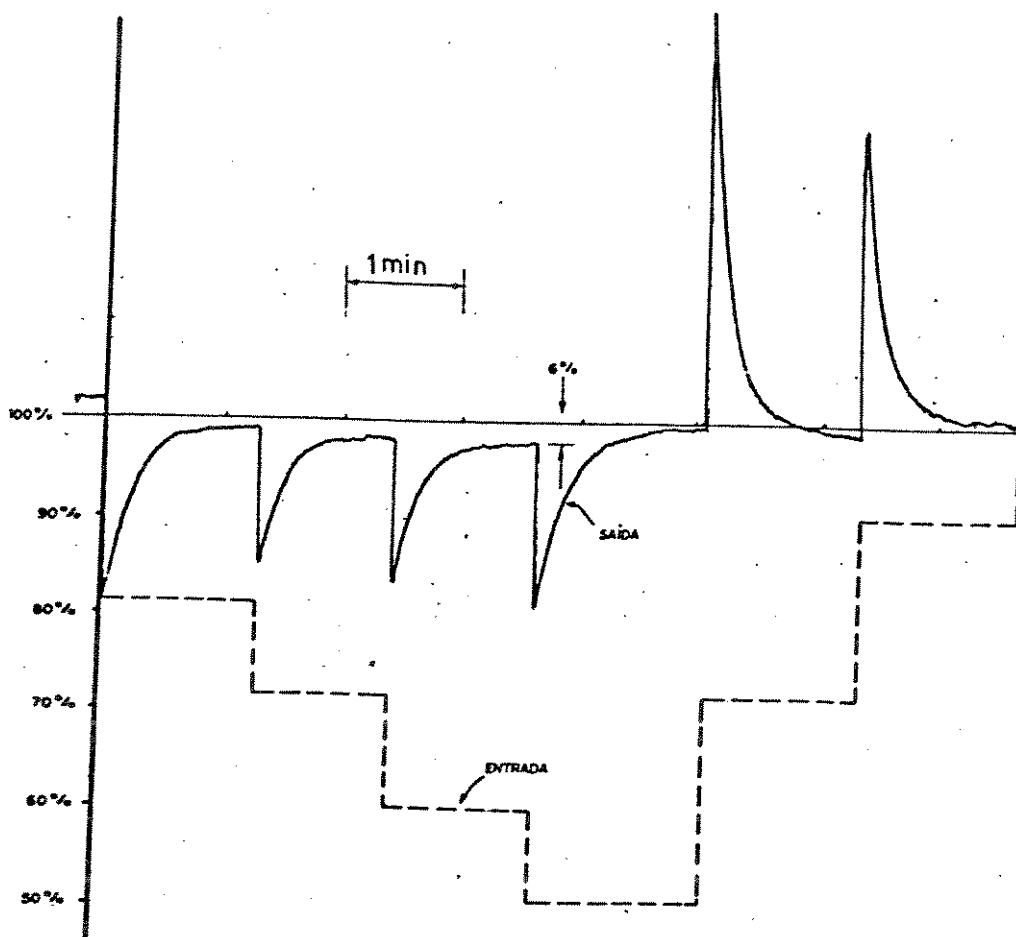


Fig. 7.2 - Respostas do Regulador

7.2 - Filtro de Ponderação

7.2.1 - Teste de Calibração

Para a calibração final do filtro de ponderação, foi montado em laboratório um esquema, Fig. 7.3, que possibilitou o traçado da resposta em frequência para cada um dos filtros - F1, F2 e F3, que compõem o filtro de ponderação, conforme visto no Capítulo 6.

Tal traçado permitiu a calibração final do filtro através de ajustes nos parâmetros previamente calculados.

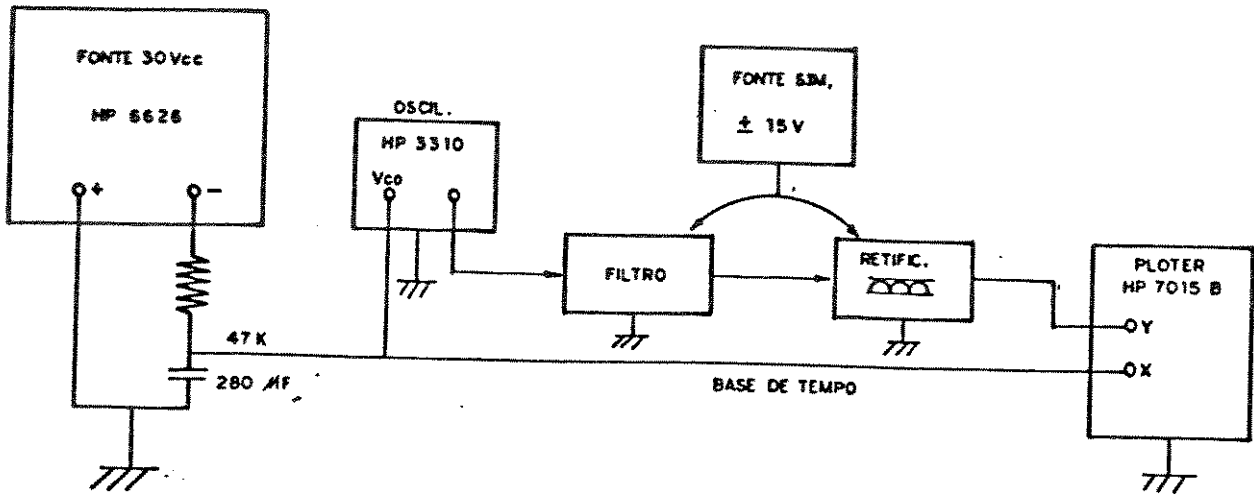


Fig. 7.3 - Esquema para a Calibração

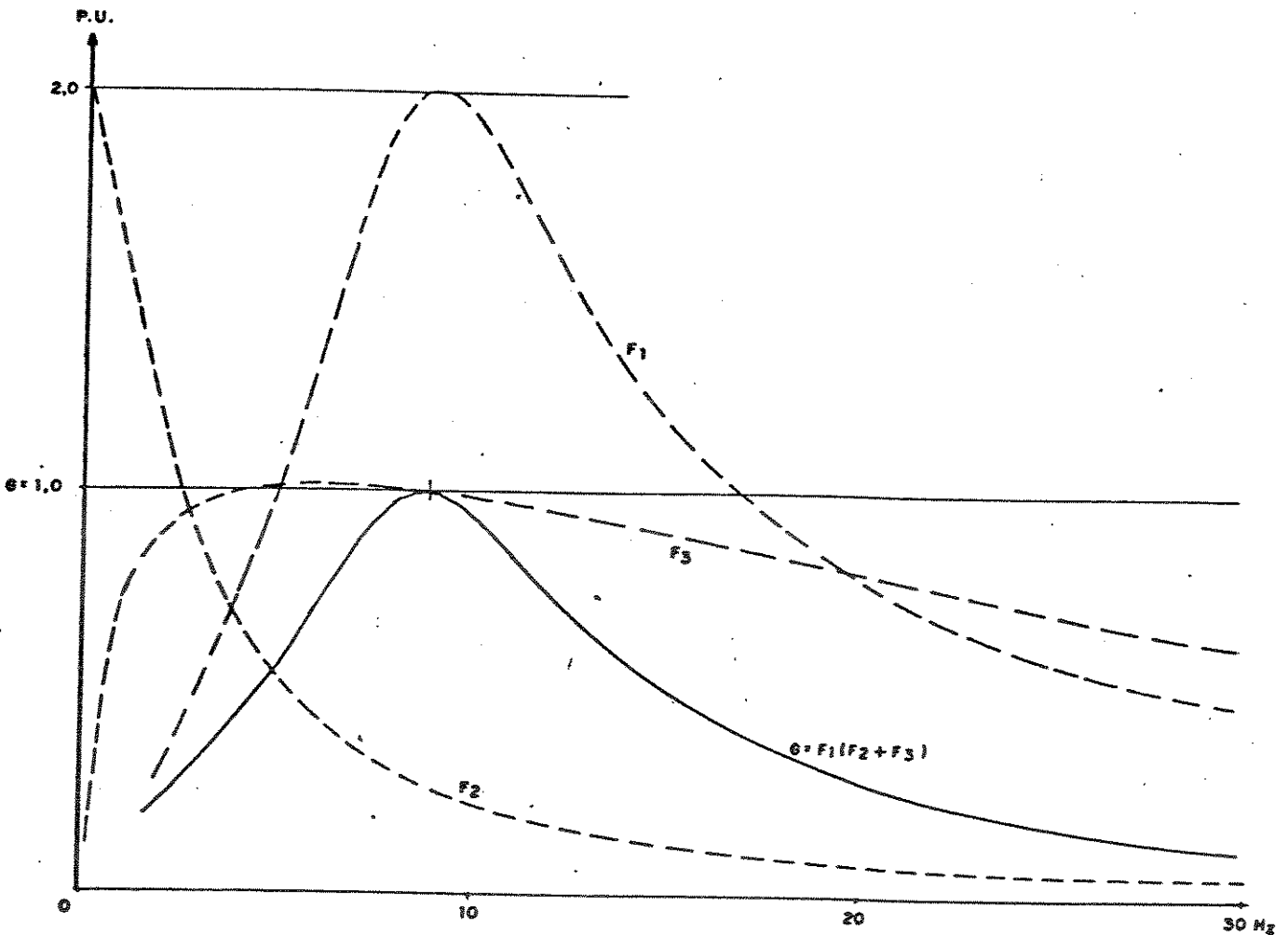


Fig. 7.4 - Resposta em Frequência para Filtro de Ponderação

7.2.2 - Testes de Validação

Para verificar se as características do filtro de ponderação estão de acordo com as recomendações internacionais estabelecidas pela UIE, foram realizados testes de laboratório objetivando a avaliação de resultados comparativos para sinal de entrada senoidal e retangular.

A Fig. 7.5 apresenta o esquema implementado em laboratório para os testes.

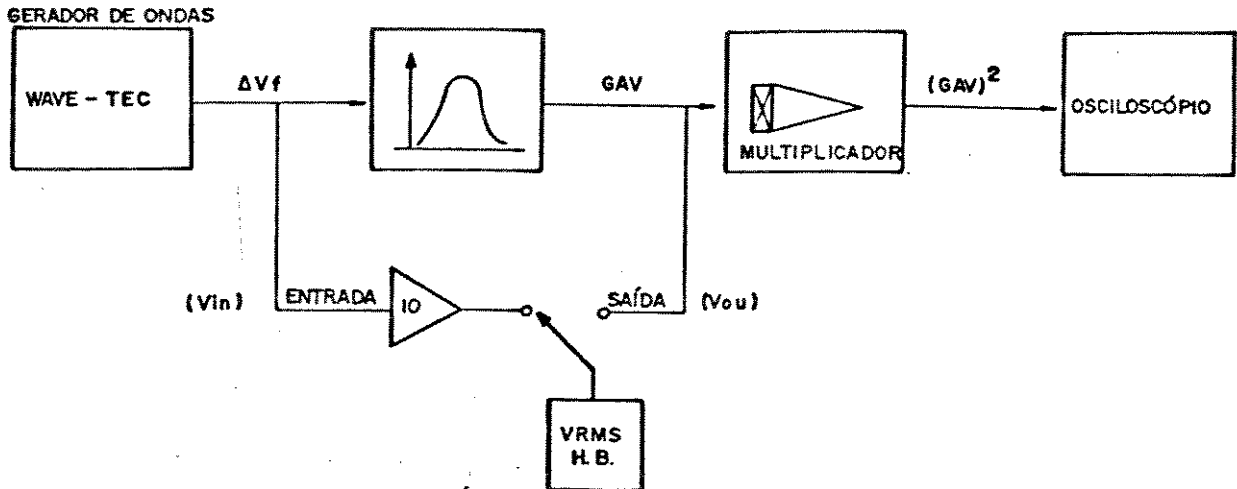


Fig. 7.5 - Esquema para Testes de Validação

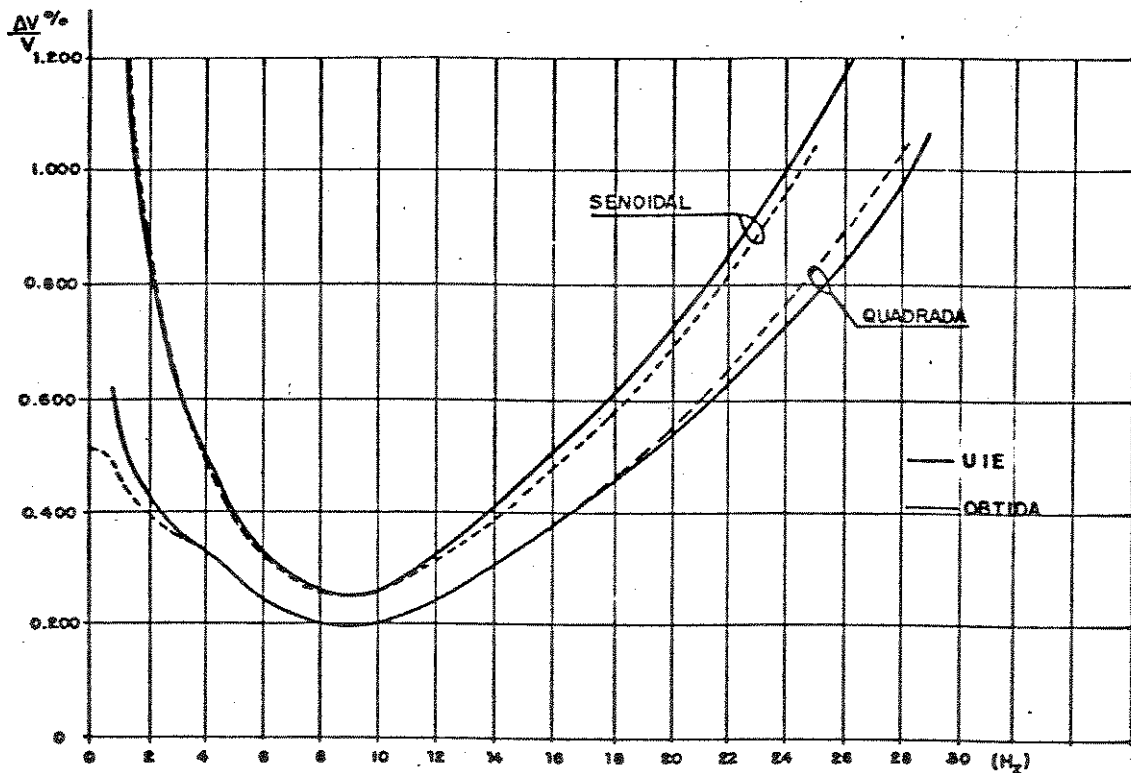


Fig. 7.6 - Curvas Comparativas de Limiar de Sensibilidade

Nos testes para o sinal senoidal foram utilizados: ganho ($G = 1$) e saída para a frequência de 8,8 Hz, fixada em (1 pu).

Para o sinal quadrático, utilizou-se ganho ($G = 1$) e tensão fixada em 1 pu para a frequência de 8,8 Hz.

Os resultados obtidos, apontados na Fig. 7.6, mostraram que as especificações UIE foram atendidas na faixa de precisão de $\pm 5\%$.

7.3 - Desempenho Estático do Conversor Análogo-Digital A/D

O teste para calibração do conversor A/D e a verificação do desempenho estático do mesmo foram feitos através da implementação da figura abaixo.

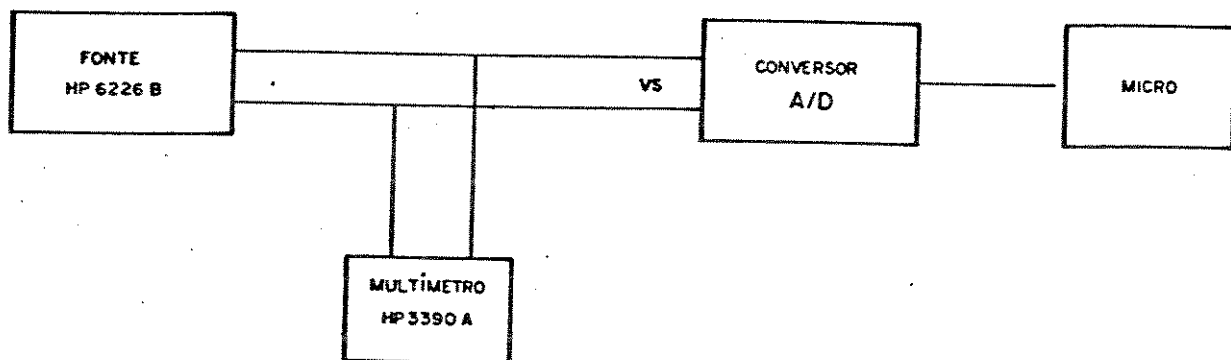


Fig. 7.7 - Calibração do Conversor A/D

O sinal analógico de entrada do conversor V_s foi medido através de um multímetro HP e os níveis médios de saída foram convertidos em nível digital de 8 bits - 256 níveis, para aquisição pelo microcomputador do sistema de medição.

A Tabela a seguir apresenta os resultados obtidos no teste.

Tabela 7.1: Resultados da Conversão A/D

Entrada (Volt)	Saída (Nível)	Entrada (Volt)	Saída (Nível)
0,005	0	0,360	30
0,010	1	0,480	40
0,015	1	0,600	50
0,020	2	0,720	60
0,025	2	0,840	71
0,030	3	0,960	81
0,035	3	1,080	91
0,040	3	1,200	101
0,045	4	1,320	110
0,050	4	1,440	120
0,055	5	1,560	131
0,060	5	1,680	141
0,065	5	1,800	151
0,070	6	1,920	161
0,075	6	2,040	171
0,080	7	2,160	181
0,085	7	2,280	190
0,090	7	2,400	200
0,095	8	2,520	211
0,100	8	2,640	221
0,110	9	2,760	231
0,120	10	2,880	241
0,240	20	3,000	251

A taxa de conversão resultante é de 12 mv/nível, com faixa de decisão em torno de 10 mv/nível. Sendo o conversor de 8 bits, tem-se um total de $2^8 = 256$ níveis, ou seja, o sinal analógico pode alcançar $256 \times 12 \text{ mv}$, igual a 3,06 V pico.

A Fig. 7.8, a seguir, mostra o desempenho estático do conversor A/D.

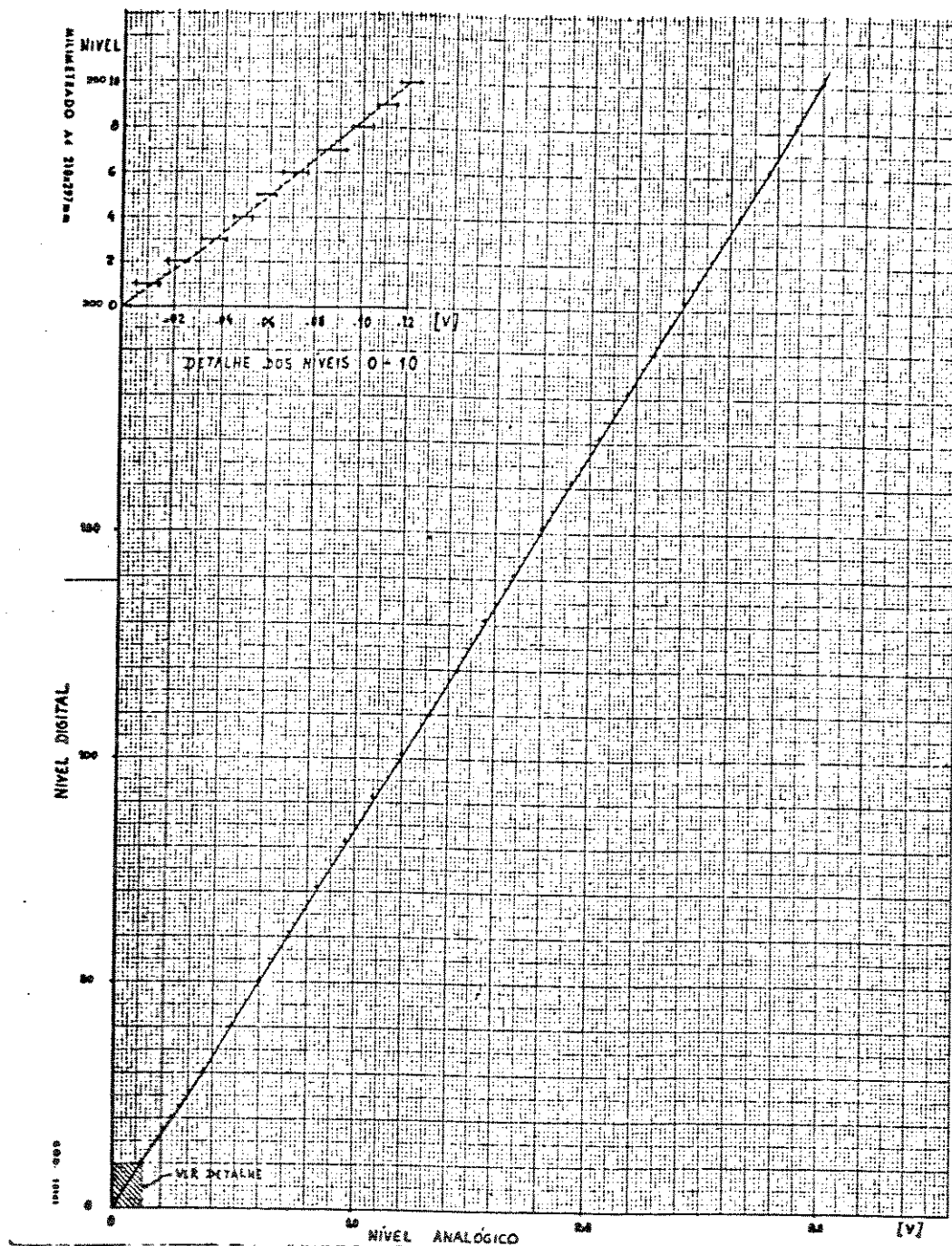


Fig. 7.8 - Característica Estática do Conversor A/D

7.4 - Desempenho Dinâmico do Conversor Análogo-Digital (A/D)

Usando-se um gerador de funções, foram amostrados sinais senoidal, triangular, onda quadrada e dente de serra. No teste foram tomadas 256 amostras a uma razão de 300 amostras/segundo, com o sinal ajustado em 10 Hz.

As figuras abaixo, plotadas através do microcomputador, mostram que a linearidade e a acuidade são plenamente satisfatórias.

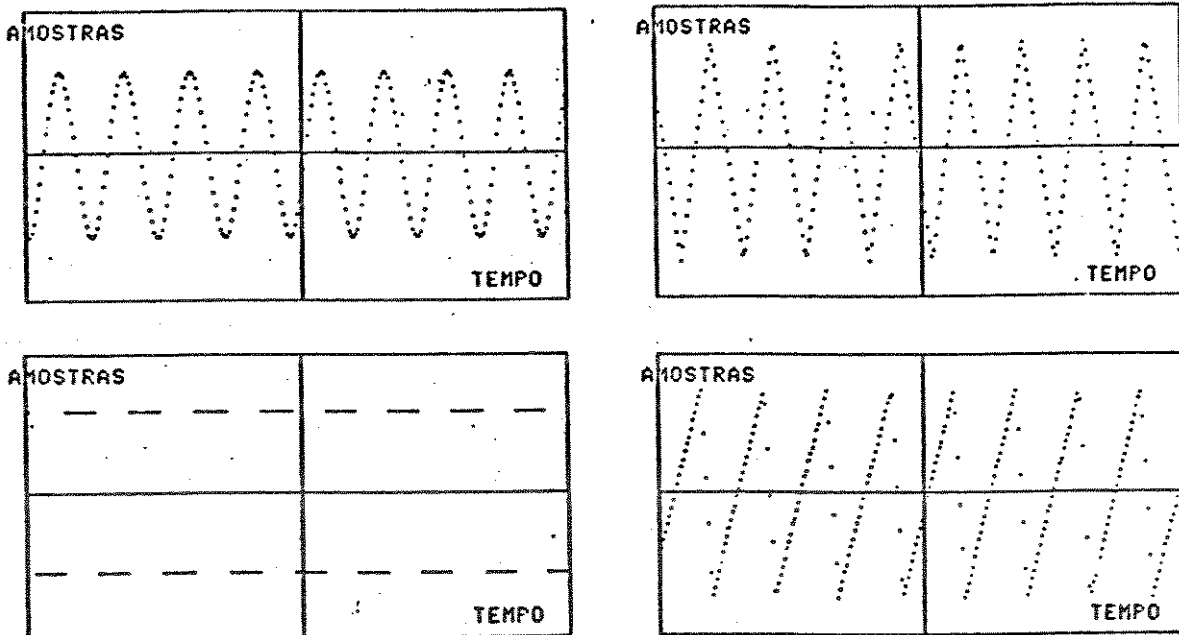


Fig. 7.9 - Característica Dinâmica do Conversor A/D

CAPITULO 8

ENSAIOS DE CAMPO

Diversos ensaios de campo foram realizados com o protótipo do medidor de cintilação luminosa desenvolvido. Tais testes objetivaram a avaliação do desempenho em campo e também a verificação, em condições reais de operação, das cargas causadoras do efeito (fornos elétricos a arco) e dos níveis de perturbação impostos à rede de suprimento em diferentes configurações do sistema e condições operativas de tais cargas.

Para tanto, os testes foram efetuados junto aos seguintes consumidores a nível de subtransmissão (138 kV):

- 1 - Cia. Ferro e Aço de Vitória (COFAVI) - Espírito Santo Centrais Elétricas S.A. (ESCELSA);
- 2 - Cia. Mendes Júnior - Centrais Elétricas de Minas Gerais (CEMIG);
- 3 - Villares Indústrias de Base S.A. (VIBASA) - Eletricidade de São Paulo (ELETROPAULO).

Em todos os casos, os valores medidos são confrontados com os limites de perturbação pré-estabelecidos; contudo, não se constitui objetivo deste trabalho qualquer verificação de violação de tais limites, mesmo porque tais ensaios foram tratados a nível experimental.

Os casos analisados foram separados em função das diferenças de condições de suprimento, ou mesmo da carga, conforme será mostrado a seguir.

8.1 - Medições no Ponto de Acoplamento Comum para Rede de 138 kV Suprindo um Único Forno a Arco.

Para o consumidor COFAVI, suprido em 138 kV através de duas linhas radiais de 20 km a partir da SE Pitanga da ESCELSA, considerada como ponto de acoplamento comum (PAC) entre a carga perturbadora e outras cargas, foram feitas diversas séries de medições objetivando a quantificação das doses unitárias de "flicker" (DU) prescritas no método francês, disponível como uma das saídas do protótipo do medidor.

Tais séries consideraram o sistema supridor, conforme Fig. 8.1, para diversas condições operativas da carga, quais sejam:

- a) com o forno de 48 MVA desligado;
- b) com o forno de 48 MVA na fase de fusão;
- c) com o forno de 48 MVA na fase de refino.

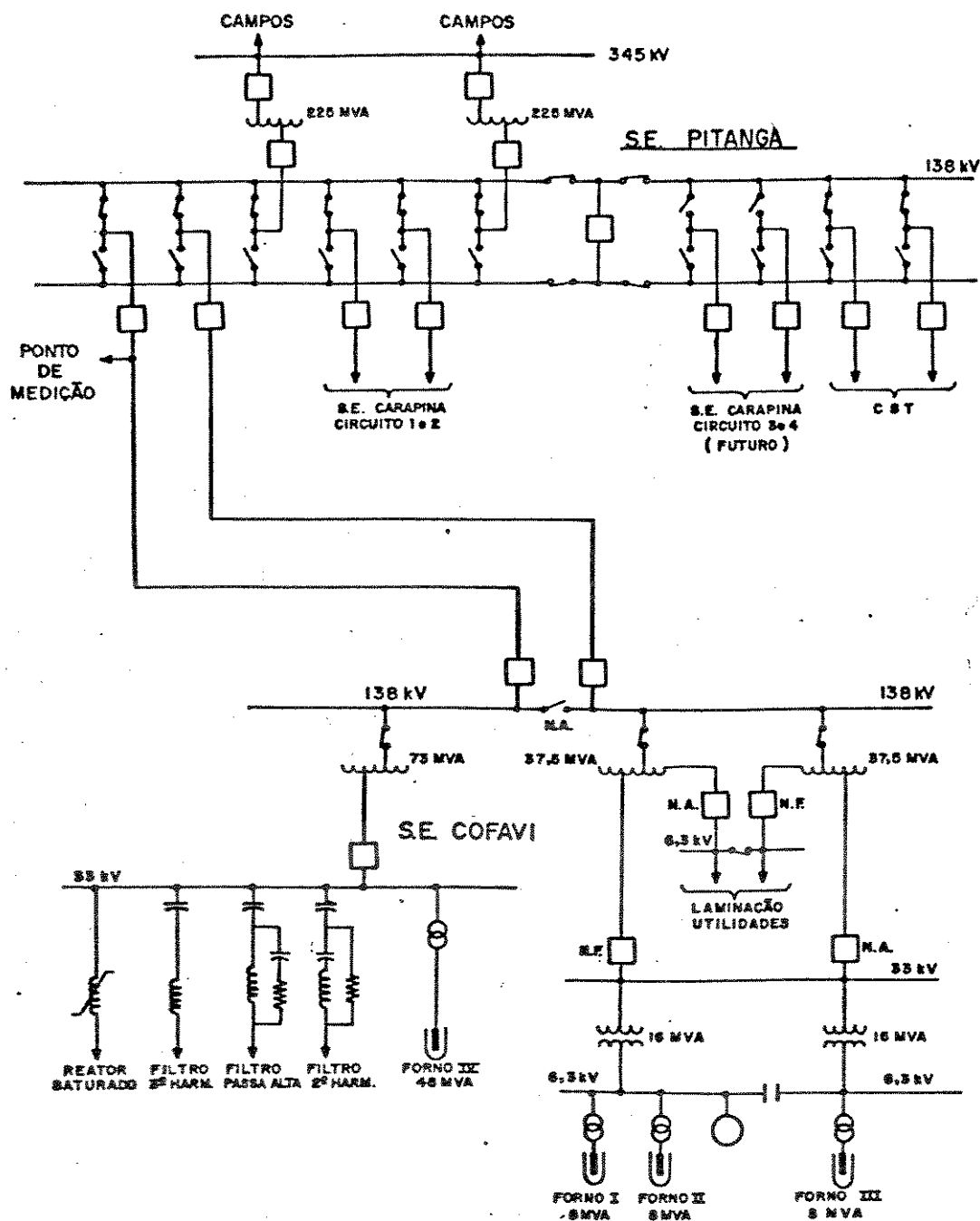


Fig. 8.1 - Sistema Supridor ao Consumidor COFAVI

Durante a medição, o sistema de medição apresenta na tela do monitor de vídeo as doses que estão sendo obtidas "on-line", em escala comparativa com o limiar de tolerância do incômodo visual prescrita pelos critérios de aceitação disponíveis.

