

ATENÇÃO

O ORIGINAL DESTE ÍTEM NÃO FORNECE CONDIÇÕES
PARA OBTER UMA CÓPIA DIGITALIZADA COM
MELHOR QUALIDADE

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**MEDIDAS E ANÁLISES DE RUÍDO NEUTRÔNICO DO REATOR DE
PESQUISA, TIPO PISCINA, DO INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS
E NUCLEARES DE SÃO PAULO**

Graciete Pedro Simões

**Dissertação apresentada ao Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares como
parte dos requisitos para obtenção do
Grau de "Mestre na Área de Reatores
Nucleares de Potência e Tecnologia do
Combustível Nuclear".**

Orientador: Dr. Lao Holland

**São Paulo
1979**

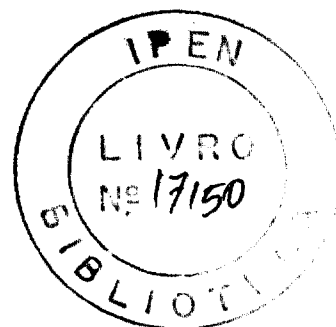
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

MEDIDAS E ANÁLISES DE RUÍDO NEUTRÔNICO
DO REATOR DE PESQUISA , TIPO PISCINA , DO
INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E
NUCLEARES DE SÃO PAULO.

Graciete Pedro Simões

Dissertação apresentada ao Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares como
parte dos requisitos para obtenção do
grau de "Mestre" na Área de Reatores
Nucleares de Potência e Tecnologia
do Combustível Nuclear

Orientador: Dr. LAO HOLLAND



São Paulo
1979

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Aos meus pais: Elisa e Manoel

A meu noivo: Leonardo

A meu irmão: Sergio

INSTITUTO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO NUCLEARES
I.P.D.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Lao Holland pela orientação, colaboração, dedicação e interesse demonstrados durante a execução deste trabalho;

Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares pela oportunidade concedida para o desenvolvimento deste trabalho e ao PRONUCLEAR - Programa de Formação de Recursos Humanos para o Setor Nuclear - pelo auxílio financeiro;

À equipe de Operação e Manutenção do Reator IEAR-1 pelo auxílio prestado na montagem dos equipamentos de medida e ao pessoal da Oficina Mecânica pela dedicação dispensada;

Aos colegas do Grupo de Física Experimental de Reatores pelas discussões, sugestões e colaboração;

Ao Prof. Dr. Rui Ribeiro Franco e Terezine Arantes Ferraz pelas sugestões apresentadas;

Ao colega Nelson Leon Meldonian pela cooperação e amizade;

Ao Eng. Peter Joseph Barry, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, pela colaboração na obtenção dos gráficos;

Ao Luiz Atilio Vicentini pela revisão e normalização das referências bibliográficas ;

À Srta. Creusa Moreira Diniz pela coordenação e elaboração datilográfica;

Finalmente, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, prestaram sua colaboração no decorrer deste trabalho.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
I. P. E. N.

RESUMO

A variação da população neutrônica ou potência de um reator nuclear (o ruído neutrônico) é um fenômeno aleatório que só pode ser descrito em termos de suas propriedades estatísticas. As variações de potência num reator de potência são produzidas por várias fontes indutoras. Neste trabalho estudou-se o ruído neutrônico característico do Reator de Pesquisa IEAR-1 (potência nominal 2 MW), usando-se duas câmaras de ionização compensada ("Westinghouse" WL-6377), e três possíveis fontes indutoras, a saber: vibração da barra de controle e da ponte suporte do reator e a temperatura de entrada da água no cerne do reator.

Os detectores tipo CIC foram posicionados dentro de tubos rígidos e fixados na placa matriz do reator. As medidas de temperatura foram feitas com um termopar Ni-Cr/Ni (diâmetro $\approx 0,2$ mm) localizado a 10 mm acima do elemento combustível.

Ainda que a correlação entre os sinais neutrônicos foi significativa ($> 0,4$) para frequências no intervalo de 0 a 10 Hz, nenhuma ressonância foi identificada. Uma coerência significativa ($> 0,4$) foi observada entre a vibração da barra de controle e o ruído neutrônico no intervalo de 0 a 10 Hz. A correlação medida entre as vibrações da ponte e a temperatura de entrada da água no reator foi insignificante.

ABSTRACT

Variations in the neutron density or power of a nuclear reactor (the neutron noise) operating at nominally constant power are generally random and can only be described in terms of statistical parameters. Random variations in the power of a power reactor are produced by one or more driving functions. In this work the neutron noise of the pool reactor IEAR-1 (2 MW nominal power) has been studied using two compensated ionization chambers (Westinghouse WL6377) and related to three possible driving functions, namely vibration of the control bar and reactor support bridge and the temperature of the water entering the core. The CIC detectors were located in rigid tubes in turn positively located in the reactor lattice plate. Conventional accelerometers were used. Temperature measurements were made with a NiCr/Ni thermocouple (wire diam = 0.2mm) located 10 mm above the top of a fuel element.

Although the correlation between the measured neutron signals was high ($> 0,4$) for frequencies in the range 0 to 10 Hz no resonances were identified in the neutron noise. A significant correlation ($> 0,4$) between the control bar acceleration and the neutron flux was obtained in the frequency range 0 to 10 Hz. The measured correlation between the neutron noise and both the bridge vibration and the reactor water inlet temperature was insignificant.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1- Análise de Ruído em Reatores Nucleares	3
1.1.1- Reatores de Potência Zero	3
1.1.1.a- Investigação no Domínio de Tempo	5
1.1.2- Reatores de Potência	15
1.1.2.a- Método da Densidade Espectral de Potência - Auto e Cruzada	18
1.1.3- Diferenças Básicas entre Análise de Ruído de Reatores de Potência e Potência Zero	20
1.1.4- Reator de Pesquisa IEAR-1, Tipo Piscina	24
1.2- Objetivos e Relevâncias deste Trabalho	25
2. RESUMO TEÓRICO	28
2.1- Teoria Geral de Análise de Ruído	28
2.1.1- Processo Aleatório	28
2.1.1.a- "Background" Matemático	30
2.1.1.b- Classificações do Processo Aleatório	32
2.1.2- Relações Básicas	36
2.1.2.a- Função Densidade Espectral de Potência (DEP)	36
2.1.2.b- Função Correlação Cruzada	38
2.1.2.c- Função Densidade Espectral de Potência Cru- zada (DEPC)	39
2.1.2.d- Função Coerência	40
2.1.2.e- Fase	41
2.1.2.f- Função de Transferência	41
2.2- Influência da Vibração do Detector de Nêutrons	43
2.3- Considerações Gerais sobre um Sistema de Análi- se de Ruído	45
2.3.1- Transdutor Neutrônico Utilizado	48
3. ARRANJO EXPERIMENTAL	50
3.1- Descrição do Reator IEAR-1	50
3.1.1- Aspectos Gerais	50
3.1.2- Cerne do Reator	51
3.1.2.a- Elemento Combustível	52
3.1.2.b- Barras e Unidade Motriz	52

	Pág.
3.1.2.c- Placa Matriz	53
3.1.3- Piscina do Reator	54
3.1.4- Sistema de Refrigeração	54
3.1.4.a- Circuito Primário	55
3.1.4.b- Circuito Secundário	57
3.1.5- Instrumentação e Controle	57
3.2- Sistema para Medir a Flutuação do Fluxo de Nêutrons	57
3.2.1- Sistema de Suporte dos Detectores de Nêutrons	58
3.2.2- Sistema de Detecção e Análise de Dados Associado ao Detector de Nêutrons	61
3.3- Sistema para Medir Vibrações Mecânicas	64
3.3.1- Vibração da Barra de Controle	64
3.3.2- Vibração da Estrutura do Reator	65
3.4- Sistema para Medir a Flutuação da Temperatura de Entrada do Refrigerante no Cerne do Reator IEAR-1	66
3.4.1- Sistema de Suporte do Termopar	67
4. MEDIDAS E ANÁLISE DE DADOS	85
4.1- Calibração do Sistema de Detecção das Flutuações do Fluxo de Nêutrons	86
4.2- Medidas Preliminares	87
4.2.1- Estudo do Sistema de Suporte dos Detectores de Nêutrons	87
4.2.1.a- Sistema de Suporte tipo "Três Cordas de Nylon"	87
4.2.1.b- Sistema de Suporte tipo "Tripê"	89
4.2.1.c- Sistema de Suporte tipo "Tubo de Retenção"	93
4.2.2- Estudo da Influência do Sistema de Compensação dos Detectores de Nêutrons	96
4.2.2.a- Medidas no Reator IEAR-1	97
4.2.3- Estudo da Utilização de Baterias como Fontes de Alimentação	99
4.3- Medidas do Ruído Neutrônico Característico do Reator IEAR-1 em suas Possíveis Fontes Indutoras	100
4.3.1- Reator a 2 MW	101
4.3.2- Reator a 20 kW	104
4.3.3- Reator Desligado	106
4.3.4- Observações Gerais	107

	Pág.
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	141
APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DAS BATERIAS DE ALIMENTAÇÃO DOS DETECTORES DE NEUTRONS	144
A.1- Dados e Resultados de Cálculos	148
A.2- Fator de Correção para o Cálculo do Fluxo de Nêutrons Térmicos por Meio das Folhas Grandes	149
A.3- Erro Máximo na Determinação do Fluxo de Nêutrons Térmicos	149
APÊNDICE B - MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DE RUÍDO EM REATORES DE PESQUISA TIPO PISCINA	154
B.1- Ruído Neutrônico Induzido por Vibrações Mecânicas	154
B.2- Ruído Neutrônico Induzido pelas Flutuações da Temperatura de Entrada e Velocidade do Refrigerante	159
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	168

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIG. 1.1- Diagrama de Blocos da Instrumentação para Medidas da Densidade Espectral de Potência	12
FIG. 1.2- Diagrama de Blocos da Instrumentação para Medidas de Densidade espectral de Potência Cruzada	13
FIG. 2.1- Registros Amostra da Saída de um Gerador de Ruído Térmico	29
FIG. 2.2- Conjunto de Funções Amostra formando um Processo Aleatório	30
FIG. 2.3- Classificações de Processos Aleatórios	33
FIG. 2.4- Esboço mostrando a Função Correlação Cruzada de Registros Amostra $x_k(t)$ e $y_k(t)$	39
FIG. 2.5- Sistema Linear de uma Única Entrada	43
FIG. 2.6- Esquema de um Sistema de Análise de Ruído	45
FIG. 3.1- Arranjo Crítico do Reator IEAR-1 durante a Execução deste Trabalho	68
FIG. 3.2- Vista Geral do Reator IEAR-1	69
FIG. 3.3- Elemento Combustível do Reator IEAR-1 (dimensões em mm)	70
FIG. 3.4- Vista do Topo da Piscina	71
FIG. 3.5- Câmara Estanque do Detector de Nêutrons (dimensões em mm)	72
FIG. 3.6- Sistema de Suporte do Detector de Nêutrons Tipo "Tripê" (Dimensões em mm)	73
FIG. 3.7- Sistema de Suporte do Detector de Nêutrons, Tipo "Tubo de Retenção". (Dimensões em mm)	74
FIG. 3.8- Junção dos Dois Tubos de Alumínio que formam o Tubo de Retenção do Detector de Nêutrons (Dimensões em mm)	75
FIG. 3.9- Localização dos Tubos de Retenção e "Bóias" na Placa Matriz do Reator IEAR-1	76

	Pág.
FIG. 3.10- Sistema Inicial de Detecção e Análise de Dados Associado ao Detector de Nêutrons	77
FIG. 3.11- Sistema de Detecção e Análise de Dados Associado ao Detector de Nêutrons	78
FIG. 3.12- Sistema de Fixação do Acelerômetro à Barra de Controle do Reator IEAR-1. (Dimensões em mm)	79
FIG. 3.13- Sistema de Detecção e Análise de Dados Associado ao Acelerômetro Posicionado na Barra de Controle do Reator IEAR-1	80
FIG. 3.14- Sistema de Fixação do Acelerômetro à Plataforma do Reator IEAR-1. (Dimensões em mm).	81
FIG. 3.15- Sistema de Detecção e Análise de Dados Associado ao Acelerômetro Posicionado na Ponte do Reator IEAR-1.	82
FIG. 3.16- Sistema de Detecção e Análise de Dados Associado ao Termopar	83
FIG. 3.17- Sistema de Suporte do Termopar	84
FIG. 4.1 - Localização dos Detectores (D_C e D_T) na Piscina do Reator IEAR-1	111
FIG. 4.2 - DEP do Ruído Neutrônico do IEAR-1, Observado com D_{C1} e D_{C2} . Trecho 2 da Gravação	111
FIG. 4.3 - DEP do Ruído Neutrônico do IEAR-1, observado com D_{C1} e D_{C2} . Trecho 5 da gravação	112
FIG. 4.4 - DEP do Ruído Neutrônico do IEAR-1, observado com D_{C1} e D_{C2} . Trecho 7 da Gravação	112
FIG. 4.5 - DEP (D_C/D_T) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada	113
FIG. 4.6 - Coerência (D_C/D_T) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada	113
FIG. 4.7 - DEP (D_C/D_T) - Reator 1 kW/Automático/Bomba Ligada	114
FIG. 4.8 - Coerência (D_C/D_T) - Reator 1 kW/Automático/Bomba Ligada.	114
FIG. 4.9 - DEP (D_C/D_T) - Reator desligado/Bomba Desligada	115
FIG. 4.10- Coerência (D_C/D_T) - Reator Desligado/Bomba Desligada	115

	Pág.
FIG. 4.11- Localização dos Detectores (D_C e D_{TR}) na Piscina do Reator IEAR-1	116
FIG. 4.12- DEP (D_C/D_{TR}) 12,5Hz - Reator 2MW/Automá- tico/Bomba Ligada	116
FIG. 4.13- Coerência (D_C/D_{TR}) 12,5Hz - Reator 2MW/ Automático/Bomba Ligada	117
FIG. 4.14- Fase (D_C/D_{TR}) 12,5Hz - Reator 2 MW/Auto- mático/Bomba Ligada	117
FIG. 4.15- DEP (D_C/D_{TR}) 500 Hz - Reator 2 MW/Auto- mático/Bomba Ligada	118
FIG. 4.16- Coerência (D_C/D_{TR}) 500 Hz - Reator 2 MW/ Automático/Bomba Ligada	118
FIG. 4.17- DEP (D_C/D_{TR}) - Reator Desligado/Bomba Desligada	119
FIG. 4.18- Coerência (D_C/D_{TR}) - Reator Desligado/ Bomba Desligada	119
FIG. 4.19- Fase (D_C/D_{TR}) - Reator Desligado/Bomba Desligada	120
FIG. 4.20- DEP (D_C -Normal -sem compensação/ D_{TR} - modificado/Compensação Desconectada) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada	120
FIG. 4.21- DEP (D_C - Normal- com Compensação/ D_{TR} - Modificada - Compensação conectada) - Reator 2MW/Automático/Bomba Ligada	121
FIG. 4.22- DEP (D_{TR} - Modificado/Compensação conec- tada/Fluke)- Reator 2MW/Automático/Bom- ba Ligada	121
FIG. 4.23- DEP (D_{TR} - modificada/compensação conec- tada/Bateria)- Reator 2 MW/Automático/ Bomba Ligada	122
FIG. 4.24- DEP (D_{TR} -modificado/compensação conec- tada/Fluke)- Reator 2MW/Automático/Bom- ba Ligada	122
FIG. 4.25- DEP (D_{TR} - modificado/compensação conec- tada/Bateria)- Reator 2 MW/Automático/ Bomba Ligada	123
FIG. 4.26- DEP (CIC-1/CIC-2)- Reator 2 MW/Automá- tico /Bomba Ligada.	123

FIG. 4.27- Coerência (CIC-1/CIC-2)- Reator 2MW/ Automático/Bomba Ligada	124
FIG. 4.28- Fase (CIC-1/CIC-2)- Reator 2 MW/Auto mático/Bomba Ligada	124
FIG. 4.29- DEP (CIC-1/AB) 12,5Hz - Reator 2MW/Au- tomático/Bomba Ligada	125
FIG. 4.30- Coerência (CIC-1/AB) 12,5Hz - Reator 2MW/Automático/Bomba Ligada	125
FIG. 4.31- Fase (CIC-1/AB) 12,5Hz - Reator 2MW/Au- tomático/Bomba Ligada	126
FIG. 4.32- DEP (CIC-1/AB) 500Hz - Reator 2MW/Au- tomático/Bomba Ligada	126
FIG. 4.33- Coerência e Fase (CIC-1/AB) 500Hz - Reator 2 MW/Automático /Bomba Ligada	127
FIG. 4.34- DEP (CIC-1/APV) - Reator 2 MW/Automã- tico/Bomba Ligada	127
FIG. 4.35- Coerência (CIC-1/APV)- Reator 2MW/Au- tomático /Bomba Ligada	128
FIG. 4.36- DEP (AB/APV) - Reator 2 MW/Automático/ Bomba Ligada	128
FIG. 4.37- Coerência (AB/APV)- Reator 2MW/Automã- tico/Bomba Ligada	129
FIG. 4.38- DEP (CIC-1/APH(1))- Reator 2MW/Automã- tico/Bomba Ligada	129
FIG. 4.39- Coerência (CIC-1/APH(1))- Reator 2 MW/ Automático/Bomba Ligada	130
FIG. 4.40- DEP (CIC-1 e APH(//))- Reator 2MW/Auto- mático/Bomba Ligada.	130
FIG. 4.41- Coerência (CIC-1/APH(//))- Reator 2MW/ Automático /Bomba Ligada	131
FIG. 4.42- DEP (CIC-1/T)- Reator 2 MW/Automático/ Bomba Ligada	131
FIG. 4.43- Coerência (CIC-1/T)- Reator 2 MW/Auto- mático/Bomba Ligada	132
FIG. 4.44- DEP (CIC-1/CIC-2)- Reator 20 kW/Automã- tico/Bomba Desligada	132
FIG. 4.45- DEP (CIC-1/CIC-2)- Reator 20 kW/Automã- tico/Bomba Ligada	133
FIG. 4.46- Coerência (CIC-1/CIC-2)- Reator 20 kW/ Automático/Bomba Ligada	133

FIG. 4.47- Fase (CIC-1/CIC-2)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada	134
FIG. 4.48- DEP (CIC-2/AB)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada	134
FIG. 4.49- Coerência (CIC-2/AB)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada	135
FIG. 4.50- Fase (CIC-2/AB)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada	135
FIG. 4.51- DEP (CIC-2/APV)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada	136
FIG. 4.52- Coerência (CIC-2/APV)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada	136
FIG. 4.53- DEP (CIC-1/CIC-2)- Reator Desligado / Bomba Desligada	137
FIG. 4.54- DEP (CIC-1/AB)- Reator Desligado/Bomba Desligada	137
FIG. 4.55- DEP (CIC-1/APV)- Reator Desligado/Bomba Desligada	138
FIG. 4.56- DEP (T)- Reator Desligado/Bomba Desligada	138
FIG. 4.57- DEP (CIC-1/CIC-2)- Reator Desligado/Bomba Ligada	139
FIG. 4.58- DEP (CIC-1/AB)- Reator Desligado/Bomba Ligada	139
FIG. 4.59- DEP (AB/APV)- Reator Desligado/Bomba Ligada	140
FIG. 4.60- DEP (CIC-1)- Reator (2 MW - 20 kW - Desligado)/Automático/Bomba Ligada	140
FIG. A.1- Curvas Características de Saturação da CIC (WL-6377).	151
FIG. A.2- Arranjo Experimental para a Medida da Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons por meio da Ativação de Folhas de Ouro . (Dimensões em mm).	152
FIG. A.3- Distribuição Espacial do Fluxo Neutrônico do Reator IEAR-1	153
FIG. B.1- Modelo Simplificado da Estrutura do Reator. A Massa da Ponte e a do Cerne são respectivamente m_1 e m_2 . A Força aleatória $f_R(t)$ está agindo no cerne	156

1. INTRODUÇÃO

Qualquer processo imposto sobre algum sinal tende a introduzir perturbações indesejáveis, que se denominam ruído. Por tanto, ruído são todas as manifestações estranhas ao sinal - de origem e que uma vez agregadas não podem mais ser separadas.

O termo ruído é normalmente usado em muitas áreas científicas; entre engenheiros nucleares, este termo é universalmente aceito para designar flutuações aleatórias em parâmetros de reatores nucleares / 56, 57 , 59 /.

Num reator, o ruído neutrônico provém da natureza aleatória das flutuações de seu nível de potência (ou população - de nêutrons).

Quando a população neutrônica é relativamente baixa (reatores de potência zero), a natureza estocástica do processo de fissão em cadeia é a principal responsável pelas flutuações aleatórias do fluxo de nêutrons.

Entretanto, quando a população neutrônica é alta, por exemplo, o caso dos reatores de potência, é necessário considerar todos os parâmetros que provocam variações de reatividade, pois eles são as fontes predominantes de ruído - para as flutuações do nível de potência.

Numerosos trabalhos individuais fornecem testemunhos do uso difundido da análise de ruído para o estudo do comportamento dinâmico de reatores de potência e potência zero.

Eles permitiram ainda que autores diversos preparassem resenhas bibliográficas históricas e apanhados teóricos sobre o ruído de reatores. /44-46, 51, 56, 57, 59/

Juntem-se às referências acima a série de conferências patrocinadas a partir de 1963 e que se acham listadas a seguir:

- 1963 - Noise Analysis in Nuclear Systems (Gainesville , Flórida, EUA).
- 1966 - Neutron Noise , Waves, and Pulse Propagation (Gainesville, Flórida, EUA).
- 1969 - Japan U.S. Seminar on Nuclear Reactor-Noise Analysis (Osaka, Japan).
- 1975 - Specialist Meeting on Reactor-Noise I: from Critical Assemblies to Power Reactors (Roma).
- 1977 - Specialist Meeting on Reactor Noise II: Reactor Noise (Gatlinburg , Tennessee , EUA).

1.1- Análise de Ruído em Reatores Nucleares

As razões para a utilização das técnicas de análise de ruído em reatores nucleares podem ser uma ou mais das seguintes:

1. Medir o comportamento dinâmico ou monitorar o estado de um sistema nuclear em operação normal.
2. Avaliar parâmetros nucleares do sistema por meio das flutuações da população neutrônica, ocorrentes naturalmente.
3. Descrever e explicar melhor a natureza dos fenômenos produtores de flutuações.
4. Detectar anomalias durante a operação do reator.
5. Verificar a resposta dinâmica dos detectores.

1.1.1- Reatores de Potência Zero

Desde o final da década de quarenta / 16 / sabe-se que, na condição de potência zero (incluindo sub-crítica), existem flutuações na população neutrônica de um reator e que seus estudos quantitativos dão informações sobre os parâmetros cinéticos do reator.

Em reatores de potência zero, onde as perturbações de reatividade provenientes dos efeitos de realimentação são desprezíveis, o ruído neutrônico (chamado de ruído de potência zero) procede unicamente das cadeias neutrônicas originárias do processo de fissão.

Até onde o modelo de reator puntual é válido, e a teoria de ruído de potência pode ser usada, os resultados experimentais podem ser verificados teoricamente.

Da análise de ruído nesse tipo de reator, os seguintes parâmetros podem ser obtidos: a taxa total de fissão; a constante de decaimento de nêutrons prontos, α ; a dispersão do número de nêutrons emitidos por fissão; o nível de reatividade do reator; o nível de potência de um sistema crítico; etc. / 14, 51, 60 /.

Em particular, freqüentemente determina-se a razão entre a fração de nêutrons atrasados e a sua vida média, β/λ , por meio de dados de uma câmara de ionização ou flutuações de contagens. Uma aplicação real, do ponto de vista de segurança de reatores, surgiu quando Uhrig / 61 / demonstrou que $(\beta - \rho)/\lambda$ também pode ser determinado num sistema sub-crítico permitindo, assim, a avaliação do limite de reatividade de "shutdown", ρ .

Apresentaremos nesta seção, um resumo sucinto dos métodos experimentais mais relevantes existentes em análise de ruído de reatores de potência zero. Esse resumo subdi-

vide-se em duas partes: investigação no domínio de tempo e investigação no domínio de frequência. Para se obter por menores específicos dessas diferentes técnicas deve-se recorrer à literatura.

Convém salientar que todos esses métodos foram revistos por Thie / 59 / e subsequentemente por Uhrig / 60 /.

Em princípio, essas experiências e outras similares podem ser feitas no reator IEAR-1, caso sua potência seja reduzida a um nível suficientemente baixo (alguns watts), o problema principal é que sua instrumentação não foi projetada para operar em potência dessa natureza.

1.1.1.a- Investigação no Domínio de Tempo

Se o nível de potência do reator é baixo, como é o caso de reatores de potência zero, seu comportamento dinâmico pode ser completamente caracterizado pelas equações cinéticas neutrônicas. Ademais, se não existem perturbações externas de reatividade, por exemplo, o movimento da barra de controle, determina-se o comportamento do reator por meio de sua fonte (quando subcrítico) e das cadeias neutrônicas envolvendo fissão, absorção e perda.

No domínio de tempo as técnicas de análise de ruído englobam a probabilidade de detecção de um nêutron, o desvio da densidade de probabilidade das distribuições de Poisson

ou Gaussiana, a distribuição dos intervalos de tempo entre contagens e outros fenômenos similares.

Existem vários métodos experimentais baseados na contagem de nêutrons dos quais determinam-se a constante de decaimento Rossi-alfa de nêutrons prontos (α), a eficiência do detector e a potência do reator.

Método Rossi-Alfa

A experiência Rossi-Alfa, primeira entre as técnicas de contagem de nêutrons, foi introduzida por Rossi e seu princípio básico é o de relatar a probabilidade de um nêutron ser detectado no intervalo de tempo Δ em t , logo após uma detecção em $t = 0$, quando a fissão original ocorreu em t_0 .

Feynman e outros / 18/ estudaram a variação relativa das contagens de nêutrons num certo intervalo de tempo. Deduções matemáticas mais rigorosas foram feitas por Mathes / 29 /, Borgwaldt e Stegemann / 10 / e Iijima /22 /. Orndoff / 37 / foi quem primeiro utilizou esse método para determinar as constantes de decaimento dos nêutrons prontos das unidades críticas rápidas "Godiva" e "Jezebel".

Esta técnica baseia-se no fato de que a ocorrência de fissão, numa unidade nuclear, não é aleatória por causa da correlação temporal entre nêutrons que tem um antecessor -

comum. Para assegurar que essas contagens correlatas, não se percam no "background" aleatório, a taxa de fissão precisa - ser mantida suficientemente baixa a fim de evitar qualquer superposição significativa de cadeias na unidade crítica ; proibindo, assim, seu uso em reatores térmicos na forma clássica.

Outras referências / 3 , 4 , 12 , 26 /.

Método da Distribuição de Probabilidades

Este método baseia-se na determinação direta da probabilidade de detecção de n eventos, $p_n(T)$ num intervalo de tempo fixo, T . Um exemplo clássico é a distribuição de Poisson, válida somente para eventos não correlacionados. Entretanto, a existência de nêutrons correlacionados num reator, oriundos do processo de ramificação das cadeias neutrônicas, conduz a distribuições de probabilidades que desviam da lei de Poisson. É desse desvio que se obtém parâmetros de reatores do tipo: constante de decaimento dos nêutrons prontos, reatividade, etc.

Existem três possibilidades para se avaliar as distribuições de probabilidades medidas:

1. Avaliação de uma única parte de $p_n(T)$, preferivelmente $p_0(T)$.

2. Avaliação do primeiro e segundo momento de $p_n(T)$ (método da variação sobre o valor médio).
3. Avaliação da distribuição de probabilidade completa, $p_n(T)$.

Zolotukin e Mogilner / 64/ deduziram a função probabilidade $p_n(T)$ admitindo o modelo de um reator puntual e desprezando os nêutrons atrasados. Entretanto, dificuldades ocorreram no cálculo de $p_n(T)$ para n maior que zero. Assim, Zolotukhin restringiu seu cálculo à probabilidade $p_0(T)$ de que nenhuma contagem será detectada no intervalo de tempo T .

As desvantagens desse método são: erros estatísticos relativamente grandes, restrição para intervalos de tempo pequenos ($T < 0,1$ s, porque despreza-se os nêutrons atrasados) e complexidade matemática. Mogilner / 31/ comparou esse método com as outras técnicas.

Outras referências / 2 , 5 , 27 , 43 , 53 , 59 /

Método da Medida das Funções Autocorrelação e Correlação Cruzada

Seja x o evento de um nêutron ser detectado pelo detector 1 e y pelo detector 2 (ou 1 para o caso especial on

de $x = y$); a função correlação é a probabilidade de um par de contagens ocorrentes em Δ_1 a t_1 e Δ_2 a t_2 , isto é, no intervalo $\tau = t_2 - t_1$.

Portanto, a função correlação cruzada, $R_{xy}(\tau)$, da qual a função autocorrelação é um caso especial onde $x = y$, é dada por:

$$R_{xy}(\tau) = p(t_1, t_2) = p_C(t_1, t_2) + p_R(t_1, t_2) \quad 1.1$$

onde $p(t_1, t_2)$ é a probabilidade de uma contagem em t_1 seguida de uma contagem em t_2 e os subscritos C e R referem-se, respectivamente, aos eventos aleatórios e correlacionados.

Do ponto de vista teórico, esse método é substancialmente idêntico ao Rossi-Alfa, mas a técnica de medida é inteiramente diferente.

Deve-se citar, ainda, que métodos digitais ou analógicos podem ser usados para avaliar as funções autocorrelação ou correlação cruzada / 11, 17, 36 /.

Investigação no Domínio de Freqüência

Uma vez que a técnica de análise de ruído utilizada neste trabalho foi a do domínio de freqüência, dar-se-á maior ênfase a esse método, embora não se tenha por objetivo a determinação de parâmetros nucleares tais como :

constante de decaimento dos nêutrons prontos , nível de reatividade do reator, etc.

De acordo com o teorema de Fourier, uma função do tempo pode ser caracterizada pela superposição de ondas senodais de várias freqüências , com amplitudes e fases apropriadas .

Portanto, pode-se usar, sem perda de generalidade , a representação contínua abaixo,

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f) \exp(i\omega t) df \quad 1.2$$

onde $X(f)df$ é a amplitude da oscilação no intervalo entre f e $f + df$.

O comportamento de $|X(f)|^2$ com a freqüência é um dos métodos mais úteis para a caracterização do ruído de reatores.

Do ponto de vista de freqüência espectral, para se obter um discernimento de fenômenos físicos em reatores nucleares é vantagem considerar, primeiramente , processos a freqüências altas. Isso corresponde a desprezar os efeitos dos nêutrons atrasados, como ocorre no método Rossi -Alfa para nêutrons prontos.

Cohn / 14 / mostrou que na ausência de influências

externas , a natureza aleatória do processo neutrônico num reator produz uma fonte de ruído branco* . Suas medidas envolveram a determinação de β/λ à frequência de corte máxima da função de transferência , correspondendo à técnica - Rossi-Alfa para um reator crítico.

Método da Densidade Espectral de Potência - Auto e Cruzada

Experiências utilizando apenas um detector foram primeiramente sugeridas por Cohn / 14/ que mediu a auto densidade espectral de potência (DEP) em vários reatores. Muitos trabalhos usando a mesma técnica foram feitos nos Estados Unidos / 1 , 6 , 8 , 38 , 39 , / e outros países / 13 , 23 , 55 , 63 , /.

Em 1964 - 1965, foram desenvolvidas experiências de correlação cruzada com dois detectores por um grupo alemão / 10 , 36 , 52 / e um grupo japonês / 34 , 35 /.

Medidas da densidade espectral de potência, técnica de uso mais difundido em análise de ruído de reatores, podem ser feitas por meios analógicos e digitais.

* Ruído Branco - É o ruído que contém todas as frequências desde DC, até o infinito, e todas com a mesma amplitude.

Considerando-se análises analógicas:

1. Experiências com um detector: o sinal , que é proporcional ao nível do parâmetro medido (nesse caso densidade de nêutrons térmicos), passa através de um filtro passa-banda com frequência central f_c ; eleva-se ao quadrado o sinal de saída do filtro, tira-se a média e divide-se pela sua banda passante (Δf), produzindo , assim, a auto densidade de spectral de potência (DEP). Esse método , está esquematizado na Figura 1.1 .

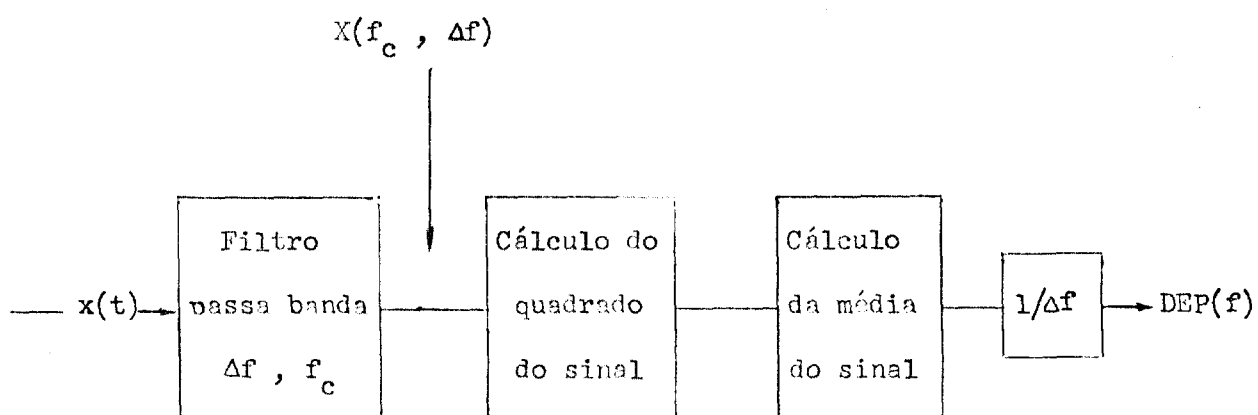


FIGURA 1.1- Diagrama de Blocos da Instrumentação para Medidas da Densidade Espectral de Potência.

2. Experiências com dois detectores: os dois sinais flutuantes passam através de um filtro passa-banda com a mesma frequência central f_c ; multiplicam-se os sinais de saída do filtro, tira-se a média e divide-se pela sua banda passante, Δf , produzindo a densidade espectral de potência cruzada (DEPC). A Figura 1.2 mostra um diagrama de blocos desse método.

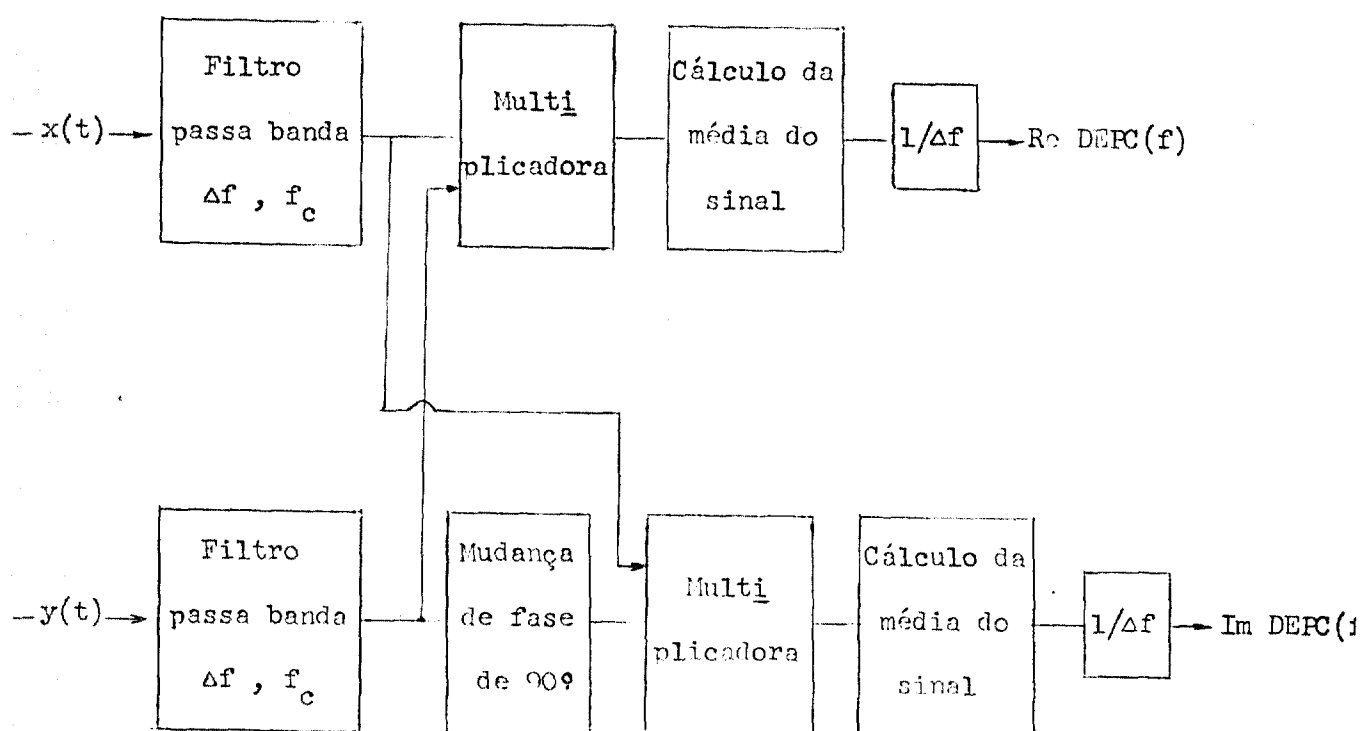


FIGURA 1.2 - Diagrama de Blocos da Instrumentação para Medidas de Densidade espectral de Potência Cruzada.

As formulações matemáticas das funções DEP e DEPC serão abordadas no Capítulo 2.

