

CDTN

PUBLICAÇÃO CDTN-796/95

**SIMPAR: SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE TESTES
DE TUBOS POR CORRENTES PARASITAS**

Donizete Anderson de Alencar

1995

**CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
CNEN**

Cidade Universitária Pampulha - Belo Horizonte - MG - Brasil

Comissão Nacional de Energia Nuclear
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR

PUBLICAÇÃO CDTN-796/95

SIMPAR: Sistema de Simulação de Testes de Tubos por Correntes Parasitas

Donizete Anderson de Alencar

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em
Tecnologia do Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre em Tecnologia.
Área de concentração: Educação Tecnológica
Orientador: Prof. Dr. Newton Ribeiro dos Santos
Co-orientador: Prof. Adolpho Soares - CNEN-CDTN

Belo Horizonte
1995



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - DPPG

SIMPAR: SISTEMA DE SIMULAÇÃO DE TESTES DE TUBOS POR
CORRENTES PARASITAS

Dissertação apresentada por **DONIZETE ANDERSON DE ALENCAR** ao Curso de Mestrado em Tecnologia, em 09 de maio de 1995, e aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Newton Ribeiro dos Santos - Orientador

Prof. M.Sc. Adolpho Soares - CNEN/CDTN

Prof. Dr. Heitor Garcia de Carvalho - DPPG/CEFET-MG

Prof. Dr. Magno Meirelles Ribeiro - DPPG/CEFET-MG

Visto e permitida a impressão
Belo Horizonte, 05/06/95

Prof. Dr. Newton Ribeiro dos Santos
Coordenador do Curso de Mestrado em Tecnologia

**Este trabalho foi realizado com incentivo do Centro
de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN
da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN**

A meus filhos, Thaís e Rafael.
À minha esposa, Terezinha.
A meus pais, Odon e Nancy.

Agradeço sinceramente:

Antes e acima de tudo a Deus. Pela vida que me concedeu, através do amor de meus queridos pais, Odon e Nancy; e pelos caracteres a mim emprestados, que permitiram a realização deste trabalho.

Ao Professor orientador, Dr. Newton Ribeiro dos Santos, pela especial atenção dedicada durante todo o período de convívio e trabalho.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, na pessoa de seu Superintendente Dr. Fernando Soares Lameiras, pela oportunidade e incentivos oferecidos.

Ao Professor Adolpho Soares, por todos os ensinamentos, pela confiança em mim depositada e principalmente pela sua franca amizade.

Ao Professor Dr. Heitor Garcia de Carvalho, pelas sua atenção em revisar os tópicos desenvolvidos, relacionados com tecnologia educacional, assim como pelas suas valiosas sugestões.

Ao Prof. Ezequiel Costa Júnior, pela constante troca de idéias relacionadas com o desenvolvimento de programas de simulação, além dos esclarecimentos relativos aos processos de modelamento de campos eletromagnéticos por elementos finitos.

Ao Prof. Antônio Carlos Torres Teixeira, pela cessão de bibliografia e pelo seu admirável espírito de solidariedade.

Aos meus amigos do CDTN, Silvério Ferreira da Silva Júnior, José Marcos Messias, Antonio Eugênio de Aguiar, Antonio Pereira Santiago e Eduardo Antonio de Carvalho, que contribuíram com extremo profissionalismo para a realização da parte experimental deste trabalho.

Aos meus companheiros de curso, com quem muito aprendí, não apenas na convivência de classe, mas sobretudo nas experiências pessoais, vividas no dia a dia.

A minha querida esposa Terezinha, pela paciência com que realizou a árdua tarefa de revisão e correção do texto desta dissertação, e principalmente pelas suas constantes palavras de carinho e incentivo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG pela concessão de recursos e facilidades para a participação em congressos e seminários técnicos.

A todos aqueles, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço sinceramente:

Antes e acima de tudo a Deus. Pela vida que me concedeu, através do amor de meus queridos pais, Odon e Nancy; e pelos caracteres a mim emprestados, que permitiram a realização deste trabalho.

Ao Professor orientador, Dr. Newton Ribeiro dos Santos, pela especial atenção dedicada durante todo o período de convívio e trabalho.

Ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear - CDTN da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, na pessoa de seu Superintendente Dr. Fernando Soares Lameiras, pela oportunidade e incentivos oferecidos.

Ao Professor Adolpho Soares, por todos os ensinamentos, pela confiança em mim depositada e principalmente pela sua franca amizade.

Ao Professor Dr. Heitor Garcia de Carvalho, pelas sua atenção em revisar os tópicos desenvolvidos, relacionados com tecnologia educacional, assim como pelas suas valiosas sugestões.

Ao Prof. Ezequiel Costa Júnior, pela constante troca de idéias relacionadas com o desenvolvimento de programas de simulação, além dos esclarecimentos relativos aos processos de modelamento de campos eletromagnéticos por elementos finitos.

Ao Prof. Antônio Carlos Torres Teixeira, pela cessão de bibliografia e pelo seu admirável espírito de solidariedade.

Aos meus amigos do CDTN, Silvério Ferreira da Silva Júnior, José Marcos Messias, Antonio Eugênio de Aguiar, Antonio Pereira Santiago e Eduardo Antonio de Carvalho, que contribuíram com extremo profissionalismo para a realização da parte experimental deste trabalho.

Aos meus companheiros de curso, com quem muito aprendí, não apenas na convivência de classe, mas sobretudo nas experiências pessoais, vividas no dia a dia.

A minha querida esposa Terezinha, pela paciência com que realizou a árdua tarefa de revisão e correção do texto desta dissertação, e principalmente pelas suas constantes palavras de carinho e incentivo.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais - FAPEMIG pela concessão de recursos e facilidades para a participação em congressos e seminários técnicos.

A todos aqueles, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*"Algum dia, quando tivermos dominado os ventos,
as ondas, as marés e a gravidade ... utilizaremos
as energias do amor. Então, pela segunda vez
na história do mundo, o homem descobrirá o fogo."*

Teilhard de Chardin

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação	19
1.2	Definição do sistema SIMPAR	19
1.3	Organização do trabalho	20
2	O ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS E SIMULAÇÃO COMO RECURSO DIDÁTICO	22
2.1	Fundamentos do método de ensaio por correntes parasitas	22
2.1.1	Conceitos básicos de eletromagnetismo	22
2.1.2	Geração das correntes parasitas	27
2.1.3	Aspectos operacionais do ensaio	37
2.1.3.1	Principais tipos de sondas utilizadas	38
2.1.3.2	Campos de aplicação e objetivos do ensaio	42
2.1.3.3	Processos de medição e apresentação de resultados	42
2.1.3.4	Padrões de referência para calibração	44
2.1.3.5	A inspeção de tubos	46
2.2	Simulação como recurso didático	51
2.2.1	Conceitos gerais	51
2.2.2	O valor da prática para o ensino tecnológico	52
2.2.3	Experimentação: virtual ou real ?	53
2.2.4	Construindo modelos de simulação	55
3	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO	58
3.1	Introdução	58
3.2	Delimitação do campo de abrangência	59

3.3	Coleta experimental de dados	61
3.3.1	Tubos-padrão	62
3.3.2	Sondas de ensaio	63
3.3.3	Instrumentação utilizada	64
3.3.4	Medições efetuadas	65
3.4	A implementação do processo de simulação	72
3.4.1	Considerações gerais	72
3.4.2	Descrição do algoritmo fundamental de simulação	73
3.4.3	Introdução de variações de fase e ganho no algoritmo de simulação	77
4	DESCRIBÇÃO DO SISTEMA SIMPAR	79
4.1	O ambiente virtual de trabalho	80
4.1.1	Recursos materiais	81
4.1.2	O estoque de corpos de prova	85
4.2	A dinâmica operacional do sistema	86
4.3	Recursos complementares	88
5	RESULTADOS OBTIDOS	91
5.1	Explorando o sistema SIMPAR	91
5.1.1	Alterando a sensibilidade vertical e horizontal	91
5.1.2	Alterando o ganho do sistema	93
5.1.3	Efeitos de rotação de fase	93
5.1.4	Alterando a frequência de ensaio	94
5.1.5	Gerando sinais de vibração da sonda de ensaio	97
5.1.6	Comportamento do sistema	97
5.2	Realização de calibração segundo o código ASME	98
5.3	Validação do sistema	101
5.3.1	Validação operacional	101
5.3.2	Validação pedagógica	103

6	CONCLUSÕES	109
6.1	Pespectivas e desenvolvimentos futuros	109
6.2	Comentários finais	110
7	ANEXOS	111
A1	O Código ASME - SEÇÃO V - Artigo 8 : O exame de produtos tubulares por correntes parasitas	111
A2	Especificações técnicas da instrumentação, sondas e padrões de referência	119
A3	SADCO 2: Sistema computadorizado de aquisição, registro e análise de dados para o ensaio por correntes parasitas	126
A4	Valores obtidos no processo de coleta experimental de dados	132
A5	Especificações de equipamentos, programas e sistemas de computação	136
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139
	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	143

LISTA DE FIGURAS

1 - Condutor cilíndrico de resistividade ρ , comprimento l e área de seção transversal A	23
2 - Campo magnético formado em uma bobina	25
3 - Geração de correntes parasitas num material	28
4 - O plano complexo	31
5 - Rotação do vetor Z no plano complexo	31
6 - O plano complexo de impedância	33
7 - Distribuição das correntes parasitas no material	34
8 - Distribuição de densidade de correntes parasitas	36
9 - Rotação de fase em função da profundidade	36
10 - Representação do sinal de medição no plano complexo	37
11 - Principais sondas utilizadas no ensaio por correntes parasitas. (a) superficiais, (b) internas, (c) externas (envolventes)	38
12 - A técnica absoluta de ensaio.....	39
13 - Circuitos utilizados na conexão de sondas absolutas. (a) paramétrico, (b) em ponte ..	40
14 - A técnica diferencial de ensaio.....	41
15 - Circuitos utilizados na conexão de sondas diferenciais. (a) paramétrico, (b) em ponte.....	41
16 - Figura gerada por descontinuidade detectada por sonda diferencial, durante a inspeção de um tubo	43
17 - Esquematisação de tubo-padrão de referência, construído conforme o código ASME (1992)	45
18 - Diagrama de blocos de um sistema de testes para o ensaio por correntes parasitas	46
19 - Formação de figuras conforme o código ASME (1992)	48
20 - Figuras de Lissajous para um tubo-padrão de referência ASME (1992)	49
21 - Curva de avaliação correspondente aos sinais apresentados na FIG. 20....	49
22 - Como funciona a poda num sistema especialista	57
23 - Fotografia dos tubos-padrão usinados	62
24 - Sondas de teste utilizadas para o ensaio de tubos-padrão.....	63

25 -	A coleta experimental de dados	65
26 -	Diagrama vetorial representativo das inclinações da TAB. 4	66
27 -	Diagrama vetorial após a rotação de fase efetuada para a calibração.....	67
28 -	Curva de avaliação por fase obtida para tubo de titânio ensaiado na frequência de 310 KHz	68
29 -	Curvas correspondentes às inclinações primitivas obtidas para o tubo-padrão de titânio ensaiado em diversas frequências de teste	69
30 -	Curva interpolada para o tubo T1 em 310 KHz	71
31 -	Figura de Lissajous de referência	75
32 -	Painel frontal do equipamento de teste do sistema SIMPAR.....	81
33 -	O impulsor de sondas do sistema SIMPAR	83
34 -	Um tubo a ser examinado com a sonda de teste posicionada em seu interior	83
35 -	Tela do simulador do sistema SIMPAR	84
36 -	Tela de acesso ao estoque de corpos de prova do sistema SIMPAR	85
37 -	Fluxograma simplificado para o sistema SIMPAR em operação	87
38 -	Emissão de mensagem de advertência	88
39 -	Traço decorrente de balanceamento	89
40 -	Traço decorrente da saída da sonda do interior do tubo ensaiado	89
41 -	Figuras resultantes de inspeção simulada de tubo de aço inoxidável 304	92
42 -	Efeito de aumento na sensibilidade do equipamento de teste	92
43 -	Efeito de redução no ganho do equipamento de teste	93
44 -	Efeito de aumento no valor da fase do equipamento de teste para 60 graus	94
45 -	Influência da redução da frequência de teste em sinais detectados	95
46 -	Influência do aumento da frequência de teste em sinais detectados.....	95
47 -	Influência do aumento da frequência de teste para 700 KHz	96
48 -	Influência da redução da frequência de teste para 60 KHz	96
49 -	Sinal resultante do movimento de vibração da sonda de testes no interior de um tubo	97
50 -	Sinal correspondente à descontinuidade de 20% de perda de espessura	98
51 -	Alterações de fase e amplitude no sinal da descontinuidade de 20 % resultantes de modificações das condições de ensaio	99
52 -	Sinal correspondente à descontinuidade com 100% de perda de espessura.....	100

53 -	Sinais correspondentes às descontinuidades do tubo-padrão de latão, e sinal de vibração da sonda de testes	100
54 -	Curva de avaliação levantada para o tubo-padrão de latão (ASME, 1992)	101
55 -	Figura correspondente à descontinuidade de 84% de perda de espessura	102
56 -	Figura correspondente à descontinuidade de 29% de perda de espessura	102
57 -	Qualidade de programas: Objetivos, fatores e subfatores	104
58 -	Estrutura da ficha de avaliação	107
59 -	Resultados obtidos no processo de avaliação	108
60 -	Esquematização do sistema de testes e aquisição de dados	129
61 -	Aspecto da tela do sistema SADCO 2	129
62 -	Medição de inclinação em sinal adquirido	130
63 -	Medição de amplitude em sinal adquirido	131
64 -	Curvas correspondentes às inclinações primitivas obtidas para o tubo-padrão de aço inoxidável em diversas frequências	133
65 -	Curvas correspondentes às inclinações primitivas obtidas para o tubo-padrão de latão em diversas frequências	134

LISTA DE TABELAS

1-	Valores de resistividade e condutividade elétrica de alguns materiais	24
2-	Características dos tubos utilizados na confecção de padrões	62
3-	Frequências ótimas calculadas para os tubos-padrão usinados	64
4-	Inclinações primitivas medidas para as descontinuidades do tubo-padrão de titânio em 310 KHz	66
5-	Inclinações primitivas relativas às descontinuidades do tubo-padrão T1 (titânio) em diversas frequências de ensaio	68
6-	Valores reais e interpolados para o tubo-padrão T1 (titânio) em 310 KHz	71
7-	Amplitudes relativas às descontinuidades do tubo-padrão de titânio em diversas frequências de ensaio	72
8-	Inclinações primitivas relativas às descontinuidades do tubo-padrão de aço inoxidável em diversas frequências de ensaio	132
9-	Inclinações primitivas relativas às descontinuidades do tubo-padrão de latão em diversas frequências de ensaio	133
10-	Amplitudes relativas às descontinuidades do tubo-padrão de aço inoxidável em diversas frequências de ensaio	134
11-	Amplitudes relativas às descontinuidades do tubo-padrão de latão em diversas frequências de ensaio	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	- <i>Analog/Digital</i> (Analógico/Digital)
ABENDE	- Associação Brasileira de Ensaaios não Destrutivos
ASME	- American Society of Mechanics Engineers
ASNT	- American Society of Non-Destructive Testing
AT	- Advanced Technology (<i>Tecnologia Avançada</i>)
BIT	- <i>Binary digit</i> (Dígito Binário)
CAI	- <i>Computer Assisted Instruction</i> (Instrução assistida por computador)
CDTN	- Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
CEFET - MG	- Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
CNEN	- Comissão Nacional de Energia Nuclear
DPPG	- Departamento de Pesquisa e Pós-graduação (CEFET-MG)
COM 1	- Communication Port # 1 (Porta de Comunicação #1)
DOS	- <i>Disk Operating System</i> (Sistema Operacional de Disco)
ECT	- Eddy Current Technology
END	- Ensaaios não Destrutivos
FAPEMIG	- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais
GAB	- Gabarito
IACS	- <i>International Annealed Copper Standard</i> (Padrão Internacional de Cobre Recozido)
IBM	- <i>International Business Machines</i>
LSB	- <i>Least Significant Bit</i> (Dígito binário menos significativo)
PC	- <i>Personal Computer</i> (Computador Pessoal)
RAM	- <i>Random Access Memory</i> (Memória de Acesso Aleatório)
SADCO 2.0	- Sistema Computadorizado de Aquisição, Registro e Análise de dados para o Ensaio por Correntes Parasitas. Versão 2.0
SAE/PR	- Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República
SI	- <i>International system of units</i> (Sistema Internacional de unidades)
SIMPAR	- Sistema de Simulação de Testes de Tubos por Correntes Parasitas
VGA	- <i>Video Graphics Adapter</i> (Adaptador Gráfico de Vídeo)

LISTA DE NOTAÇÕES

A	- Ampère (cap. 2)
A	- Área de seção transversal
A	- Amplitude (cap. 3)
α	- Ângulo de fase
A_p	- Amplitude de sinal (após processamento)
A_t	- Amplitude de transiente
A_x	- Amplitude de sinal (descontinuidade de x %)
\vec{B}	- Densidade de fluxo ou Indução magnética
\vec{B}_0	- Indução magnética no vácuo
d	- Profundidade padrão de penetração
dB	- Decibel
F_g	- Frequência de teste
f	- Frequência
Φ	- Fluxo magnético
Φ_p	- Fluxo magnético primário
Φ_s	- Fluxo magnético secundário
G	- Ganho total
G_s	- Ganho selecionado
\vec{H}	- Força magnetizadora
H	- Henry (unidade de indutância)
Hz	- Hertz (unidade de ciclos)
I	- Corrente elétrica
I_0	- Corrente máxima
i_0	- Densidade de corrente superficial (cap. 2)
I_x	- Inclinação primitiva (descontinuidade de x %)
i_x	- Densidade de corrente na distância x
j	- Unidade imaginária
j_y	- Parte imaginária de um número complexo Z
L	- Indutância
l	- Comprimento
m	- Metro
μ	- Permeabilidade magnética total

μ_0	- Constante de permeabilidade magnética no vácuo
μ_{rel}	- Permeabilidade magnética relativa
M	- Matriz da figura de referência
MT	- Matriz de transferência
M_x	- Matriz da figura de x %
n	- Número de espiras (em bobinas)
ρ	- Resistividade elétrica
R	- Resistência elétrica (em ohms)
R_a	- Rotação adicionada
R_x	- Matriz de rotação (inclinação da descontinuidade de x %)
S	- Siemens
s	- Segundo (unidade de tempo)
σ	- Condutividade elétrica
t	- Tempo (s)
U	- Tensão elétrica ou diferença de potencial
U_m	- Tensão de medição
U_{ind}	- Tensão induzida
U_0	- Tensão máxima
V	- Volt
∇^2	- Operador de Laplace (segunda derivação de posição)
V_x	- Componente de tensão (horizontal)
$V_{x'}$	- Componente de tensão horizontal (após rotação de eixos)
V_y	- Componente de tensão vertical
$V_{y'}$	- Componente de tensão vertical (após rotação de eixos)
Ω	- Ohms (resistência elétrica)
ω	- Velocidade angular
ωL	- Reatância indutiva
x	- Parte real de um número complexo Z
x	- Distância
Z	- Impedância complexa

RESUMO

Desenvolveu-se um sistema de simulação, denominado SIMPAR, capaz de permitir a realização de atividades práticas relacionadas com a inspeção de tubos através do ensaio não destrutivo por correntes parasitas, em microcomputadores tipo IBM-PC 386. Para este desenvolvimento, adotou-se metodologia heurística baseada em amostragem. Sondas e padrões de referência foram confeccionados e ensaiados em laboratório, registrando-se criteriosamente os sinais e informações detectados pelos equipamentos de teste utilizados. Basicamente, o programa processa numericamente estas informações, produzindo durante uma simulação, sinais de resposta de acordo com condições de contorno impostas pelo operador. Ao desenvolver-se o ambiente do simulador, procurou-se manter as formas dos objetos, o aspecto dos equipamentos de teste e a ergonomia pertinente às atividades práticas, semelhantes aqueles encontrados nos sistemas de inspeção reais. O sistema operou satisfatoriamente, tendo sido submetido à apreciação de especialistas em END, que verificaram seu desempenho e eficiência, validando-o tecnicamente. Sendo o sistema um recurso didático aplicável ao ensino tecnológico, procedeu-se ainda a um processo de validação pedagógica, onde diversos aspectos foram avaliados.

ABSTRACT

A simulation system, called SIMPAR, was developed. It enables to perform practical activities in tube inspections using eddy current non-destructive testing, on personal computers like IBM-PC 386 and clones. An heuristic methodology based on experimentation was adopted to achieve this objective. Probes and reference standard-tubes were specially constructed and examined at laboratory. All relevant data and informations, detected by the testing equipments, were criteriously registered. Basically, the software processes numerically these data, producing during the simulation, output signals according to boundary conditions imposed by the system operator. The visual shape of the virtual equipments and accessories, and the ergonomic aspects of real testing, were kept as actual as possible in the simulator environment. The system was submitted to the appreciation of nondestructive testing experts, for verification of its performance and efficiency. As the system may be used as an educational tool, a pedagogic validation was done. The SIMPAR system has operated satisfactorily.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O ensaio eletromagnético por correntes parasitas, fundamentado na análise de comportamento de correntes elétricas induzidas em materiais condutores, é uma valiosa ferramenta, utilizada no controle da qualidade de materiais e componentes empregados principalmente nas indústrias aero-espacial e nuclear.

Para sua efetiva utilização, este ensaio não destrutivo (END) exige o estudo de conteúdos teóricos, bem como a realização de atividades práticas por parte dos técnicos que o empregam. Ainda que os aspectos teóricos sejam abordados nos cursos ministrados pelas instituições competentes, verifica-se que as atividades práticas geralmente não correspondem às expectativas desejáveis.

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho, surgiu da constatação de que este desequilíbrio ocorre principalmente, em função das dificuldades encontradas na aquisição, manutenção e operação de laboratórios e equipamentos adequados à execução das atividades práticas.

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia e desenvolver um programa de simulação, executável em micro-computadores tipo IBM-PC, que possibilite a realização de atividades práticas de treinamento, para o ensaio de tubos pela técnica de correntes parasitas.

1.2 Definição do sistema SIMPAR

O Sistema SIMPAR é um programa de simulação, executável em micro-computador tipo IBM-PC 386 ou superior, dotado de monitor de vídeo VGA preferencialmente colorido, em ambiente DOS, que reúne as facilidades necessárias à realização de atividades práticas, para a inspeção de tubos pelo método de correntes parasitas.

Durante a simulação o usuário do sistema pode: escolher dentre tubos-padrão ou corpos de prova de diversos materiais e dimensões, o objeto de teste de sua preferência; movimentar uma sonda diferencial interna em seu interior; e observar na tela de um aparelho de testes as figuras de Lissajous correspondentes às discontinuidades detectadas.

Utilizando-se o mouse, é possível uma completa interação com a interface gráfica do programa, sendo assim possível alterar as condições de contorno da simulação, pela atuação direta nos controles existentes na instrumentação virtual disponível. As implicações decorrentes destas alterações são tratadas matematicamente e serão refletidas na visualização dos resultados.

O programa SIMPAR, desenvolvido a partir de metodologia heurística, foi implementado em linguagem Turbo-Pascal versão 7.0. No capítulo 4, apresentam-se os argumentos que influíram na escolha desta linguagem de programação. Procedeu-se inicialmente, a um trabalho de coleta experimental de dados em laboratório, capaz de formar uma base de dados de referência, a ser utilizada pelos algoritmos de simulação.

Para garantir a reprodutibilidade dos aspectos operacionais reais num ambiente simulado de trabalho, procurou-se manter com a maior fidelidade possível, as formas e ergonômias envolvidas. Em função da variedade das condições de ensaio existentes, tornou-se imperativo o estabelecimento de delimitações no campo de abrangência da simulação, visando sobretudo, garantir a concretização deste projeto de pesquisa. Apresentam-se no entanto, sugestões para implementação em futuros desenvolvimentos.

1.3 Organização do trabalho

São abordados no capítulo 2, alguns tópicos relacionados com os conteúdos-chave utilizados nessa dissertação. Primeiramente são apresentados os fundamentos teóricos do ensaio, fazendo-se a seguir as considerações relativas aos aspectos práticos e operacionais. Realizam-se ainda discussões acerca dos processos de simulação por computador, e seu uso como recurso didático em educação tecnológica.

No capítulo 3, faz-se uma descrição do processo geral desenvolvido, compreendendo desde o estabelecimento da metodologia de condução do trabalho de pesquisa, passando pela coleta experimental de dados em laboratório, até a descrição do algoritmo fundamental de simulação.

Descrevem-se o sistema SIMPAR, suas facilidades operacionais e potencialidades de utilização no capítulo 4.

No capítulo 5, apresentam-se os resultados obtidos, e procede-se a uma validação em termos técnicos e pedagógicos relacionados com a utilização prática do programa.

Finalmente, no capítulo 6, apresentam-se as conclusões assim como alguns comentários finais.

Fazem parte ainda desta dissertação cinco ANEXOS, onde estão registradas informações complementares relacionadas com a normatização, a instrumentação e os recursos técnicos utilizados para o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa, garantindo assim rastreabilidade a todo o processo.

2 O ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS E SIMULAÇÃO COMO RECURSO DIDÁTICO

2.1 Fundamentos do método de ensaio por correntes parasitas

Para que seja possível a compreensão dos princípios básicos de operação do método de ensaios por correntes parasitas, é necessário recorrer a alguns conceitos e formulações, relacionados com as áreas de eletricidade e magnetismo. A descrição que se segue, faz-lhes referências sucintas e objetivas, uma vez que os mesmos são de utilização universal, fazendo parte do conteúdo programático da disciplina Física, lecionada nos cursos de ciências exatas em nível de graduação.

2.1.1 Conceitos básicos de eletromagnetismo

Numa breve retrospectiva histórica, sabe-se que em 1825, o físico francês Jean Foucault constatou experimentalmente a existência de correntes elétricas que, sob certas condições, circulavam no interior de materiais eletricamente condutores, cabendo a Michael Faraday em 1831 a descoberta do princípio da indução eletromagnética capaz de explicá-las. Estas correntes receberam o nome de correntes parasitas ou correntes de Foucault. Em 1864, James Maxwell formulou através de um conjunto de equações matemáticas, conhecidas como equações de Maxwell, a base teórica do eletromagnetismo.

Autores como TIPLER (1978) ou HALLIDAY (1994), apresentam tais tópicos com bastante clareza. Utilizou-se para os fins desta dissertação, a abordagem conduzida por STEGMANN (1990).

• Corrente elétrica e Tensão

Denomina-se corrente elétrica ao movimento ordenado de cargas elétricas (elétrons) em materiais condutores. Sua unidade é o Ampére (A) sendo que 1 um Ampére equivale à passagem de $6,25 \cdot 10^{18}$ elétrons (1 coulomb) por uma dada seção de material condutor em 1 segundo. O que determina o deslocamento de uma carga elétrica livre de um ponto para outro, é a diferença de potencial elétrico entre eles. Esta diferença de potencial é também denominada como tensão elétrica. Sua unidade é o Volt.

• Resistividade e Resistência elétrica

Pode-se definir a resistividade ρ como a grandeza que mede o grau de dificuldade encontrado por uma corrente elétrica para passar por um material. Seja o condutor cilíndrico apresentado na FIG. 1, de comprimento l e área da seção transversal A . Sua resistência elétrica R (em Ω) corresponde a:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (1)$$

onde,

ρ é a resistividade elétrica do material constituinte do condutor ($\Omega \cdot m$)

l é o comprimento do condutor (m)

A é a área da seção transversal do condutor (m^2)

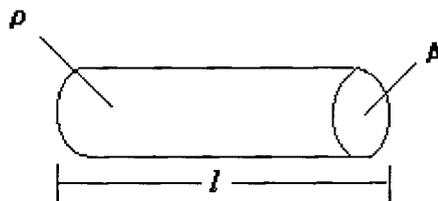


FIGURA 1 - Condutor cilíndrico de resistividade ρ , comprimento l e área de seção transversal A .

• Lei de Ohm

A equação (2), conhecida como lei de Ohm, relaciona três grandezas: a tensão elétrica U , a corrente elétrica I e a resistência elétrica R .

$$R = \frac{U}{I} \quad (2)$$

• Condutividade elétrica

A condutividade elétrica σ , pode ser definida como sendo o inverso da resistividade ρ , ou seja:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

A unidade de condutividade é o S/m (siemens/metro). Expressa-se ainda a condutividade elétrica, em valores percentuais, pelo padrão IACS (International Annealed Copper Standard). Esta norma atribui 100% de condutividade ao cobre recozido. A TAB. 1 mostra valores de resistividade e condutividade para alguns materiais de interesse para o ensaio por correntes parasitas.

TABELA 1

Valores de resistividade e condutividade elétrica de alguns materiais.

Material	Resistividade $\Omega \cdot m$	Condutividade s/m	Condutividade % IACS
Prata	1,63 E-8	6,13 E 7	105,0
Cobre recozido	1,72 E-8	5,81 E 7	100,0
Ouro	2,46 E-8	4,07 E 7	70,0
Alumínio	2,83 E-8	3,54 E 7	61,0
Latão 70 -30	6,14 E-8	1,63 E 7	28,0
Bronze fosforoso	1,56 E-7	6,41 E 6	11,0
CU - Ni 90-10	1,77 E-7	5,64 E 6	9,7
Aço inoxidável	6,88 E-7	6,99 E 6	2,5
Zircaloy 2	7,19 E-7	1,39 E 6	2,4

FONTE: ECT, 1986, p.4.

• Intensidade de um campo magnético ou força magnetizadora H

A FIG. 2 ilustra a formação de um campo magnético, através da circulação de uma corrente contínua numa bobina de geometria regular (espiras igualmente espaçadas e de mesmo diâmetro). Os segmentos de reta que passam pelo interior da bobina numa mesma distância e em trajetórias paralelas representam que nesta região o campo magnético é homogêneo.

A dispersão verificada a partir das extremidades da bobina significa que nestas áreas o campo magnético torna-se não homogêneo. Em geral descreve-se o campo elétrico por uma grandeza vetorial denominada Intensidade de Campo Magnético, \vec{H} , ou força magnetizadora, calculada como:

$$|\vec{H}| = H = \frac{I n}{l} \quad (4)$$

onde,

I é a intensidade da corrente (A).

n é o número de espiras da bobina.

l é o comprimento da bobina (m).

$|\vec{H}|$ é o módulo da intensidade do campo magnético ou força magnetizadora (A/m).

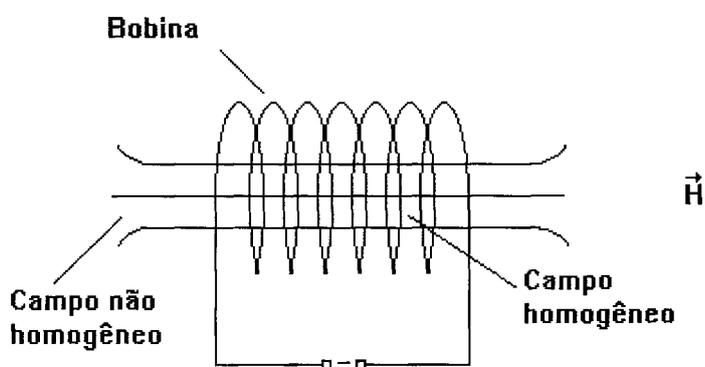


FIGURA 2 - Campo magnético formado em uma bobina.

• Fluxo magnético Φ

Pode-se dizer que o fluxo magnético, Φ , é o conjunto de todas as linhas de força existentes no campo magnético de uma bobina, que atravessam uma superfície aberta escolhida como referência..

• Lei de indução de Faraday

Se uma bobina composta por n espiras é atravessada perpendicularmente por um fluxo magnético cuja intensidade é variável no tempo, surge uma tensão elétrica U_{ind} induzida nos terminais da bobina e que pode ser calculada como:

$$U_{\text{ind}} = -n \frac{d\Phi}{dt} \quad (5)$$

Esta equação serve como definição para a unidade do fluxo magnético em Volt . segundo (Vs). Se o fluxo magnético total corta a secção transversal A da bobina, resulta a densidade de fluxo magnético ou Indução Magnética, \vec{B} , calculada por:

$$|\vec{B}| = B = \frac{\Phi}{A} \quad , \quad (6)$$

quando \vec{B} é homogêneo e perpendicular à superfície escolhida. \vec{B} representa uma grandeza vetorial, pois a direção pela qual as linhas de força do campo penetram na seção A , influem na intensidade do fluxo magnético. A unidade de densidade de fluxo magnético é expressa em Volt.segundo / metro quadrado (Vs/m²).

• Permeabilidade magnética μ

A densidade de fluxo magnético, \vec{B} , depende da Intensidade do Campo Magnético, \vec{H} , e também das características magnéticas do material atravessado pelo fluxo Φ .

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (7)$$

onde,

μ é a permeabilidade total (Vs/Am).