Tais critérios prevêm como limite de variação de tensão $\Delta V(\%) = 0,3\%$, correspondente, em dose de "flicker", ao valor $0,09(\%) * \text{min}$, donde, conforme visto em capítulos anteriores, se obtém:

$$DU_i = \int_{t_i}^{t_i+1\text{min}} \frac{(\text{gf } \Delta V\%)^2}{dt} \quad (8.1)$$

sendo

DU_i - dose unitária correspondente ao iésimo minuto;

gf - dada pela característica de ponderação para sensibilidade visual abaixo

$\Delta V(\%) = \frac{\Delta V}{V_0} * 100\%$ - corresponde à variação percentual da tensão, em relação a 1 pu.

$(\text{gf } \Delta V\%)^2$ - corresponde ao valor quadrático médio da variação de tensão ponderada pela característica de sensibilidade visual. Esse sinal é designado como sendo o nível instantâneo médio de "flicker".

A análise das Doses Unitárias (DU_i), Fig. 8.2, é normalmente estendida a um valor acumulado para um período de 15 minutos consecutivos.

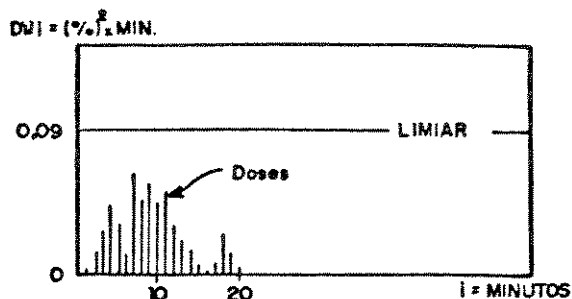
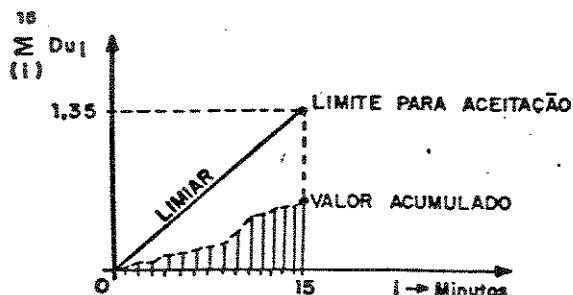


Fig. 8.2 - Doses Unitárias

Para tanto, a condição de aceitabilidade de uma instalação é dada por:

$$\sum_{i=1}^{i+15} \text{DUI} < 15 * 0,09(\%) * \text{min} = 1,35(\%) * \text{min} \quad (8.2)$$

No protótipo implementado, as doses acumuladas de 15 minutos são obtidas através de análise posterior "off-line" das doses unitárias, armazenadas por gravação em fita magnética. Os resultados dessa análise são apresentados na forma de gráficos, correspondentes a cada intervalo consecutivo de 15 minutos das doses, assumindo a forma seguinte:



A condição de aceitação, neste gráfico, significa que o valor acumulado deve estar abaixo do LIMITE DE ACEITAÇÃO.

8.1.1 - Medições Efetuadas e Resultados Obtidos

Dentre as diversas séries de medições executadas, foram selecionadas três para apresentação dos resultados; estas medições foram feitas por aquisição do sinal de tensão a partir do Transformador de Potencial (TP) de 138 kV, conforme segue:

A) Série de Medição nr.1 - 220 doses unitárias

Dia : 09 de março de 1987
Hora : 11:26 - 15:06
Configuração: Forno IV, de 4 MVA, em operação
Eventos : 11:24 - início de fusão da 1a.carga
11:26 - início da medição
11:59 - parada do forno p/ recarga
12:10 - início de fusão da 2a.carga
12:28 - parada do forno p/ recarga
12:40 - início de fusão da 3a.carga
12:52 - início da fase de refino
15:06 - término da medição

O registro das doses unitárias e eventos correspondentes foi obtido conforme a figura a seguir:

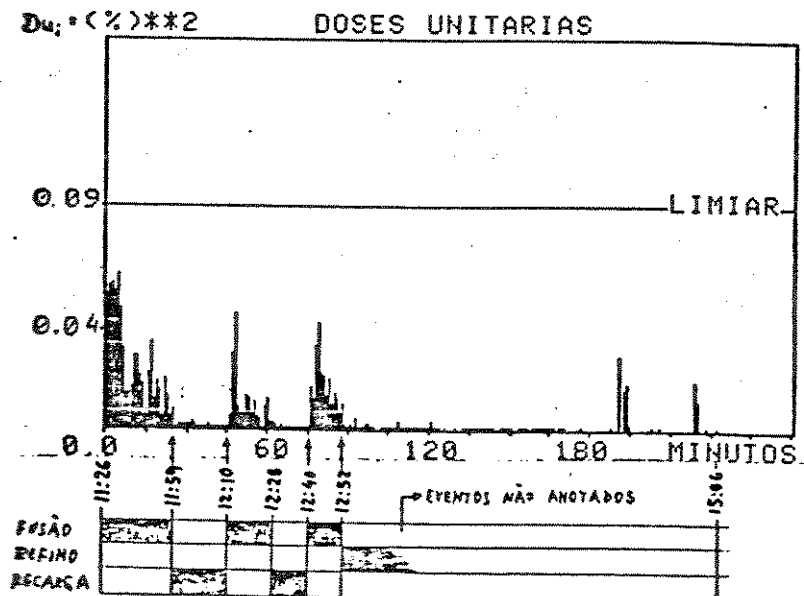


Fig. 8.3 - Doses Unitárias, Série nr.1

As doses acumuladas para os 15 minutos iniciais dos 3 períodos de fusão verificados nesta série são apresentadas nas curvas a seguir:

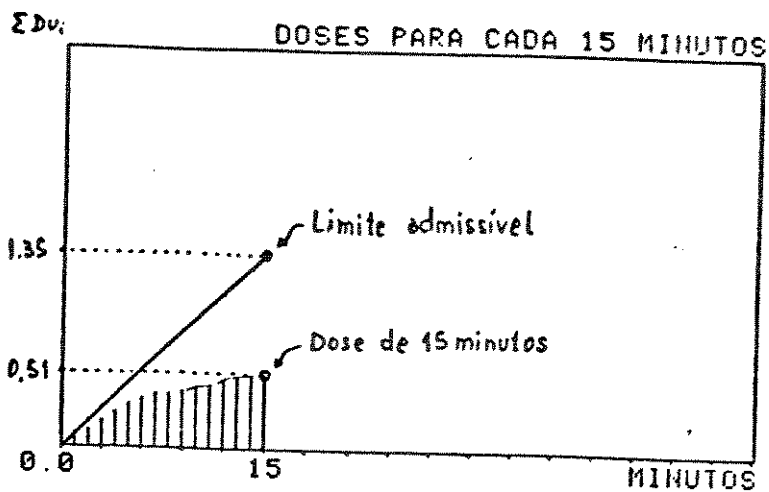


Fig. 8.4 - Fusão da 1a.carga

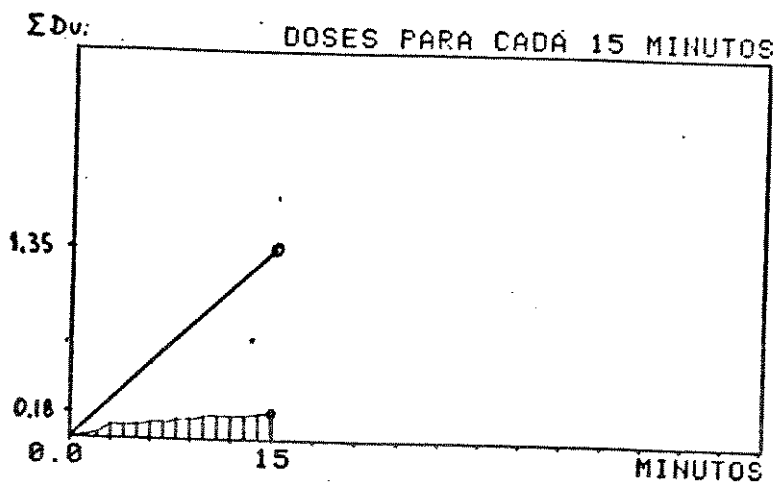


Fig. 8.5 - Fusão da 2a.carga

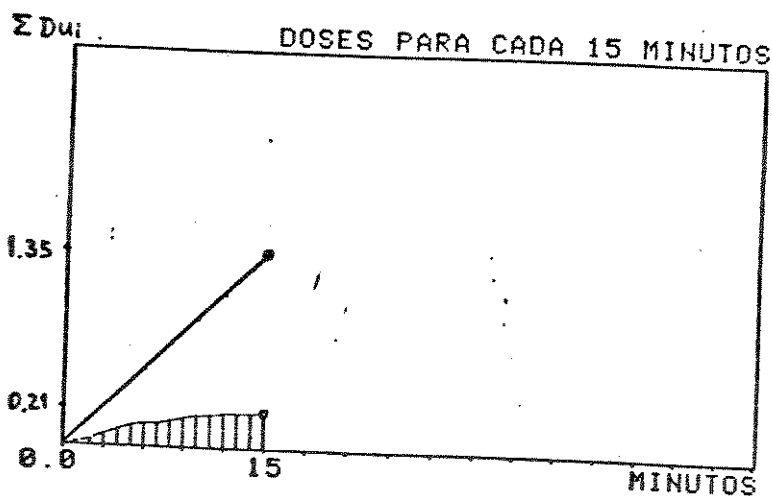


Fig. 8.6 - Fusão da 3a.carga

Considerando os valores acumulados de 15 minutos, resulta, para o período completo de medição, a seguinte curva:

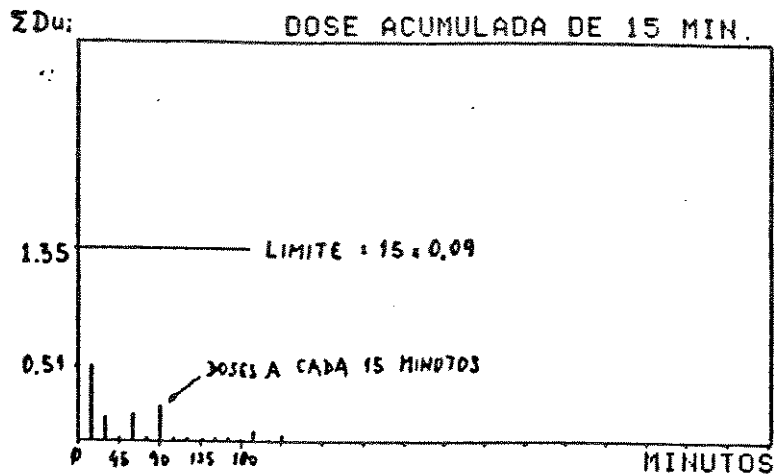


Fig. 8.7 - Doses Acumuladas a cada 15 Minutos - Série nr.1

B) Série de Medição nr.2 - 180 doses unitárias

Dia : 11 de março de 1987
 Hora : 06:15 - 09:15
 Configuração: Forno IV, de 48 MVA, em operação
 Eventos : 06:28 - início de fusão da 1a.carga
 07:00 - parada do forno p/ recarga
 07:11 - início de fusão da 2a.carga
 07:30 - parada do forno p/ recarga
 07:36 - início de fusão da 3a.carga
 07:56 - parada do forno
 08:00 - início da fase de refino
 09:15 - término da medição

Registro das Doses Unitárias:

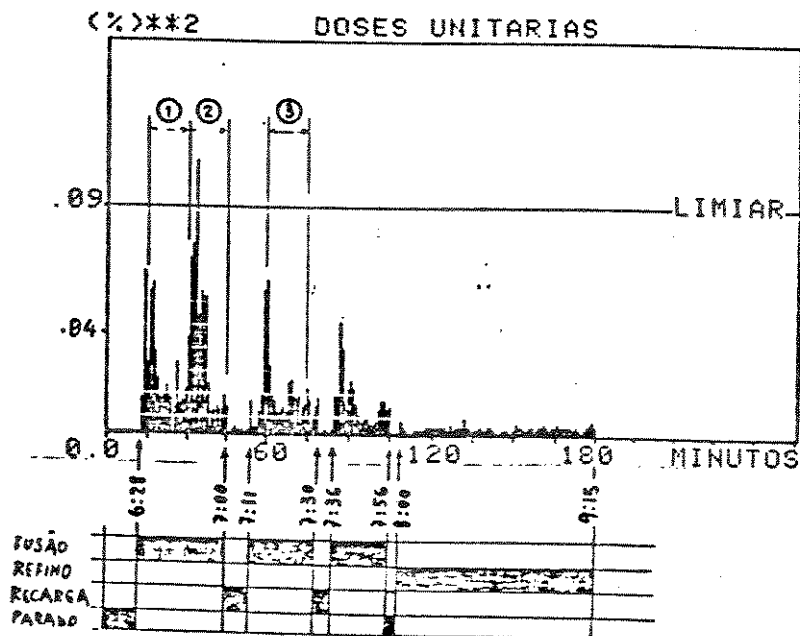


Fig. 8.8 - Doses Unitárias - Série nr.2

Os valores acumulados de 15 minutos para os intervalos assinalados acima apresentaram a seguinte evolução:

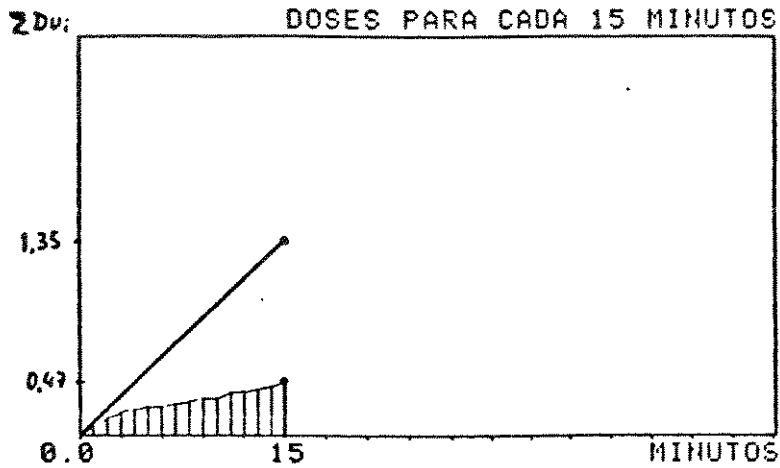


Fig. 8.9 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

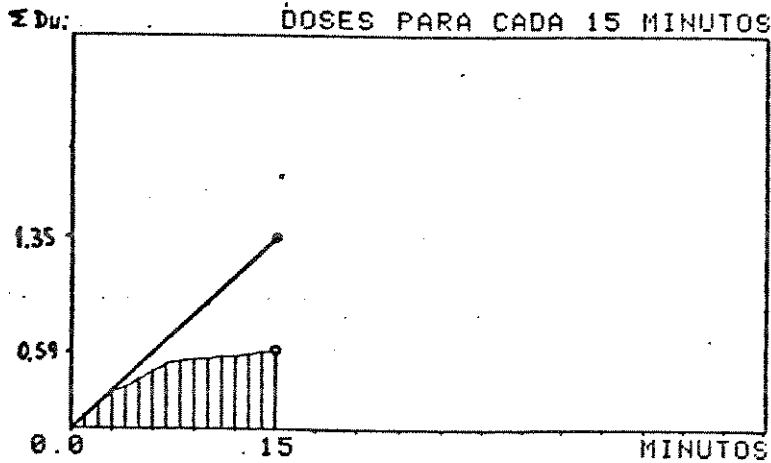


Fig. 8.10 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

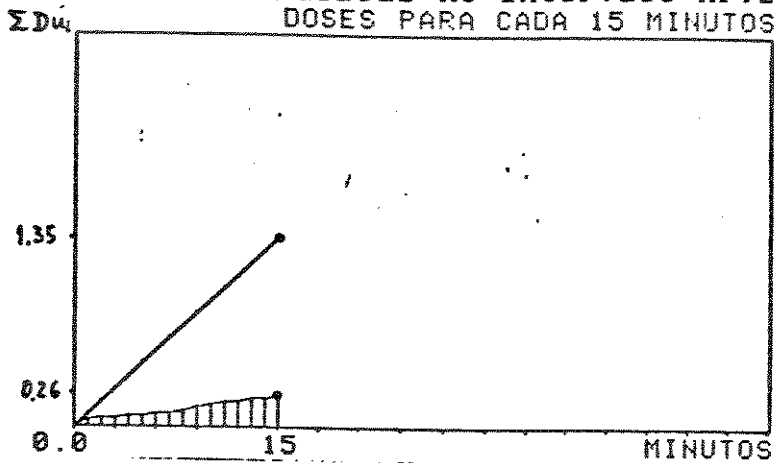


Fig. 8.11 - Doses acumuladas no Intervalo nr.3

Considerando todos os intervalos acumulados de 15 minutos, resulta a curva:

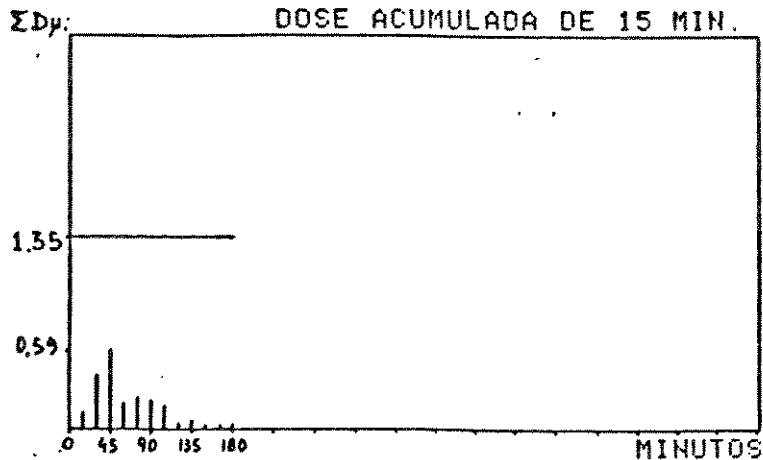


Fig. 8.12 - Doses Acumuladas a cada 15 Minutos - Série nr.2

C) Série de Medição nr.3 - 120 doses unitárias

Dia : 11 de março de 1987
 Hora : 09:27 - 11:27
 Configuração: Forno IV, de 48 MVA, em operação
 Eventos : 09:44 - início de fusão da 1a.carga
 10:17 - parada do forno p/ recarga
 10:23 - início de fusão da 2a.carga
 10:45 - parada do forno p/ recarga
 10:50 - início de fusão da 3a.carga
 11:10 - início da fase de refino
 11:27 - término da medição

Registro das Doses Unitárias:

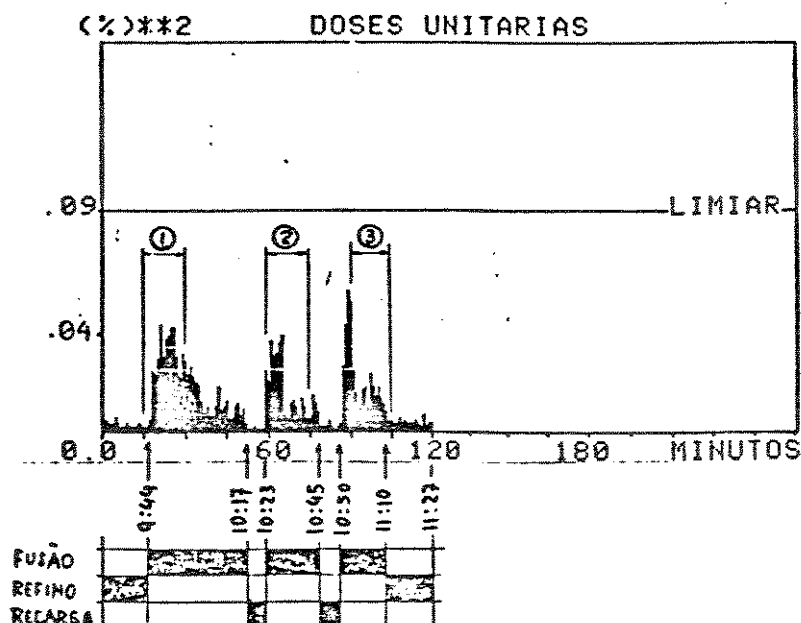


Fig. 8.13 - Doses Unitárias - Série nr.3

O acúmulo de doses nos 3 intervalos acima indicados é o seguinte:

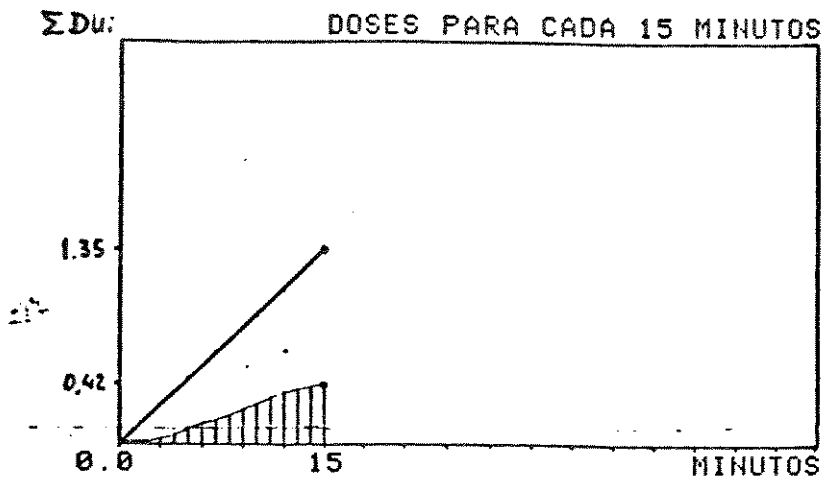


Fig. 8.14 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

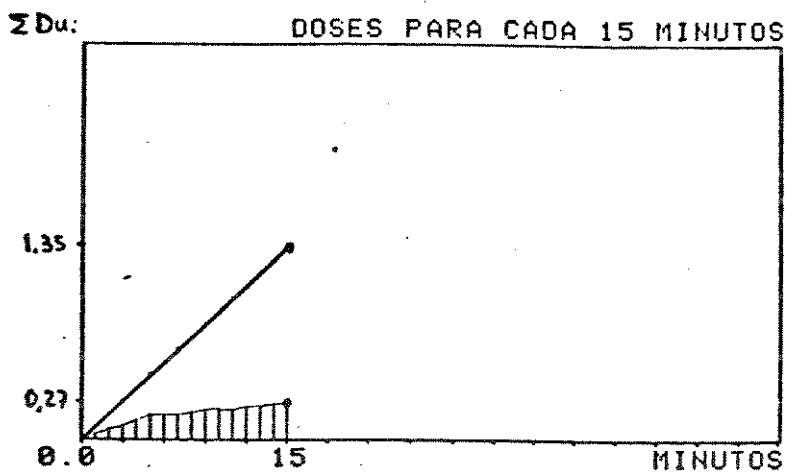


Fig. 8.15 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

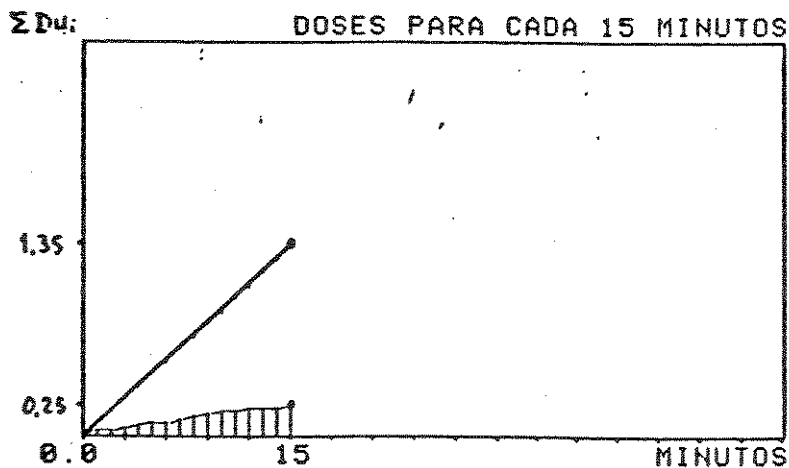


Fig. 8.16 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

As doses acumuladas para todos os intervalos de 15 minutos são as seguintes:

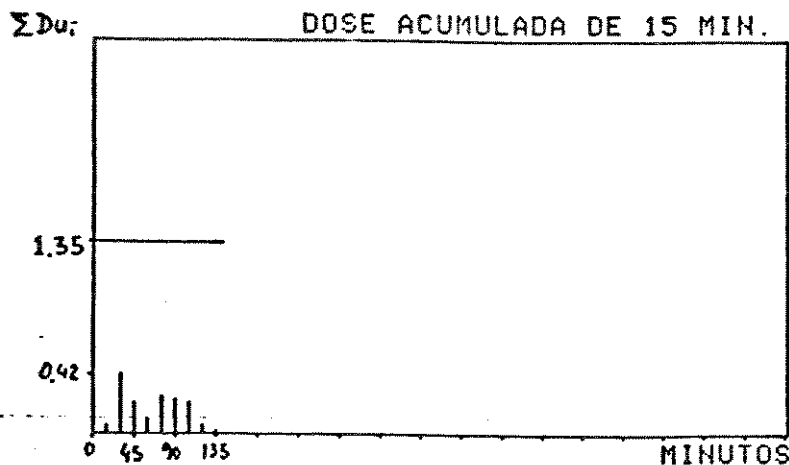


Fig. 8.17 - Doses Acumuladas a cada 15 Minutos - Série nr.3

8.1.2 - Análise dos Resultados Obtidos

Na primeira série de medições, observa-se claramente o aumento do nível de flutuações de tensão durante os processos de fusão. Na segunda e na terceira séries, foi observada uma única dose ultrapassando o limiar de tolerância $DU = 0,107(\%) \cdot \text{min}$, que corresponde à flutuação equivalente em 8,8 Hz de $\Delta V = 0,33\%$ durante 1 minuto. Esse valor excede em 10% o limite estabelecido. No entanto, como o critério de aceitação se baseia na avaliação do valor acumulado após 15 minutos, verifica-se que em nenhum intervalo de 15 minutos o limite admissível é violado. Pode-se observar ainda dessas medições que o nível de "flicker" que ocorre durante a fase de refino é baixo e não causa maiores preocupações.

Como avaliação, a título de pré-determinação dos níveis de "flicker", obteve-se a variação correspondente de tensão $\Delta V(\%) = 2,2(\%)$, sendo:

$$\Delta V(\%) = \frac{Q1}{Scc} \cdot 100 = \frac{50}{2300} \cdot 100 = 2,2(\%) \quad (8.3)$$

para $\Delta Q = 50 \text{ MVar}$ (Variação máxima de potência reativa);
 $Scc = 2300 \text{ MVA}$ (no PAC).

Considerando que o fator de severidade médio para operação do forno é $K_s = 0,12$ (valor típico), obtém-se uma flutuação equivalente $\Delta V_f = K_s \Delta V\%$, igual a

$$\Delta V_f = 0,12 * 2,2 = 0,26\% \quad (8.4)$$

Esta avaliação indica que a instalação está praticamente no limite, como mostram os resultados obtidos nas medições.

O Apêndice D apresenta as tabelas com os valores numéricos das três séries de medições.

8.2 - Medições em Instalação Compensada através de Compensador Estático do tipo Capacitores Chaveáveis

A descrição apresenta os resultados obtidos durante a medição do nível de "flicker" produzido por um forno a arco de 40 MW de potência nominal, suprido a partir da SE Juiz de Fora I, na área de concessão da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. O nível de tensão de suprimento ao parque siderúrgico Mendes Júnior, onde está instalado o forno, é de 138 kV, e o nível de curto-circuito no ponto de acoplamento comum pode ser alterado através da interligação com a SE Santos Dumont. A Fig. 8.18 mostra o esquema simplificado do sistema em questão.

O nível de "flicker" foi avaliado em dois pontos de medição, a saber:

Ponto 1 - T.P. ligado ao barramento de 138 kV que alimenta o forno e o compensador estático a capacitores chaveados. Nesse ponto foram medidas 3 séries de doses unitárias de "flicker", durante 60, 40 e 30 minutos, respectivamente.

Ponto 2 - T.P. ligado ao barramento de 345 kV na SE Juiz de Fora I. Nesse ponto foi obtida uma série de 90 minutos de doses unitárias de "flicker".

As medições obedeceram à mesma metodologia de análise comentada no item anterior, ou seja, obtenção das doses unitárias minuto a minuto e das doses acumuladas a cada 15 minutos.