Com o desenvolvimento de computadores digitais e analogias matemáticas para acelerar os cálculos no domínio de frequência ("Fast Fourier Transform / 7 , 60/) o método digital tornou-se predominantemente usado.

É muito mais fácil modificar os parâmetros de análise (frequência máxima, resolução; precisão) quando se utiliza métodos digitais para medidas no domínio de frequência (ou tempo), do que no caso de métodos analógicos onde os parâmetros são definidos pelas características das unidades físicas (por exemplo, o filtro passa-banda).

Convém salientar que para parâmetros de análise idênticos, obtêm-se os mesmos resultados qualquer que seja o método utilizado (analógico ou digital).

Os objetivos principais da avaliação da DEP num reator de potência zero são:

- a - determinar a constante de decaimento dos nêutrons prontos em criticalidade atrasada (α_c): é obtida medindo-se a DEP (auto ou cruzada) para $2\pi f \gg \lambda_i$ (constante de tempo do i-ésimo grupo precursor) / 21 , 50 , 52 /.

- b- calcular o nível absoluto de potência : é obtido deduzindo-se a taxa absoluta de fissão , F.
- c- determinar a reatividade ρ/β : mede-se a DEPC $(\lambda_1 \ll \beta_1 \ll \alpha)$ e a DEPC $(w_2 \gg \alpha)$, simultaneamente, e calcula-se a reatividade (em dollars) / 47/.

1.1.2- Reatores de Potência

Conforme visto na seção 1.1.1, descreve-se o comportamento dinâmico dos reatores de potência zero por meio das equações cinéticas neutrônicas.

Entretanto, muito mais informações podem ser obtidas da análise de ruído de reatores de potência, pois a complexidade adicionada às condições de alta potência introduzem várias fontes de ruído que, por sua vez, interferem no comportamento dinâmico do reator.

Apesar de estudos anteriores em reatores de potência zero, a aplicação da análise de ruído em reatores de potência foi relativamente inoperante até que Moore /32/ sugeriu a determinação da função de transferência (Seção 2.1.2.f) para medidas em operação estacionária; sugestão essa, subsequentemente aplicada nas análises do "Experimental Boiling - Water Reactor (EBWR)".

Os objetivos principais da análise de ruído nesses reatores podem ser resumidos em:

1. Avaliar informações sobre o comportamento dinâmico do reator, as quais podem ser obtidas por meio de vários sinais flutuantes, disponíveis durante as condições normais de operação.
2. Desenvolver uma técnica para diagnosticar mal funcionamento do reator objetivando-se a redução do tempo de "shutdown" e dos custos de reparo, e o aumento da segurança e viabilidade de uma usina nuclear.

Deve-se lembrar que em contraste com reatores de potência zero, onde a natureza estocástica do processo de fissão em cadeia é a principal responsável pelas flutuações aleatórias do fluxo neutrônico, parâmetros indutores de variações de reatividade, por exemplo, vibração da barra de controle, flutuação da temperatura de entrada e velocidade do refrigerante; precisam ser considerados como possíveis fontes de ruído neutrônico em reatores de potência (vide Tabela 1.1 / 45/).

Embora seja necessário, inicialmente, a identificação dessas fontes de ruído, é importante que se tenha um entendi

TABELA 1.1- Fontes de Ruído em Reatores de Potência

Fontes de Ruído Nuclear	<ul style="list-style-type: none"> - Reação de fissão produzindo nêutrons <u>pr</u>ontos , fôtons de fissão e produtos de fis<u>s</u>ão. - Calor do decaimento dos produtos de fissão
Fontes de Ruído Térmico	<ul style="list-style-type: none"> - Flutuações da temperatura de entrada do re<u>fr</u>igerante. - Transferência de calor quando se retira uma certa quantidade de energia , por exemplo , um líquido com grande entalpia e/ou na forma de bolhas. - Flutuações no tamanho de bolhas num canal refrigerante. - Flutuações nas constantes de tempo de rela<u>x</u>ação proveniente das flutuações de densi<u>d</u>ade, velocidade e pressão do refrigerante.
Fontes de Ruído Hidrodinâmicas	<ul style="list-style-type: none"> - Flutuações na taxa de remoção de calor pro<u>ve</u>nientes das flutuações de densidade, ve<u>l</u>ocidade e pressão do refrigerante. - Flutuações de pressão provenientes da forma<u>ç</u>ão aleatória de bolhas . - Gotículas de refrigerante distribuídas - aleat<u>ó</u>riamente e flutuantes em qualidade de vapor, entalpia e momento . - Variação no fluxo refrigerante proveni<u>en</u>te do bombeamento. - Flutuações na potência acionadora da bom<u>ba</u> de refrigeração.
Fontes de Ruído Estrutural	<ul style="list-style-type: none"> - Flutuações nas posições ocupadas pelas zo<u>na</u>s ativas dos elementos combustíveis e barras de controle provenientes de flutua<u>ç</u>ões de pressão do refrigerante. - Distribuição aleatória das gotículas vene<u>no</u>s queimáveis . - Distribuição estatística da precisão de fabricação dos elementos combustíveis . - Distribuição heterogênia aleatória da par<u>te</u> ativa do elemento combustível.

mento quantitativo do ruído observado, principalmente se esse método é usado como uma técnica para detectar comportamentos anômalos ou mal funcionamento de componentes do reator em operação. Uma vez que cada tipo de reator de potência tem suas próprias características dinâmicas e de transmissão, nenhuma teoria geral pode ser universalmente aplicada para explicar todos os fenômenos do ruído de potência.

1.1.2.a- Método da Densidade Espectral de Potência - Auto e Cruzada

O método de análise mais utilizado em reatores de potência é o de examinar o espectro de frequência do ruído neutrônico. O sinal flutuante do transdutor é amplificado, gravado em fita magnética e então, analisado usando-se técnicas analógicas ou digitais.

A densidade espectral de potência neutrônica (DEP_n) do sinal de uma câmara de ionização num reator de potência é dada por / 20 , 40 /:

$$DEP_n(\omega) = \frac{2 \epsilon_n q^2 P}{\Lambda} + \frac{\epsilon_n^2 q^2}{\Lambda^2} |H_o(\omega)|^2$$

$$\times |DEP_f(\omega) + P^2 DEP_\rho(\omega)| \quad 1.3$$

onde:

w = frequência angular

q = carga transferida por nêutrons absorvido no detector

ϵ_n = eficiência do detector

Λ = tempo de geração do nêutron

P = nível de potência do reator

H_0 = função de transferência de reatividade a potência zero

$DEP_f(w)$ = DEP do sinal das fontes internas ou equivalentes de ruído

$DEP_\rho(w)$ = DEP do sinal das perturbações externas de reatividade.

O primeiro termo é o ruído branco oriundo da contribuição do processo de detecção, o segundo representa a DEP_n proveniente de fontes internas ou equivalentes de ruído e o termo restante é o ruído neutrônico causado pelas perturbações externas de reatividade, por exemplo, vibração dos componentes do cerne.

Cohn / 14 / mostrou que a DEP_f é proporcional ao nível de potência e a equação 1.3 também indica que o ruído do sinal da câmara é proporcional à potência. Logo, mesmo para um reator operando a poucos MW, o terceiro termo da equação 1.3, ou o ruído proveniente de flutuações externas de reatividade, é dominante, uma vez que é proporcional ao

quadrado da potência.

Portanto, para interpretar a DEP_n , de um reator de potência, pode-se reescrever:

$$DEP_n(w) = i_{dc}^2 |H_o(w)|^2 DEP_p(w)$$

$$\text{onde } i_{dc} \text{ (corrente média da câmara) } = \frac{P \epsilon_n q}{\Lambda} .$$

Conseqüentemente, quando a DEP_n é normalizada dividindo-se por i_{dc}^2 , as medidas serão independentes do nível de potência.

Para se diagnosticar comportamentos anômalos num reator específico, por meio da DEP_n , deve-se coletar um histórico de seu ruído neutrônico característico em operação normal. Assim, qualquer mudança no ruído neutrônico indica que alguma coisa não está funcionando normalmente.

1.1.3- Diferenças Básicas entre Análise de Ruído de Reatores de Potência e Potência Zero

Na Tabela 1.2 / 51/ tem-se um resumo da comparação qualitativa da análise de ruído dos dois tipos de reatores em questão (potência e potência zero).

TABELA 1.2- Comparação Qualitativa dos Objetivos de Análise de Ruído de Reatores de Potência e Potência Zero

	Reatores de Potência Zero	Reatores de Potência
Motivos de estudos	Pesquisa e Interesse Acadêmico	Interesse de Engenharia
Tipos de variáveis oscilantes para análise	Fluxo neutrônico (predominantemente), fluxo de radiação gama (somente em casos especiais)	Fluxo neutrônico e radiação gama (dentro e fora do cerne); temperatura do combustível e do refrigerante; pressão, densidade e velocidade do refrigerante; posição da barra de controle; ebulição nucleada; força, tensão e aceleração; vibração e deslocamento do combustível; radioatividade do refrigerante; densidade de bolhas de gás da radiólise.
Propósitos de estudos	<p>Parâmetros cinéticos de um reator puntual: nível absoluto de potência; constante de decaimento dos nêutrons prontos; reatividade de "shutdown"; fração de nêutrons atrasados.</p> <p>Cinética neutrônica dependente do espaço: reatividades de acoplamento e tempos de atraso entre zonas do reator; potência absoluta e reatividade total de um sistema de cerne acoplado.</p>	<p>Parâmetros dinâmicos: estabilidade do reator a níveis diferentes de potência; coeficientes significantes e constantes de tempo da função de transferência total; mecanismos de realimentação incluindo características dos parâmetros; identificação de fontes de ruído.</p> <p>Estudos do sistema de controle: detecção de ebulição; diagnósticos de anomalias de reatividade e real funcionamento de componentes do reator de fontes intrínsecas de ruído.</p>
Interpretação de dados:	Fácil no caso do modelo de reator puntual ; moderado no caso de reatores acoplados	Difícil e complexo .

TABELA 1.2- (continuação)

Motivos de estudos	Reatores de Potência Zero	Reatores de Potência
	Pesquisa e Interesse Acadêmico	Interesse de Engenharia
Equipamentos experimentais para detecção da variável:	Detectores tipo pulso sensível a nêutrons (^{10}B -, ^3He -, ^{235}U -, cintilado - res, etc.) e câmaras de ionização (^{10}B , ^3He , ^{235}U ,).	Detecção do fluxo neutrônico: Câmaras de ionização sensíveis a nêutrons (^{10}B , ^{235}U); câmaras ^{10}B otimizadas para mínima sensibilidade de radiação gama; detectores de nêutrons no cerne (e.g. mini câmaras de fissão e detectores de nêutrons auto alimentados de Cd ou Co)-
Condições ambientais para estudos experimentais de ruído.	Muito boa, se um detector de eficiência suficientemente alta (em contagens /fissão no sistema) é disponível.	Detecção do fluxo de radiação gama: câmaras de ionização (^4He , CO_2 , N_2 , Ar , etc.); detectores Cerenkov; detectores de microondas por cavidade ressonante. Transdutores com respostas rápidas para temperatura (termopares), pressão, tensão e aceleração; medidores de vazão; microfones de alta qualidade para detecção de ruído de ebulição.
Custo e complexidade experimental do sistema de aquisição de dados	médio	Insatisfatórias, se utiliza-se apenas o equipamento e instrumentação do reator. Detectores e transdutores no cerne, juntamente com o sistema de transmissão correspondente, devem ser usados e projetados.
Grande, por causa dos numerosos e diferentes canais de medida.		

.... continua.....

TABELA 1.2 (continuação)

	Reatores de Potência Zero	Reatores de Potência
Motivos de estudos	Pesquisa e Interesse Acadêmico	Interesse de Engenharia
Presente estado do tra- tamento teórico	Totalmente entendido, exceto para alguns fenômenos especiais dependentes do espaço e energia.	Em estágio adiantado; cada tipo de reator requer tratamento teórico separado por causa de seu projeto e suas fontes intrínsecas e específicas de ruído de reatividade e mecanismos de realimentação.
Potencialidade futura para pesquisa	Baixa	Substancial; uma variedade de experimentos fundamentais e suas interpretações são desejáveis, e.g. determinação dos mecanismos de acoplamento neutrônico em grandes reatores refrigerados a água
Potencialidade futura para engenharia	Média; e.g. projeto, construção e uso prático de medidores de reatividade "on line" de simples operação e baratos; determinação de β ; uso para calibração da instrumentação de medida de potência.	Substancial; e.g. desenvolvimento de técnicas "on line" confiáveis para diagnóstico de sistemas, especialmente para reatores operando com densidade de potência relativamente alta (por exemplo, reatores rápidos refrigerados a metal líquido); determinação dos limites de estabilidade em BWR's, etc.

1.1.4 - Reator de Pesquisa IEAR-1, Tipo Piscina

Teoricamente, todos os parâmetros nucleares obtidos de um reator de potência zero também podem ser determinados em reatores tipo piscina, cuja potência de operação é da ordem de alguns MW.

Mas, como já foi mencionado anteriormente, o sistema de controle do reator IEAR-1 não permite que ele opere a potências da ordem de watts.

Por outro lado, quando se está em operação normal o interesse da análise de ruído concentra-se na determinação das possíveis fontes de variação de reatividade, conseqüentemente da população neutrônica.

Esse tipo de análise permite a avaliação do ruído neutrônico característico do reator e possibilita o diagnóstico de um possível mal funcionamento de alguns de seus componentes.

Os parâmetros de interesse imediato nos reatores tipo piscina são:

1. Temperatura de entrada do refrigerante no cerne do reator.

2. Vibração mecânica: barra de controle, elemento combustível e estrutura de suporte do reator.
3. Vazão do refrigerante .
4. Radiação Cerenkov, cuja intensidade é proporcional ao nível de potência.

No presente trabalho considera-se apenas os dois primeiros casos, menos a vibração do elemento combustível. Os parâmetros restantes serão estudados posteriormente.

Deve-se enfatizar que todos os procedimentos experimentais e teóricos basearam-se no modelo de reator puntual estacionário, onde a distância entre o detector e o cerne do reator é suficientemente grande, portanto, as perturbações de reatividade produzidas pelos detectores podem ser desprezadas.

1.2- Objetivos e Relevâncias deste Trabalho

Atualmente o maior interesse da análise de ruído de reatores concentra-se na área de reatores de potência.

Entretanto, ainda se dá atenção às medidas de ruído dos reatores de baixa potência (até algumas dezenas de MW), como é o caso do Reator de Pesquisa IEAR-1, pois oferecem - oportunidades para:

1. estudar mais profundamente o comportamento dinâmico desses reatores;
2. desenvolver técnicas que possam ser aplicadas aos reatores de potência;
3. desenvolver uma capacidade experimental e teórica - para medidas de ruído em reatores de potência.

Com bases neste estudo tem-se por objetivos:

- estudar e avaliar a influência do ruído mecânico (vibração da barra de controle e do suporte do cerne do reator) e da temperatura de entrada do refrigerante no nível de potência do Reator de Pesquisa IEAR-1; identificando-se , assim, o ruído neutrônico característico desse reator para cada uma dessas fontes - de flutuação do fluxo de nêutrons.
- tentar isolar ressonâncias na densidade espectral de potência de nêutrons e relacioná-las com umas das funções indicadoras de ruído :vibração mecânica e temperatura.

- desenvolver um modelo matemático para explicar os resultados experimentais .

2. RESUMO TEÓRICO

2.1- Teoria Geral de Análise de Ruído

Apresenta-se nesta seção, de maneira sucinta, uma base teórica para análise de ruído, extraída das Referências / 7 , 59, 60 /.

2.1.1- Processo Aleatório

De modo geral, qualquer dado observado representando um fenômeno físico pode ser classificado como sendo determinístico ou não determinístico. Dados determinísticos, são aqueles descritos por uma relação matemática explícita.

Entretanto, existem muitos outros fenômenos físicos que produzem dados não determinísticos. Estes dados são aleatórios e devem ser descritos em termos de probabilidades - ou médias estatísticas ao invés de equações explícitas.

Uma simples amostra $x(t)$ representando um fenômeno aleatório é chamada de função amostra (ou registro amostra - quando observado num intervalo de tempo finito). Por exemplo, admitindo-se que a voltagem de saída de um gerador de

ruído térmico seja gravada como uma função do tempo, um registro amostra de tensão será obtido; como mostra a Figura 2.1.

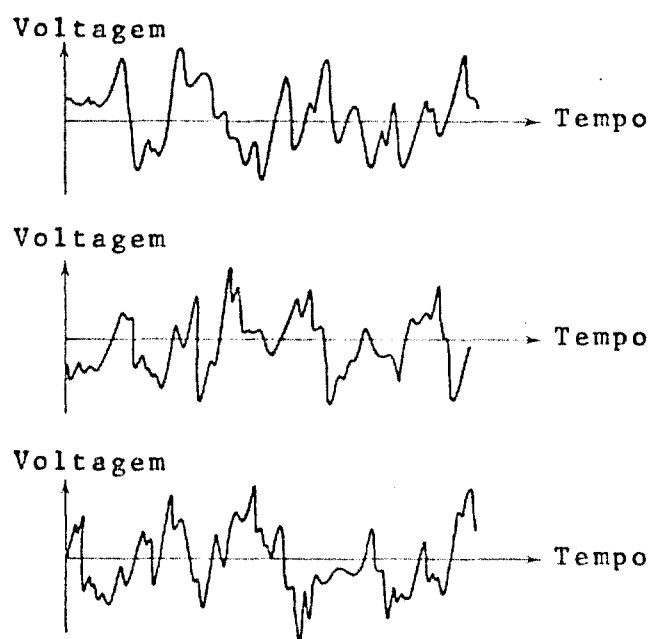


FIGURA 2.1- Registros Amostra da Saída de um Gerador de Ruído Térmico

O conjunto de todas as possíveis funções amostra produzidas pelo fenômeno aleatório em consideração, denomina-se processo aleatório ou estocástico.

2.1.1.a- "Background" Matemático

Quando um fenômeno físico é considerado em termos de um processo aleatório, suas propriedades podem ser descritas, em qualquer instante, calculando-se valores médios sobre o conjunto de funções amostra que o descrevem. Considerando-se o conjunto de funções amostra que forma o processo aleatório na Figura 2.2, podemos definir os seguintes parâmetros:

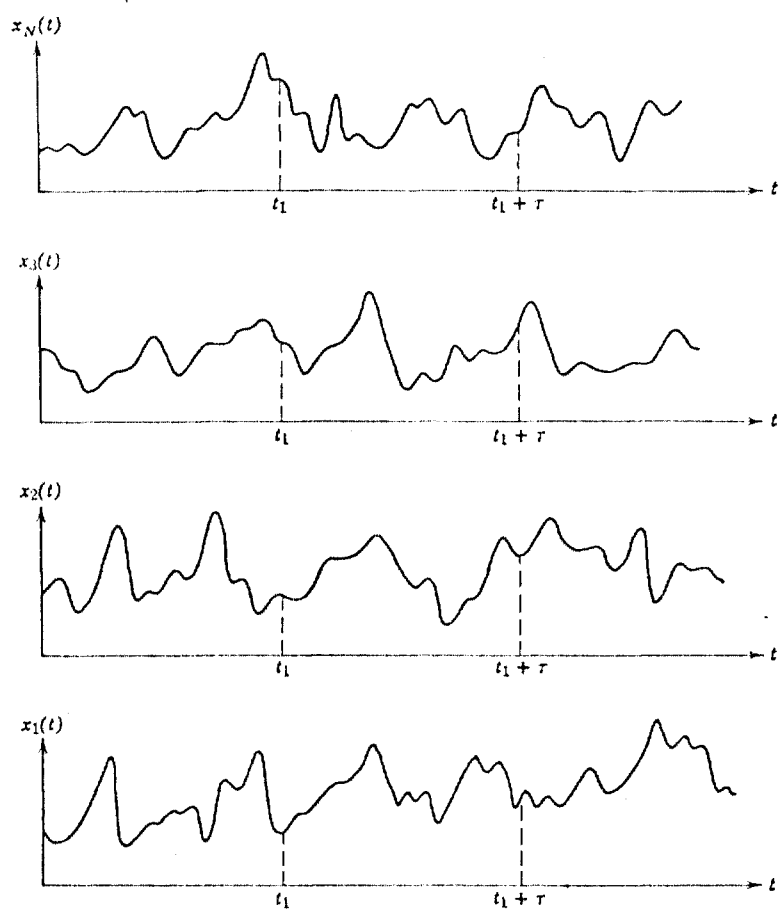


FIGURA 2.2- Conjunto de Funções Amostra formando um Processo Aleatório

Valor Médio (Primeiro Momento): o valor médio $\mu_x(t_1)$, num tempo t_1 , pode ser calculado tomando-se o valor instantâneo de cada função amostra do conjunto no instante t_1 , $(x(t_1))$, somando-se os valores e dividindo-se pelo número de funções amostra (N).

$$\mu_x(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) \quad 2.1$$

Valor Médio Quadrático (Segundo Momento): o momento de ordem n de um processo aleatório, no instante t_1 é dado por:

$$\mu_x^n(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^n(t_1) \quad 2.2$$

Para $n = 2$ tem-se o segundo momento ou valor médio quadrático, $\psi_x^2(t_1)$, onde

$$\psi_x^2(t_1) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k^2(t_1) \quad 2.3$$

Convém salientar que a raiz quadrada positiva do valor médio quadrático é chamada de raiz média quadrática ou valor "rms" .

Função Autocorrelação (Momento Adjunto): tal função

é uma extensão do conceito de valor médio quadrático abrangendo um certo intervalo de tempo. Enquanto o valor médio quadrático é a média do quadrado do valor de uma função num intervalo particular, a função autocorrelação, $R_x(t_1, t_1 + \tau)$, é a média do produto de dois valores da variável - separadas por um intervalo de tempo τ ; isto é,

$$R_x(t_1, t_1 + \tau) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k(t_1) x_k(t_1 + \tau) \quad 2.4$$

Transformada de Fourier: dados periódicos e não periódicos podem ser transferidos do domínio de tempo para o domínio de frequência (ou vice-versa) usando-se o Par de Transformada de Fourier,

$$X(w) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{Transformada Anterior}) \quad 2.5$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(w) e^{j\omega t} dw \quad (\text{Transformada Inversa}) \quad 2.6$$

onde: $w = 2\pi f$

2.1.1.b- Classificações do Processo Aleatório.

Um processo aleatório categoriza-se em estacionário ou não-estacionário. Por sua vez, o processo aleatô-

rio estacionário pode ser classificado como ergótico e não ergótico; e o processo aleatório não estacionário em termos de tipos específicos de propriedades não estacionárias. Estas várias classificações estão esquematizadas na Figura 2.3.

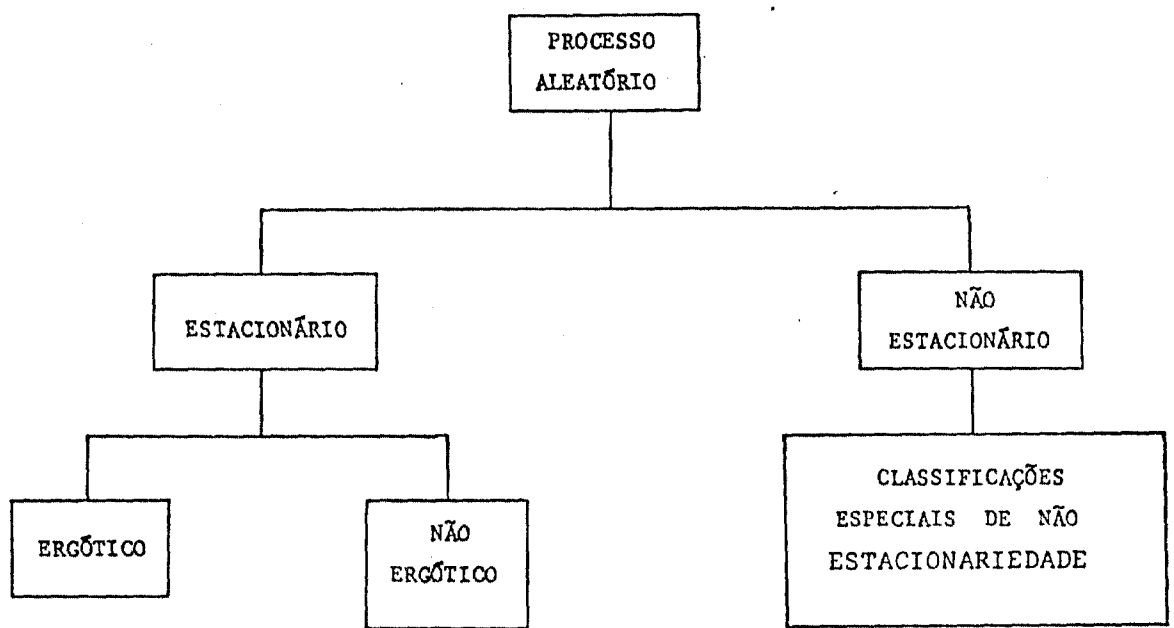


FIGURA 2.3- Classificações de Processos Aleatórios

Processo Aleatório Estacionário :

Um processo aleatório , $\{x(t)\}$, é estacionário se suas características não mudam com o tempo.

Tal processo é considerado fracamente estacionário - quando $\mu_x(t_1)$ e $R_x(t_1, t_1+\tau)$ não variam qualquer que seja o

tempo t_1 . Nestas condições o valor médio é uma constante e a função autocorrelação depende somente do intervalo de tempo τ ; ou seja,

$$\mu_X(t_1) = \mu_X \quad \text{e} \quad R_X(t_1, t_1 + \tau) = R_X(\tau) \quad 2.7$$

Para o caso especial, em que todos os possíveis momentos e momentos adjuntos são independentes do tempo, o processo aleatório é denominado de fortemente estacionário.

Deve-se salientar que em muitas aplicações práticas, a verificação de que o processo é fracamente estacionário justifica a suposição de um processo fortemente estacionário.

Processo Aleatório Ergótico:

Em muitos casos é possível descrever as propriedades de um processo estacionário calculando-se médias temporais sobre funções amostra específicas no conjunto e não por meio de médias do conjunto em instantes específicos. Portanto, considerando-se a k -ésima função amostra do processo aleatório, o seu valor médio e sua função autocorrelação serão dadas por,

$$\mu_x(k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) dt \quad 2.8$$

$$R_x(\tau, k) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) x_k(t+\tau) dt \quad 2.9$$

Se o processo aleatório $\{x(t)\}$ é estacionário e $\mu_x(k)$ e $R_x(\tau, k)$ forem iguais para qualquer função amostra, tal processo é denominado ergótico. Neste caso,

$$\mu_x(k) = \mu_x = \mu_x(t_1) \quad 2.10$$

$$R_x(\tau, k) = R_x(\tau) = R_x(t_1, t_1 + \tau) \quad 2.11$$

Portanto, somente um processo aleatório estacionário pode ser ergótico.

Na prática, dados aleatórios representando um fenômeno físico estacionário geralmente são ergóticos e, conseqüentemente, suas propriedades podem ser medidas pela observação de um simples intervalo amostrado do sinal.

Processo Aleatório não Estacionário:

Tais processos incluem todos os processos aleatórios que não satisfazem os requisitos para estacionariedade descritos anteriormente. A menos que restrições sejam impostas, as propriedades de um fenômeno aleatório não-estacionário são, geralmente, funções dependentes do tempo que só podem ser determinadas fazendo-se médias instantâneas - sobre o conjunto de funções amostra que formam o processo.

2.1.2- Relações Básicas

Todo o desenvolvimento teórico a seguir será feito supondo-se um processo aleatório ergódico.

2.1.2.a- Função Densidade Espectral de Potência (DEP)

A função DEP de uma seqüência de dados aleatórios - (também chamada função densidade auto-espectral) descreve a composição em frequência dos dados, em termos da densidade espectral de seu valor médio quadrático.

No domínio do tempo, a potência de um sinal, $P(t)$, é definida como o valor médio quadrático do sinal; isto é,

$$P(t) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt \quad 2.12$$

No domínio de frequência, a potência de um sinal no intervalo f a $f + \Delta f$, $P(f, \Delta f)$, é similarmente definida como o valor médio quadrático do sinal dentro deste intervalo; ou seja,

$$P(f, \Delta f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^t x^2(t, f, \Delta f) dt = \psi_x^2(f, \Delta f) \quad 2.13$$

Para Δf pequeno a função DEP, $G_x(f)$, pode ser definida pela aproximação:

$$\psi_x^2(f, \Delta f) \approx G_x(f) \Delta f \quad 2.14$$

Mais precisamente,

$$G_x(f) = \lim_{\Delta f \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta f} \psi_x^2(f, \Delta f) \quad 2.15$$

onde $G_x(f)$ é sempre uma função real positiva.

Especificamente, para um processo estacionário, a função DEP está relacionada com a função autocorrelação por meio de uma Transformada de Fourier como segue,

$$\begin{aligned}
 G_X(f) &= 2 \int_{-\infty}^{\infty} R_X(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \\
 &= 4 \int_0^{\infty} R_X(\tau) \cos \omega\tau d\tau
 \end{aligned}
 \tag{2.16}$$

(desde que $G_X(f)$ é real).

Sendo $X(f)$ a Transformada de Fourier de $x(t)$, a função DEP pode ser definida por,

$$G_X(f) = X(f) \cdot X^*(f) \tag{2.17}$$

onde, * indica o complexo conjugado.

2.1.2.b- Função Correlação Cruzada

De maneira similar ao método usado para a função autocorrelação (seção 2.1.1.a), pode-se definir a função correlação cruzada entre dois registros amostra $x_k(t)$ e $y_k(t)$ quaisquer (vide Figura 2.4), tomados de dois processos ergóticos $x(t)$ e $y(t)$, respectivamente.

Portanto, tal função (que descreve a dependência geral dos valores de um conjunto de dados no outro) é dada por,

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_k(t) y_k(t+\tau) dt \quad 2.18$$

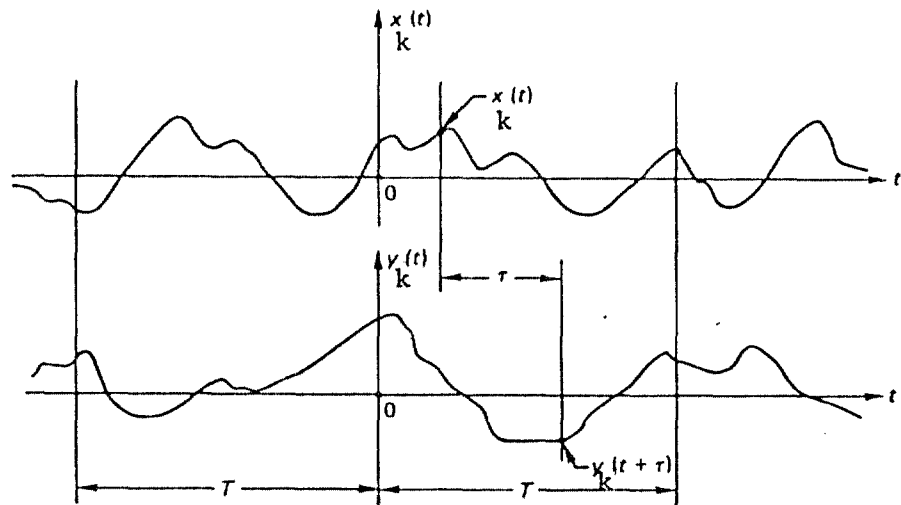


FIGURA 2.4- Esboço mostrando a Função Correlação Cruzada de Registros Amostra $x_k(t)$ e $y_k(t)$

2.1.2.c- Função Densidade Espectral de Potência Cruzada (DEPC)

A definição da função DEPC de dois conjuntos de dados aleatórios é deduzida diretamente da função correlação cruzada. Assim como a DEP é a Transformada de Fourier da função autocorrelação, a DEPC é a Transformada de Fourier da função correlação cruzada. Logo,

$$G_{xy}(f) = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau \quad 2.19$$

ou seja,

$$G_{xy}(f) = X(f) Y^*(f) \quad 2.20$$

2.1.2.d- Função Coerência

Uma outra variável de interesse em análise de ruído é a coerência (γ_{xy}^2), que é uma medida da coesão de dois sinais (x e y); isto é, a proximidade de suas relações num sentido de causa e efeito / 20 /. É calculada como segue,

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{[DEPC_{xy}(f)]^2}{DEP_x(f) DEP_y(f)} = \frac{[G_{xy}(f)]^2}{G_x(f) G_y(f)} \leq 1 \quad 2.21$$

Dois sinais perfeitamente correlatos tem uma coerência igual a 1, e dois sinais incoerentes tem uma coerência igual a 0.

2.1.2.e- Fase

Se dois sinais tem uma coerência relativamente alta, maior que 0,4, é significativo falar de uma relação de fase (θ) entre eles . Esta fase é calculada por,

$$\theta(f) = t_g^{-1} \left[\frac{\text{Im DEPC}_{xy}(f)}{\text{Re DEPC}_{xy}(f)} \right] = t_g^{-1} \left[\frac{\text{Im } G_{xy}(f)}{\text{Re } G_{xy}(f)} \right] \quad 2.22$$

onde $\text{Im DEPC}_{xy}(f)$ e $\text{Re DEPC}_{xy}(f)$ são, respectivamente, as partes imaginária e real da densidade espectral de potência cruzada.

2.1.2.f- Função de Transferência

Formalmente , um sistema linear com parâmetros constantes (vide Figura 2.5) pode ser caracterizado pela função de transferência, definida como a transformada de Laplace da resposta ao impulso do sistema ($h(\tau)$) ou seja:

$$H(p) = \int_0^{\infty} h(\tau) e^{-p\tau} d\tau \quad 2.23$$

onde p - é um complexo da forma $a + jb$

τ - o instante em que o impulso unitário foi aplicado ao sistema.

Para uma entrada arbitrária, $x(t)$, a saída do sistema (ou resposta), $y(t)$, é dada pela integral de convolução:

$$y(t) = \int_0^{\infty} h(\tau) x(t-\tau) d\tau \quad 2.24$$

Em termos de frequência, a função de transferência, $H(f)$, pode ser definida como a relação entre a Transformada de Fourier do sinal de saída e do sinal de entrada, isto é:

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad 2.25$$

O conhecimento da função de transferência do reator é essencial para a descrição do comportamento dinâmico desse.

Deve-se salientar duas relações de entrada-saída de sinal de relevante importância, que são:

$$G_Y(f) = |H(f)|^2 G_X(f) \quad 2.26$$

$$G_{xy}(f) = H(f) G_X(f) \quad 2.27$$

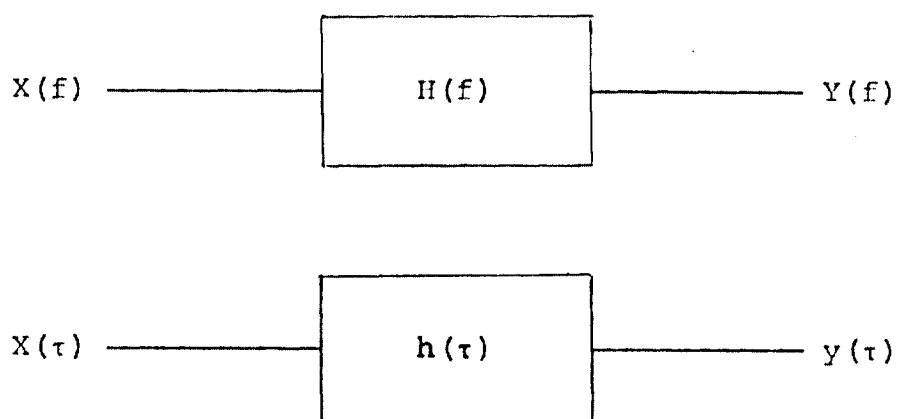


FIGURA 2.5- Sistema Linear de uma Única Entrada

2.2- Influência da Vibração do Detector de Nêutrons

Visto que o ruído neutrônico é composto da soma do ruído local^o global, é importante distinguir e interpretar as diferentes componentes no espectro neutrônico. A análise baseia-se nas diferenças de fase (θ) e coerência entre os sinais dos diferentes detectores.

Convém salientar, caso seja definido o contrário, que se está considerando sinais de ruído cujo nível DC foi eliminado.

O ruído global, devido a mudanças de reatividade, é o responsável pelas flutuações na potência do reator e caracteriza-se por uma alta coerência entre os sinais dos diferentes detectores e ângulo θ , igual a zero.

Se o efeito de reatividade deve-se, por exemplo, a uma vibração de frequência f , um pico de mesma frequência estará presente na DEP de ruído neutrônico.

O ruído local deve-se a perturbações locais e é caracterizado por baixa correlação ($< 0,4$) entre os sinais dos diferentes detectores.

Para medidas de ruído neutrônico, geralmente os detectores são colocados num gradiente de fluxo de nêutrons. Portanto, um movimento relativo do detector em relação ao cerne do reator influenciará na DEP medida.

Assim, é essencial, que este movimento seja insignificante; isto é, que o sistema de suporte dos detectores seja adequadamente rígido para minimizar o sinal devido ao movimento do detector.

Considerando-se o caso em que o ruído neutrônico é medido por dois detectores A e B e denotando-se o sinal do detector A por (a) e do detector B por (b), a DEPC é definida por (vide equação 2.20):

$$DEPC = F(a) * F(b)$$

2.28

onde F é o operador transformada de Fourier.

Desde que o reator funciona como uma fonte puntual, mudanças de fase nessas medidas indicam a presença de vibrações do detector. Se o movimento é nulo, a diferença de fase entre os dois sinais é zero para qualquer orientação dos detectores em relação ao cerne do reator.

2.3- Considerações Gerais sobre um Sistema de Análise de Ruído

Apresenta-se aqui, algumas considerações gerais sobre os problemas envolvidos na aquisição, transmissão e gravação de dados.