Se o material atravessado pelo fluxo magnético é o ar ou o vácuo é válida a expressão:

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} \quad (8)$$

onde,

\vec{B}_0 é a densidade do fluxo magnético no vácuo

μ_0 é a constante permeabilidade magnética do vácuo

No sistema internacional (SI):

$$\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ H / m} \quad (9)$$

onde,

H é a unidade de indutância, Henry, (Vs/Am)

Utiliza-se mais freqüentemente o conceito de permeabilidade relativa μ_{rel} , equivalente ao quociente entre a permeabilidade total e a permeabilidade no vácuo:

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (10)$$

No vácuo e no ar a permeabilidade total μ equivale a μ_0 , logo $\mu_{rel} = 1$. Pode-se então reescrever a equação (7) como:

$$\vec{B} = \mu_{rel} \mu_0 \vec{H} = \mu_{rel} \vec{B}_0 \quad (11)$$

2.1.2 Geração das correntes parasitas

O método de ensaio por correntes parasitas consiste, basicamente, na indução de correntes elétricas em materiais eletricamente condutores, através de um campo eletromagnético variável, gerado por uma bobina alimentada por corrente alternada, e na

monitoração da interação entre as correntes induzidas e o material, como pode ser visto na FIG. 3.

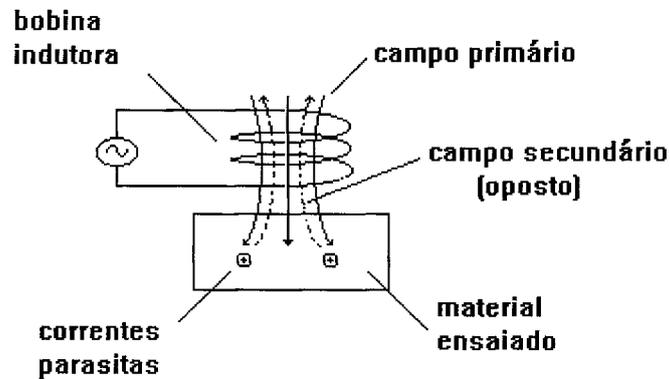


FIGURA 3 - Geração de correntes parasitas num material.

A formação das correntes parasitas depende de três características do material a ser testado:

- Geometria ou forma;
- Condutividade elétrica;
- Permeabilidade magnética.

Verifica-se que a bobina indutora gera um campo magnético primário \vec{H}_p , que é responsável pela indução de correntes parasitas no material. Estas correntes parasitas geram um campo magnético secundário \vec{H}_s , de sentido contrário ao do campo primário. Os dois campos superpõem-se e determinam uma tensão resultante nos terminais da bobina.

A existência de falhas e discontinuidades, ou a variação de condutividade elétrica e/ou permeabilidade magnética podem ser interpretadas como não homogeneidades do material, e serão diretamente responsáveis pelo comportamento das correntes induzidas. Como fundamentalmente ocorrem induções segundo a lei de Faraday, pode-se afirmar que a diferença Φ entre o fluxo magnético primário Φ_p e o fluxo magnético secundário Φ_s induz a tensão de medição efetiva na bobina:

$$\Phi = \Phi_p - \Phi_s \quad (12)$$

Da equação (6) tem-se que $\Phi = BA$, e da equação (11) sabe-se que $\vec{B} = \mu_{\text{rel}} \mu_0 \vec{H}$, então:

$$\Phi = \mu_{\text{rel}} \mu_0 A \quad (13)$$

A tensão de medição U_m , pode ser calculada combinando-se a equação da indução (5), e a equação (13) considerando-se $U_m = U_{\text{ind}}$ e desprezando-se o sinal negativo.

$$U_m = n \mu_{\text{rel}} \mu_0 A \frac{d\vec{H}}{dt} \quad (14)$$

Para uma bobina sem material em seu interior, o valor da tensão U_m pode ser calculado de acordo com a seguinte equação:

$$U_m = \frac{n^2 \mu_{\text{rel}} \mu_0 A}{l} \frac{dI}{dt} = L \frac{dI}{dt} \quad (15)$$

onde,

I é a corrente na bobina (A)

$$\frac{n^2 \mu_{\text{rel}} \mu_0 A}{l} = L \quad \text{é a indutância da bobina} \quad (16)$$

No mundo real, modela-se satisfatoriamente uma bobina por uma indutância L , em série com uma resistência R , cujo valor é função das características físicas do fio que a constitui. Assim a tensão U da bobina quando percorrida por uma corrente I compõe-se de fato do somatório de duas tensões: U_r de acordo com a equação (2), e U_L de acordo com a equação (15):

$$U = RI + L \frac{dI}{dt} \quad (17)$$

Representando-se a tensão como uma função senoidal tem-se:

$$U = U_0 \text{sen } \omega t \quad (18)$$

onde,

U_0 é a tensão máxima (V)

$\omega = 2 \pi f$ é a velocidade angular (radiano / s)

f é a frequência de teste (Hz)

Circuitos RL série apresentam defasagem entre corrente e tensão. Pode-se expressar esta característica pela relação:

$$I = I_0 \text{ sen } (\omega t - \alpha) \quad (19)$$

onde,

I_0 é o valor máximo da corrente (A)

α é a diferença de fase entre a corrente e a tensão (radianos ou graus)

Uma maneira conveniente de representar circuitos RL é através de números complexos, e do plano complexo como pode ser visto na FIG. 4. Os números complexos representam-se pela forma:

$$Z = x + jy \quad (20)$$

onde,

Z é o número complexo

x é a parte real

jy é a parte imaginária

j é a unidade imaginária definida como $j^2 = -1$

Nesta figura o número complexo Z é um ponto do plano. A abcissa (x) equivale à parte real, e a ordenada (y) à parte imaginária de Z . A impedância é representada pelo segmento de reta que vai da origem até o ponto Z . Assim, é possível expressar Z em função do comprimento ou módulo de Z e da fase α , resultando:

$$x = |Z| \cos \alpha; \quad y = |Z| \text{ sen } \alpha; \quad |Z| = (x^2 + y^2)^{1/2} \quad (21)$$

logo:

$$Z = |Z| (\cos \alpha + j \text{ sen } \alpha) \quad (22)$$

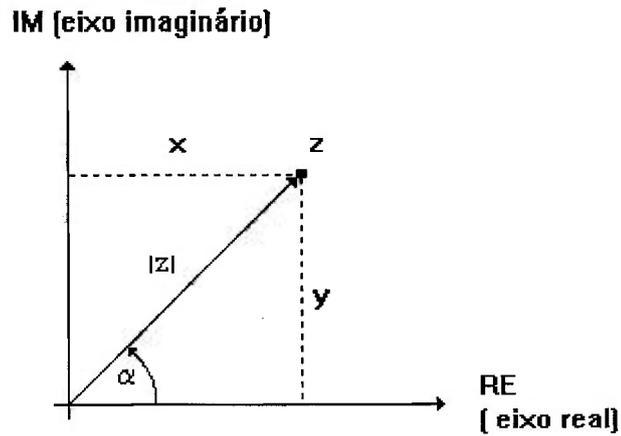


FIGURA 4 - O Plano complexo

Pode-se utilizar a fórmula de Euler:

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \operatorname{sen} \alpha \quad (23)$$

Substituindo-a na equação (22) obtêm-se:

$$Z = |Z| e^{j\alpha} \quad (24)$$

Na FIG. 5 faz-se $\alpha = \omega t$, o que leva o ponto Z a traçar um círculo com raio $|Z|$ no plano complexo.

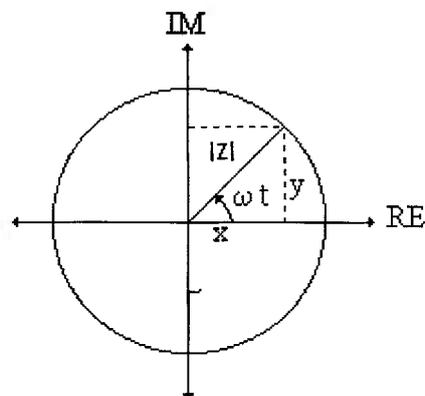


FIGURA 5 - Rotação do vetor Z no plano complexo.

Diz-se que o vetor Z gira com velocidade angular constante. Projetando-se o movimento nos eixos do plano, tem-se:

$$x = |Z| \cos \omega t \quad (25)$$

$$y = |Z| \sin \omega t \quad (26)$$

Reescrevendo as equações (18) e (19) podem-se representar tensão e corrente de modo análogo:

$$U = |U| e^{j\omega t} \quad (27)$$

$$I = |I| e^{j\omega t} \quad (28)$$

onde,

$$|U| = U_0 \quad \text{e} \quad |I| = I_0$$

Substituindo as equações (27) e (28) na equação (17) utilizando-se:

$$\frac{dI}{dt} = j\omega |I| e^{j(\omega t - \alpha)} \quad (29)$$

obtem-se:

$$|U| e^{j\omega t} = |I| R e^{j(\omega t - \alpha)} + j\omega L |I| e^{j(\omega t - \alpha)} \quad (30)$$

e então:

$$\frac{|U|}{|I|} e^{j\alpha} = R + j\omega L = Z \quad (31)$$

onde,

Z é a impedância complexa

R é a resistência

ωL é a reatância indutiva

A representação destas grandezas no plano complexo de impedância pode ser vista na FIG. 6, correspondendo para a impedância:

$$Z = |Z| e^{j\alpha} \quad (32)$$

sendo:

$$|Z| = \frac{|U|}{|I|} = (R^2 + (\omega L)^2)^{1/2} \quad (33)$$

Para a defasagem tem-se:

$$\text{tg } \alpha = \frac{\omega L}{R} \quad (34)$$

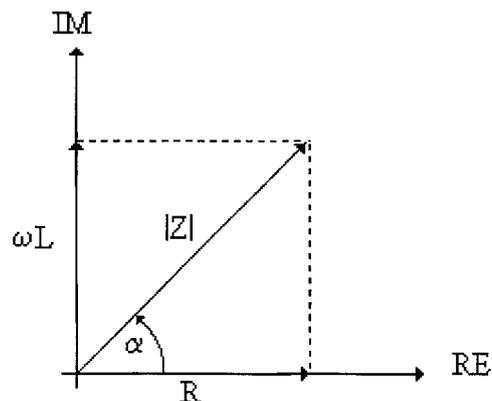


FIGURA 6 - O plano complexo de impedância.

Pela FIG. 7 pode-se observar a distribuição das correntes parasitas no interior de um material. A medida que nele penetram, sua intensidade diminui exponencialmente. Assim a circulação das correntes é superficial ou sub-superficial. Este efeito é conhecido como efeito pelicular e pode ser explicitado pela equação:

$$\nabla^2 i = \sigma \mu \frac{di}{dt} \quad (35)$$

onde,

i é a densidade de corrente

s é a condutividade elétrica

μ é a permeabilidade magnética

∇^2 é o operador de Laplace (segunda derivação de posição)

a solução desta equação para um material de volume semi-infinito é dada por:

$$i_x = i_0 e^{-\alpha} \text{sen}(\omega t - \alpha) \quad (36)$$

onde,

i_x é a densidade de corrente no ponto x do material testado

i_0 é a densidade das correntes na superfície do material testado

$\alpha = x/d$ é o valor do ângulo de fase

d é a profundidade de penetração padrão (ver a equação 39)

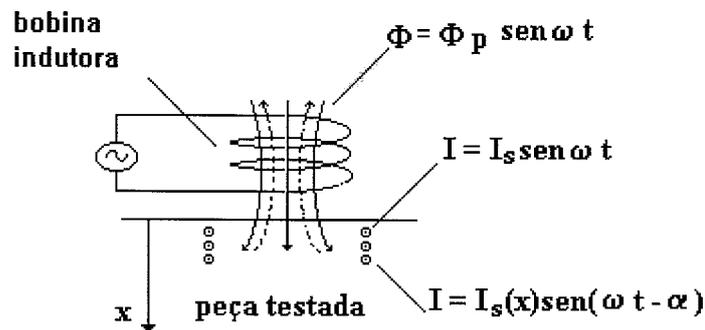


FIGURA 7 - Distribuição das correntes parasitas no material.

Verifica-se nesta distribuição, que quanto maior a frequência de teste, menor é a profundidade de penetração e maior a densidade de corrente na superfície do material testado. Além disso observa-se que a fase das correntes aumenta com a

profundidade. Este efeito é denominado rotação de fase. Ambos podem ser explicados analisando-se a equação (36):

O enfraquecimento exponencial:

$$\frac{i_x}{i_0} \text{ é proporcional a } e^{-x/d} \quad (37)$$

O aumento do valor da fase:

$$\frac{i_x}{i_0} \text{ é proporcional a } \sin(\omega t - x/d) \quad (38)$$

A relação (37) pode ser representada conforme a FIG. 8. A intensidade das correntes parasitas diminui exponencialmente, à medida em que cresce a profundidade de penetração. Quando o enfraquecimento atinge 36,8 % (ou $1/e$), diz-se que este valor equivale a uma **profundidade de penetração padrão**, calculada como:

$$d = \frac{1}{2\pi (\mu_{rel} \sigma f 10^{-7})^{1/2}} \quad (39)$$

onde,

d é a profundidade de penetração padrão (mm)

μ_{rel} é Permeabilidade magnética (H/m)

σ é a condutividade elétrica ($m / \Omega \cdot mm^2$)

f = Frequência de teste (Hz ou s^{-1})

A relação (38) por sua vez pode ser verificada através da FIG. 9. A rotação de fase padrão, entre a corrente na superfície e a corrente numa profundidade x , é calculada pela relação:

$$\alpha = \frac{x}{d} \text{ (radianos)} \quad (40)$$

ou

$$\alpha = 57 \frac{x}{d} \text{ (graus)} \quad (41)$$

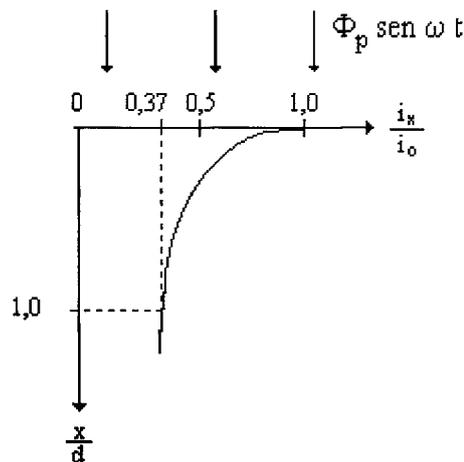


FIGURA 8 - Distribuição de densidade de correntes parasitas.

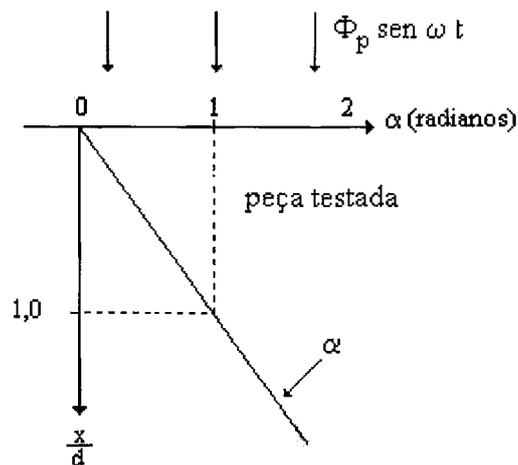


FIGURA 9 - Rotação de fase em função da profundidade.

A ocorrência da rotação fase é muito útil para a avaliação de discontinuidades através do ensaio por correntes parasitas (ASME,1992). O sinal de medição pode ser representado no plano complexo de impedância. Esta forma de representação está exemplificada na FIG. 10, onde a bobina de uma sonda superficial tem sua impedância registrada em duas situações distintas: o ponto P_0 representa a impedância ($R_0 + \omega L_0$) no ar. Ao ser aproximada da superfície do material testado a impedância se altera e é representada pelo ponto P_1 equivalente a ($R_1 + \omega L_1$).

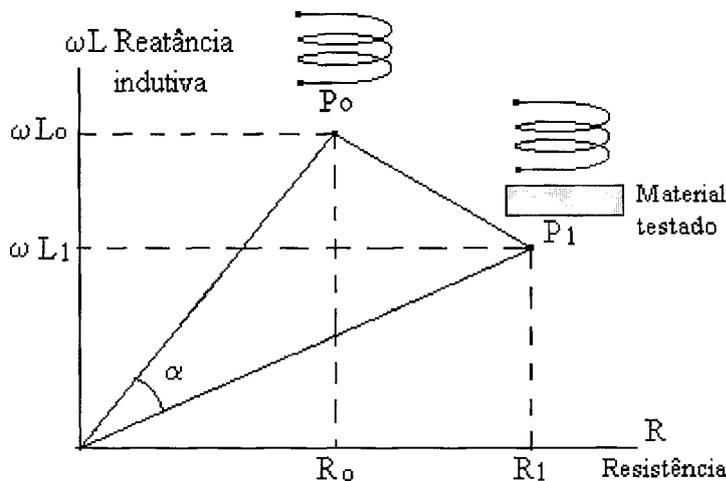


FIGURA 10 - Representação do sinal de medição no plano complexo.

Uma vez apresentados os princípios físicos e matemáticos que fundamentam o ensaio por correntes parasitas, passarão a ser abordados os aspectos operacionais deste ensaio, destacando-se aqueles relacionados com a inspeção de tubos.

2.1.3 Aspectos operacionais do ensaio por correntes parasitas.

Para sua aplicação prática, o ensaio por correntes parasitas requer o concurso de algumas facilidades e recursos técnicos. Um arranjo básico capaz de fornecer as condições elementares de operação, é composto por um conjunto onde um gerador de frequências trabalha como fonte de corrente alternada, que alimenta uma sonda de teste, cuja impedância é medida por um dispositivo indicador, na medida em que ela vai sendo movimentada pela superfície interna ou externa do objeto sob teste e influenciada pelas suas variações de homogeneidade.

Diversas possibilidades derivam deste arranjo básico, na medida que são combinadas variações envolvendo:

- As características construtivas das sondas de teste;
- O campo de aplicação e os objetivos do ensaio;
- Os processos de medição utilizados.

2.1.3.1 Principais tipos de sondas utilizadas

Os diversos tipos de sondas utilizadas no ensaio por correntes parasitas podem ser classificados em três categorias gerais:

- sondas superficiais;
- sondas internas;
- sondas externas (ou bobinas envolventes).

Estes transdutores podem ainda ser classificados, segundo os arranjos e circuitos de ligação elétrica empregados, em dois tipos:

• **Sondas absolutas:** Quando empregam somente uma bobina para a gerar as correntes parasitas e medir os sinais de teste.

• **Sondas diferenciais:** Quando empregam duas bobinas, ligadas em circuito diferencial para gerar as correntes parasitas e medir sinais de teste.

A escolha do tipo de arranjo das bobinas da sonda, determina o nome dado à técnica de ensaio (absoluta ou diferencial). Na FIG. 11 tem-se uma representação em forma esquemática destes transdutores.

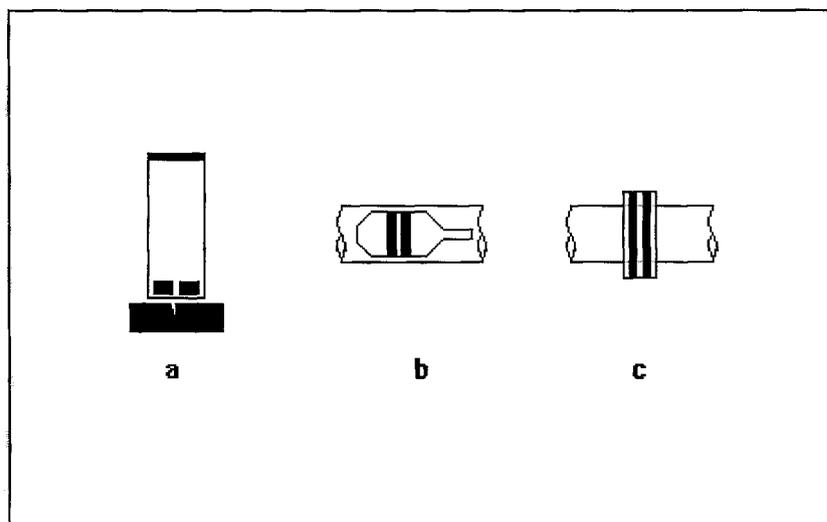


FIGURA 11 - Principais sondas utilizadas no ensaio por correntes parasitas: a) superficiais; b) internas; c) externas (envolventes).

A FIG. 12 permite explicar a técnica absoluta de ensaio. Numa condição inicial a sonda é posicionada sobre uma área homogênea do material testado e assume um valor de impedância representado pelo ponto P_1 no plano complexo. Ao ser deslocada e ao passar por uma região cuja homogeneidade foi perturbada (pela presença de uma falha ou descontinuidade por exemplo), ocorre uma variação de impedância, representada pelo deslocamento do ponto P_1 até um ponto genérico P_2 . Prosseguindo o deslocamento da sonda até atingir nova região homogênea retorna-se ao ponto de origem.

A trajetória percorrida pelo ponto no plano complexo representa o sinal de medição, cuja forma depende do tipo de descontinuidade detectada, da frequência de ensaio e das propriedades elétricas e magnéticas do material e das características de construção da sonda.

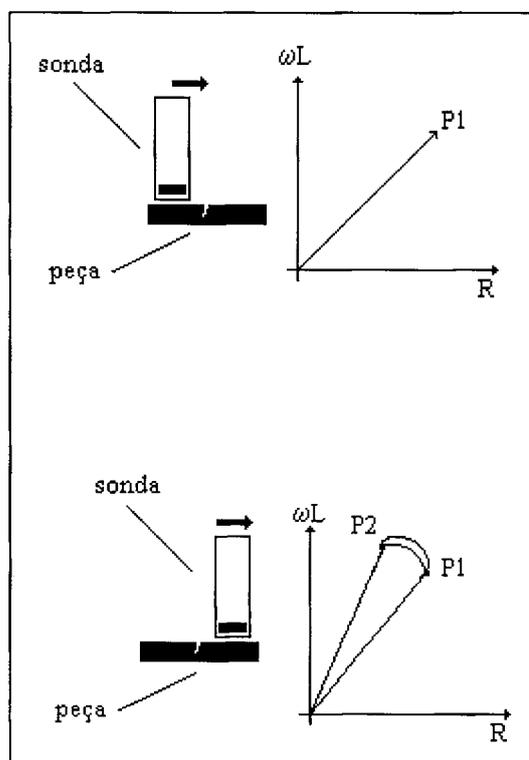


FIGURA 12 - A técnica absoluta de ensaio.

Com relação às possibilidades de ligações elétricas, a FIG. 13 apresenta os diagramas correspondentes ao uso de sondas absolutas nos circuitos paramétricos e em ponte.

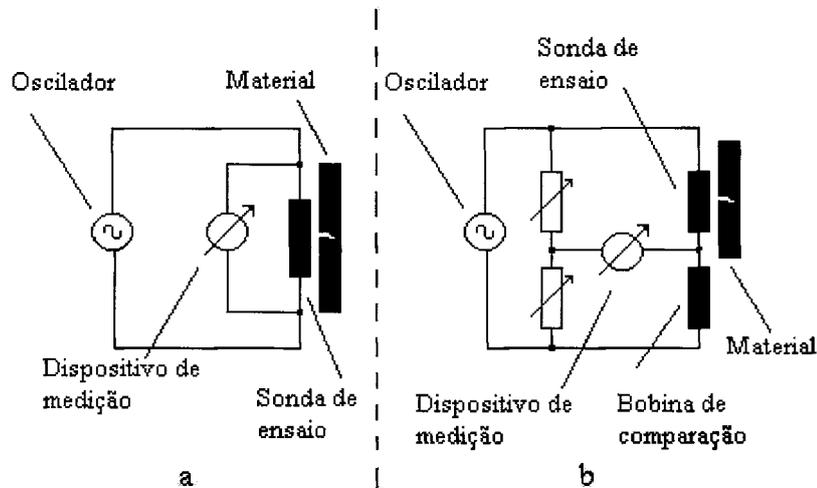


FIGURA 13 - Circuitos utilizados na conexão de sondas absolutas.

a) paramétrico

b) em ponte

A técnica diferencial, pode ser entendida com auxílio da FIG. 14. As duas bobinas da sonda de ensaio são ligadas em série, mas os sentidos de seus enrolamentos são contrários. Numa condição inicial a sonda é posicionada sobre uma área homogênea do material testado e cada bobina assume um valor de impedância cuja diferença é representada pelo ponto P_1 no plano complexo. Ao ser deslocada e ao passar por uma região cuja homogeneidade foi alterada (pela presença de uma falha ou descontinuidade por exemplo), ocorrem variações na impedância de cada bobina, de maneira idêntica mas não simultânea, uma vez que elas estão fisicamente separadas. Verifica-se assim um deslocamento do ponto P_1 até os pontos P_2 e P_3 . Prosseguindo o deslocamento da sonda até atingir nova região homogênea retorna-se ao ponto de origem. A forma do sinal de medição não é a mesma, mas também depende dos fatores citados para a técnica absoluta.

A FIG. 15 apresenta os circuitos elétricos correspondentes ao emprego de sondas diferenciais nos modos paramétricos e em ponte.

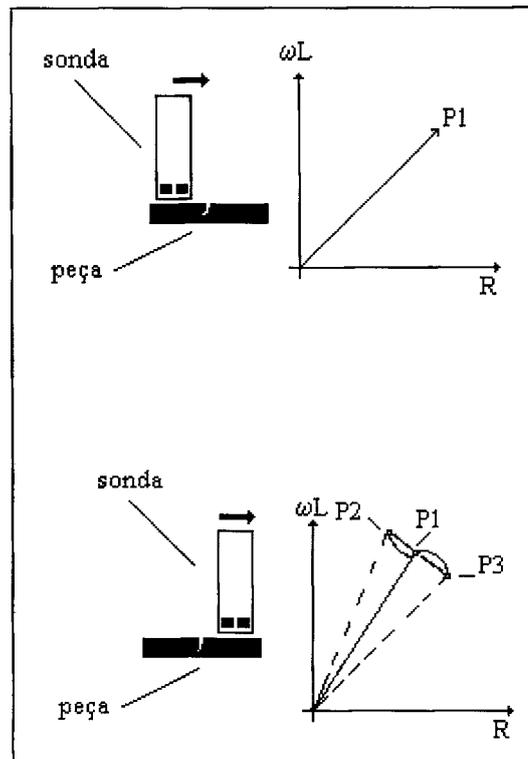


FIGURA 14 - A técnica diferencial de ensaio.

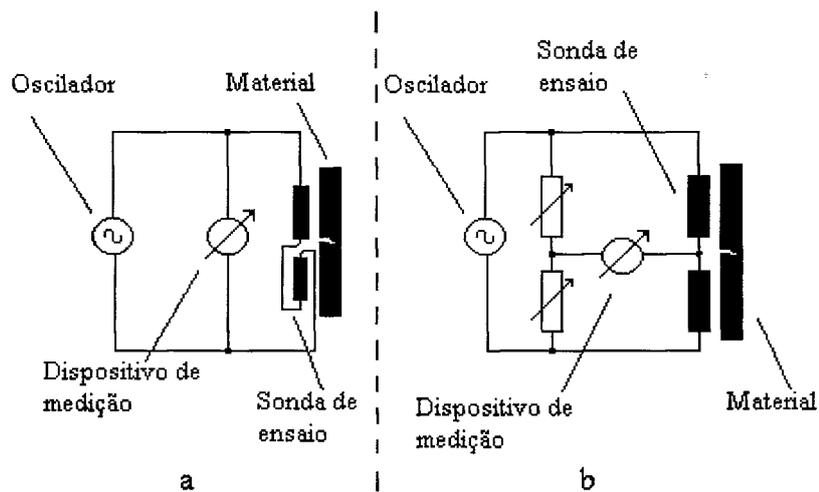


FIGURA 15 - Circuitos utilizados na conexão de sondas diferenciais.

a) paramétrico

b) em ponte

Nesta exposição foram consideradas sondas do tipo superficial, mas o processo de formação de sinais no plano complexo é muito similar, para sondas internas e externas empregadas na inspeção de tubos.

2.1.3.2 Campos de aplicação e objetivos do ensaio

Dentre os diversos campos de aplicação onde o ensaio por correntes parasitas é empregado, destacam-se os setores aero-espacial e nuclear. No primeiro utilizam-se muitas técnicas de inspeção especificamente recomendadas nos manuais de serviço das aeronaves. Os ensaios por correntes parasitas ocupam posição de destaque e dentre os testes efetuados podem-se citar:

- Detecção e avaliação de trincas superficiais e sub-superficiais;
- Detecção e avaliação de trincas em furos-sedes de rebites e parafusos;
- Medição de espessura de chapas;
- Medição de espessura de pinturas e revestimentos;
- Separação de materiais.

No setor nuclear, além destes objetivos, surge um campo de aplicação muito importante em termos de segurança nas instalações das usinas nucleo-elétricas: a inspeção de tubos. Muitos equipamentos os utilizam para sua construção e funcionamento e neste caso os testes por correntes parasitas são utilizados para:

- Detecção e avaliação de descontinuidades em tubos instalados em trocadores de calor e geradores de vapor;
- Medição de desgastes e variações dimensionais em varetas combustíveis.

2.1.3.3 Processos de medição e apresentação de resultados

Nas FIG. 13 e 15 verifica-se que as variações de impedância das sondas utilizadas, são detectadas por dispositivos de medição. Dependendo dos objetivos do ensaio, estes sistemas podem efetuar medições e apresentar os resultados de maneiras distintas.

Nos sistemas mais simples, as medidas representando estas variações, podem ser efetuadas por circuitos amplificadores lineares e os resultados apresentados por galvanômetros ou registradores gráficos.

Funcionam deste modo, diversos equipamentos de ensaio, sendo possível, com sua utilização, a execução de testes tais como os citados para a área aero-espacial. Em função de seu modo de medição, que somente registra o módulo de impedância da sonda, este processo não satisfaz as necessidades de outros campos de aplicação, onde são desejáveis a medição e apresentação dos valores de impedância, em sua forma complexa. Esta forma de medição oferece maiores recursos e facilidades para a análise dos sinais detectados (SOARES, 1976).

Nos equipamentos que apresentam as medições pelo sistema vetor-ponto, reproduz-se numa tela gráfica o plano complexo. As variações de impedância sofridas pelas sondas durante um ensaio, podem ser visualizadas na forma de figuras e então analisadas. Nos sistemas mais antigos, esta função era desempenhada por osciloscópios com memorização de tela, como por exemplo o modelo 5111 fabricado pela Tektronix Inc. . Atualmente os fornecedores de equipamentos para correntes parasitas fabricam sistemas computadorizados e as figuras correspondentes aos sinais gerados pelas discontinuidades detectadas são registradas na tela de um monitor de vídeo.

Durante uma inspeção, ainda que os sinais detectados sejam transientes que surgem rapidamente na tela do equipamento de teste, sua forma permanece visível, podendo então ser analisada. Na FIG. 16 pode-se observar o registro gráfico de uma típica figura, gerada pela passagem de uma sonda diferencial interna, durante a inspeção de um tubo onde existe uma descontinuidade.

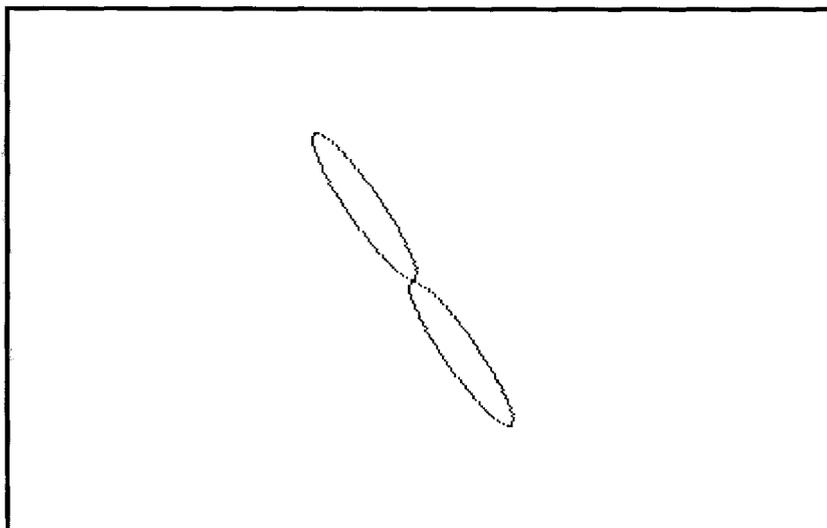


FIGURA 16 - Figura gerada por descontinuidade detectada por sonda diferencial, durante a inspeção de um tubo.

Seu formato é função de duas variáveis sendo por isso denominadas como *figuras de Lissajous*, matemático francês que descobriu ser possível fazer representações gráficas no plano, com duas variáveis simultaneamente .

De uma maneira geral, para quaisquer descontinuidades de geometria regular, este formato não sofre grandes alterações em seu aspecto. O que se observa de fato, é a ocorrência de variações na inclinação e amplitude das figuras. Tais variações são função da profundidade das descontinuidades detectadas e das condições operacionais estabelecidas para cada teste.

O sistema vetor-ponto permite então avaliar os sinais detectados, a partir de análises comparativas que associam as inclinações das figuras de Lissajous, às profundidades das descontinuidades existentes. Fica assim evidente, que, para a realização de ensaios por correntes parasitas, objetivando avaliações quantitativas de descontinuidades torna-se necessária a utilização de padrões de referência.