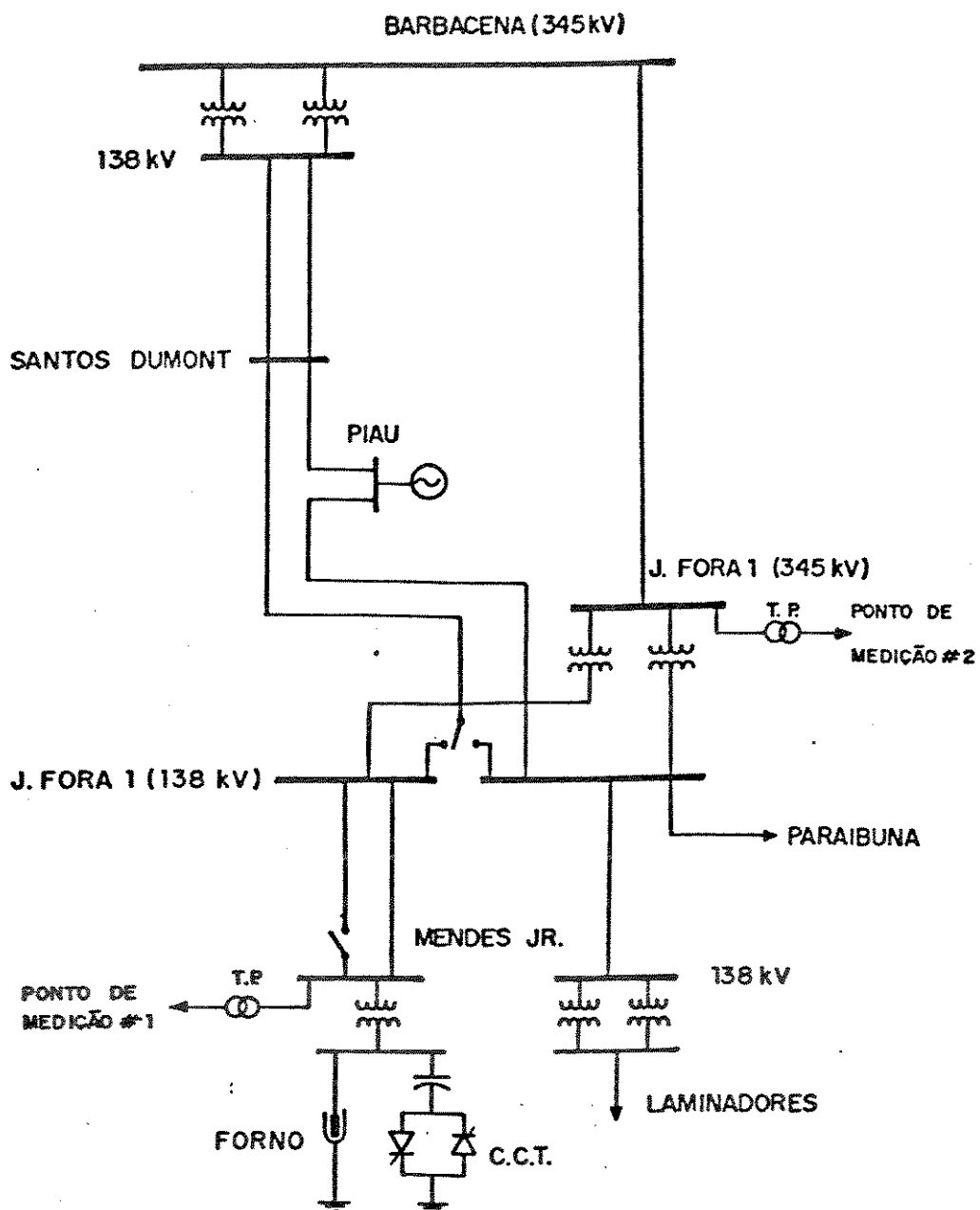


Fig. 8.18 - Sistema Supridor ao Consumidor Mendes Júnior

8.2.1 - Medições Efetuadas - Resultados Obtidos no Ponto 1

A) Série de Medição nr.1 - 60 doses unitárias

Hora : 11:28 - 12:26
Configuração: apenas 1 linha de Juiz de Fora I
Eventos : 11:28 - início da medição, forno desligado
11:31 - entrada do forno, sem compensação
11:32 - entrada do compensador
11:33 - saída do forno
11:46 - volta do forno
12:26 - fim da medição

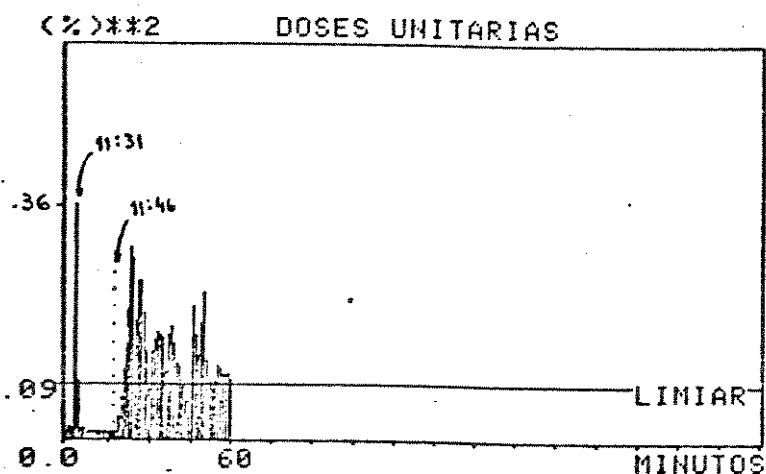


Fig. 8.19 - Doses Unitárias - Série nr.1

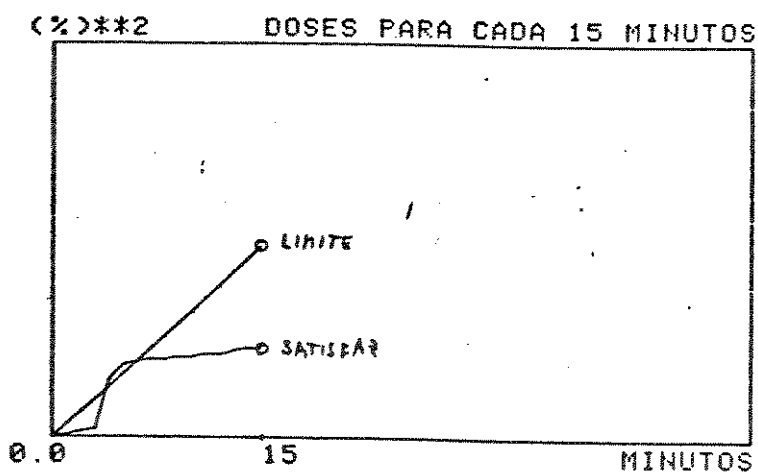


Fig. 8.20 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

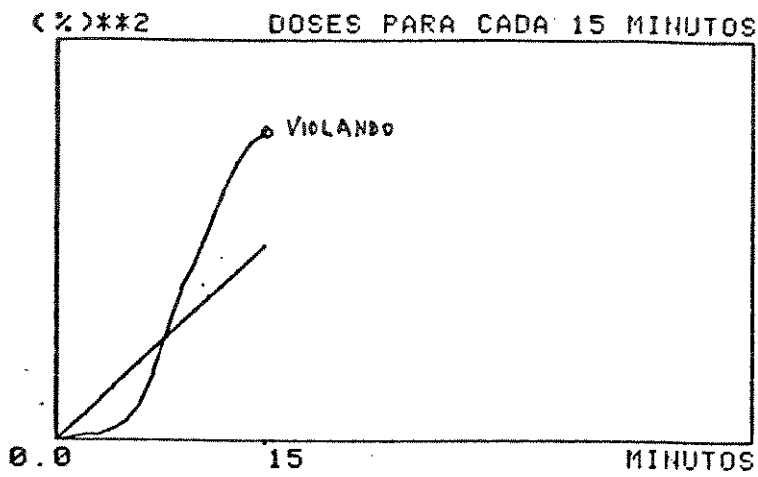


Fig. 8.21 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

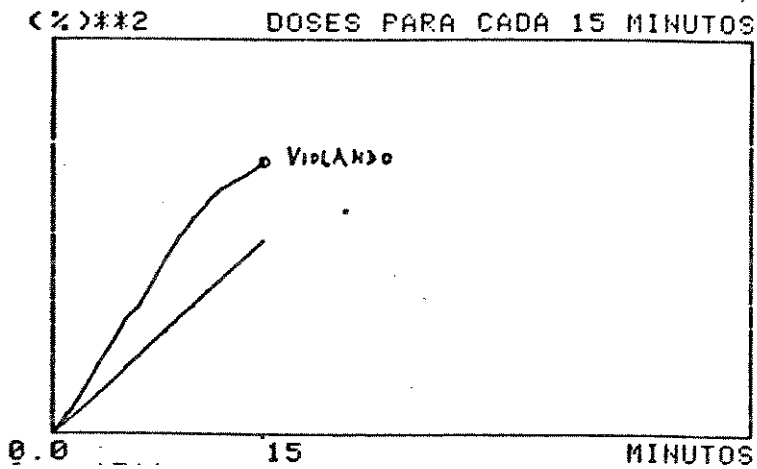


Fig. 8.22 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

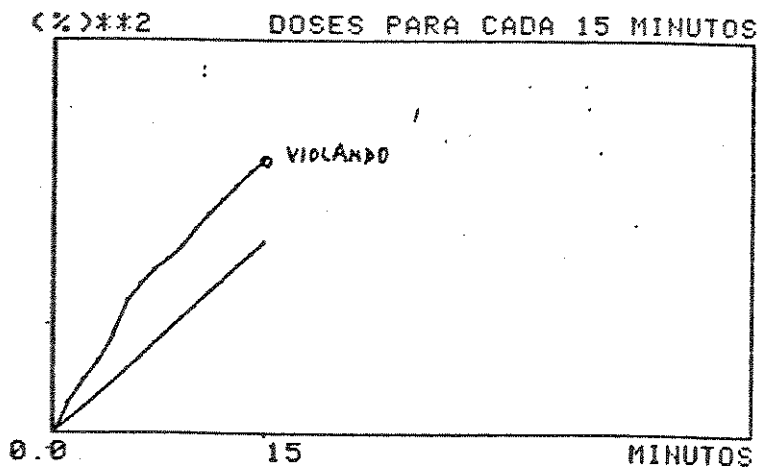


Fig. 8.23 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

B) Série de Medição nr.2 - 40 doses unitárias

Hora : 12:43 - 13:19
Configuração: apenas 1 linha de Juiz de Fora I
Eventos : 12:43 - início da medição, forno sem compensador
12:49 - saída do forno
12:57 - volta do forno
12:59 - entrada do compensador
13:14 - parada do forno p/ 2a.carga
13:16 - volta do forno
13:19 - fim da medição

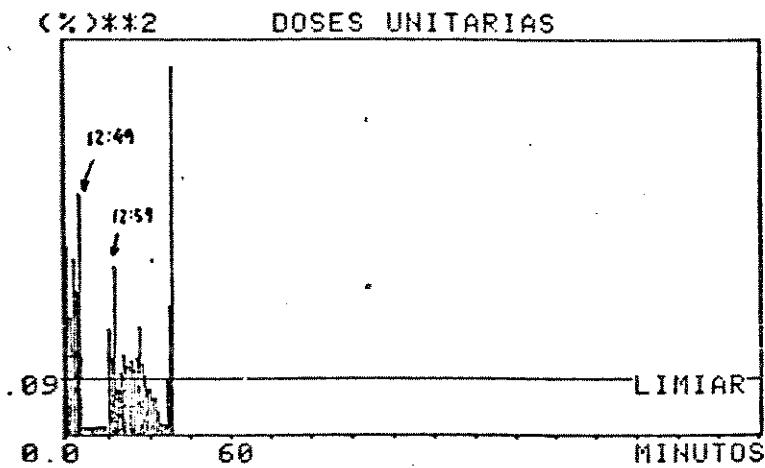


Fig. 8.24 - Doses Unitárias - Série nr.2

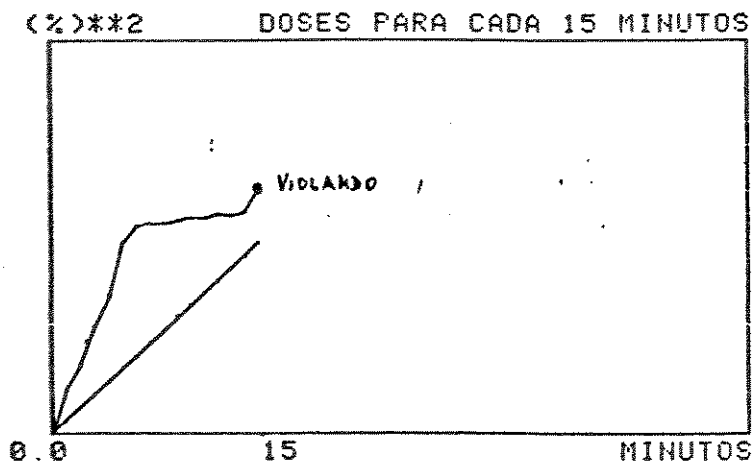


Fig. 8.25 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

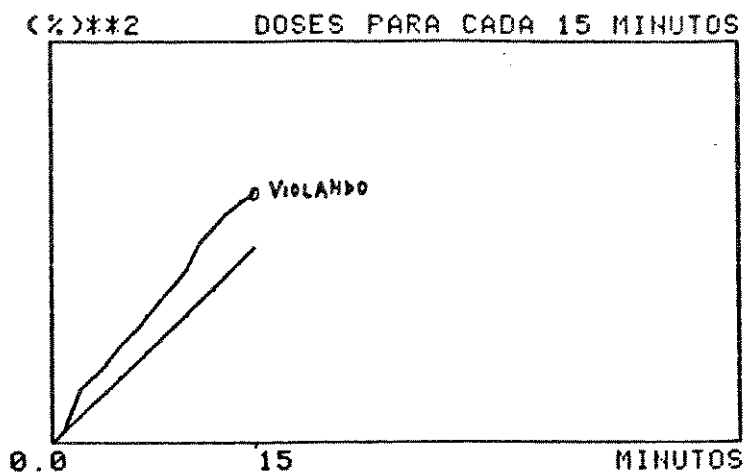


Fig. 8.26 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

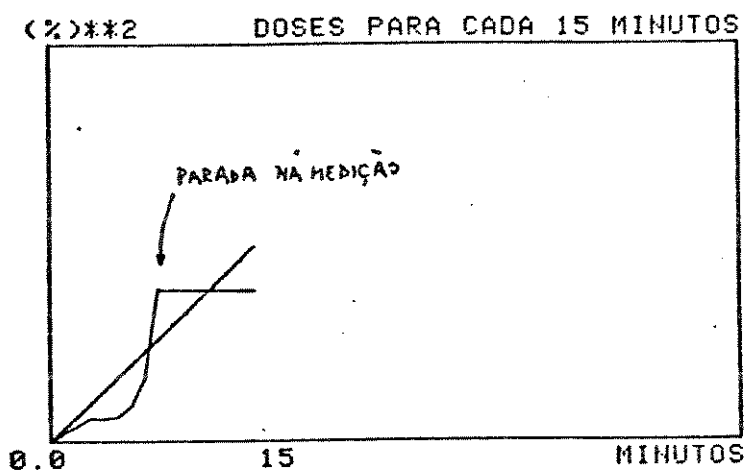


Fig. 8.27 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

C) Série de Medição nr.3 - 30 doses unitárias

Hora : 14:23 - 14:52
 Configuração: forno alimentado por duas linhas de Juiz de Fora I e uma de Santos Dumont
 Eventos : 14:23 - início da medição, forno com o compensador
 14:42 - saída do compensador
 14:47 - saída do forno
 14:52 - fim da medição

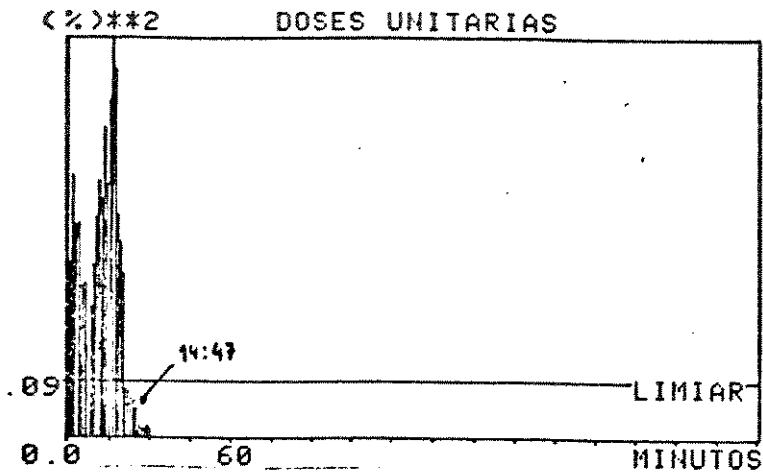


Fig. 8.28 - Doses Unitárias - Série nr.3

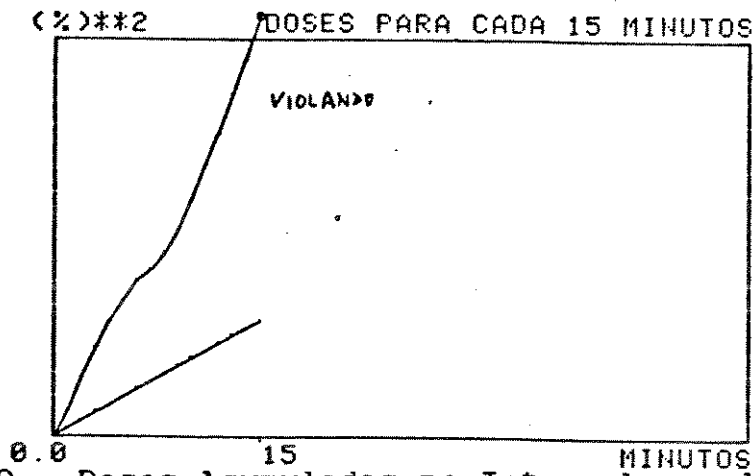


Fig. 8.29 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

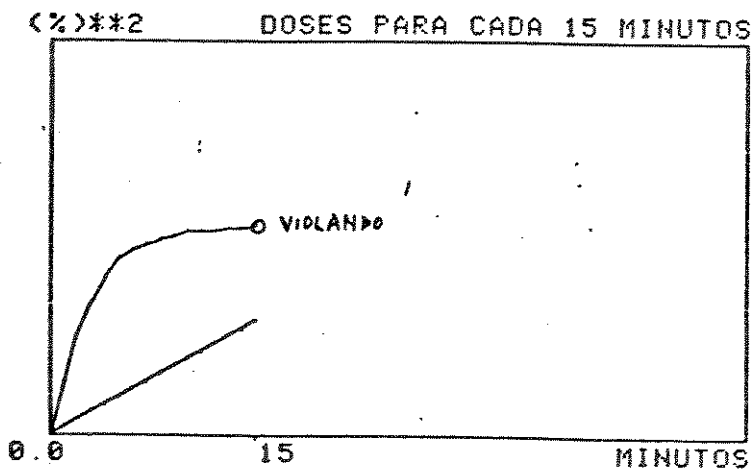


Fig. 8.30 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

8.2.2 - Medições Efetuadas - Resultados Obtidos no Ponto 2

A) Medições - Série Unica - 90 doses unitárias

Hora : 15:43 - 17:23
Configuração: forno com duas linhas de Juiz de Fora I e compensador ligado
Eventos : 15:43 - início da medição, forno desligado
15:49 - entrada do forno
16:23 - parada do forno para 2a. carga
16:26 - volta do forno
17:00 - forno desligado
17:23 - fim da medição

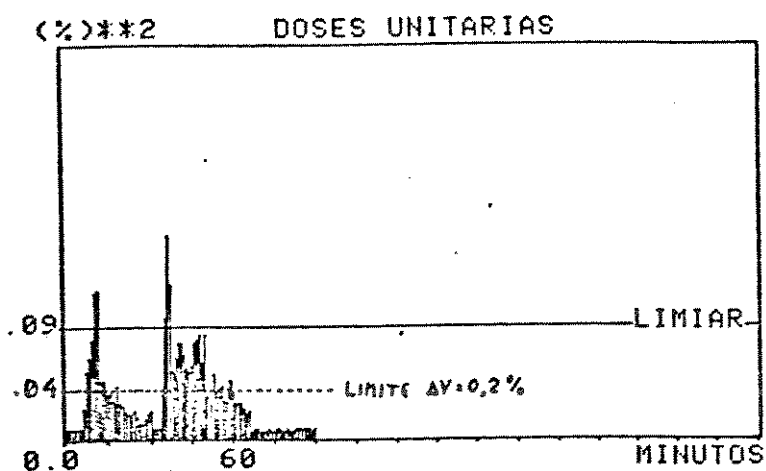


Fig. 8.31 - Doses Unitárias

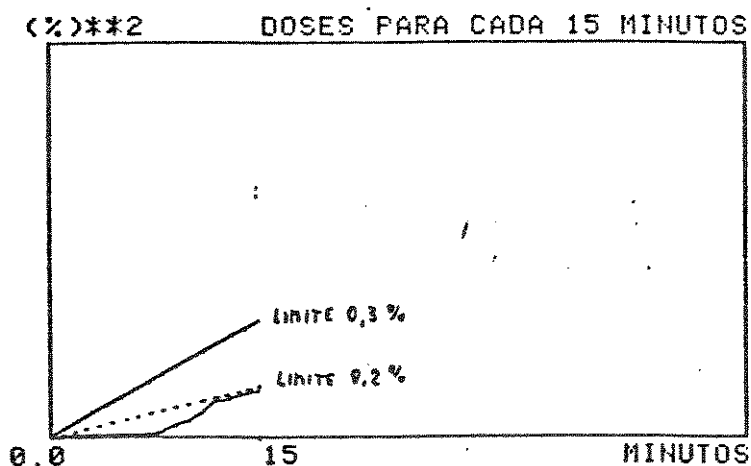


Fig. 8.32 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

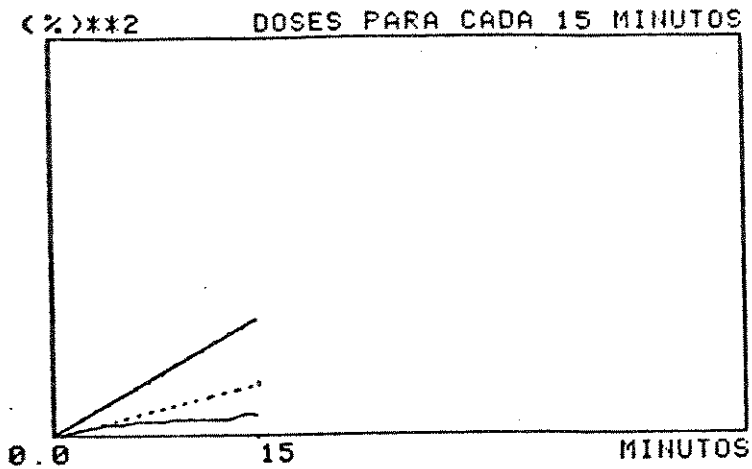


Fig. 8.33 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

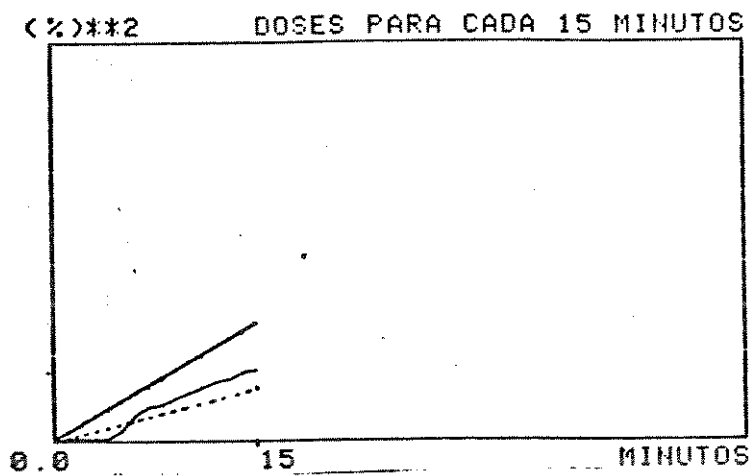


Fig. 8.34 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

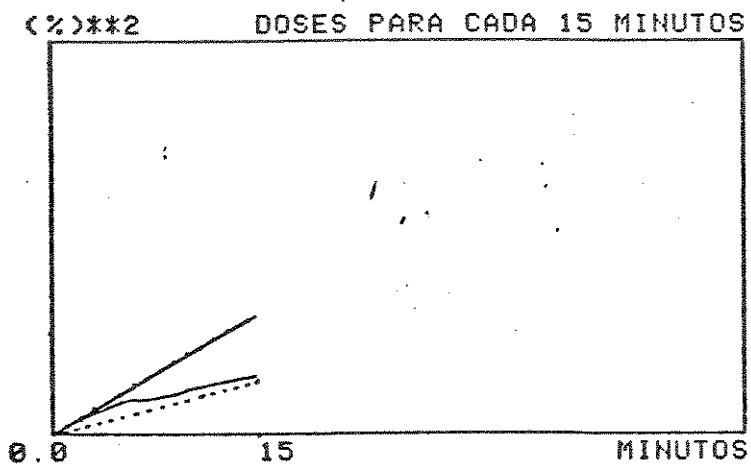


Fig. 8.35 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

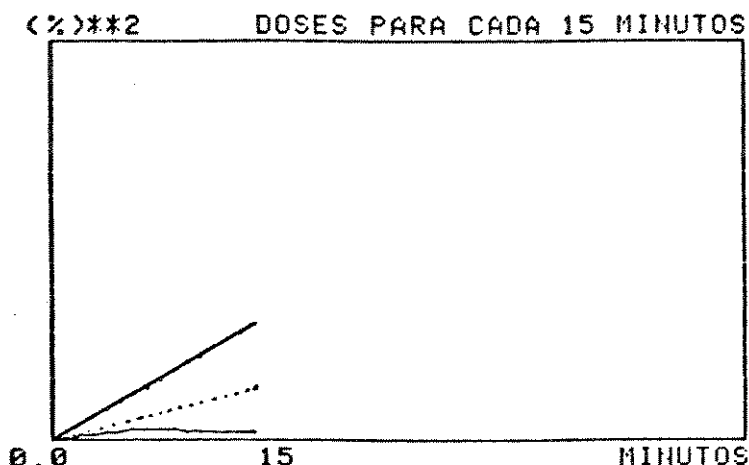


Fig. 8.36 - Doses Acumuladas no Intervalo nr. 5

8.2.3 - Análise dos Resultados Obtidos

Com relação às três séries de medições realizadas junto à Mendes Júnior (Ponto 1), podem-se destacar as seguintes observações:

- A - O nível de "flicker", mesmo com a operação do compensador, é excessivamente elevado. Dos nove intervalos de 15 minutos analisados, apenas dois estão na faixa tolerável.
- B - Nas configurações testadas, o nível de curto-circuito é insuficiente para garantir a operação normal do forno sem a devida compensação reativa.
- C - O compensador estático fornece o suporte reativo necessário para a operação do forno na potência nominal.
- D - Na comparação entre o nível de "flicker" com e sem compensador, deve-se levar em conta que o nível de potência alcançado pelo forno nos dois casos não é o mesmo. Seria desejável avaliar simultaneamente o nível de "flicker" compensado e não-compensado.

O processo de medição sugerido seria realizar um bloqueio no sistema de controle do compensador para que o mesmo atuasse como um capacitor fixo, dando o suporte de reativo necessário o forno operar na potência nominal.

Com relação à série de medições realizadas na SE Juiz de Fora I (Ponto 2), destaca-se:

- A - O nível de "flicker" observado no sistema de 345 kV também é elevado, indicando que há propagação deste efeito através do sistema de transmissão.
- B - Se for considerado o limiar $\Delta V = 0,3\%$, o nível de "flicker" observado neste ponto de medição está na faixa tolerável. No entanto, se for considerado o limite de $\Delta V = 0,25\%$ para esta tensão, de acordo com a recomendação inglesa, então o nível de "flicker" observado é excessivo.

O Apêndice E apresenta os valores numéricos das Doses Unitárias obtidas nas séries de medição apresentadas.

8.3 - Medições em Pontos Próximos e Remotos de um Sistema Supridor de Fornos a Arco

A verificação dos níveis de "flicker" em pontos remotos do sistema e junto à fonte geradora das perturbações foi feita para o consumidor VIBASA - Villares Indústria de Base S.A., suprido pela ELETROPAULO através de 2 linhas de 138 kV, derivadas da Estação Terminal Taubaté, que interliga os sistemas CESP e ELETROPAULO. Desta Estação derivam 2 linhas de 138 kV para o suprimento à cidade de Campos de Jordão, conforme mostra a figura a seguir.

As medições foram realizadas nos 4 pontos assinalados na Fig. 8.37, sempre através de Transformadores de Potencial ao nível de 138 kV.