Pode-se representar as medidas de ruído de qualquer sistema por meio do seguinte esquema (Figura 2.6):

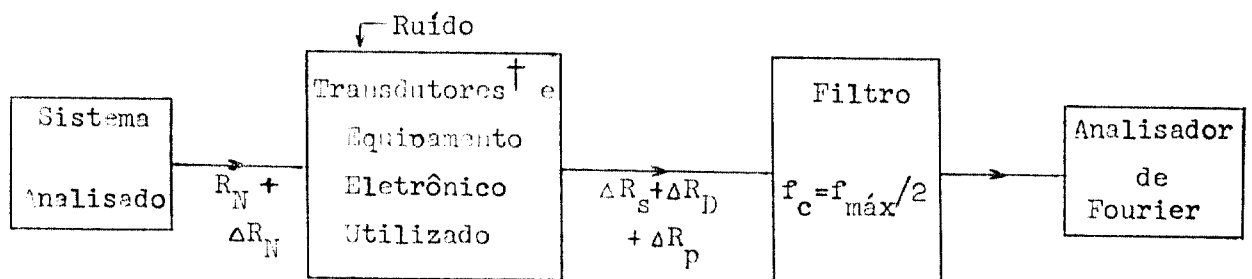


FIGURA 2.6- Esquema de um Sistema de Análise de Ruído.

† Conversores de uma variável para um sinal elétrico.

onde:

R_N = nível constante da grandeza analisada;

ΔR_N = parte flutuante da grandeza analisada;

ΔR_D = ruído inerente do detector e do equipamento eletrônico;

ΔR_P = ruído eletrônico que entra pela rede de alimentação, de indução eletro-magnética de fontes como motores elétricos e devido a problemas de aterramento;

ΔR_S = sinal devido a ΔR_N

f_C = frequência de corte do filtro;

$f_{m\acute{a}x}$ = frequência máxima de análise;

Geralmente, para se maximizar as informações obtidas das medidas de ruído (ou identificação fiel de picos menores na DEP da variável sendo medida) é necessário que a relação sinal/ruído, $\Delta R_S / (\Delta R_P + \Delta R_D)$, seja maximizada.

A componente ΔR_D pode ser minimizada com a utilização de equipamentos (transdutores, amplificadores, etc) de baixo ruído. Desde que essa componente é não correlacionada, a sua importância será significativamente reduzida usando-se dois transdutores e calculando-se a função correlação cruzada dos dois sinais (vide seção 2.2).

A componente ΔR_p entra por dois caminhos : rede de alimentação e por indução através dos cabos e equipamentos.

O primeiro pode ser reduzido com os seguintes procedimentos:

- a) fornecendo-se a alimentação através de baterias ou transformadores de isolação;
- b) utilizando-se filtros do tipo "notch filters" na alimentação;
- c) ligando-se o sistema a um bom terra num só ponto.

O ruído induzido pode ser minimizado utilizando-se cabos especiais de baixo ruído entre o detector e o pré-amplificador (por exemplo: cabo de dois condutores e dupla blindagem). Os cabos de alimentação também devem ser de baixo ruído. Uma blindagem extra cobrindo o detector e os cabos, que pode ser feita com papel de alumínio, diminui ainda mais o ruído induzido, principalmente quando cabos de baixo ruído não são disponíveis.

Deve-se salientar que, quando a distância entre a localização de um transdutor e a instrumentação é maior que 30 metros, torna-se necessário a utilização de instrumentação especial para assegurar que as características dos dados não sejam influenciadas pelo sistema de transmissão / 60 /. Portanto, minimizar-se-á o ruído redu

zindo-se , tanto quanto possível, o comprimento dos cabos de transmissão.

Quanto à gravação dos dados em fita magnética, normalmente é feita em frequência modulada porque os sinais são gravados de nível DC à resposta máxima em frequência, enquanto que nas gravações diretas, geralmente, os sinais não são gravados abaixo de 100 Hz.

2.3.1- Transdutor Neutrônico Utilizado

Neste trabalho utilizaram-se detectores de nêutrons do tipo câmara de ionização compensada (CIC) que é uma câmara de ionização sensível a nêutrons com compensação para radiação gama.

Pode-se considerar este tipo de câmara como constituída de duas câmaras de ionização separadas, na qual somente uma é sensível a nêutrons, conectadas eletricamente de modo que os sinais provenientes de cada uma sejam subtrativos.

Desde que nêutrons não produzem ionização diretamente, obtêm-se a sensibilidade neutrônica introduzindo-se algum material (por exemplo B^{10}) com o qual o nêutron interage produzindo partículas ionizantes.

Como o fluxo gama dentro e próximo do cerne do reator varia muito de ponto para ponto, a ionização produzida pelos raios gama nos dois volumes iguais raramente é a mesma. Por esta razão é necessário, depois de posicionada a câmara, ajustar a compensação de modo que as correntes devido a raios gama dos dois volumes sejam iguais.

Como foram utilizados cabos coaxiais e não cabos especiais de baixo ruído (vide seção 3.2), ao se usar o sistema de compensação dos detectores estar-se-ia medindo o ruído devido aos nêutrons, mas não se eliminaria o ruído induzido pelos cabos.

A solução adotada foi a de fazer uma terminação RC no cabo de compensação por meio de um capacitor em paralelo com um resistor, e cujos valores devem obedecer às características do detector. Desta maneira mede-se o ruído devido à presença de nêutrons e radiação gama, mas reduz-se o ruído induzido pelos cabos com o uso do amplificador diferencial.

3. ARRANJO EXPERIMENTAL

3.1- Descrição do Reator IEAR-1

Resolveu-se incluir uma descrição sucinta das partes e mecanismos principais do reator IEAR-1 por causa de sua possível ajuda na interpretação dos resultados obtidos na feitura deste trabalho.

3.1.1- Aspectos Gerais

- a - Tipo de reator: Piscina aberta
- b - Potência de operação: 2MW
- c - Ciclo de funcionamento: 5 dias/semana; 8 horas/dia
- d - Tipo de elemento combustível: placas planas paralelas
- e - Composição do elemento combustível: liga de U-Al, U enriquecido a 93,2% em ^{235}U que constitui 45% em peso liga
- f - Massa de ^{235}U /elemento combustível: 185 g
- g - Disposição dos elementos combustíveis: placa matriz retangular de 8 x 10 furos circulares
- h - Número de elementos no cerne : 25 (arranjo 5x5)

- i - Dimensões da parte ativa do cerne: 60x40x38cm
- j - Moderador: água leve
- k - Refletor: blocos de grafita revestidos por Al
- l - Controle do reator:
 - 3 barras de segurança (B_4C + Cd revestidos de Al)
 - 1 barra de controle (B_4C + Cd revestido de aço inoxidável)
- m - Circulação (dados a 2MW):
 - forçada de ~~uma~~ ^{CIMA} para baixo
 - vazão normal: 3600 gpm
 - temperatura de entrada no cerne: 33°C
 - temperatura de saída no cerne: 35,5°C
 - coeficiente de transferência de calor:
 - 0,186 cal/cm²seg°C
- n - Fluxo térmico médio: $5,9 \times 10^{12}$ n/cm²s
 - Fluxo térmico máximo: $1,28 \times 10^{13}$ n/cm²s
- o - Coeficiente de temperatura: 7×10^{-4} ΔK/K/°C

3.1.2- Cerne do Reator

O cerne consiste em um conjunto de elementos combustíveis e refletores inseridos em uma placa matriz e arranjados em uma estrutura cúbica. A placa matriz, sustentada por uma estrutura de alumínio, contém furos dentro dos

quais os elementos combustíveis e refletores (de grafita) podem ser encaixados para formar os diversos arranjos críticos possíveis. O arranjo crítico do reator IEAR-1 durante a realização deste trabalho está indicado na Figura 3.1.

Na Figura 3.2 observa-se um desenho do núcleo do reator IEAR-1, juntamente com o esboço da estrutura de sustentação.

3.1.2.a- Elemento Combustível

A Figura 3.3 mostra o elemento combustível do IEAR-1. Este elemento foi fabricado pela "United Nuclear Corporation", sendo do tipo MTR (Material Testing Reactor), composto de 18 placas paralelas. Estas placas são montadas num estojo constituído de duas guias de alumínio com ranhuras. Na parte inferior do estojo está montado o suporte do elemento, que é usinado na forma cilíndrica, para encaixar na placa matriz.

3.1.2.b- Barras e Unidade Motriz

As unidades motrizes para três barras de segurança e uma de controle são montadas sobre a ponte móvel do reator em qualquer dos lados da estrutura de sustentação do

reator. Há duas placas de montagem, uma à direita e outra à esquerda, que são presas à estrutura da ponte e furadas para que as unidades motrizes possam ser posicionadas em vários locais acima do centro do conjunto do cerne do reator. A unidade motriz da barra como um todo, constitui-se no mecanismo de acionamento que é ligado às barras de controle e segurança por meio de uma haste provida de um magneto; na extremidade inferior do mecanismo de acionamento há um grampo de desengate rápido que permite a simples desconexão entre o mecanismo principal e as partes acessórias.

3.1.2.c- Placa Matriz

A placa matriz do reator é de alumínio (828,6x639,7x114,3mm) com $8 \times 10 = 80$ furos (60mm de diâmetro) que servem de soquete e suporte para os elementos que formam o cerne do reator. Esta placa é sustentada por treliças conectadas à plataforma rolante, existente na superfície da piscina, podendo desta maneira ser deslocada para várias posições ao longo da piscina.

Há, além disso, 63 furos de 22 mm de diâmetro atravessando a placa matriz, localizados diagonalmente entre os furos maiores. Estes furos menores permitem a circulação da água refrigerante por entre as superfícies exteriores dos elementos combustíveis e refletores. A água

flue de cima para baixo através desses furos menores, durante a circulação forçada, ou de baixo para cima quando existe convecção.

3.1.3- Piscina do Reator

A Figura 3.4 mostra uma vista de cima, em corte, da piscina e do reator; a piscina foi construída em concreto e apresenta as dimensões interiores de 5,2m x 13,7m x 9,5m. Sua parte interna acha-se revestida de aço inoxidável.

Está dividida, longitudinalmente em dois compartimentos que podem ser isolados um do outro por uma porta de alumínio, removível que se encaixa num guia, também de alumínio, embutido em apêndices das paredes da piscina.

3.1.4- Sistema de Refrigeração

O sistema de refrigeração do reator tem por função remover a energia térmica gerada no cerne, por fissões nucleares nos elementos combustíveis e dissipá-la no exterior.

Consegue-se isso pela circulação forçada da água da

piscina, entre as placas dos elementos combustíveis e nas suas partes laterais, sendo o fluxo de água dirigido do topo para a extremidade inferior dos elementos. Por meio de utilização de trocadores de calor e torres de refrigeração, esta energia é dissipada para a atmosfera.

Quando o reator opera em potências inferiores a 200 KW, a refrigeração pode ser realizada unicamente por convecção natural.

3.1.4.a- Circuito Primário

Constitue um sistema fechado de circulação, e é o responsável pela refrigeração forçada do cerne do reator.

Este circuito é composto por:

- Piscina
- Cerne do reator
- Placa matriz
- Funil de circulação: reduz a secção de passagem da água (retangular para circular); ligando, desta maneira, a placa matriz com a válvula de convecção.

- Válvula de convecção: constitui o sistema de acoplamento da parte inferior do funil de circulação com a tubulação do circuito primário.
- Tanque de decaimento: retém a água de refrigeração que sai do caroço do reator para que haja o decaimento do Nitrogênio-16 (reação: $^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$).
- Bombas hidráulicas: são duas bombas centrífugas, com características idênticas, funcionando em paralelo.
- Trocadores de calor: são os responsáveis pela transferência da energia térmica do circuito primário para o secundário.
- Difusor: destina-se a distribuir, de maneira homogênea, a água que retorna à piscina, evitando a formação de correntes que levem diretamente esta água de retorno até a superfície livre da piscina. Constitue-se em três tubos de alumínio, formando um T no plano horizontal, a uma altura de 60 cm do fundo da piscina. A passagem de água é feita através de 572 furos com diâmetros de 2,54 cm, voltados para o fundo da piscina.

Na Figura 3.2, pode observar-se uma vista do conjunto formado pela placa matriz, funil de circulação, válvula de convecção e difusor.

3.1.4.b- Circuito Secundário

Este circuito é composto por dois sistemas independentes que podem, no entanto, ser inter-ligados. Sua função é remover a energia térmica do circuito primário, através dos trocadores de calor, liberando-a na atmosfera por meio das torres de refrigeração.

3.1.5- Instrumentação e Controle

O sistema de instrumentação e controle tem como função principal manter o reator seguro, além de fornecer as informações necessárias para sua operação segura durante todo o tempo. Faz-se o controle ajustando-se, automaticamente ou manualmente, o nível de potência por intermédio da mudança da medida do nível do fluxo de nêutrons.

3.2- Sistema para Medir a Flutuação do Fluxo de Nêutrons

Para as medidas de ruído neutrônico utilizaram-se dois detectores de nêutrons, do tipo câmara de ionização compensada - CIC -, marca Westinghouse, modelo WL-6377 / 28 /.

Estes detectores são compensados eletricamente e podem operar entre os fluxos térmicos de $2,5 \times 10^2$ e $2,5 \times 10^{10}$ nêutrons /cm²/segundo, com uma sensibilidade de aproximadamente 4×10^{-14} ampères /nêutrons/cm²/segundo.

Montou-se cada CIC dentro de uma câmara estanque de alumínio (vide Figura 3.5), com os cabos coaxiais saindo através de um tubo plástico (9 m de comprimento) de modo a permitir sua introdução na piscina do reator.

Para evitar "loops" de terra entre os cabos (alta tensão e sinal) e o tubo de retenção (vide Figura 3.7) - dos detectores de nêutrons, tal tubo foi isolado da câmara estanque por meio de isoladores de lucite, conforme - indicado na Figura 3.5.

Para reduzir a indução eletromagnética, os cabos coaxiais de sinal e voltagem foram encamisados separadamente com duas camadas de folha de alumínio, separadas e cobertas com uma camada fina de polietileno. As duas camadas de alumínio foram unidas e acopladas à câmara estanque do detector e ao terra do equipamento.

3.2.1- Sistema de Suporte dos Detectores de Nêutrons

Nas primeiras medidas de ruído neutrônico feitas no reator IEAR-1, as duas CIC's foram sustentadas por meio

de três cordas de "nylon" amarradas em posições distantes, acima da superfície do reator.

Da análise dos valores obtidos decidiu-se construir um suporte rígido na forma de um tripé invertido, medindo 9 m de comprimento e fabricado com barras de alumínio de 2,5cm de diâmetro, conforme a Figura 3.6, com o objetivo de reduzir o movimento dos detectores dentro d'água . A câmara estanque do detector estava conectada ao tripé - por meio de três acoplamentos tipo junta esférica . Para estas medidas tal câmara foi fechada por flanges externos (acima e abaixo), o que pode ser verificado na Figura 3.6.

Visto que o sistema de suporte por tripé reduziu, mas não eliminou o movimento do detector na faixa de frequências baixas, na qual são esperadas ressonâncias oriundas da operação do reator, construiu-se um novo sistema de suporte.

As experiências feitas com este terceiro sistema indicaram que o movimento do detector em relação ao cerne do reator é insignificante, tornando-o , desta maneira , definitivo para a execução deste trabalho.

Neste último sistema, os detectores foram suspensos por cordas de "nylon", dentro de tubos de retenção de alumínio rigidamente encaixados na placa matriz e fixados -

no parapeito da ponte do reator. Admitiu-se que o movimento do cerne em relação aos detectores produzido pela circulação do refrigerante é desprezível.

Este tubo de retenção (Figura 3.7), com 9,5m de comprimento e 127,4mm de diâmetro externo, consiste em dois tubos de alumínio (menores em comprimento) devidamente encaixados. Para reduzir seu peso efetivo a aproximadamente 6 kg usaram-se "bóias" - caixas de alumínio (1130 mm de comprimento) com ar em seu interior. O peso de cada tubo foi ajustado permitindo-se que uma quantidade adequada de água entrasse nas "bóias".

Na Figura 3.7, podem ser observados todo o sistema de suporte das CIC's, bem como os pormenores das "bóias" para redução de peso e do sistema de fixação do tubo de retenção no parapeito da ponte do reator.

Os pormenores da junção dos dois tubos menores estão representados na Figura 3.8.

Deve-se lembrar que o ruído neutrônico foi avaliado por meio da análise dos sinais ($y_1(t)$ e $y_2(t)$) de duas - CIC's colocadas em posições diferentes; conseqüentemente construíram-se dois conjuntos de suporte.

A localização dos dois tubos de retenção na placa matriz está indicada na Figura 3.9.

3.2.2- Sistema de Detecção e Análise de Dados Associado ao Detector de Nêutrons

Determinaram-se os valores iniciais de ruído neutrônico com o sistema de detecção e análise de dados indicado na Figura 3.10.

Segundo a análise destas medidas, fizeram-se algumas modificações para reduzir o ruído eletrônico e de indução eletromagnética introduzidos no sistema (vide Seção 2.3). Eliminou-se o eletrômetro (com o amplificador conversor de corrente em tensão), utilizou-se bateria para a alimentação de tensão dos detectores e adaptou-se uma terminação RC no cabo de compensação (vide Figura 3.11, capacitor (300 μ F) em paralelo com resistor ($10^{12} \Omega$)) simulando as características RC do detector de nêutrons.

Os resultados dessas modificações estão representados nas seções 4.2.2 e 4.2.3.

O sistema de detecção e análise de dados modificado, utilizado neste trabalho, está esquematizado na Figura 3.11 e consiste em:

1 - Fontes de Tensão (t): baterias de aproximadamente 540 V.

2- Amplificadores marca "Hewlett Packard", modelo 8875A. São do tipo diferencial com ganho constante de zero Hz (DC) a um valor superior (3dB) entre 2Hz e 75 kHz, ajustável pela troca de um capacitor.

3- Compensadores de nível DC, fabricado no IPEN . Eles introduzem uma força eletromotriz de sinal contrário em série com o sinal dos amplificadores HP-8875A, para compensar o nível constante (DC), sem interferir nas flutuações do sinal.

4- Amplificadores marca "Analog Devices", modelo 605K. São do tipo diferencial com resposta em frequência (3dB) entre zero Hz e 300 kHz. Seu uso permitiu um ganho fixo de aproximadamente 300 .

As Figuras 3.10 e 3.11, indicam que os sinais amplificados podem ser analisados durante a experiência ou gravados para análise posterior.

5- Gravador marca "Hewlett Packard", modelo 3960 . Tem quatro canais simultâneos de gravação dos quais dois foram usados em gravação direta (resposta em frequência entre 50 Hz e 30kHz) e dois em frequência modulada (resposta (3dB) entre zero e 2,5 kHz). Convém salientar que a resposta em frequência depende da velocidade de gravação , e como ruído do reator está na faixa entre DC e

300 Hz, o gravador foi utilizado sempre em frequência modulada e, com velocidade de gravação mínima (1"7/8) - resposta em frequência entre zero e 312 Hz.

6- Filtro de frequência analógico marca "Rockland" , modelo 816 (4 canais) . Opera no modo passa baixa com frequência de corte (3dB) ajustável entre 10 Hz e 150kHz.. É utilizado para eliminar os erros decorrentes de "aliasing" que são erros introduzidos quando a frequência do sinal analógico é superior à metade da frequência de amostragem da unidade "ADC" ("Analog-to-Digital Converter").

7- Analisador de Fourier marca "Hewlett Packard" , modelo 5451B, com conversor analógico para digital ("ADC") de quatro canais. Tem como unidade central de controle o computador 2100S com 32K de memória e o tamanho do bloco de dados varia entre 64 e 4 K por potências de 2.

No Analisador de Fourier , de uma série de N pontos reais no domínio de tempo, calcula-se e mostra-se N/2 - frequências positivas , mais DC. Cada frequência , excepto a máxima , tem dois valores numéricos independentes : um real (cosseno) e um imaginário (seno). A frequência de análise para cada canal de entrada do "ADC" varia entre zero e 100 kHz.

A análise é simplificada com o uso do sistema de teclagem que incorpora várias funções, e operações como - por exemplo : "Hanning " (multiplica um bloco de dados pela função janela $1/2 - 1/2 \cos 2\pi t/T$); "Fourier Transform" (este comando calcula a transformada de Fourier - de um domínio para o outro); "Punch" (comando para perfurar fitas de papel) etc.

A entrada de dados pode ser de forma analógica, por meio da unidade "ADC"; digital, por meio de fitas de papel perfuradas; manual, pelo "Keyboard" ou diretamente - pelo computador. Os resultados de todas as operações são mostrados num osciloscópio e podem ser impressos em números decimais ou perfurados em fitas de papel pela impressora "Teletype", armazenados em fita magnética ou graficados pelo graficador (x -y) .

3.3- Sistema para Medir Vibrações Mecânicas

3.3.1- Vibração da Barra de Controle

Para identificar o ruído neutrônico induzido pela - vibração da barra de controle utilizou-se um acelerômetro /amplificador marca "Sundstrand ", modelo 305T/515BT. Este sistema emprega o acelerômetro como uma fonte de corrente para o amplificador, que por sua vez fornece - tensão de saída para análise.

O sistema de fixação do acelerômetro na barra de controle foi feito de maneira a não interferir na operação do reator e está indicado na Figura 3.12.

Na Figura 3.13, tem-se o esquema do sistema de detecção e análise de dados utilizado em conjunto com o acelerômetro (± 40 g de alcance). O amplificador 515BT fornece +15V e -15V DC, de no máximo 40mA, para o acelerômetro e libera uma corrente de ± 10 mA; já possui um compensador de nível DC.

3.3.2- Vibração da Estrutura do Reator

Mediu-se a vibração da plataforma suporte do reator utilizando-se um acelerômetro (marca "Schaevitz", modelo LSRP-2 de ± 2 g de alcance) fixo na ponte do reator conforme indicado na Figura 3.14.

As placas de fixação (alumínio) do acelerômetro foram coladas na ponte do reator de forma a permitir três orientações para o eixo sensível do acelerômetro: horizontal (direção paralela e perpendicular à direção do movimento da ponte) e vertical.

O sistema de detecção e análise de dados associado ao acelerômetro posicionado na ponte do reator está esquematizado na Figura 3.15.

3.4- Sistema para Medir a Flutuação da Temperatura de Entrada do Refrigerante no Cerne do Reator IEAR-1

Para medir flutuações de temperatura utilizou-se um termopar do tipo Ni/Ni-Cr localizado, aproximadamente, 10mm acima do topo do elemento combustível da posição 96 da placa matriz do reator.

Como o fio de Ni/Ni-Cr disponível tinha cerca de 1,5m de comprimento fez-se uma junção com o cabo blindado para trazer o sinal até a superfície da piscina. Convém salientar que esta junção do termopar permaneceu dentro d'água, portanto, não foi possível determinar o valor absoluto da temperatura da água.

No decorrer desta experiência, tomaram-se algumas providências para maximizar a relação sinal /ruído:

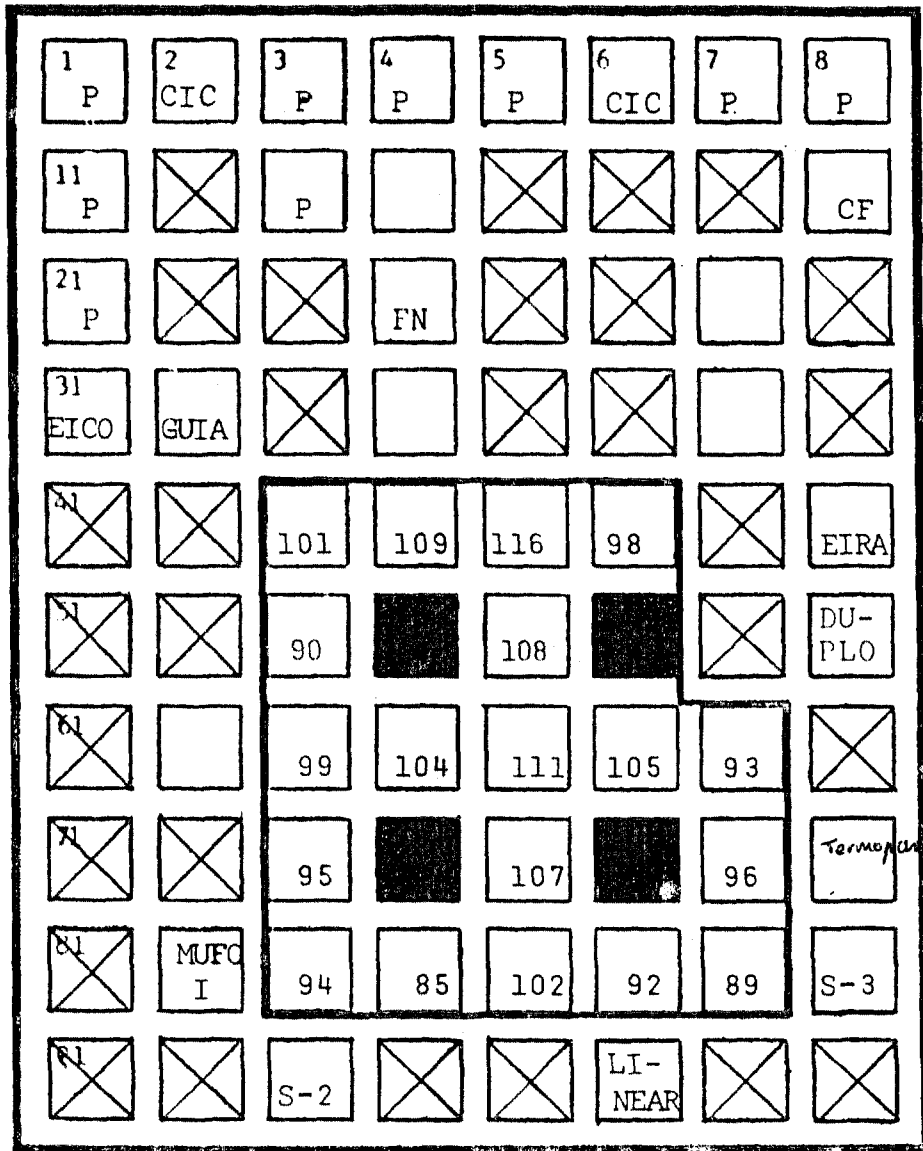
- encamisamento do termopar, na região externa ao seu tubo guia (vide Figura 3.17), com folhas de alumínio ;

- utilização de um amplificador de alto ganho e baixo ruído (marca "Analog Devices", modelo 605K) acoplado na extremidade superior do tubo guia do termopar; diminuindo, assim, o comprimento do cabo;
- colocação de um fio terra do tubo guia ao osciloscópio.

A Figura 3.16 indica um esquema do sistema de detecção e análise de dados utilizado nas medidas de flutuação de temperatura de entrada do refrigerante.

3.4.1- Sistema de Suporte do Termopar

Este sistema, ilustrado na Figura 3.17, consiste em um tubo guia para o termopar (dois tubos de alumínio devidamente unidos), de aproximadamente 9,5m de comprimento e 2" de diâmetro, rigidamente encaixado na placa matriz e fixo no parapeito da ponte do reator.



— " Plug "

*cross section element
= 3.01 x 2.995"
= 76.4 x 76.1 mm*



— Refletor



— Guia de irradiação



— Elemento Combustível



— Barra de Segurança

FIGURA 3.1- Arranjo Crítico do Reator IEAR-1 durante a Execução deste Trabalho.

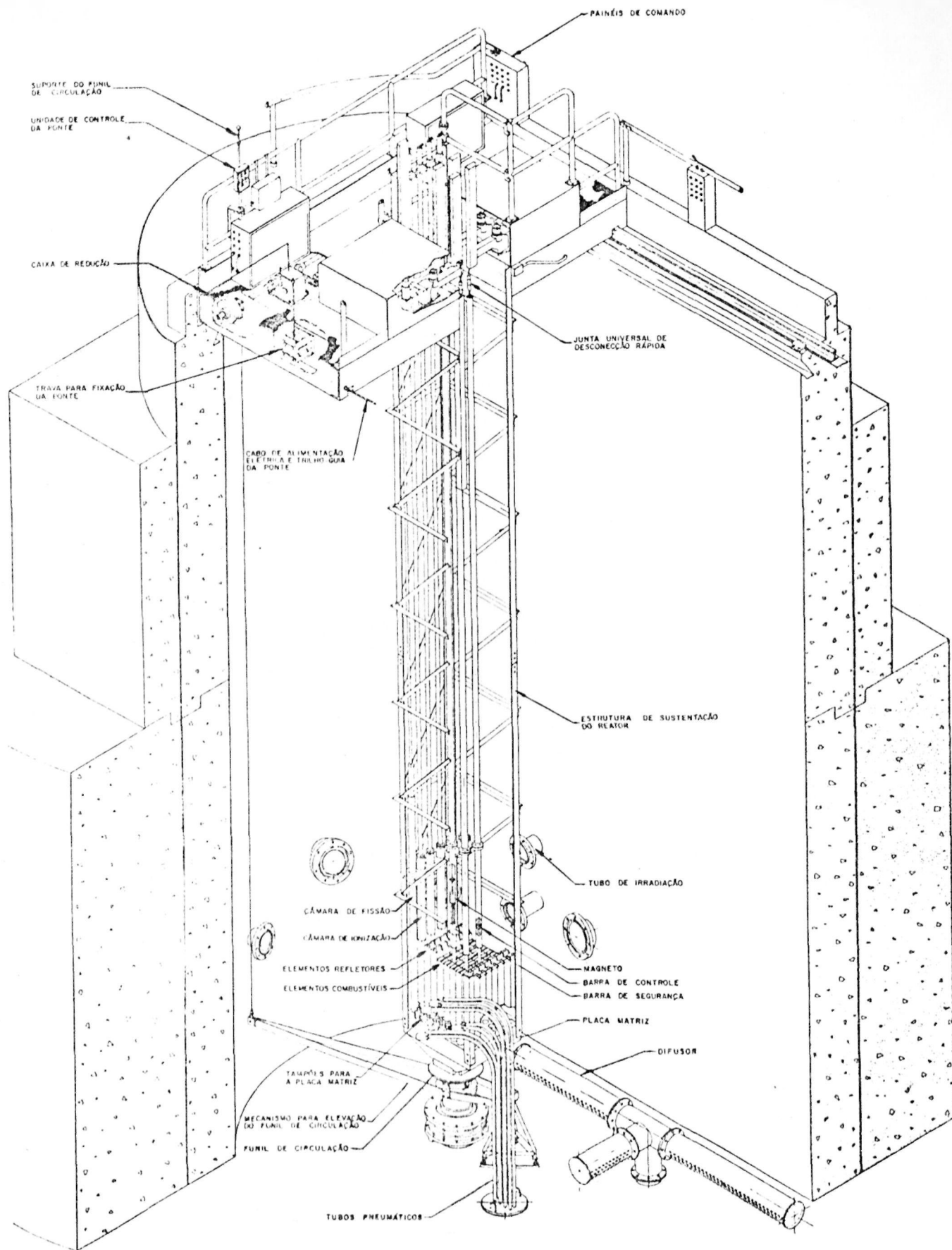


FIGURA 3.2- Vista Geral do Reator IEAR-1.

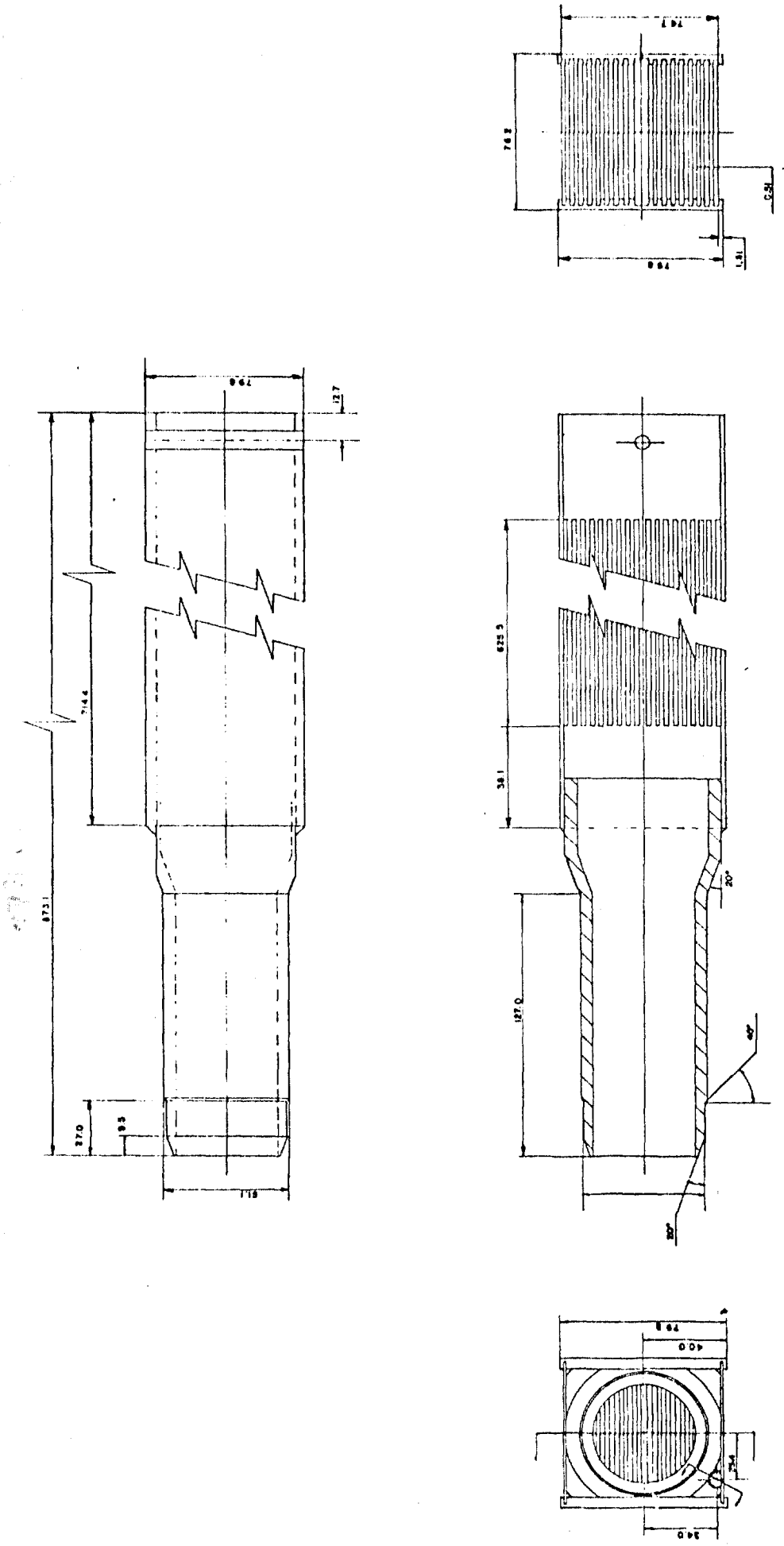


FIGURA 3.3- Elemento Combustível do Reator IEAR-1 (dimensões em mm).

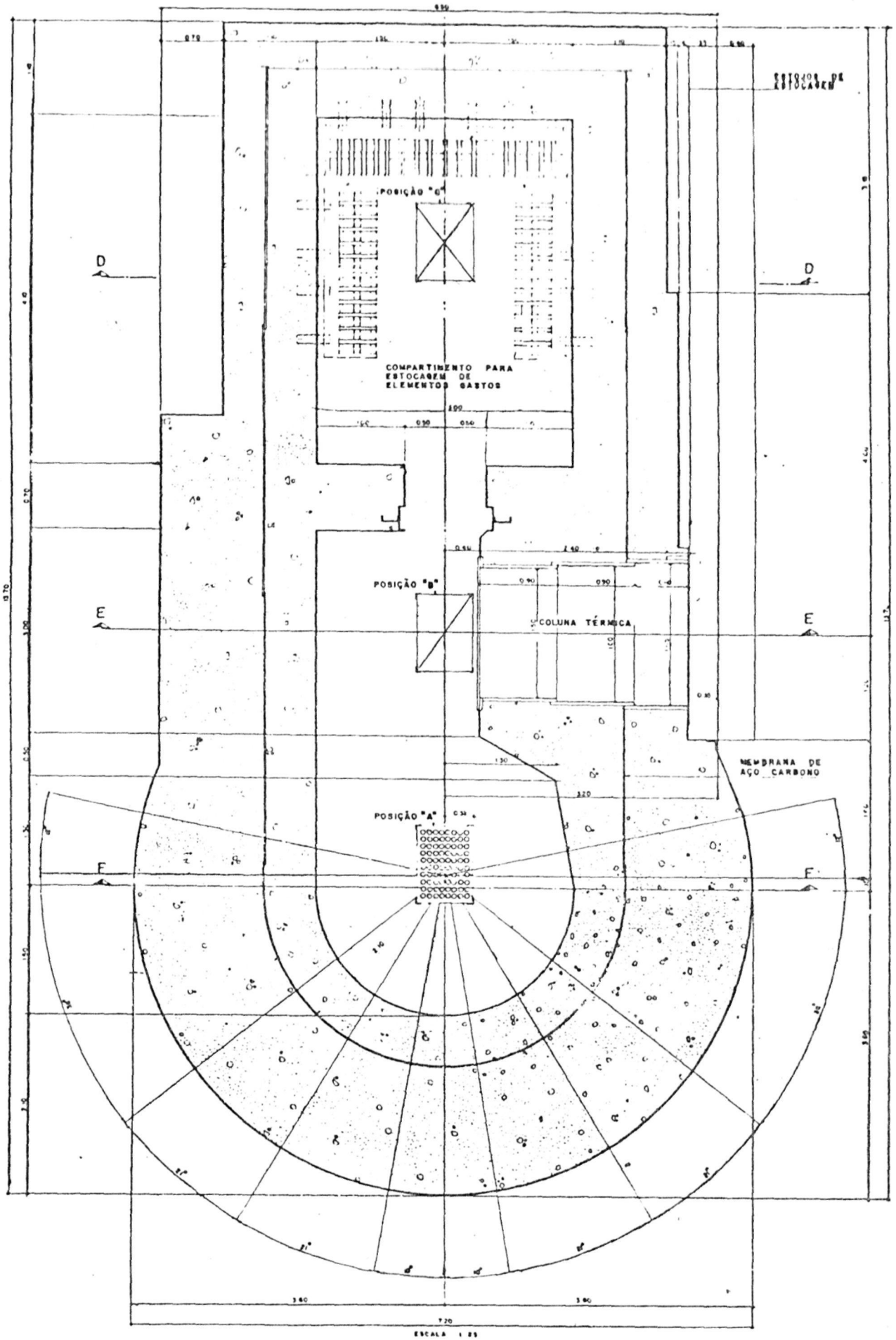


FIGURA 3.4- Vista do Topo da Piscina.