2.1.3.4 Padrões de referência para calibração

Padrões de referência para calibração de sistemas de ensaio por correntes parasitas, são corpos de prova (tubos, chapas, barras) construídos por processos, onde são usinadas descontinuidades artificiais, cujo formato e dimensões são rigorosamente controlados, de modo a permitir o estabelecimento de relações de equivalência e comparação entre os sinais à elas relacionados e aqueles provenientes da inspeção de descontinuidades reais (ASNT, 1986). Assim, uma condição fundamental inerente a este ensaio é a utilização de padrões de referência com as mesmas propriedades físicas, químicas e metalúrgicas dos objetos de teste.

Em particular para o ensaio de tubos, são empregados padrões de referência construídos por técnicas de eletro-erosão. Neste caso, usinam-se através de descargas elétricas, estabelecidas entre um eletrodo de tungstênio e o tubo-padrão de referência, diversos rasgos e orifícios de fundo plano, com diâmetros e profundidades estabelecidos por norma ou procedimento. No ANEXO A1 dessa dissertação, encontram-se recomendações para a construção de tubos-padrão, feitas pela American Society of Mechanics Engineers (ASME, 1992); uma das principais normas utilizadas na inspeção de tubos em trocadores de calor da área nuclear.

A FIG. 17 é uma esquematização de um tubo-padrão genérico, construído segundo esta norma. Podem-se observar ao longo do tubo-padrão, descontinuidades cujas dimensões (diâmetro ou largura) são estabelecidas em função das características de cada tubo, e cujas profundidades são especificadas nominalmente como:

- Um rasgo circunferencial interno equivalente a 10% de perda da espessura do tubo;
- Um furo passante equivalente a 100% de perda da espessura do tubo;
- Um furo de fundo plano equivalente a 80% de perda da espessura do tubo;
- Um furo de fundo plano equivalente a 60% de perda da espessura do tubo;
- Um furo de fundo plano equivalente a 40% de perda da espessura do tubo;
- Quatro furos de fundo plano, radialmente alinhados, equivalentes a 20% de perda da espessura do tubo;
- Um rasgo circunferencial externo equivalente a 10% de perda da espessura do tubo.

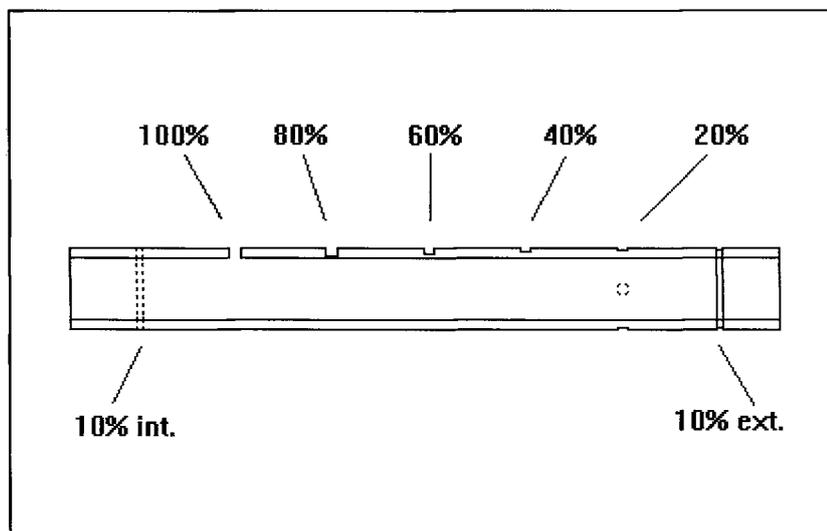


FIGURA 17 - Esquematização de tubo-padrão de referência, construído conforme o código ASME (1992).

Para realizar inspeções aplicáveis a outros objetos de teste, ou visando outros objetivos dentre aqueles citados na seção 2.1.3.2, haverá sempre a necessidade da preparação de padrões de referência. Para os objetivos desta dissertação, considerou-se desnecessário dar-lhes um enfoque mais detalhado.

2.1.3.5 A inspeção de tubos

A inspeção de tubos por correntes parasitas, requer a utilização de sistemas de testes que apresentem resultados pelo sistema vetor-ponto. A FIG. 18 mostra a nível de diagrama de blocos um sistema de testes de uso geral, cuja operação é simplificada a seguir.

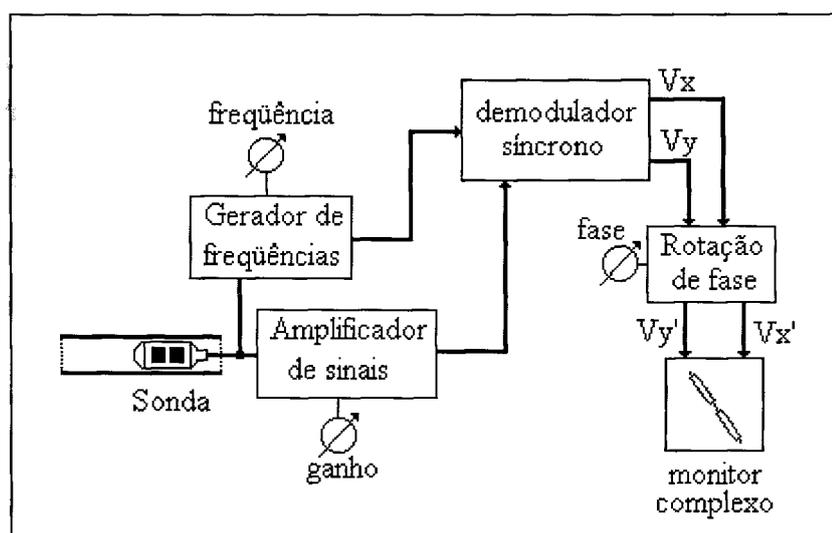


FIGURA 18 - Diagrama de blocos de um sistema de testes para o ensaio por correntes parasitas.

O bloco gerador de frequências é responsável pela criação de correntes alternadas, dentro de uma faixa de frequências que pode ser variada entre 10 Hz e 10 MHz. Deve ainda ser capaz de alimentar com estas correntes as bobinas da sonda de teste, e fornecer frequências de referência ao circuito demodulador síncrono.

O amplificador de sinais recolhe e amplia os sinais resultantes da detecção das discontinuidades existentes. Estes sinais podem ser definidos, como sendo modulações de fase e amplitude cuja frequência portadora é aquela estabelecida no bloco gerador de frequências. Através de um controle de ganho, seu fator de amplificação pode ser controlado, o que permite alterar a amplitude dos sinais processados.

Após a amplificação, um circuito denominado demodulador síncrono elimina a componente de frequência do sinal de teste, e transforma as modulações detectadas nas inspeções em duas componentes de tensão, V_x e V_y , que podem então

ser aplicadas num monitor ou sistema de medição trabalhando de modo a representar o plano complexo.

Um bloco adicional, denominado circuito de rotação de fase, permite transformar o par de componentes V_x e V_y em outro par $V_{x'}$ e $V_{y'}$, antes de remete-las ao sistema de medição empregado. Com isto, as figuras de Lissajous resultantes podem formar-se na tela de apresentação, com a inclinação ajustada no controle de fase do equipamento de teste. Matematicamente esta transformação corresponde a uma rotação de eixos coordenados (JUDICE, 1976) e pode ser explicitada como:

$$V_{x'} = V_x \cos \alpha - V_y \sin \alpha \quad (42)$$

$$V_{y'} = V_x \sin \alpha + V_y \cos \alpha \quad (43)$$

onde,

V_x é a componente horizontal original do sinal processado

V_y é a componente vertical original do sinal processado

$V_{x'}$ é a componente horizontal modificada do sinal processado

$V_{y'}$ é a componente vertical modificada do sinal processado

α é o valor da inclinação imposta ao sistema

A possibilidade de ajustar a inclinação das figuras apresentadas é fundamental na etapa de calibração do ensaio, uma vez que o processo de avaliação das descontinuidades é baseado nos ângulos de fase registrados. O código ASME (1992), estabelece alguns procedimentos para proceder-se a uma calibração. Para o modo diferencial recomenda:

- Estabelece-se uma frequência de ensaio e ajusta-se o controle de ganho do sistema de testes, de modo a obter o sinal resultante da passagem da sonda pelas descontinuidades correspondentes a 20% de perda de espessura do padrão de referência utilizado. A amplitude deste sinal deve ser de pelo menos 30% da altura total da tela de apresentação do osciloscópio.
- Ajusta-se o controle de fase do sistema de testes, de maneira que este mesmo sinal se forme segundo as direções e sentidos mostrados na FIG 19, ao ser a sonda puxada através do padrão de referência, partindo do centro da tela: Primeiro para baixo e para a esquerda, depois para cima e para o centro, a seguir para cima e para

a direita e finalmente para baixo voltando ao centro da tela. A inclinação desta figura é definida como sendo o ângulo formado entre o eixo das abcissas e o segmento de reta que passa sobre a figura segundo as direções 2 e 3 apresentadas nesta ilustração. Adotou-se o sentido de rotação horário como referência.

- Gera-se a figura correspondente à descontinuidade de 100% de perda de espessura, puxando-se a sonda através do padrão de referência. Deve-se verificar sua formação conforme as direções ilustradas na FIG. 19. O valor da diferença entre as inclinações das figuras de 20% e 100% de perda de espessura, deve estar entre 50 e 120 graus, dependendo da frequência de teste estabelecida. Se o valor estiver fora desta faixa, a frequência de testes deverá ser modificada.
- Ajusta-se o controle de fase do sistema de testes, de modo que o sinal correspondente à vibração ou o sinal correspondente ao rasgo circunferencial interno de 10% de perda de espessura, fiquem posicionados ao longo do eixo das abcissas, com uma tolerância de 5 graus.
- Verifica-se que a inclinação da figura correspondente à descontinuidade de 100% de perda de espessura apresenta uma inclinação de aproximadamente 40 graus.

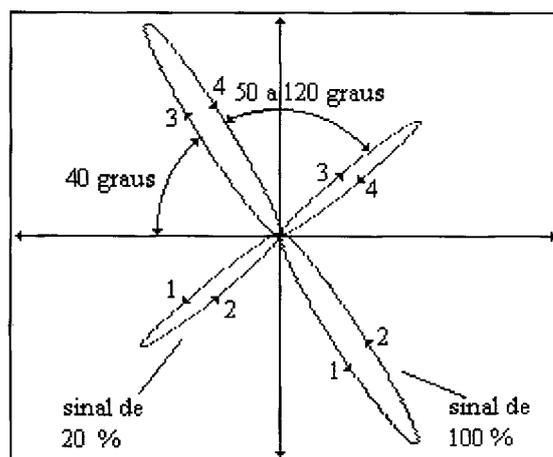


FIGURA 19 - Formação de figuras segundo o código ASME (1992).

Uma vez estabelecidas as condições de calibração para uma determinada condição de operação, deve ser levantada uma curva de avaliação, a partir do registro e medição das inclinações das descontinuidades existentes no tubo-padrão de referência.

A FIG. 20 apresenta alguns sinais típicos observados na tela do osciloscópio de um sistema de testes corretamente calibrado. A FIG. 21 mostra a curva de avaliação obtida para estes sinais.

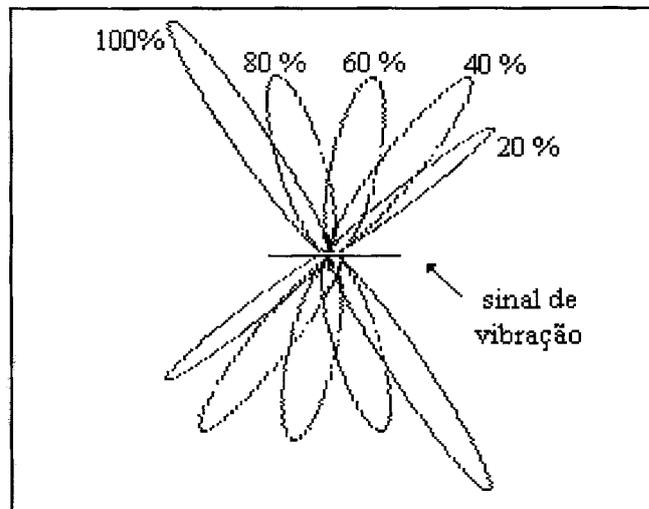


FIGURA 20 - Figuras de Lissajous para um tubo-padrão de referência ASME (1992).

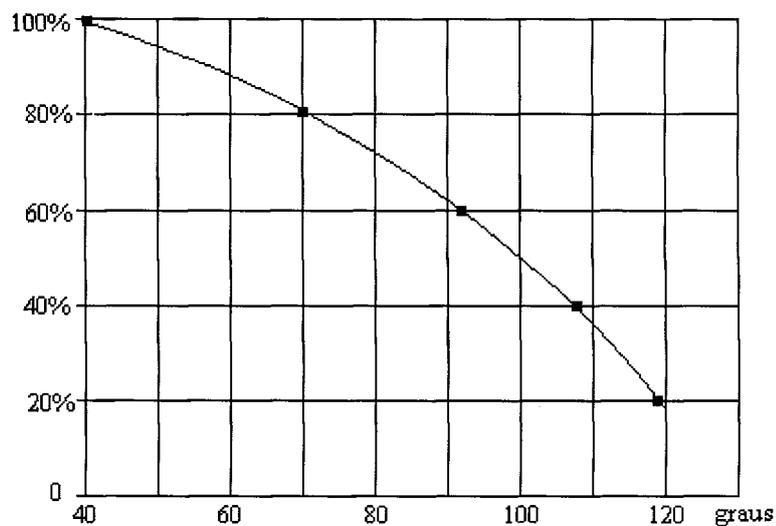


FIGURA 21 - Curva de avaliação correspondente aos sinais apresentados na FIG. 20.

Tendo sido efetuada a calibração do sistema de testes, e levantada a curva de avaliação correspondente, pode-se proceder então à inspeção dos tubos que constituem os objetos de teste. Obviamente apenas poderão ser avaliados, tubos cujas características físicas e dimensionais forem idênticas àquelas do padrão de referência. Também as condições de teste estabelecidas durante a calibração, deverão permanecer inalteradas. O estabelecimento de outras condições, por qualquer razão, implicará obrigatoriamente na realização de novo processo de calibração (ASME, 1992).

A maioria dos equipamentos de teste utilizados no ensaio por correntes parasitas, requer que durante sua operação seja efetuado um balanceamento eletrônico do sistema. Para tanto deve-se posicionar a sonda em uso numa região absolutamente livre de descontinuidades no interior do tubo-padrão, e pressionar uma chave adequada no painel do aparelho. Com isso, a ponto de operação do sistema de testes, equivalente à extremidade do vetor impedância nas condições estabelecidas, é levado para o centro da tela do osciloscópio. Dependendo da tecnologia empregada na construção do equipamento, o período de tempo recomendado pelo fabricante para cada balanceamento, pode variar entre alguns minutos até horas. Os sistemas mais modernos, que empregam tecnologia de processamento digital apresentam balanceamento permanente (ECT, 1994).

Durante o ensaio, a sonda é introduzida nos tubos, até sair na extremidade oposta à de inserção, através de um cabo elétrico que a interliga ao sistema de testes. Através de um dispositivo eletro-mecânico tracionador, a sonda é então puxada com velocidade constante, da ordem de 10 a 30 cm/s, até ser completamente retirada do tubo. A existência de descontinuidades traduz-se na formação de figuras de Lissajous na tela do dispositivo de visualização do sistema de testes. Na sua ocorrência deve-se estabelecer então, correlações entre a inclinação das figuras registradas e os valores correspondentes, obtidos da curva de avaliação previamente levantada. Esta tarefa é denominada como processo de avaliação. Verifica-se que o parâmetro *amplitude* não é relevante neste processo (ASNT, 1986).

Opcionalmente, podem ser utilizados recursos para registrar os sinais correspondentes aos tubos ensaiados. Para tanto utilizam-se: registradores gráficos (GOULD, 1980), gravadores de instrumentação (HEWLETT-PACKARD, 1981) ou sistemas de aquisição de dados por computador (ALENCAR, 1994).

Em linhas gerais, o ensaio de tubos por correntes parasitas, utilizando a técnica de frequência simples e sonda interna em arranjo diferencial, realiza-se deste modo. Técnicas especiais têm sido utilizadas, no sentido de tornar as inspeções mais eficazes. Contudo, para os objetivos estabelecidos para este trabalho, é suficiente a abordagem apresentada.

2.2 Simulação como recurso didático

2.2.1 Conceitos gerais

A expressão *simulação*, é empregada na atualidade, com vários significados e com diversos propósitos. De fato, este termo assume nuances múltiplas, pois existem e estão sendo utilizados, diversos tipos de simulação, dependendo da área de aplicação (LUNETTA. & HOFSTEIN, 1981). Apresentam-se a seguir algumas definições encontradas para o mesmo:

"Simulação é o processo de projetar um modelo de um sistema real e com este conduzir experimentações, visando tanto compreender o comportamento do sistema quanto avaliar as várias estratégias para sua operação" (SHANNON, 1979).

"Simulação é um método usado para estudar a dinâmica de sistemas" (PAYNE, 1982).

" Simulação é colocar o indivíduo num arranjo realístico, onde ele é confrontado por uma situação problemática que requer sua participação ativa na inicialização e condução de questionamentos, decisões e ações." (McGUIRE, 1976)

" Simulação é o uso de um modelo, para estudar o comportamento de um sistema, ou seja, para verificar como este sistema reage a mudanças." (ROSENBAUM, 1970)

" Simulação é o processo de interagir com um modelo que representa a realidade." (LUNETTA & HOFSTEIN, 1981)

" Simulação é um sistema construído para representar um modelo teórico, de maneira que seus parâmetros possam ser alterados e os efeitos decorrentes sejam prontamente observados." (TAWNEY, 1976)

São particularmente adequadas aos objetivos do presente trabalho de pesquisa, as duas últimas citações.

2.2.2 O valor da prática para o ensino tecnológico

Nos processos de ensino-aprendizagem relacionados com disciplinas, cujos conteúdos enfocam aspectos científicos e tecnológicos, as atividades práticas constituem indiscutivelmente parte relevante. É pelo exercício de experimentações, que muitos conceitos teóricos fundamentais ganham forma e consolidam os processos de cognição. Sem o exercício da prática, muitos conteúdos tendem a permanecer distantes e desvinculados da realidade. Segundo MOORE & THOMAS (1983) os objetivos a serem alcançados por estas atividades, podem ser agrupados em quatro categorias gerais:

- Desenvolver técnicas e habilidades manipulativas;
- Consolidar fundamentos teóricos e ensinar conceitos;
- Destacar o método científico;
- Motivar e estimular interesses.

Todas estas categorias, levam em conta elementos dos domínios cognitivo, afetivo e psico-motor. Do ponto de vista pedagógico as atividades práticas de laboratório devem essencialmente ajudar o aluno a:

- Identificar as questões básicas em estudo;
- Identificar conceitos-chave no experimento;
- Identificar fenômenos físicos fundamentais;
- Descrever o método empregado para resolver os problemas propostos;
- Relatar os resultados obtidos.

Diversos fatores contribuem tanto para o sucesso quanto para o fracasso no processo de desenvolvimento de tais atividades, principalmente nas etapas iniciais das experimentações, quando são enfrentadas as previsíveis dificuldades inerentes ao contato do aluno com o novo e o desconhecido.

Primeiramente pode ser questionada a prática pedagógica exercida pelo professor-orientador no recinto do laboratório. O aproveitamento de seus alunos dependerá fundamentalmente de seu preparo, domínio e habilidade em manipular adequadamente os equipamentos e materiais envolvidos em cada atividade; do gerenciamento adequado do tempo disponível para o desenvolvimento dessas atividades, e ainda de sua capacidade em esclarecer as frequentes situações de dúvida.

Em segundo lugar, verificam-se as questões ligadas ao planejamento e à organização das atividades, que têm lugar antes mesmo de seu início. Assim, ao planejar os experimentos, é importante haver sintonia e sincronia entre os conteúdos teóricos apresentados e desenvolvidos em classe, e suas contrapartes de cunho prático. Simples desajustes nesta condução, podem comprometer o sucesso de um programa estruturalmente bem planejado, mas dinamicamente mal conduzido. Neste sentido, o próprio plano de aula ocupa papel fundamental para um adequado desempenho das atividades previstas. Para tanto, os roteiros das práticas elaborados devem procurar tanto explorar as facilidades e recursos operacionais disponíveis, quanto motivar e despertar nos alunos interesses latentes.

Por último, apresenta-se o fator material. Bons desempenhos nas atividades práticas e conseqüente alcance de objetivos, dependerão sobremaneira da qualidade e funcionalidade dos recursos materiais disponíveis. Assim as instalações dos laboratórios utilizados devem ser seguras e fisicamente adequadas ao desenvolvimento dos trabalhos. Também os equipamentos e acessórios aí empregados devem estar em boas condições de operação, uma vez que os dados resultantes das medições realizadas, devem ser confiáveis e estar alinhados com os propósitos das experimentações, de modo a garantir ao aluno, condições adequadas de desenvolver raciocínios que lhe permitam chegar às conclusões corretas.

2.2.3 Experimentação: virtual ou real ?

Por muitos anos cientistas e engenheiros, numa variedade de aplicações, têm utilizado técnicas de simulação, para manipular modelos representativos da realidade, visando compreender o funcionamento de sistemas complexos. As indústrias aero-espacial e naval frequentemente utilizam muitas destas técnicas, durante o desenvolvimento de novos produtos. Outras tem sido muito utilizadas no treinamento e formação de astronautas e pilotos de aviação civis e militares. Os avanços da eletrônica e da informática contribuíram para a difusão e popularização do uso de simulações até mesmo nos ambientes residenciais onde jogos eletrônicos, que efetivamente são simulações computadorizadas, tem sido amplamente utilizados.

De acordo com OLIVER e OKEY (1986), as simulações por computador tem produzido grande incremento na qualidade e no emprego de sistemas instrucionais assistidos por computador (CAI). Os primeiros sistemas implementados, eram dirigidos ao desenvolvimento específico de habilidades, mas com a evolução da capacidade de processamento das máquinas tem-se observado um redirecionamento de propósitos, visando alcançar objetivos de maior profundidade. Neste sentido, as simulações por

computador são particularmente importantes, porque permitem a interação com situações desfavoráveis no mundo real. Estas são as chamadas razões logísticas de utilização. LUNETTA & HOFSTEIN (1981), citam quatro casos principais:

- situações de risco ou perigo;
- situações de alto custo financeiro;
- situações de execução complexa;
- situações envolvendo grandes lapsos de tempo.

Com excessão da primeira, todas estas razões estão contempladas no sistema de simulação ora desenvolvido, uma vez que:

- A implantação de um laboratório de END aplicável à inspeção de tubos por correntes parasitas, tem custo muito superior ao de um microcomputador pessoal (IBM- PC-AT).
- Para sua efetiva utilização, este laboratório requer a confecção de sondas e padrões de calibração, assim como de tubos com descontinuidades diversas.
- O tempo necessário para o desenvolvimento de tais recursos é bastante significativo.

Do ponto de vista funcional, a utilização de simulações deve ser capaz de conferir ao aluno condições para:

- tomar decisões;
- testar hipóteses;
- obter dados;
- observar e influir em conseqüências;
- chegar a conclusões.

Como em diversas outras situações e discussões envolvendo processos de ensino-aprendizagem, há correntes que defendem e outras que criticam o uso das técnicas de simulação em substituição às atividades convencionais. MOORE & THOMAS (1983), desenvolveram estudos enfocando diversos aspectos relacionados com o seu uso. Do ponto de vista pedagógico estes autores analisam positivamente o uso destas técnicas como alternativa viável ao trabalho de laboratório, além de apresentar e rebater algumas críticas. Na sustentação desta posição, argumentam eles

que algumas destas críticas procedem e são aplicáveis em certos casos, onde fatores como a qualidade dos programas de simulação, o grau de realismo nos ambientes simulados, ou a ocorrência de confusões conceituais entre real e virtual, são questionáveis. Contudo contra-argumentam eles, no sentido de que essas falhas são superáveis, na medida em que se estende e se intensifica o uso de recursos computacionais em praticamente todas as atividades curriculares da escola.

Outra tese apresentada por MOORE & THOMAS (1983), refere-se à postura de alguns professores que recusam-se a utilizar simulações, alegando que o trabalho real da maioria dos cientistas, em geral não as empregam. Estes autores ressaltam contudo, que cientistas estão engajados em fazer ciência, enquanto que alunos são orientados para aprender sobre ciência, o que não é a mesma coisa. De fato, verifica-se na atualidade, que diversas pesquisas científicas e muitas conquistas tecnológicas, têm sido conduzidas e atingidas por meio de simulações. SILVA (1993), verificou os efeitos da substituição das atividades práticas realizadas em laboratórios convencionais, para a disciplina Eletrônica Digital dos cursos técnicos de Eletrônica e Informática do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, (CEFET-MG), por programas de simulação computadorizadas. Ao comparar e avaliar o desempenho dos alunos trabalhando nas duas condições, o pesquisador concluiu que, para praticamente todos os itens pesquisados, as atividades realizadas por simulação mostraram-se de alguma forma superiores ou mais eficientes que as atividades conduzidas pelos meios tradicionais.

2.2.4 Construindo modelos de simulação

Segundo MITTRA (1986), a despeito da metodologia utilizada ou dos recursos técnicos empregados para seu desenvolvimento, um modelo de simulação é sempre construído para alcançar um dos seguintes objetivos.:

- Descrever um sistema existente;
- Explorar um sistema hipotético;
- Projetar e aperfeiçoar um sistema.

Neste sentido, os passos envolvidos na construção de um programa de simulação são os seguintes:

Passo 1 *Formular o modelo.* Significa estabelecer uma base fundamental, onde são estabelecidos os objetivos a serem alcançados de maneira muito similar aquelas

estabelecidas nos processos de modelamento matemático, porém ao contrário daqueles, sem excessiva preocupação com a inclusão de grande número de detalhes.

Passo 2 *Projetar o experimento*. Significa trabalhar no detalhamento dos procedimentos experimentais. Nesta fase cabem questões como: Quais as características do sistema simulado devem ser quantificadas? Qual a extensão dos detalhes envolvidos?

Passo 3 *Desenvolver o programa de computador*. Utilizando linguagens de programação adequadas tais como: FORTRAN, C, PASCAL ou ainda linguagens específicas de simulação tais como: GPSS, DYNAMO ou SYMULA; gerar os códigos necessários à efetiva implementação dos procedimentos estabelecidos.

Para efeitos práticos de treinamento, na maioria das vezes como constatado por GAGNÉ (1962), um sistema de simulação apresenta as seguintes características gerais:

- Uma simulação representa uma situação real, onde operações ou interferências podem ser efetuadas;
- Uma simulação dá a seu usuário, certo controle sobre o problema ou situação proposta;
- Uma simulação omite certas variáveis que são consideradas irrelevantes ou não importantes para atingir o objetivo instrucional pretendido.

Assim, ao desenvolver um programa de simulação, seu autor deve decidir quais elementos da realidade devem ser incluídos e quais devem ser omitidos, baseando-se nos objetivos instrucionais e na natureza do sistema a ser simulado. Frequentemente, simulações são utilizadas por razões logísticas, mas em outros casos seu uso é justificado pela simplificação da prática através da redução do número de variáveis ativas na simulação (LUNETTA & HOFSTEIN, 1981). Neste sentido, DALE (1969), afirma que, por se tratar de uma versão modificada da realidade, uma simulação pode facilitar sua compreensão por parte do aluno.

Nas estratégias de desenvolvimento de programas de simulação, há espaço para o emprego de *regras heurísticas*. Segundo PEARL (1985), heurística são critérios, métodos ou princípios, que permitem decidir qual dentre várias alternativas de ação, promete ser a mais eficiente para que seja atingido um objetivo. *Mecanismos de pesquisa heurística* são amplamente utilizados nos chamados *sistemas especialistas*. De acordo com LEVINE et al., (1988), em tais sistemas os objetivos são alcançados com

base no conhecimento de fatos, regras, mecanismos de inferência e mecanismos de poda. Na FIG. 22, tem-se uma representação de como funciona o processo de poda num sistema especialista.

Na resolução de alguns problemas envolvendo o emprego de regras heurísticas e correspondentes mecanismos de pesquisa, PEARL (1985), apresenta várias metodologias dentre as quais destaca a heurística baseada em amostragem. Em termos gerais, tal metodologia envolve inferir algumas propriedades válidas para um grande conjunto de elementos, a partir de outras, selecionadas de um pequeno subconjunto de elementos representativos.

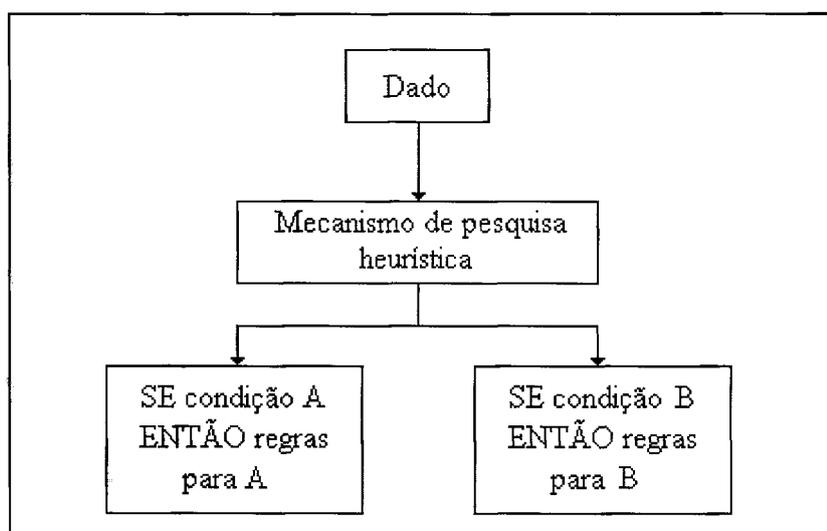


FIGURA 22 - Como funciona a poda num sistema especialista.

FONTE: LEVINE et al., 1988, p. 23.

Para o desenvolvimento do sistema SIMPAR, empregou-se concretamente grande parte das estratégias, e proposições pesquisadas e apresentadas. Em particular destacam-se os aspectos relacionados com o uso dos mecanismos de pesquisa heurística e em especial a heurística baseada em amostragem. No capítulo 3, descreve-se objetivamente a formulação da estratégia de simulação empregada e os processos de coleta experimental de dados envolvidos para sua construção.

3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

3.1 Introdução

Para o desenvolvimento de um programa de simulação, voltado para a realização de atividades práticas relacionadas com o ensaio por correntes parasitas, em substituição às atividades convencionais, devem-se estabelecer modelos capazes de permitir o estabelecimento das estratégias gerais para sua operação.

Tradicionalmente, os fenômenos relativos a este ensaio têm sido modelados analiticamente. As equações diferenciais que os descrevem podem ser resolvidas por técnicas clássicas, desde que se façam considerações envolvendo as não-linearidades e a geometria do material em questão. É frequente na literatura a utilização de tais modelos como referências teóricas capazes de fundamentar física e matematicamente o processo de geração das correntes parasitas. SOARES (1976) e STEGMANN (1990), fazem a determinação da distribuição da intensidade do campo magnético, em corpos de prova ou objetos cilíndricos, a partir das equações de Maxwell da eletrodinâmica. Tais modelos prestam-se muito bem à solução de problemas hipotéticos, mas nas condições de contorno impostas fazem-se tantos cortes e simplificações, que o modelo não pode ser utilizado em aplicações realísticas, como por exemplo para a caracterização de descontinuidades.

Uma possível alternativa ao emprego das técnicas de modelamento analítico é o uso de processos de modelamento numérico, e em particular das técnicas de análise por elementos finitos (PALANISAMY & LORD, 1979). Tais técnicas permitem a manipulação das condições de contorno correspondentes a diversos tipos de descontinuidades, bem como de outras não-linearidades existentes nos materiais. COSTA JÚNIOR et al. (1993), apresentam os fundamentos do processo de modelamento por elementos finitos, que pode ser seguramente definido como sendo o mais preciso processo de modelamento matemático, utilizável para resolver problemas de elevado nível de complexidade. Num modelamento típico, é possível determinar valores de impedâncias complexas para sondas genéricas, em variadas condições de contorno. Para tanto, representa-se numa malha tridimensional, o domínio de estudo, levando em conta as condições de contorno de cada região do mesmo: o material a ser testado, a sonda de teste, e a descontinuidade desejada. Para cada nó desta malha são impostas condições de operação de acordo com as *equações de Maxwell* para o

eletromagnetismo, através de processos numéricos. Para a obtenção de resultados válidos aceitáveis, o número de nós para uma única situação hipotética de modelamento pode chegar a ordem de milhares.

Assim, para simular uma simples passagem de uma sonda de testes por uma descontinuidade qualquer, torna-se necessário estabelecer-se uma sequência de arranjos físicos, cada qual com um posicionamento diferente entre a sonda de ensaio e a descontinuidade em questão. O cálculo das impedâncias complexas para cada condição estática e conseqüente registro gráfico representativo no plano de impedâncias, poderá então refletir as formas de figuras de Lissajous verificadas em situações do mundo real.