Impedâncias base 100 MVA/138 KV em %

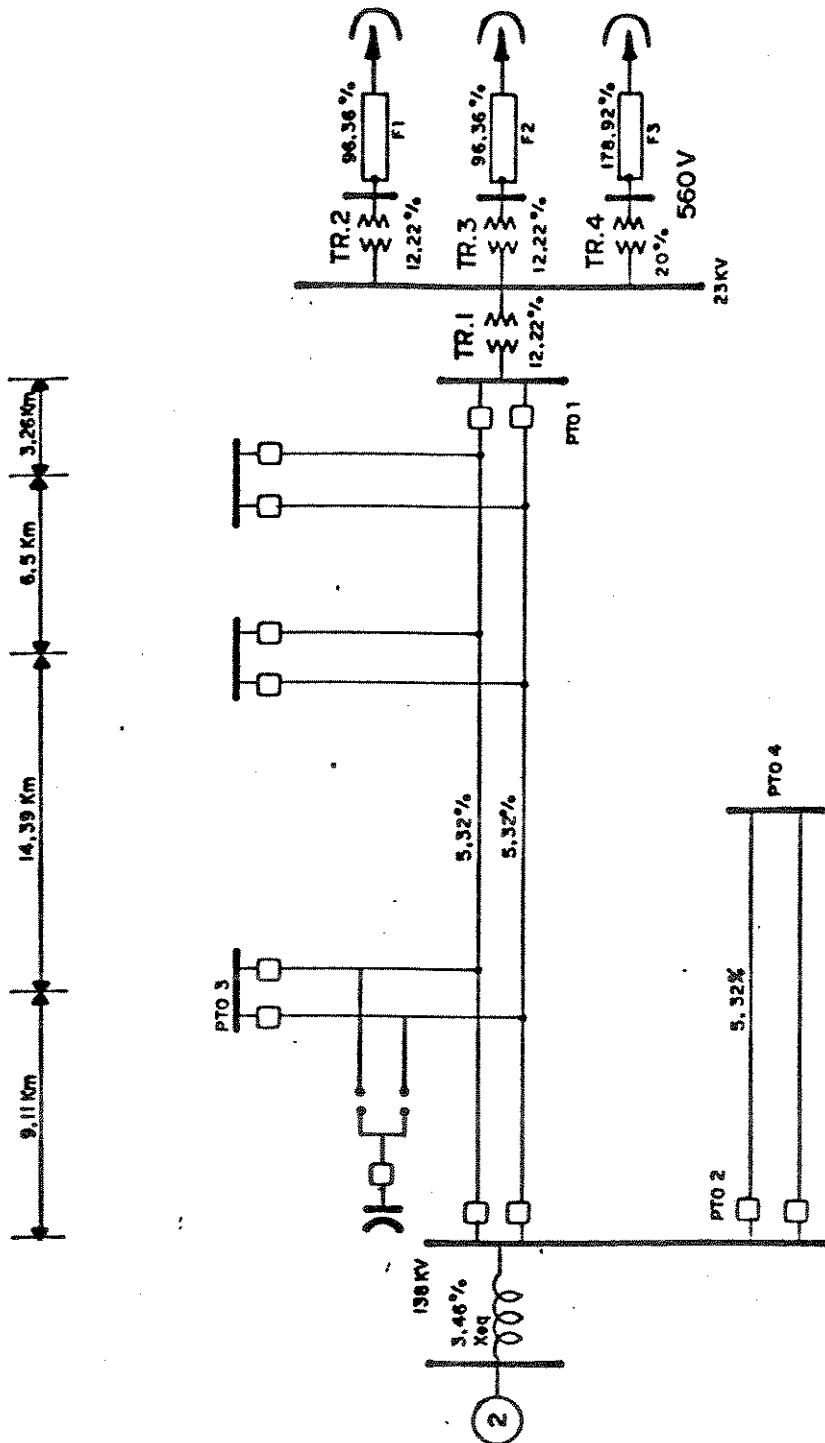


Fig. 8.37 - Sistema Supridor ao Consumidor VIBASA

8.3.1 - Medições Efetuadas através do Método das Doses Unitárias

A) Medições no Ponto 1 - VIBASA

Série nr.1 - 60 doses unitárias

Início : 10:24

Configuração: só 1 linha de 138 kV em operação

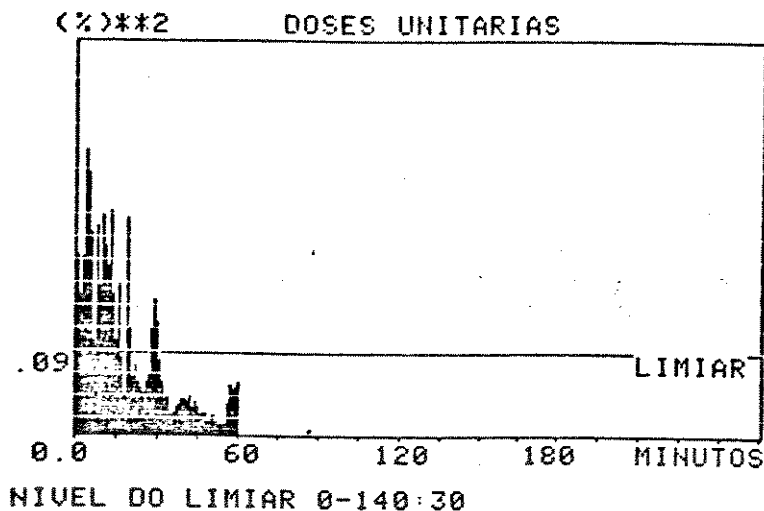


Fig. 8.38 - Doses Unitárias - Série nr.1

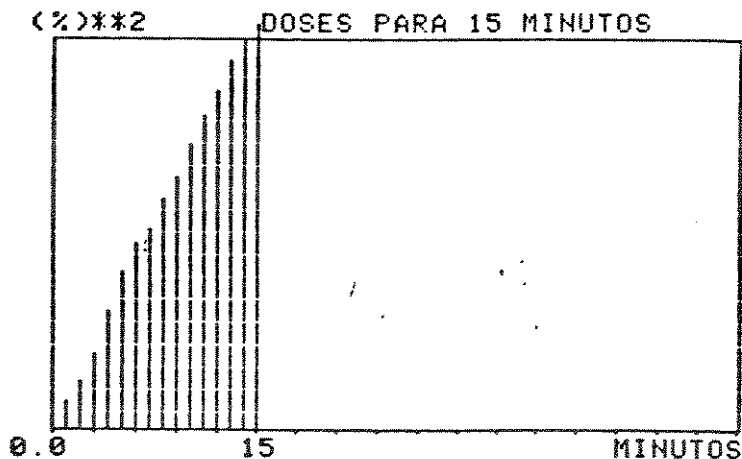


Fig. 8.39 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

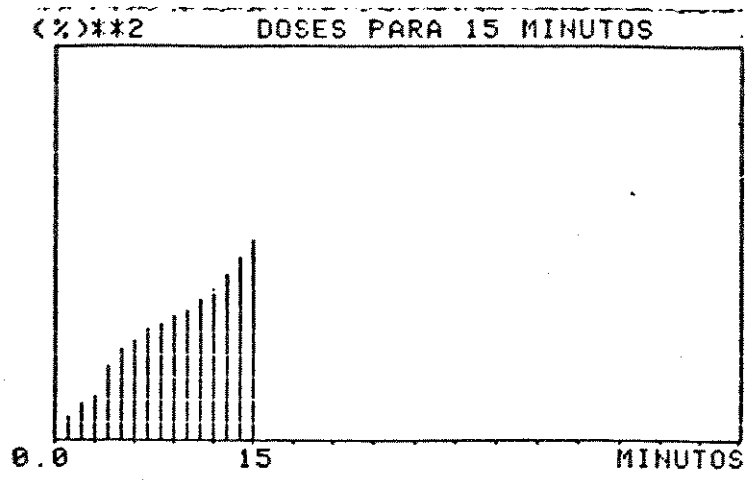


Fig. 8.40 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

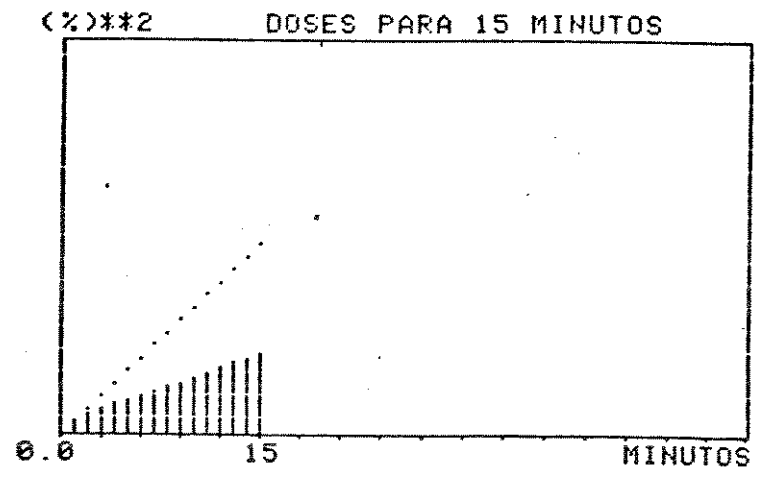


Fig. 8.41 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

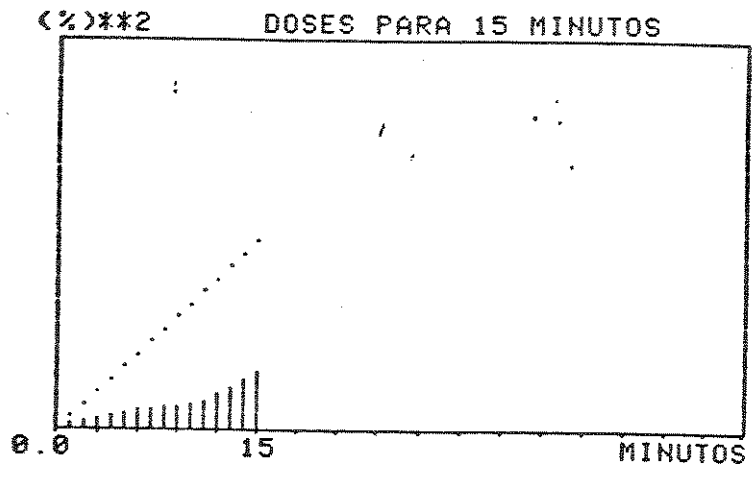


Fig. 8.42 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

Série nr.2 - 60 doses unitárias

Início : 11:25

Configuração: às 11:53 ligada a 2a. linha de transmissão

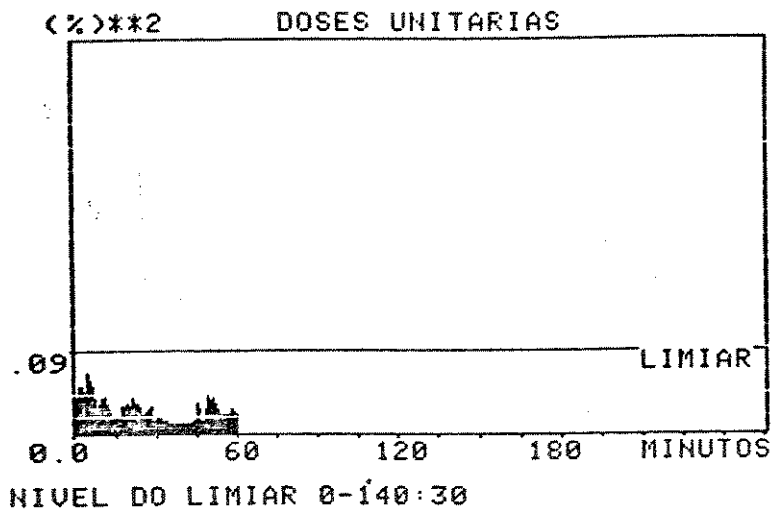


Fig. 8.43 - Doses Unitárias - Série nr.2

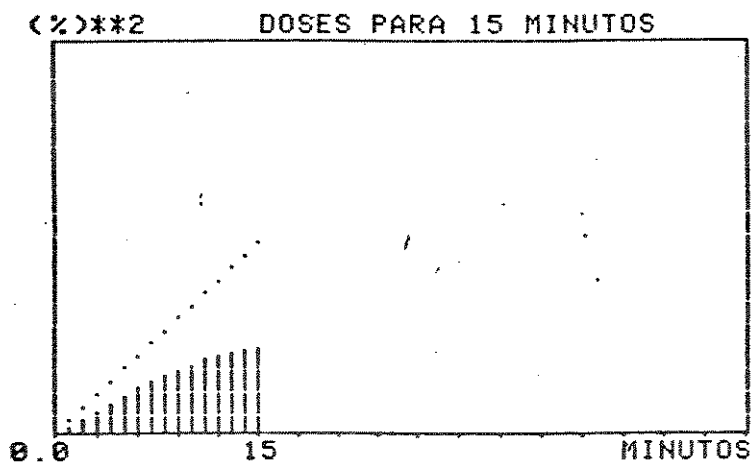


Fig. 8.44 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

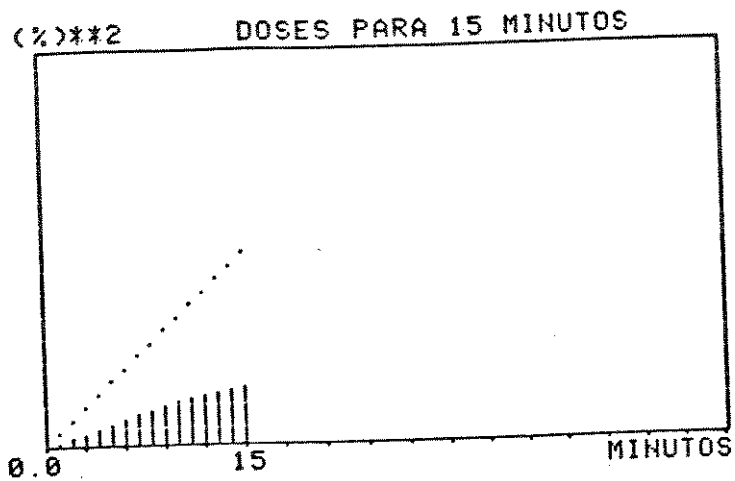


Fig. 8.45 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

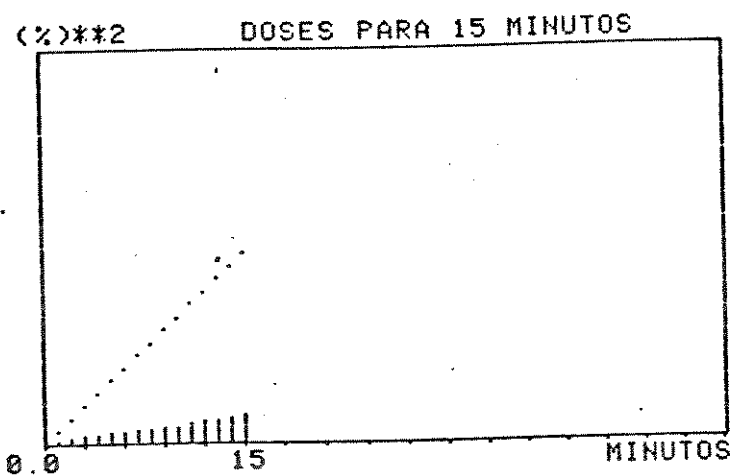


Fig. 8.46 - Doses Acumuladas no Intervalo nr. 3

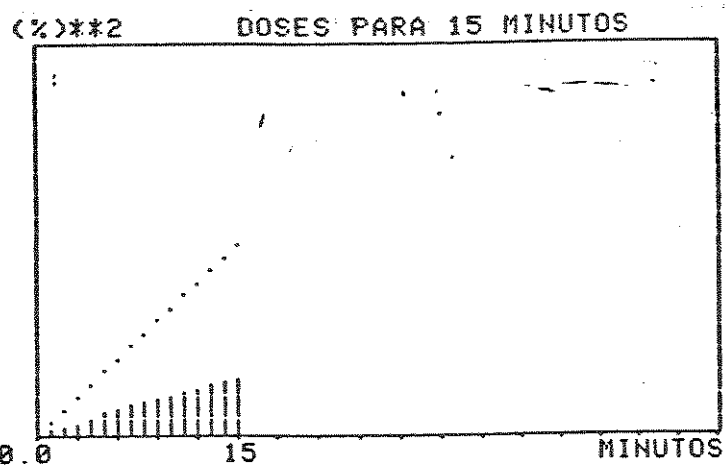


Fig. 8.47 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

Série nr.3 - 60 doses unitárias

Início : 14:13

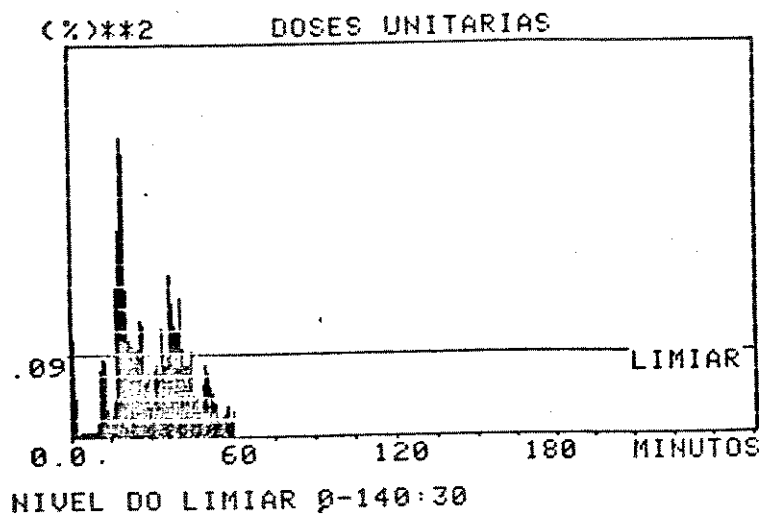


Fig. 8.48 - Doses Unitárias - Série nr.3

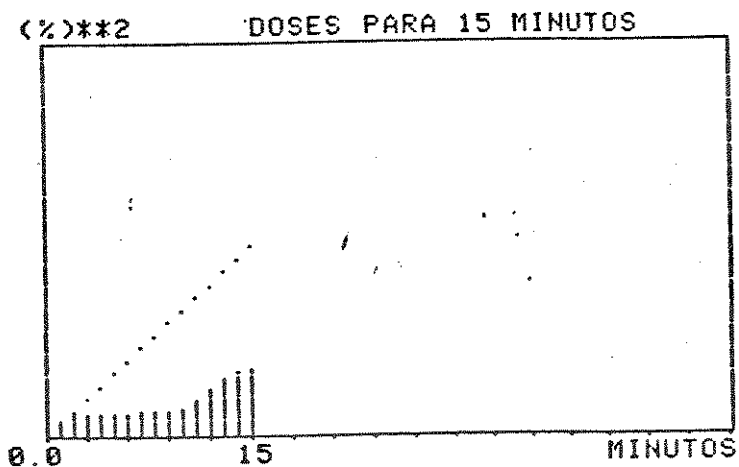


Fig. 8.49 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

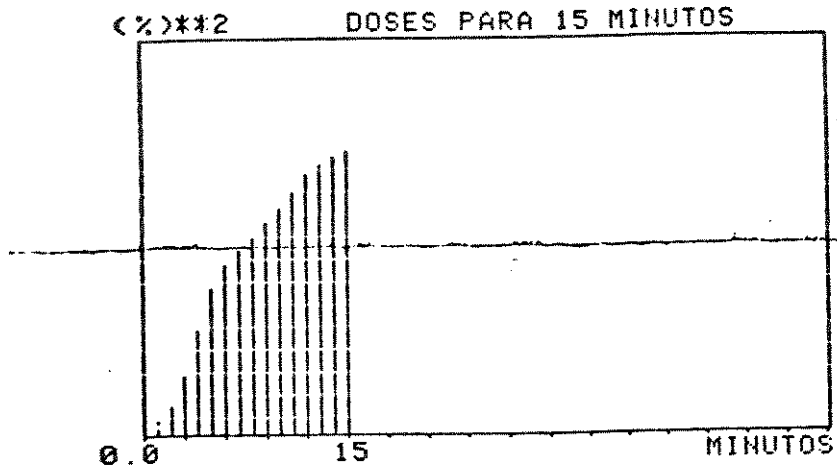


Fig. 8.50 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

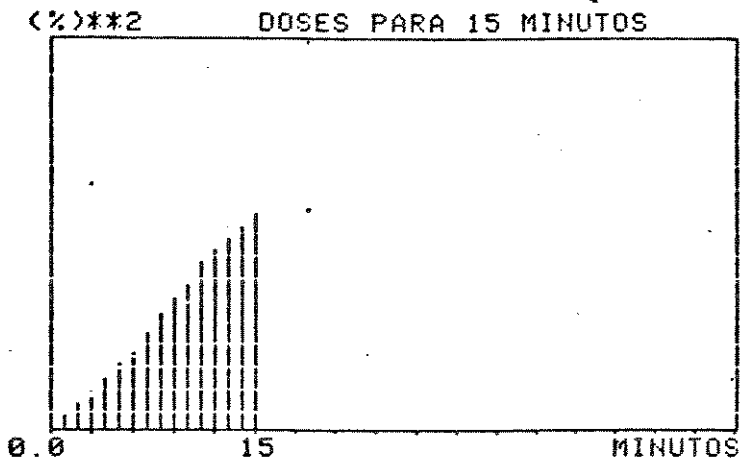


Fig. 8.51 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

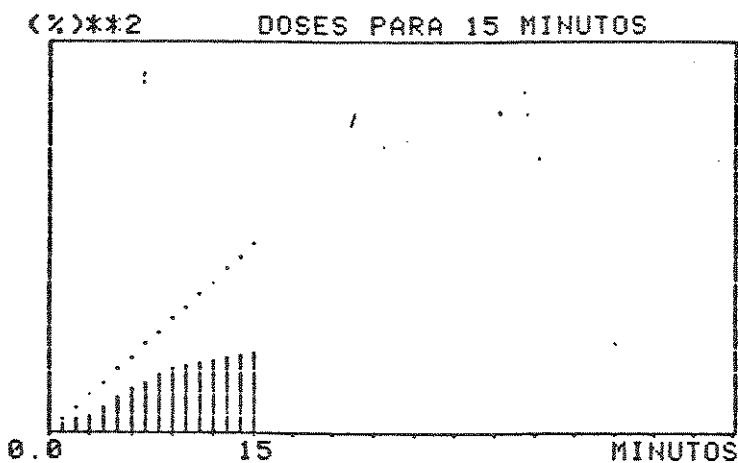


Fig. 8.52 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

B) Medições no Ponto 2 - Estação Terminal de Taubaté

Série nr.1 - 60 doses unitárias

Início : 15:42

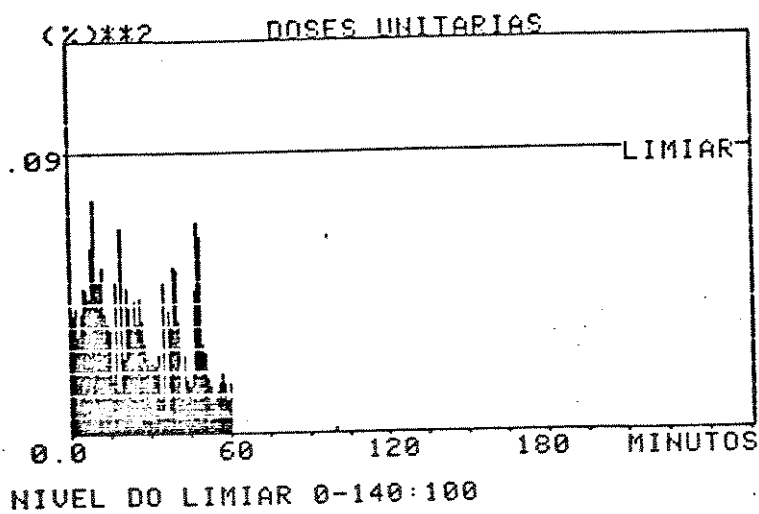


Fig. 8.53 - Doses Unitárias - Série nr.1

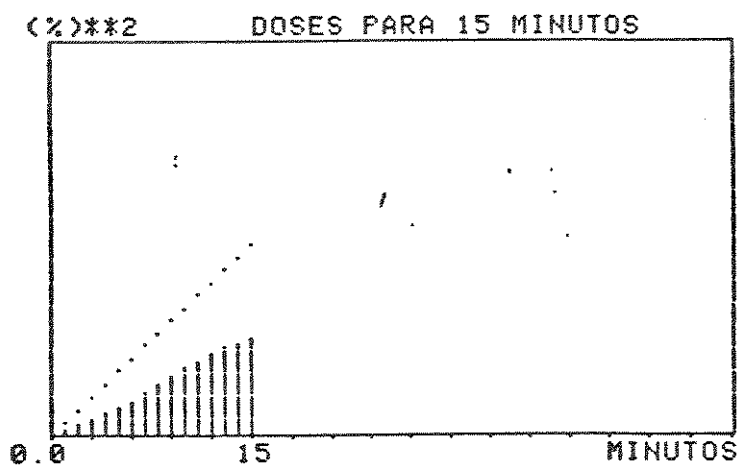


Fig. 8.54 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

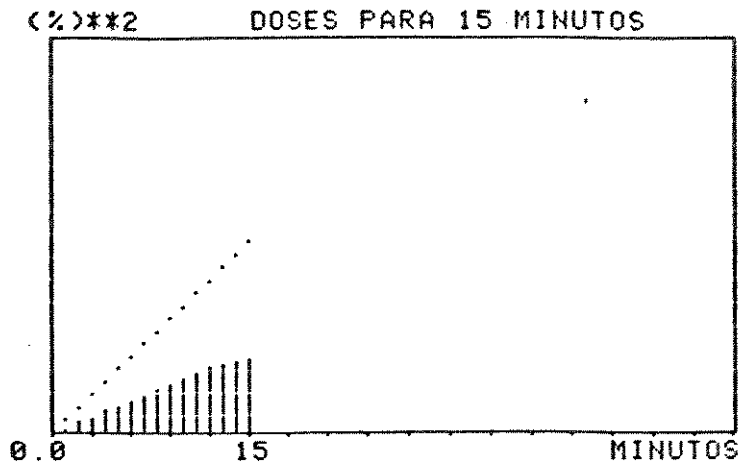


Fig. 8.55 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

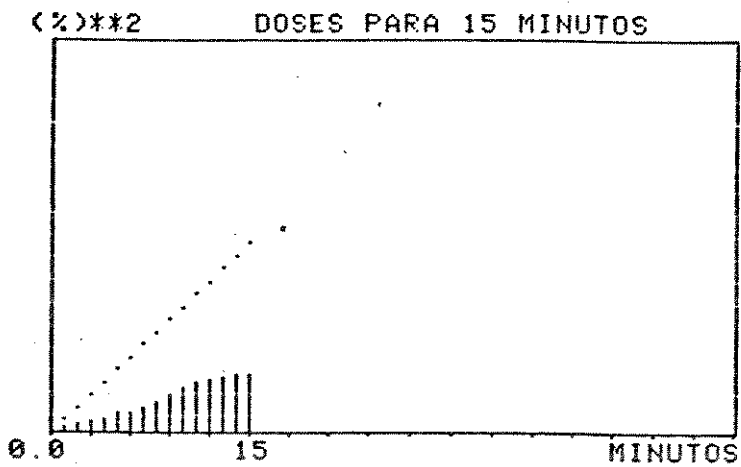


Fig. 8.56 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

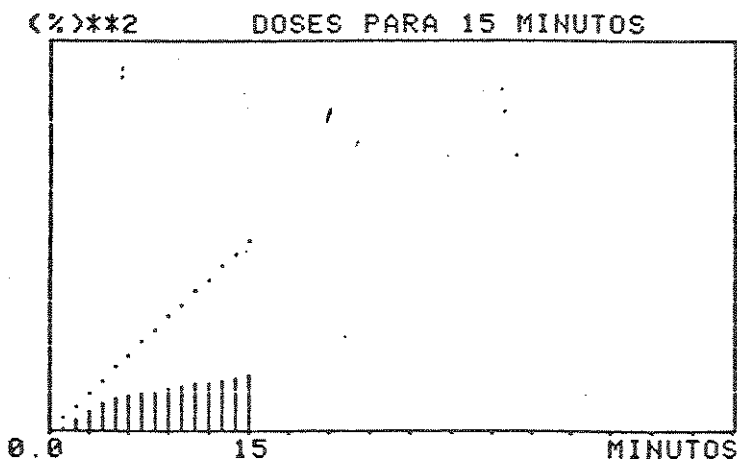


Fig. 8.57 - Doses Acumuladas no Intervalo nr. 4

Série nr.2 - 60 doses unitárias

Início : 16:39

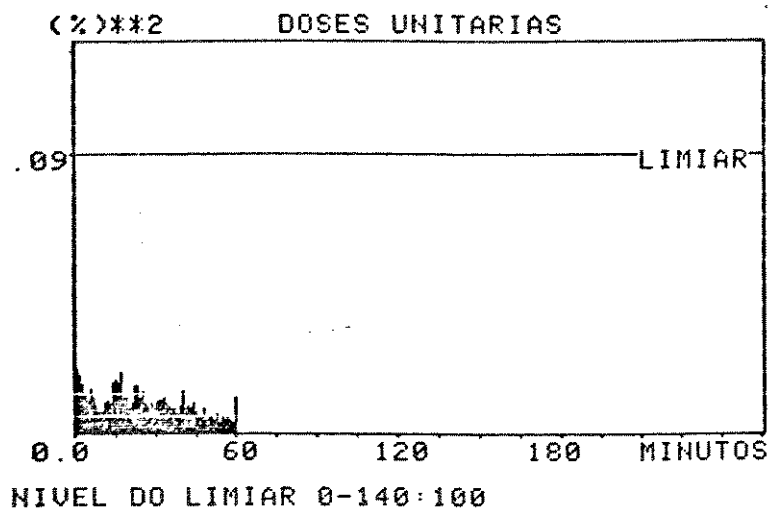


Fig. 8.58 - Doses Unitárias - Série nr.2

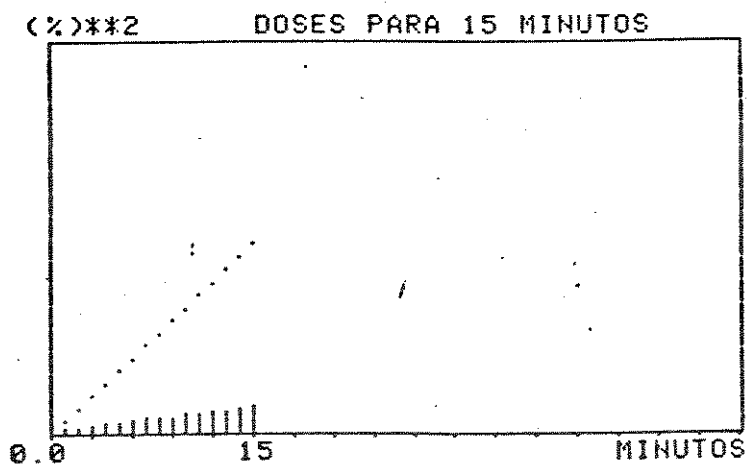


Fig. 8.59 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

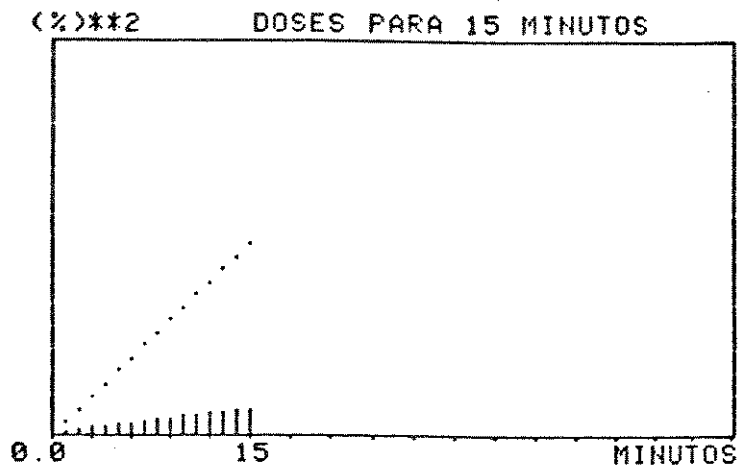


Fig. 8.60 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

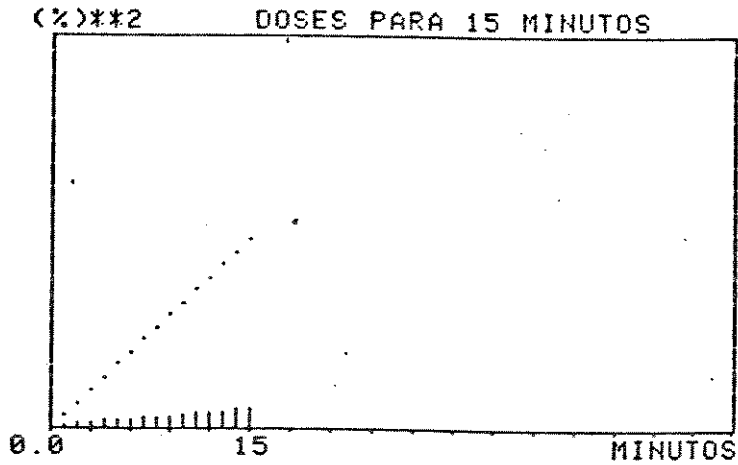


Fig. 8.61 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

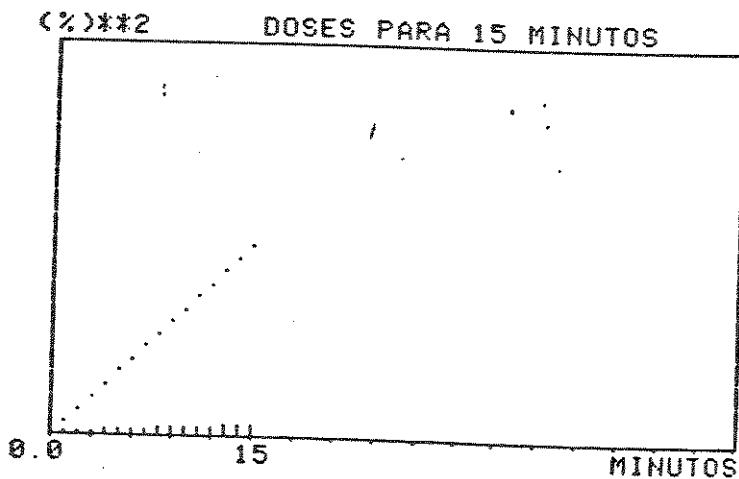


Fig. 8.62 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

Série nr.3 - 60 doses unitárias

Início : 21:14

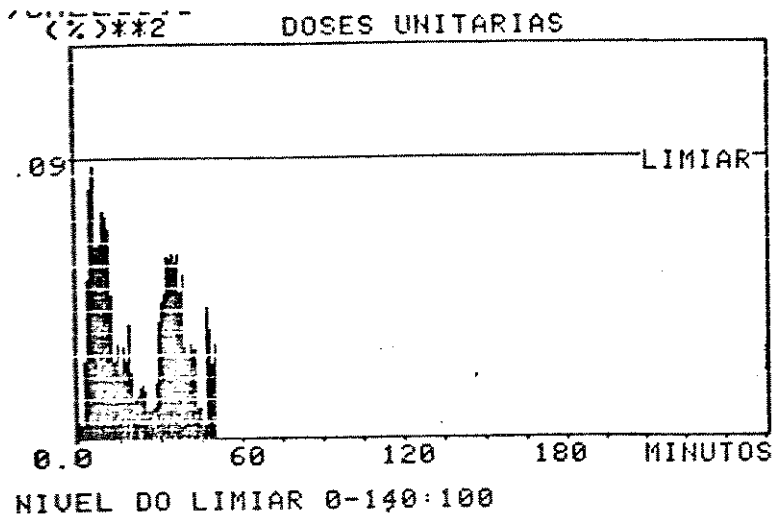


Fig. 8.63 - Doses Unitárias - Série nr.3

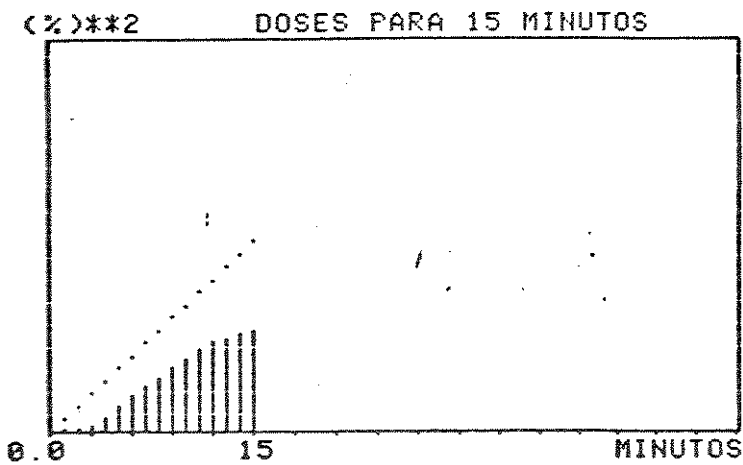


Fig. 8.64 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