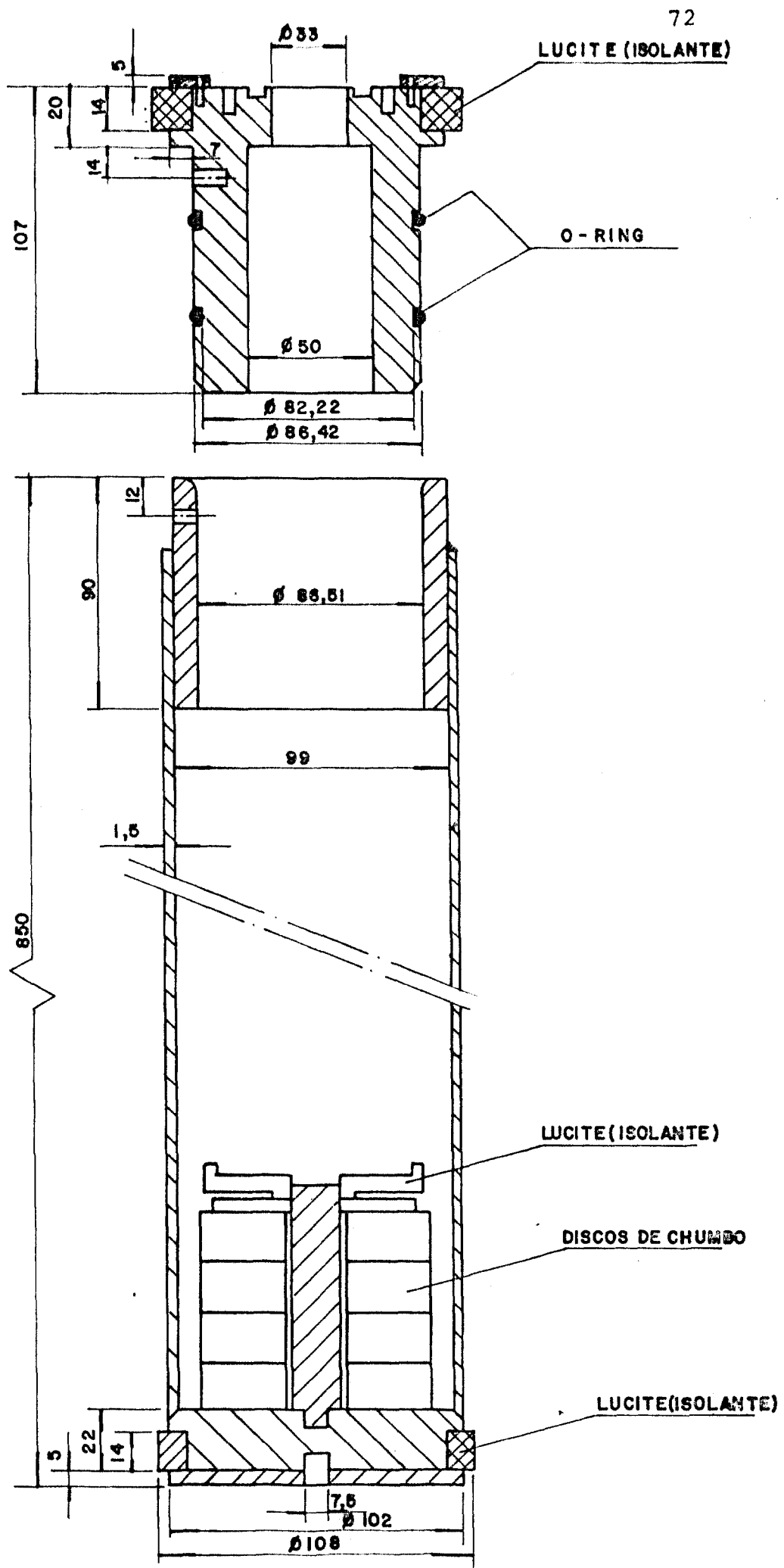


FIGURA 3.5- Câmara Estanque do Detector de Nêutrons
(Dimensões em mm.)

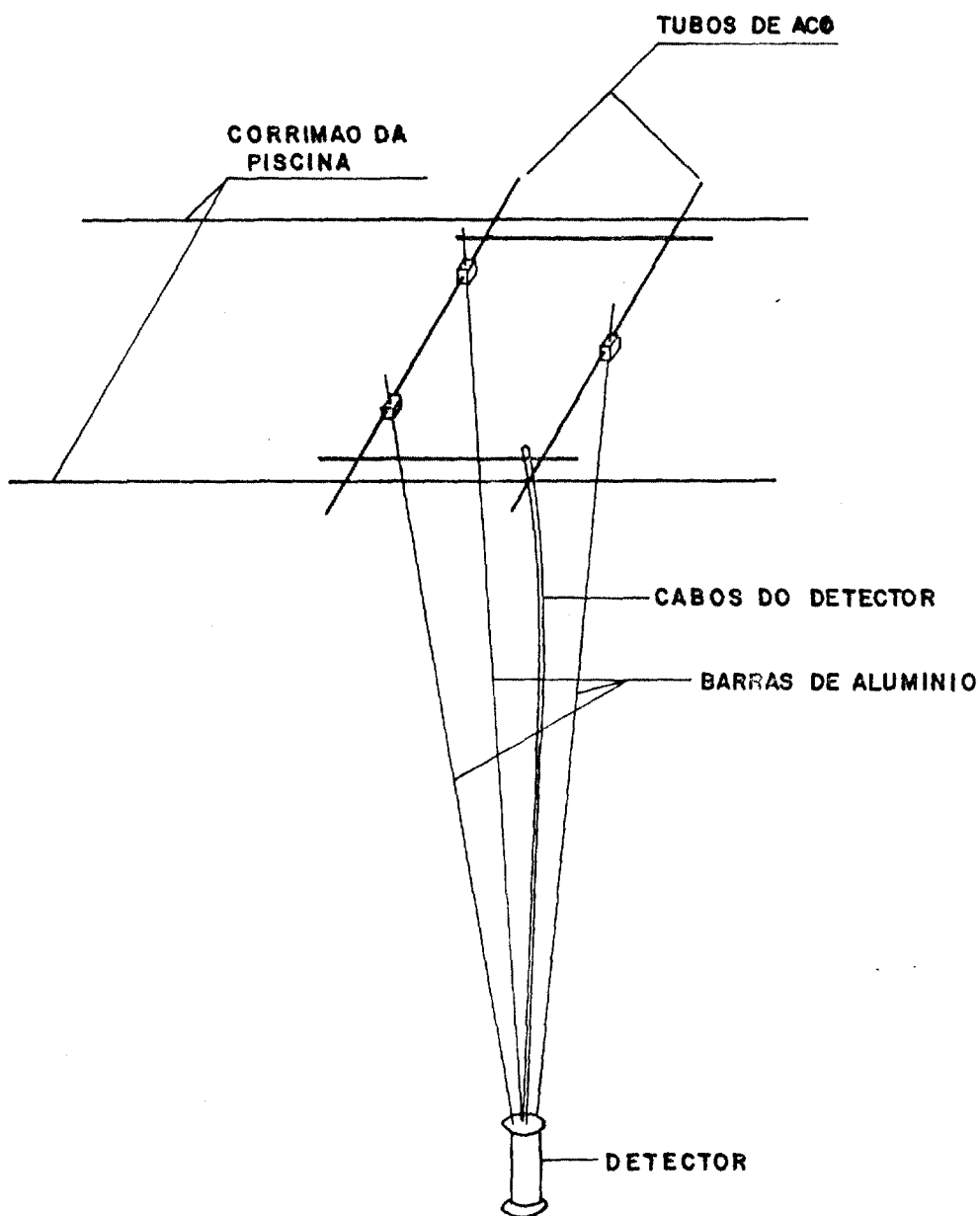


FIGURA 3.6- Sistema de Suporte do Detector de Nêutrons, Tipo "Tripé" (Dimensões em mm)

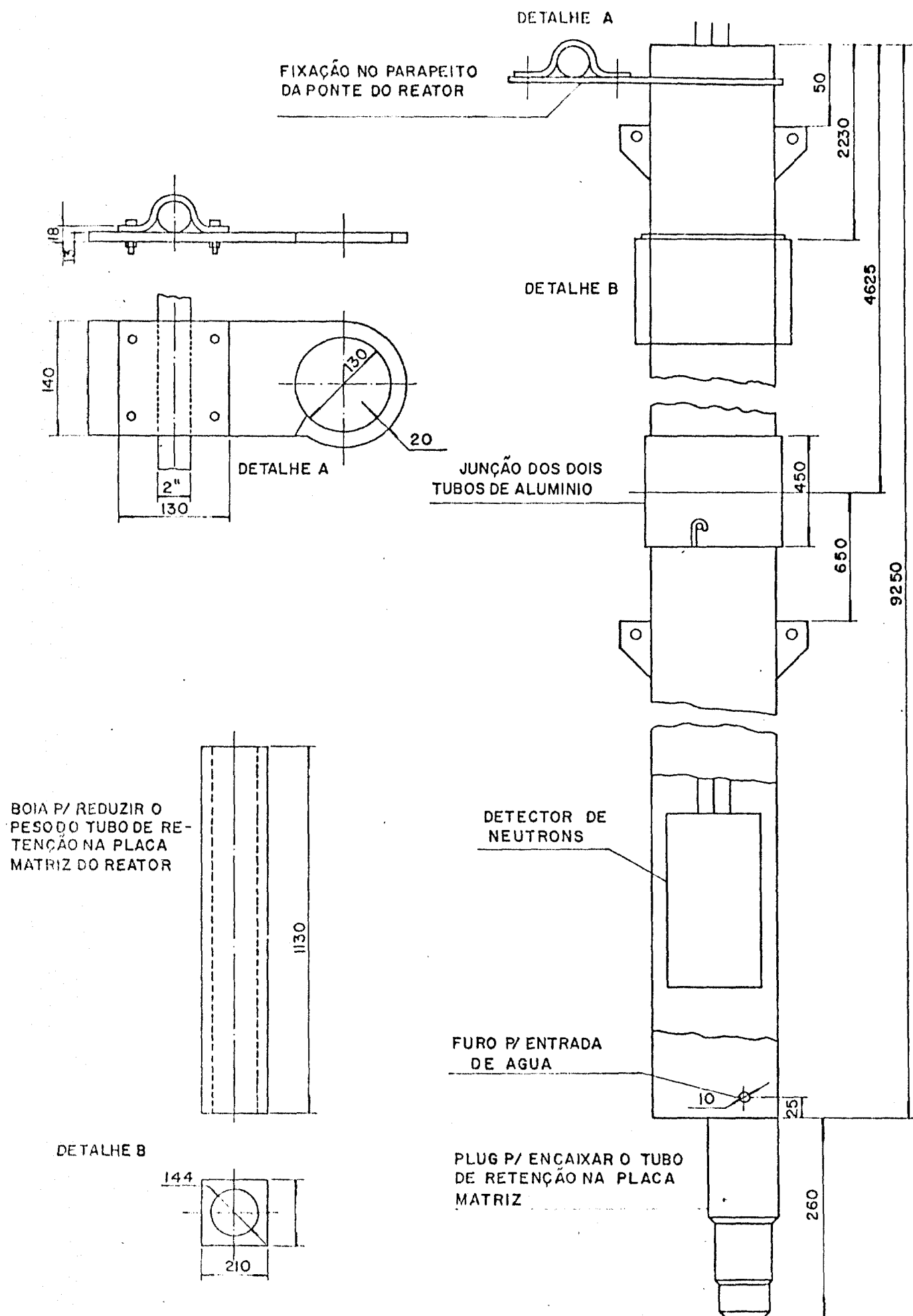


FIGURA 3.7- Sistema de Suporte do Detector de Nêutrons, Tipo "Tubo de Retenção". (Dimensões em mm)

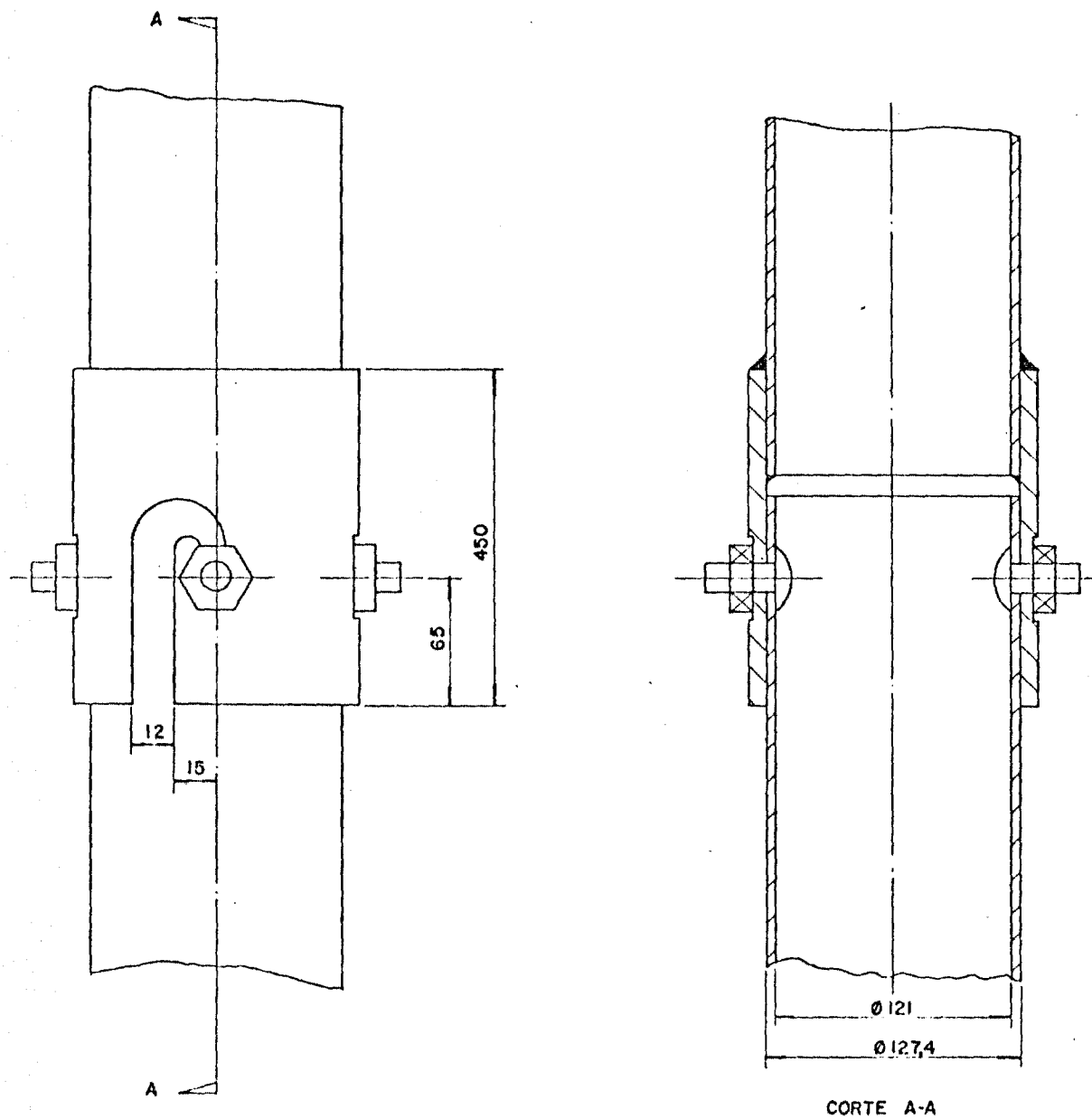


FIGURA 3.8- Junção dos Dois Tubos de Alumínio que formam o Tubo de Retenção do Detector de Nêutrons. (Dimensões em mm)

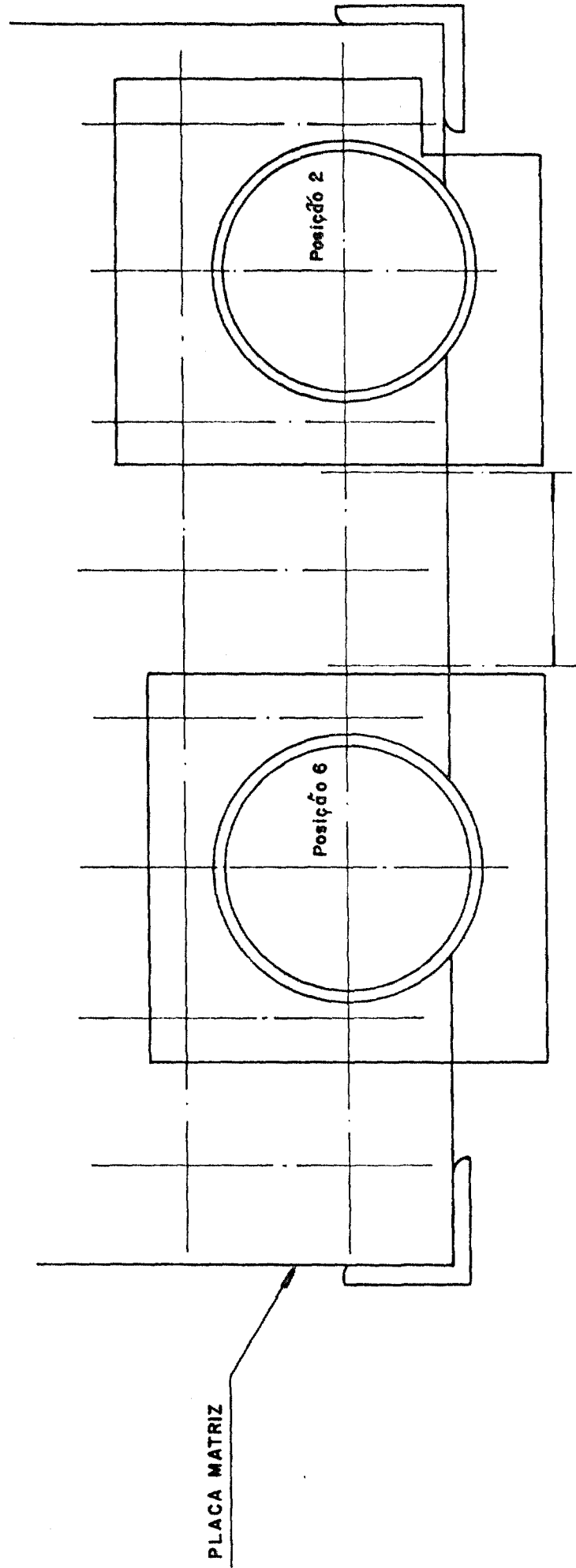


FIGURA 3.9- Localização dos Tubos de Retenção e "Bóias" na Placa Matriz do Reator IEAR-1.

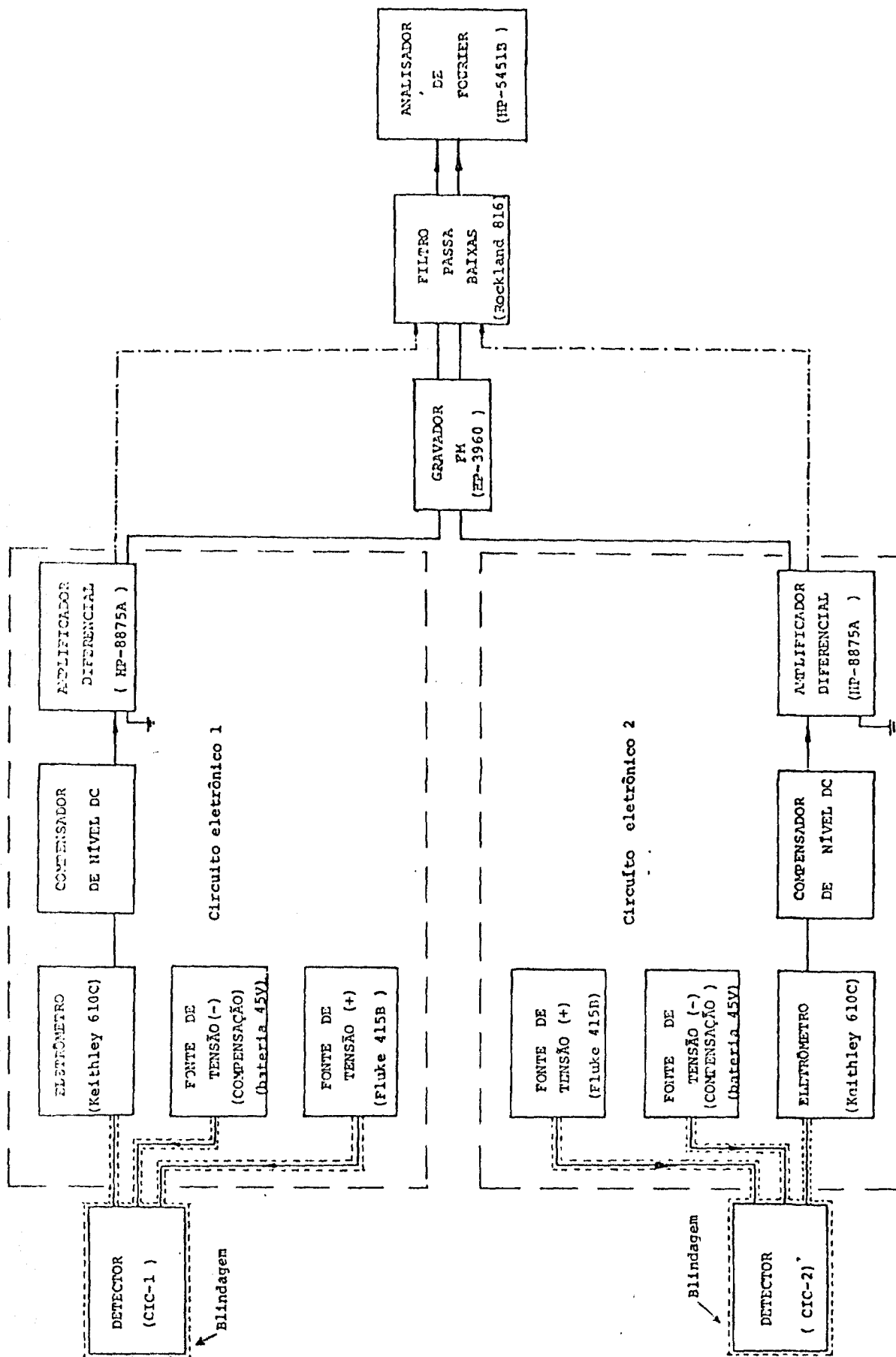


FIGURA 3.10- Sistema Inicial de Detecção e Análise de Dados Associado ao Detector de Nêutrons

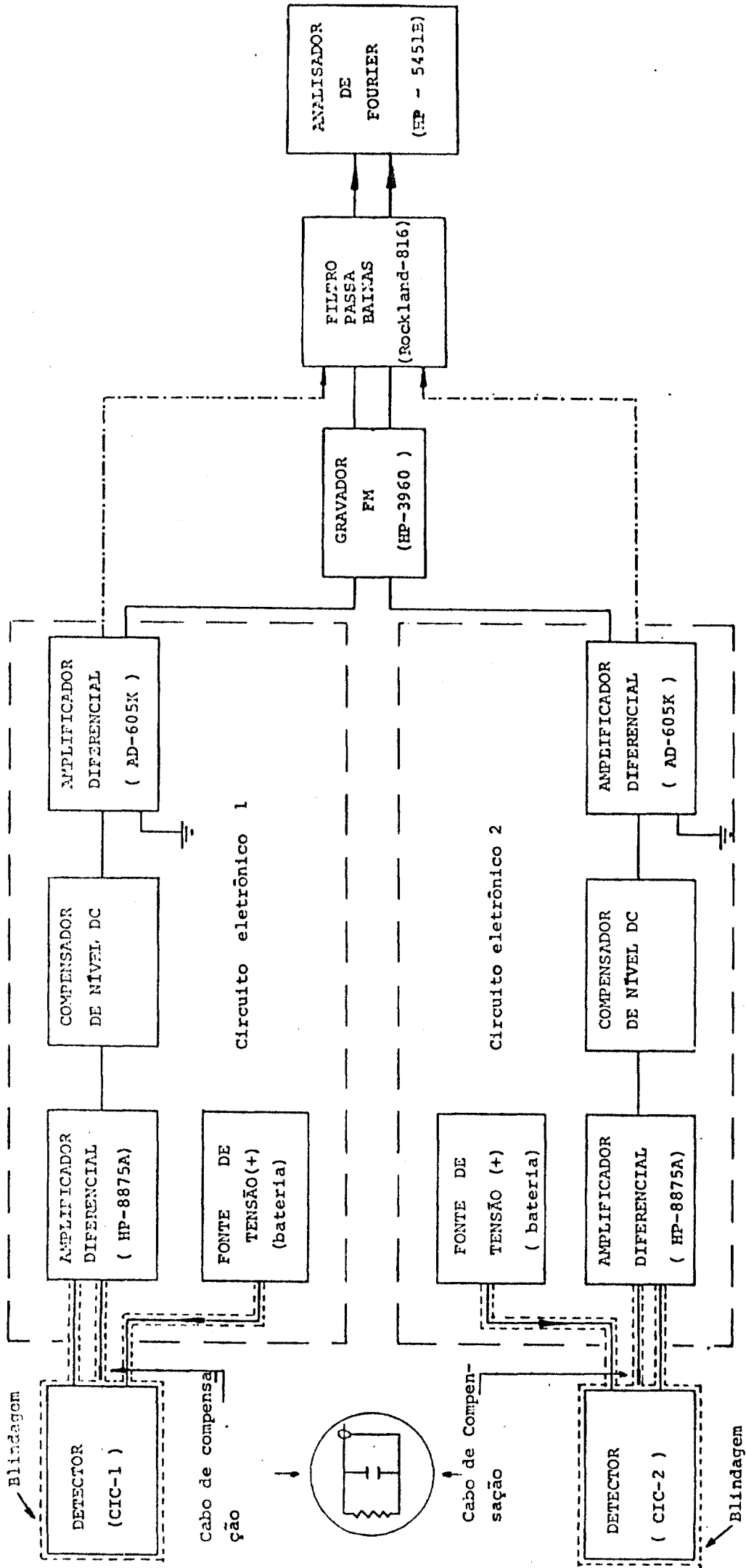
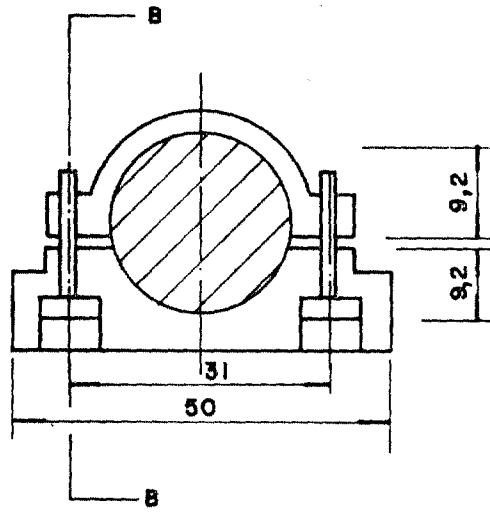


FIGURA 3.11- Sistema de Detecção e Análise de Dados Associado ao Detector de Nêutrons



CORTE BB

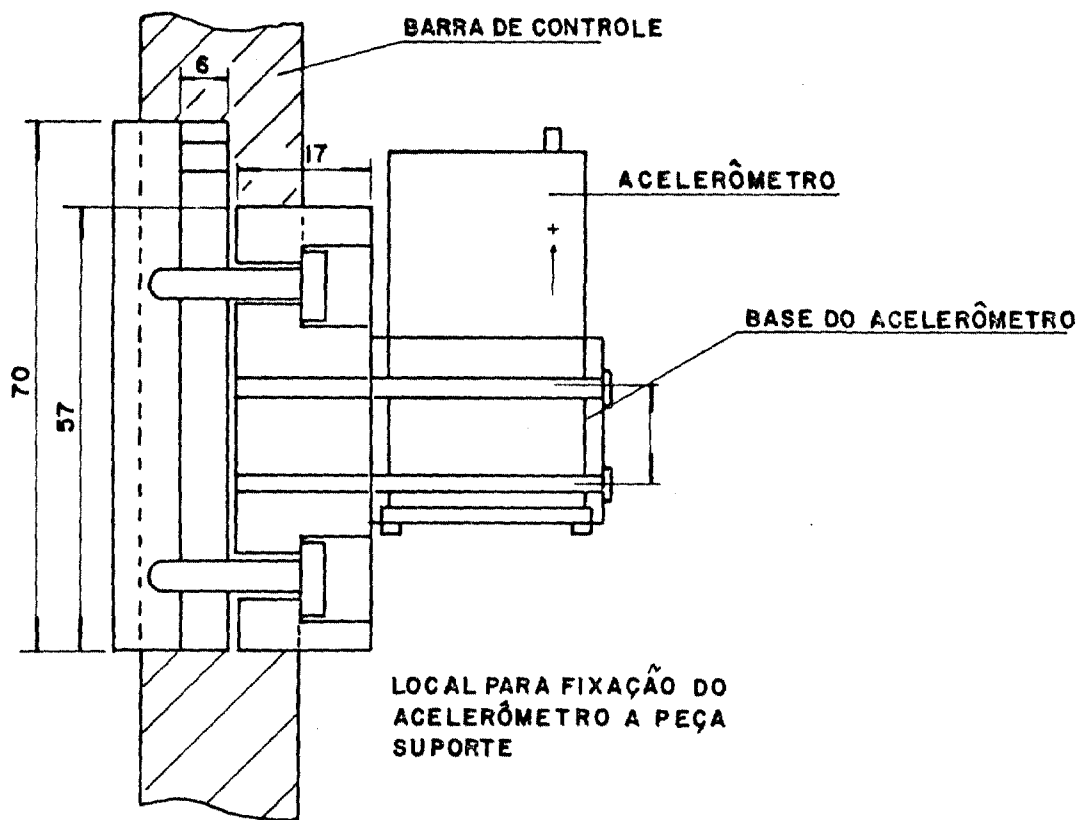


FIGURA 3.12- Sistema de Fixação do Acelerômetro à Barra de Controle do Reator IEAR-1. (Dimensões em mm).

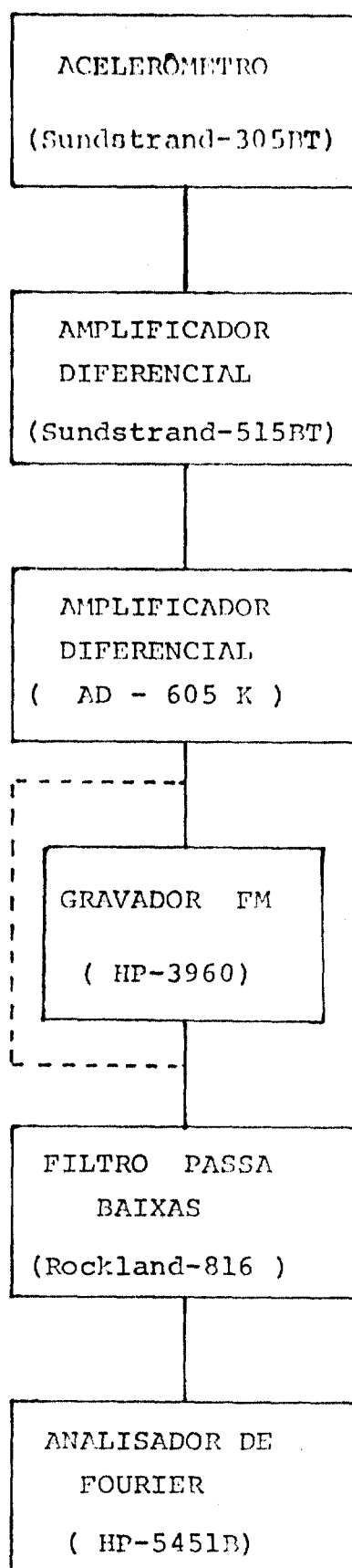


FIGURA 3.13- Sistema de Detecção e Análise de Dados Asso
ciado ao Acelerômetro Posicionado na Barra
de Controle do Reator IEAR-1.

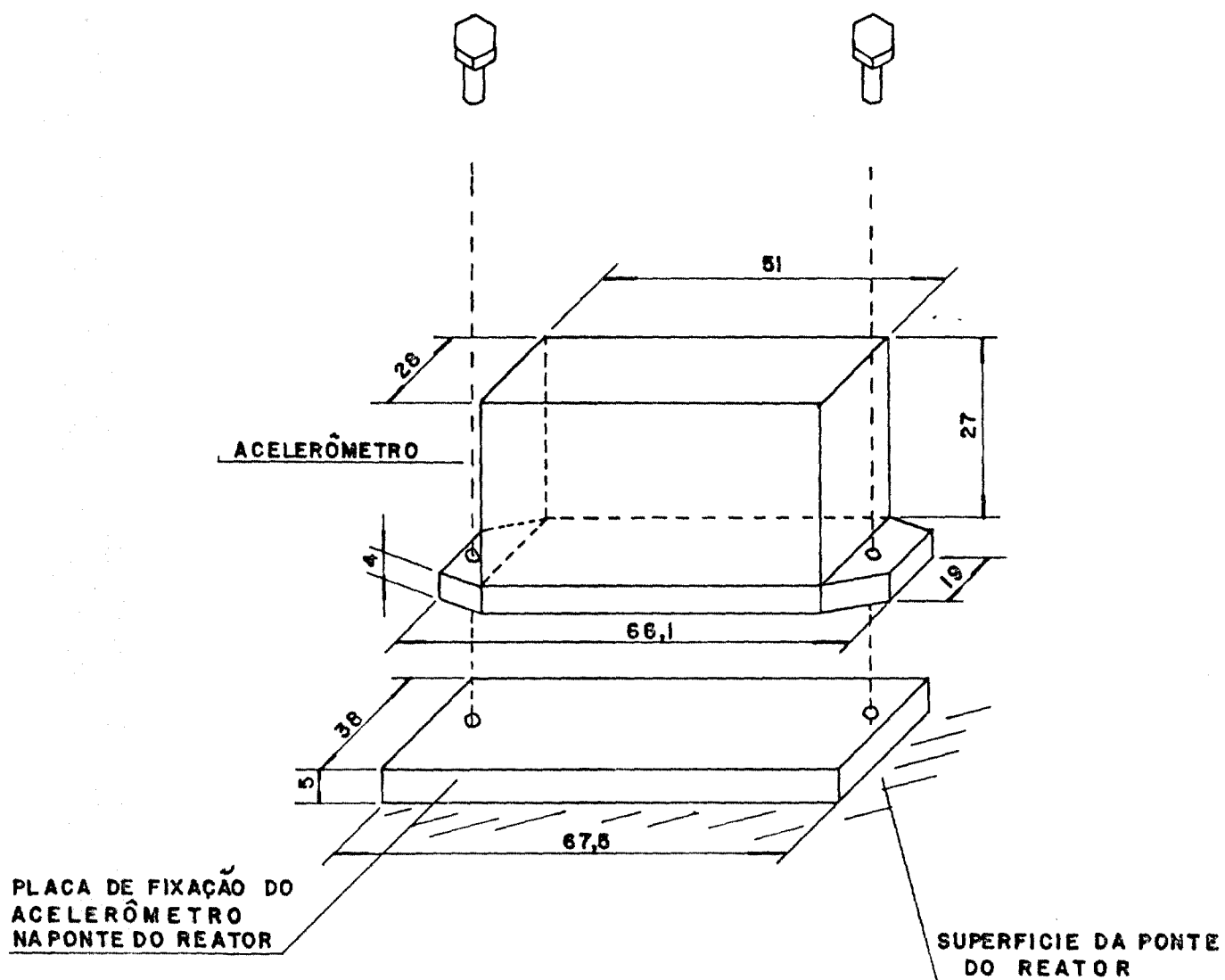


FIGURA 3.14- Sistema de Fixação do Acelerômetro à Placa forma do Reator IEAR-1. (Dimensões em mm).