Evidentemente, o volume de dados a processar torna-se muito grande, exigindo então o uso de computadores com elevada capacidade de trabalho. Segundo COSTA JÚNIOR et. al. (1993), numa workstation Hewlet-Packard, modelo 9000, o modelamento para uma única descontinuidade numa condição de contorno hipotética, exige um tempo de processamento da ordem de vinte minutos. Portanto, pode-se concluir que os processos de modelamento numérico não podem ser facilmente implementados em microcomputadores comuns, hoje tipo IBM-PC, permitindo o estabelecimento de modelos de simulação, executáveis em tempo relativamente pequeno. Do ponto de vista operacional, esta é uma característica fundamental para uma adequada performance, em qualquer programa de simulação utilizável em atividades de ensino.

Propõe-se assim, o estabelecimento de uma estratégia alternativa capaz de levar a construção de um sistema de simulação empregando regras e mecanismos de pesquisas heurísticas baseadas em amostragem real de dados, nos moldes daquelas empregadas em sistemas especialistas, e que passará a ser descrita a seguir.

3.2 Delimitação do campo de abrangência

O ensaio não destrutivo por correntes parasitas, apresenta-se como solução para a resolução de problemas de inspeção em situações muito diversas, como foi discutido no capítulo 2. Cada situação de teste possui peculiaridades próprias. Podem-se indicar algumas variações nas condições gerais do ensaio:

Quanto à avaliação:

- Pela análise de amplitude de sinais;
- Pela análise da fase e amplitude (plano de impedância);
- Pela análise da modulação.

Quanto ao arranjo das sondas de ensaio:

- Diferencial;
- Absoluto ou referência.

Quanto ao tipo e/ou geometria das sondas:

- Superficial;
- Interna;
- Envolvente.

Quanto ao método de supressão de variáveis indesejáveis:

- Utilizando-se monofrequência;
- Utilizando-se multifrequência e mistura vetorial.

Quanto aos objetos de inspeção:

- Chapas e placas;
- Barras, tarugos e perfis;
- Tubos soltos ou instalados em componentes de troca térmica.

Quanto ao objetivo da inspeção:

- Detectar e avaliar descontinuidades localizadas;
- Detectar e avaliar variações dimensionais graduais;
- Separar materiais através da medição de sua condutividade elétrica;
- Medir espessuras de materiais eletricamente condutores;
- Medir espessuras de revestimentos condutores e não condutores aplicados sobre bases eletricamente condutoras;

Verifica-se assim, que a elaboração de um programa capaz de simular com eficiência, tão vasto conjunto de possibilidades, exigiria um grande volume de trabalho em atividades de pesquisa e coleta experimental de dados e, conseqüentemente, bastante tempo no desenvolvimento da programação. Tornou-se necessário então proceder-se à uma delimitação do campo de abrangência do programa de simulação e das metas a serem atingidas nesta fase do projeto de pesquisa, buscando marcos

referenciais alcançáveis. Para a área nuclear, é de especial interesse a inspeção de tubos pela técnica de correntes parasitas, uma vez que estas são muito utilizados na construção de importantes componentes em usinas nucleares, tais como:

- Tubos de Zircaloy, presentes como elementos de sustentação e revestimento de pastilhas, em varetas combustíveis;
- Tubos de aço inoxidável ou inconel 600, presentes no gerador de vapor;
- Tubos de titânio, presentes nos condensadores;
- Tubos de latão e cobre-níquel, presentes em trocadores de calor.

Inspeções de tubos iniciam-se antes mesmo das etapas de fabricação e instalação dos componentes acabados. Em geral seus fabricantes realizam ensaios de pós-fabricação. É também muito comum a realização de inspeções quando de seu recebimento pelas indústrias fabricantes de trocadores de calor para a área nuclear. Todos estes cuidados são tomados em função da segurança geral da instalação. Dentre as diversas variações das técnicas e métodos de ensaio é bastante utilizada a seguinte combinação:

- | | |
|------------------------|---|
| • Elemento transdutor: | Sonda interna (arranjo diferencial). |
| • Método de análise: | Plano de impedância. |
| • Técnica de inspeção: | Monofrequência. |
| • Objetos de ensaio: | Tubos não instalados (soltos). |
| • Objetivo do ensaio: | Detecção de descontinuidades localizadas. |

Para os objetivos deste trabalho de pesquisa, optou-se pela escolha deste conjunto. Mesmo com esta delimitação, poderão ser desenvolvidas atividades práticas bastante complexas do ponto de vista operacional, comparadas às outras combinações de variações do ensaio. Além disso, a futura expansão da capacidade de simulação em programas mais complexos poderá ser realizada à partir da estratégia estabelecida e dos algoritmos desenvolvidos, desde que sejam devidamente adaptados.

3.3 Coleta experimental de dados

Uma vez definidas as condições gerais e restritas a serem simuladas, a metodologia de simulação heurística, requer o estabelecimento de uma base de dados e informações, obtidos através de experimentação em laboratório, e que servirá de referência para o programa de simulação.

3.3.1 Tubos-padrão

A TAB. 2 apresenta as características técnicas dos diversos tubos utilizados na confecção de padrões de ensaio de acordo com o código ASME (1992). Os detalhes de construção e os relatórios de ensaio dimensional destes encontram-se no ANEXO A2. A FIG. 23 é uma fotografia dos tubos-padrão usinados e utilizados neste trabalho.

TABELA 2

Características técnicas de tubos utilizados na confecção padrões.

Tubo	Material	Diâmetro externo (mm)	Espessura de parede (mm)	Resistividade ($\Omega \cdot m$)
T1	Aço inox 304	25,4	1,24	6,897 E-7
T2	Latão	19,05	1,53	6,836 E -8
T3	Titânio	25,40	0,68	6,527 E -7



FIGURA 23 - Fotografia dos tubos-padrão usinados.

3.3.2 Sondas de ensaio

Para cada tubo-padrão disponível, foi confeccionada uma sonda de ensaio. Os detalhes de construção e características técnicas das mesmas, encontram-se no ANEXO A2. A FIG. 24 é uma fotografia que mostra estes transdutores. A equação (44) permite a determinação das frequências ótimas de ensaio, para cada tubo-padrão (SOARES, 1976):

$$F_0 = \frac{10 \rho}{W^2} \quad (44)$$

onde,

- F_0 é a frequência ótima em Hz
- ρ é a resistividade do material em $\mu\Omega\cdot m$
- W é a espessura do tubo em polegadas

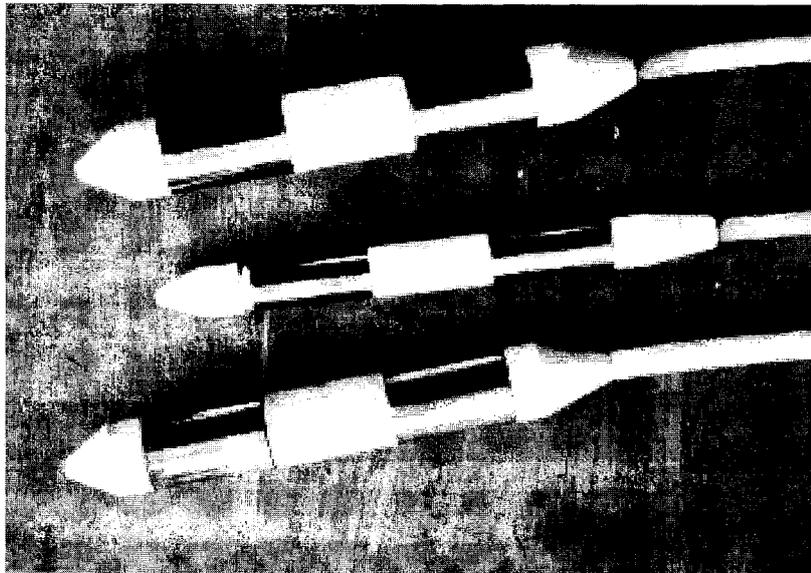


FIGURA 24 - Sondas de teste utilizadas para o ensaio de tubos-padrão.

A TAB. 3 apresenta os valores de frequência ótima calculados de acordo com este critério para todos os tubos padrão disponíveis.

TABELA 3

Frequências ótimas calculadas para os tubos padrão usadas.

Sonda	Tubo-padrão	Material	Frequência ótima (KHz)
S1	T1	Aço inox 304	310
S2	T2	Latão	16,5
S3	T3	Titânio	340

3.3.3 Instrumentação utilizada

Para a realização dos testes iniciais, visando estabelecer os parâmetros de calibração previstos pelo código ASME (1992) para a frequência ótima em cada tubo-padrão, foi utilizada a seguinte instrumentação:

- Equipamento de teste marca Zetec, modelo MIZ-12;
- Osciloscópio de armazenagem marca Tektronix, modelo 5111;
- Sistema computadorizado de aquisição, registro e análise de dados, SADCO 2.

As características técnicas dos equipamentos de teste encontram-se no ANEXO A2. A FIG. 25 é uma fotografia do processo de coleta experimental de dados. Pode-se observar que os sinais detectados pelos equipamentos de teste, são enviados a um sistema de aquisição de dados computadorizado, onde são armazenados e analisados. Com isto foi possível promover a medição e o registro de valores de amplitude e inclinação das figuras de Lissajous correspondentes às descontinuidades detectadas, quando da formação da base de dados utilizada pelo programa SIMPAR (seção 3.4). O sistema de aquisição registro e análise de dados SADCO 2, foi especialmente desenvolvido para incrementar a performance da instrumentação disponível para uso (ALENCAR, 1994), garantindo precisão e rastreabilidade aos

experimentos conduzidos. Maiores detalhes técnicos e operacionais, sobre a construção e utilização prática do sistema de aquisição de dados SADC0 2, podem ser encontrados no ANEXO A3 desta dissertação.



FIGURA 25 - A coleta experimental de dados.

3.3.4 Medições efetuadas

Utilizando-se a instrumentação descrita, e sondas de ensaio adequadas a cada material, procedeu-se ao levantamento experimental dos valores das *inclinações primitivas* (em graus) e das *amplitudes* (em volts pico a pico), para todos os sinais correspondentes às descontinuidades existentes em cada tubo-padrão, em suas respectivas frequências ótimas. Empregou-se a expressão *inclinações primitivas*, em função de terem sido registradas fixando-se os valores dos controle de fase e ganho do sistema de ensaio em 0 (zero) e 69 respectivamente. *Estas condições mantiveram-se inalteradas durante todo processo de coleta de dados.*

O semi-eixo negativo das abcissas e o sentido horário foram considerados como referenciais de medição (ASME, 1992). Também foram registrados os valores das inclinações primitivas correspondentes aos sinais originados pela vibração da sonda ao percorrer o interior dos tubos. Após esta etapa inicial avaliou-se o comportamento dos sinais obtidos. A TAB. 4 resume os valores registrados para o tubo-padrão de

titânio utilizando-se a frequência de 310 KHz. Este valor foi escolhido, por estar próximo daquele correspondente à frequência ótima deste tubo-padrão, servindo como referência para comparações.

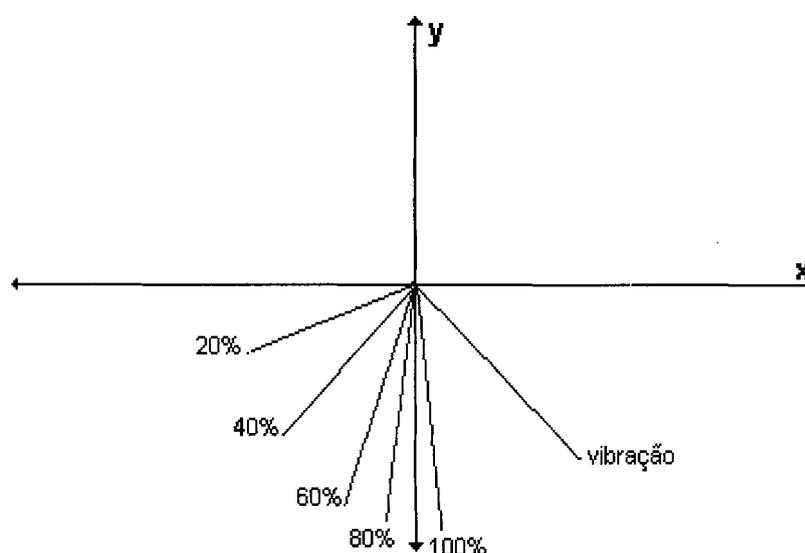
TABELA 4

Inclinações primitivas medidas para as descontinuidades do tubo padrão de titânio em 310 KHz.

Descontinuidade	Inclinação primitiva
Vibração	223
100 %	261
80 %	282
60 %	295
40 %	315
20 %	329

NOTA: Medidas em graus

A FIG. 26 apresenta na forma de diagrama vetorial, as inclinações correspondentes às descontinuidades registradas na TAB. 4.

**FIGURA 26 - Diagrama vetorial representativo das inclinações da TAB. 4.**

Ao estabelecer-se uma calibração de acordo com o código ASME, o sinal de vibração deve ser levado para a direção horizontal, pela atuação no controle de fase do aparelho de ensaio. Relacionar esta operação com os vetores mostrados na FIG. 27 corresponde a subtrair o valor da inclinação correspondente à vibração, 223 graus, de todos os demais. A figura FIG 27 representa o diagrama vetorial resultante desta operação. O sentido de medição corresponde ao estabelecido na seção 2.1.3.5 desta dissertação.

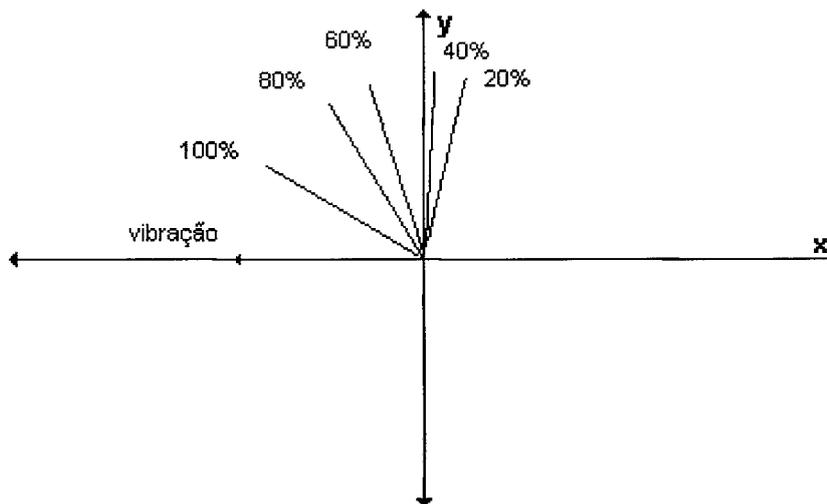


FIGURA 27 - Diagrama vetorial após a rotação de fase efetuada para a calibração.

Ainda de acordo com este código, podem-se registrar os valores de inclinação encontrados para as descontinuidades do tubo-padrão, num gráfico do tipo perda de espessura (percentual) versus inclinação (graus), obtendo-se uma curva de avaliação por análise de fase. A FIG. 28 apresenta a curva de avaliação levantada para o tubo-padrão de titânio, ensaiado na frequência de 310 KHz. Assim, conforme discutiu-se na seção 2.1.3.5, **a partir dos valores dos ângulos de fase válidos para descontinuidades cujas profundidades são conhecidas, determinam-se matematicamente as inclinações esperadas para descontinuidades de quaisquer profundidades.**

Após esta etapa, foram coletados e registrados outros dados em diferentes frequências de ensaio. A TAB. 5 apresenta os valores das inclinações primitivas medidas para estas frequências. Os dados obtidos para os demais tubos-padrão ensaiados, podem ser encontrados no ANEXO A4. A representação destes valores em curvas de avaliação pode ser observada na FIG. 29.

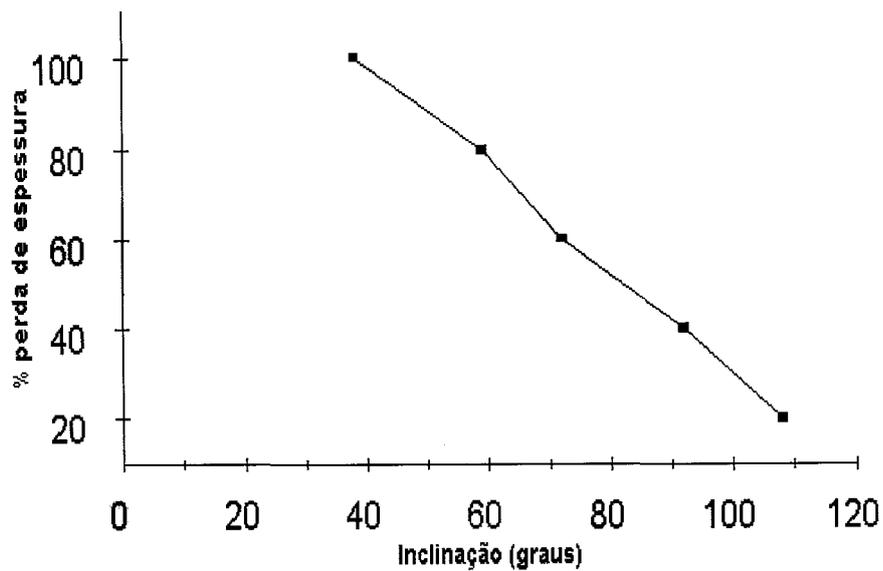


FIGURA 28 - Curva de avaliação por fase para o tubo de titânio ensaiado na frequência de 310 KHz.

TABELA 5

Inclinações primitivas relativas às descontinuidades do tubo-padrão T1 (titânio) em diversas frequências de ensaio.

Frequência (KHz)	Vibração	100%	80%	60%	40%	20%
50	140	160	163	166	173	177
100	160	188	195	203	215	223
200	190	227	242	253	266	276
400	250	288	315	330	353	373
800	385	430	495	524	548	565

NOTA: Medidas em graus.

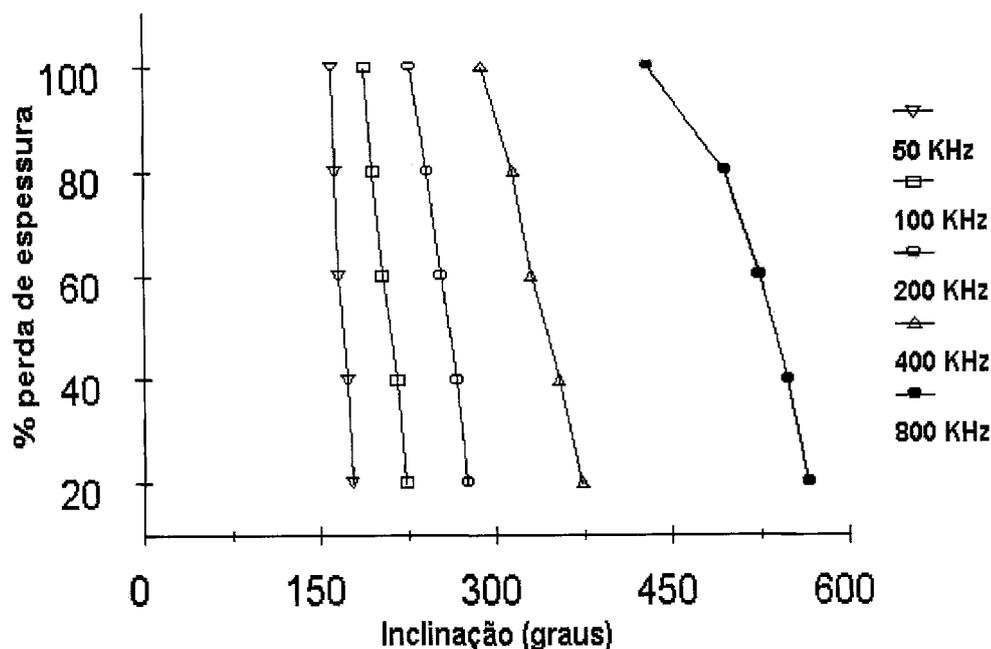


FIGURA 29 - Curvas correspondentes às inclinações primitivas obtidas para o tubo-padrão de titânio ensaiado em diversas frequências.

Levando-se em conta a forma de distribuição e a baixa dispersão dos dados representados nas curvas de avaliação apresentadas, pode-se chegar a seguinte conclusão: **Curvas de avaliação por fase, para frequências de ensaio compreendidas entre os valores previamente ensaiados, podem ser obtidas por processos numéricos.** Neste caso, torna-se necessário ajustar curvas aos dados tabelados experimentalmente, ou elaborar interpolações. Como os dados são precisos, a interpolação se aplica adequadamente.

Denotando-se por $f(x)$ a função contínua que fornece a inclinação exata para qualquer descontinuidade x , o processo de interpolação polinomial (BRICE et al., 1970) permite escrever:

$$f(x) = P_n(x) + R_n(x) \quad (45)$$

onde,

$P_n(x)$ é o polinômio interpolador de grau n , passando pelos $n+1$ pontos tabelados ($x_k, f(x)_k$).

O erro de truncamento cometido, $R_n(x)$, vale:

$$R_n(x) = (x - x_0) \dots (x - x_n) f[x, x_0, \dots, x_n] \quad (46)$$

onde,

$f[x, x_0, \dots, x_n]$ indica a diferença dividida, de ordem $n+1$, nos pontos x, x_0, \dots, x_n . Na equação (46), geralmente $f[x, x_0, \dots, x_n]$ é desconhecida, contudo pode ser estimada através de:

$$f[x, x_0, \dots, x_n] \cong f[x_{n+1}, x_0, \dots, x_n] \quad (47)$$

Da TAB. 5 e da FIG. 29, verifica-se que $f(x)$ é monotonicamente decrescente em x e comporta-se suavemente, isto é, não apresenta grandes variações. Portanto, é válida a estimativa dada pela equação (47). Então o grau da interpolação a efetuar será ditado por n , quando a diferença dividida de ordem n se anular, uma vez que o erro de truncamento será aproximadamente nulo.

De fato, através da TAB. 5, a diferença dividida máxima, de segunda ordem, relativa à frequência de 400 KHz (pior caso), para uma descontinuidade de 50% (um ponto de erro máximo), vale 0,01. Este valor levado na equação (47), conduz ao erro (máximo) de 1 grau. Assim, a interpolação linear aplica-se satisfatoriamente, uma vez que pelo código ASME (1992) aceitam-se erros da ordem de cinco graus.

A FIG. 30 apresenta uma curva de avaliação obtida por interpolação linear (BARROSO et al., 1987), para a frequência de 310 KHz, a partir das curvas traçadas para as frequências de 200 KHz e 400 KHz.

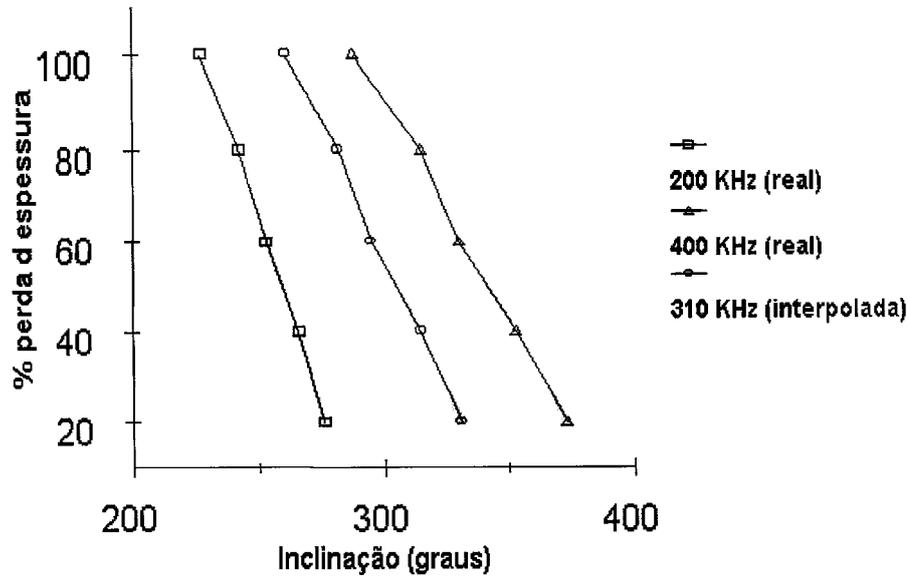


FIGURA 30 - Curva interpolada para o tubo T1 em 310 KHz.

Na TAB. 6 comparam-se os valores de inclinações interpolados, com aqueles obtidos por experimentação prática (considerando-se a frequência de ensaio como 310 KHz).

TABELA 6

Valores reais e interpolados para o tubo-padrão T1 (titânio) em 310 KHz.

Descontinuidade	Valor real	Valor interpolado	Erro
100%	261	261	-
80%	282	282	-
60%	295	295	-
40%	315	314	-1
20%	329	329	-

NOTA: Medidas em graus.

Registrando-se, além dos valores das inclinações, os valores das amplitudes dos sinais obtidos durante o processo de coleta dos dados, é também possível encontrar,

por interpolação, as amplitudes esperadas para todas as descontinuidades existentes no tubo-padrão. A TAB. 7 mostra os valores de amplitude correspondentes aos sinais das descontinuidades para o tubo-padrão de titânio ensaiado em várias frequências de ensaio. No ANEXO A4 são apresentadas tabelas para os valores de amplitude dos sinais coletados para os demais tubos-padrão ensaiados.

TABELA 7

Amplitudes relativas às descontinuidades do tubo padrão de titânio em diversas frequências de ensaio.

Frequência (KHz)	100%	80%	60%	40%	20%
50	2,5	2,4	2,4	3,0	3,8
100	5,0	4,8	4,6	5,3	6,6
200	8,8	7,8	7,6	7,7	10,0
400	18,0	16,0	17,0	13,0	12,0
800	6,0	5,8	5,7	6,6	5,6

NOTA: Medidas em Volts pico a pico.

3.4 A implementação do processo de simulação

3.4.1 Considerações gerais

No capítulo 2 discutiu-se sobre o processo de formação das figuras de Lissajous representativas dos sinais gerados pelas descontinuidades existentes num tubo, detectados pelas sondas de ensaio operando em modo diferencial e apresentados numa tela gráfica do tipo plano de impedância. De uma maneira geral o formato destas figuras é aproximadamente o mesmo, verificando-se que sua razão de aspecto pode variar em função da disposição geométrica dos enrolamentos das sondas de ensaio, da frequência de operação do sistema e das dimensões das descontinuidades (SOARES, 1976). Suas amplitudes dependem fundamentalmente da sensibilidade das sondas, das características operacionais do aparelho de ensaio (ganho, tensão de excitação e impedância) e também das dimensões das descontinuidades (STEGMAN, 1990).

De uma maneira geral, por mais que sejam variadas as condições, ao estabelecer-se uma calibração, para realizar um ensaio de tubos acôrdo com o código ASME (1992), verifica-se que a técnica de análise recai sempre na mesma metodologia discutida no capítulo 2. Assim, é importante lembrar que a característica fundamental à análise da figura, e que permite avaliar a profundidade da descontinuidade a ela relacionada é sua inclinação.

A amplitude dos sinais permite o estabelecimento de critérios de aceitação ou de rejeição durante a análise, em função de outros sinais existentes. Exemplificando, a amplitude do sinal correspondente à vibração da sonda, no interior do tubo, pode ser um destes referenciais. Neste caso o procedimento ou norma de trabalho deve estabelecer a menor relação sinal/ruído permissível para a realização do ensaio.

Durante o processo de coleta experimental de dados, as variáveis inclinação primitiva e amplitude das figuras de Lissajous foram criteriosamente registradas, mantendo-se rígidas as condições operacionais da instrumentação. Pode-se concluir então que para aquelas condições, é possível predeterminar através de interpolações, as inclinações primitivas aproximadas e amplitudes das figuras de Lissajous, correspondentes a cada tubo-padrão, que deverão formar-se dentro dos limites de frequência pré-estabelecidos e com fatores de erro inerentes ao processo interpolador.

Neste sentido, verificou-se que os valores de inclinação primitiva, registrados para cada tubo-padrão, apresentaram-se com uma dispersão relativamente pequena. No caso dos valores de amplitude, a dispersão é mais acentuada, mas este parâmetro, conforme discutiu-se no ítem 2.1.3.5, tem pouca relevância no processo de avaliação de descontinuidades. Assim, optou-se para o desenvolvimento do sistema SIMPAR, pelo método de interpolação linear, que pode ser implementado com facilidade, mantendo contudo fatores de erro suficientemente baixos para satisfazer as exigências da normatização utilizada, nominalmente de até 5 graus, (ASME, 1992).

3.4.2 Descrição do algoritmo fundamental de simulação

O objetivo que se pretende alcançar neste trabalho de pesquisa, não é apenas o de encontrar por interpolação, valores esperados de inclinação e de amplitude para figuras de Lissajous, correspondentes à descontinuidades genéricas, numa dada condição de contorno (para uma certa frequência e com um valor arbitrário de ganho). Na realidade, os valores encontrados deverão ser utilizados como referências, dentro de um processo de simulação, capaz de formar adequadamente cada figura, em conformidade com os mesmos. Para operacionalizar este processo, criou-se um algoritmo computacional, que constitui o núcleo principal do programa SIMPAR, e

passará a ser apresentado a seguir. Considerou-se primeiramente, que serão geradas figuras correspondentes às descontinuidades de 100%, 80%, 60%, 40% e 20% de perda de espessura, existentes num tubo-padrão ASME.

Procedimento 1

Escolhe-se o material à ser testado na simulação, dentre aqueles previamente inspecionados.

Procedimento 2

Estabelece-se uma frequência genérica de ensaio F_g .

Procedimento 3

Determinam-se, a partir de dados coletados experimentalmente, as constantes I_{100} a I_{20} , representando os valores das inclinações primitivas e as constantes A_{100} a A_{20} representando os valores de amplitudes dos sinais correspondentes às figuras de Lissajous geradas pelas descontinuidades existentes no tubo-padrão escolhido, na frequência F_g .

Procedimento 4

Cria-se uma matriz de rotação, de dimensão 2×2 , denominada R_{100} :

$$R_{100} = \begin{pmatrix} \cos I_{100} & -\sin I_{100} \\ \sin I_{100} & \cos I_{100} \end{pmatrix} \quad (48)$$

onde,

I_{100} é o valor da inclinação primitiva correspondente à descontinuidade de 100%

Procedimento 5

Armazenam-se em uma matriz M de dimensão 2×40 os valores $x_{(i)}$ e $y_{(i)}$ correspondentes às abscissas e ordenadas que compoem uma figura de Lissajous de referência com amplitude nominal A e inclinação zero grau, representada na FIG. 31.

$$M = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{40} \\ y_1 & y_2 & \dots & y_{40} \end{pmatrix} \quad \text{ou ainda} \quad M = \begin{pmatrix} x_{(i)} \\ y_{(i)} \end{pmatrix} \quad (49)$$

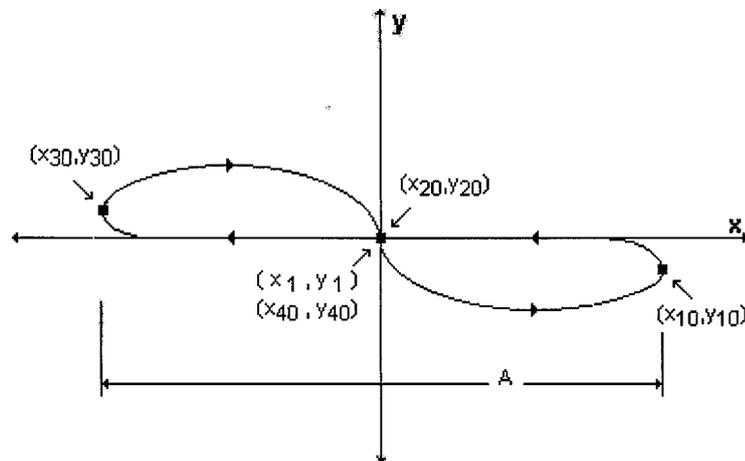


FIGURA 31 - Figura de Lissajous de referência.

Procedimento 6

Gera-se a matriz M_{100} , correspondente a figura de 100%, multiplicando-se a matriz M pela matriz de rotação R_{100} , e ainda pelo escalar A_{100} .

$$M_{100} = A_{100} R_{100} M \quad (50)$$

Procedimento 7

Geram-se de modo análogo, a partir da matriz M , as matrizes para as descontinuidades de 80%, 60%, 40%, e 20%; cada uma com sua rotação de eixos coordenados efetuada, com a matriz de rotação correspondente :

$$M_{80} = A_{80} R_{80} M \quad (51)$$

$$M_{60} = A_{60} R_{60} M \quad (52)$$

$$M_{40} = A_{40} R_{40} M \quad (53)$$

$$M_{20} = A_{20} R_{20} M \quad (54)$$

onde,

A_{80} a A_{20} são constantes proporcionais às amplitudes dos sinais das descontinuidades de 80% a 20%

R_{80} a R_{20} são matrizes de rotação correspondentes às inclinações das descontinuidades de 80% a 20% .