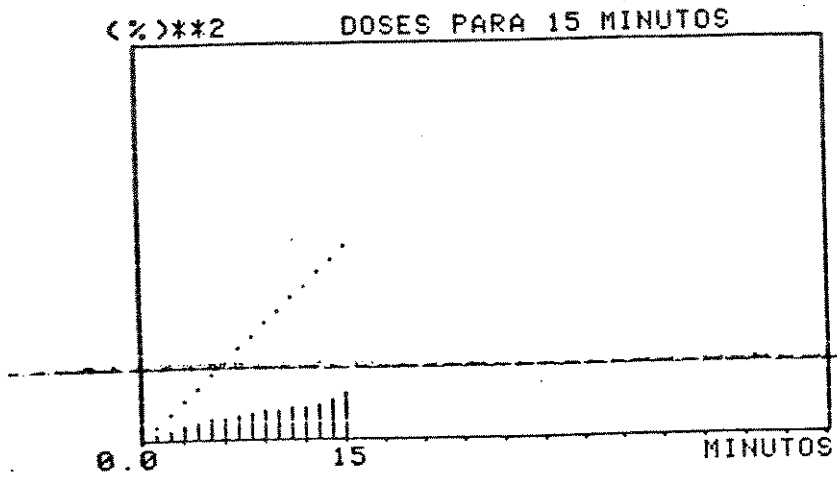


Fig. 8.65 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

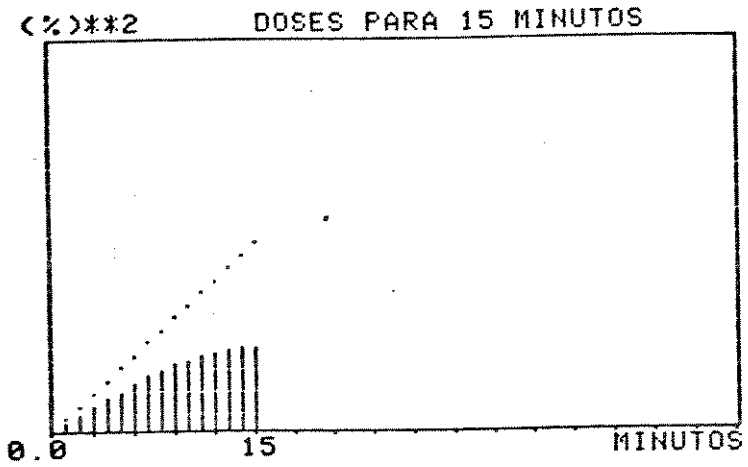


Fig. 8.66 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

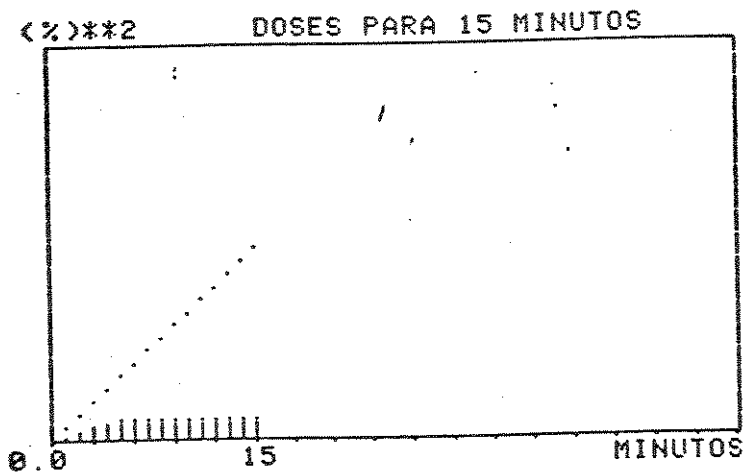


Fig. 8.67 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

C) Medições no Ponto 3 - Estação Taubaté

Série nr.1 - 60 doses unitárias

Início : 10:05

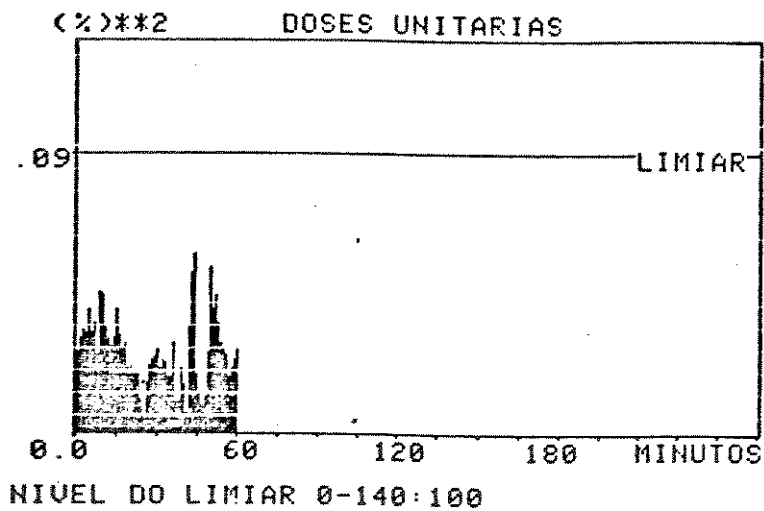


Fig. 8.68 - Doses Unitárias - Série nr.1

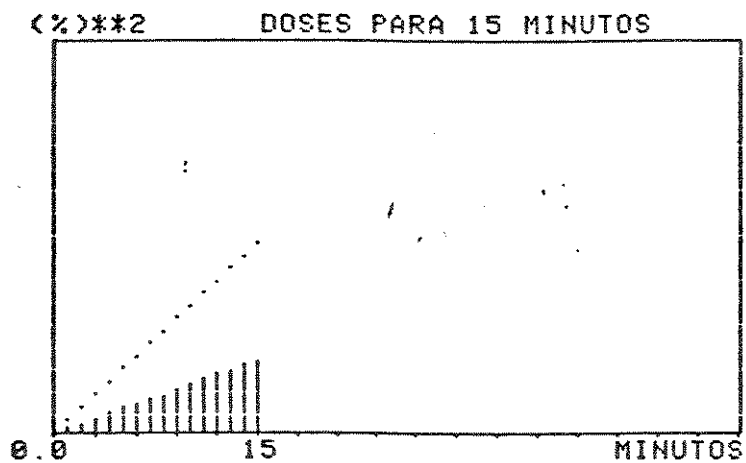


Fig. 8.69 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

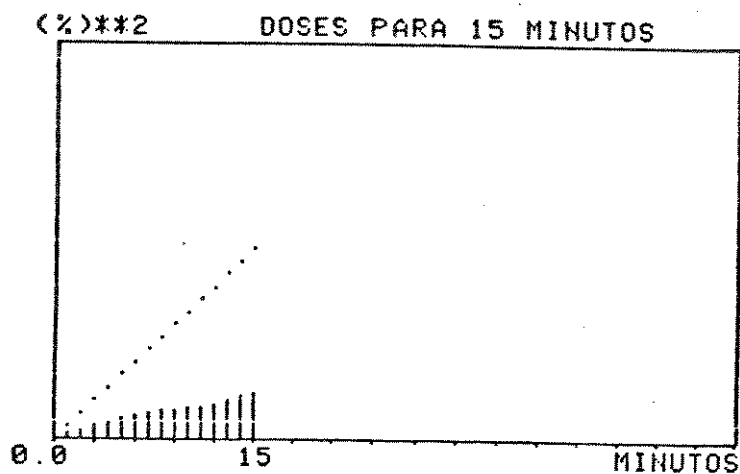


Fig. 8.70 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

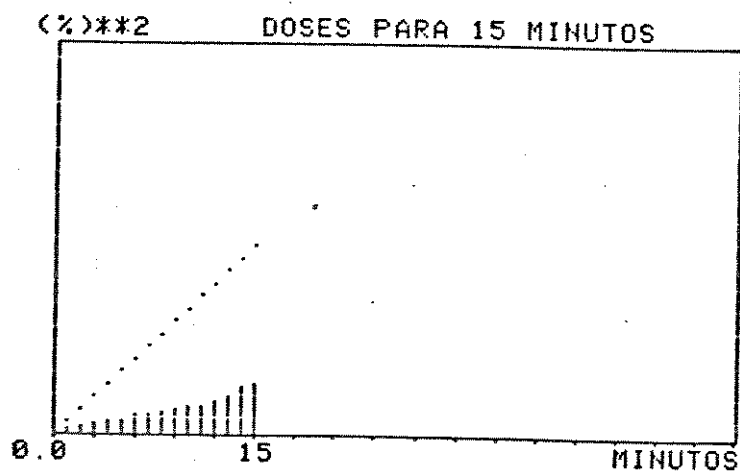


Fig. 8.71 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

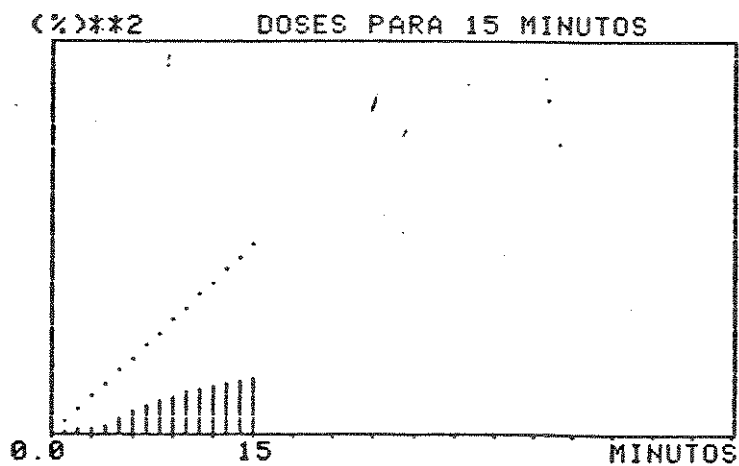


Fig. 8.72 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

Série nr.2 - 60 doses unitárias

Início : 11:04

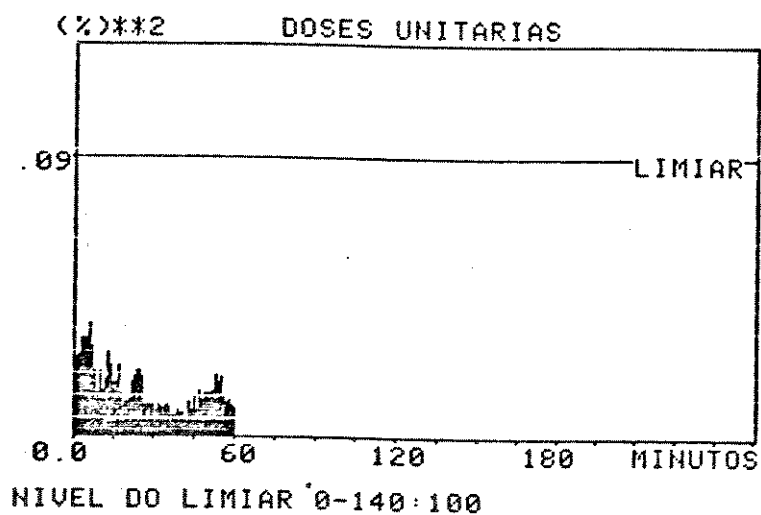


Fig. 8.73 - Doses Unitárias - Série nr.2

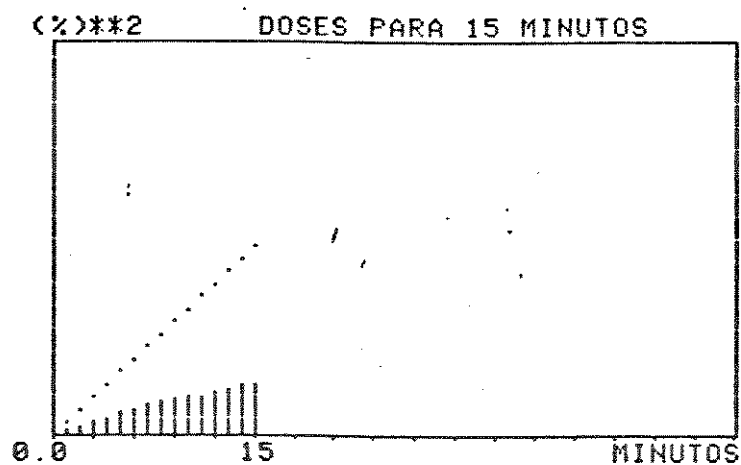


Fig. 8.74 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

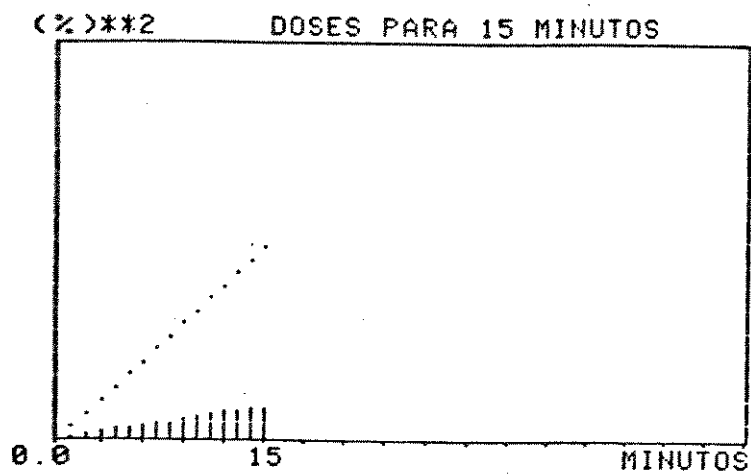


Fig. 8.75 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

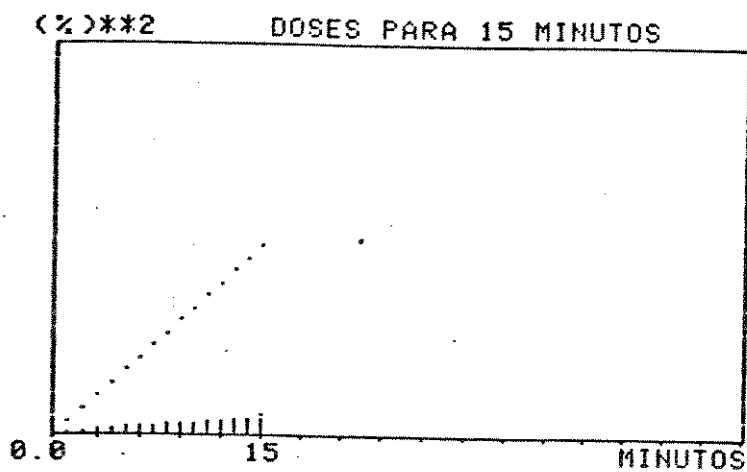


Fig. 8.76 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

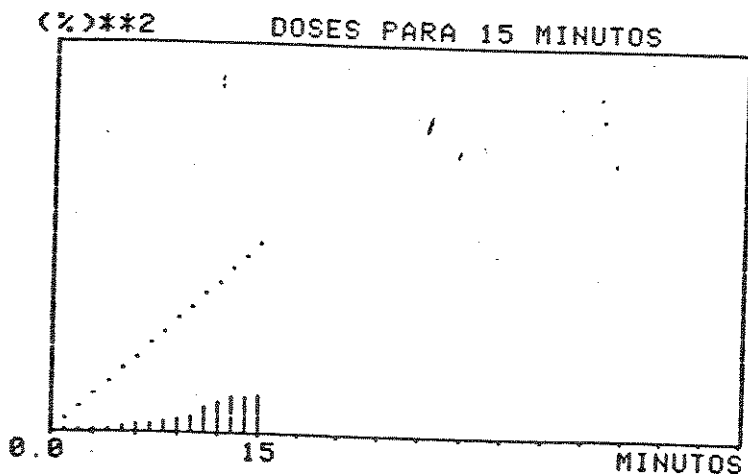


Fig. 8.77 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

D) Medições no Ponto 4 - Estação Campos do Jordão

Série nr. 1 - 120 doses unitárias

Início : 13:22

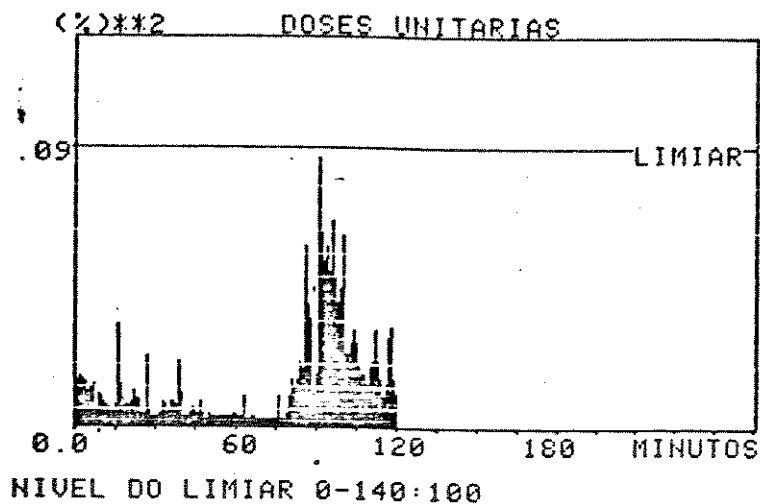


Fig. 8.78 - Doses Unitárias - Série nr.1

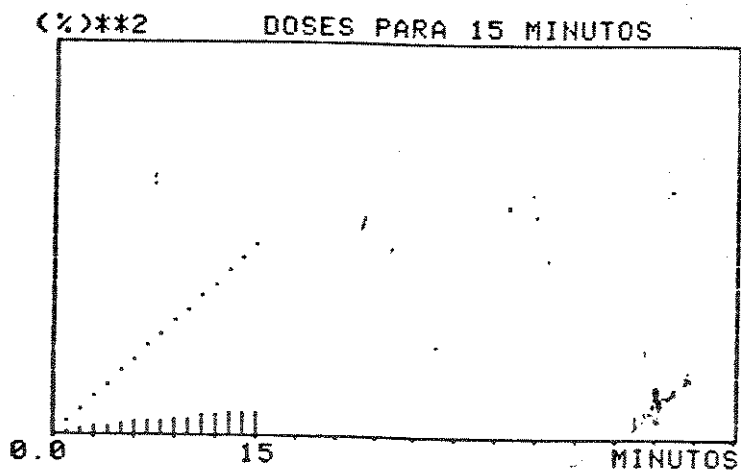


Fig. 8.79 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

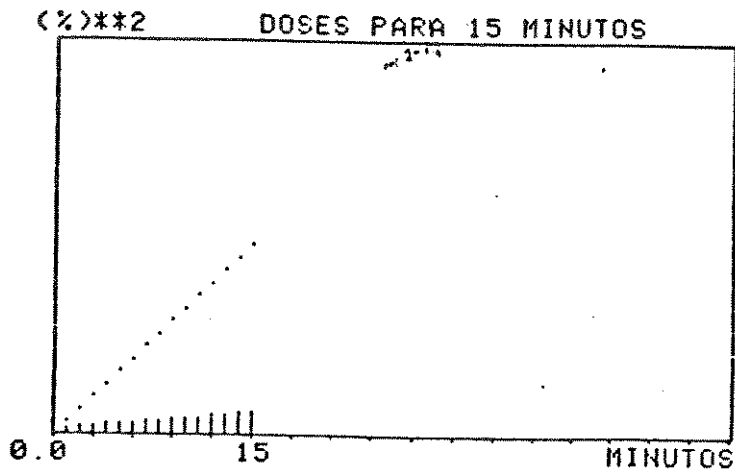


Fig. 8.80 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

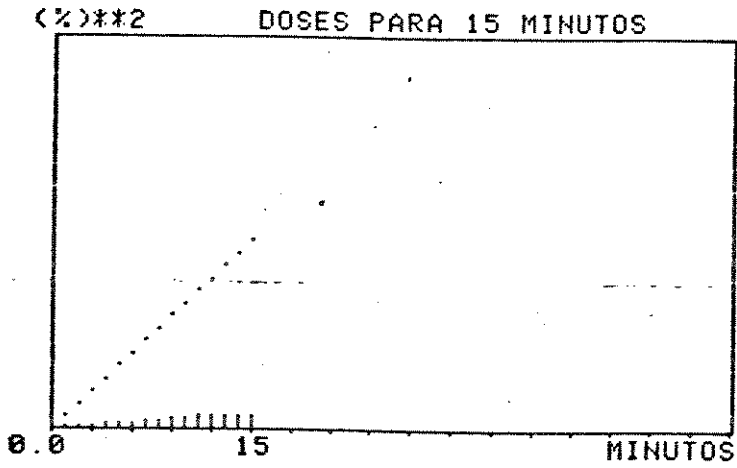


Fig. 8.81 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

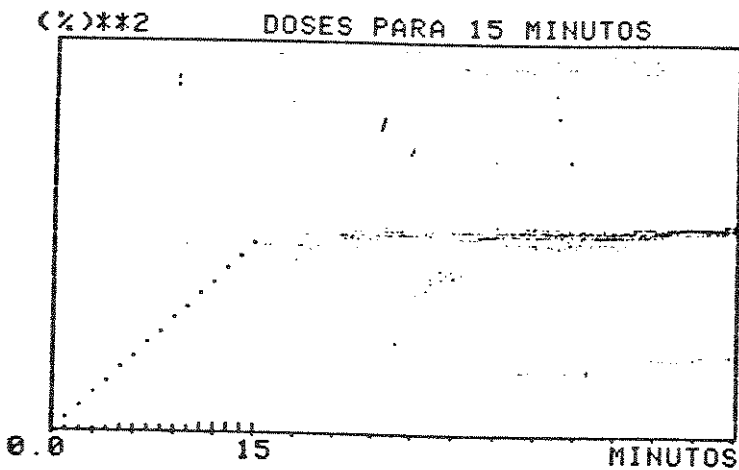


Fig. 8.82 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

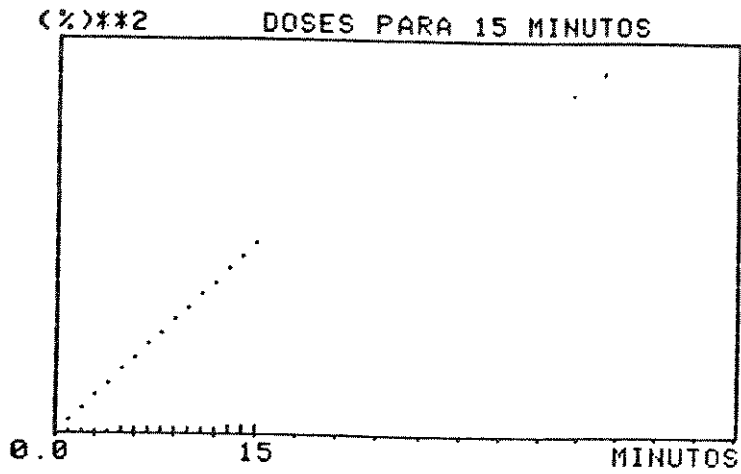


Fig. 8.83 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.5

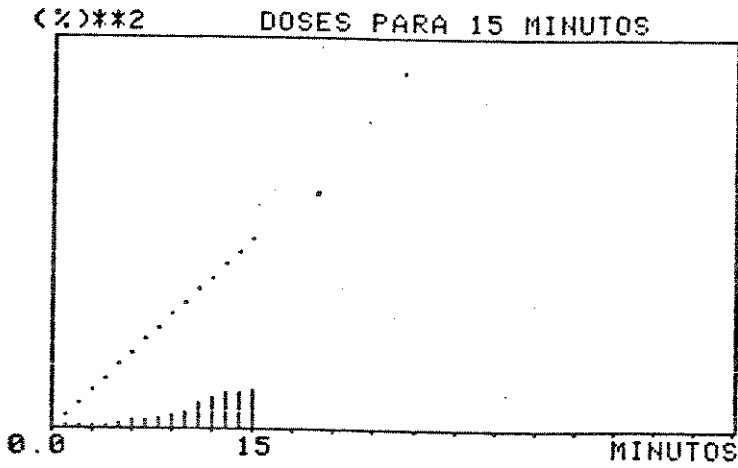


Fig. 8.84 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.6

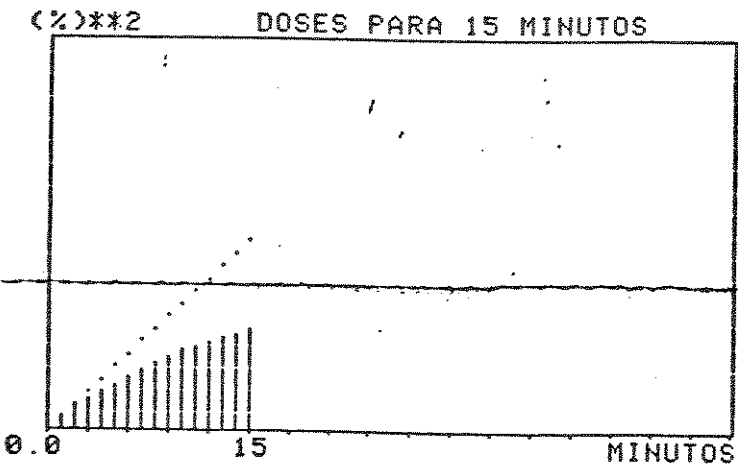


Fig. 8.85 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.7

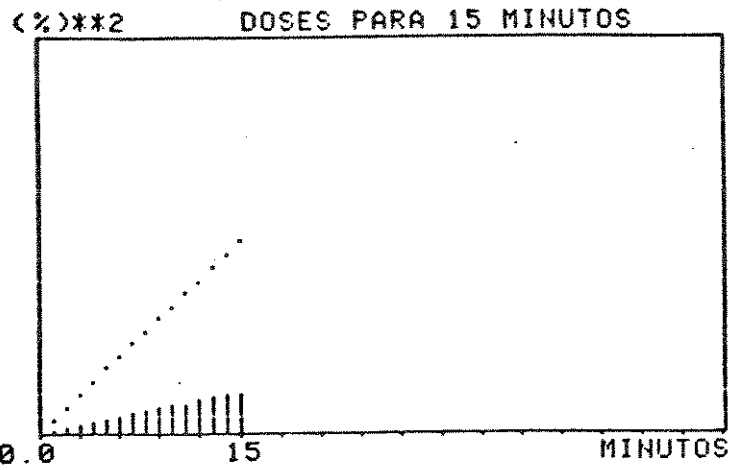


Fig. 8.86 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.8

Série nr.2 - 60 doses unitárias

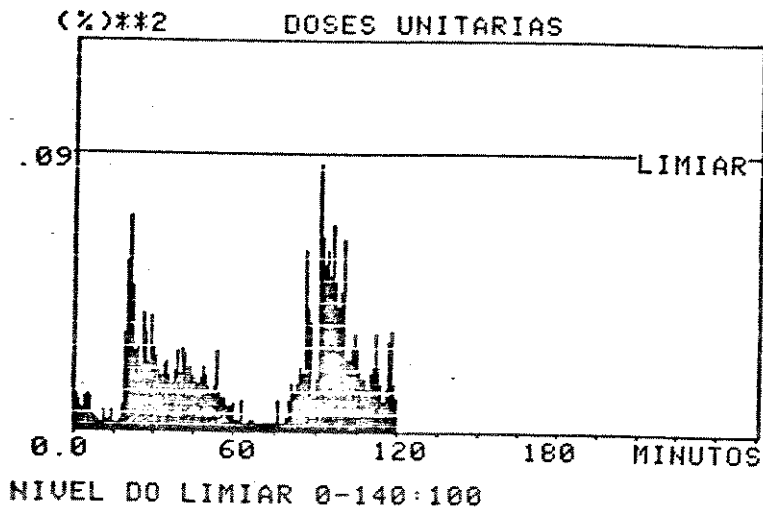


Fig. 8.87 - Doses Unitárias - Série nr.2

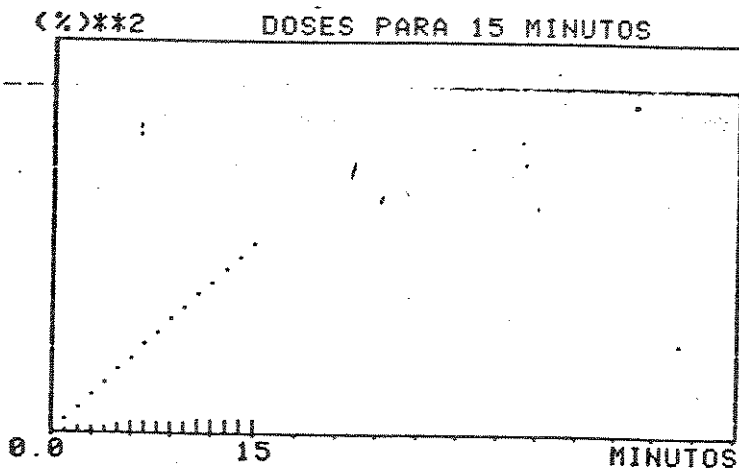


Fig. 8.88 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.1

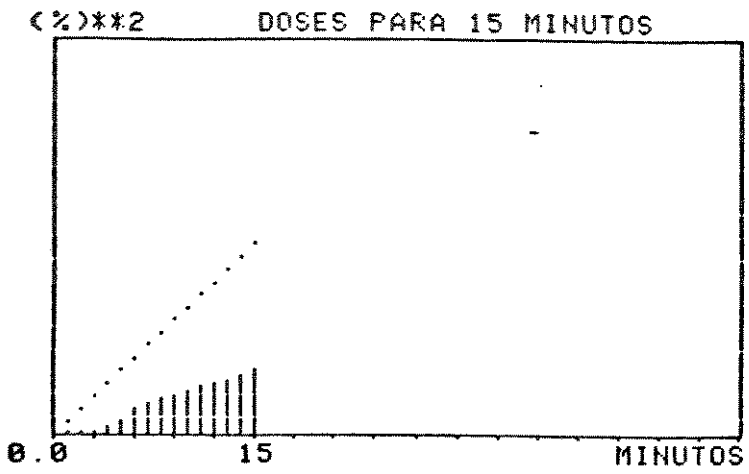


Fig. 8.89 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.2

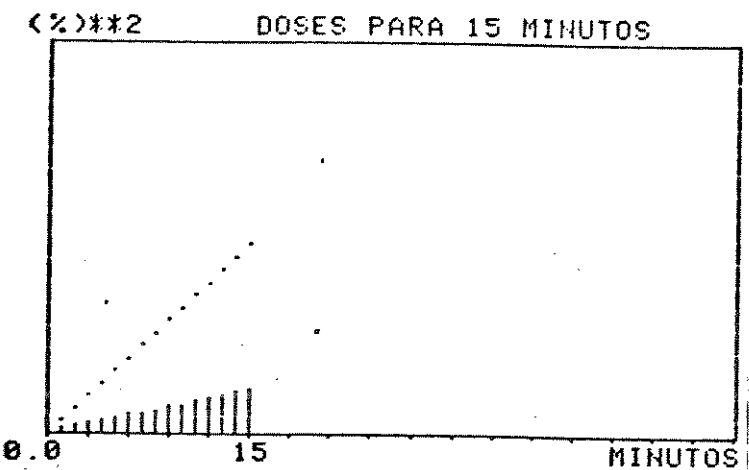


Fig. 8.90 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.3

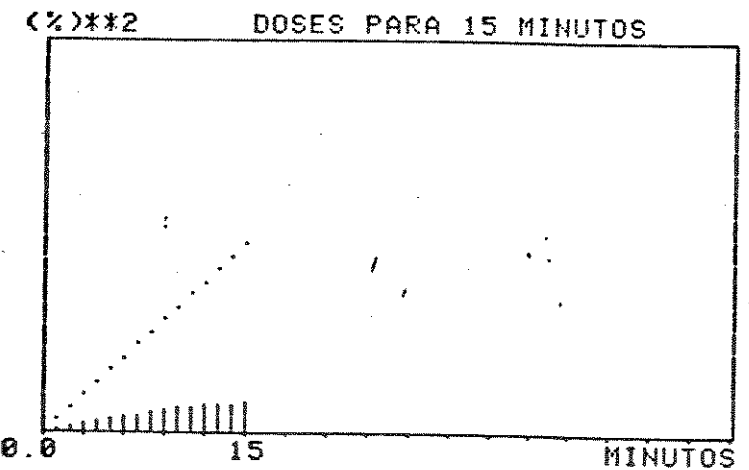


Fig. 8.91 - Doses Acumuladas no Intervalo nr.4

Nos Apêndices D, E e F estão listados os valores numéricos das doses obtidas.

8.3.2 - Medições Efetuadas através do Método da Função de Probabilidade Cumulativa

A) Medição no Ponto 1 - VIBASA

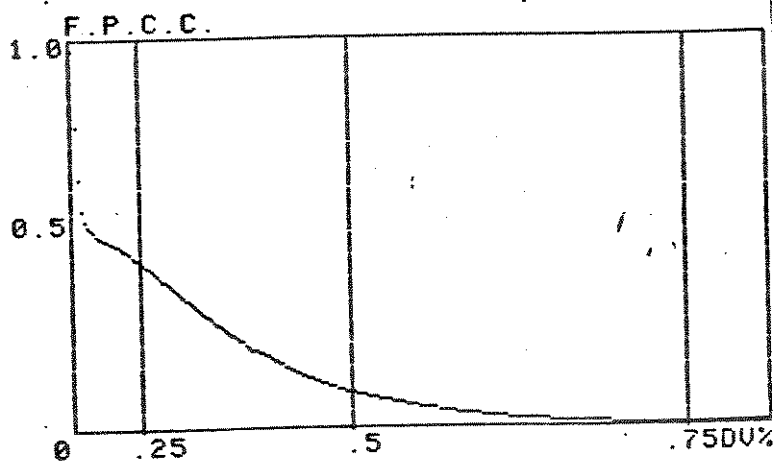
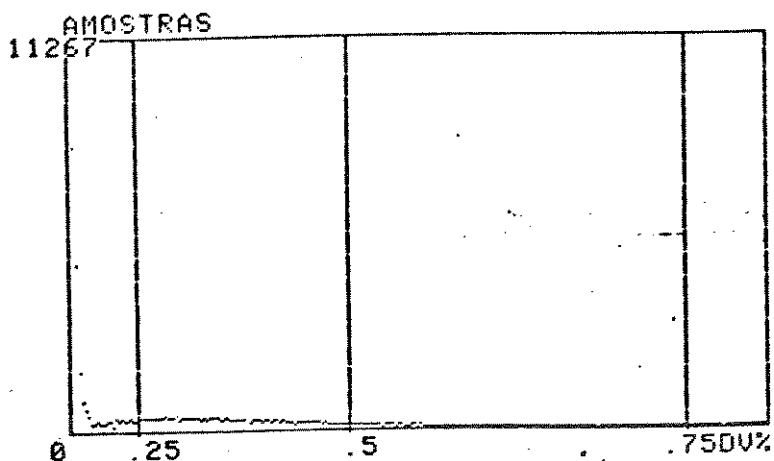
Série nr.1 - 10 minutos