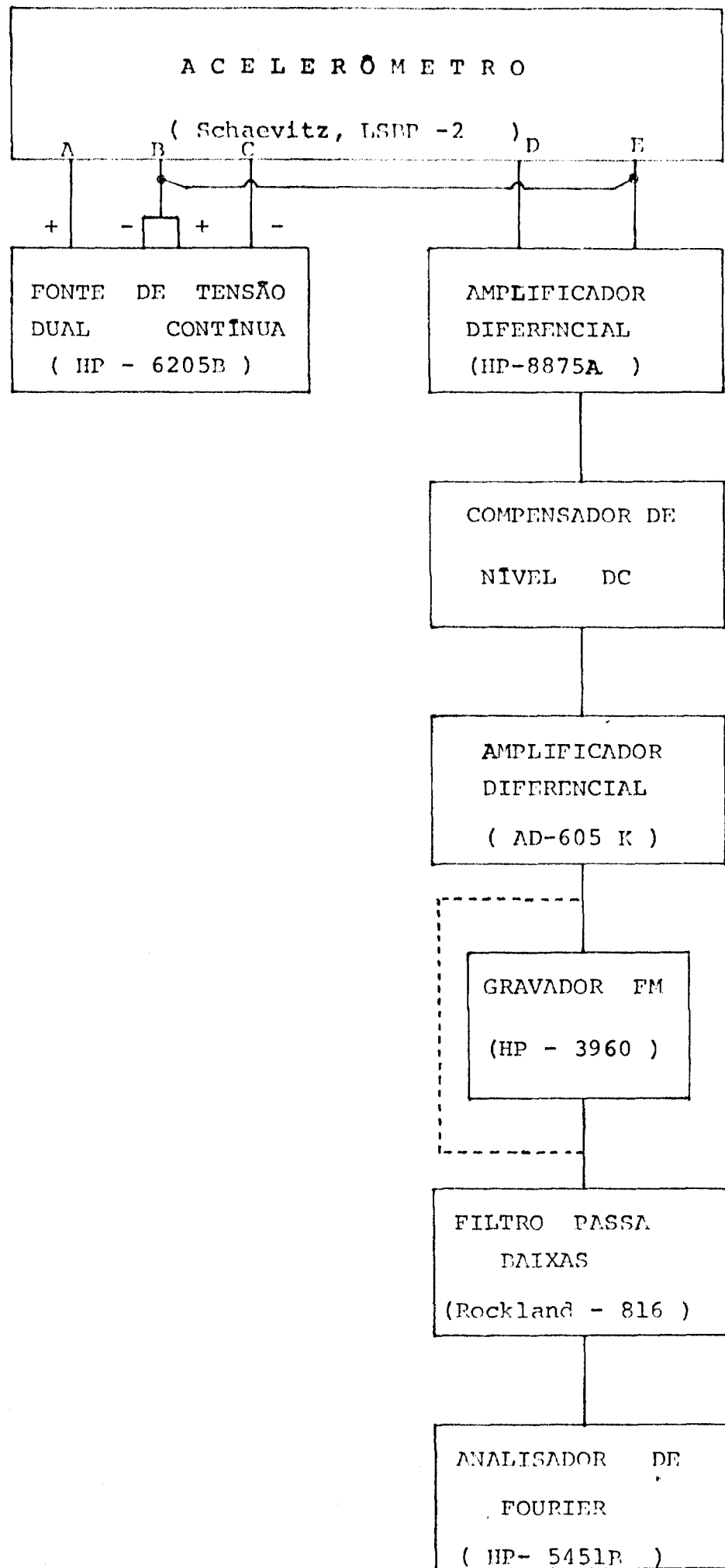


FIGURA 3.15- Sistema de Detecção e Análise de Dados Associado ao Acelerômetro Posicionado na Ponte do Reator IEAR-1.

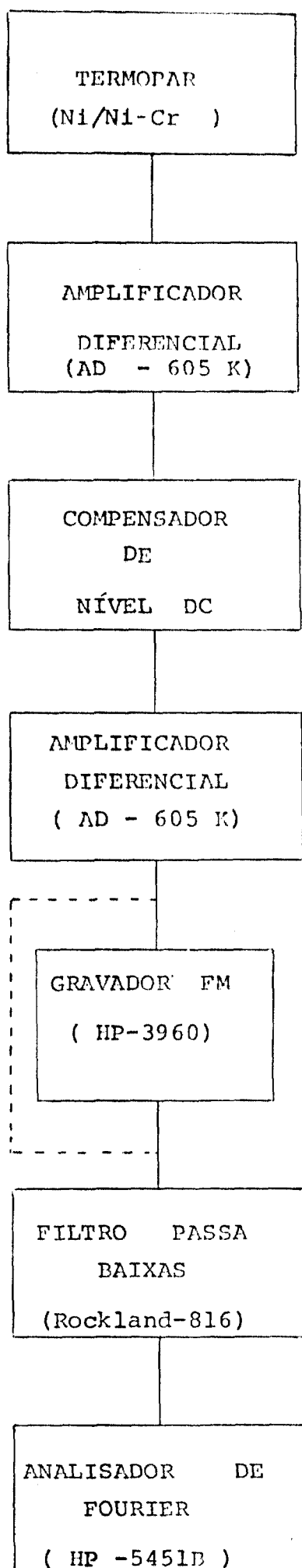


FIGURA 3.16- Sistema de Detecção e Análise de Dados Asso-
ciado ao Termopila

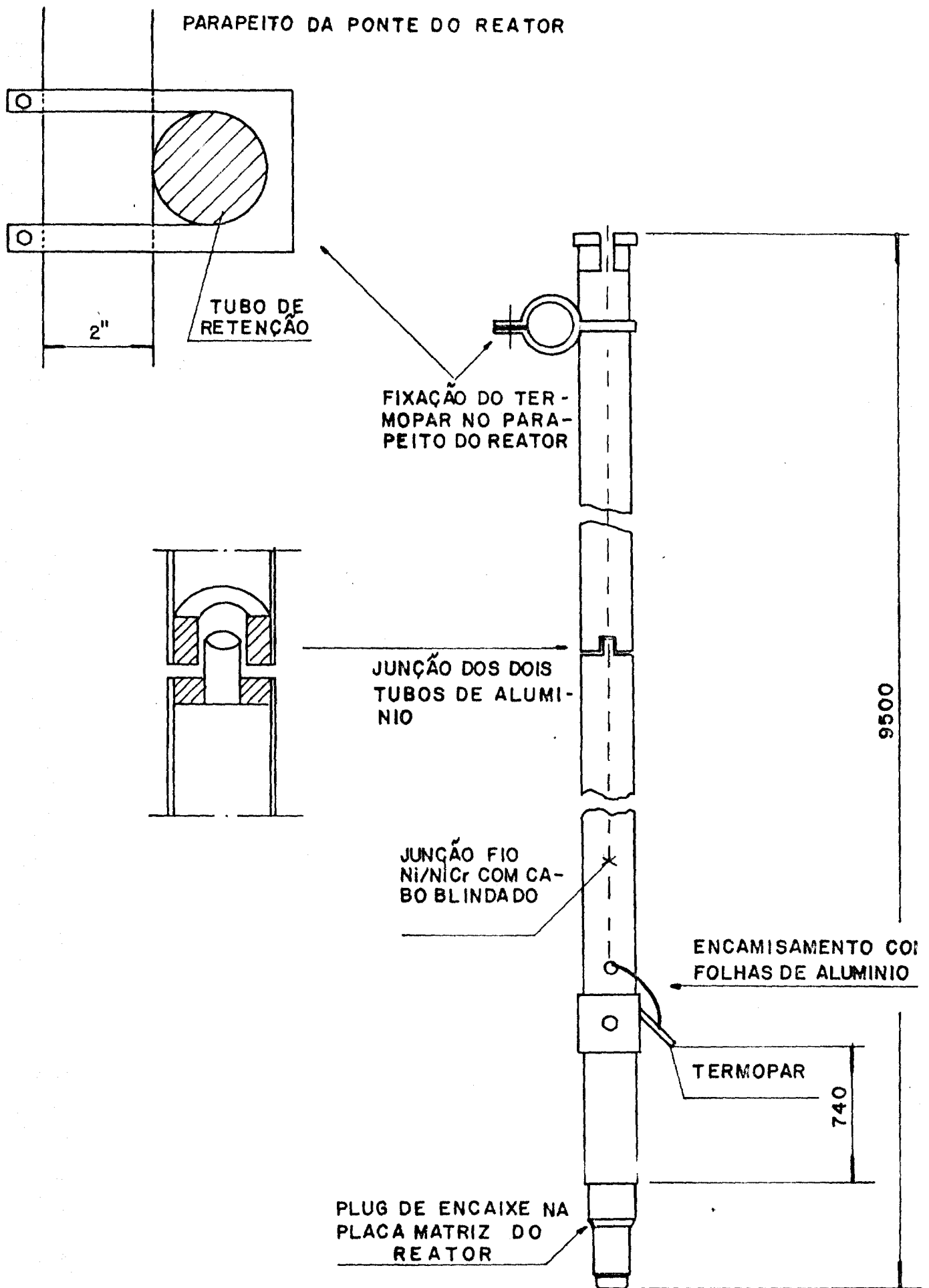


FIGURA 3.17- Sistema de Suporte do Termopar.

4. MEDIDAS E ANÁLISE DE DADOS

Objetivando-se o controle e análise de dados, gravaram-se os sinais dos transdutores (geralmente trechos de meia hora) antes de serem analisados.

Convém salientar que, em consequência das interferências introduzidas nos sinais de ruído do reator IEAR-1, quando da ativação do elevador do prédio do reator, resolveu-se desligá-lo durante a gravação desses sinais.

Calcularam-se as DEP's, juntamente com a DEPC, a fase e a coerência para cada medida.

Usualmente normaliza-se as magnitudes das DEP's e DEPC's em relação ao valor médio (DC) do sinal; por exemplo, a corrente do detector de nêutrons, no caso de ruído neutrônico. Por causa das condições experimentais predominantes, os resultados apresentados neste trabalho não foram normalizados.

Antes do início de qualquer seqüência experimental, verificou-se o funcionamento correto dos sistemas de medida tomando-se as seguintes providências:

- calibração do gravador para $\pm 10V_{DC}$;
- gravação de sinal senoidal de várias frequências (5,50- 500Hz) para verificação instantânea;
- gravação de ruído branco (entrada e saída do último amplificador) e cálculo da DFP.

A seguir , serão discutidas as medidas mais significativas e mais representativas, dentre aquelas feitas neste trabalho.

4.1- Calibração do Sistema de Detecção das Flutuações do Fluxo de Nêutrons

Para testar os detectores e verificar suas respostas em função da frequência, nêutrons de 14 MeV foram produzidos por meio da reação $^3H (d,n)^4He$ com um gerador do tipo tubo selado (SAMPS-BE2) operando em regime pulsado, com uma intensidade média de $10^8 n.s^{-1}$.

Colocou-se o gerador , juntamente com um monitor (detector BF_3) e uma CIC de cada vez, dentro de uma montagem de parafina (usada para termalizar os nêutrons). Utilizaram-se pulsos com, aproximadamente, 50 ms de largura e um período de 340 ms.

Dos resultados obtidos, verificou-se que o tempo de

descida do pulso de nêutrons era da ordem de $1 \mu\text{s}$, enquanto o da CIC estava abaixo de 5 ms. Isto resulta numa resposta em frequência, para o detector de nêutrons, superior a 200 Hz.

4.2- Medidas Preliminares

4.2.1- Estudo do Sistema de Suporte dos Detectores de Nêutrons

Conforme discutido no Capítulo 2 (seção 2.2), um dos problemas a solucionar é a utilização de um sistema de suporte, adequadamente rígido, para reduzir o ruído local proveniente da vibração dos detectores de nêutrons.

Construíram-se três sistemas diferentes, durante a execução deste trabalho, dos quais somente o terceiro ofereceu a rigidez requerida.

4.2.1.a- Sistema de Suporte tipo "Três Cordas de Nylon"

Deve-se enfatizar que o grupo de análise de ruído do laboratório Van de Graaff do Centro de Engenharia Nuclear - do IPEN foi responsável por esse estudo.

Nas medidas iniciais colocaram-se dois detectores próximos um do outro, a aproximadamente um metro da face vertical do reator e paralelos a esta, utilizando-se o sistema de "Três Cordas de Nylon" descrito na seção 3.2.1. A Figura 3.10 mostra o sistema de detecção e análise de dados utilizado nesta experiência.

Gravou-se, simultaneamente, o sinal das duas CIC's durante duas horas. Dividiu-se a gravação em trechos para efeito de análise e determinaram-se as DEP's, DFPC, fase e coerência correspondentes.

Nas Figuras 4.2 e 4.3 tem-se as DEP's do ruído neu-trônico até a frequência de 10 Hz, para dois trechos analisados e na Figura 4.4 vê-se as DEP's até 200 Hz, de um dos outros trechos.

Pode-se notar que as DEP's do sinal dos dois detectores diferem para trechos idênticos de gravação e variam entre diferentes trechos. Como as CIC's foram colocadas muito próximas uma da outra, a causa dessas diferenças, para o mesmo trecho de gravação, não pode ser atribuída às flutuações temporais do fluxo de nêutrons.

As possíveis fontes da inconstância da DEP são: movimento dos detectores, produzido pela circulação do refrigerante no reator, instabilidade da resposta do sistema de detecção (não muito provável) e da operação do reator. Deve-se enfatizar que a estacionariedade é um requisito essen-

cial para esse tipo de análise (vide seção 2.1).

4.2.1.b- Sistema de Suporte tipo "Tripé"

Da análise dos valores obtidos acima, construiu-se um segundo suporte para as CIC's , denominado "Tripé" (vide Figura 3.6).

Nesta experiência , posicionaram-se os dois detectores no plano centro -horizontal a aproximadamente um metro da face vertical e paralelo a estas, conforme indicado na Figura 4.1. Um dos detectores foi sustentado pelo sistema de "Três Cordas de Nylon" (notação D_C) e o outro pelo de "Tripé" invertido (notação D_T) . Na Figura 3.10 tem-se o sistema de detecção e análise de dados em questão.

Foram feitas medidas de ruído neutrônico para as condições de operação do reator, indicadas na Tabela 4.1.

TABELA 4.1- Condições de Operação do Reator IFAR-1 para as Medidas de Ruído Neutrônico utilizando o Sistema de Suporte tipo "Tripé"; destacando-se os resultados mais representativos.

Código	Potência do reator	Modo de operação	Bomba de circulação do refrigerante	Figuras
M ₁	2MW	automático	ligada	4.5 e 4.6
M ₂	100kW	automático	ligada	
M ₃	1kW	automático	ligada	4.7 e 4.8
M ₄	1kW	manual	ligada	
M ₅	1kW	manual	desligada	
M ₆	desligado		desligada	4.9 e 4.10
M ₇	Desligado		ligada	

Para as condições M_1 , os detectores e seus sistemas eletrônicos foram trocados (detector (1,2)/sistema (1,2)-detector (1,2)/sistema(2,1)). As DEP's obtidas para as duas combinações foram essencialmente constantes, como era esperado.

As Figuras de 4.5 a 4.10 mostram resultados representativos do ruído neutrônico do reator IEAR-1 em várias condições de operação.

Convém salientar que para essas medidas a magnitude absoluta de ruído não pode ser atribuída às condições de operação do reator, pois as posições dos detectores foram mudadas, e não definidas com precisão, para cada potência de operação.

Fez-se essas mudanças de posição para maximizar a razão sinal/ruído e, conseqüentemente, melhorar a determinação das possíveis ressonâncias presentes nas DEP's do ruído neutrônico. Deve-se lembrar que durante a avaliação das várias fontes de ruído no sinal observado (como por exemplo, possíveis interferências introduzidas pelas bombas de circulação do refrigerante), as condições experimentais precisam manter-se constantes.

Da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir:

1. A comparação dos valores médios das DEP's indica que a corrente de água entrando no reator produ-

ziu um aumento significativo na DEP do ruído neu-
trônico na faixa de frequência de 0,1 Hz a 1 Hz e
um aumento menor na faixa de 1 Hz a 10 Hz.

2. Os valores médios das DEP's são aproximadamente constantes para frequências ao redor de 4 Hz.
3. Nas DEP's analisadas, não se verificou nenhuma ressonância procedente das mudanças de potência do reator.

Como os dois detectores estavam próximos um do outro, ao lado do cerne do reator, para que essas ressonâncias se identificassem com mudanças de potência, elas precisavam ter coerência maior que 0,4 e diferença de fase aproximadamente igual a zero (vide seção 2.1.2). Embora vários picos (por exemplo, 0,8 Hz, 1,6 Hz, 3,3 Hz, etc) não estejam presentes nas DEP's de ruído de fundo das CIC's, há evidências que não foram produzidos por mudanças de potência e, conseqüentemente, da população de nêutrons..

4. Quando se elevou a potência de operação do reator de 1 kW a 2MW, verificou-se um aumento significativo, cerca de 50 dB, na DEP do sinal do detector D_C na faixa de frequência de 0,1 Hz a 1 Hz.

Deve-se enfatizar que essas mudanças não podem ser atribuídas a oscilações do detector porque nos dois casos as bombas de circulação estavam ligadas.

Para frequências acima de 4 Hz, a DEP do sinal do detector D_T foi independente do nível de potência do reator.

5. O sistema de suporte tipo "Tripé" reduziu, mas não eliminou o movimento das CIC's na faixa de frequências baixas. Portanto, foi necessário a construção de um suporte mais rígido do que o de "Tripé".

Embora não se tenha apresentado as DEP's do sinal dos dois detectores para a condição de operação do reator M_2 , deve-se evidenciar que houve uma pequena diferença entre as DEP's desta condição e a da M_3 .

4.2.1.c- Sistema de Suporte tipo "Tubo de Retenção"

Esse sistema, "Tubo de Retenção", está descrito na seção 3.2.1 e ilustrado na Figura 3.7.

Além da análise desse novo sistema de suporte das CIC's, essa série de medidas teve outros objetivos, por exemplo: a) verificar a influência do ruído eletrônico da unidade de alta tensão de alimentação (Fluke 415B) e b) avaliar a possível redução do ruído eletrônico associado aos cabos do detector de nêutrons quando adapta-se uma termina-

ção RC no cabo de compensação (vide seção 3.2.2).

Discutir-se-á , por hora, apenas os resultados obtidos na verificação desse terceiro sistema; as análises serão discutidas posteriormente.

Sustentou-se um dos detectores (o mesmo da experiência anterior) pelo sistema de "Três Cordas de Nylon" (notação D_C), posicionando-o de maneira idêntica à descrita na seção 4.2.1.b; o outro (com terminação RC no cabo de compensação), pelo sistema de "Tubo de Retenção" (notação D_{TR}), fixo na posição 6 da placa matriz (vide Figura 3.1) e distante aproximadamente 1 m do topo do cerne do reator. Na Figura 4.11 observa-se um esboço da localização das CIC's na piscina do reator.

Para o detector D_C utilizou-se o circuito eletrônico - indicado na Figura 3.10 e para o detector D_{TR} o da Figura 3.11. Convém acrescentar que a fonte de alimentação foi idêntica para ambos (Fluke 415B em 1200 V).

As condições de operação do reator, durante a execução dessa experiência, foram as M_1 , M_6 e M_7 indicadas na Tabela 4.1.

Nas Figuras 4.12 a 4.19 podem ser vistos os resultados mais representativos, dos quais pode-se concluir:

- 1- Embora na faixa de, aproximadamente, 0,85 Hz a 1,85Hz

a coerência entre os sinais dos dois detectores seja maior que 0,4, com o reator operando a 2 MW, a diferença de fase (diferente de zero) indica que não se pode identificá-la como mudanças do fluxo de nêutrons.

- 2 - Observa-se uma ressonância, em aproximadamente 3,3 Hz, com coerência 0,5 e diferença de fase de 5° ; pico esse que será investigado nas medidas definitivas, pois um dos detectores foi sustentado pelo sistema de "Três Cordas de Nylon" (pior sistema de suporte).
- 3 - Na Figura 4.15, confirma-se a redução do ruído de "pick-up" quando do uso da combinação do "Tubo de Retenção" e terminação RC no cabo de compensação, pois deixa bem evidente a influência da frequência da rede (60 Hz) e seus harmônicos, como é o caso do detector D_C . Esse estudo será pormenorizado na seção seguinte (4.2.2).
- 4 - Quando ambos, o reator e a bomba, estão ligados, as DEP's do sinal dos dois detectores são relativamente semelhantes.

5 - Comparando-se as Figuras 4.5 e 4.12 , vê-se que a DEP do sinal do detector D_{TR} apresenta um ruído menor que a do detector D_T e ambos têm um aumento de cerca de 35 dB na faixa de 0,1 Hz a 10 Hz. Esses resultados vêm confirmar a eficiência desse terceiro sistema de suporte. A sua total viabilidade será demonstrada na seção 4.3 quando serão discutidos os resultados da análise de ruído do reator IEAR-1 com os dois detectores sustentados de maneira idêntica , ou seja, utilizando o sistema tipo "Tubo de Retenção".

4.2.2- Estudo da Influência do Sistema de Compensação dos Detectores de Nêutrons

O objetivo do presente estudo foi avaliar a possível redução do ruído de "pick-up" adaptando-se uma terminação RC no cabo de compensação, equivalente ao RC do detector (vide seção 2.3.1). Conseqüentemente , não se compensa a corrente do detector (CIC) proveniente dos raios gama e faz-se a conversão do sinal de corrente para tensão por meio de um amplificador diferencial de tensão , ao invés do conversor corrente-tensão "Keithley 610C".

Inicialmente, gravou-se o ruído de fundo das duas CIC's (fora da sala do reator) para posterior cálculo da DEP.

Visto que dessas medidas nada se pôde concluir de mais definitivo, o passo seguinte foi a feitura de uma sequência experimental no reator IEAR-1 em operação normal.

4.2.2.a- Medidas no Reator IEAR-1

Como foi mencionado anteriormente, junto com os testes do terceiro sistema de suporte dos detectores de nêutrons, verificou-se a influência do sistema de compensação das CIC's.

Deve-se lembrar que o arranjo experimental utilizado foi idêntico ao descrito na seção 4.2.1.c. O detector D_C estava operando de modo compensado e o detector D_{TR} de modo não compensado (terminação RC no cabo de compensação).

As medidas foram realizadas com o reator operando a 2 MW e os diferentes casos considerados estão resumidos na Tabela 4.2.

TABELA 4.2- Casos Considerados para o Estudo da Influência do Sistema de Compensação dos Detectores de Nêutrons

Caso (nº)	CIC Normal	CIC Modificada
1	com compensação	cabo de compensação desconectado do amplificador
2	com compensação	cabo de compensação conectado no amplificador
3	sem compensação	cabo de compensação desconectado do amplificador
4	sem compensação	cabo de compensação conectado no amplificador

As Figuras 4.20 e 4.21 mostram os resultados mais representativos, onde evidencia-se que o sistema, cabos blindados pelo tubo de retenção/terminação RC no cabo de compensação da CIC, reduziu significativamente o ruído possivelmente proveniente dos cabos do detector, e, obtem-se melhor redução quando conecta-se esse cabo de compensação ao amplificador diferencial.

4.2.3- Estudo da Utilização de Baterias como Fontes de Alimentação

Já foi discutido anteriormente (seção 2.3) a importância da redução do ruído eletrônico introduzido pela rede de alimentação e que uma das possíveis soluções para essa diminuição é a utilização de baterias como fontes de tensão.

Analisou-se a influência do ruído introduzida pela fonte de alta tensão , somente para o detector com a terminação RC no cabo de compensação (D_{TR}) , uma vez que adotou-se esse sistema para as medidas finais.

O arranjo experimental foi idêntico ao empregado na verificação dos sistemas de compensação e suporte dos detectores de nêutrons, tendo-se utilizado um conjunto de baterias de 9 volts, com tensão total de 540 volts, como fonte de tensão da CIC (o reator estava operando a 2 MW).

Fixou-se a tensão de operação das CIC's (540 volts) calculando-se a distribuição espacial do fluxo de nêutrons, do plano central até 2 m acima do topo do cerne do reator, por meio da ativação de folhas de ouro. Pormenores e resultados dessas experiências encontram-se no Apêndice A .

Das Figuras 4.22 e 4.23 observa-se que para frequências baixas, o tipo de fonte de alimentação (Fluke ou Bateria) parece não interferir na DEP neutrônica.

O mesmo fato não ocorre com frequências mais altas, onde o pico de 60 Hz é significativamente menor quando são usadas baterias (vide Figura 4.24 e 4.25).

4.3- Medidas do Ruído Neutrônico Característico do Reator IEAR-1 em suas Possíveis Fontes Indutoras

Como foi mencionado no Capítulo 1 e 3, avaliou-se o ruído neutrônico característico do Reator IEAR-1 medindo-se os parâmetros listados a seguir:

- flutuação do fluxo neutrônico mais radiação gama;
- vibração da barra de controle do reator;
- vibração da estrutura de suporte do reator;
- flutuação da temperatura de entrada do refrigerante no cerne do reator.

O arranjo experimental para a execução dessas medidas foi descrito no Capítulo 3. Convém lembrar que os detectores foram sustentados pelo sistema tipo "Tubo de Retenção" (suporte mais rígido) e colocados nas posições 2 e 6 da placa matriz do reator (vide Figura 3.1); o sistema de detec-

ção e análise de dados utilizado foi o da Figura 3.11.

Deve-se enfatizar, também, que a partir deste momento representar-se-ã o detector da posição 6 pela notação CIC-1 e o da posição 2 pela notação CIC-2.

Para as medidas das flutuações da população neutrônica, conseqüentemente do nível de potência do reator, ajustou-se o ganho dos amplificadores de modo que os sinais gravados tivessem, aproximadamente, a mesma amplitude ; embora nem sempre os ganhos fossem idênticos.

Foram feitas experiências para as condições de operação do reator citadas abaixo:

- Reator a 2 MW/automático/bomba ligada;
- Reator a 20 kW/ automático/bomba ligada;
- Reator desligado / bomba ligada;
- Reator desligado / bomba desligada;

onde o termo automático significa o regime de controle do reator e bomba ligada ou desligada representa o modo de operação.

4.3.1- Reator a 2 MW

Os vários parâmetros analisados, juntamente com os resultados mais representativos, estão resumidos na Tabela 4.3.

TABELA 4.3- Sumário das Medidas Feitas e Apresentadas para a Condição de Operação do Reator IEAR-1: 2 MW/ Automático/Bomba Ligada .(O Sistema de identificação adotado está na página 110).

Medidas Nº	Canal 1	Canal 2	Figuras
	Transdutor	Transdutor	
1	CIC-1	CIC-2	4.26 a 4.28
2	CIC-1	AB	4.29 a 4.33
3	CIC-1	APV	4.34 e 4.35
4	AB	APV	4.36 e 4.37
5	CIC-1	APH (I)	4.38 e 4.39
6	AB	APH (I)	
7	CIC-1	APH (//)	4.40 e 4.41
8	AB	APH (//)	
9	CIC-1	T	4.42 e 4.43

Dos resultados obtidos conclui-se:

1. Nas Figuras 4.26 a 4.28 observa-se a viabilidade do sistema de suporte tipo "Tubo de Retenção", pois na faixa de 0 Hz a 10 Hz a coerência é maior que 0,4 (por exemplo, próximo a 1 entre 0 Hz e 5 Hz) e a fase é aproximadamente igual a zero.

2. Pode-se notar também, nas Figuras 4.29 a 4.31, que a vibração da barra de controle e o ruído neutrônico apresentam uma coerência de aproximadamente 1 na faixa de 0 Hz a 5 Hz, reduzindo a um valor significativo ($\approx 0,4$) até 10 Hz.

3. Para os casos: vibração da estrutura de suporte do reator (qualquer que seja a orientação) e flutuação da temperatura de entrada do refrigerante no cerne do reator, não se tem nenhuma coerência entre esses sinais e o proveniente das flutuações do fluxo de nêutrons (Vide Figuras 4.34 a 4.43). Deve-se salientar que medidas subsidiárias, objetivando-se a calibração do termopar, indicaram variações de temperatura da ordem de 0,5°C.

4. Para frequências acima de 30 Hz, a fase entre o sinal da CIC e do acelerômetro da barra é totalmente irregular e diferente de zero; (Vide Figuras 4.32 e 4.33).

4.3.2- Reator a 20 kW

Os vários parâmetros analisados, juntamente com os resultados mais representativos, para o reator operando a 20 kW estão indicados na Tabela 4.4.

Convém salientar que a vibração da estrutura de suporte do reator foi considerada apenas no sentido vertical, por ter amplitude maior.

De acordo com a análise desses resultados conclui-se:

1. A DEP do sinal do sistema de detecção de nêutrons não variou quando se ligou a bomba de circulação do refrigerante, (Vide Figuras 4.44 e 4.45); como era de se esperar.

2. O sinal das duas CIC's tem uma coerência maior que 0,4 e uma diferença de fase de aproximadamente 0° , na faixa de 0 Hz a 10 Hz (Vide Figuras 4.46 e 4.47). Isso vem confirmar , novamente, a viabilidade do sistema de suporte dos detectores de nêutrons.

3. A vibração da barra de controle está altamente correlacionada com o ruído neutrônico (Vide Figuras 4.48 a 4.50). Esse fato, foi observado também quando o reator estava em operação normal (2 MW).

TABELA 4.4- Sumários das Medidas Feitas e Apresentadas para a Condição de Operação do Reator IEAR-1: 20 MW/ Automático/Bomba ligada.

Medidas Nº	Canal 1	Canal 2	Figuras
	Transdutor	Transdutor	
1	CIC-1 (bomba desligada)	CIC-2 (bomba desligada)	4.44
2	CIC-1	CIC-2	4.45 a 4.47
3	CIC-2	AB	4.48 a 4.50
4	CIC-2	APV	4.51 a 4.52

4. Vê-se novamente que a vibração da estrutura de suporte do reator não induz flutuações de reatividade, conseqüentemente de potência (Figuras 4.51 e 4.52).

5. Comparando-se as Figuras 4.26 e 4.45, observa-se que na faixa de 0 Hz a aproximadamente 1,25 Hz o nível de ruído é maior para a condição de alta potência (2 MW); como era de se esperar.

6. Ainda pode-se salientar que a DEP do sinal do acelerômetro posicionado na barra de controle do reator são semelhantes para as potências 2 MW e 20 kW.

4.3.3- Reator Desligado

Na série de medidas com o reator desligado considerou-se duas condições: bomba ligada e bomba desligada.

Para o reator desligado/bomba desligada o ganho do sistema de detecção associado ao acelerômetro da barra de controle foi diferente do valor usado quando o reator estava operando a 2 MW, isto porque o nível de gravação do sinal foi inferior a - 20 dB.

Para os casos restantes, o ganho do sistema de detecção associado aos vários transdutores não foi modificado.

Convém enfatizar que durante a execução deste trabalho o nível de gravação dos vários sinais analisados foi mantido entre - 20 e 0 dB.

Os vários parâmetros considerados, incluindo as figuras mais representativas para análise, estão indicados na Tabela 4.5.

De acordo com os dados obtidos observa-se:

1. Comparando-se as Figuras 4.53 e 4.57 ; 4.55 e 4.59 , nota-se que o nível de ruído para o reator desligado é idêntico em ambos os casos; bomba ligada ou desligada; como era de se esperar.

2. Considerando-se a DEP do sinal da vibração da barra de controle (Vide Figuras 4.54 e 4.58) tem-se um aumento de aproximadamente $\frac{10}{20}$ dB quando do acionamento da bomba de circulação do refrigerante.

4.3.4- Observações Gerais

1. Embora apareçam ressonâncias nas DEP's do sinal da vibração da estrutura de suporte do reator, há evidências que não existe uma correlação significativa entre elas e a DEP do sinal do sistema de detecção de nêutrons.

2. A DEP do sinal do sistema de detecção de nêutrons para o reator em operação normal (2 MW) está 10 dB acima do nível de ruído da DEP para o reator desligado/bomba ligada; aumento este, proveniente do ruído neutrônico. Con-

TABELA 4.5- Sumário das Medidas Feitas e Apresentadas com o Reator IEAR-1 Desligado

Medidas Nº	Canal 1 transdutor	Canal 2 transdutor	Figuras	
1	CIC-1	CIC-2	4.53	BOMBA DES-LIGADA
2	CIC-1	AP	4.54	
3	CIC-1	APV	4.55	
4	AB	APV		
5	CIC-1	APH(1)		
6	AP	APH(1)		
7	CIC-1	T	4.56	
8	CIC-1	CIC-2	4.57	BOMBA LIGADA
9	CIC-1	AP	4.58	
10	AB	APV	4.59	

siderando-se a DEP do sinal do acelerômetro na barra de controle , este aumento é insignificante (≈ 2 dB).

3. Observa-se na Figura 4.60 um aumento significativo na DEP do sinal do sistema de detecção de nêutrons à medida que se muda da condição de reator desligado/ bomba ligada para a de potências baixas (no caso 20 kW) e destas para a de potências mais altas (no caso, 2 MW). Isto indica que esse aumento é proveniente do ruído neutrônico e não do sistema de detecção; como era de se esperar.

4. Fato inesperado foi observado ao comparar as Figuras 4.42 e 4.56 . Para o caso do reator desligado, nota-se, que as variações no nível de sinal do termopar foram maiores num fator de 6 dB em relação a sua operação em condições normais (2 MW). Convém salientar que as medidas com o reator desligado foram feitas 14 horas após o seu desligamento.

Lista de Símbolos Usados nestes Gráficos

- DEP = Densidade espectral de potência
 D_C = Detector sustentado pelo sistema de suporte tipo "Três Cordas de Nylon"
 D_T = Detector sustentado pelo sistema de suporte tipo "Tripé"
 D_{TR} = Detector sustentado pelo sistema de suporte tipo "Tubo de Retenção"
CIC-1 = D_{TR} na posição 6 da placa matriz
CIC-2 = D_{TR} na posição 2 da placa matriz
AB = Acelerômetro posicionado na barra de controle do reator
APV = Acelerômetro posicionado na plataforma do reator, com orientação vertical
APH(1) = Acelerômetro posicionado na plataforma do reator, com orientação horizontal e sentido perpendicular ao movimento da plataforma
APH(//) = Acelerômetro posicionado na plataforma do reator, com orientação horizontal e sentido paralelo ao movimento da plataforma
T = Termopar.

Como as legendas das Figuras 4.12 a 4.60 foram registradas automaticamente, sua nomenclatura é explicada a seguir:

- 1) PSD = Densidade espectral de potência (DEP)
COH = Coerência
P = Fase

2) A frequência indicada acima do gráfico, com os respectivos valores da função analisada, corresponde à linha vertical demarcada no gráfico.

Condições de Análise

Frequência de corte = 12,5 Hz
Tamanho de bloco = 1024
Número de blocos analisados = 50 .

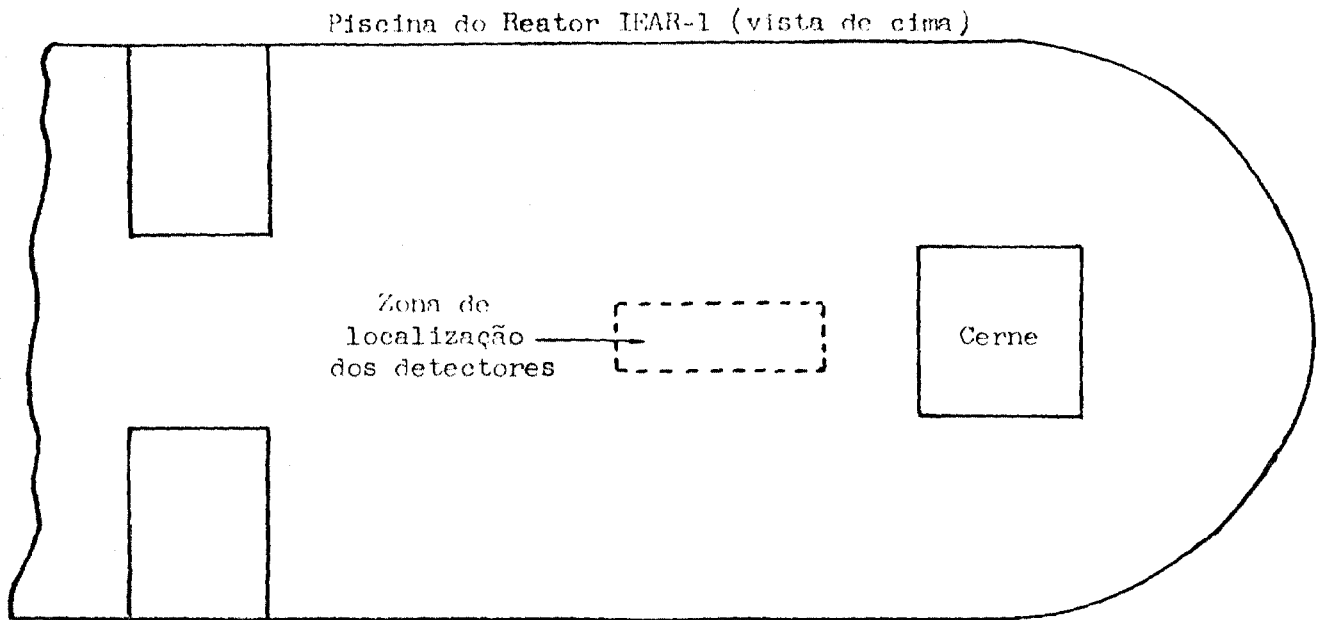


FIGURA 4.1- Localização dos Detectores (D_C e D_T) na Piscina do Reator IEAR-1.

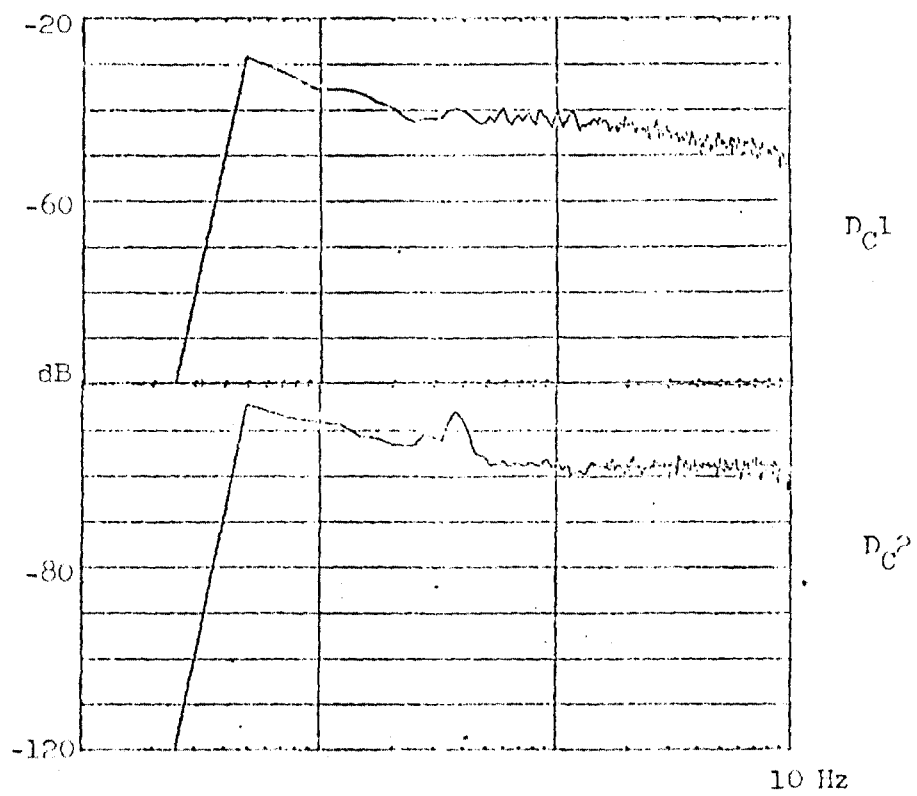


FIGURA 4.2- DEP do Ruído Neutrônico do IEAR-1, Observado com D_{C1} e D_{C2} . Trecho 2 da Gravação.