M é a matriz da figura de Lissajous de referência.

Procedimento 8

Cria-se uma matriz nula, MT , de dimensão 2×200 . A dimensão 200 representa o valor mínimo necessário para acomodar a transferência de cinco matrizes de dimensão 2×40 descrita no procedimento 9 desta descrição.

Procedimento 9

Transferem-se sequencialmente as matrizes M_{100} a M_{20} para a matriz MT . Algebricamente pode-se dizer que M_{100} a M_{20} são submatrizes de MT (KREYSZIG, 1980).

$$MT = (M_{100} \quad M_{80} \quad M_{60} \quad M_{40} \quad M_{20}) \quad (55)$$

Acessando-se sequencialmente a matriz MT, segundo um indexador genérico i , e representando-se numa área gráfica do monitor de vídeo todos os pares (x,y) de elementos desta matriz, formam-se as figuras de Lissajous correspondentes aos sinais gerados pelas descontinuidades existentes no tubo-padrão, cada uma com sua respectiva inclinação e amplitude.

Podem-se substituir as descontinuidades ora simuladas (100% a 20 % de perda de espessura), por outras de quaisquer profundidades, uma vez que é possível interpolar os valores de inclinação e amplitude a elas associados.

A implementação deste algoritmo através de uma linguagem de programação adequada, permite obter um programa preliminar de simulação. Entretanto as simulações desenvolvidas reproduzirão as mesmas condições operacionais estabelecidas durante a fase de coleta de dados, ou seja: os controles de fase geral e ganho do aparelho de ensaio ajustados para os valores 0 e 69 respectivamente. A única variável passível de alteração nestas condições é a frequência de ensaio. A possibilidade de alteração destes parâmetros durante a simulação é fundamental, e sua implementação será discutida a seguir.

3.4.3 Introdução de variações de fase e ganho no algoritmo de simulação

Numa situação real, ajustando-se o controle de fase no painel de controle de um sistema de ensaio para um valor qualquer, introduz-se uma rotação angular de mesma ordem em qualquer vetor que esteja sendo processado (ZETEC, 1984). Como durante a etapa de coleta de dados este controle foi ajustado para zero, as inclinações das figuras de Lissajous obtidas e registradas naquela oportunidade representam seu valores primitivos. Portanto o efeito de rotação angular e conseqüente alteração da inclinação de qualquer figura de Lissajous durante uma simulação, pode ser obtido adicionando-se ao valor I de inclinação primitiva, interpolado para cada descontinuidade, o valor Ra de rotação adicionada. Tomando-se como exemplo uma descontinuidade de 100%, a partir da equação (50) tem-se:

$$M_{100} = A_{100} R_{100+Ra} M \quad (56)$$

onde,

A_{100} é a constante proporcional à amplitude da descontinuidade de 100%

R_{100+Ra} é a nova matriz de rotação obtida para I_{100} adicionada de Ra

M é a matriz da figura de Lissajous de referência

Considerando-se que os circuitos eletrônicos de excitação, amplificação e demodulação de sinais que compõem o sistema de ensaios utilizado neste trabalho, podem ser considerados como sistemas lineares (MILLMAN & HALKIAS, 1972), e que durante a etapa de coleta de dados o ganho total deste sistema foi mantido num valor constante (máximo), pode-se afirmar que:

$$A_p = A_t \cdot G \quad (57)$$

onde,

A_t é a amplitude de um transiente gerado pela sonda de ensaio ao detectar uma descontinuidade.

A_p é a amplitude do transiente após seu processamento pelo aparelho de teste.

G é ganho total do sistema de ensaio.

Sendo o sistema linear, o efeito de redução no ganho geral e consequente diminuição no tamanho das figuras de Lissajous quando da realização de uma simulação, pode ser alcançado multiplicando-se o lado direito da equação (56) por uma constante G_s , de valor maior que zero e menor ou igual a um, e que será função do valor de ganho escolhido. Novamente para a descontinuidade de 100% tem-se:

$$M_{100} = G_s A_{100} R_{100+R_a} M \quad (58)$$

onde,

G_s é a constante de ajuste relativa ao ganho escolhido.

A_{100} é a constante proporcional à amplitude da descontinuidade de 100%.

R_{100+R_a} é a matriz de rotação obtida para I_{100} adicionada de R_a .

M é a matriz da figura de Lissajous de referência.

Em linhas gerais, o processo de simulação utiliza esta metodologia como base fundamental para a formação das figuras de Lissajous. Combinada com as facilidades operacionais e os recursos de interação também desenvolvidos e que estão descritos no capítulo 4, formam um ambiente virtual de trabalho para a inspeção simulada de tubos pela técnica de correntes parasitas, consolidando assim o objetivo almejado neste trabalho de pesquisa.

4 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SIMPAR

Neste capítulo faz-se uma descrição funcional do programa de simulação, denominado SIMPAR, e que foi desenvolvido a partir da estratégia proposta no capítulo 3 desta dissertação. Antes de passar-se a esta descrição, é conveniente tecer algumas considerações envolvendo certos aspectos fundamentais relacionados ao processo, e que influenciaram diretamente tanto no seu desenvolvimento quanto na qualidade dos resultados obtidos.

Um primeiro aspecto a considerar, foi a escolha da plataforma de desenvolvimento. Em nosso país, têm-se verificado uma generalizada disseminação de utilização de máquinas da linha IBM-PC-AT (e similares) em detrimento de outras (AMIGA, APPLE, etc.). Esta constatação acabou por conduzir, por uma questão fundamentalmente logística, à adoção desta linha de microcomputadores como plataforma de desenvolvimento do programa, uma vez que um dos objetivos deste trabalho, é promover uma maior difusão do ensaio por correntes parasitas.

Outro aspecto relevante, foi a escolha do ambiente de desenvolvimento. Em princípio, qualquer linguagem de programação poderia ser utilizada, desde que fosse capaz de permitir a implementação e compilação das rotinas e programas envolvidos no desenvolvimento do sistema de simulação científica. Para alcançar os objetivos pretendidos, optou-se pela linguagem TURBO-PASCAL versão 7.0, fabricado pela BORLAND INTERNATIONAL INC. , que mostrou-se bastante eficiente neste sentido. Dentre as características desta linguagem de programação que influenciaram para esta escolha podem-se citar:

- A elevada capacidade e qualidade de seu editor;
- A existência de um compilador integrado ao editor;
- A diversidade de diretivas de compilação;
- A natureza dos dados e parâmetros a serem passados entre procedimentos.
- A capacidade de processamento matemático;
- As amplas possibilidades de programação e geração gráfica;

Com relação ao sistema operacional, ainda que se verifique crescente número de usuários da interface WINDOWS, optou-se pelo desenvolvimento de uma versão do sistema SIMPAR executável a partir do MS-DOS (versão 3.xx ou superior).

A simples possibilidade de implementação do programa em plataformas que não suportam de modo adequado a implantação do WINDOWS, por limitação de memória por exemplo (COSENTINO, 1992), é suficiente para justificar esta decisão. De qualquer maneira, é perfeitamente possível a execução do sistema SIMPAR a partir do WINDOWS, sem qualquer restrição para sua operação.

Finalmente, optou-se a escolha do *mouse* como principal dispositivo de interação entre o usuário final e o sistema SIMPAR. Ainda que nas versões iniciais do programa, tenha-se utilizado o teclado com esta finalidade, a utilização do *mouse* mostrou-se bem mais eficiente e adequada às necessidades do sistema, principalmente em função das características ergonômicas inerentes ao processo interativo de um programa de simulação para testes de tubos. O uso deste dispositivo no ambiente TURBO-PASCAL 7.0, requereu a implementação de procedimentos e funções especiais (ALMEIDA, 1992). Do ponto de vista de instalação do programa desenvolvido, recomenda-se como mínima a seguinte configuração de hardware capaz de garantir um desempenho adequado do sistema:

- Microcomputador tipo IBM-PC-AT 386;
- *Mouse* tipo MICROSOFT (ou similar) conectado à porta COM 1;
- Monitor de vídeo padrão VGA (ou superior) a cores;
- Impressora gráfica matricial padrão EPSON (ou similar).

O ANEXO A5 descreve detalhadamente os equipamentos e recursos computacionais efetivamente utilizados para o desenvolvimento do sistema SIMPAR, assim como a configuração recomendada para a sua instalação e utilização

4.1 O ambiente virtual de trabalho

Como foi discutido no capítulo 2 desta dissertação, a realização de atividades práticas relacionadas com a inspeção de tubos através do ensaio por correntes parasitas, tanto a nível de treinamento quanto em situações reais de teste, requer a utilização de recursos materiais e operacionais adequados. Assim, para permitir a execução destas atividades através de simulações computadorizadas, é fundamental que no ambiente virtual de trabalho, sejam oferecidas ao seu usuário, condições de operação que se assemelhem, da melhor maneira possível, àsquelas encontradas no mundo real. A combinação desta premissa com a delimitação das condições gerais de ensaio proposta e apresentada no capítulo 3 deste texto, resultou na definição destas facilidades para o programa de simulação.

4.1.1 Recursos materiais

A instrumentação e os acessórios implementados e disponíveis para utilização pelos usuários do sistema SIMPAR são os seguintes:

- O equipamento de teste;
- O equipamento impulsionador de sondas;
- Sondas de inspeção;
- Tubos de diversos materiais.

O painel frontal do equipamento virtual de teste, pode ser observado na FIG. 32. Trata-se de um sistema de frequência simples, operando em modo diferencial. Pode-se verificar a existência de uma tela de visualização, operando como um osciloscópio com memorização, funcionando no modo X-Y.

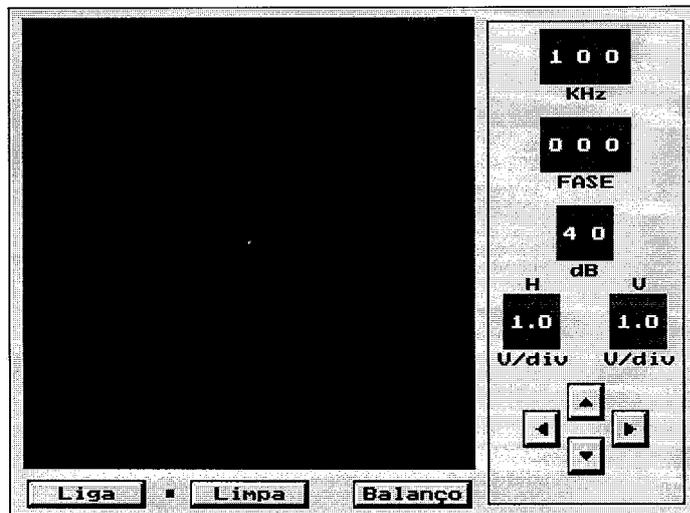


FIGURA 32 - Painel frontal do equipamento de teste do sistema SIMPAR.

Existem ainda diversas chaves tipo *thumbwheel* (amplamente empregadas nos equipamentos de fabricação comercial), através das quais pode o usuário estabelecer e alterar as condições de contorno da simulação, selecionando valores de frequência, ângulo de fase, ganho e sensibilidade horizontal ou vertical da apresentação de resultados.

Para atuar nestas chaves, basta posicionar o cursor do *mouse* sob o dígito desejado e pressionar o botão esquerdo deste dispositivo. Deste modo, programa

incrementará seu valor em uma unidade. Enquanto o botão do *mouse* permanecer pressionado, o processo prosseguirá continuamente. É possível estabelecer condições de operação dentro dos seguintes limites:

- Frequência de operação: 1 a 999 KHz
- Ângulo ou rotação de fase: 0 a 399 graus
- Ganho: 0 a 49 decibéis
- Sensibilidade (horizontal): 0,5 a 2,0 volts por divisão da tela
- Sensibilidade (vertical): 0,5 a 2,0 volts por divisão da tela

Além destes atuadores, foram implementados quatro botões posicionadores, cuja função é permitir o deslocamento da região de formação e apresentação das figuras de Lissajous na tela do equipamento de teste. Para tanto, basta posicionar o cursor do *mouse* sobre qualquer um deles, pressionar botão esquerdo do *mouse*. Para completar o conjunto de elementos atuadores neste painel, existem três botões localizados em sua parte inferior esquerda. Todos eles são acionáveis através do *mouse*.

O botão mais à esquerda permite ligar e desligar o equipamento. Estando o equipamento ligado, acende-se uma pequena lâmpada de sinalização de cor vermelha localizada à sua direita. Somente nesta condição o programa permite a visualização na tela do equipamento de teste, de qualquer sinal resultante da simulação.

Já o botão localizado ao centro, permite limpar a tela do equipamento de teste, removendo ou apagando todos os sinais aí registrados. Finalizando, o botão localizado do lado direito permite a execução do balanceamento do equipamento de teste, e deve ser acionado sempre que haja alteração nas condições de operação do sistema, de maneira análoga àquela observada nos equipamentos convencionais.

A FIG. 33 mostra o sistema impulsor de sondas implementado. Este dispositivo é responsável pela movimentação da sonda de ensaio durante a realização de qualquer atividade de simulação do sistema SIMPAR. Em seu painel de controle existem cinco botões ou atuadores, com os quais o usuário pode controlar (com auxílio do *mouse* e de modo similar aquele descrito para os botões do equipamento de teste), os seguintes movimentos da sonda:

- Tracionar ou puxar em velocidade normal;
- Tracionar ou puxar em alta velocidade;
- Empurrar em velocidade normal;
- Empurrar em alta velocidade;
- Balançar ou vibrar.

Além destes controles, implementou-se ainda um indicador da posição da sonda, com relação a extremidade oposta à de inserção do tubo sob teste (valor expresso em milímetros). Esta facilidade é importante pois permite ao usuário do programa registrar a exata localização das discontinuidades detectadas em cada tubo.

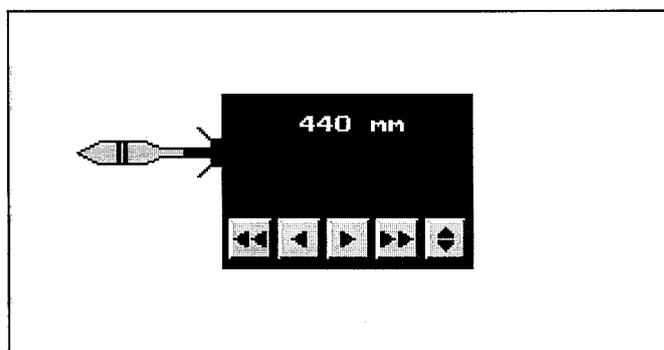


FIGURA 33 - O impulsor de sondas do sistema SIMPAR.

A FIG. 33 apresenta ainda a sonda de ensaio e seu cabo de interconexão com o sistema de testes. Nesta representação o cabo da sonda está quase totalmente recolhido pelo impulsor.

Na FIG. 34 é possível observar um tubo a ser examinado, e a sonda de teste, desta vez posicionada em seu interior. Neste caso, o cabo de interconexão pode ser visto numa maior extensão. Algumas características físicas e dimensionais deste tubo, são listadas logo abaixo do mesmo. São elas:

- O tipo de peça (padrão de referência ou tubo a examinar);
- O material com o qual é confeccionado;
- A resistividade elétrica em $\Omega \cdot m$;
- A resistividade elétrica em percentual IACS;
- O diâmetro externo em milímetros;
- A espessura em milímetros.

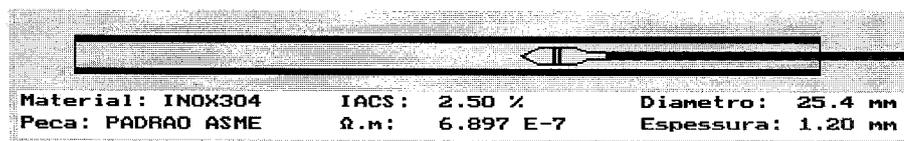


FIGURA 34 - Um tubo a ser examinado, com a sonda de teste posicionada em seu interior.

Ao desenvolver-se a tela do simulador, procurou-se criar condições de trabalho que se traduzissem num ambiente amigável para o usuário, refletindo com a maior fidelidade possível as condições encontradas nas atividades práticas realizadas no mundo real. Assim, os equipamentos foram distribuídos segundo um arranjo físico, capaz de permitir sua adequada operação, mesmo para o usuário com pouca experiência prévia no ensaio por correntes parasitas.

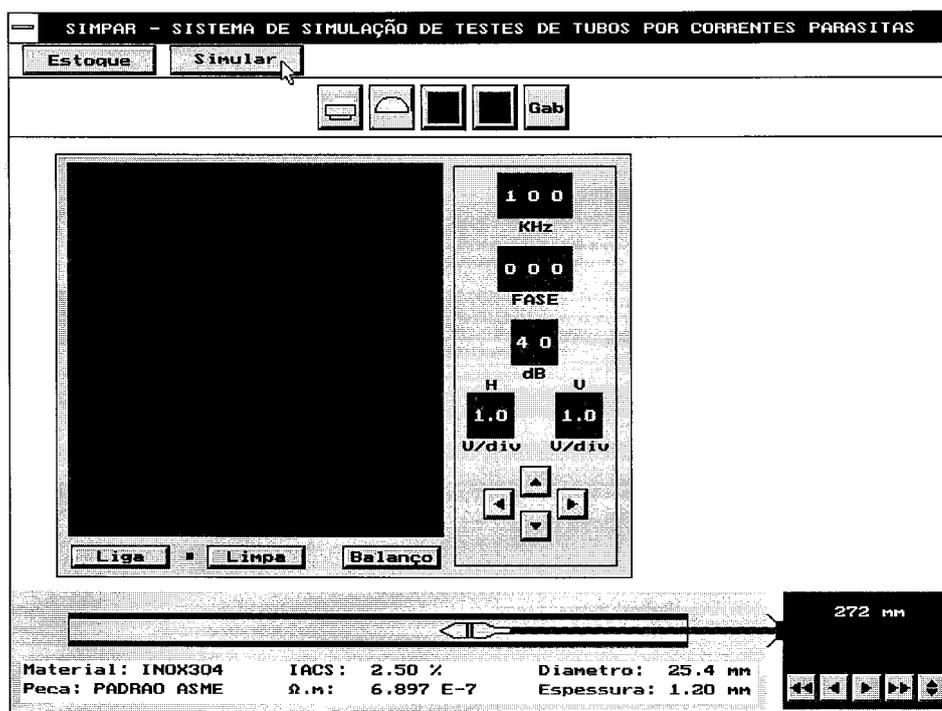


FIGURA 35 - Tela do simulador do sistema SIMPAR.

A FIG. 35 apresenta a tela do simulador do sistema SIMPAR. Além dos recursos já descritos, podem ser observadas algumas facilidades adicionais. Uma barra de ferramentas constituída por um conjunto de cinco botões, cada qual com um ícone característico e adequado à sua função permite ao usuário:

- Enviar à impressora o painel do equipamento de teste;
- Medir a inclinação das figuras existentes;
- Desabilitar o graticulo da tela do equipamento;
- Habilitar o graticulo da tela do equipamento;
- Obter o gabarito das discontinuidades existentes no tubo sob teste.

4.1.2 O estoque de corpos de prova

A FIG. 36 mostra a tela de acesso ao estoque de corpos de prova do sistema. Através deste recurso pode-se escolher dentre os diversos tubos existentes, aquele que seja de interesse para uma determinada atividade de simulação. Nesta tela pode-se observar uma caixa de estoque de corpos de prova, com duas caixas menores em seu interior.

A caixa localizada à esquerda contém uma lista com os nomes de todos os corpos de prova disponíveis. Seis nomes podem ser apresentados simultaneamente. Através dos dois botões de deslocamento, que devem ser acionados através do *mouse* e que encontram-se localizados do lado direito desta caixa, o usuário pode deslocar a lista de tubos no sentido desejado, visualizando toda a listagem existente. Para selecionar um determinado tubo, basta posicionar o cursor do *mouse* sobre o nome do arquivo correspondente, e pressionar seu botão esquerdo. Neste instante o programa o destacará dos demais, colocando seu nome na cor branca sobre um fundo azul. Uma vez destacado o tubo desejado, deve-se então posicionar o cursor do *mouse* sobre o botão "OK", e aguardar que o programa o carregue da unidade de disco rígido. Uma vez carregado com os dados do tubo selecionado, pode-se visualizar na caixa de características, localizada do lado direito desta tela, uma série de detalhes técnicos acerca do tubo selecionado.

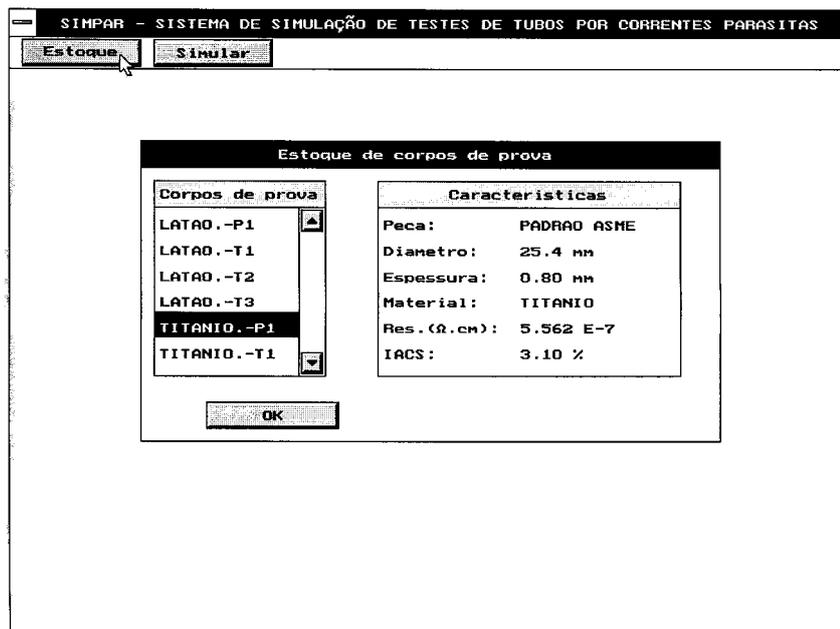


FIGURA 36 - Tela de acesso ao estoque de corpos de prova do sistema SIMPAR.

Convencionou-se um padrão de identificação para cada tubo do estoque, que na realidade corresponde ao nome e extensão de um arquivo de disco, onde estão os dados utilizados pelo programa para executar as funções de simulação. Este padrão obedece ao seguinte protocolo:

- Os oito primeiros caracteres de identificação correspondem ao material com que é construído o tubo.
- O nono e décimo caracter correspondem sempre a um ponto e a um hífen para qualquer tubo.
- O décimo primeiro caracter será a letra **P** se o tubo for um padrão de calibração, e a letra **T** se for um tubo com descontinuidades para testes.
- O décimo segundo caracter poderá ser qualquer numeral ou letra do alfabeto, que permita a identificação de diferentes corpos de prova de um mesmo tipo e material.

A título de exemplo, podem-se citar alguns nomes para corpos de prova tais como: LATÃO.-P1, LATÃO.-T6, TITANIO.-P1, TITANIO.-TA, etc. .

4.2 A dinâmica operacional do sistema

Todos estes equipamentos e facilidades trabalham de forma integrada durante a operação do sistema SIMPAR. Esta integração pode ser verificada em relação aos aspectos:

- Espacial;
- Temporal;
- Operacional.

Assim, pode-se verificar que para possibilitar a formação de figuras de Lissajous na tela do equipamento de teste, durante uma atividade de simulação, é necessária a ocorrência de uma série de eventos, envolvendo a movimentação e o posicionamento da sonda de testes em relação às descontinuidades existentes no tubo sob teste, e o estabelecimento de condições de contorno adequadas.

Deste modo, é dada ao usuário do sistema SIMPAR, total liberdade de interação com o ambiente de simulação. É ele quem determina onde, quando e de que forma os componentes do sistema irão responder ou reagir à sua interferência. No capítulo 5, são apresentados alguns exemplos onde podem ser observados alguns efeitos resultantes da utilização prática deste sistema de simulação. A FIG. 37 é um

fluxograma bastante simplificado, mas suficiente para apresentar de modo adequado o sistema SIMPAR em operação.

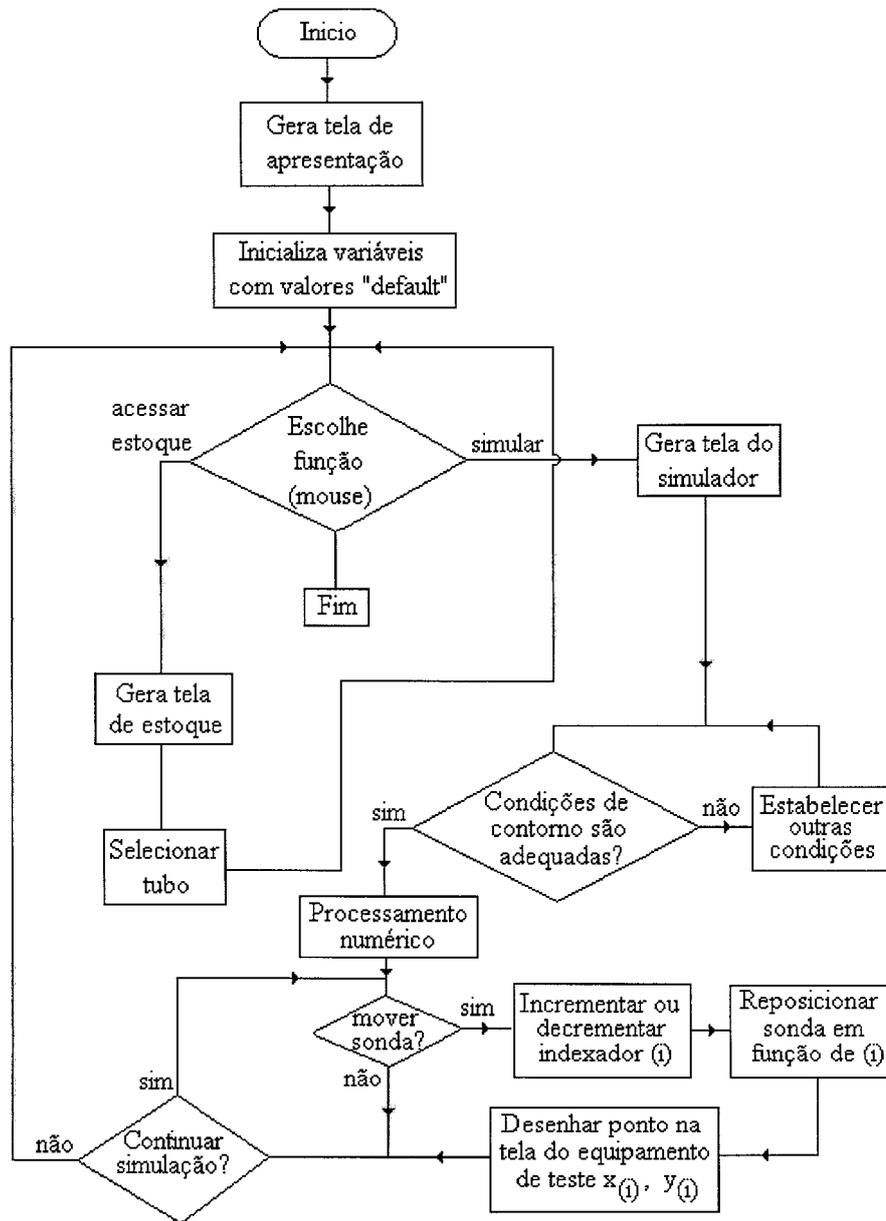


FIGURA 37 - Fluxograma simplificado do sistema SIMPAR em operação.

4.3 Recursos complementares

Com o objetivo de dar ao usuário do sistema SIMPAR, maior conforto e segurança durante a execução de uma simulação, dotou-se o programa de alguns recursos para informa-lo do status operacional de algumas funções do programa. Uma facilidade existente, é o retorno sonoro através do alto-falante do microcomputador, sempre que uma destas funções for ativada ou desativada. Vejam-se alguns casos:

Ativa-se o botão para impressão gráfica. Na ocorrência de qualquer irregularidade durante o processo, um tom de audio grave será emitido pelo alto-falante.

Ativa-se o sistema de medição de inclinação de figuras. O alto falante emitirá um tom de audio agudo.

Desativa-se o sistema de medição de inclinação de figuras. O alto falante emitirá um tom de audio grave.

Ativa-se o botão para fornecer o gabarito do tubo sob teste. O alto falante emitirá um tom de audio agudo.

Desativa-se o botão para fornecer o gabarito do tubo sob teste. O alto falante emitirá um tom de audio grave.

Outra facilidade implementada é a emissão de mensagens na tela do equipamento de teste sempre que alguma anormalidade impeça uma perfeita operação do sistema. Exemplificando: se a condição de contorno imposta para uma determinada simulação, não permitir ao programa um processamento correto, a mensagem "*Parâmetros inadequados*" aparecerá na tela. Na FIG. 38 esta mensagem foi emitida em função da escolha inadequada do valor da frequência de teste.

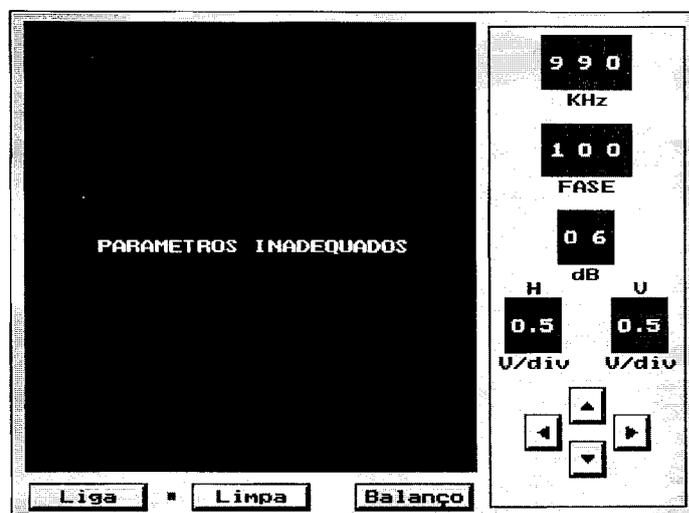


FIGURA 38 - Emissão de mensagem de advertência.

O balanceamento do sistema, que deverá ser feito com a sonda posicionada no interior do tubo sob teste, a pelo menos 10 milímetros de uma das suas extremidades, acarretará no aparecimento de um traço na tela do equipamento de teste. Ver a FIG. 39.

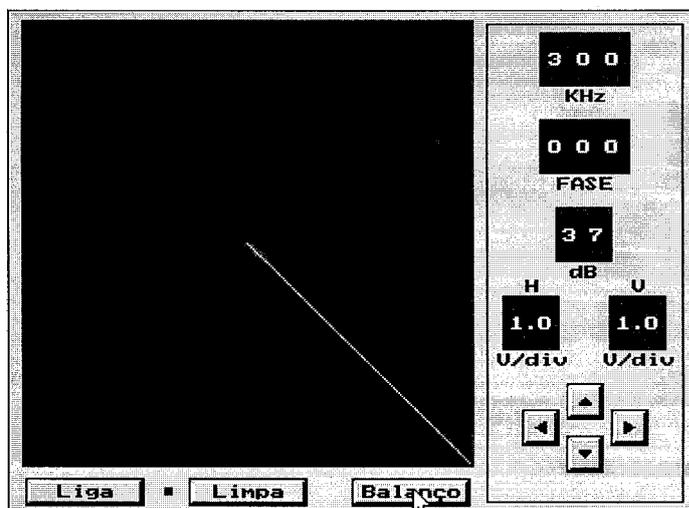


FIGURA 39 - Traço decorrente de balanceamento.

Ao se movimentar a sonda de teste, sua entrada ou saída do interior do tubo ensaiado, também poderá acarretar o aparecimento outros traços na tela do equipamento de teste, devido à brusca variação de impedância ocorrida. Ver a FIG. 40.

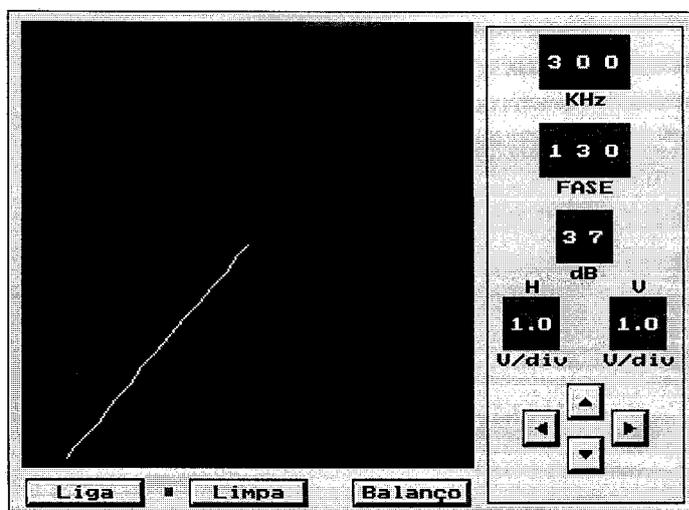


FIGURA 40 - Traço decorrente da saída da sonda do interior do tubo ensaiado.