Início: 15:12

Fim : 15:22

Análise do "Flicker"

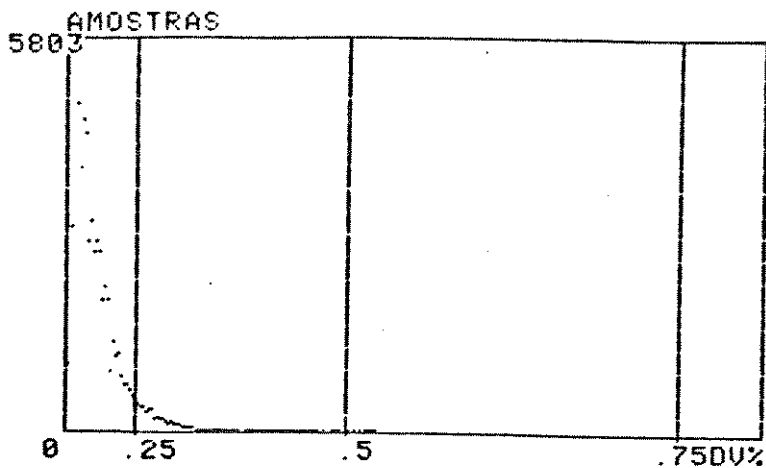
Nível médio	: 9
Desvio padrão	: 36,5
Nr. de amostras	: 60001
P 0,1%	: 0
P 1%	: .68
P 3%	: .60
P 10%	: .48
P 50%	: .15
Pst	: .34



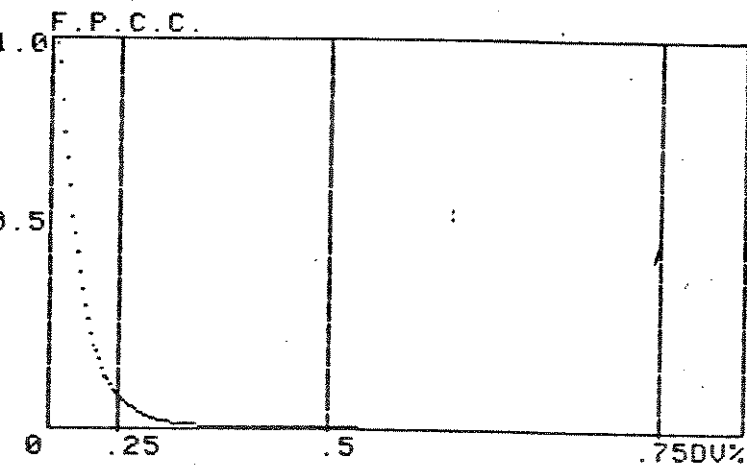
Série nr.2 - 10 minutos

Início: 15:23
Fim : 15:33

Análise do "Flicker"



Nível médio : 9
Desvio padrão : 7.5
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : .435889894
P 1% : .346410162
P 3% : .2958
P 10% : .23979
P 50% : .15
Pst : .189511873



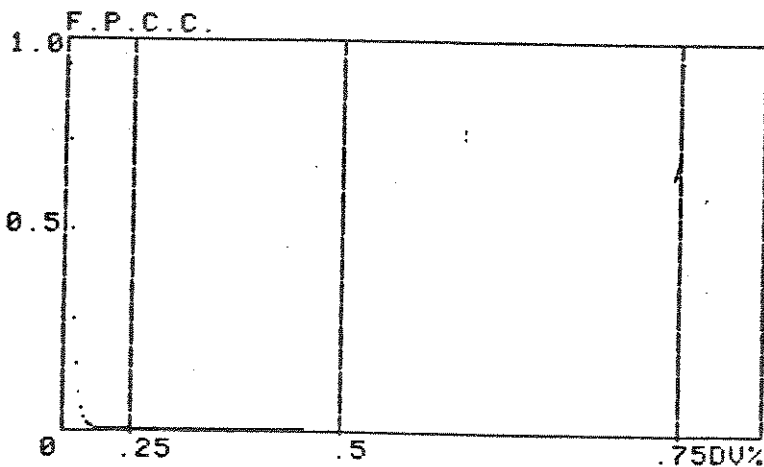
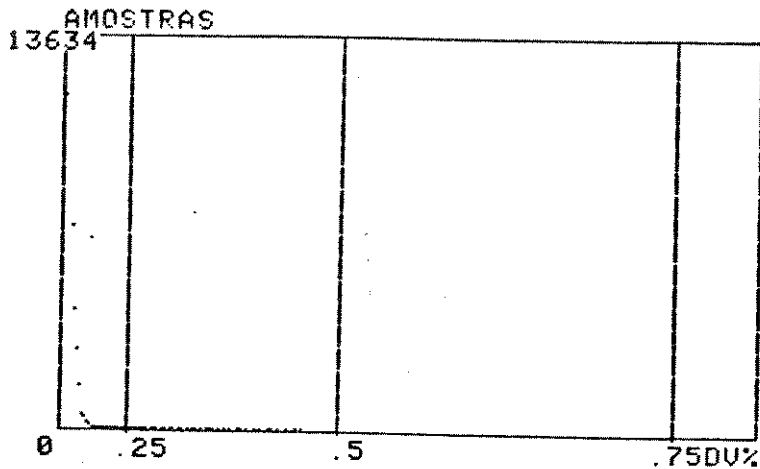
Série nr.3 - 10 minutos

Início: 15:34

Fim : 15:44

Análise do "Flicker"

Nível médio : 4
Desvio padrão : 2
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : .244948374
P 1% : .16583124
P 3% : .141421356
P 10% : .1322875
P 50% : .1
Pst : .101694395

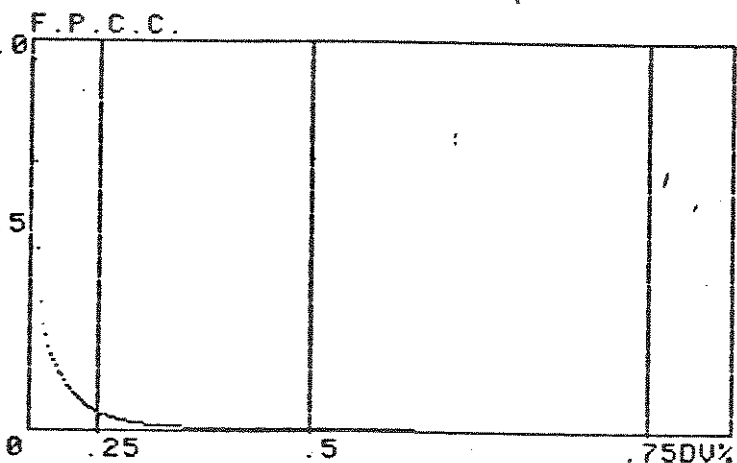
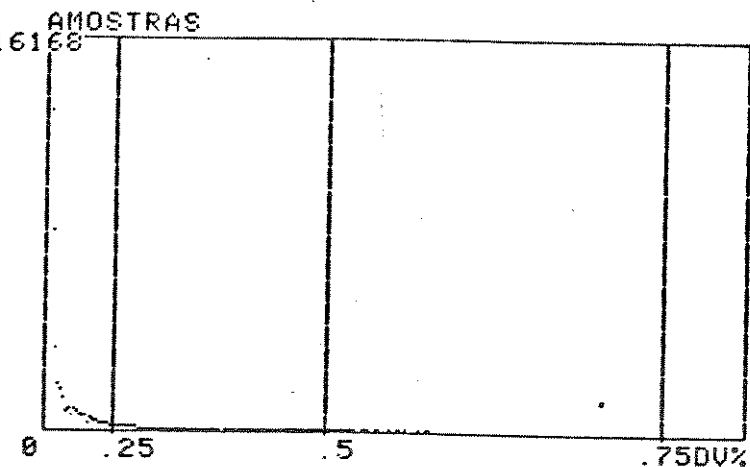


Série nr.4 - 10 minutos

Início: 15:45
Fim : 15:55

Análise do "Flicker"

Nível médio : 3
Desvio padrão : 4,5
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : .487339
P 1% : .35
P3% : .278388
P10% : .2
P50% : .0866
Pst : .175443723

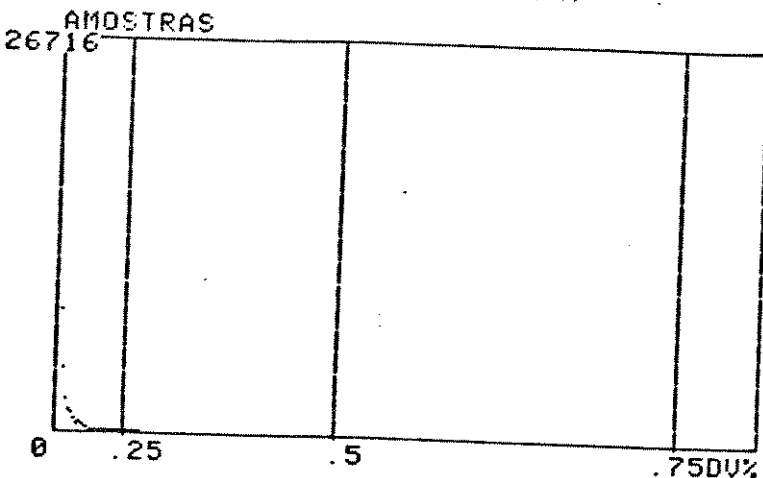


Série nr.5 - 10 minutos

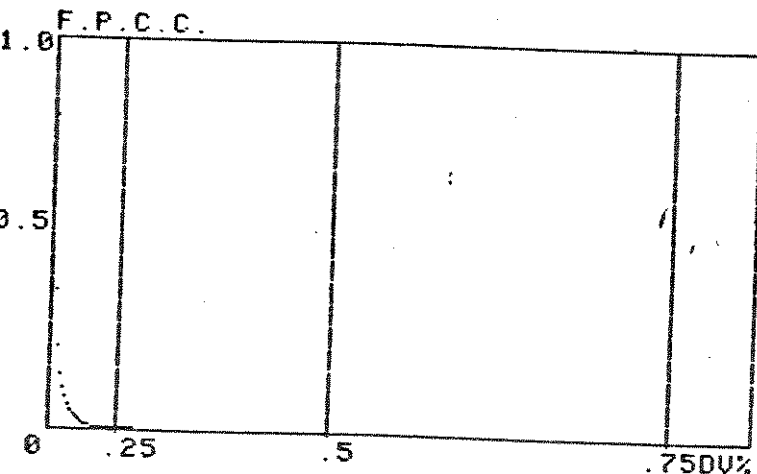
Início: 15:56

Fim : 16:06

Análise do "Flicker"



Nível médio : 2
Desvio padrão : 1,5
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : .23979
P 1% : .1936
P 3% : .15811
P 10% : .12247
P 50% : .0707
Pst : .10008

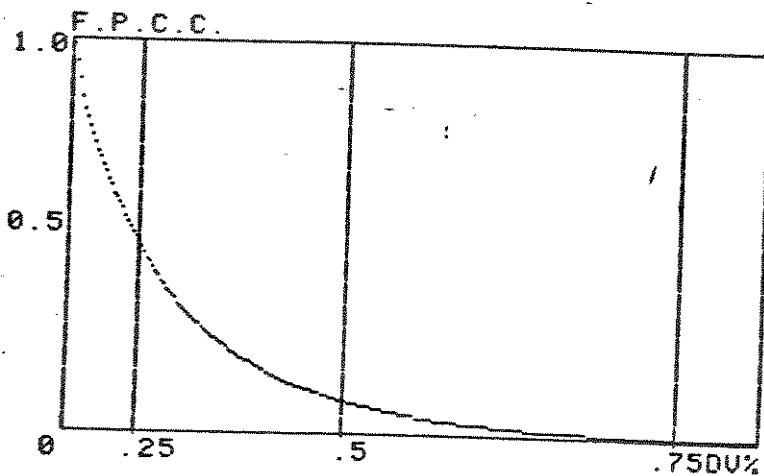
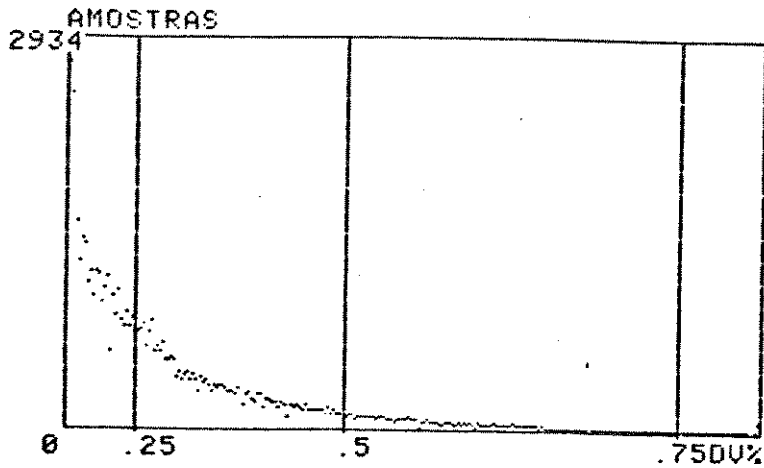


Série nr.6 - 10 minutos

Início: 16:07
Fim : 16:17

Análise do "Flicker"

Nível médio : 24
Desvio padrão : 33
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : 0
P 1% : .66895
P 3% : .593717
P 10% : .47958
P 50% : .24494
Pst : .34037



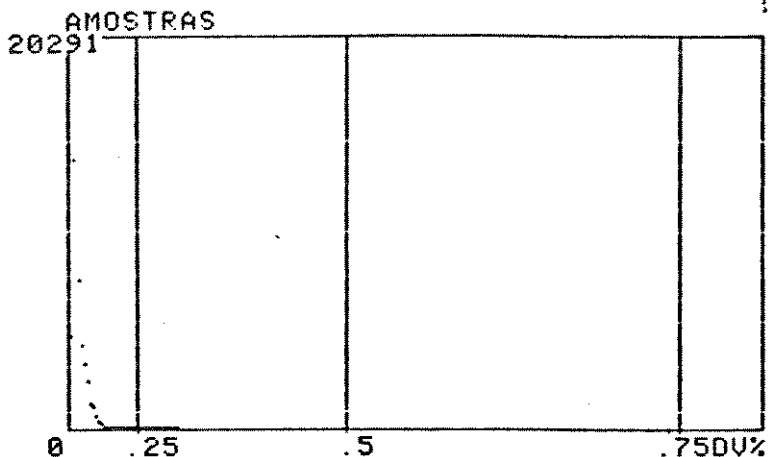
B) Medições no Ponto 3 - Estação Taubaté

Série nr. 1 - 10 minutos

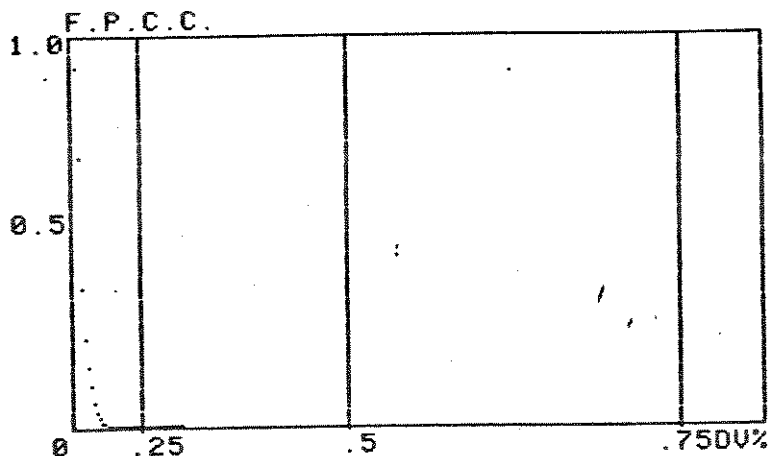
Início: 12:04

Fim : 12:14

Análise do "Flicker"



Nível médio : 7
Desvio padrão : 7
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : 0
P 1% : .39051
P 3% : .28722
P 10% : .2291
P 50% : .13228
Pst : .1718

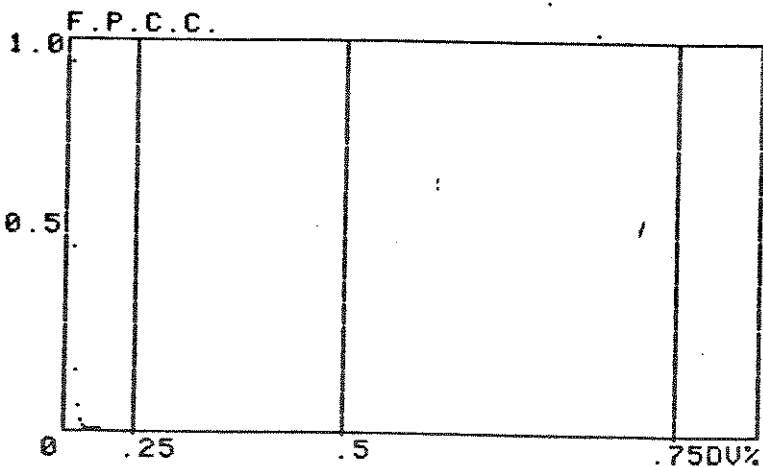
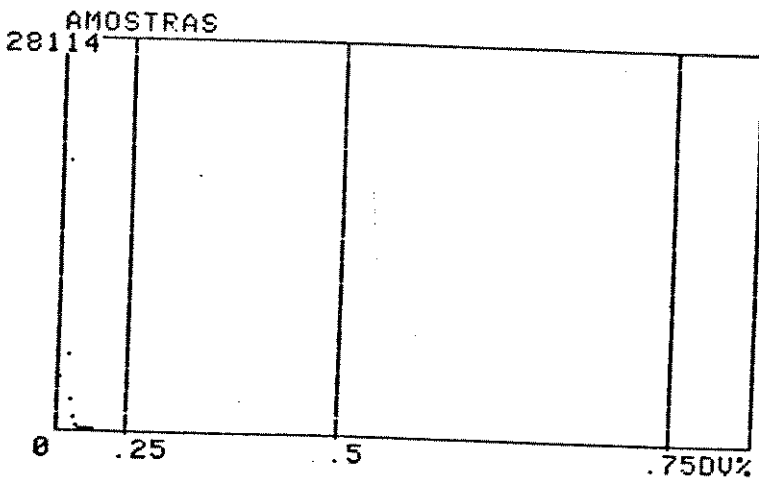


Série nr.2 - 10 minutos

Início: 12:15
Fim : 12:25

Análise do "Flicker"

Nível médio : 4
Desvio padrão : 1
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : .158113883
P 1% : .141421356
P 3% : .132287566
P10% : .122474487
P50% : .1
Pst : .0893574284

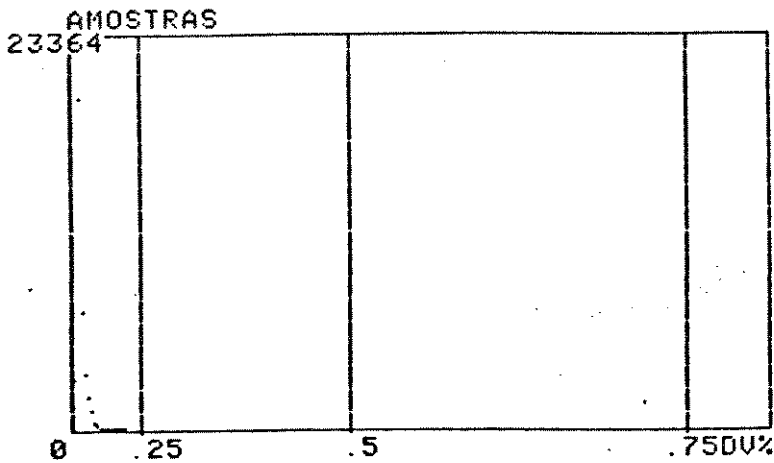


Série nr.3 - 10 minutos

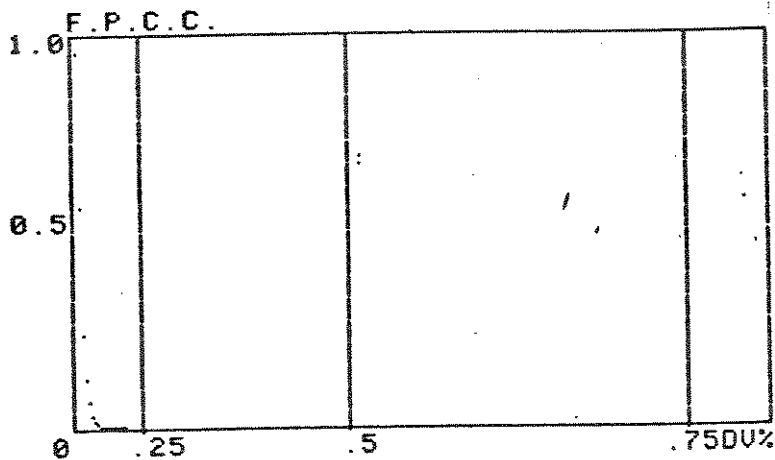
Início: 12:15

Fim : 12:25

Análise do "Flicker"



Nível médio : 4
Desvio padrão : 1
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : .291547595
P 1% : .141421356
P3% : .132287566
P10% : .122474487
P50% : .1
Pst : .0993415824

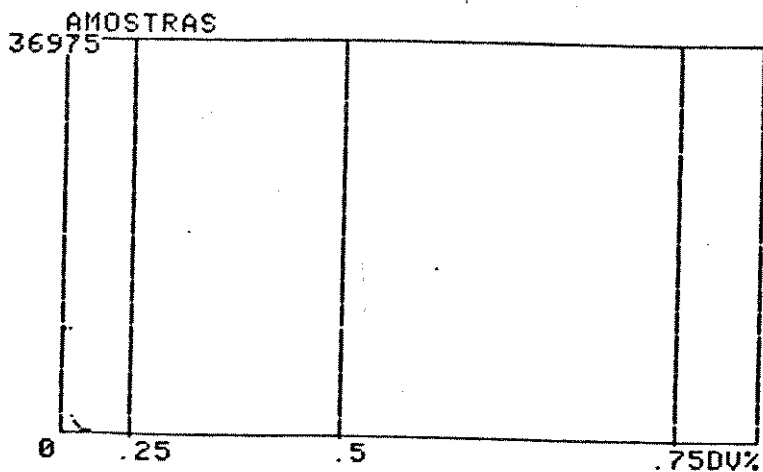


Série nr.4 - 10 minutos

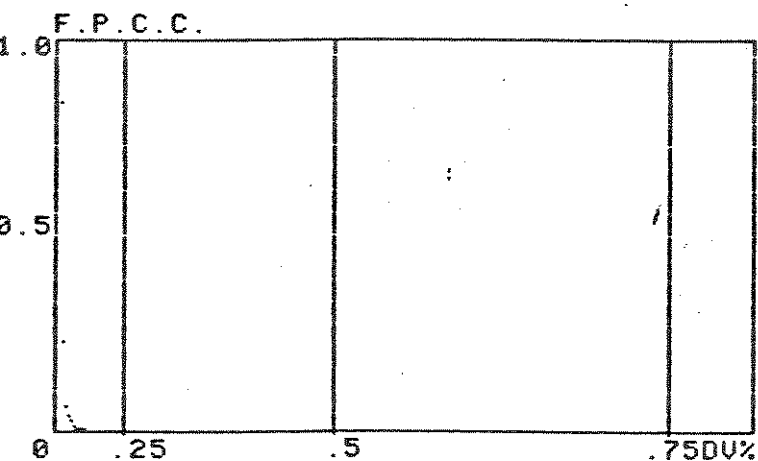
Início: 12:26

Fim : 12:36

Análise do "Flicker"



Nível médio : 3
Desvio padrão : 1
Nr. de amostras: 60001
P 0,1% : .158113893
P 1% : .132287566
P 3% : .122474487
P 10% : .111803399
P 50% : .0866025404
Pst : .0823969053



8.3.3 - Análise dos Resultados Obtidos

As medições realizadas através do método das doses mostram-se mais diretas, apontando de forma "on-line" as variações de tensão nos diversos pontos de medição.