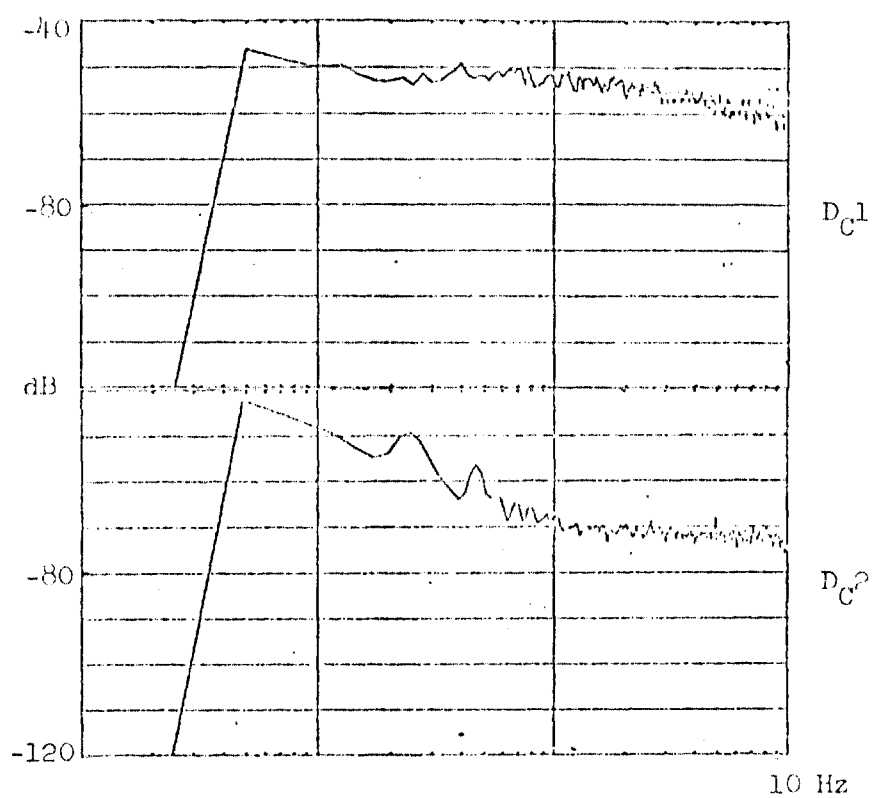


FIGURA 4.3- DEP do Ruído Neutrônico do IEAR-1, observado com D_{C1} e D_{C2} . Trecho 5 da Gravação.

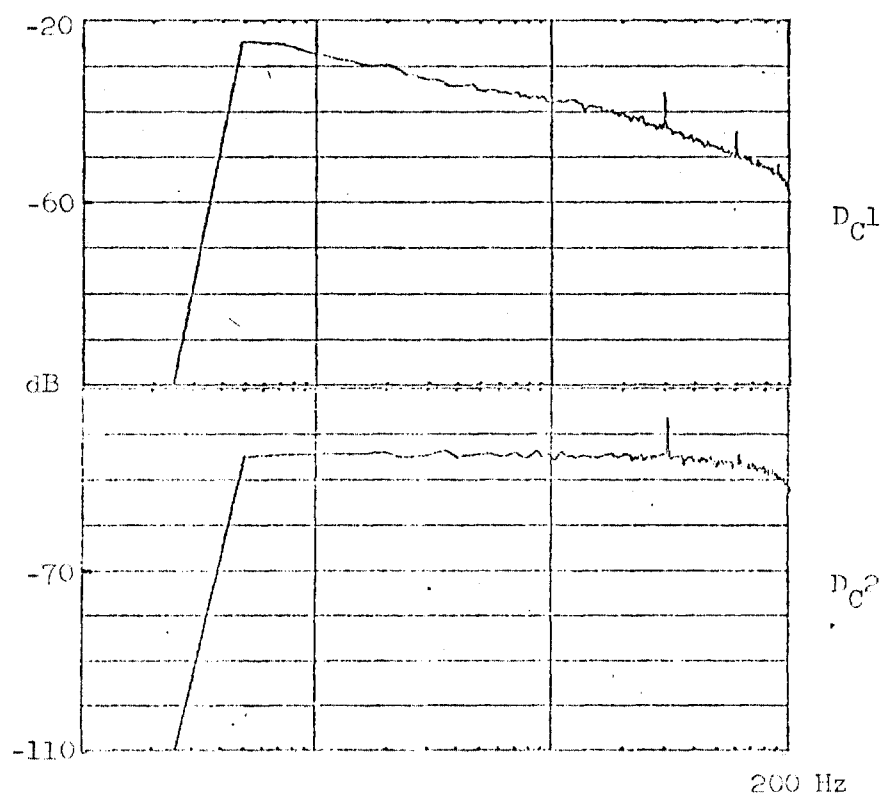


FIGURA 4.4- DEP do Ruído Neutrônico do IEAR-1, observado com D_{C1} e D_{C2} . Trecho 7 da gravação.

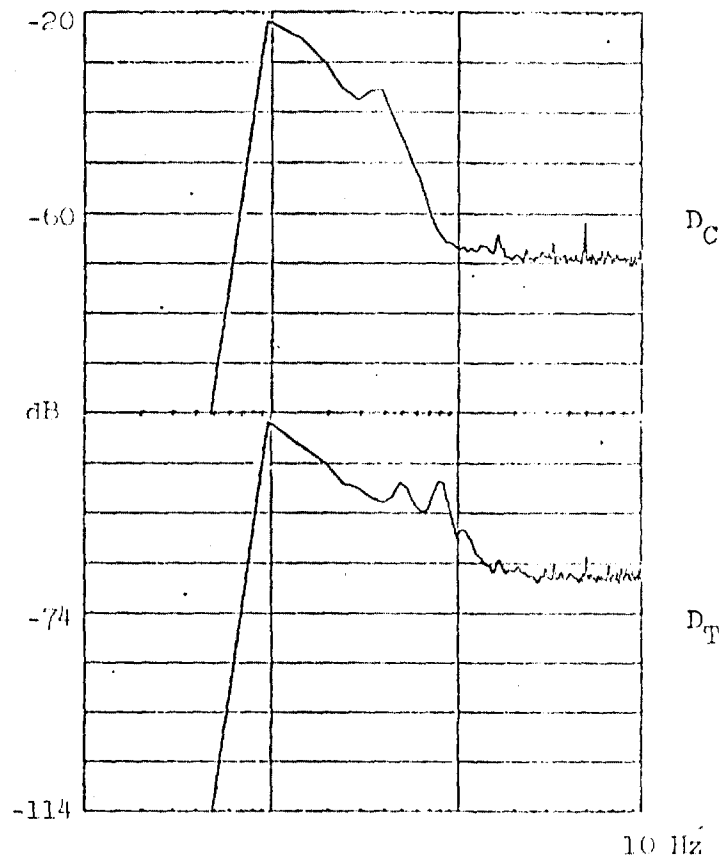


FIGURA 4.5- DEP (D_C/D_T) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

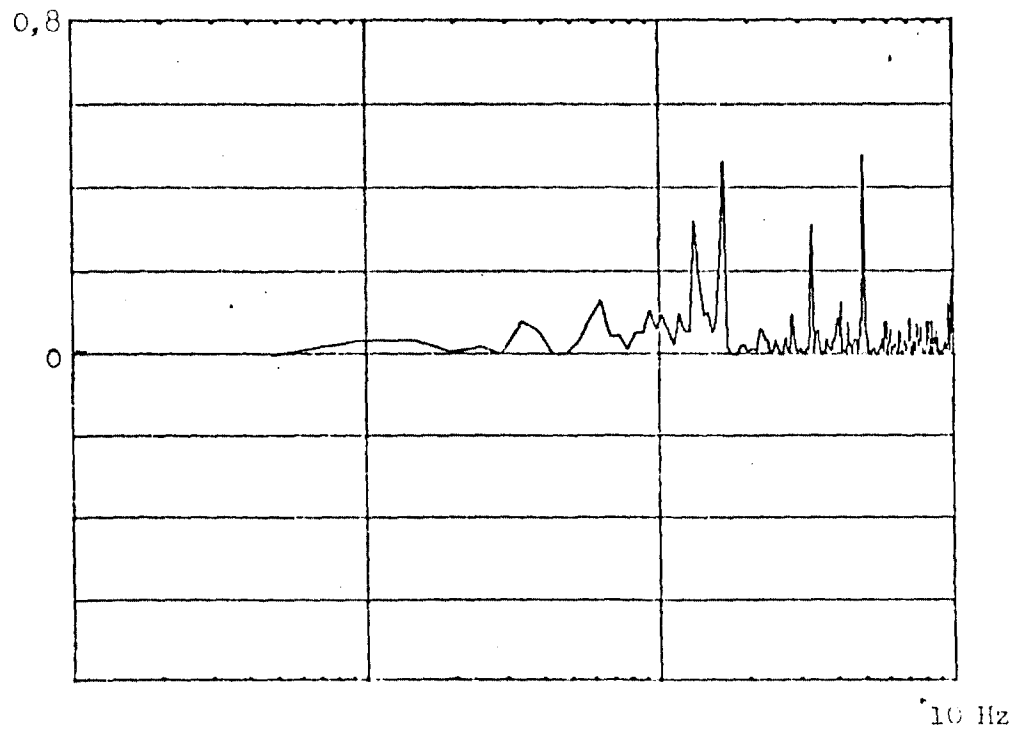


FIGURA 4.6- Coerência (D_C/D_T) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

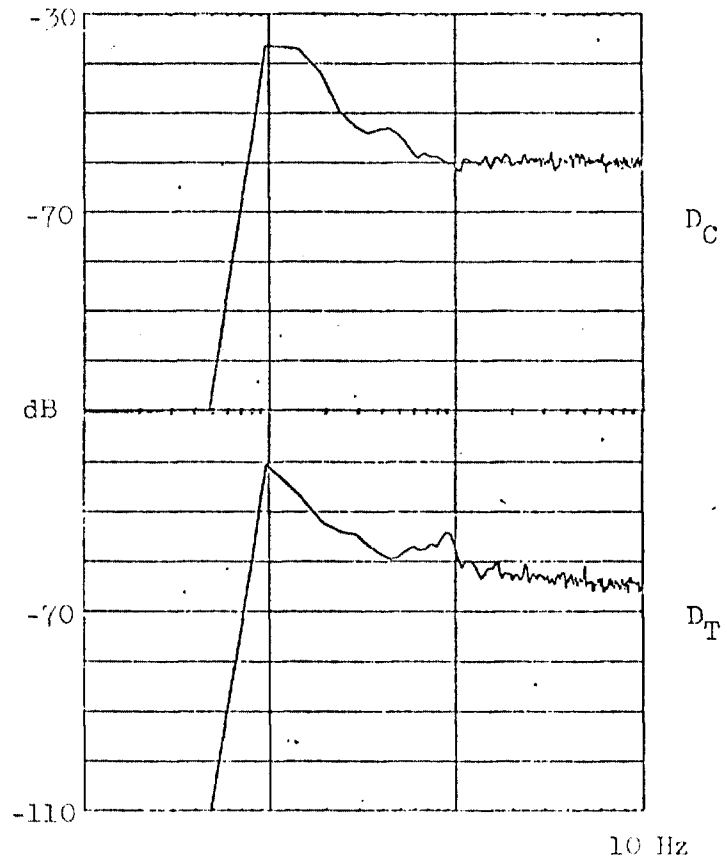


FIGURA 4.7- DEP (D_C/D_T) - Reator 1 kW/Automático/Bomba Ligada.

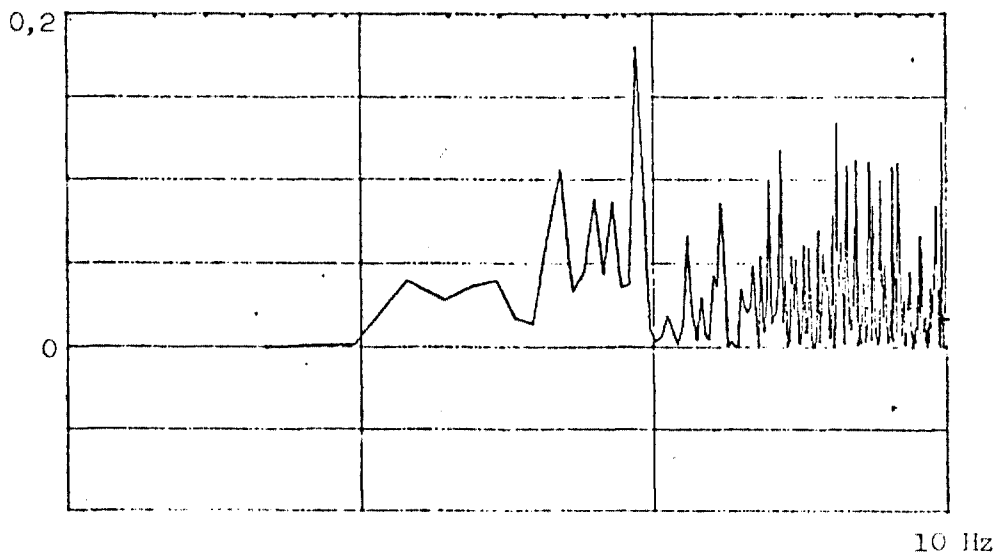


FIGURA 4.8- Coerência (D_C/D_T) - Reator 1 kW/ Automático/bomba Ligada.

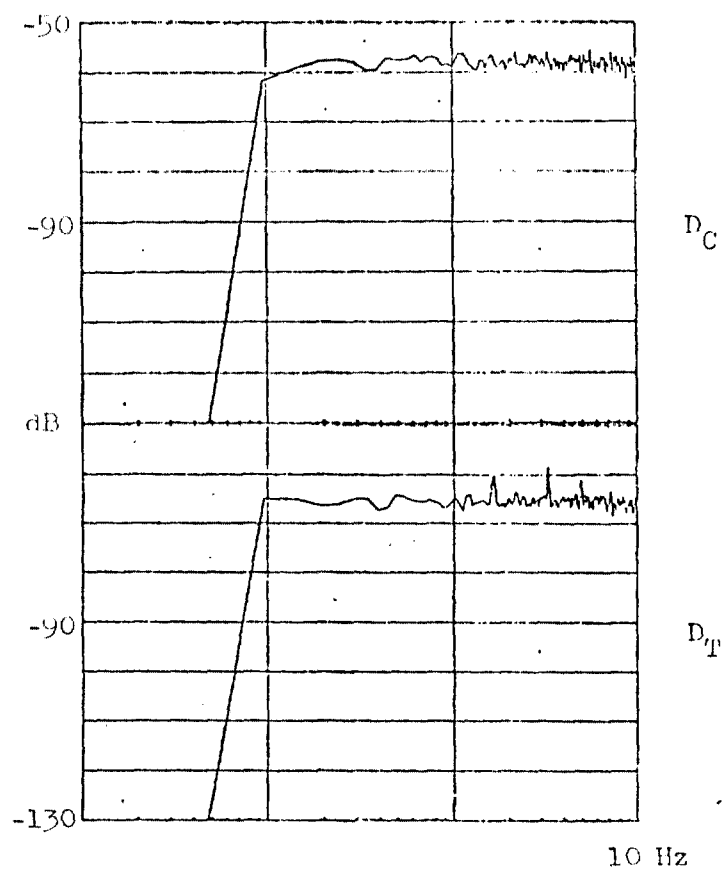


FIGURA 4.9- DEP (D_C/D_T) - Reator desligado/Bomba Desligada

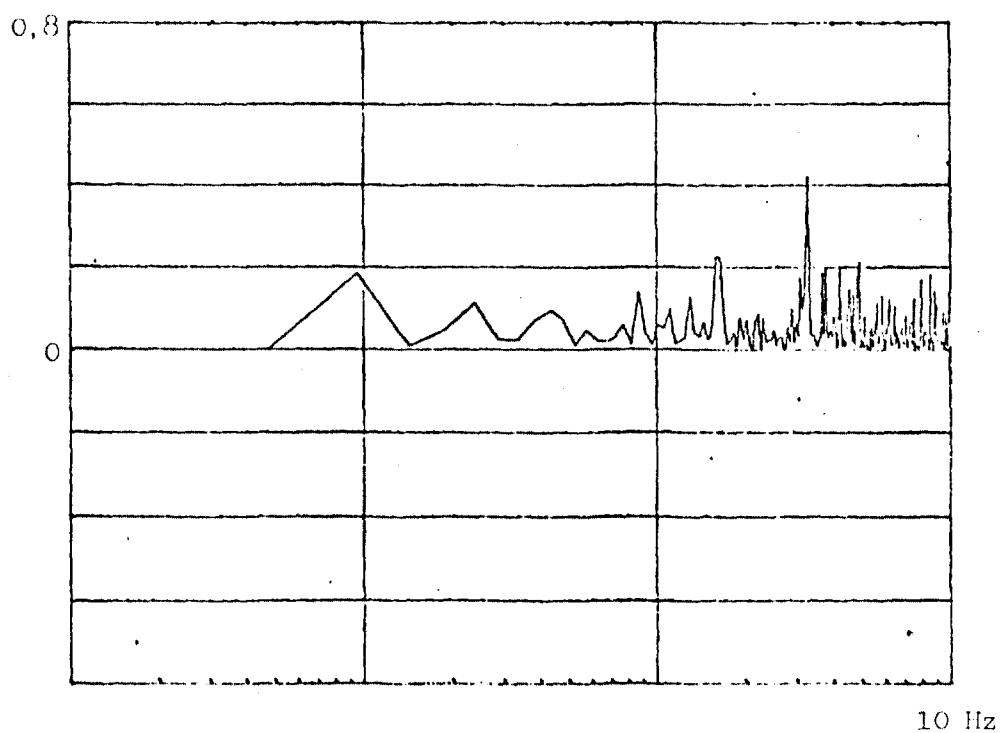


FIGURA 4.10- Coerência (D_C/D_T) - Reator Desligado/Bomba Desligada.

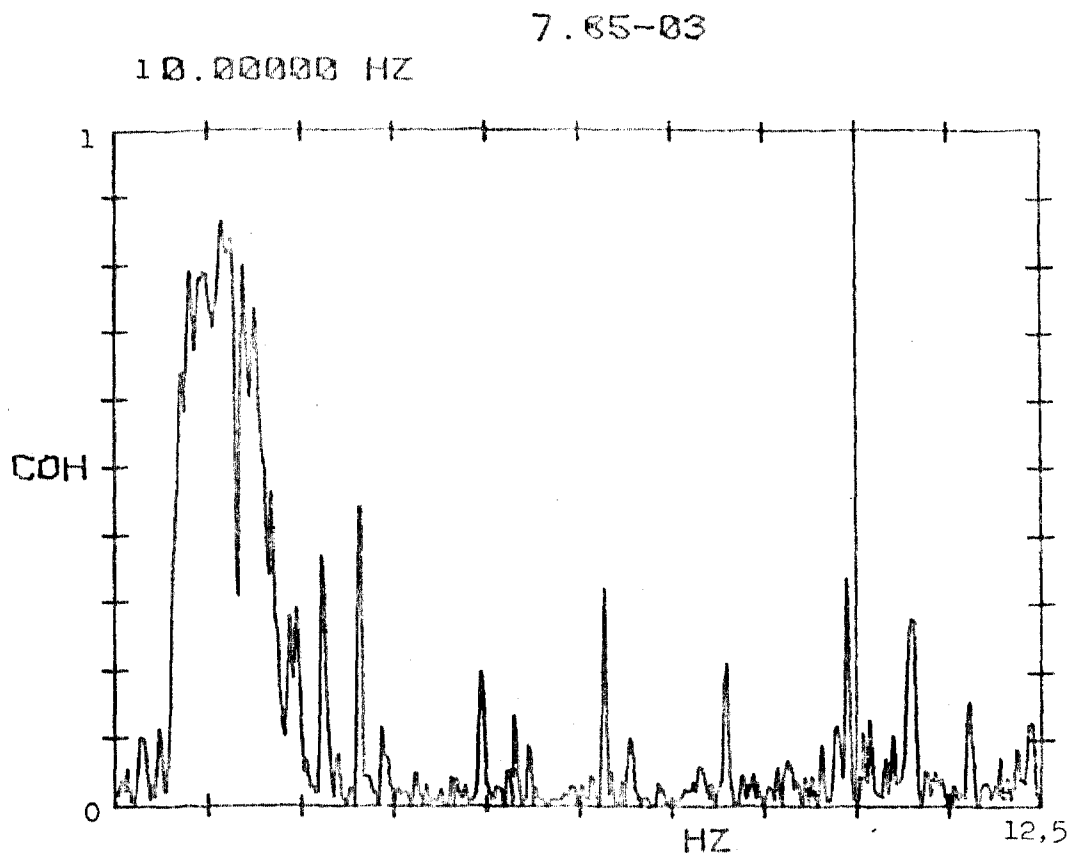


FIGURA 4.13- Coerência (D_C/D_{TR}) 12,5 Hz - Reator 2 MW/ Automático/Bomba Ligada.

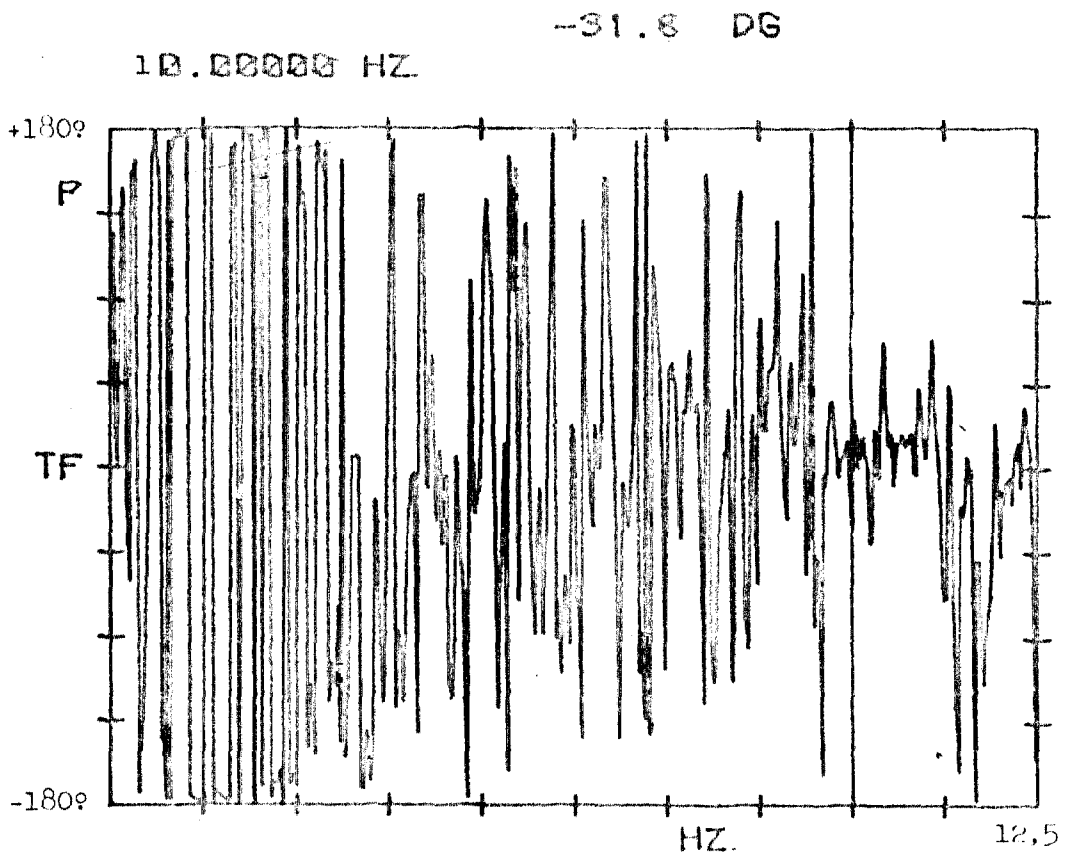


FIGURA 4.14- Fase (D_C/D_{TR}) 12,5 Hz - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

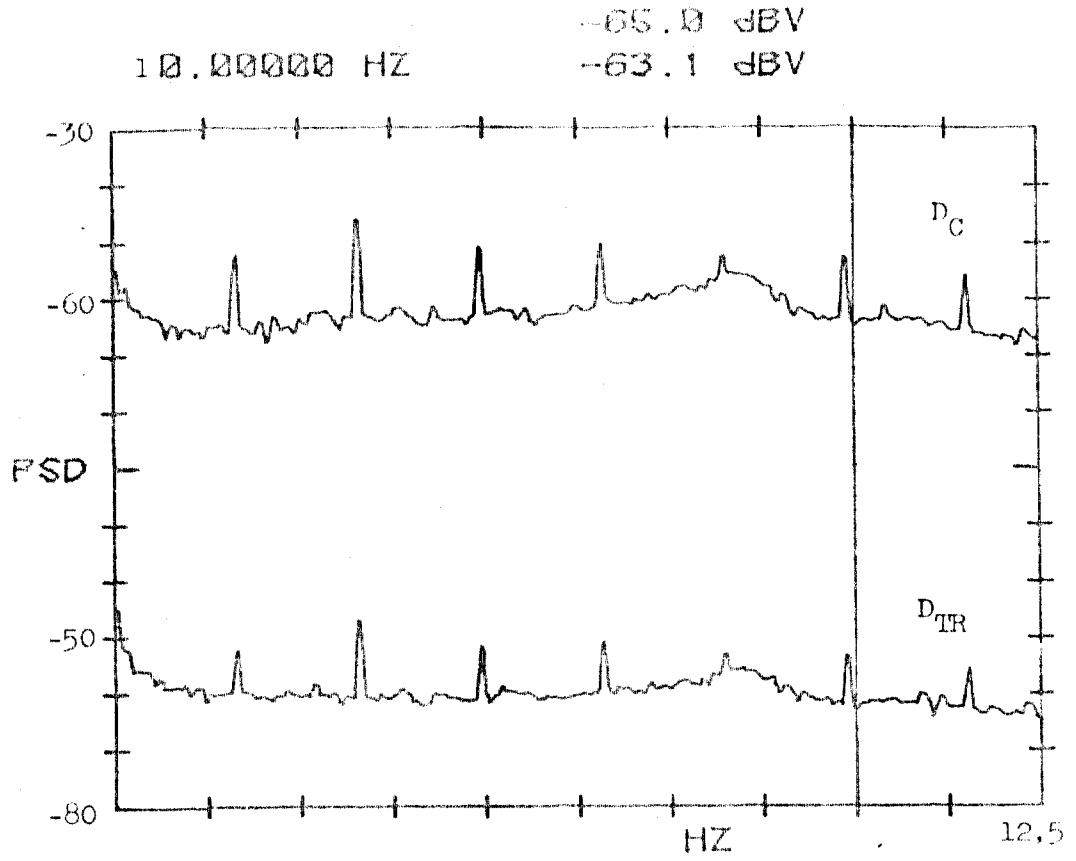


FIGURA 4.17- DEP (D_C/D_{TR}) - Reator Desligado/Bomba Desligada

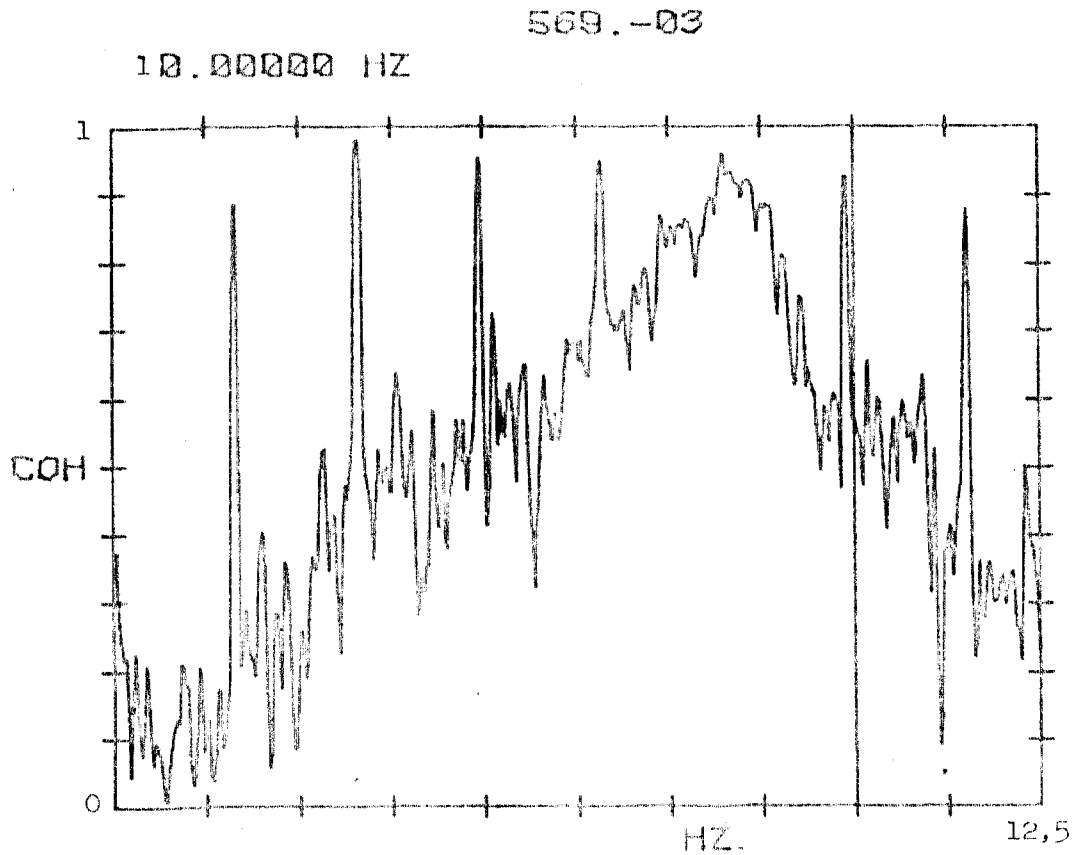


FIGURA 4.18- Coerência (D_C/D_{TR}) - Reator Desligado/Bomba Desligada.

7.1 DG

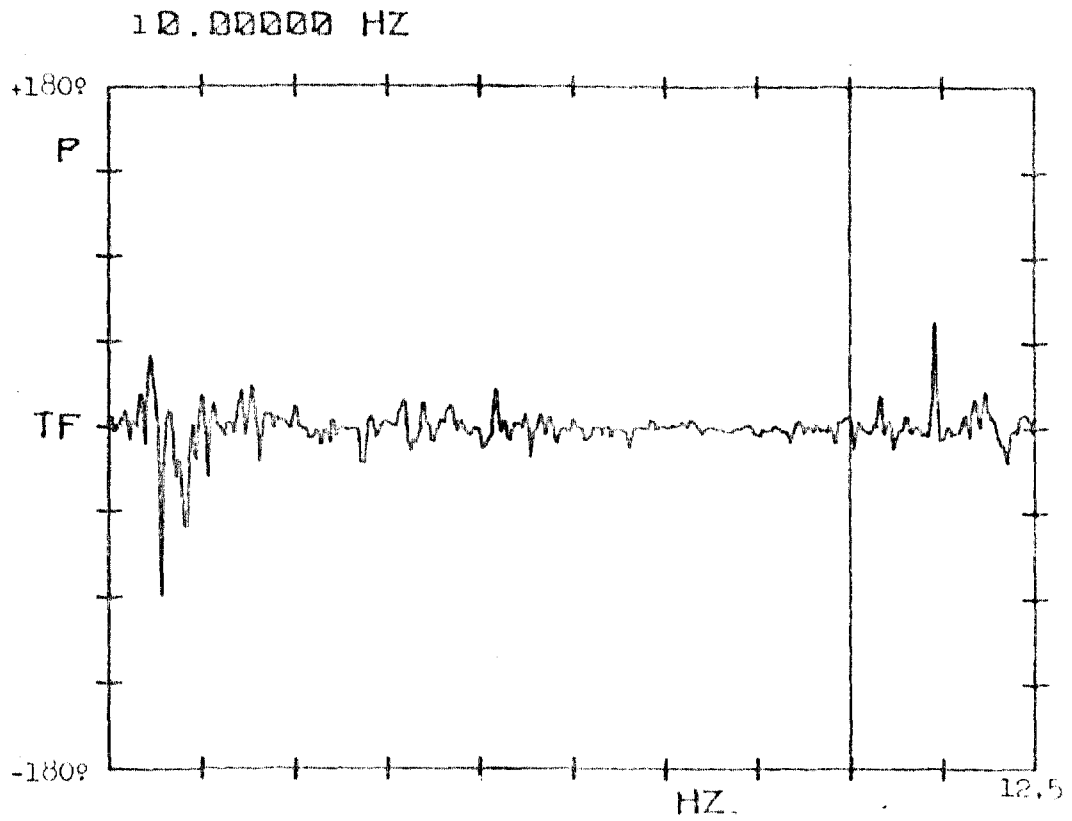


FIGURA 4.19- Fase (D_C/D_{TR}) - Reator Desligado/Bomba Desligada

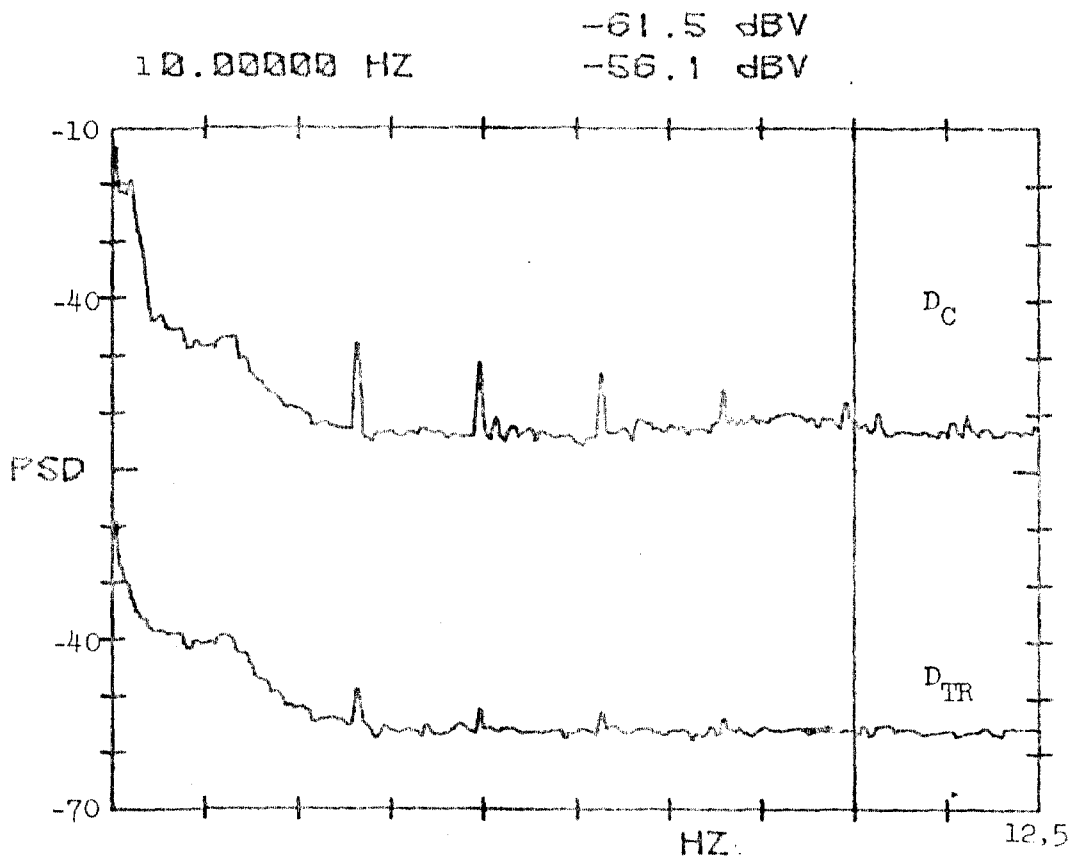


FIGURA 4.20- DEP (D_C - Normal- sem compensação/ D_{TR} - modificado / Compensação Desconectada) - Reator 2 MW/Au_{tomático}/Bomba Ligada.