Procurou-se evidenciar nesta descrição, que para o desenvolvimento do sistema SIMPAR, houve especial atenção em construir-se um ambiente virtual de trabalho, onde os aspectos ergonômicos e funcionais foram valorizados. A forma física, a posição e o modo de operação dos equipamentos e objetos implementados, assim como a maneira com que o usuário do sistema deve interagir com os mesmos, foram sempre considerados durante as fases de projeto e de implementação do programa.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo, apresentam-se os resultados obtidos a partir de algumas simulações realizadas. Inicialmente mostram-se telas do simulador, onde diversas facilidades do sistema SIMPAR são exploradas. Vários efeitos decorrentes desta utilização podem ser observados.

A seguir é apresentada etapa por etapa, a realização de uma calibração segundo norma (ASME, 1992), para um tubo-padrão de latão. Estando o sistema devidamente calibrado, procede-se à inspeção de um tubo para teste, simulando um ensaio real onde algumas descontinuidades são detectadas e avaliadas.

Finalizando, apresenta-se a validação do programa desenvolvido, segundo duas abordagens distintas. Primeiramente faz-se uma validação operacional, através da comparação dos resultados obtidos através do uso do simulador, com outros obtidos nas mesmas condições, mas em situação real de teste. A seguir faz-se uma validação pedagógica do programa, segundo os critérios propostos por ROCHA (1991).

5.1 Explorando o sistema SIMPAR

Para que seja possível verificar os efeitos resultantes da interferência nas condições de operação durante uma simulação, a FIG. 41 deve ser tomada como referência. Neste caso, pode-se observar na tela do equipamento de testes, a existência de cinco figuras de Lissajous, correspondentes à passagem da sonda de ensaio pelo interior de um tubo de aço inoxidável 304, onde estão representadas cinco descontinuidades, visíveis em decocorrência da função *gabarito* do simulador, ter sido habilitada.

5.1.1 Alterando a sensibilidade vertical e horizontal

Observa-se na FIG. 42 que o tamanho das figuras de Lissajous foi aumentado em relação à condição anterior, em consequência dos valores de sensibilidades horizontal e vertical terem sido alterados de 1 volt por divisão para 0,5 volt por divisão.

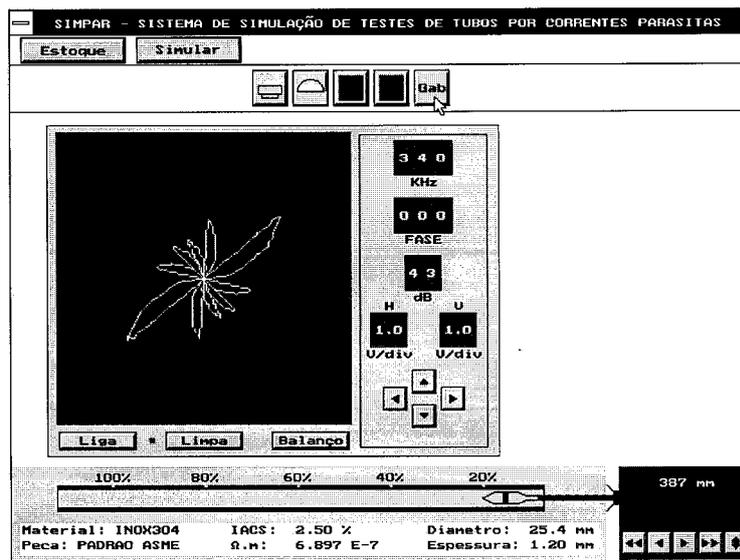


FIGURA 41 - Figuras resultantes de inspeção simulada de tubo de aço inoxidável 304.

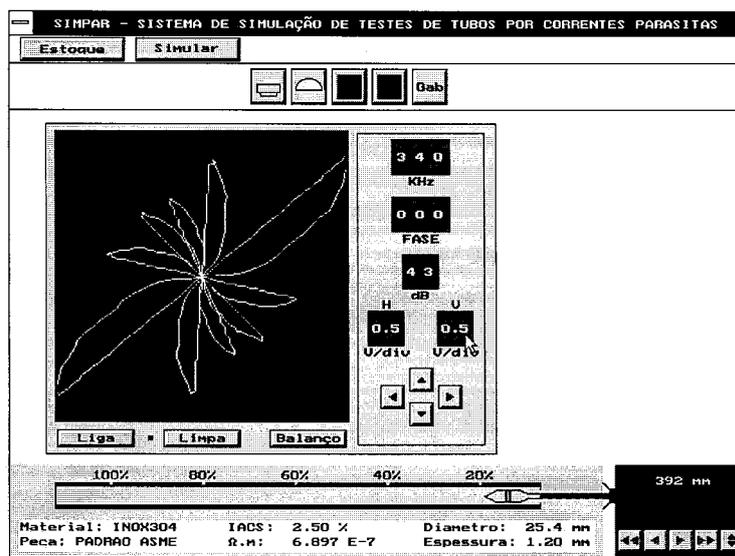


FIGURA 42 - Efeito de aumento na sensibilidade do equipamento de teste.

5.1.2 Alterando o ganho do sistema

Observa-se na FIG. 43 que o tamanho das figuras de Lissajous foi reduzido em consequência do ganho do equipamento de testes ter sido alterado de 43 dB para 39 dB. Os controles de sensibilidade horizontal e sensibilidade vertical foram reajustados para 1 volt por divisão da tela, retornando aos valores estabelecidos na figura de referência.

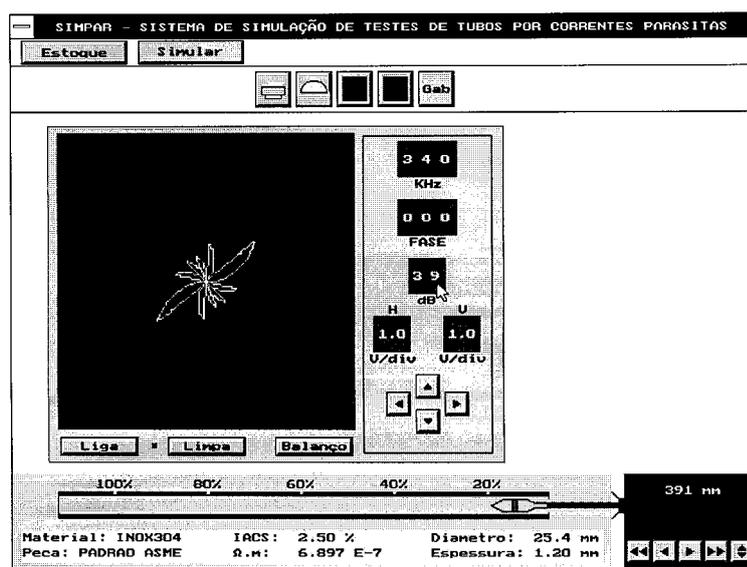


FIGURA 43- Efeito de redução no ganho do equipamento de teste.

5.1.3 Efeitos de rotação de fase

Na FIG. 44 pode-se verificar que a inclinação do conjunto de figuras de Lissajous apresenta-se alterada, em consequência do controle de fase do equipamento de testes ter sido reajustado.

Neste caso, o valor inicial 0 (zero) passou para 60 graus. Note-se que o aspecto das figuras de Lissajous, assim como suas amplitudes, não sofrem qualquer modificação.

Pode-se observar ainda, o sentido de rotação obtido. Ao incrementar-se o valor do ângulo de fase, verifica-se que o deslocamento se dá no sentido horário.

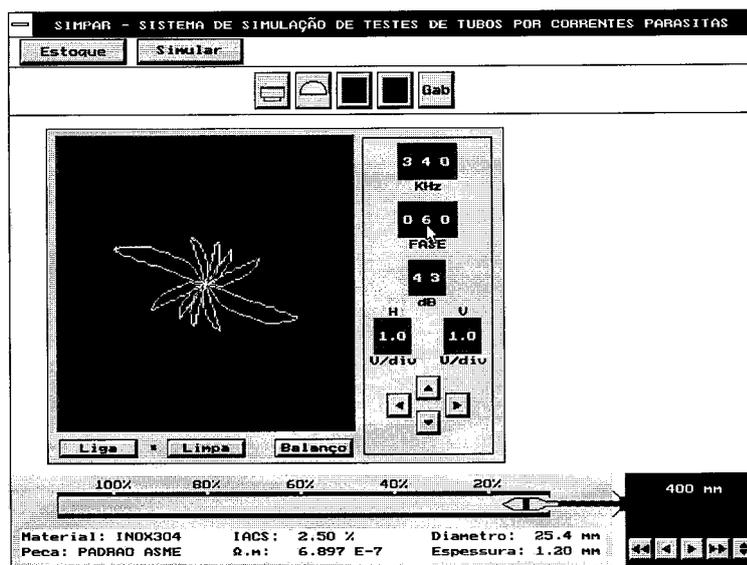


FIGURA 44 - Efeito da alteração no valor de fase do equipamento de teste para 60 graus.

5.1.4 Alterando a frequência de ensaio

Quando a frequência de ensaio é alterada, verificam-se diversas mudanças nas figuras de Lissajous detectadas na simulação. Estas alterações seguem o comportamento previsto na teoria geral do ensaio por correntes parasitas (ASNT, 1986), e traduzem-se na ocorrência dos seguintes fatos:

- O conjunto de figuras sofre um giro na tela do equipamento de teste;
- O giro se dá no sentido horário quando o valor da frequência cresce;
- O giro se dá no sentido anti-horário quando o valor da frequência decresce;
- O espalhamento de fase (SOARES, 1976), cresce se a frequência aumenta.
- O espalhamento de fase, decresce se a frequência diminui.
- O tamanho das figuras diminui exponencialmente a medida que a frequência é desviada de um valor central (frequência ótima);

Comparando-se os sinais da FIG. 45 (obtidos em 200KHz), ou da FIG. 46 (obtidos em 440 KHz), com aqueles apresentados na FIG. 41 (obtidos em 340 KHz), os efeitos mencionados podem ser observados.

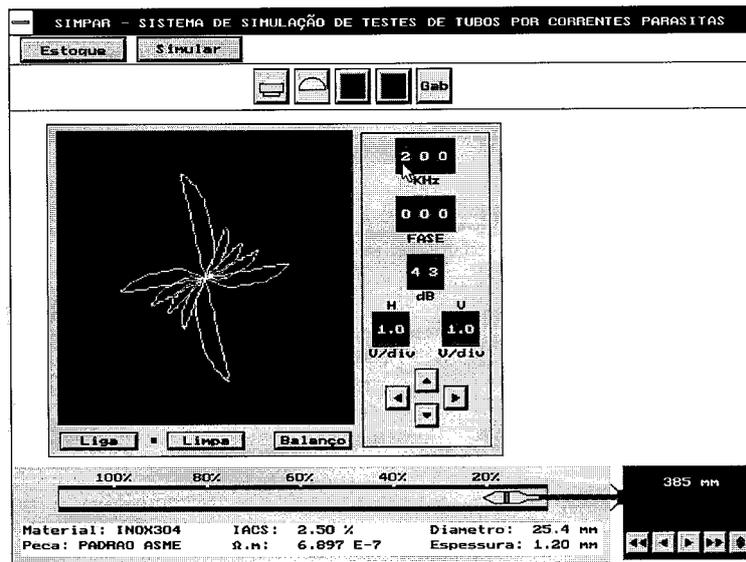


FIGURA 45 - Influência da redução da frequência de teste em sinais detectados.

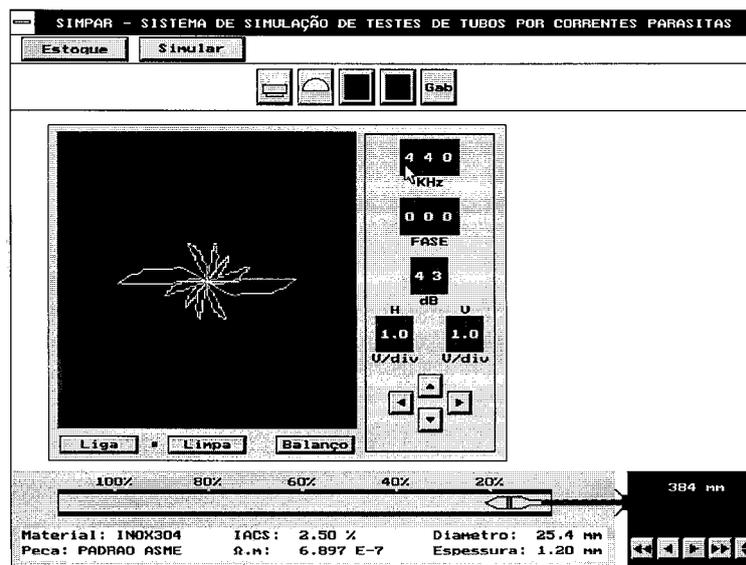


FIGURA 46 - Influência do aumento da frequência de teste em sinais detectados.

A FIG 47 retrata uma acentuada redução na amplitude das figuras de Lissajous, ocorrida em função da elevação da frequência de operação para 700 KHz. Na FIG. 48 este efeito ocorre em função da frequência ser reduzida para 60 KHz.

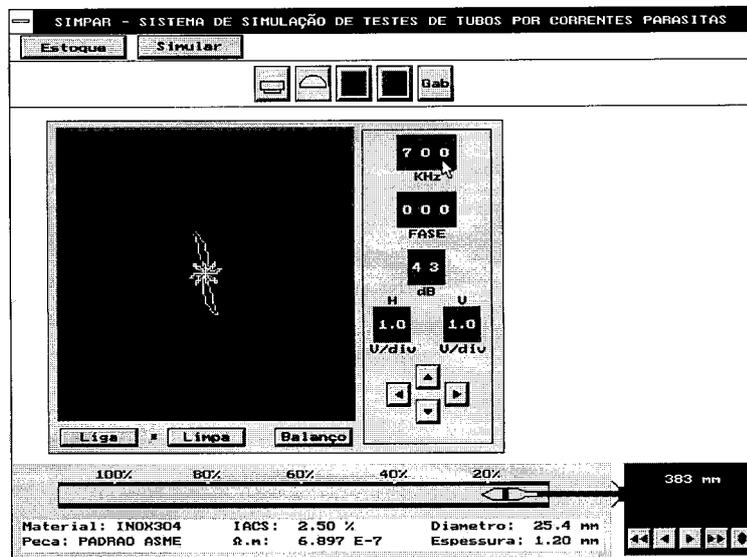


FIGURA 47 - Influência do aumento da frequência de teste para 700 KHz.

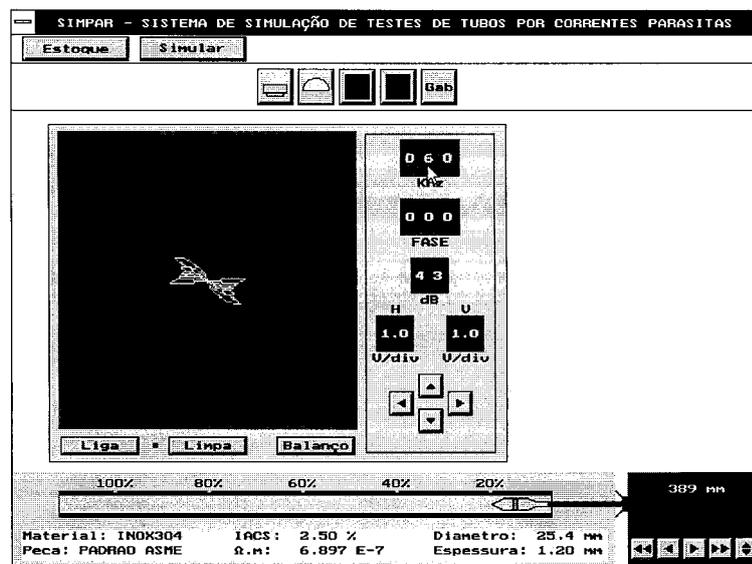


FIGURA 48 - Influência da redução da frequência de teste para 60 KHz.

5.1.5 Gerando sinais de vibração da sonda de ensaio

Na FIG. 49 observa-se a figura de Lissajous correspondente ao sinal produzido pela vibração da sonda de ensaio, percorrendo o interior do tubo ensaiado. Este sinal caracteriza-se como uma série de transientes de pequena amplitude. Os controles de ganho e sensibilidade do equipamento de teste, estão ajustados de maneira a permitir a visualização desta figura com o maior tamanho possível.

Também o sistema de medição de inclinação de sinais está habilitado. O valor de inclinação medido nestas condições, pode ser visto no canto inferior direito da tela do equipamento de teste. Para promover a geração deste sinal, a sonda foi posicionada dentro do tubo, sendo então pressionado (através do mouse) o botão adequado no impulsor de sondas.

Além de formar a figura, o sistema SIMPAR produz um movimento ondulatório na sonda, deslocando-a alternadamente para cima e para baixo, conferindo características de realismo à simulação.

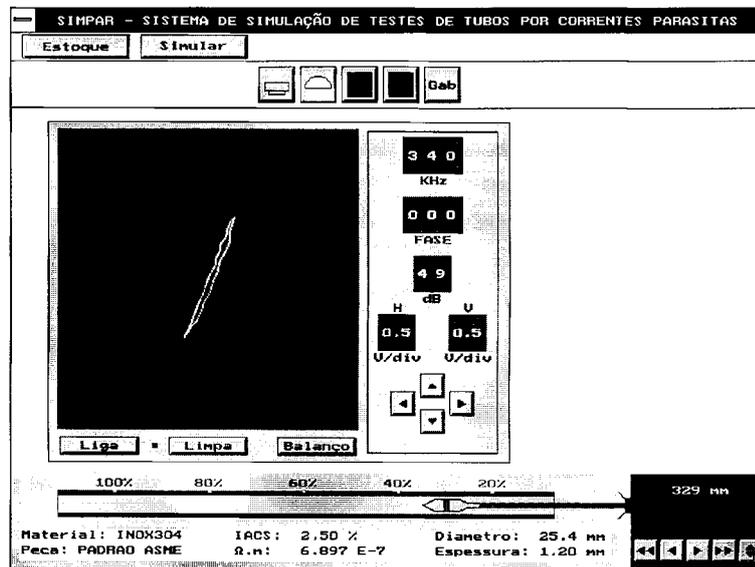


FIGURA 49 - Sinal resultante do movimento de vibração da sonda de testes no interior de um tubo.

5.1.6 Comportamento do sistema

Durante o desenvolvimento das atividades de simulação, verifica-se que a resposta às interferências provocadas pelo usuário do sistema, ocorrem imediatamente, à semelhança das situações normais de ensaio. A sensibilidade do teste e a legibilidade

dos sinais-resposta, são também mantidos em níveis semelhantes aqueles encontrados nas atividades práticas convencionais. Assim, a interação homem-máquina ocorre com grande rapidez, conferindo maior realismo às atividades desenvolvidas.

5.2 Realização de calibração segundo o código ASME

Descrevem-se a seguir, as várias etapas desenvolvidas com o sistema SIMPAR, visando estabelecer parâmetros de calibração de acordo o código ASME (1992), para um tubo-padrão de referência de latão. Basicamente, seguem-se as recomendações compiladas e apresentadas na seção 2.1.3.5 desta dissertação.

Inicialmente, determinou-se a frequência ótima de teste, de acordo com critérios sugeridos pela ASNT (1986). Para o tubo em questão encontrou-se o valor teórico de 16,5 KHz. Dando início à simulação, o controle de frequência do equipamento de teste foi ajustado em 17 KHz. O controle de fase foi mantido inicialmente em 0 (zero) graus, e o de ganho em 33 dB. A sensibilidade foi fixada em 0,5 volt por divisão.

Uma vez balanceado o sistema, a sonda de teste foi puxada lentamente pelo impulsor de sondas, passando pela descontinuidade com profundidade equivalente a 20% de perda de parede do tubo-padrão. Como pode ser observado na FIG. 50, o sinal

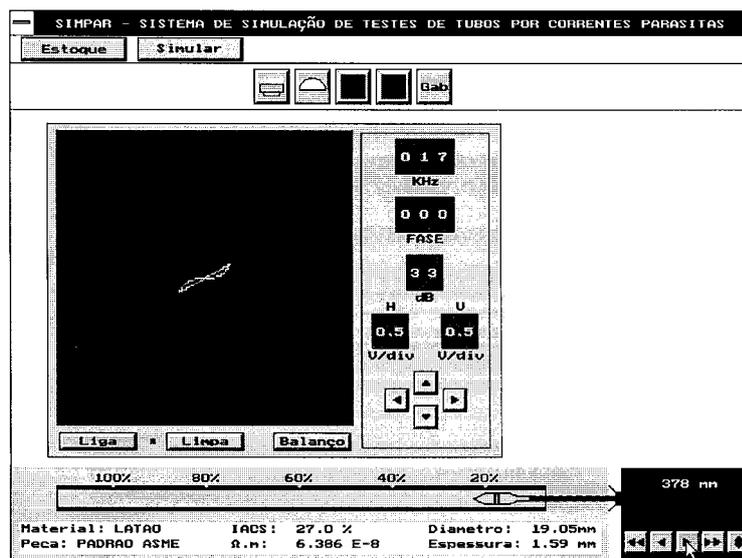


FIGURA 50 - Tela inicial do simulador, com o sinal correspondente à descontinuidade de 20% de perda de espessura.

gerado apresentou uma amplitude menor que a mínima estabelecida pela norma, ou seja: pelo menos três divisões da tela. Além disso, o modo de formação da figura não correspondeu ao esperado (primeiro para a esquerda e para baixo, e depois para a direita e para cima).

Continuando, aumentou-se o ganho do sistema de modo a obter um sinal com amplitude de aproximadamente cinco divisões de tela. O valor do ângulo de rotação de fase foi fixado em 180 graus. A inclinação medida pelo sistema foi de 151 graus. Consequentemente, o sentido de formação da figura de Lissajous adequou-se ao estabelecido na norma utilizada. O sinal obtido adquiriu o aspecto mostrado na FIG 51.

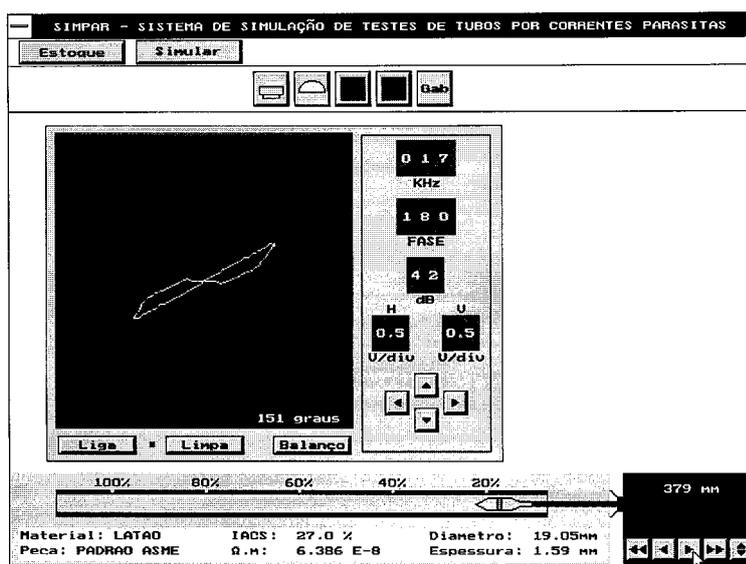


FIGURA 51 - Alterações de fase e amplitude no sinal da descontinuidade de 20% resultantes de modificações das condições de ensaio.

Dando prosseguimento à experimentação simulada, gerou-se o sinal correspondente a passagem da sonda de teste pela descontinuidade com profundidade equivalente a 100% de perda de espessura do tubo-padrão. A inclinação medida foi de 43 graus. Portanto, o espalhamento de fase obtido para esta condição de operação, 108 graus, ficou dentro da faixa de aceitação do código ASME (1992), que vai de 50 a 120 graus. Pode-se concluir assim, que a frequência de ensaio estabelecida para esta simulação foi correta. A FIG. 52 apresenta a tela do simulador com a figura de Lissajous obtida. Com relação à inclinação do sinal de vibração, para estas condições de operação, o valor medido foi de 7 graus. Reduzindo o valor da rotação de fase de 180 para 173 graus, obteve-se o alinhamento desta figura com o eixo das abcissas.

Evidentemente os sinais correspondentes às descontinuidades de 20% e 100% de perda de espessura passaram a ter inclinações de 144 graus e 36 graus respectivamente.

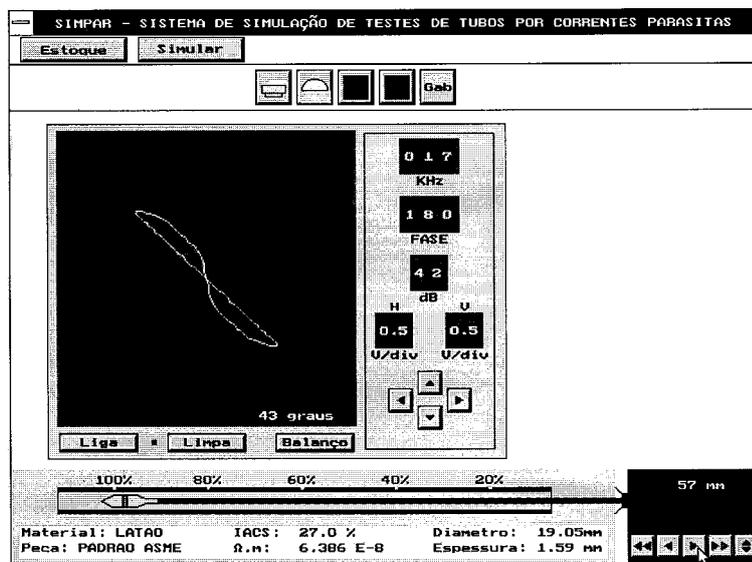


FIGURA 52 - Sinal correspondente à descontinuidade com 100 % de perda de espessura.

A FIG 53 apresenta os sinais correspondentes a todas as descontinuidades existentes no tubo-padrão e o sinal de vibração da sonda, detectados nas condições de operação estabelecidas nesta calibração.

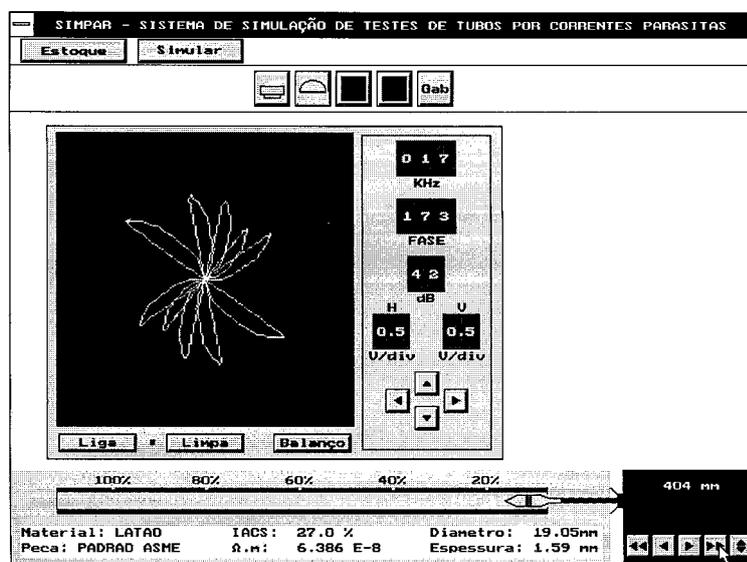


FIGURA 53 - Sinais correspondentes às descontinuidades detectadas no tubo-padrão de latão.

A representação dos resultados obtidos nesta simulação, em curva de avaliação (ASME, 1992), pode ser vista na FIG. 54.

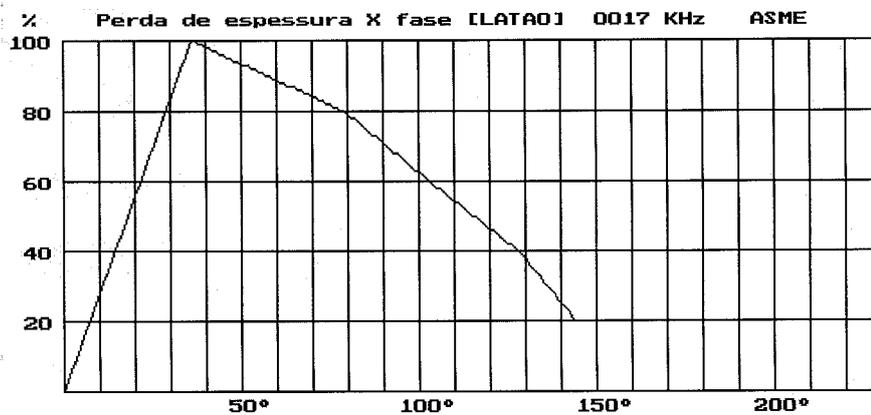


FIGURA 54 - Curva de avaliação levantada para tubo-padrão de latão (ASME, 1992).

5.3 Validação do sistema

5.3.1 Validação operacional

Uma vez calibrado o sistema de testes, realizou-se o ensaio simulado de um dos tubos de latão disponíveis no estoque do sistema SIMPAR, com características idênticas às do tubo-padrão. Evidentemente, as condições de operação do equipamento de teste permaneceram inalteradas. Duas descontinuidades foram detectadas.

A primeira descontinuidade, com profundidade equivalente a 84% de perda de espessura, localiza-se a 178 milímetros da extremidade esquerda do tubo. A inclinação medida para a figura de Lissajous correspondente, foi de 70 graus. Veja-se a FIG. 55.

A segunda descontinuidade, cuja profundidade equivale a 29% de perda de espessura, localiza-se a 231 milímetros desta mesma extremidade. A inclinação medida para a figura de Lissajous correspondente foi de 137 graus. Veja-se a FIG. 56.

Avaliando os sinais referentes às descontinuidades, com o auxílio da curva representada na FIG. 54, foram encontrados valores de profundidade semelhantes aqueles apresentados no tubo examinado. Pode-se perceber assim, que o processamento numérico realizado pelo programa, e descrito no capítulo 3 desta dissertação, é

suficientemente preciso para atender às necessidades requeridas pelo método de ensaio por correntes parasitas, nominalmente 5 graus (ASME, 1992).

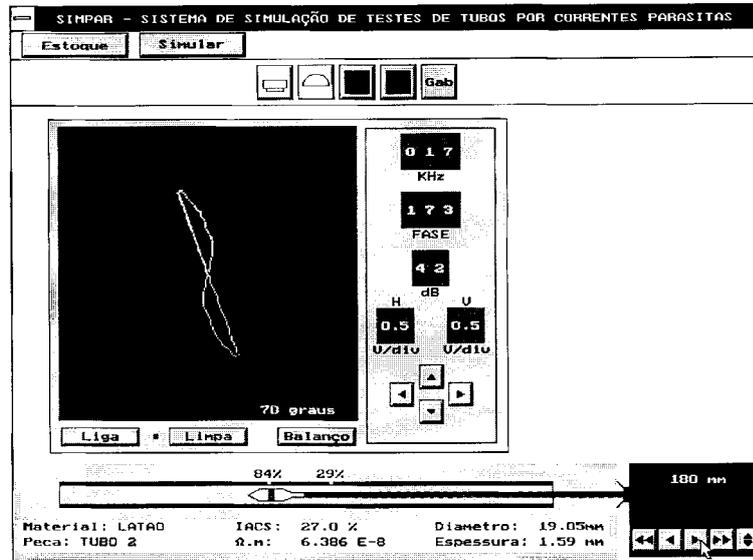


FIGURA 55 - Figura correspondente a descontinuidade de 84% de perda de espessura.

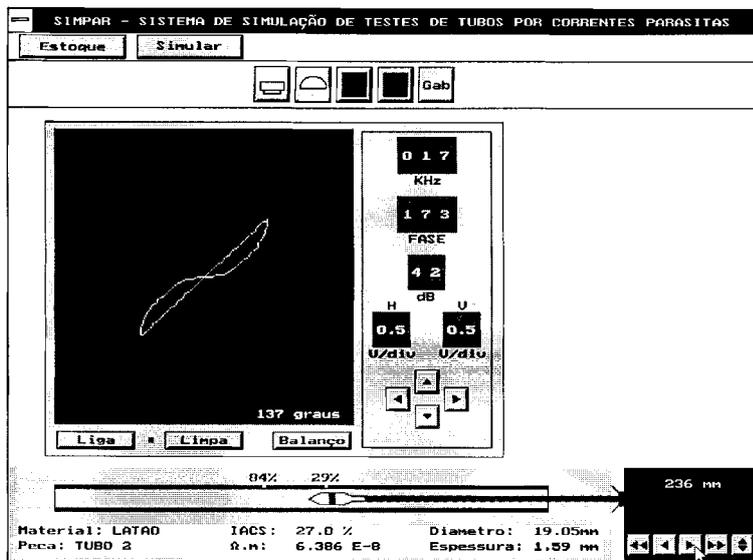


FIGURA 56 - Figura correspondente a descontinuidade de 29% de perda de espessura.