Foi verificado que os níveis de "flicker" detectados no barramento de 138 kV do consumidor se mostraram bastante acentuados, com tendência de atenuação à medida que se aproxima da Estação Terminal Taubaté, de 440/138 kV, onde o nível de curto-circuito é mais elevado.

No ponto mais remoto do sistema, a Estação Campos do Jordão, ficou comprovado que o fenômeno se manifesta ao longo do sistema, já que as medições realizadas naquele ponto apresentaram níveis consideráveis.

Durante as medições realizadas nos pontos remotos do sistema - 2, 3 e 4 - puderam ser imediatamente detectadas as variações dos ciclos operativos da carga, o que comprovou a influência da mesma ao longo de todo o sistema.

A metodologia da Função Probabilidade Cumulativa empregada nos Pontos 1 e 3 do sistema mostrou-se coerente com os níveis de flutuação de tensão esperados naqueles momentos, porém de forma menos direta do que na metodologia das doses acumuladas, uma vez que requer algum tempo e esforço computacional para emitir os resultados parciais de avaliação, ou seja, uma curva de FPCC a cada 10 minutos.

O valor do Pst calculado pela fórmula definida na equação (5.11) acusou valores muito baixos em relação ao nível das perturbações observadas. A razão para essa incongruência está no fato de se ter utilizado no medidor o filtro de ponderação, cujo efeito foi atenuar o impacto causado pelas flutuações de baixa frequência do forno.

CAPÍTULO 9

CONCLUSÕES

A utilização da metodologia de medição de cintilação luminosa segundo recomendação da União Internacional de Eletrotermia mostrou diversas vantagens para o usuário, tais como:

- i - confere a liberdade de projeto para a implementação do equipamento de medição e análise;
- ii - incorpora as principais experiências colhidas pelos países que já dispunham de medidores desse efeito;
- iii - permite a comparação dos resultados obtidos pelas diferentes metodologias com as estimativas resultantes da pré-determinação;
- iv - aplica-se a qualquer sistema de suprimento e qualquer tipo de carga variável;
- v - permite o acompanhamento direto do efeito na rede com o registro e a gravação de dados durante longos períodos de medição;

Com a implementação do medidor, combinando o processamento analógico do sinal de tensão com a análise digital das amostras do sinal processado, obteve-se um sistema de medição flexível com saídas analógicas e digitais, permitindo o registro simultâneo de dados através de oscilógrafos, gravador de fita ou memória digital.

Com relação às principais metodologias - método das doses e método da probabilidade acumulada - verificaram-se algumas diferenças fundamentais na interpretação dos resultados: enquanto o registro das doses unitárias permite o acompanhamento da evolução da carga minuto a minuto na comparação direta com os limites de tolerância da variação luminosa associada, a avaliação dada pela análise estatística corresponde a um diagnóstico do que ocorreu no intervalo de medição em termos relativos, indicando a fração do tempo total em que cada nível de flutuação ocorreu. Esse método, mais rico em informações sobre o processo como um todo, não proporciona a monitoração direta do que está acontecendo durante a medição.

Pela comparação dos resultados da medição direta com os dos métodos de pré-determinação, verificou-se que existe uma coerência razoável dentro da faixa de variação dos resultados obtidos, sendo que se torna difícil afirmar que os limites ora adotados correspondem exatamente àqueles em que o fenômeno passa a ser sentido como um incômodo visual, por se tratar de uma avaliação subjetiva média.

As discrepâncias observadas podem ser minimizadas adequando-se os critérios e limites à realidade brasileira. Para isso, sugere-se a realização de medições de campo em larga escala, com base no método proposto a nível internacional, bem como testes de sensibilidade visual considerando os padrões de exigência brasileiros. Sugere-se também o cadastramento completo das características de cargas (fornos a arco) e sistemas supridores para a estimativa de fatores empíricos, como o Ks do método inglês, e o K do método francês, a serem utilizados nos critérios de pré-avaliação.

Das experiências realizadas e resultados obtidos conclui-se que a metodologia de pré-análise poderia ser simplificada considerando, por exemplo, as relações de níveis de curto-circuito em qualquer Ponto de Acoplamento Comum onde se queira verificar o impacto de uma futura carga a ser suprida por tal sistema.

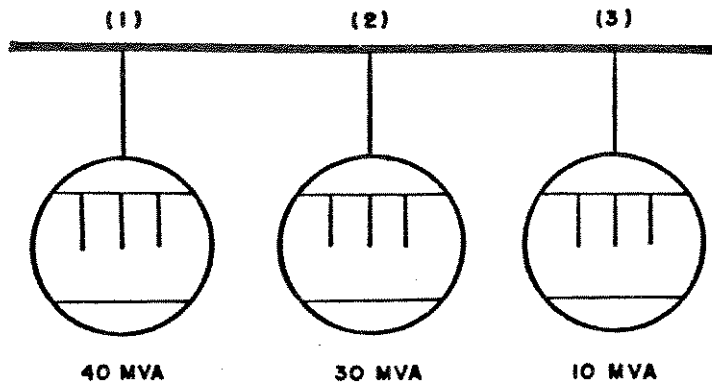
Uma outra avaliação possível seria efetuada através de faixas de limites que poderiam ter, ao invés de uma interpretação quantitativa como as atualmente utilizadas, uma interpretação qualitativa, ou seja, a qualidade de suprimento seria considerada satisfatória ou não, de acordo com as faixas estabelecidas como limites de tolerância para os resultados obtidos.

A interpretação dos níveis de "flicker" de modo discretizado poderia ser feita através da utilização de intervalos de tempo inferiores a 1 minuto para o processo das doses, objetivando a verificação da incidência de maiores flutuações de tensão já que a integração durante maior intervalo de tempo leva a uma diluição dos níveis obtidos ao longo do processo.

E, finalmente, seria recomendável realizar simultaneamente a medição pelo método das doses e da análise estatística, que permitiriam a comparação e validação mútua.

APENDICE A

APLICAÇÃO NUMÉRICA DO MÉTODO INGLÊS DE PRÉ-DETERMINAÇÃO POR INSTALAÇÕES MULTI-FORNOS NO MESMO BARRAMENTO



Dados:

-> Potência de curto-circuito no PAC = 5500 MVA

-> Potência de curto-circuito dos fornos: St1 = 100 MVA
St2 = 75 MVA
St3 = 25 MVA

-> Fator de Severidade Ks = 0,12

1) Cálculo de Vt1, Vt2 e Vt3:

$$V_{t1} = \frac{100}{5500} = 0,0182 \text{ pu}$$

$$V_{t2} = \frac{75}{5500} = 0,0136 \text{ pu}$$

$$V_{t3} = \frac{25}{5500} = 0,0045 \text{ pu}$$

2) Cálculo de Vf_{q1}, Vf_{q2} e Vf_{q3}

$$Vf_{q1} = 0,12 \times 0,0182 = 0,218 \text{ \textcircled{R}}$$

$$Vf_{q2} = 0,12 \times 0,0136 = 0,163 \text{ \textcircled{R}}$$

$$Vf_{q3} = 0,12 \times 0,0045 = 0,054 \text{ \textcircled{R}}$$

3) Determinação de Vf_{g1}, Vf_{g2} e Vf_{g3}

$$Vf_{g1} = 1,0 \text{ pu}$$

$$Vf_{g2} = 0,75 \text{ pu}$$

$$Vf_{g3} = 0,25 \text{ pu}$$

4) Cálculo dos Momentos M₁, M₂ e M₃

$$M_1 = 0,1638 [1 + 0,75^2 + 0,25^2] = 0,2662$$

$$M_2 = 0,0485 [1 + 0,75^4 + 0,25^4] = 0,0640$$

$$M_3 = 0,0239 [1 + 0,75^6 + 0,25^6] = 0,0282$$

5) Fatores b e c

$$B = \frac{M_3^2}{M_2^3} = \frac{(0,0282)^3}{(0,0640)^3} = 3,04$$

Do gráfico, para b = 3,04 c = 3,5

6) Cálculo do valor Vf_{gr}

$$Vf_{gr} = \sqrt{0,262 + 3,5 \cdot \sqrt{0,0640}} = 1,073$$

$$Vf_{gr} = 1,073 \times 0,218 = 0,235 \text{ \textcircled{R}}$$

$$V_{tA2} = \frac{15}{4200} = 0,0035 \text{ pu}$$

$$V_{tB1} = \frac{75}{5000} = 0,015 \text{ pu}$$

$$V_{tB2} = \frac{45}{5000} = 0,009 \text{ pu}$$

2) Cálculo de V'_{fgA1} , V'_{fgA2} , V'_{fgB1} e V'_{fgB2}

$$V_{fg'A1} = 0,3 (0,12 * 0,0179) = 0,64 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

$$V_{fg'A2} = 0,3 (0,12 * 0,0035) = 0,126 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

$$V_{fg'B1} = 0,12 \times 0,015 = 1,8 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

$$V_{fg'B2} = 0,12 \times 0,009 = 1,08 \times 10^{-3} \text{ pu}$$

A partir deste ponto, os cálculos passam a ser idênticos aos do caso com vários fornos conectados no mesmo barramento.

Assim,

a) pela fórmula empírica:

$$V_{fgr} = \frac{98 + 4}{100} \sqrt[4]{(V_{fgB1})^4 + (V_{fgB2})^4 + (V_{fgA1})^4 + (V_{fgA2})^4}$$

$$V_{fgr} = \frac{102}{100} \sqrt[4]{1,86 \times 10^{-3}}$$

$$V_{fgr} = 0,189\%$$

b) pelo processo estatístico:

$$V_{fgB1} = 1,0 \text{ pu}$$

$$V_{fgB2} = 0,6 \text{ pu}$$

$$V_{fgA1} = 0,36 \text{ pu}$$

$$V_{fgA2} = 0,07 \text{ pu}$$

$$M1 = 0,1638 [1 + 0,6^2 + 0,36^2 + 0,07^2] = 0,244$$

$$M2 = 0,0485 [1 + 0,6^4 + 0,36^4 + 0,07^4] = 0,056$$

$$M3 = 0,0239 [1 + 0,6^6 + 0,36^6 + 0,07^6] = 0,025$$

$$b = \frac{M3^2}{M2^3} = \frac{(0,025)^2}{(0,056)^3} = 3,56$$

$$c = 3,6$$

$$V_{fgr} = \sqrt{0,244 + 3,6 \sqrt{0,056}} = 1,05$$

$$V_{fgr} = 1,05 \times 0,18$$

$$V_{fgr} = 0,189\%$$

APÊNDICE C

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FRANCESA

Serão estudadas as condições de instalação de um forno a arco cujo transformador tem potência nominal de 5,5 MVA sobre uma rede de potência de curto-circuito 380 MVA.

Portanto, pode-se verificar antecipadamente que a relação entre a potência de curto do sistema e a potência nominal do forno é $380/5,5 = 69$, sendo que, para uma análise prévia, o método francês, assim como o inglês, considera que a relação mínima para que não ocorra "flicker" seja de 100, o que corresponde a uma queda de tensão $\Delta V\% = 2\%$, obtido a partir de:

$$S_{nf} = 5,5 \text{ MVA} \rightarrow S_{ccf} = 11 \text{ MVA} = 2 \times 5,5 \text{ MVA}$$

$$S_{cc} = 550 \text{ MVA} \rightarrow 100 \times S_n$$

$$\text{logo: } \Delta V\% = \frac{11}{550} \times 100\% = 2\%$$

Condições de Suprimento:

A aciaria é alimentada por uma linha de 90 kV, com 2 km de comprimento. A potência de curto-circuito no local é de 380 MVA. O transformador é de 90/11 kV - 7 MVA, com impedância de curto - $Z\% = 8,5\%$.

Condições do forno:

- potência nominal do trafo do forno: 5,5 MVA
- capacidade: 15 ton
- tensão primária: 11 kV
- tensão secundária: 238 a 110 V, com 12 Tap's
- impedância de curto-circuito do trafo: 10% (238 V)
- reatância do circuito de BT do forno estimada em
-3
(j 2,510 Ohm)

Logo, a impedância total da instalação do forno, visto da barra de 90 kV, corresponde à soma das reatâncias (despreza as resistências) do forno, do transformador do forno, do transformador 90/11 kV (7 MVA) e da linha de 90 kV.

Portanto, a reatância total é de j 11,8 Ohm.

Curva da dose de "flicker"

Tendo por base uma curva de dose de "flicker", obtida através das medições para um outro forno a arco, de potência nominal 3,3 MVA, cuja impedância de curto-circuito total é de j 14,4 Ohm e potencia de curto-circuito da rede 196 MVA, obtém-se, pelo método exposto no Capítulo 5, uma curva correspondente para o forno em estudo.

Então:

$$G = \left(\frac{196}{380}\right)^2 \times \left(\frac{14,4}{11,8}\right)^2 = 0,396$$

A curva de doses de "flicker" assim pré-determinada é traçada na Fig. A.C-1. O fator 0,396 é multiplicado por todos os valores da ordenada da curva de referência.

Aplicação do Limite

Como apresentado anteriormente, para que a instalação esteja dentro dos limites toleráveis, a curva de dose de "flicker" obtida deve permanecer à direita da curva de limiar de sensibilidade para o tempo de 15 minutos a partir do início da fusão.

Logo, através das curvas da Fig. A.C-1, verifica-se que, para 15 minutos, para a curva pré-determinada ($G = 2,14\%$ min), e para a curva de limiar de sensibilidade ($G = 1,35\%$ min), o que implica que para o dimensionamento de um compensador o fator a ser considerado como a redução necessária para a dose de cintilação acumulada é $0,631 = 1,35/2,14$.

APENDICE D

RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES DO CASO 1

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.1

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,053	61	0,002
2	0,057	62	0,002
3	0,058	63	0,002
4	0,054	64	0,001
5	0,061	65	0,001
6	0,048	66	0,0
7	0,032	67	0,0
8	0,014	68	0,0
9	0,014	69	0,0
10	0,016	70	0,0
11	0,029	71	0,0
12	0,028	72	0,0
13	0,021	73	0,0
14	0,017	74	0,0
15	0,007	75	0,0
16	0,022	76	0,016
17	0,034	77	0,011
18	0,012	78	0,033
19	0,018	79	0,042
20	0,015	80	0,022
21	0,005	81	0,021
22	0,020	82	0,013
23	0,013	83	0,20
24	0,005	84	0,010
25	0,007	85	0,014
26	0,001	86	0,012
27	0,002	87	0,006
28	0,001	88	0,001
29	0,001	89	0,002
30	0,001	90	0,0
31	0,001	91	0,002
32	0,002	92	0,001
33	0,002	93	0,004
34	0,0	94	0,0
35	0,0	95	0,0
36	0,0	96	0,0
37	0,001	97	0,001
38	0,001	98	0,001
39	0,0	99	0,0
40	0,0	100	0,0

41	0,001	101	0,0
42	0,0	102	0,0
43	0,0	103	0,0
44	0,0	104	0,0
45	0,0	105	0,0
46	0,006	106	0,0
47	0,030	107	0,0
48	0,046	108	0,0
49	0,009	109	0,002
50	0,006	110	0,001
51	0,007	111	0,0
52	0,013	112	0,0
53	0,012	113	0,0
54	0,006	114	0,0
55	0,010	115	0,0
56	0,005	116	0,0
57	0,003	117	0,0
58	0,001	118	0,0
59	0,009	119	0,0
60	0,012	120	0,0

DOSES DA MEDIÇÃO - SERIE NR.2

MINUTO	DOSE (%) min ²	MINUTO	DOSE (%) min ²
1	0,001	61	0,026
2	0,0	62	0,015
3	0,001	63	0,013
4	0,001	64	0,008
5	0,0	65	0,009
6	0,001	66	0,011
7	0,001	67	0,001
8	0,0	68	0,019
9	0,0	69	0,021
10	0,001	70	0,015
11	0,0	71	0,014
12	0,0	72	0,016
13	0,014	73	0,010
14	0,064	74	0,012
15	0,028	75	0,017
16	0,056	76	0,013
17	0,059	77	0,001
18	0,032	78	0,011
19	0,022	79	0,014
20	0,015	80	0,001
21	0,015	81	0,001
22	0,018	82	0,002
23	0,015	83	0,001
24	0,014	84	0,001
25	0,010	85	0,015
26	0,027	86	0,015
27	0,011	87	0,043
28	0,012	88	0,033
29	0,017	89	0,013
30	0,038	90	0,018
31	0,069	91	0,021
32	0,074	92	0,017
33	0,107	93	0,012
34	0,046	94	0,007
35	0,055	95	0,005
36	0,054	96	0,006
37	0,053	97	0,006
38	0,020	98	0,004
39	0,008	99	0,004
40	0,009	100	0,005

41	0,011	101	0,010
42	0,010	102	0,012
43	0,010	103	0,013
44	0,015	104	0,009
45	0,011	105	0,011
46	0,001	106	0,001
47	0,002	107	0,001
48	0,002	108	0,001
49	0,002	109	0,005
50	0,001	110	0,002
51	0,001	111	0,001
52	0,001	112	0,001
53	0,001	113	0,0
54	0,013	114	0,002
55	0,002	115	0,002
56	0,002	116	0,002
57	0,009	117	0,002
58	0,015	118	0,003
59	0,056	119	0,003
60	0,061	120	0,002

DOSES DA MEDIÇÃO - SERIE NR.3

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,004	61	0,035
2	0,004	62	0,030
3	0,003	63	0,031
4	0,002	64	0,034
5	0,005	65	0,038
6	0,002	66	0,006
7	0,002	67	0,005
8	0,002	68	0,010
9	0,003	69	0,012
10	0,001	70	0,009
11	0,002	71	0,006
12	0,002	72	0,013
13	0,003	73	0,009
14	0,003	74	0,005
15	0,002	75	0,006
16	0,002	76	0,014
17	0,004	77	0,010
18	0,025	78	0,007
19	0,023	79	0,001
20	0,028	80	0,001
21	0,042	81	0,002
22	0,029	82	0,004
23	0,037	83	0,001
24	0,038	84	0,001
25	0,041	85	0,002
26	0,042	86	0,003
27	0,030	87	0,026
28	0,021	88	0,042
29	0,030	89	0,056
30	0,028	90	0,051
31	0,023	91	0,024
32	0,025	92	0,015
33	0,022	93	0,011
34	0,020	94	0,016
35	0,019	95	0,017
36	0,011	96	0,010
37	0,007	97	0,024
38	0,010	98	0,017
39	0,006	99	0,015
40	0,006	100	0,018

41	0,010	101	0,012
42	0,017	102	0,010
43	0,009	103	0,008
44	0,010	104	0,004
45	0,011	105	0,004
46	0,005	106	0,003
47	0,005	107	0,002
48	0,010	108	0,005
49	0,011	109	0,003
50	0,006	110	0,004
51	0,008	111	0,003
52	0,003	112	0,002
53	0,001	113	0,003
54	0,001	114	0,004
55	0,002	115	0,003
56	0,001	116	0,002
57	0,001	117	0,006
58	0,0	118	0,002
59	0,024	119	0,003
60	0,019	120	0,002

APÊNDICE E

RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES DO CASO 2

DOSES DAS MEDIÇÕES - SÉRIE NR.1

MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,023
2	0,028
3	0,027
4	0,381
5	0,104
6	0,026
7	0,024
8	0,022
9	0,021
10	0,021
11	0,022
12	0,021
13	0,022
14	0,022
15	0,021
16	0,022
17	0,021
18	0,022
19	0,043
20	0,076
21	0,121
22	0,216
23	0,313
24	0,297
25	0,198
26	0,260
27	0,258
28	0,210
29	0,147
30	0,089
31	0,149
32	0,165
33	0,179
34	0,175
35	0,170
36	0,116
37	0,174
38	0,186
39	0,161
40	0,129

41	0,125
42	0,093
43	0,070
44	0,071
45	0,098
46	0,217
47	0,175
48	0,144
49	0,193
50	0,244
51	0,134
52	0,104
53	0,091
54	0,103
55	0,127
56	0,119
57	0,110
58	0,111
59	0,109
60	0,103

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.2

MINUTO	DOSE (%) min ²
1	0,305
2	0,192
3	0,288
4	0,234
5	0,388
6	0,127
7	0,022
8	0,023
9	0,023
10	0,021
11	0,021
12	0,021
13	0,021
14	0,021
15	0,173
16	0,127
17	0,271
18	0,082
19	0,106
20	0,133
21	0,117
22	0,116
23	0,123
24	0,111
25	0,131
26	0,176
27	0,122
28	0,104
29	0,081
30	0,077
31	0,068
32	0,064
33	0,043
34	0,025
35	0,024
36	0,093
37	0,213
38	0,594

DOSES DA MEDIÇÃO - SERIE NR.3

MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,283
2	0,416
3	0,340
4	0,345
5	0,246
6	0,249
7	0,151
8	0,213
9	0,276
10	0,355
11	0,407
12	0,379
13	0,493
14	0,401
15	0,533
16	0,632
17	0,586
18	0,359
19	0,308
20	0,263
21	0,082
22	0,081
23	0,070
24	0,066
25	0,055
26	0,027
27	0,021
28	0,022
29	0,025
30	0,022

DOSES DA MEDICAÇÃO - SÉRIE NR.4

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,011	46	0,078
2	0,010	47	0,081
3	0,010	48	0,084
4	0,011	49	0,063
5	0,011	50	0,084
6	0,010	51	0,036
7	0,026	52	0,031
8	0,055	53	0,052
9	0,066	54	0,039
10	0,081	55	0,042
11	0,118	56	0,045
12	0,121	57	0,032
13	0,048	58	0,041
14	0,049	59	0,048
15	0,037	60	0,041
16	0,039	61	0,031
17	0,032	62	0,031
18	0,044	63	0,030
19	0,030	64	0,026
20	0,027	65	0,021
21	0,025	66	0,024
22	0,021	67	0,009
23	0,021	68	0,009
24	0,024	69	0,009
25	0,018	70	0,008
26	0,014	71	0,009
27	0,015	72	0,008
28	0,017	73	0,009
29	0,022	74	0,009
30	0,023	75	0,008
31	0,010	76	0,009
32	0,010	77	0,009
33	0,010	78	0,009
34	0,038	79	0,009
35	0,097	80	0,009
36	0,164	81	0,009
37	0,125	82	0,009
38	0,055	83	0,009
39	0,065	84	0,010
40	0,077	85	0,010
41	0,077	86	0,010
42	0,068	87	0,010
43	0,057	88	0,010
44	0,056	89	0,010
45	0,061	90	0,064

APENDICE F

RESULTADOS OBTIDOS NAS MEDIÇÕES DO CASO 3

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.1 (Ponto 1)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,190	31	0,078
2	0,148	32	0,056
3	0,186	33	0,040
4	0,300	34	0,040
5	0,278	35	0,024
6	0,214	36	0,022
7	0,099	37	0,028
8	0,220	38	0,031
9	0,156	39	0,037
10	0,232	40	0,038
11	0,200	41	0,035
12	0,178	42	0,041
13	0,236	43	0,030
14	0,149	44	0,035
15	0,100	45	0,027
16	0,159	46	0,024
17	0,082	47	0,022
18	0,039	48	0,024
19	0,231	49	0,015
20	0,114	50	0,018
21	0,060	51	0,018
22	0,074	52	0,015
23	0,057	53	0,001
24	0,049	54	0,001
25	0,043	55	0,010
26	0,056	56	0,030
27	0,063	57	0,053
28	0,113	58	0,046
29	0,141	59	0,050
30	0,117	60	0,055

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.2 (Ponto 1)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,038	31	0,018
2	0,050	32	0,016
3	0,048	33	0,012
4	0,044	34	0,013
5	0,066	35	0,010
6	0,056	36	0,010
7	0,051	37	0,011
8	0,037	38	0,010
9	0,032	39	0,010
10	0,037	40	0,010
11	0,042	41	0,010
12	0,031	42	0,010
13	0,026	43	0,010
14	0,017	44	0,013
15	0,017	45	0,031
16	0,017	46	0,027
17	0,027	47	0,014
18	0,027	48	0,027
19	0,031	49	0,039
20	0,028	50	0,034
21	0,037	51	0,038
22	0,033	52	0,031
23	0,032	53	0,025
24	0,030	54	0,021
25	0,020	55	0,020
26	0,022	56	0,021
27	0,026	57	0,021
28	0,030	58	0,027
29	0,012	59	0,022
30	0,015	60	0,020

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.3 (Ponto 1)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,104	31	0,071
2	0,041	32	0,076
3	0,003	33	0,067
4	0,004	34	0,114
5	0,003	35	0,075
6	0,004	36	0,087
7	0,005	37	0,172
8	0,005	38	0,143
9	0,005	39	0,118
10	0,012	40	0,113
11	0,069	41	0,147
12	0,082	42	0,094
13	0,079	43	0,076
14	0,028	44	0,077
15	0,022	45	0,092
16	0,037	46	0,042
17	0,161	47	0,040
18	0,219	48	0,026
19	0,318	49	0,057
20	0,302	50	0,076
21	0,157	51	0,067
22	0,102	52	0,051
23	0,096	53	0,050
24	0,090	54	0,034
25	0,095	55	0,023
26	0,125	56	0,018
27	0,118	57	0,024
28	0,060		0,031
29	0,068		0,016
30	0,030		0,024

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.1 (Ponto 2)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,040	31	0,023
2	0,040	32	0,021
3	0,031	33	0,024
4	0,038	34	0,012
5	0,046	35	0,048
6	0,046	36	0,006
7	0,042	37	0,039
8	0,059	38	0,034
9	0,074	39	0,052
10	0,048	40	0,052
11	0,048	41	0,035
12	0,052	42	0,014
13	0,038	43	0,024
14	0,035	44	0,017
15	0,033	45	0,015
16	0,020	46	0,020
17	0,050	47	0,045
18	0,014	48	0,066
19	0,065	49	0,063
20	0,024	50	0,028
21	0,046	51	0,026
22	0,040	52	0,017
23	0,033	53	0,015
24	0,042	54	0,011
25	0,034	55	0,015
26	0,042	56	0,016
27	0,036	57	0,019
28	0,028	58	0,016
29	0,023	59	0,010
30	0,022	60	0,016

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.2 (Ponto 2)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,020	31	0,010
2	0,018	32	0,010
3	0,015	33	0,011
4	0,012	34	0,009
5	0,010	35	0,009
6	0,014	36	0,008
7	0,011	37	0,008
8	0,008	38	0,005
9	0,006	39	0,008
10	0,006	40	0,013
11	0,009	41	0,008
12	0,010	42	0,009
13	0,009	43	0,007
14	0,016	44	0,009
15	0,016	45	0,007
16	0,015	46	0,005
17	0,019	47	0,005
18	0,011	48	0,008
19	0,011	49	0,004
20	0,007	50	0,004
21	0,009	51	0,005
22	0,014	52	0,004
23	0,015	53	0,006
24	0,011	54	0,003
25	0,013	55	0,004
26	0,009	56	0,004
27	0,009	57	0,005
28	0,009	58	0,004
29	0,008	59	0,003
30	0,009	60	0,011