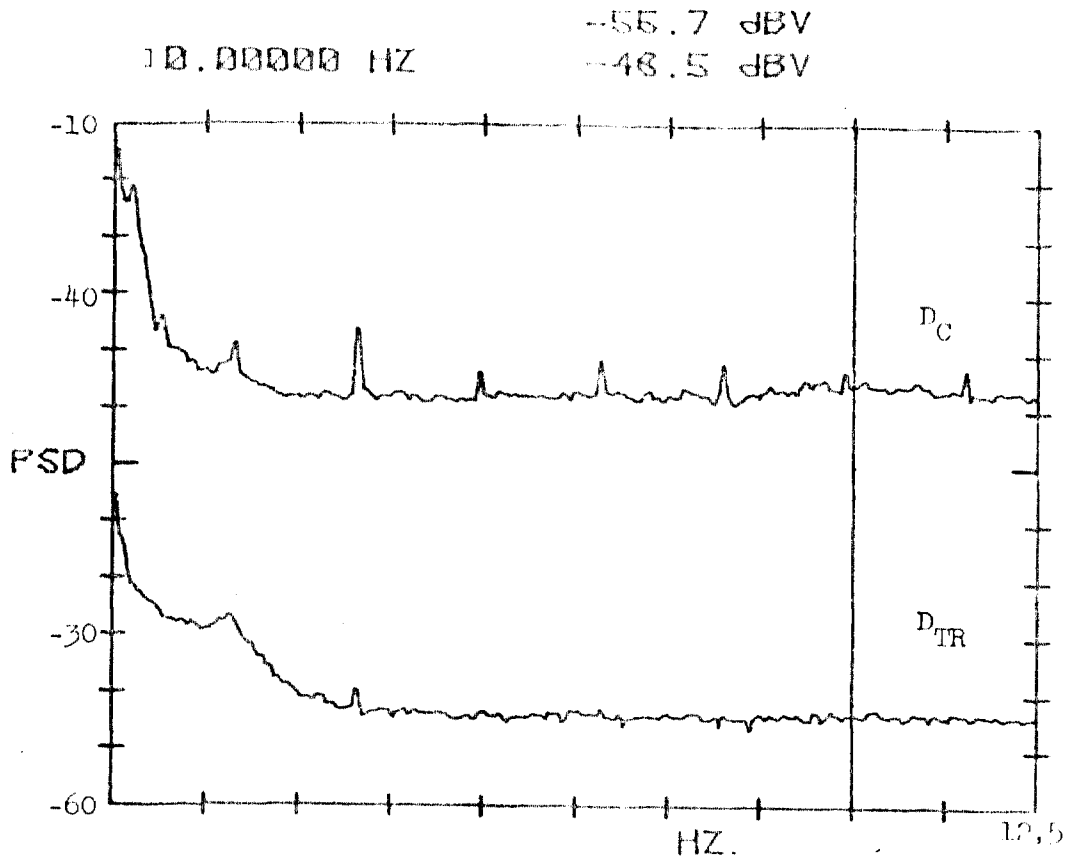


FIGURA 4.21- DEP (D_C - Normal - com Compensação/ D_{TR} - Modificada - compensação conectada) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

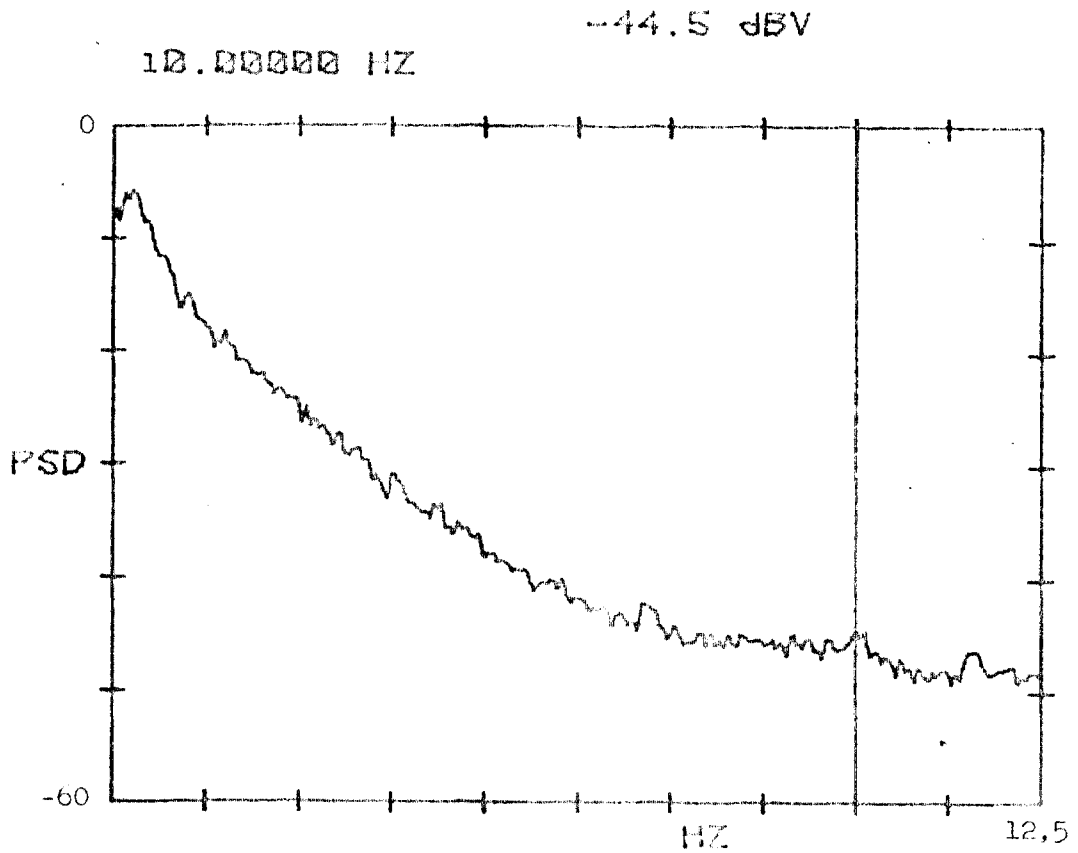


FIGURA 4.22- DEP (D_{TR} - Modificado/compensação conectada/Fluke) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

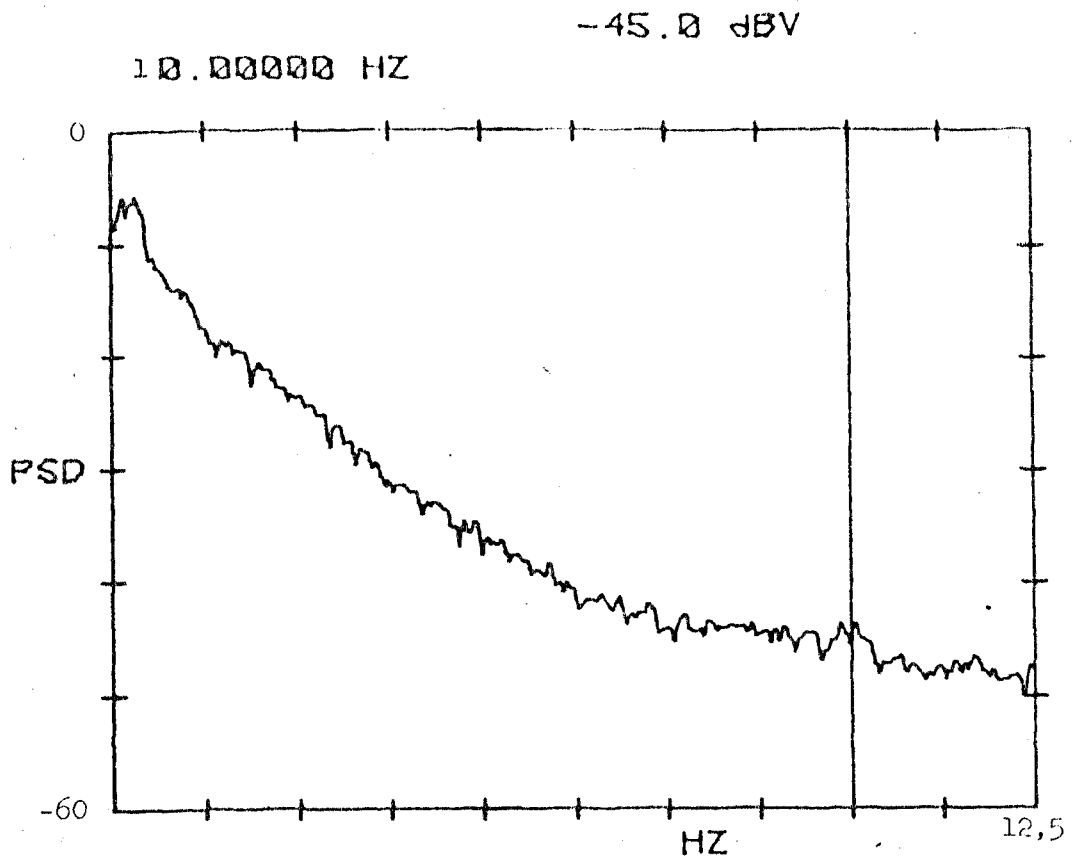


FIGURA 4.23- DEP (D_{TR} - modificada/compensação conectada / Bateria) - Reator 2 MW /Automático/Bomba Ligada.

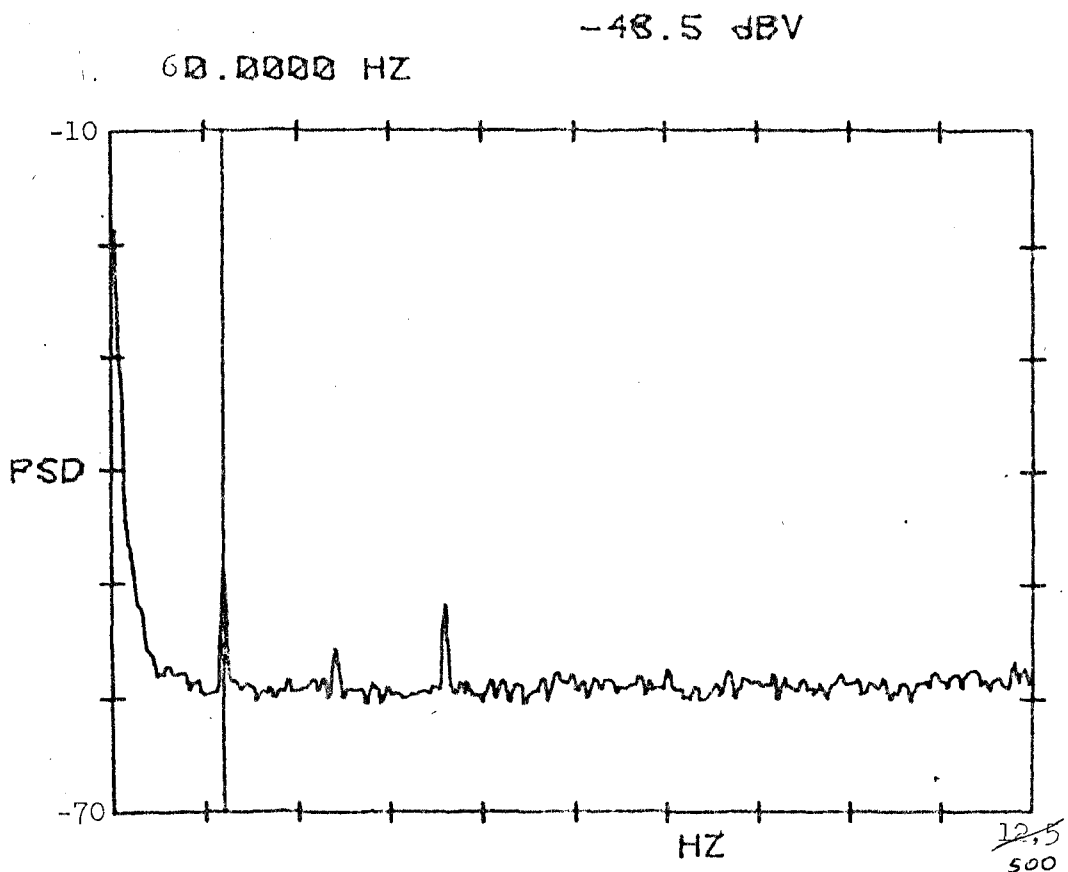


FIGURA 4.24- DEP (D_{TR} - modificado/compensação conectada / Fluke) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

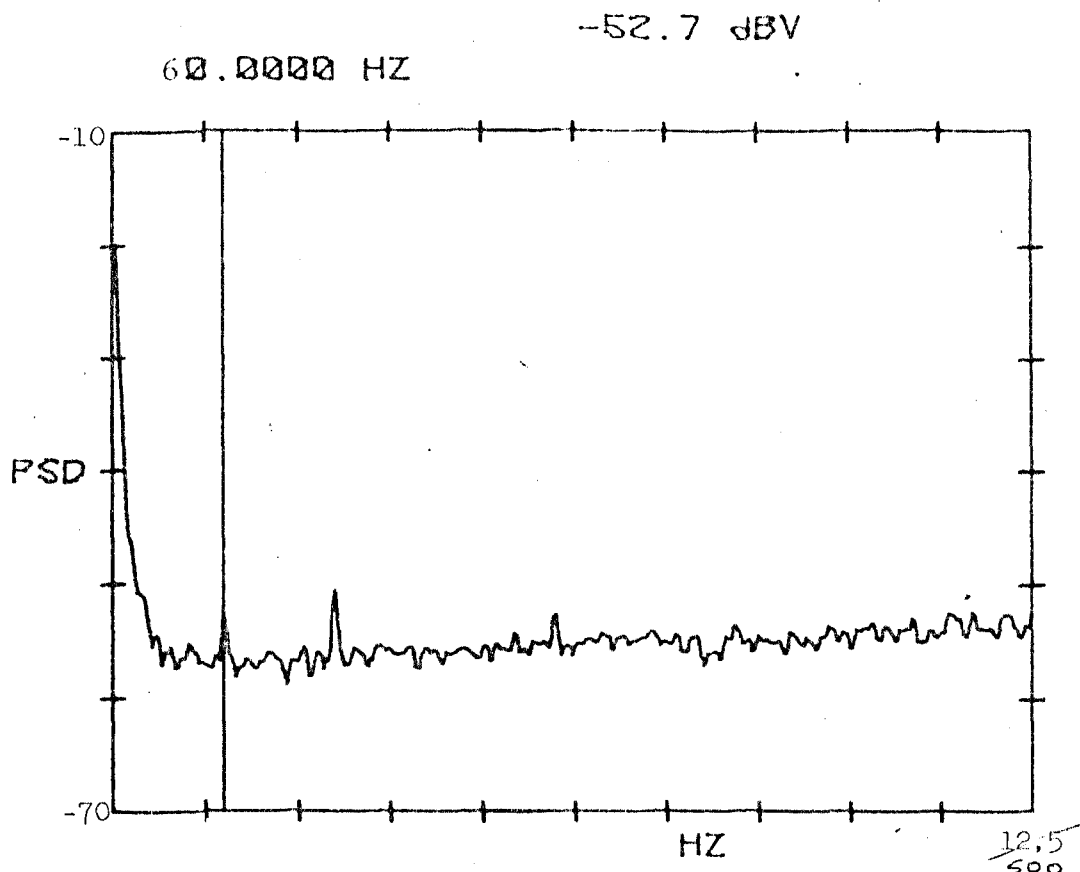


FIGURA 4.25- DEP (D_{TR} - modificado/compensação conectada/Bateria) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

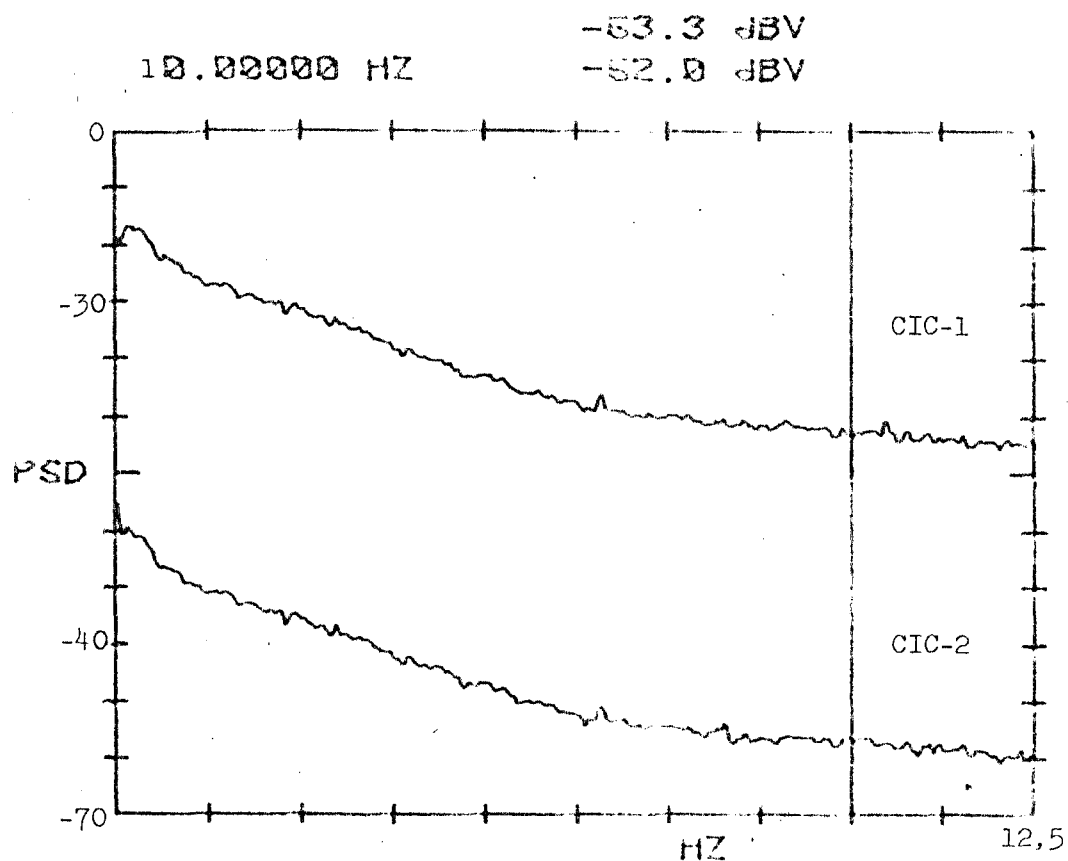


FIGURA 4.26- DEP (CIC-1 /CIC-2)- Reator 2 MW/Automático / Bomba Ligada.

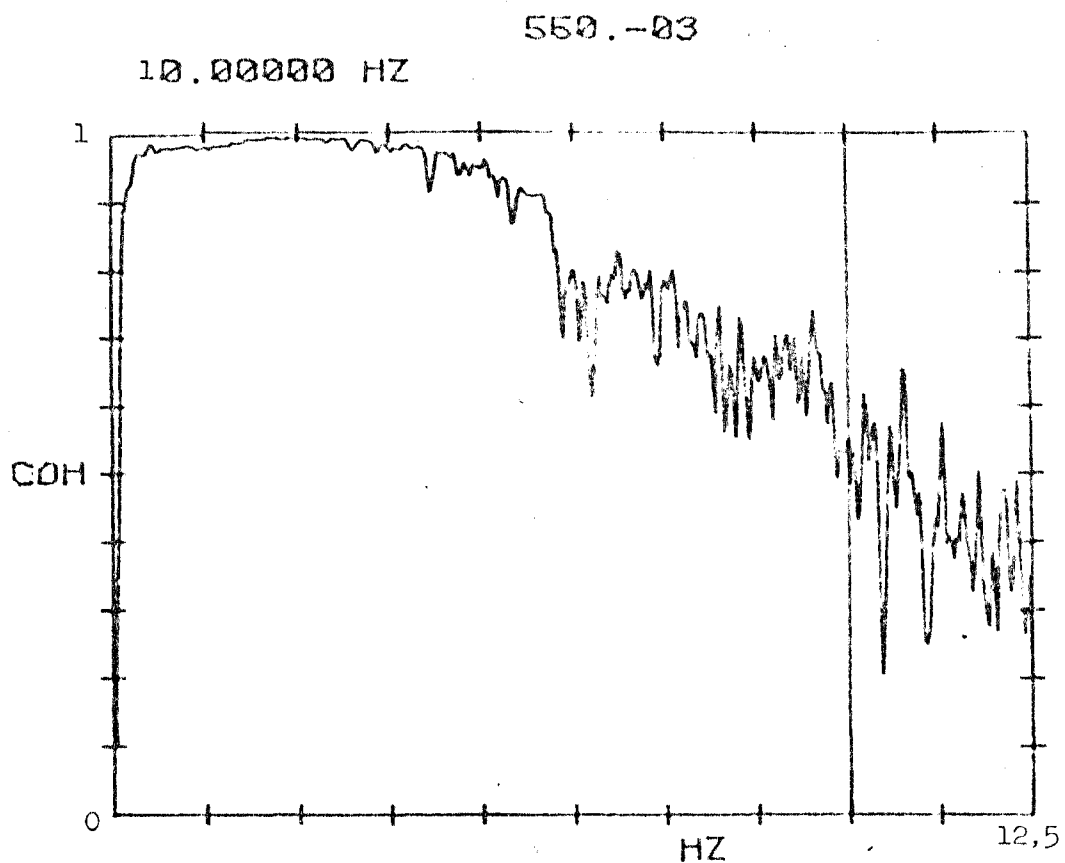


FIGURA 4.27- Coerência (CIC-1/CIC-2)- Reator 2 MW/Automático/
Bomba Ligada.

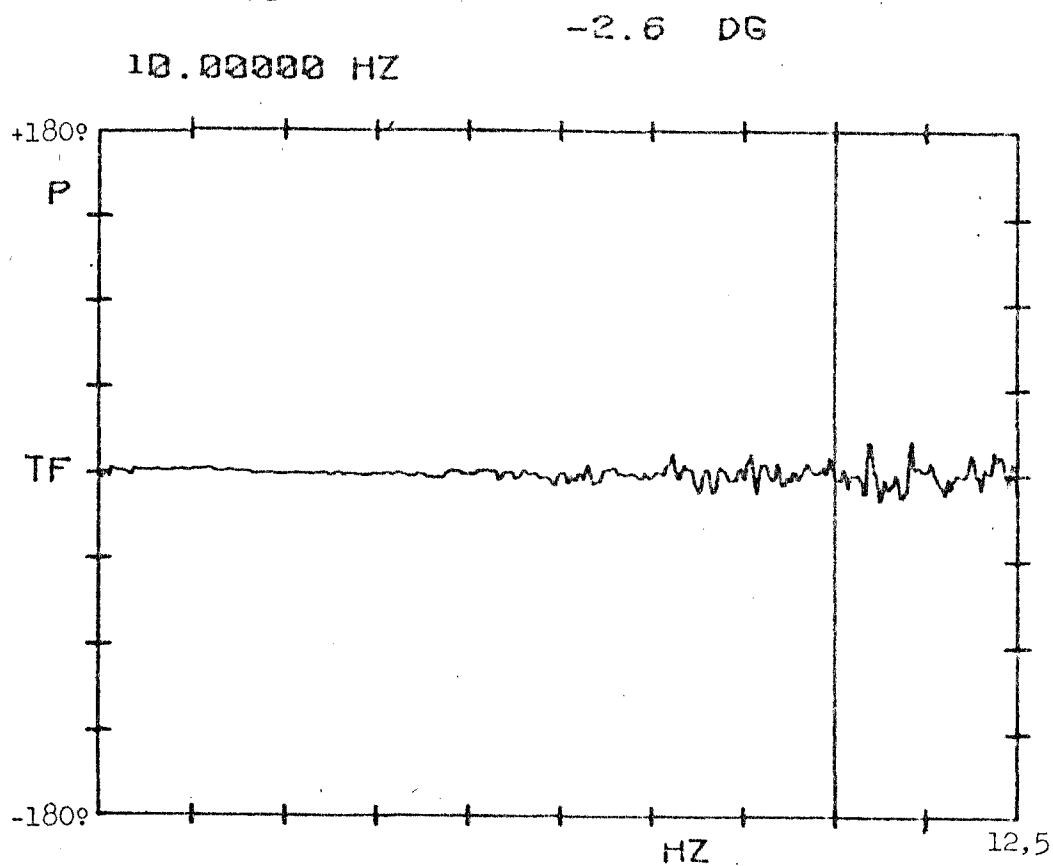


FIGURA 4.28- Fase (CIC-1/CIC-2)- Reator 2 MW/Automático /
Bomba Ligada.

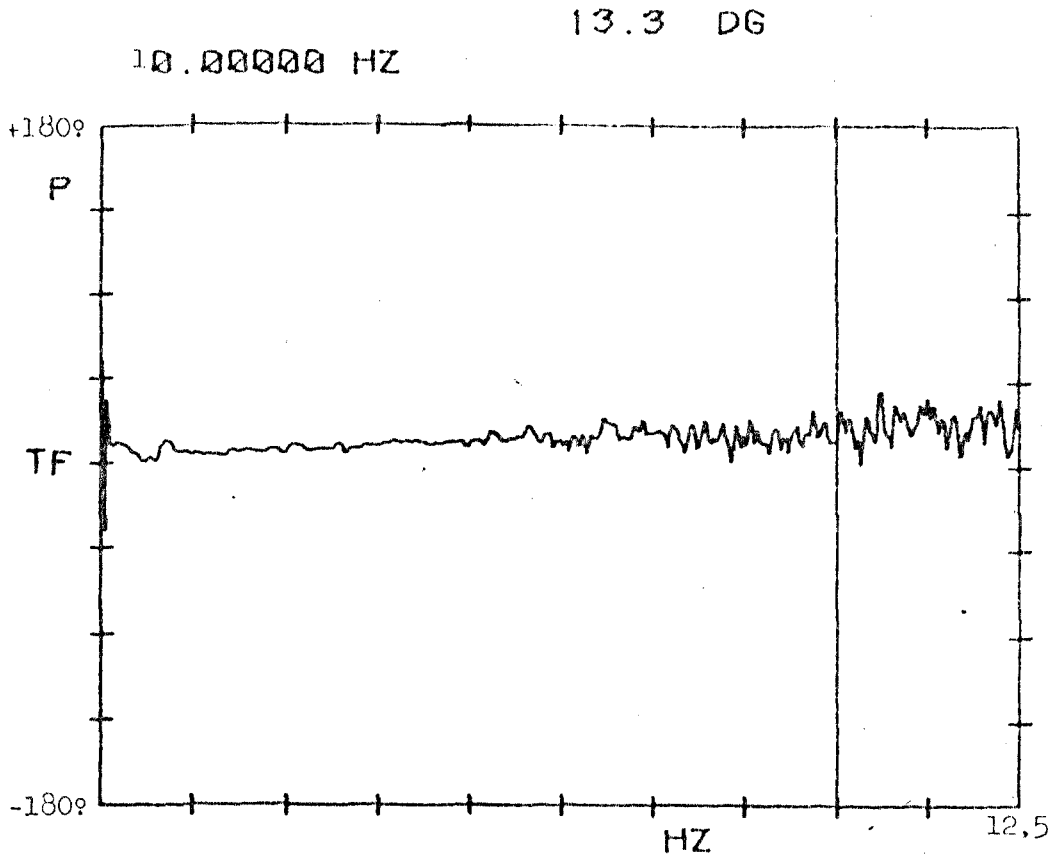


FIGURA 4.31- Fase (CIC-1/AB) 12,5 Hz - Reator 2 MW/Automático/
Bomba Ligada.

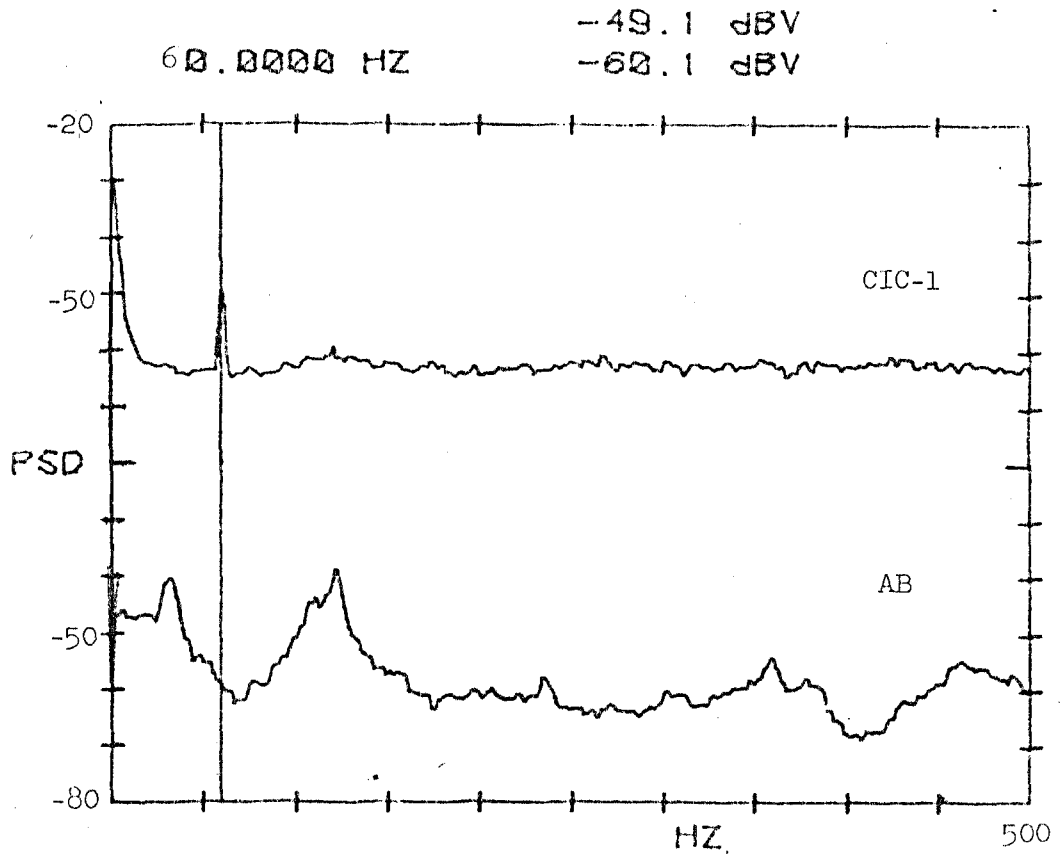


FIGURA 4.32- DFP (CIC-1/AB) 500 Hz - Reator 2 MW/Automático/
Bomba Ligada.

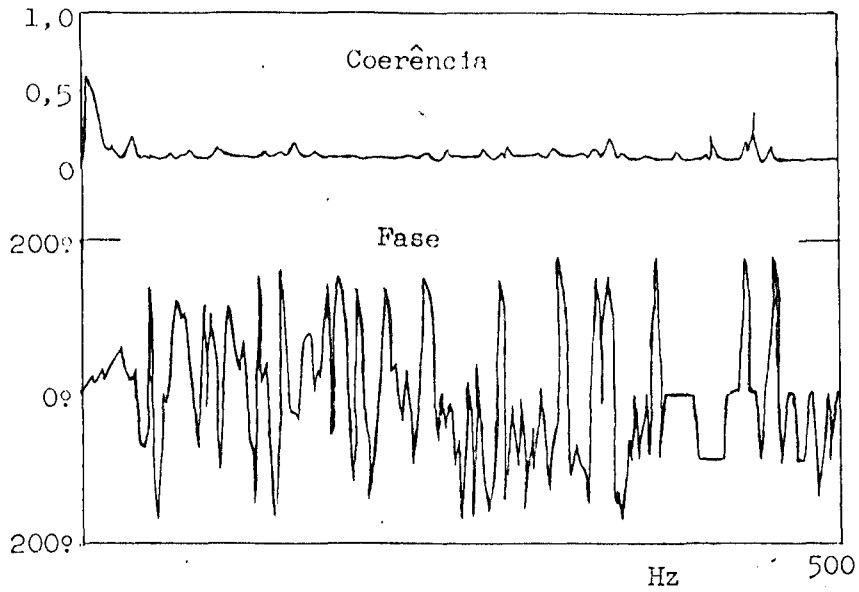


FIGURA 4.33- Coerência e Fase (CIC-1/AB) 500 Hz - Reator 2MW/ Automático/Bomba Ligada.

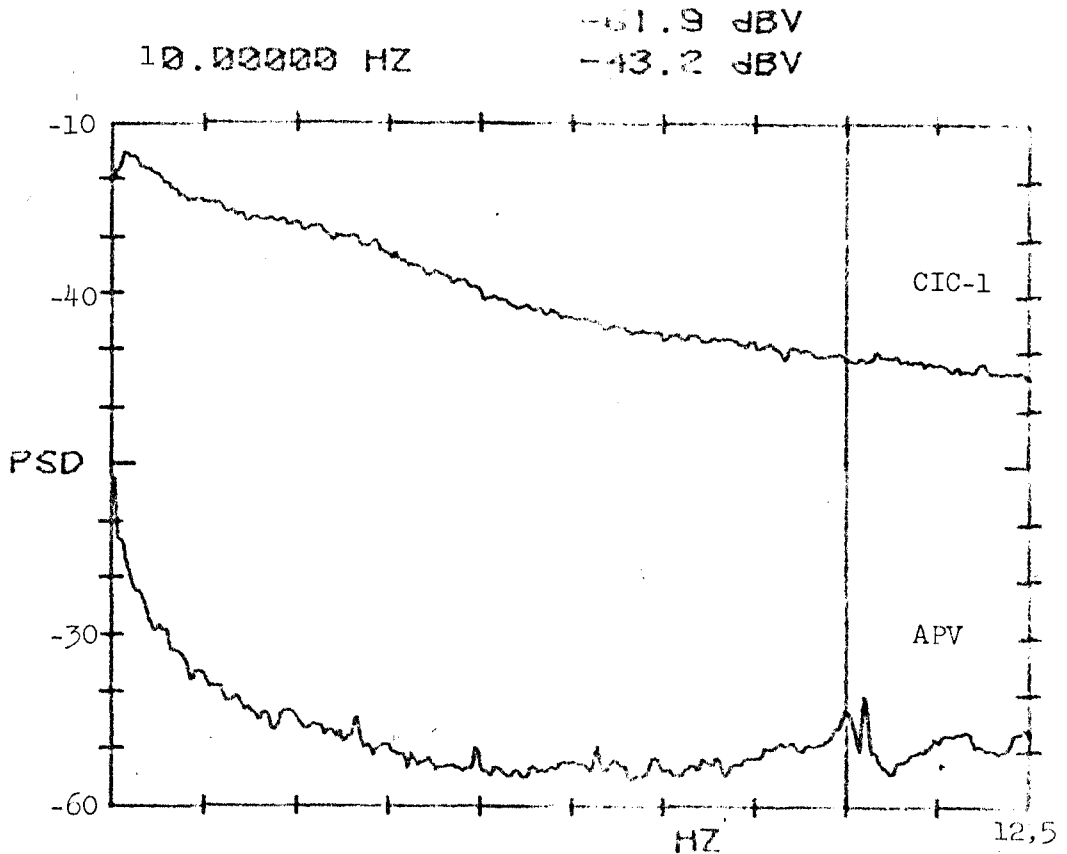


FIGURA 4.34- DEP (CIC-1/APV) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

52.8-83

10.00000 HZ

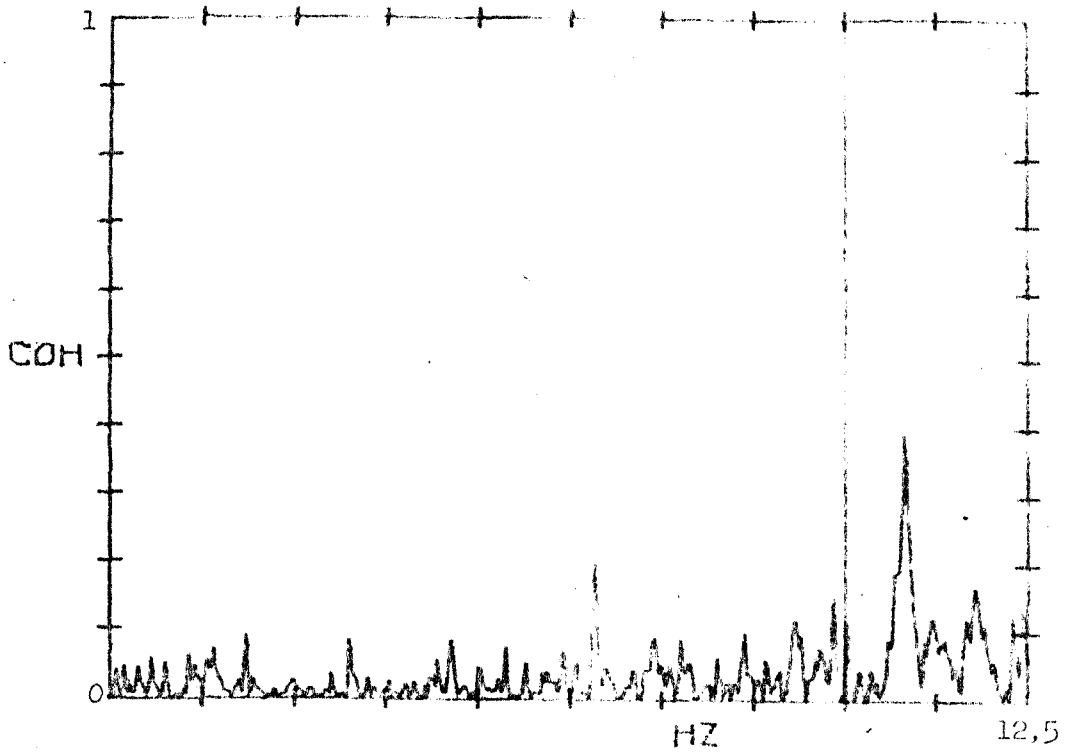


FIGURA 4.35- Coerência (CIC-1/APV) - Reator 2 MW/Automático/
Bomba Ligada.