5.3.2 Validação pedagógica

A utilização do sistema SIMPAR como recurso didático para a realização de atividades ligadas ao ensino tecnológico, pode levantar questões relacionadas com os aspectos de qualidade e confiabilidade operacional do mesmo. Deste modo, após a conclusão das etapas de concepção, desenvolvimento, e implementação do sistema de simulação, procurou-se verificar do ponto de vista do usuário os impactos resultantes de sua operação. Incluiu-se então neste trabalho, um processo parcial de validação pedagógica do programa desenvolvido. Inicialmente procedeu-se a uma pesquisa bibliográfica, buscando referenciais teóricos apropriados à condução do tema. Encontrou-se em RODRIGUES (1993), um interessante marco norteador, uma vez que neste trabalho de pesquisa, a etapa de validação conduzida, apresentou características que puderam ser empregadas para validar o sistema SIMPAR.

Basicamente, elaborou-se um questionário composto por 15 questões, que foi submetido à apreciação de três especialistas da área de END (dois atuando no CDTN e um no CEFET-MG), após um período de utilização prática e familiarização com o sistema de simulação, numa adaptação do método proposto por ROCHA (1989) que explica: "... *devem ser atingidos três objetivos de qualidade: utilizabilidade, confiabilidade conceitual e confiabilidade de representação.* " .

De acordo com STAHL (1991), *utilizabilidade* é a característica que determina a viabilidade de uso de um programa. *Confiabilidade de representação* é um conjunto de características de representação de um programa que afeta sua compreensão e manipulação. *Confiabilidade conceitual* é a característica do programa em implementar satisfatoriamente as especificações de projeto, satisfazendo às necessidades que motivaram sua construção. A FIG. 57 mostra os fatores e subfatores relacionados com cada objetivo, segundo o esquema elaborado por ROCHA (1989).

A exemplo de RODRIGUES (1993), excluiu-se o objetivo *Confiabilidade de representação*, uma vez que este se encontra ligado fundamentalmente às questões de uso da linguagem e da estrutura de representação adotada (Turbo-Pascal 7.0), e que os especialistas envolvidos no processo de avaliação trabalharam com um programa executável (compilado).

Para a condução da avaliação, os especialistas receberam uma *ficha de avaliação*, na qual atribuíram notas relativas à cada aspecto levantado, numa escala variando de zero a dez, nos moldes sugeridos por ROCHA e CAMPOS (1991).

Objetivos	Fatores	Subfatores
Confiabilidade de representação	Legibilidade	Clareza
		Concisão
		Estilo
		Modularidade
	Manipulabilidade	Disponibilidade
		Estrutura
Rastreabilidade		
Utilizabilidade	Manutenibilidade	
	Operacionalidade	Oportunidade
		Amenidade ao uso
	Portabilidade	
	Reutilizabilidade	
	Eficiência	
	Rentabilidade	
	Avaliabilidade	Verificabilidade
Validabilidade		
Confiabilidade Conceitual	Fidedignidade	Precisão
		Completeza
		Necessidade
	Integridade	Robustez
		Segurança

FIGURA 57 - Qualidade de programas: objetivos, fatores e subfatores

Fonte: ROCHA, 1991, p. 15

A ficha de avaliação elaborada levantou opiniões do avaliador com relação:

1- ao tempo necessário para a produção de resultados:

O tempo é inadequado para uma perfeita operação do sistema	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	O tempo é adequado para uma perfeita operação do sistema
--	------------------------	--

2 - às telas do ambiente de simulação

São inadequadas para a perfeita operação do sistema de simulação	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	São adequadas para a perfeita operação do sistema de simulação
--	------------------------	--

3 - às condições de estabelecimento de condições de contorno:

São inadequadas para a perfeita operação do sistema de simulação	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	São adequadas para a perfeita operação do sistema de simulação
--	------------------------	--

4 - aos dispositivos de alerta na ocorrência de falhas na operação do sistema:

São inadequados para a perfeita operação do sistema de simulação	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	São adequados para a perfeita operação do sistema de simulação
--	------------------------	--

5 - à apresentação das figuras e demais resultados da simulação:

É inadequada para a perfeita operação sistema de simulação	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	É adequada para a perfeita operação do sistema de simulação
--	------------------------	---

6 - ao aspecto visual das telas, a forma e modo de operação dos equipamentos simulados:

É inadequado para a perfeita operação sistema de simulação	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	É adequado para a perfeita operação do sistema de simulação
--	------------------------	---

7 - à relação custo-benefício:

Não justifica a utilização do sistema	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Justifica a utilização do sistema
---------------------------------------	------------------------	-----------------------------------

8 - à precisão obtida nos cálculos e resultados:

É inadequada para atender as necessidades estabelecidas em norma	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	É adequada para atender as necessidades estabelecidas em norma
--	------------------------	--

9 - à reação a situações hostis:

O programa não trata erros e aborta sua execução	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	O programa trata erros sem abortar sua execução
--	------------------------	---

10 - ao objetivo do sistema SIMPAR:

Não é alcançado	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	É alcançado
-----------------	------------------------	-------------

11 - à adequação ao nível do aluno:

Não é adequado	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	É adequado
----------------	------------------------	------------

12 - à adequação ao nível do professor:

Não é adequado	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	É adequado
----------------	------------------------	------------

13 - à sua opinião geral sobre o sistema SIMPAR:

Péssimo	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Ótimo
---------	------------------------	-------

14 - Utilizaria este sistema em atividades de ensino?

Não	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Sim
-----	------------------------	-----

15 - Recomendaria o uso do sistema a outros profissionais de ensino na área de END ?

Não	0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10	Sim
-----	------------------------	-----

Para a elaboração desta ficha de avaliação, procurou-se contemplar os diversos objetivos e respectivos fatores e subfatores aplicáveis. Sua estrutura encontra-se representada na FIG. 58.

Objetivo	Fatores	Subfatores	Questões
Utilizabilidade	Operacionalidade	Oportunidade	1
		Amenidade ao uso	2, 3, 4, 5, 6
	Rentabilidade		7
Confiabilidade conceitual	Fidedignidade	Precisão	8
	Integridade	Robustez	9
Específicos à metodologia proposta para o uso do sistema			10, 11, 12
			13, 14, 15

FIGURA 58 - Estrutura da ficha de avaliação.

A FIG. 59 apresenta os resultados do processo de validação conduzido pelos avaliadores. As fichas originais, devidamente preenchidas e assinadas, encontram-se arquivadas na secretaria do D.P.P.G. do CEFET-MG.

Aspectos	Avaliador A	Avaliador B	Avaliador C
1	10	9	10
2	10	9	10
3	10	10	9
4	10	8	10
5	10	10	10
6	9	9	10
7	10	10	10
8	10	10	10
9	10	10	10
10	10	9	10
11	10	8	10
12	10	10	10
13	10	9	10
14	10	9	10
15	10	9	10

FIGURA 59 - Resultados obtidos no processo de avaliação.

Na opinião dos avaliadores, o sistema SIMPAR mostrou-se preciso e eficaz, proporcionando ao seu usuário final uma adequada performance operacional, capaz de permitir a perfeita realização de atividades práticas relacionadas com o ensaio de tubos por correntes parasitas.

Solicitou-se ainda dos avaliadores, sugestões no sentido de melhorar ou aperfeiçoar o sistema de simulação desenvolvido. A compilação destas , encontra-se na seção 6.1 desta dissertação, onde são apresentadas algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

6 CONCLUSÕES

Através do uso de metodologia heurística, foi possível estabelecer-se um modelo de simulação, que implementado na forma do sistema SIMPAR, permite a realização de atividades práticas relacionadas com a inspeção de tubos através do ensaio por correntes parasitas.

Contornando as limitações características dos modelos de resolução analítica, assim como os problemas de processamento requeridos pelos modelos de solução numérica por elementos finitos, o sistema SIMPAR opera de modo satisfatório, dando ao seu usuário condições de interagir com os elementos diretamente envolvidos na simulação, e observar os efeitos decorrentes desta interferência nos resultados apresentados.

O estabelecimento das condições de contorno, o processamento numérico envolvido, e a respostas às interferências introduzidas pelo usuário durante a realização das atividades de simulação, se dão em tempo hábil, o que torna o sistema adequado para a realização de atividades de ensino ou demonstração prática das potencialidades do ensaio por correntes parasitas para a inspeção de tubos.

Com a utilização deste sistema de simulação, é possível a substituição de instalações especiais, equipamentos e acessórios, que exigem recursos da ordem de U\$ 70 mil para sua aquisição, por similares virtuais que dependem somente da disponibilidade de uso de um microcomputador pessoal de baixo custo.

Assim, os resultados do processo de pesquisa e desenvolvimento ora descrito, consolidam-se num produto de real aplicação prática, capaz de promover melhorias e alterações nas limitadas condições atualmente encontradas nas atividades de ensino tecnológico relacionados com o ensaio por correntes parasitas.

6.1 Perspectivas e desenvolvimentos futuros

Inicialmente, é importante ressaltar que para o desenvolvimento do sistema SIMPAR, foi necessário efetuar uma série de cortes e simplificações nas diversas técnicas e particularidades inerentes ao ensaio por correntes parasitas, de maneira que fosse possível garantir a realização e conclusão do trabalho de pesquisa proposto. Deste modo, longe de considerar-se como definitivo ou terminado o presente trabalho,

reconhece-se que na realidade existe um apreciável volume de trabalho de pesquisa a ser realizado.

Uma primeira sugestão seria promover à ampliação do estoque de tubos, existente na versão atual do programa SIMPAR. Neste sentido poderiam ser levantadas novas bases de dados experimentais, a partir de tubos confeccionados com outros materiais, ou diferentes características dimensionais.

Outra, seria a inclusão nas simulações, dos sinais aleatórios decorrentes da movimentação da sonda de teste pelo interior do tubo ensaiado, conferindo assim maior realismo ao sistema, uma vez que nas situações reais de ensaio, ocorrem vibrações durante seu manejo.

Seria ainda bastante recomendada, a expansão das possibilidades de simulação do sistema ou mesmo a construção de outro, no qual fosse possível realizar, não apenas a inspeção de tubos com sondas diferenciais internas em monofrequência, mas todas as demais combinações de métodos e técnicas de inspeção, relativas ao ensaio de materiais através do ensaio por correntes parasitas.

Com a expansão da capacidade de processamento dos microcomputadores, e a evolução constante dos recursos tecnológicos a eles associados, o desenvolvimento de programas de simulação mais complexos, eficientes e funcionais, deverá ser apenas uma questão de tempo.

6.2 Comentários finais

A realização do presente trabalho de pesquisa, constituiu um desafio que exigiu grande esforço e dedicação para sua concretização, os quais foram plenamente recompensados pelos resultados finais alcançados e pelo grau de satisfação e receptividade encontrados junto aos técnicos e usuários que compoem a comunidade de profissionais de END, quando da apresentação em congressos, palestras e publicações técnicas, dos progressos realizados e resultados preliminares e intermediários obtidos.

Espera-se que a efetiva implementação e utilização do programa traduza-se numa melhor formação de profissionais de END, assim como numa maior divulgação do ensaio por correntes parasitas junto à comunidade científica e tecnológica nacional.

ANEXO A1

O CÓDIGO ASME SEÇÃO V ARTIGO 8: O EXAME DE PRODUTOS TUBULARES POR CORRENTES PARASITAS

Este anexo apresenta a documentação técnica elaborada pela American Society of Mechanics Engineers, que vem sendo utilizada como referência pelos principais fornecedores e clientes de serviços de inspeção por correntes parasitas, envolvendo barras e tubos metálicos. A utilização de um código ou norma de referência de aceitação universal é especialmente recomendada (SOARES, 1976), no sentido de garantir padrões de qualidade e rastreabilidade nos ensaios realizados.

São abordados no artigo 8 (e appendix I) da seção V deste código, detalhes importantes relativos a:

- Procedimentos
- Padrões de referência
- Qualificação dos equipamentos
- Técnica de ensaio
- Calibração
- Avaliação
- Documentação

Por ter sido esta normatização utilizada nos testes de tubos, realizados na etapa de coleta experimental de dados deste trabalho, anexou-se à esta dissertação, cópia da edição mais recente disponível para consulta (1992).

ARTICLE 8

EDDY CURRENT EXAMINATION OF TUBULAR PRODUCTS

T-810 SCOPE

(a) This Article describes the method to be used when a referencing Code Section requires eddy current or other electrical examination to this Article. The methods conform substantially with the following Standards listed in Article 26 and reproduced in Subsection B:

SE-243 Electromagnetic (Eddy Current) Testing of Seamless Copper and Copper-Alloy Heat Exchanger and Condenser Tubes

SE-309 Eddy Current Testing of Steel Tubular Products With Magnetic Saturation

SE-215 Standardizing Equipment for Electromagnetic Testing of Seamless Aluminum-Alloy Tube

SE-268 Terms Relating to Electromagnetic Testing

SE-426 Recommended Practice for Electromagnetic (Eddy Current) Testing of Seamless and Welded Tubular Products, Austenitic Stainless Steel and Similar Alloys

SE-571 Standard Practice for Electromagnetic (Eddy Current) Examination of Nickel and Nickel Alloy Tubular Products

(b) The requirements of Article 1, General Requirements, and Appendix A, Glossary of Terms Used in Nondestructive Examination, also apply when eddy current examination to Article 8 is required by a referencing Code Section.

T-820 GENERAL

T-821 Written Procedure

All eddy current or other electrical examinations shall be performed to detailed written procedures, unless otherwise stated in the referencing Code Section.

T-830 DESCRIPTION OF METHOD

The procedure for eddy current or other electrical examination methods shall provide a sensitivity which will consistently detect discontinuity indications equal to or greater than those in the reference specimen described in T-840. Products with discontinuities which produce indications in excess of the reference standards shall be processed in accordance with T-860.

T-840 REFERENCE SPECIMEN

(a) The reference specimen shall be a part of and shall be processed in the same manner as the product being examined. It shall be of the same nominal diameter and the same nominal composition as the product being examined. Unless specified in the referencing Code Section, the reference discontinuities shall be transverse notches or drilled holes as described in paragraph 5.4, Calibration Standard, of Standard Method SE-243.

(b) The reference specimen shall be long enough to simulate the handling of the product being examined through the inspection equipment. The separation between reference discontinuities placed in the same reference specimen shall be not less than twice the length of the sensing unit of the inspection equipment.

T-850 EQUIPMENT QUALIFICATION

(a) The proper functioning of the examination equipment shall be checked and calibrated by the use of the reference specimens as follows:

- (1) at the beginning of each production run of a given diameter and thickness of a given material;
- (2) after each hour during the production run;
- (3) at the end of the production run;
- (4) at any time that malfunctioning is suspected.

T-850

1992 SECTION V

T-870

(b) If, during any check it is determined that the testing equipment is not functioning properly, all of the product tested since the last check shall be re-examined.

T-860 ACCEPTANCE REQUIREMENTS

Acceptance requirements shall be as specified in the referencing Code Section.

T-870 PROCEDURE REQUIREMENTS

A written procedure, when required according to T-150, shall include at least the following:

- (a) frequency
- (b) type of coil or probe (e.g., differential coil)
- (c) type of material and sizes to which applicable
- (d) reference specimen notch or hole size
- (e) additional information as necessary to permit re-testing

ARTICLE 8 — APPENDIX I

EDDY CURRENT EXAMINATION METHOD FOR INSTALLED NONFERROMAGNETIC HEAT EXCHANGER TUBING

ARTICLE I-800 INTRODUCTION

I-810 SCOPE

This Appendix defines the eddy current (ET) examination method and equipment requirements applicable to installed nonferromagnetic heat exchanger tubing. When specified by the referencing Code Section, the eddy current techniques described in this Appendix shall be used. The methods and techniques described in this Appendix are intended to detect and quantify degradation in the tubing.

I-820 GENERAL REQUIREMENTS

(a) The basis frequency ET examination is required and shall be done in accordance with I-862.

(b) The requirements for test equipment and examination procedures shall be in accordance with I-830.

(c) Calibrations shall be done in accordance with I-860.

(d) Examination shall be done in accordance with I-870.

I-830 EQUIPMENT

Eddy current nondestructive testing equipment capable of operation in the differential mode or the absolute mode, or both, shall be used for this examination. A device for recording data, real time, in a format suitable for evaluation and for archival storage, shall be provided when required by the referencing Code Section.

I-831 Frequency of Calibration

Electronic instrumentation of the eddy current system shall be calibrated at least once a year or whenever the equipment has been overhauled or repaired as a result of malfunction or damage.

I-850 TECHNIQUE

Single frequency or multiple frequency techniques are permitted for this examination. Upon selection of the test frequency(s) and after completion of calibration, the probe shall be inserted into the tube where it is extended or positioned to the region of interest. Resulting eddy current signals at each of the individual frequencies shall be recorded for review, analysis, and final disposition.

I-860 CALIBRATION

I-861 Calibration Tube Standards

The calibration tube standard shall be manufactured from a length of tubing of the same nominal size and material type (chemical composition and product form) as that to be examined in the vessel. The intent of this reference standard is to establish and verify system response. The standard shall contain calibration discontinuities as follows.

(a) A single hole drilled 100% through the wall 0.052 in. diameter for $\frac{3}{4}$ in. O.D. tubing and smaller and 0.067 in. diameter for larger tubing.

(b) Four flat bottom holes, $\frac{1}{16}$ in. diameter, spaced 90 deg. apart in a single plane around the tube circumference, 20% through the tube wall from the O.D.

I-861

1992 SECTION V

I-862

(c) A $\frac{1}{16}$ in. wide, 360 deg. circumferential groove, 10% through from the inner tube surface (optional).

(d) All calibration discontinuities shall be spaced so that they can be identified from each other and from the end of the tube.

(e) Each standard shall be identified by a serial number.

(f) The depth of the calibration discontinuities, at their center, shall be accurate to within $\pm 20\%$ of the specified depth or ± 0.003 in., whichever is smaller. All other dimensions shall be accurate to 0.010 in.

(g) The dimensions of the calibration discontinuities and the applicable ET system response shall become part of the permanent record of the standard.

I-862 Basis Frequency¹ Calibration Procedure

The examination system shall be calibrated utilizing the standard described in I-861.

(a) Basis Frequency Calibration Using Differential Bobbin Coil Technique

(1) Adjust the ET instrument for a basis frequency chosen so that the phase angle of a signal from the four 20% flat bottom holes is between 50 deg. and 120 deg. rotated clockwise from the signal of the through-the-wall hole (Fig. I-862-1).

(2) The trace display for the four 20% flat bottom holes shall be generated, when pulling the probe, in the directions illustrated in Fig. I-862-1: down and to the left first, followed by an upward motion to the right, followed by a downward motion returning to the point of origin.

(3) The sensitivity shall be adjusted to produce a minimum peak-to-peak signal from the four 20% flat bottom holes of 30% of the full scale horizontal presentation with the oscilloscope sensitivity set at 1 V per division.

(4) Adjust the phase or rotation control so that the signal response due to probe motion, or the 10% deep circumferential inside diameter groove, or both, is positioned along the horizontal axis of the display ± 5 deg. The responses from the calibration holes shall be maintained as described in (a)(1), (2), and (3) above.

(b) Basis Frequency Calibration Using Absolute Bobbin Coil Technique

(1) Adjust the ET instrument for a basis frequency so that the phase angle between a line drawn from the origin to the tip of the response from the through-the-

¹The basis frequency is that test frequency selected for the examination which provides responses from the 20% flat bottom holes and the 100% through-the-wall hole references in the calibration tube standard that have a phase angle difference between 50 deg. and 120 deg.

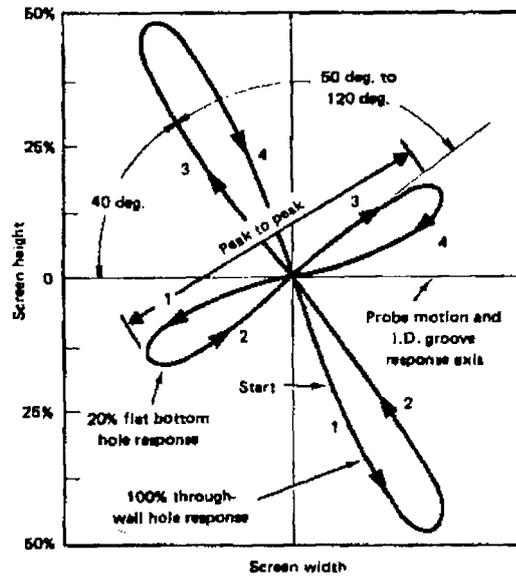


FIG. I-862-1 TYPICAL SIGNAL RESPONSE FROM A PROPERLY CALIBRATED DIFFERENTIAL BOBBIN COIL PROBE SYSTEM

wall hole and the horizontal axis is approximately 40 deg. The phase angle formed by a line drawn from the origin to the tip of the response of the four 20% flat bottom holes and the through-the-wall response line is between 50 deg. and 120 deg. (see Fig. I-862-2).

(2) The sensitivity shall be adjusted to produce a minimum origin-to-peak signal from the four 20% flat bottom holes of 30% of the full scale horizontal presentation with the oscilloscope sensitivity set at 1 V per division.

(3) Adjust the phase or rotation control so that the signal response due to probe rotation, or the 10% deep circumferential inside diameter groove, or both, is positioned along the horizontal axis of the display ± 5 deg. The response of the calibration reference shall be maintained as described in (b)(1) and (2) above.

(4) The response may be rotated to the upper quadrants of the display at the option and convenience of the operator.

(5) Repeat withdrawing the probe through the calibration tube standard at the probe speed selected for the examination. Record the responses of the applicable calibration discontinuities. Ascertain that they are clear-

I-862

ARTICLE 8 — APPENDIX I

I-865

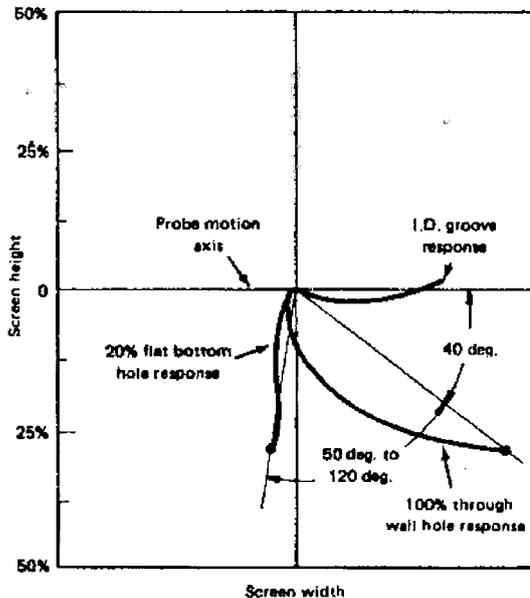


FIG. I-862-2 TYPICAL SIGNAL RESPONSE FROM A PROPERLY CALIBRATED ABSOLUTE BOBBIN COIL PROBE SYSTEM

ly indicated by the instrument and are distinguishable from each other as well as from probe motion signals.

I-863 Auxiliary Frequency(s) Calibration Procedure

(a) Auxiliary frequency(s) may be used to examine the tube wall. Reference standards other than that specified in I-861 may be used to establish examination specific sensitivity settings and an impedance plane phase reference.

(b) Auxiliary frequency(s) may be combined (mixed) with the basis frequency or with each other for extraneous variable suppression. When auxiliary frequency(s) are combined with the basis frequency for extraneous variable suppression, the basis frequency shall meet the requirements of I-862.

(c) Reference standards simulating the extraneous variables shall be used to establish mixing parameters. Auxiliary frequency response to the extraneous variable reference standard, or basis frequency response to the extraneous variable reference standard, or both, shall be a part of the calibration record.

(d) Repeat withdrawing the probe through the calibration standard at the probe speed selected for examination. Record the auxiliary frequency response of the applicable reference discontinuities.

(e) The basis frequency and auxiliary frequencies shall be recorded.

I-864 Calibration Confirmation

(a) Calibration shall include the complete ET examination system. Any change of probe, extension cables, ET instrument, recording instruments, or any other parts of the ET examination system hardware shall require recalibration.

(b) The system calibration hardware shall be confirmed as required by the referencing Code Section.

(c) Should the system be found to be out of calibration (as defined in I-862) the equipment shall be recalibrated. The recalibration shall be noted on the recording. The data analyst shall determine which tubes, if any, shall be reexamined.

I-865 Correlation of Signals to Estimate Depth of Discontinuities

The depth of discontinuities is primarily shown by the phase angle of the ET signal they produce. A relationship of reference comparator depths versus signal phase angle shall be developed for the examination being performed (see Fig. I-865-1). The following reference comparators may be used.

(a) The reference comparators shall be manufactured from a length of tubing of the same nominal size (diameter and wall thickness) and material (chemical composition and product form) as the tubes being examined.

(b) The reference comparators may be flat bottom holes drilled to varying depths.

(c) The drilled holes in the calibration standard (see I-861) may be used to establish this relationship where additional depths are required.

(d) The tolerance for the dimensions of the flat bottom holes shall be the same as those specified for the calibration tube standards [see I-861(g)].

(e) Except for the holes specified in (f)(1) below, all references shall be far enough apart to avoid interference between signals.

(f) When drilled holes are used, the dimensions shall be as follows:

(1) four flat bottom drill holes, $\frac{3}{16}$ in. diameter, 20% through the wall [same as the calibration tube standard (b) in I-861(b)];

I-865

1992 SECTION V

I-891

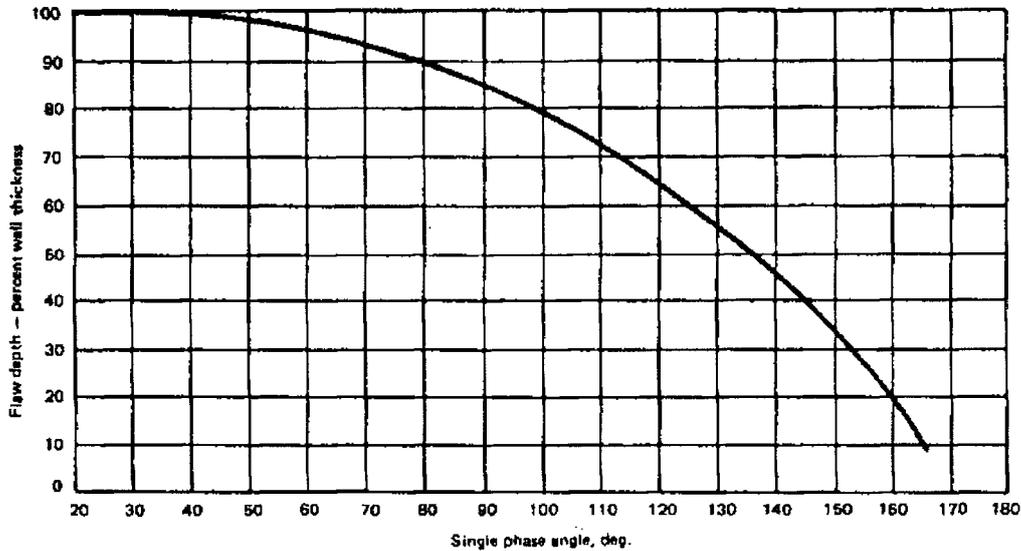


FIG. I-865-1 PHASE ANGLE vs FLAW DEPTH INCONEL TUBE, 400 kHz (TYPICAL 0.050 in. WALL TUBE)

- (2) one flat bottom drill hole, $\frac{1}{16}$ in. in diameter \times 40% through the wall from the outside surface;
- (3) one flat bottom drill hole, $\frac{7}{64}$ in. in diameter \times 60% through the wall from the outside surface;
- (4) one flat bottom drill hole, $\frac{5}{64}$ in. in diameter \times 80% through the wall from the outside surface;
- (5) one through-the-wall drill hole [same as the calibration tube standard in I-861(a)].
- (g) Other reference comparators may be used, provided that they can be demonstrated to be comparable to the intended discontinuity to be evaluated.
- (h) Signal amplitude may be used to estimate depth for defects which exhibit a known regularity in their growth history. Standards representative of the defect shall be used to generate an amplitude versus depth calibration curve.

I-870 EXAMINATION

I-871 General

Data shall be recorded as the probe traverses the tube.

I-872 Probe Speed

The nominal probe speed during examination shall not exceed 14 in./sec. Higher probe speeds may be used if system frequency response and sensitivity to the applicable calibration standards described in I-861 can be demonstrated.

I-880 EVALUATION

I-881 General

The evaluation of examination data shall be made in accordance with the referencing Code Section.

I-890 DOCUMENTATION

I-891 Procedure Requirements

When required by the referencing Code Section, Eddy Current (ET) examinations shall be performed in accordance with a written procedure. Each procedure shall include at least the following information:

- (a) tube material, diameter, and wall thickness;
- (b) size and type of probes;

I-891

ARTICLE 8 — APPENDIX 1

I-891

- (c) mode of operation (differential or absolute or both);
- (d) examination frequency or frequencies;
- (e) manufacturer and model of ET equipment;
- (f) scanning speed during examination;
- (g) examination technique, i.e., hand probe, mechanized probe drive, remote control fixture, etc.;
- (h) calibration procedure and calibration tube standards;
- (i) data recording equipment and procedures;
- (j) procedure for interpretation of results;
- (k) additional information as necessary to describe the examination.

ANEXO A2

ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA INSTRUMENTAÇÃO, SONDAS E PADRÕES DE REFERÊNCIA

Neste anexo, descrevem-se as principais características técnicas e construtivas dos diversos equipamentos e acessórios empregados durante o processo de coleta experimental de dados desenvolvido neste trabalho; visando garantir os padrões de confiabilidade e rastreabilidade que se fazem necessários.

Inicialmente, são apresentadas informações relativas aos equipamentos eletro-eletrônicos empregados para a realização dos ensaios dos diversos tubos-padrão disponíveis.

A seguir, mostram-se características elétricas e dimensionais, das diversas sondas de ensaio confeccionadas.

Concluindo, apresentam-se os valores levantados durante o processo de controle dimensional de fabricação, para os tubos-padrão de referência, especialmente usinados para atender aos objetivos pretendidos neste trabalho de pesquisa.

A2.1 Especificações dos equipamentos eletro-eletrônicos

Marca:	ZETEC
Modelo:	MIZ-12
Número de canais:	4
Técnicas de ensaio:	Mono ou multifrequência
Modos de operação:	Absoluto e diferencial
Faixa de frequências:	10 KHz a 990 KHz
Ganho do sistema:	73 dB
Ganho selecionavel:	0 a 69 (referencial)
Tensão de operação:	110/220 VAC
Display:	Osciloscópio Tektronix modelo 5111

Balaceamento:	Automático (eletrônico)
Rotação de fase:	Digital (0 a 360 graus, passos de 1 grau)
Tensão de excitação:	15 volts pico a pico
Circuito de conexão de sondas:	Em ponte
Impedância nominal de sonda:	100 Ω
Sinal de saída:	8 volts (máximo, bipolar)

A2.2 Especificações das sondas de teste

Sonda S1

Tubo de referência:	Aço inox 304
Resistividade do material:	$6,9 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$
Diâmetro externo:	21,75 mm
Fator de enchimento:	89,4%
Frequência ótima nominal:	310 KHz
Indutância (por enrolamento):	$5,13 \cdot 10^{-5} H$
Resistência (por enrolamento):	1,3 Ω
Número de espiras:	38
Fio utilizado:	32 AWG

Sonda S2

Tubo de referência:	Latão
Resistividade do material:	$6,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
Diâmetro externo:	14,0 mm
Fator de enchimento:	88,5%
Frequência ótima nominal:	16,5 KHz
Indutância (por enrolamento):	$8,8 \cdot 10^{-4} H$
Resistência (por enrolamento):	3,1 Ω
Número de espiras:	225
Fio utilizado:	36 AWG

Sonda S3

Tubo de referência:	Titânio
Resistividade do material:	$6,5 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$
Diâmetro externo:	22,2 mm
Fator de enchimento:	85,5%
Frequência ótima nominal:	340,5 KHz
Indutância (por enrolamento):	$4,08 \cdot 10^{-5} H$
Resistência (por enrolamento):	0,8 Ω
Número de espiras:	25
Fio utilizado:	29 AWG

A2.3 Especificações dos tubos-padrão

As especificações pertinentes encontram-se no relatório técnico AT1-009/94 emitido pelo Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Uma cópia deste documento é apresentada a seguir.



SAE/PR - Secretária de Assuntos Estratégicos da
Presidência da República
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR - CNEN
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR - CDTN

RELATÓRIO TÉCNICO

NÚMERO: AT1-009/94

OBJETO: Tubo-padrão para o ensaio por correntes parasitas

CLIENTE: Donizete Anderson de Alencar

DATA: 17/10/94

REFERÊNCIA:

R. Prof. Mário Werneck, s/nº
Cidade Universitária - Pampulha
Caixa Postal 941
CEP: 30161-970 Belo Horizonte - MG

Telefone: (031) 441-5422 (PARX)
Fac-Símile: (031) 443 4744
Telex 31 1173 CNEN BR

CNC: 00.402.552/0012-61
Inscrição Estadual: ISENTO

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
 CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

2/4

1. MATERIAL RECEBIDO

- Tubo de aço inoxidável 304 com cinco descontinuidades externas usinadas por eletro-erosão, identificado como T1.
- Tubo de latão com cinco descontinuidades externas usinadas por eletro-erosão, identificado como T2.
- Tubo de titânio com cinco descontinuidades externas usinadas por eletro-erosão, identificado com T3.