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.3 (PONTO 2)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,006	26	0,009
2	0,006	27	0,010
3	0,025	28	0,017
4	0,051	29	0,037
5	0,079	30	0,044
6	0,087	31	0,046
7	0,061	32	0,058
8	0,062	33	0,057
9	0,072	34	0,058
10	0,070	35	0,056
11	0,067	36	0,059
12	0,046	37	0,047
13	0,025	38	0,053
14	0,030	39	0,029
15	0,021	40	0,026
16	0,029	41	0,030
17	0,024	42	0,028
18	0,037	43	0,028
19	0,021	44	0,009
20	0,012	45	0,009
21	0,013	46	0,004
22	0,016	47	0,042
23	0,016	48	0,034
24	0,015	49	0,024
25	0,009	50	0,030

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.1 (Ponto 3)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,026	31	0,020
2	0,030	32	0,022
3	0,033	33	0,022
4	0,032	34	0,017
5	0,039	35	0,017
6	0,031	36	0,028
7	0,035	37	0,009
8	0,025	38	0,009
9	0,044	39	0,020
10	0,043	40	0,015
11	0,034	41	0,006
12	0,030	42	0,034
13	0,027	43	0,051
14	0,030	44	0,057
15	0,040	45	0,019
16	0,031	46	0,012
17	0,027	47	0,008
18	0,028	48	0,027
19	0,020	49	0,025
20	0,021	50	0,052
21	0,018	51	0,040
22	0,018	52	0,044
23	0,019	53	0,034
24	0,010	54	0,028
25	0,006	55	0,027
26	0,016	56	0,025
27	0,021	57	0,018
28	0,023	58	0,021
29	0,024	59	0,023
30	0,026	60	0,027

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.2 (Ponto 3)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,025	31	0,008
2	0,026	32	0,010
3	0,031	33	0,008
4	0,031	34	0,008
5	0,031	35	0,010
6	0,035	36	0,009
7	0,028	37	0,006
8	0,020	38	0,006
9	0,013	39	0,008
10	0,020	40	0,007
11	0,014	41	0,007
12	0,017	42	0,005
13	0,026	43	0,010
14	0,022	44	0,008
15	0,016	45	0,012
16	0,017	46	0,007
17	0,022	47	0,014
18	0,013	48	0,011
19	0,010	49	0,013
20	0,010	50	0,013
21	0,011	51	0,013
22	0,016	52	0,014
23	0,018	53	0,019
24	0,020	54	0,017
25	0,020	55	0,018
26	0,018	56	0,012
27	0,009	57	0,010
28	0,009	58	0,011
29	0,009	59	0,010
30	0,010	60	0,008

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.2 (Ponto 4)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,011	31	0,024
2	0,009	32	0,019
3	0,006	33	0,017
4	0,010	34	0,021
5	0,011	35	0,022
6	0,010	36	0,018
7	0,005	37	0,015
8	0,004	38	0,020
9	0,003	39	0,026
10	0,003	40	0,020
11	0,006	41	0,027
12	0,003	42	0,025
13	0,003	43	0,020
14	0,006	44	0,020
15	0,003	45	0,017
16	0,003	46	0,017
17	0,003	47	0,015
18	0,008	48	0,016
19	0,031	49	0,020
20	0,054	50	0,017
21	0,069	51	0,014
22	0,046	52	0,012
23	0,025	53	0,013
24	0,026	54	0,026
25	0,020	55	0,012
26	0,038	56	0,010
27	0,031	57	0,010
28	0,026	58	0,007
29	0,036	59	0,007
30	0,027	60	0,008

DOSES DA MEDIÇÃO - SÉRIE NR.1 (Ponto 4)

MINUTO	DOSE (%) ² min	MINUTO	DOSE (%) ² min
1	0,014	61	0,003
2	0,015	62	0,003
3	0,015	63	0,009
4	0,014	64	0,003
5	0,011	65	0,003
6	0,012	66	0,003
7	0,012	67	0,003
8	0,005	68	0,002
9	0,010	69	0,002
10	0,009	70	0,002
11	0,008	71	0,002
12	0,006	72	0,002
13	0,006	73	0,002
14	0,005	74	0,002
15	0,006	75	0,002
16	0,033	76	0,009
17	0,013	77	0,002
18	0,009	78	0,002
19	0,007	79	0,004
20	0,007	80	0,009
21	0,007	81	0,015
22	0,011	82	0,012
23	0,008	83	0,015
24	0,008	84	0,020
25	0,004	85	0,018
26	0,004	86	0,058
27	0,022	87	0,039
28	0,005	88	0,034
29	0,003	89	0,010
30	0,003	90	0,017
31	0,003	91	0,086
32	0,004	92	0,062
33	0,007	93	0,053
34	0,007	94	0,058
35	0,005	95	0,050
36	0,007	96	0,066
37	0,008	97	0,048
38	0,007	98	0,040
39	0,020	99	0,044
40	0,010	100	0,062

41	0,002	101	0,023
42	0,003	102	0,023
43	0,004	103	0,027
44	0,006	104	0,031
45	0,005	105	0,026
46	0,004	106	0,019
47	0,008	107	0,017
48	0,004	108	0,016
49	0,003	109	0,013
50	0,004	110	0,020
51	0,003	111	0,020
52	0,003	112	0,031
53	0,003	113	0,020
54	0,003	114	0,015
55	0,003	115	0,009
56	0,003	116	0,013
57	0,003	117	0,028
58	0,003	118	0,031
59	0,004	119	0,115
60	0,004	120	0,010

APENDICE G

FOTOS DO PROTÓTIPO IMPLEMENTADO

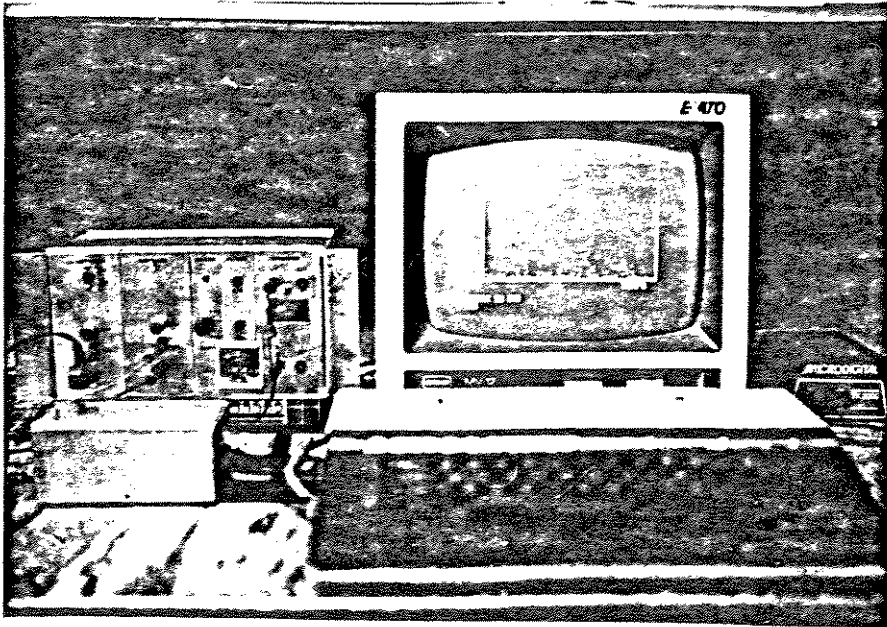


Foto nr. 1 - Sistema Implementado

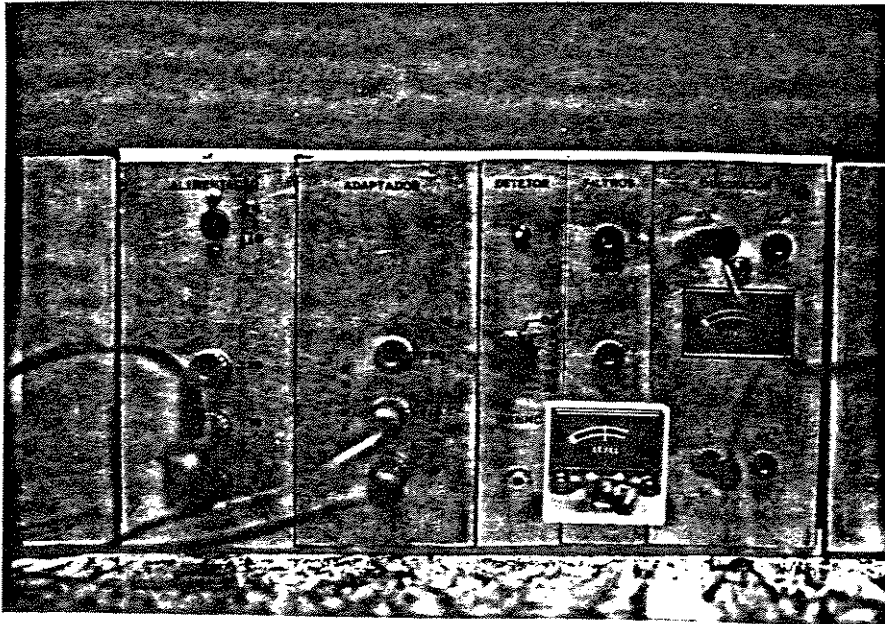


Foto nr. 2 - Módulos de Tratamento Analógico do Sinal

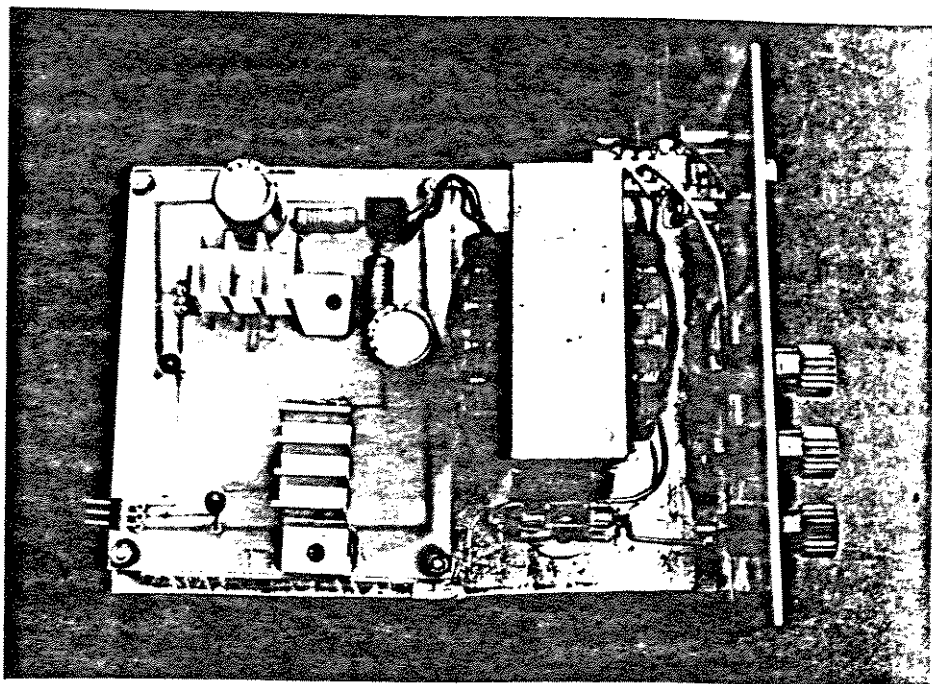


Foto nr. 3 - Placa-Circuito de Alimentação

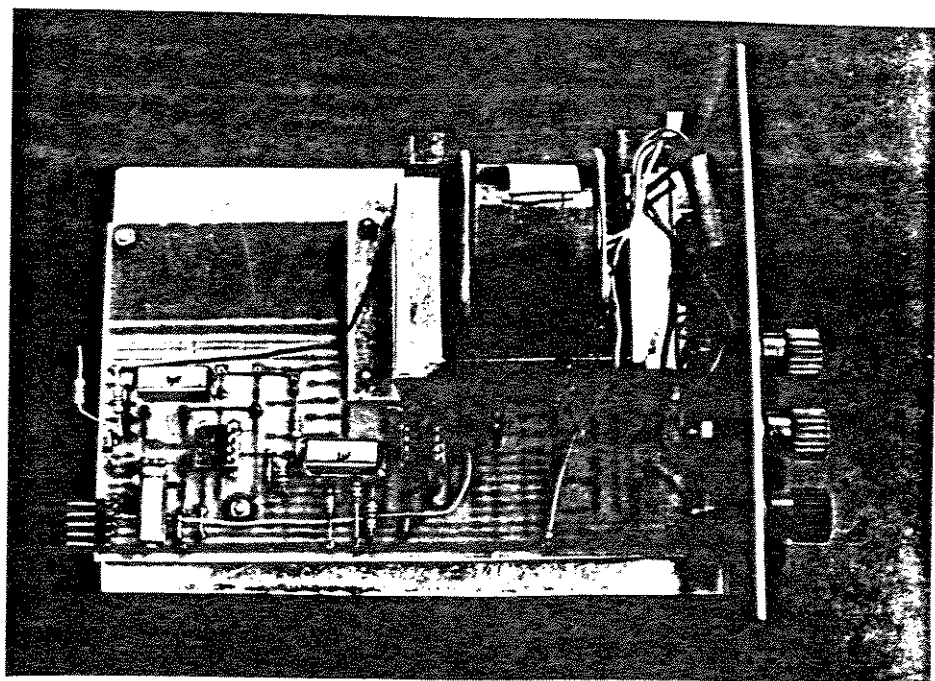


Foto nr. 4 - Placa-Adaptador do Sinal

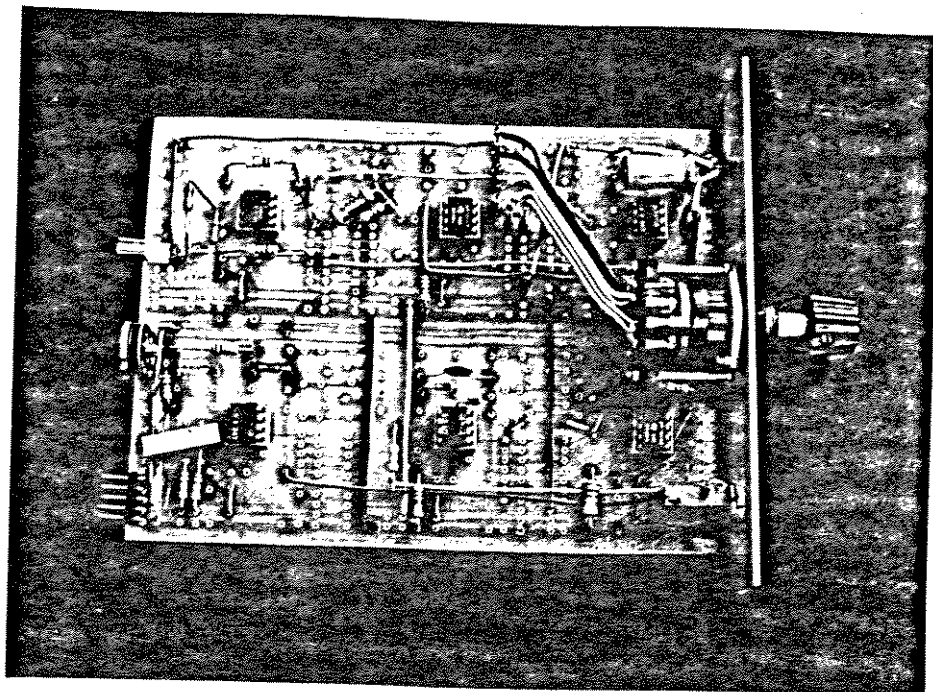


Foto nr. 5 - Placa-Detector de Envoltória e Seletor de Ganho

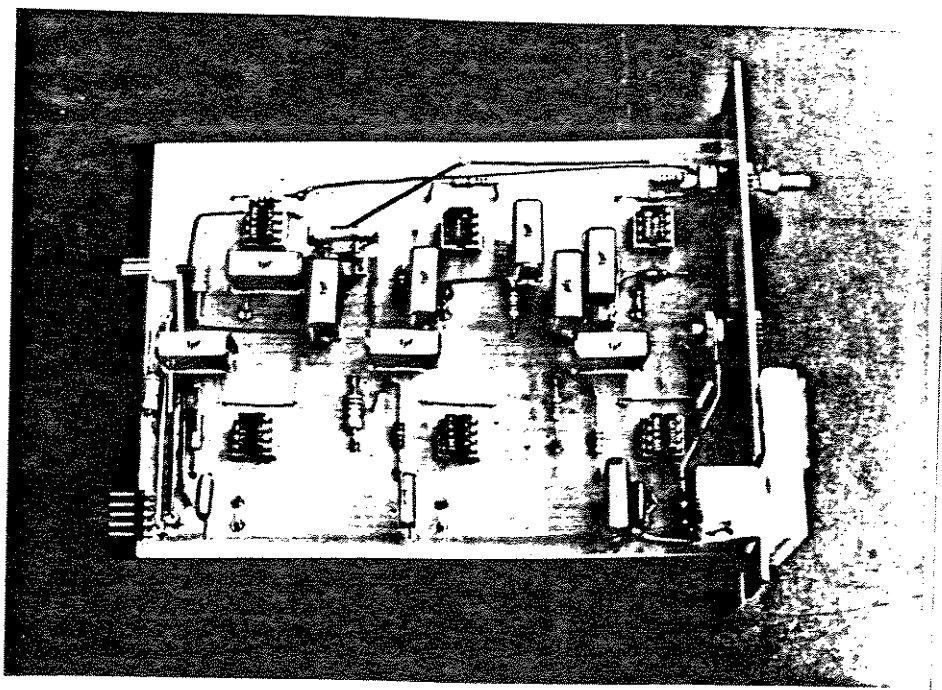


Foto nr. 6 - Placa-Filtros

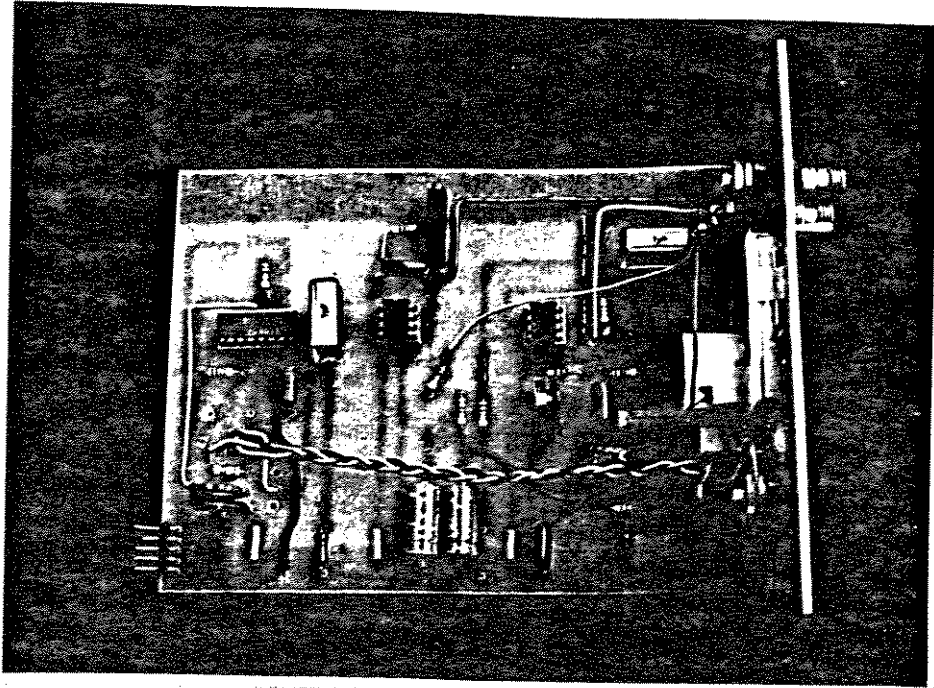


Foto nr. 7 - Placa-Circuito Quadrador

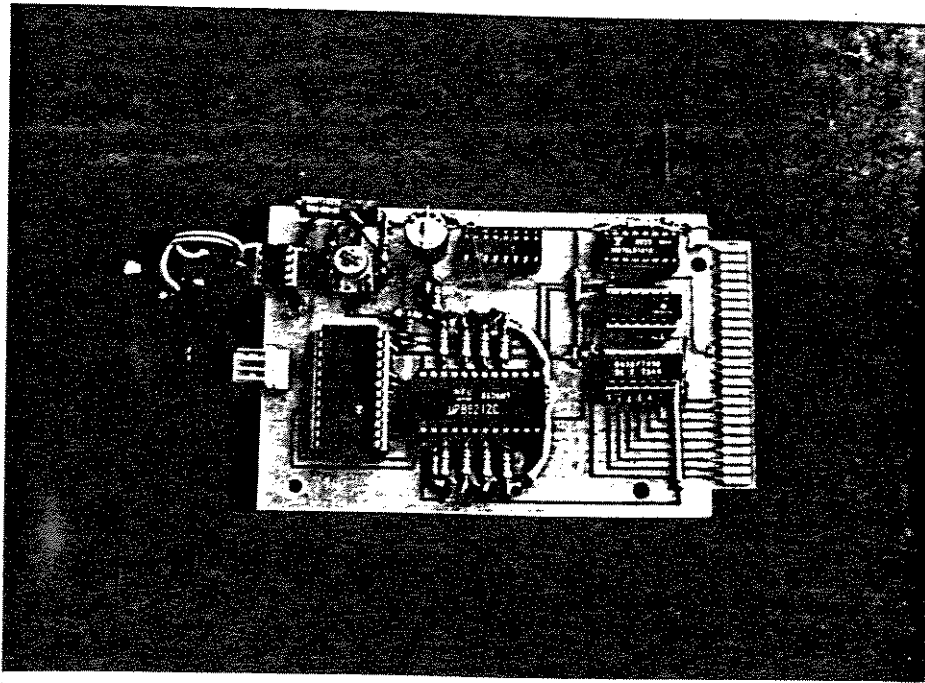


Foto nr. 8 - Placa-Convertor Analógico-Digital

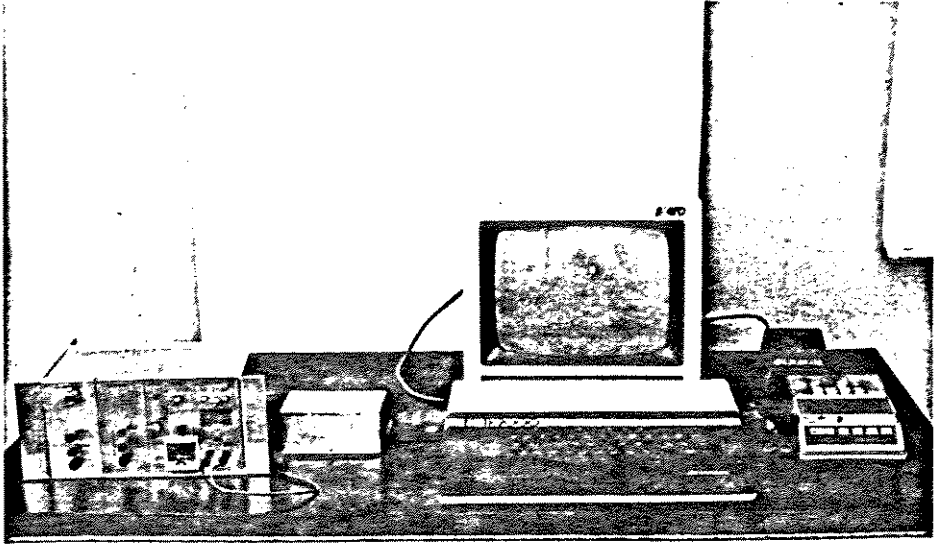


Foto nr. 9 - Microcomputador Utilizado

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Dixon, G.F.L. & Kendal, P.G., "Supply to Arc Furnaces Measurement and Prediction of Supply Voltage Fluctuation". London, England. Proc.IEEE, vol.119, n- 4. April, 1979.
- [2] - Decharte, G., "Elements pour la Pré-détermination des Conditions de Recordement des Fours a Arcs sur les Réseaux". Paris, France.
- [3] - Meynaud, P., "Flicker and the Network Connections Requirements of Devices Producing Rapid Voltage Variations". Paris, France. Décembre, 1971.
- [4] - Meynaud, P. & Lemoine, M., "Réseaux de Distribution, Flicker et Harmoniques". Paris, France. Réseaux de Distribution.
- [5] - British Electricity Board, "Report on Supply to Arc Furnaces". A. C. E. Report n- 26. July, 1970.
- [6] - Sundberg, Y., "The Arc Furnace as a Load on the Network". ASEA Journal, vol. 49, n- 4, pp. 75-87, 1976.
- [7] - Electricity Council, "Supply to Arc Furnaces". Engineering Recommendation, pp.7/2. London, 1970.
- [8] - Miller, T. J. E., "Reactive Power Control in Electric Systems". J. Willey & Sons. New York, 1982.
- [9] - UIE Disturbance Study Committee, "Arc Furnace Disturbances-State of Art", 1980.
- [10] - UIE Disturbance Study Committee, "UIE Flickermeter-Functional and Design Specifications", 1982.
- [11] - Benavides, J. E., "Redução de Flutuações de Tensão por Compensação Reativa usando Reator Controlado por Tiristores". Tese de Mestrado, FEC/DEE, UNICAMP. Fevereiro, 1986.
- [12] - UIE Disturbance Study Committee, "Flicker Measurements and Evaluation", 1986.
- [13] - UIE Disturbance Study Committee, "UIE Flickermeter-Functional and Design Specifications", 1983.
- [14] - Johnson, D. E. & Hilburn, J. L., "Rapid Practical Design of Active Filters". John Willey & Sons. New York, 1975.

- [15] - Rutkowski, G. B., "Handbook of Integrated Circuit Operational Amplifiers". Prentice-Hall Inc. New Jersey, 1975.
- [16] - Bergeal, J., "Étude Critique des Methodes de Mesures du Phénomene de Flicker". Paris, France. Février, 1978.
- [17] - Costa, D. F. & Moraes, A. V., "Medição e Correção do Flicker". Seminário de Eletrotermia, São Paulo. Outubro, 1982.
- [18] - Hosono, I., Yano, M., Takeda, M., Yuya, S. & Sueda, S., "Suppression and Measurement of Arc Furnace Flicker with a Large Static VAR Compensator". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, n- 6. November/December, 1979.
- [19] - Engberg, K., Frank, H. & Torseng, S., "Reatores e Capacitores Controlados por Tiristores para Otimização da Compensação Reativa em Sistemas de Potência". Seminário Eletrobrás sobre Sistemas de Compensação Reativa Estática, Rio de Janeiro. Maio, 1979.
- [20] - Markovits, C. H. M., Maeyama, Y. & Stella, M. S., "Influência na Flutuação de Tensão do Sistema de Transmissão em Função do seu Ciclo de Trabalho". V Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Recife, 1979.
- [21] - Meynaud, P., "Methode d'Etude des Perturbations Provoquées par des Fours a Arcs Utilisés en France". Paris, France. Décembre, 1974.
- [22] - Schwabe, W. E. & Kasper, R., "Flicker Caused by UHP Arc Furnaces Using Scrap and Directly Reduced Materials". II Simpósio ABM/CNBE/IBS, São Paulo. Setembro, 1976.
- [23] - Ashmole, P. H. & Jervis, W. B., "Results of Digital Flickermeter Measurements at Point Lisas". Trinidad. October, 1982.
- [24] - Ashmole, P. H., Jervis, W. B. & Kendall, P. G., "A Method of Evaluating Limits of Voltage Fluctuation in Terms of Flicker Severity". London, England. April, 1983.
- [25] - Ashmole, P. H. & Jervis, W. B., "A Statistical Evaluation of Digital Flickermeter Measurements Made at Kemsley Substation". London, England. July, 1981.
- [26] - Kendall, P. G., Boyce, P. R. & Morrel, J. E., "Assessment of Complex Voltage Disturbances from Industrial and Other Sources". CIRED. May, 1985.

- [27] - ASEA/Reactive Power Compensation Department, "The Arc Furnace as a Load on the Network". Vasteras, Sweden. May, 1981.
- [28] - GCOI, "Critérios e Metodologias para Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais". Julho, 1984.
- [29] - Lacroux, C. & Dubreuil, M. M. A., "Les Ancizes: The First Static VAR Compensator on the French Network", France. Janvier, 1984.
- [30] - Granstrom, S., "Computer Studies of Voltage Fluctuation Caused by Arc Furnaces", Cannes. Octobre, 1980.
- [31] - Bonnard, G. & Decharte, G., "Conditions de Raccordement d'Equipements Générateurs de Fluctuations Rapides de Tension". Paris, France. Avril, 1982.
- [32] - Rocco, A. & Almeida, R. M., "Medições de Flicker como Subsídio para Estabelecimento de Critérios de Atendimento a Consumidores Industriais". CIER, São Paulo. Julho, 1986.
- [33] - Couvreur, M., Heuskin, J., Mean, E. & Nicaise, P., "Methode d'Approche des Problèmes Electrotechniques de Raccordement des Fours a Arc". Bruxelas, Bélgica. Novembre, 1973.
- [34] - Duveau, P., "Flickermètre Numérique". Paris, France. Avril, 1971.
- [35] - Di Stasi, L., "Fornos Elétricos", Hemus Livraria & Editora Ltda, 1981.
- [36] - Motorola Semiconductor Data Library, Linear Integrated Circuits, vol. 6/série B, 1976.
- [37] - Deckmann, S. M., "Compensação de Cargas Especiais". Relatório Científico sobre Projeto com Apoio da FAPESP. Abril, 1986.
- [38] - Deckmann, S. M. & Rocco, A., "Medição do Efeito "Flicker" pelo Método UIE". Anais do 6- Congresso Brasileiro de Automática (SBA), Belo Horizonte. Novembro, 1986. Pp. 865-869.
- [39] - Deckmann, S. M. & Rocco, A., "Medições Realizadas nas Subestações de Juiz de Fora I e Mendes Júnior (CEMIG)". Relatório de Medição. Outubro, 1986.
- [40] - Deckmann, S. M. & Rocco, A., "Medições Realizadas na SE Pitança da ESCELSA Vitória, ES". Relatório de Medição. Março, 1987