2. PROCEDENCIA

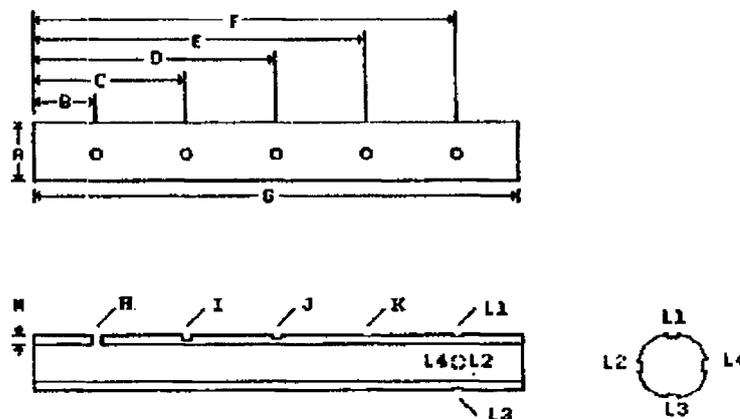
Laboratório de Ensaio Não Destrutivos do CDTN.

3. INSTRUMENTOS UTILIZADOS

- Relógio comparador	marca COMPAC	modelo 720-2400
- Micrômetro	marca TESA	modelo 02.10701
- Escala de aço	marca MITUTOYO	modelo 965-01
- Paquímetro	marca MITUTOYO	modelo 505-634
- Comparador óptico	marca MITUTOYO	modelo PJ-300

4. DIAGRAMA DE MEDIÇÃO

Válido para os três tipos de tubos.



RC-009/94

17/10/94

Rev: *ML*

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
 CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

3/4

5. MEDIÇÕES (em mm)

5.1 Tubo T1

ITEM	DIÂMETRO	DISTANCIA	PROFUNDIDADE	ESPESSURA
A	25,38	-	-	-
B	-	85,5	-	-
C	-	120,0	-	-
D	-	155,0	-	-
E	-	191,0	-	-
F	-	224,5	-	-
G	-	347,5	-	-
H	1,758	-	-	-
I	2,055	-	0,932	-
J	2,819	-	0,707	-
K	4,715	-	0,508	-
L ₁	4,732	-	0,250	-
L ₂	4,687	-	0,253	-
L ₃	4,724	-	0,247	-
L ₄	4,710	-	0,254	-
M	-	-	-	1,24

5.2 Tubo T2

ITEM	DIÂMETRO	DISTANCIA	PROFUNDIDADE	ESPESSURA
A	19,03	-	-	-
B	-	84,5	-	-
C	-	120,0	-	-
D	-	155,0	-	-
E	-	190,0	-	-
F	-	225,0	-	-
G	-	348,1	-	-
H	1,418	-	-	-
I	2,146	-	1,214	-
J	2,964	-	0,911	-
K	4,807	-	0,609	-
L ₁	4,822	-	0,297	-
L ₂	4,763	-	0,311	-
L ₃	4,808	-	0,304	-
L ₄	4,802	-	0,297	-
M	-	-	-	1,53

RC-009/94

17/10/94

Rev: *lll*

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear
 CDTN - Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

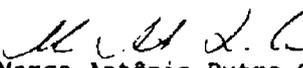
4/4

5.3 Tubo T3

ITEM	DIAMETRO	DISTÂNCIA	PROFUNDIDADE	ESPESSURA
A	25,38	-	-	-
B	-	85,0	-	-
C	-	119,5	-	-
D	-	150,0	-	-
E	-	185,5	-	-
F	-	225,0	-	-
G	-	348,5	-	-
H	1,734	-	-	-
I	2,030	-	0,571	-
J	2,750	-	0,384	-
K	4,660	-	0,297	-
L1	4,717	-	0,131	-
L2	4,730	-	0,133	-
L3	4,780	-	0,127	-
L4	4,754	-	0,139	-
M	-	-	-	0,68

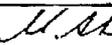

 Eduardo Antônio de Carvalho
 Executor


 Jadir Antônio Moreira Lopes
 Emitente


 Marco Antônio Dutra Quinan
 Aprovação

RC-009/94

17/10/94

Rev: 

ANEXO A3

SADCO 2.0 - SISTEMA COMPUTADORIZADO DE AQUISIÇÃO, REGISTRO E ANÁLISE DE DADOS PARA O ENSAIO POR CORRENTES PARASITAS.

Este anexo relata as características de funcionamento de um sistema composto por uma placa conversora A/D e um programa para aquisição e análise de dados por computador, capaz de efetuar as funções de registro e medição de propriedades em sinais provenientes de ensaios de tubos pela técnica de correntes parasitas. Este sistema foi amplamente utilizado durante a etapa de coleta de dados do presente trabalho, quando foram registrados os valores de amplitude e inclinação primitiva, para as várias descontinuidades existentes nos diversos tubos-padrão disponíveis.

A3.1 Introdução

No laboratório de END do CDTN existem dois conjuntos completos de equipamentos para a inspeção por correntes parasitas, sendo cada um formado pelos seguintes componentes:

- Um aparelho de testes Zetec, modelo MIZ-12;
- Um osciloscópio de memória Tektronix, modelo 5111;
- Um gravador de fita magnética Hewlet-Packard, modelo 3968A;
- Um registrador gráfico Gould, modelo 220.

Todos estes equipamentos são construídos com tecnologia analógica. Assim, ainda que suas características funcionais atendam às especificações técnicas recomendadas nas normas pertinentes (ASME, 1992), sua utilização prática requer cuidados por parte de seus operadores. Verifica-se que é possível a ocorrência de falhas

durante o processo de avaliação de descontinuidades, uma vez que os equipamentos de teste não oferecem recursos adequados para a medição de características nas figuras de Lissajous correspondentes.

Com o objetivo de moderniza-los e incrementar sua capacidade operacional, resolveu-se desenvolver um sistema composto por uma placa conversora analógico/digital compatível com microcomputadores tipo IBM-PC e um software para supervisionar a aquisição, o registro e a análise dos sinais das descontinuidades detectadas durante inspeções.

A3.2 O conversor analógico-digital

Para realizar seu processamento interno, um microcomputador requer que os dados a processar apresentem-se sob formato digital. Como os sinais de saída dos equipamentos utilizados são analógicos, apresentando-se na forma de tensões elétricas proporcionais as variações de grandezas físicas (resistividade, indutância, etc.), torna-se necessário a existência de um circuito eletrônico capaz de realizar esta conversão.

Inicialmente desenvolveu-se nos próprios laboratórios do CDTN, uma placa conversora A/D baseada no circuito integrado ADC 0808, fabricado pela National Semiconductors. Tal sistema é composto por um único chip, que implementa a maioria dos circuitos eletrônicos normalmente utilizados num sistema de aquisição e conversão de dados. Suas principais características técnicas são:

- Resolução: 8 bits
- Erro de conversão: 1 lsb
- Tempo de conversão: 100 microsegundos
- Faixa de tensões de entrada: 0 a 5 Volts

Esta placa conversora encaixa-se em qualquer slot (padrão ISA) disponível em microcomputador tipo IBM-PC. Posteriormente, foram testadas placas de fabricação comercial de maior resolução (12 bits) e menor tempo de conversão (até 10 microsegundos). A título de informação, podem-se citar as placas conversoras A/D dos seguintes fabricantes nacionais:

- LYNX, modelo CAD 12/36
- STD, modelo 5012
- MOLDAÇO, modelo AD-03

Todas estas placas adaptaram-se perfeitamente ao programa de controle desenvolvido, sem necessidade de grandes modificações em seu código-fonte. Basicamente, as poucas alterações que se fizeram necessárias, dizem respeito às posições de endereçamento.

A3.3 O programa de controle e operação

Desenvolveu-se utilizando linguagem Turbo Pascal 7.0 um programa que permite a realização das seguintes tarefas:

- Registrar as condições de operação estabelecidas para cada processo de aquisição de dados (valores de fase, ganho, frequência, etc.);
- Registrar dados que identifiquem os objetos e o ambiente de teste (instrumentação, operador, local, data, etc.);
- Selecionar o canal a ser apresentado;
- Selecionar o modo de apresentação (X-Y ou X-T);
- Gravar em disco os sinais adquiridos;
- Editar passo a passo toda a aquisição;
- Promover com precisão a avaliação de descontinuidades registradas, através de rotinas de análise vetorial;
- Utilizar a impressora para documentar as figuras de interesse.

Durante o processo de aquisição de dados, é esta a seqüência de ações normalmente conduzida.

A3.4 O sistema completo

Na FIG. 60, pode-se observar a esquematização do sistema, a nível de hardware. Verifica-se que, de toda a instrumentação disponível apenas o aparelho de testes do sistema MIZ-12 foi utilizado, compondo em conjunto com um microcomputador tipo IBM-PC, o sistema completo de aquisição de dados. O osciloscópio de memória, o gravador de fita magnética e o registrador gráfico foram substituídos respectivamente pelo monitor de vídeo e pelas unidades de disco, e ainda pelo programa de controle. A FIG. 61 apresenta a tela do sistema SADCO 2, conforme aparece no monitor de vídeo do microcomputador.

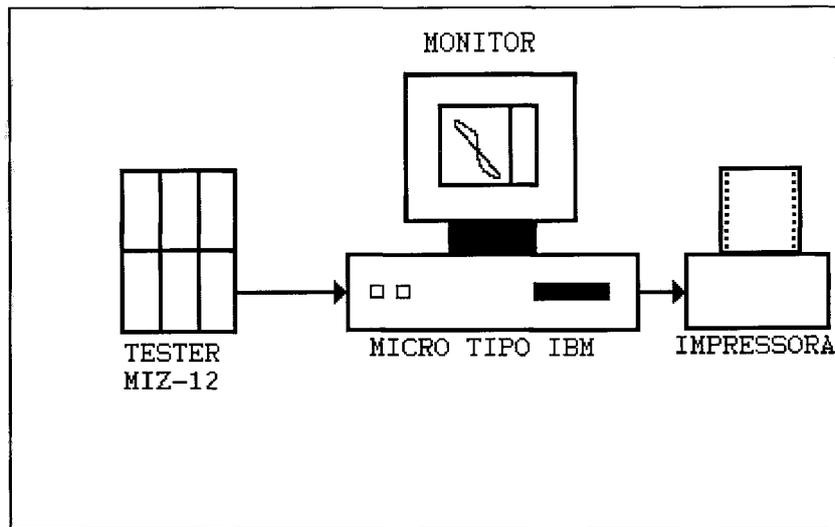


FIGURA 60 - Esquemática do sistema de testes e de aquisição de dados.

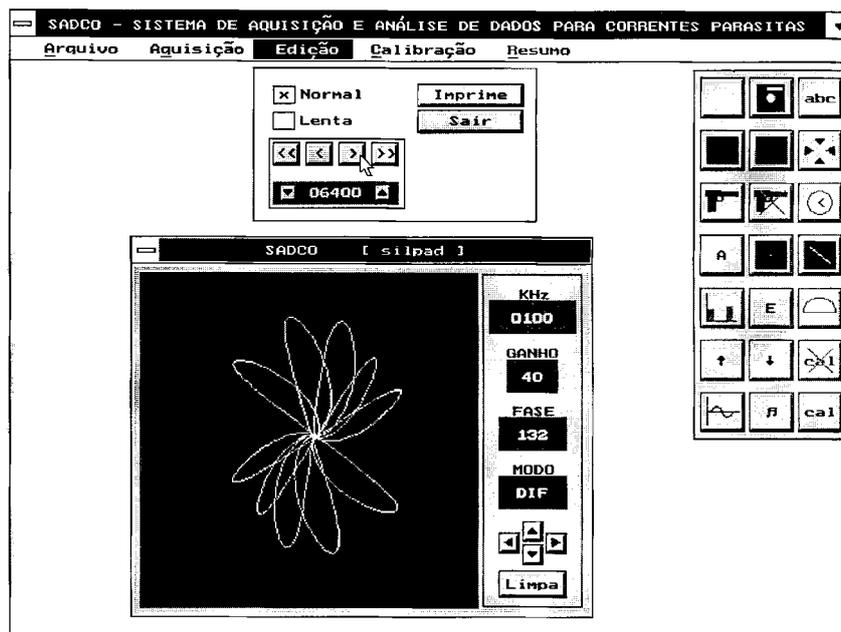


FIGURA 61 - Aspecto da tela do sistema SADCO 2.

A3.5 UTILIZAÇÃO PRÁTICA

O sistema SADC0 2 tem sido utilizado com sucesso no laboratório de END do CDTN. O registro das figuras em papel através de impressora, é empregado principalmente na elaboração de relatórios de inspeções e na publicação de trabalhos técnicos. Também a utilização do analisador vetorial e do editor de registros tem facilitado em muito a análise das figuras correspondentes às descontinuidades detectadas.

São apresentados a seguir alguns exemplos de medições realizadas. As FIG. 62 e 63 apresentam uma mesma descontinuidade avaliada pelo sistema. Observe-se que na 62 os cursores de medição foram posicionados no sentido de promover a medição da inclinação da figura de Lissajous (em graus), conforme o código ASME.

Já na FIG. 63 estes cursores foram reposicionados de maneira a permitir a avaliação da amplitude do sinal (em Volts pico a pico).

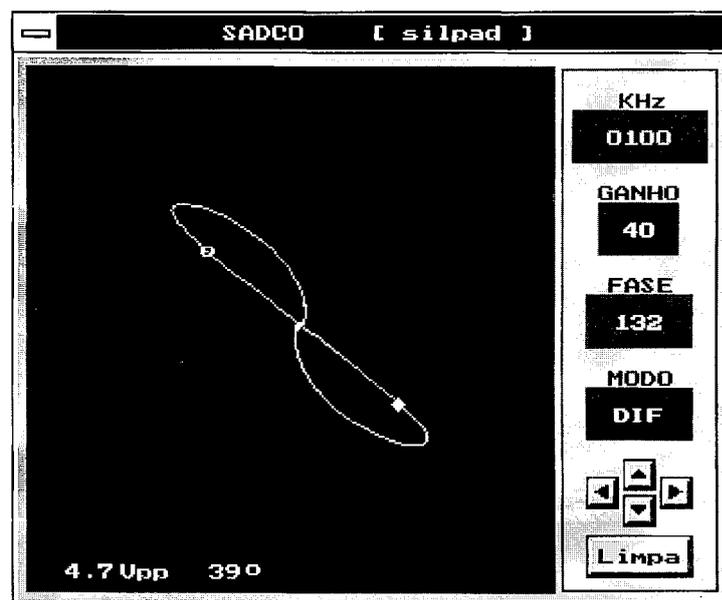


FIGURA 62 - Medição de inclinação em sinal adquirido.

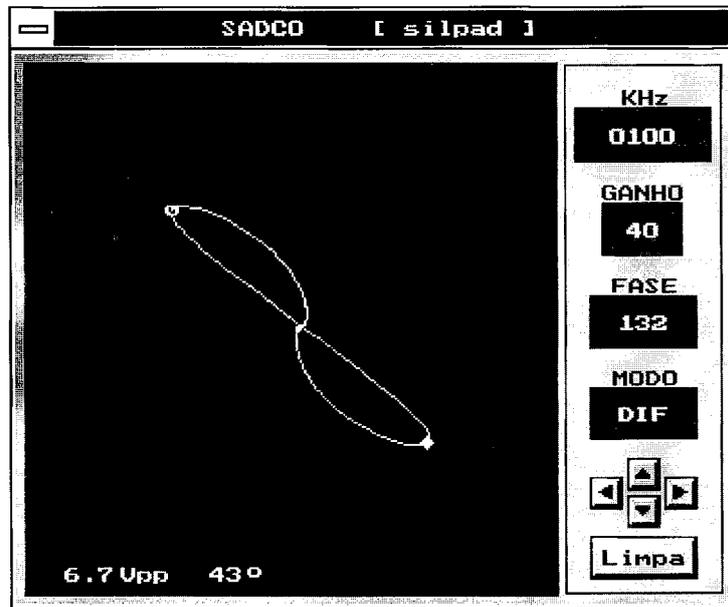


FIGURA 63 - Medição de amplitude em sinal adquirido.

ANEXO A4

VALORES OBTIDOS NO PROCESSO DE COLETA EXPERIMENTAL DE DADOS

Neste anexo são apresentados valores de inclinação primitiva e amplitude, obtidos de acordo com os procedimentos de coleta experimental de dados, definidos no capítulo 3 desta dissertação, para as figuras de Lissajous correspondentes às descontinuidades existentes nos tubos-padrão de aço inoxidável 304 e latão, ensaiados em diversas frequências de teste.

A4.1 Medidas de inclinação

São apresentadas a seguir as tabelas e gráficos relativos às medições efetuadas para os tubos-padrão ensaiados.

TABELA 8

Inclinações primitivas relativas às descontinuidades do tubo-padrão de aço inoxidável 304 em diversas frequências de teste.

Frequência (KHz)	Vibração	100%	80%	60%	40%	20%
50	140	170	180	188	197	206
100	174	194	206	226	238	251
200	226	257	292	315	332	350
400	320	346	407	443	468	498
800	445	464	558	615	668	725

NOTA: Medidas em graus.

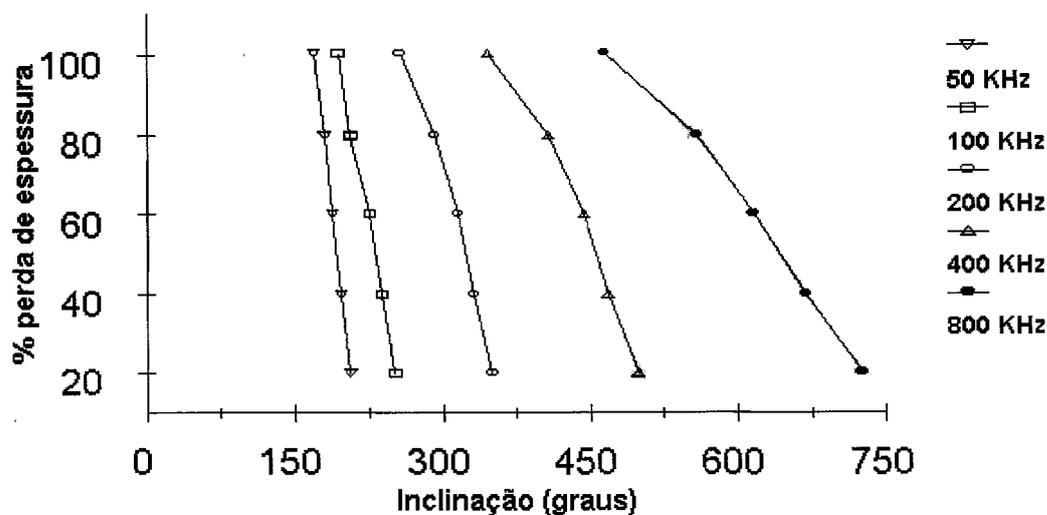


FIGURA 64 - Curvas correspondentes às inclinações primitivas obtidas para o tubo-padrão de aço inoxidável 304 ensaiado em diversas frequências.

TABELA 9

Inclinações primitivas relativas às descontinuidades do tubo-padrão de latão em diversas frequências de teste.

Frequência (KHz)	Vibração	100%	80%	60%	40%	20%
5	105	137	155	175	190	205
10	155	189	223	239	255	265
20	201	238	285	312	341	360
40	264	291	370	414	461	496
80	335	357	472	545	625	675

NOTA: Medidas em graus.

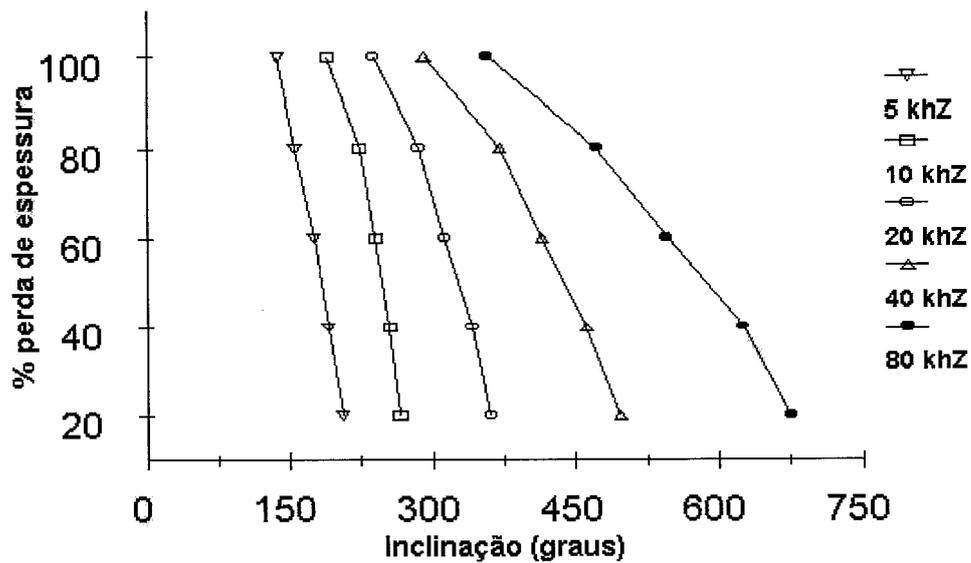


FIGURA 65 - Curvas correspondentes às inclinações primitivas obtidas para o tubo-padrão de latão ensaiado em diversas frequências.

A4.2 Medidas de amplitudes

São apresentadas a seguir, as tabelas relativas às medições de amplitude efetuadas nos tubos-padrão.

TABELA 10

Amplitudes relativas às descontinuidades do tubo-padrão de aço inoxidável 304 em diversas frequências de teste.

Frequência (KHz)	100%	80%	60%	40%	20%
50	4,4	2,9	3,0	3,6	5,1
100	8,4	8,7	6,4	6,4	7,2
200	15,0	7,8	7,2	8,4	12,0
400	13,2	6,4	5,8	5,0	6,8
800	3,7	1,0	0,9	0,5	0,7

NOTA: Medidas em Volts pico a pico.

TABELA 11

**Amplitudes relativas às descontinuidades do tubo-padrão
de latão em diversas freqüências de teste.**

Freqüência (KHz)	100%	80%	60%	40%	20%
5	2,8	3,0	3,2	3,4	3,5
10	5,6	4,8	4,8	4,2	5,2
20	8,6	7,7	7,2	5,6	6,7
40	10,0	5,3	4,2	3,2	3,0
80	7,5	1,9	1,0	0,7	0,5

NOTA: Medidas em Volts pico a pico.

ANEXO A5

ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS, PROGRAMAS E SISTEMAS DE COMPUTAÇÃO

Neste anexo, descrevem-se as especificações técnicas dos diversos equipamentos e acessórios, assim como dos programas efetivamente utilizados no processo de desenvolvimento do sistema SIMPAR.

Inicialmente, são apresentadas informações relativas aos equipamentos (*hardware*) empregados durante o desenvolvimento.

A seguir, citam-se os programas (*softwares*) e demais sistemas utilizados.

Por fim, descrevem-se as especificações mínimas necessárias para a correta instalação e utilização da versão final do sistema SIMPAR.

A5.1 Equipamentos utilizados durante o desenvolvimento

Microcomputador

Processador:	INTEL 80386 DX
Frequência:	40 MHz
Co-processador:	INTEL 80387
Memória RAM:	4 Megabytes
Memória cache:	128 Kilobytes
Unidade de disco Rígido:	170 Megabytes
Unidade de disco flexível A:	3 1/2 " - 1.44 Megabytes
Unidade de disco flexível B:	5 1/4 " - 1.20 Megabytes
Teclado:	101 teclas

Placa de vídeo:	SVGA - 1 Megabytes
Placa controladora (I/O):	IDE
Portas de comunicação:	COM 1, COM 2 e LPT1

Monitor de vídeo

Marca:	SAMSUNG
Modelo:	4967
Padrão:	SVGA color
Diagonal:	14"
Resolução:	0,28 mm

Impressora

Marca:	EPSON
Modelo:	LX 810 L
Capacidade:	80 colunas
Tipo:	Matricial - 9 agulhas

Mouse

Marca:	Genius
Modelo:	1303
Padrão:	MICROSOFT
Número de botões:	3

Placa conversora A/D

Marca:	LYNX
Modelo:	CAD 36/12
Resolução:	12 bits

A5.2 Programas e sistemas utilizados para o desenvolvimento

Sistema operacional:	MICROSOFT DOS versão 6.1
Sistema de desenvolvimento:	BORLAND TURBO-PASCAL 7.0
Sistema de aquisição de dados:	SADCO 2.0
Interface gráfica:	BORLAND EGA VGA.BGI

A5.3 Especificação mínima requerida para implementação e utilização do sistema SIMPAR**Microcomputador**

Processador:	INTEL 80386 SX
Frequência:	16 MHz
Memória RAM:	2 Megabytes
Unidade de disco flexível:	5 1/4 " - 1.20 Megabytes
Teclado:	101 teclas
Placa de vídeo:	EGA - 256 Kilobytes
Portas de comunicação:	COM 1 e LPT1
Monitor de vídeo:	EGA monocromático
Impressora:	Padrão EPSON, matricial, 9 agulhas
Mouse:	Padrão MICROSOFT, 2 botões
Sistema operacional:	MS-DOS versão 3.3

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALENCAR, D. A. Sistema computadorizado de aquisição, registro e análise de dados para o ensaio por correntes parasitas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 13, 1994, Belo Horizonte. Anais... São Paulo: ABENDE, 1994. p. 179-183.
- ALMEIDA, A.L.S. *Ferramentas avançadas em Turbo Pascal*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 1992. 490p.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICS ENGINEERS, New York. Section V, Article 8; *Boiller and pressure vessel code*. New York, 1992. p. 127-133.
- AMERICAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING. Columbus, *Electromagnetic testing*. v.4. Columbus, 1986. 187p.
- BARROSO, L.C. et al. *Cálculo numérico*. 2.ed. São Paulo: Harbra, 1987. 283p.
- BRICE, C. et al. *Applied numerical methods*. New York: John Wiley & Sons, 1970. 604p.
- COSENTINO, L. J. L. *WINDOWS: uma forma prática de apresentação*. São Paulo: Atlas, 1994. 384p.
- COSTA JÚNIOR, E., MESQUITA, R.C., SANTOS, N.R. Modelamento matemático 3D por elementos finitos para END com alimentação em tensão. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 12, 1993, São Paulo. Anais...São Paulo: ABENDE, 1993 p. 31-37.
- DALE, E. *Audio visual methods in teaching*. New York: HRW, 1969. 213p.
- ECT. MAD4 eddy current tester data sheet. Virginia Beach, 1994. 4p.

- ECT. Report 8418-R1- Resistivity of materials. Virginia Beach, 1986. 8p.
- GAGNÉ, R. The use of simulators. In: GLAZER, R. (Ed). *Training research and education*. Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 1962.
- GOULD. *Model 220 strip chart recorder: operating manual*. Cleveland, 1980. 76p.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R., MERRIL, J. *Fundamentos de física*. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1994. 334p.
- HEWLETT-PACKARD. *Model 3968 instrumentation tape recorder manual*. New York, 1981. 248p.
- JUDICE, E.D. *Elementos de geometria analítica*. 2.ed. Belo Horizonte: Vega, 1971. 188p.
- KREYSZIG, E. *Matemática superior*. Rio de Janeiro: LTC, 1977. v.2, 267p.
- LEVINE, R.I., DRANG, D.E., EDELSON, B. *Inteligência artificial e sistemas especialistas*. São Paulo: McGraw-Hill, 1988. 214p.
- LUNETTA, V.N., HOFSTEIN, A. Simulations in science education. *Science education*, v.65, n.3, p.243-252, 1981.
- McGUIRE, C. Simulation technique in the teaching and testing of problem-solving skills. *Journal of Researchs in Science Teaching*, n.13, p.89-100, 1976.
- MILLMAN, J., HALKIAS, C.C. *Integrated electronics: analog and digital circuits and systems*. Tokyo: McGraw-Hill-Kogakusha, 1972. 911p.
- MITTRA, S. S. *Decision support systems, tools and techniques*. New York: Wiley-Interscience, 1986. 262p.
- MOORE J.L., THOMAS F.H. Computer simulation of experiments: a valuable alternative to traditional laboratory work for secondary school teaching. *S.S.R.*, p.641-655, Jun. 1983.

- OLIVER, R., OKEY, J. Using computer simulations to promote achievement and transfer. *Research in Science Education*, n.16, p.191-198, 1986.
- PALANISAMY, R., LORD, W. Finite element analysis of eddy current phenomena. *Materials Evaluation*, p.39-43, out. 1980.
- PAYNE, J. A. *Introcuction to Simulation - Programming techniques and methods of analysis*. New York: McGraw-Hill, 1982. 290p.
- PEARL, J. *Heuristics: Inteligent Search strategies for computer problem solving*. Menlo Park: Addison-Wesley, 1985. 198p.
- ROCHA, A. R. Qualidade de software. In: SEMINÁRIO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO, 2, 1989, Nova Friburgo. Anais...Rio de Janeiro: UFRJ, 1989. p.48-57.
- ROCHA, A. R. Avaliação da qualidade de software. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE INFORMÁTICA EDUCATIVA, 2, 1991, Maceió. Anais...Maceió: UFAL, 1991. p. 11-19.
- ROCHA, A. R., CAMPOS, G. H. Uma proposta de manual para avaliação da qualidade de software educacional. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE INFORMÁTICA EDUCATIVA, 2, 1991, Maceió. Anais...Maceió: UFAL, 1991. p. 118-134.
- RODRIGUES, W. J. R. *Linha de transmissão: Um recurso didático construído no contexto de uma nova proposta metodológica de ensino*. Belo Horizonte: CEFET-MG, 1993. 267p. (Dissertação, Mestrado em Tecnologia).
- ROSEMBAUM, S.M. Computer simulation for high school students. New York: WLC, 1970. 236p.
- SHANNON, A. Introduction to simulation. In: PAYNE, J. A. (ed.) *Introcuction to Simulation - Programming techniques and methods of analysis*. New York: McGraw-Hill, 1982. p.2.

SILVA, M.L. *Uso de simulação computadorizada em aulas práticas de eletrônica digital*. Belo Horizonte: CEFET-MG, 1993. 215p. (Dissertação, Mestrado em tecnologia).

SOARES, L.F.G. *Modelagem e simulação discreta de sistemas*. São Paulo IME-USP, 1990. 174p.

SOARES, A. *Aplicações das correntes de Foucault na detecção de descontinuidades em tubos de Zircaloy*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1976. 200 p. (Dissertação, Mestrado em Ciências e Técnicas Nucleares).

STAHL, M. Fatores de qualidade de software educacional. In: SEMINÁRIO DE INFORMÁTICA NA EDUCAÇÃO, 1991, Nova Friburgo. Anais...Nova Friburgo: 1981. p. 58-67.

STEGMANN, D. *Curso de correntes parasitas*. São Paulo: ABENDE, 1987. 133p.

STEGMANN, D. *Fundamentos do método de correntes parasitas*. São Paulo: ABENDE, 1990. 98p.

TAWNEY, D.A. *Simulation and modelling in science computer assisted learning*. London: Council for Educational Technology, 1976. 36p. (relatório)

TIPPLER, P. *Física*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 999p.

ZETEC. *MIZ-12 Multiple frequency eddy current tester system - operating manual*. Issaquah: Zetec, 1984. 88p.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

- ALENCAR, D. A., SANTOS, N. R. Desenvolvimento de software de simulação em tempo real para o ensaio por correntes parasitas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS, 12, 1993, São Paulo. Anais...São Paulo:ABENDE, 1993. p. 31-37.
- BORLAND INTERNATIONAL INC. *Turbo Pascal 7.0 programmer's reference*. Scotts Valley: BORLAND PRESS, 1992. 298p.
- CARVALHO, H. G. *Sistemas Tutoriais Inteligentes*. Belo Horizonte: Faculdade de Educação da UFMG, 1991. 24p. (Nota prévia).
- DUTTON, F. *Ferramentas em Turbo Pascal*. 2.ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 1990. 395p.
- FRANÇA, J.L., VASCONCELLOS, A.C., BORGES, S.M. *Manual para normalização de publicações técnico-científicas*. 2.ed. Belo Horizonte: UFMG, 1992. 196 p.
- GENERAL DYNAMICS. *Classroom training handbook:Nondestructive Testing - Eddy current testing*. Ottawa: General Dynamics, 1967.
- HERGERT, D. *Dominando o Turbo Pascal*. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 1989. 550p.
- ISHIDA, T. *Turbo Pascal 5 para programadores Basic*. São Paulo: Atlas, 1989. 189p.
- JAMSA, K., NAMEROFF S. *Turbo Pascal programmer's library*. Berkeley: McGraw-Hill, 1986. 562p.
- KAY, C.B. *Mathematics for computer programmers*. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984. 182p.

LAWRENCE, P.D., MAUCHE, K. *Real time microcomputer system design: an introduction*. New York: McGraw-Hill, 1987. 255p.

NEWMAN, W. M., SPROULL, R.F. *Principles of interactive computer graphics*. 2.ed. Tokyo: McGraw-Hill, 1983. 542p.