-42.7 dBV
42.8 dBV

10.00000 HZ

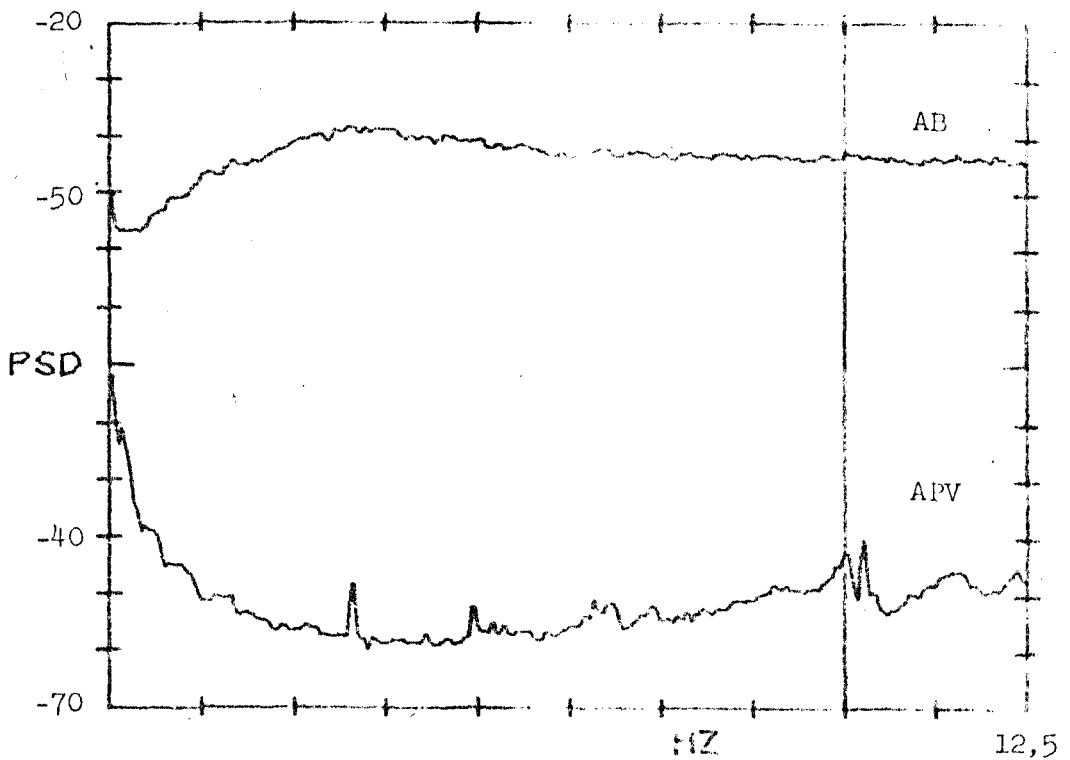


FIGURA 4.36- DEP (AB/APV) - Reator 2 MW/Automático/Bomba
Ligada.

50.4-83

10.00000 HZ

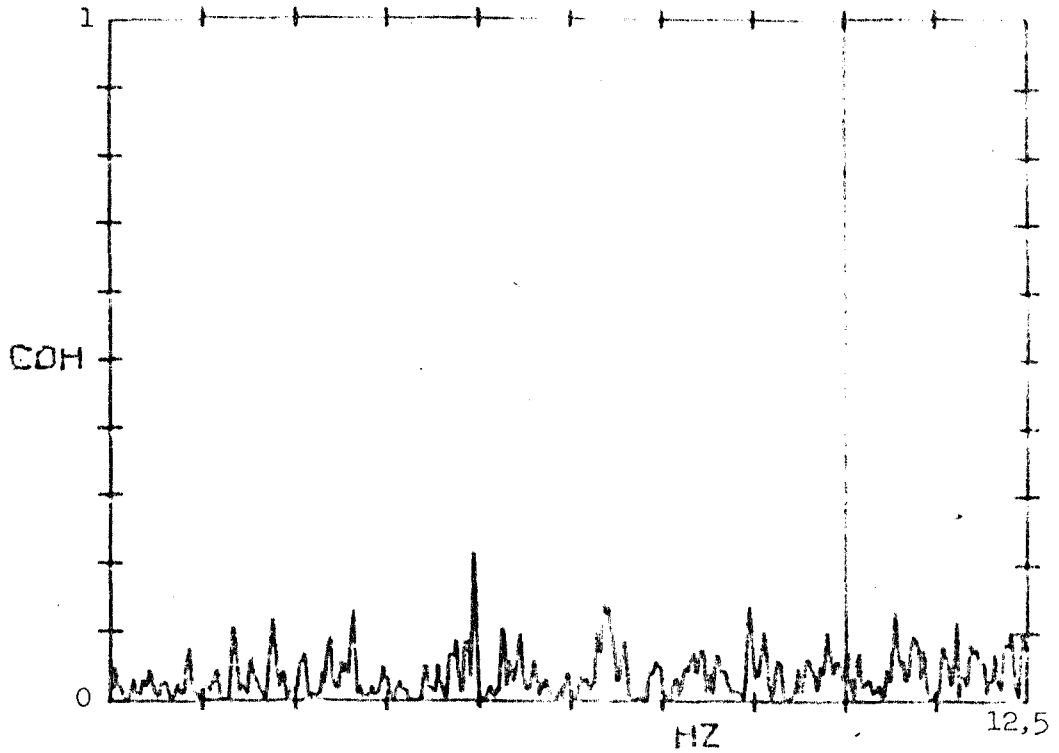


FIGURA 4.37- Coerência (AB/APV) - Reator 2MW/Automático / Bomba Ligada.

-61.5 dBV

-63.8 dBV

10.00000 HZ

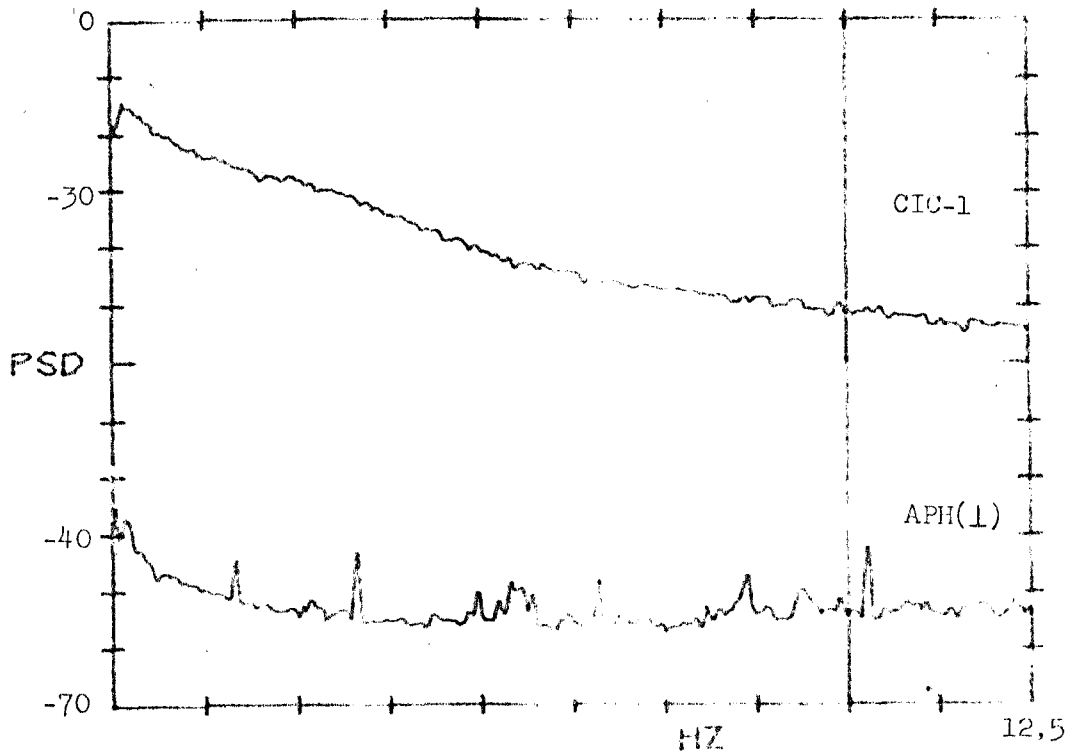


FIGURA 4.38- DFP (CIC-1/APH(L))- Reator 2 MW/Automático / Bomba Ligada.

15.8-83

10.00000 HZ

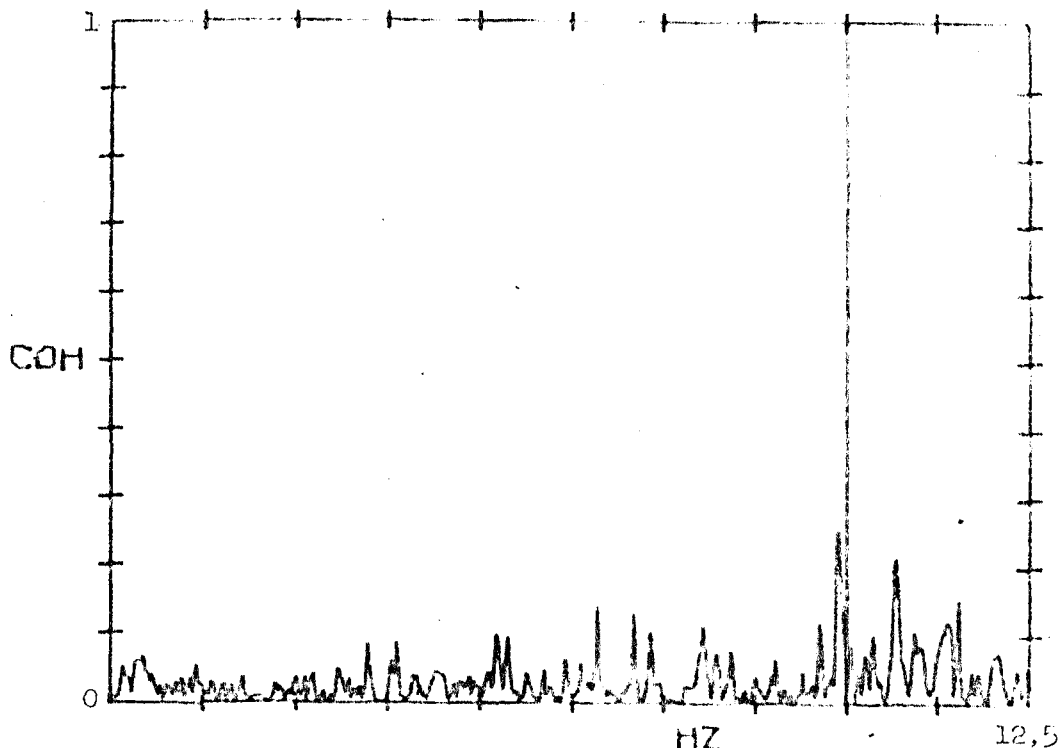


FIGURA 4.39- Coerência (CIC-1/APH(1))- Reator 2 MW/Automático /Bomba Ligada.

-51.6 dBV

10.00000 HZ

-48.9 dBV

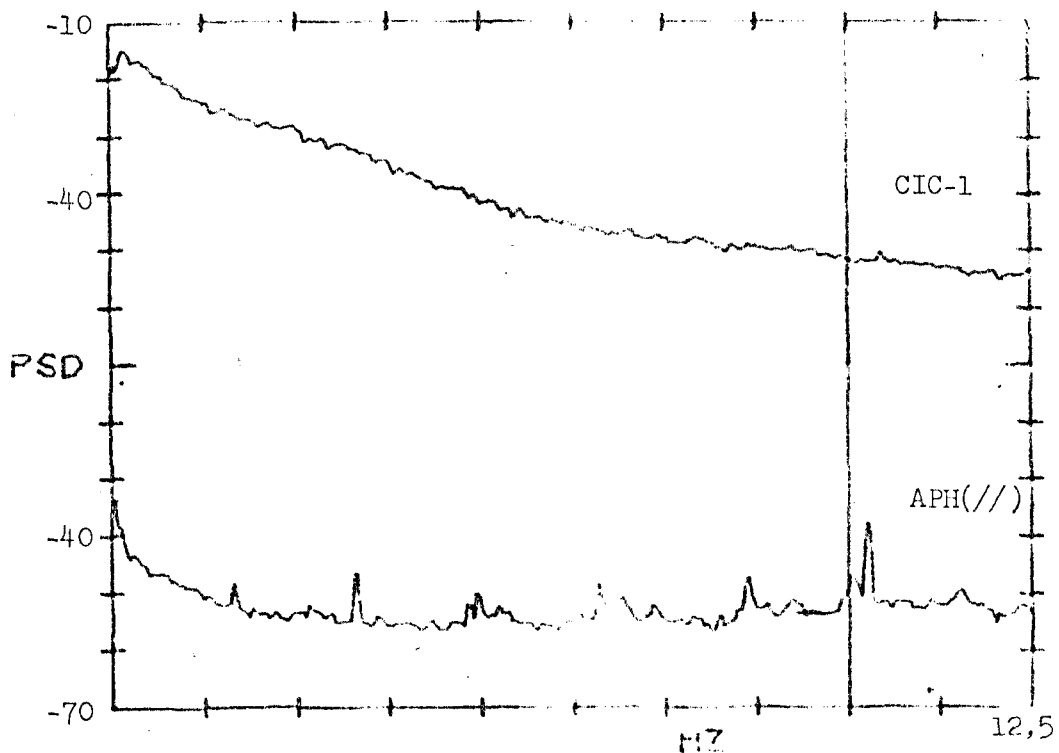


FIGURA 4.40- DEP (CIC-1 e APH(//)) - Reator 2 MW/Automático/ Bomba Ligada.

4.87-83

10.00000 HZ

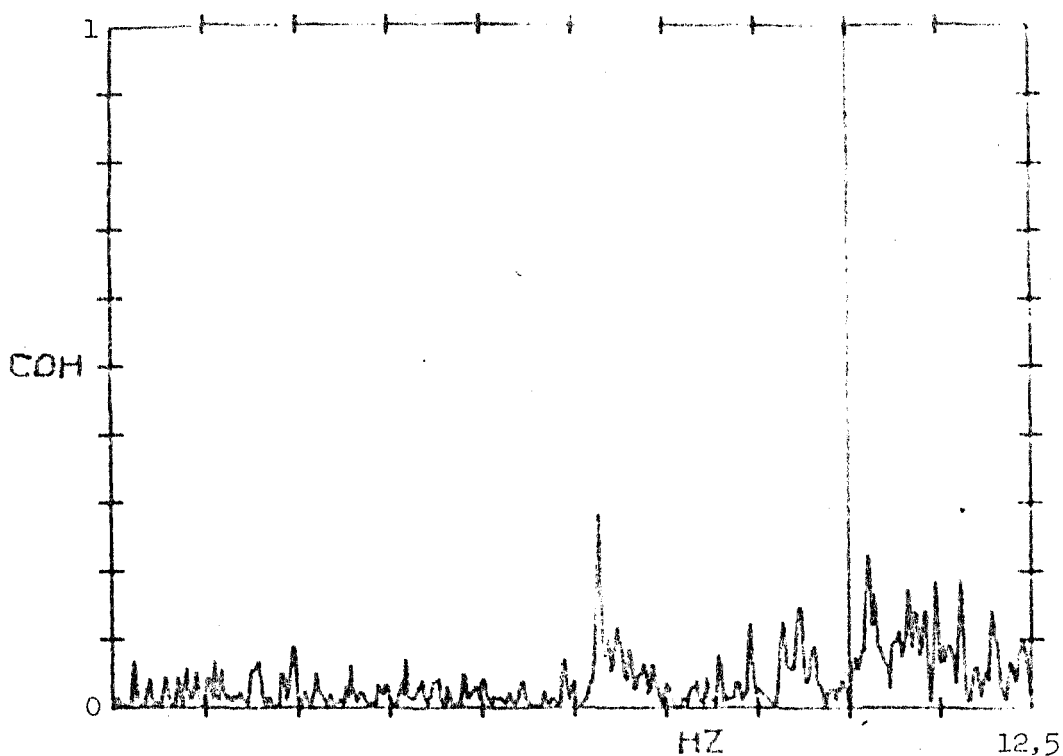


FIGURA 4.41- Coerência (CIC-1/APH(//)) - Reator 2 MW/Automático/Bomba Ligada.

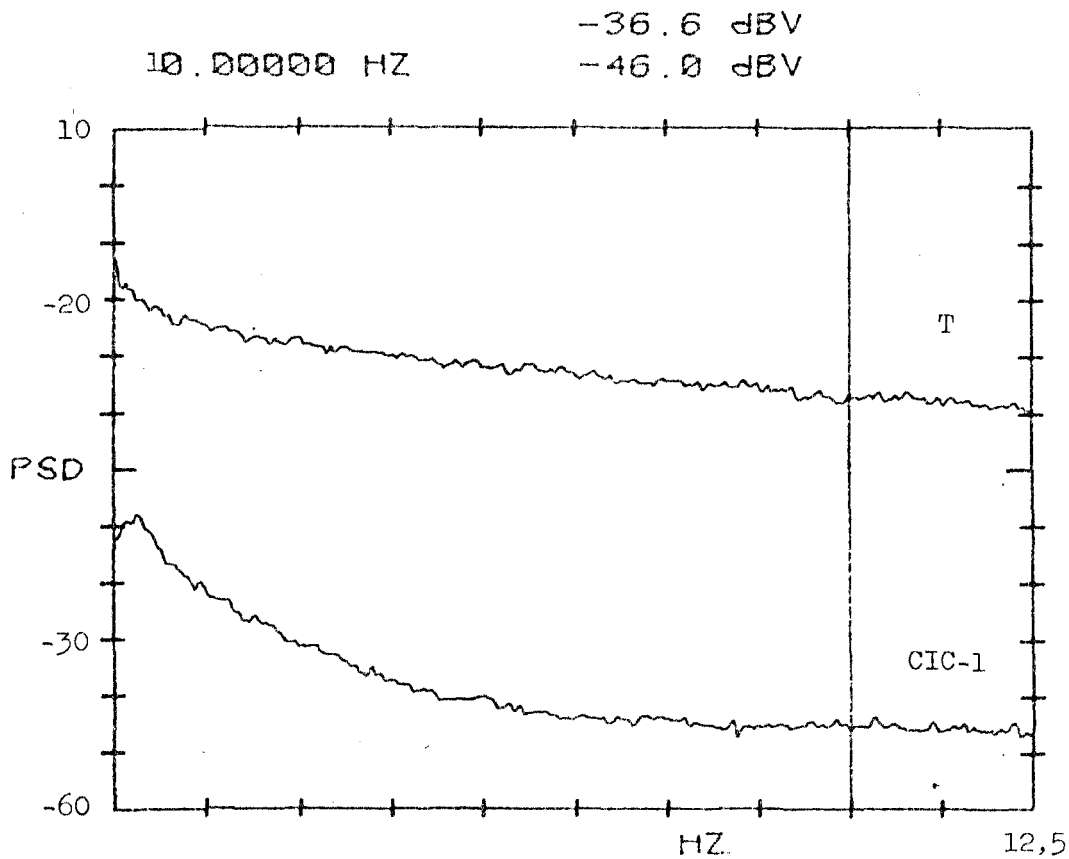


FIGURA 4.42- DEP (CIC-1/T) - Reator 2MW/Automático/Bomba Ligada.

961.-06

10.00000 HZ

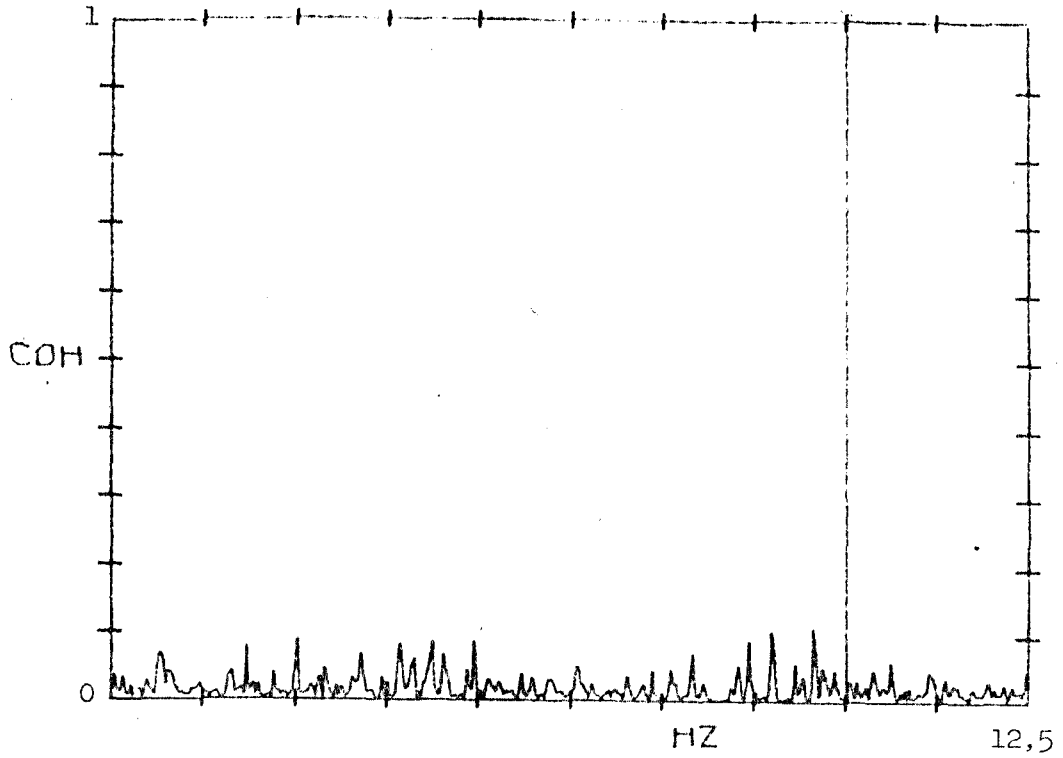


FIGURA 4.43- Coerência (CIC-1/T)- Reator 2 MW/Automático/
Bomba Ligada.

-53.4 dBV

10.00000 HZ

-53.6 dBV

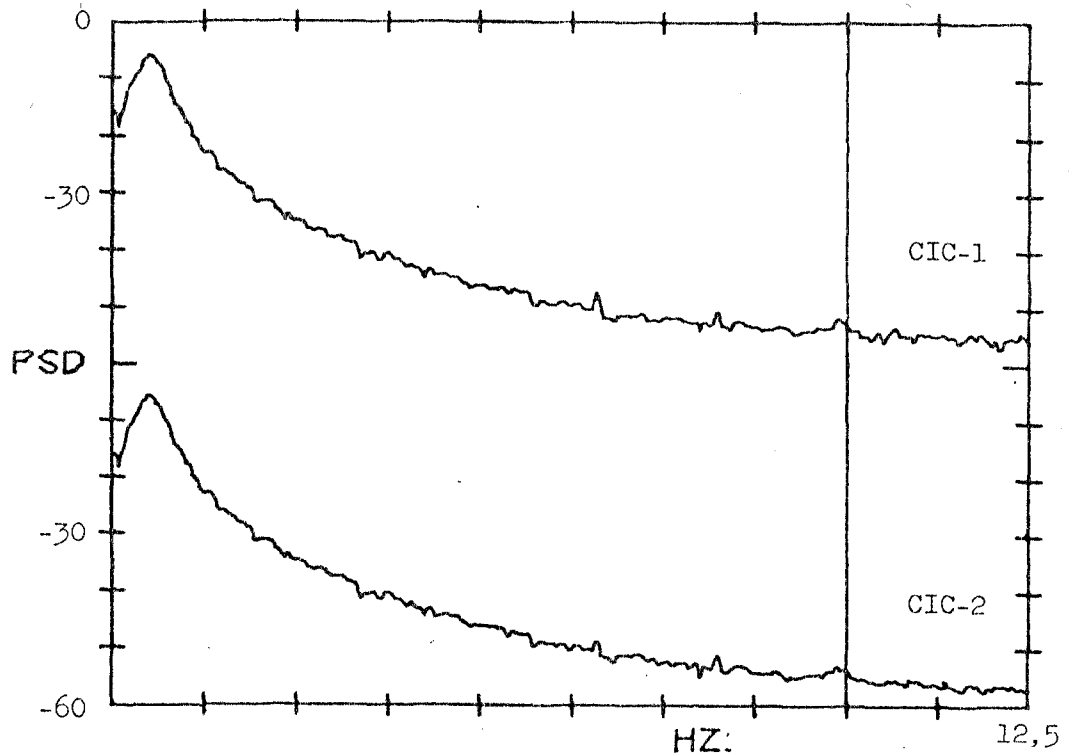


FIGURA 4.44- DEP (CIC-1/CIC-2) - Reator 20 kW/Automático/
Bomba Desligada.

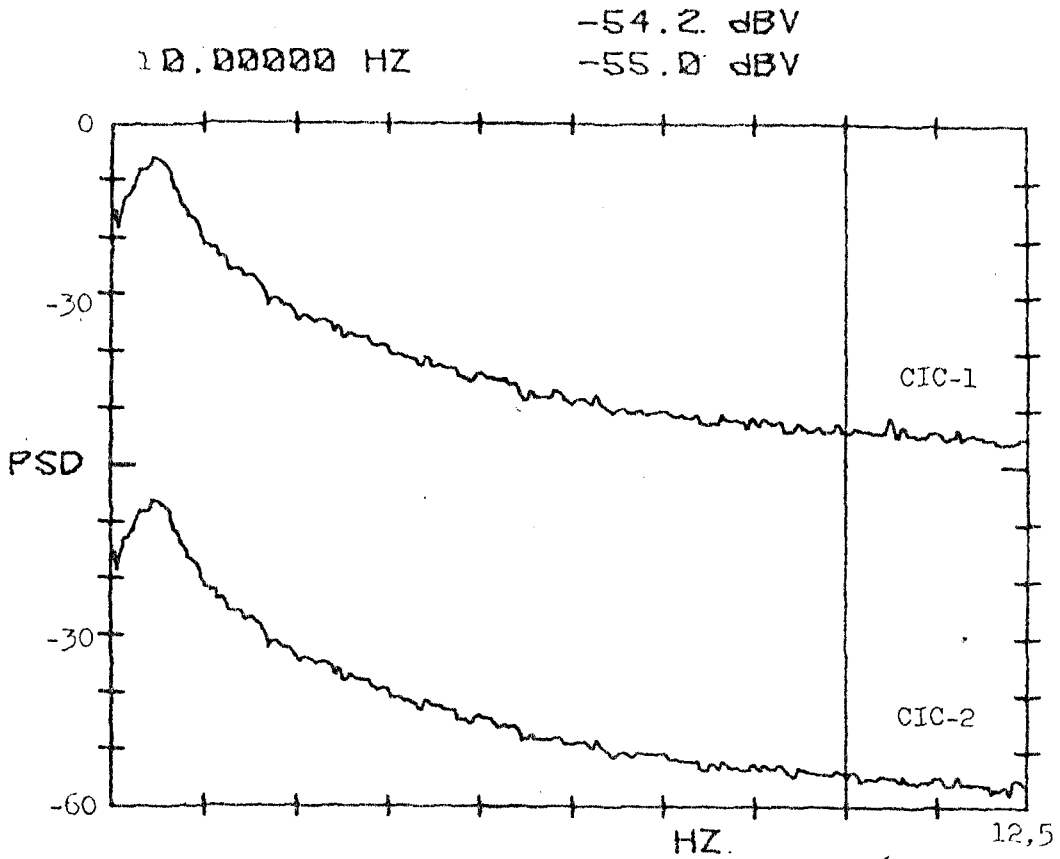


FIGURA 4.45- DEP (CIC-1/CIC-2) - Reator 20 kW/Automático/
Bomba Ligada.

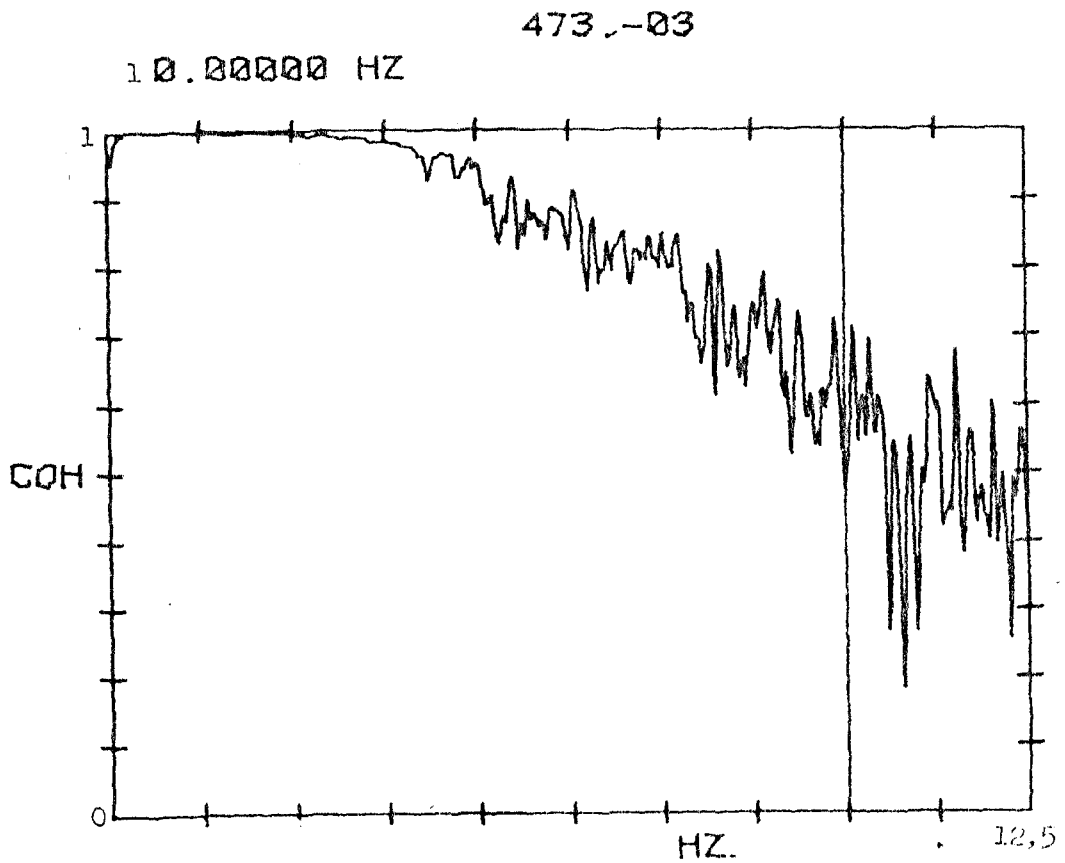


FIGURA 4.46- Coerência (CIC-1/CIC-2) - Reator 20 kW/Automá-
tico/Bomba Ligada.

-0.2 DG

10.00000 HZ

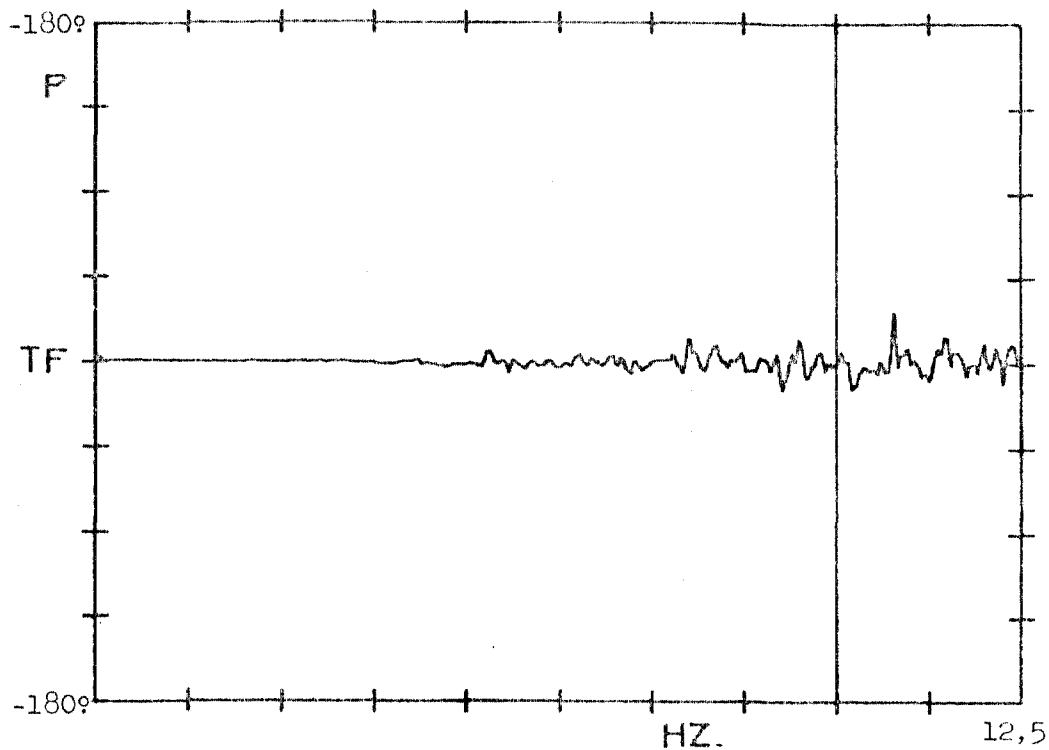


FIGURA 4.47- Fase (CIC-1/CIC-2)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada.

-53.2 dBV

-45.8 dBV

10.00000 HZ

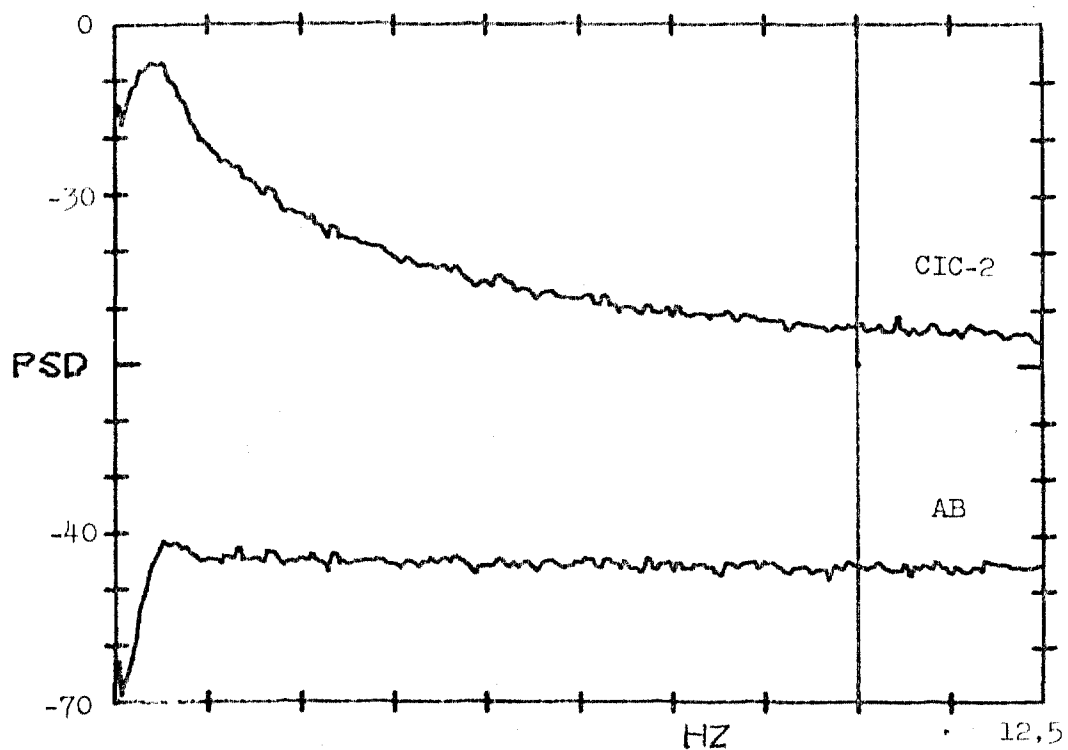


FIGURA 4.48- DEP (CIC-2/AB)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada.

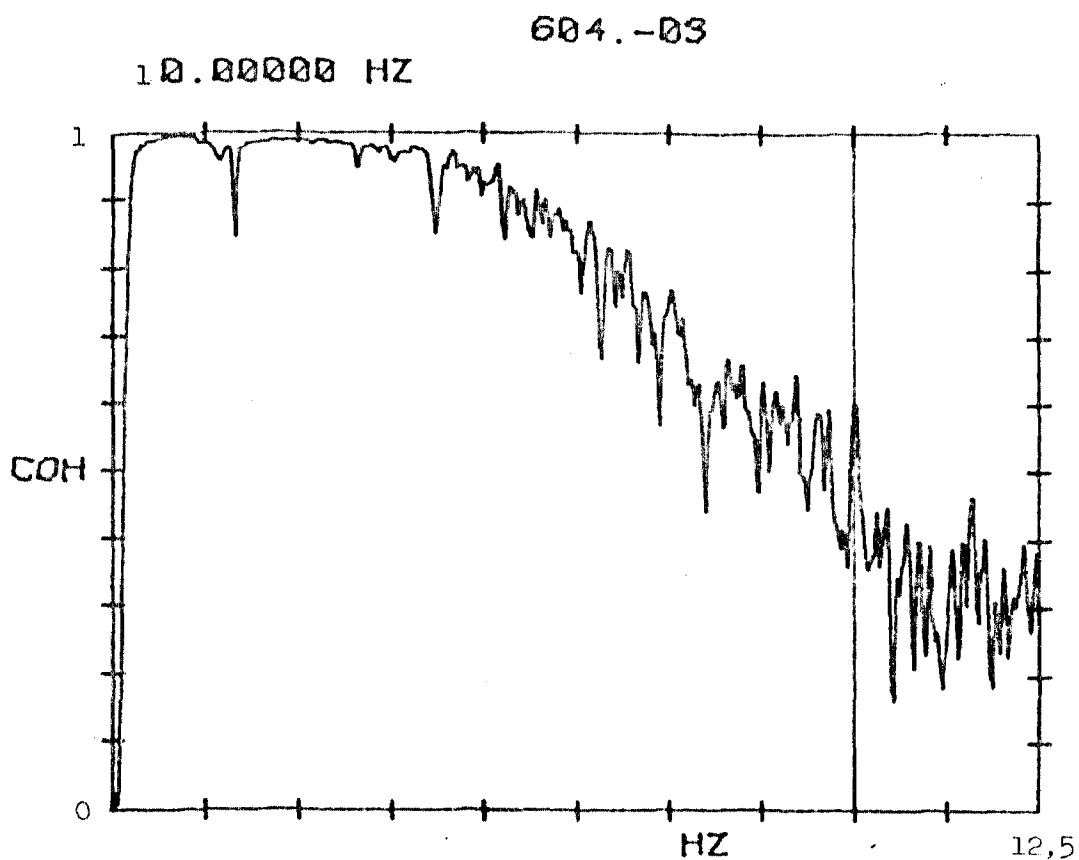


FIGURA 4.49- Coerência (CIC-2/AB) - Reator 20 kW/Automático/
Bomba Ligada.

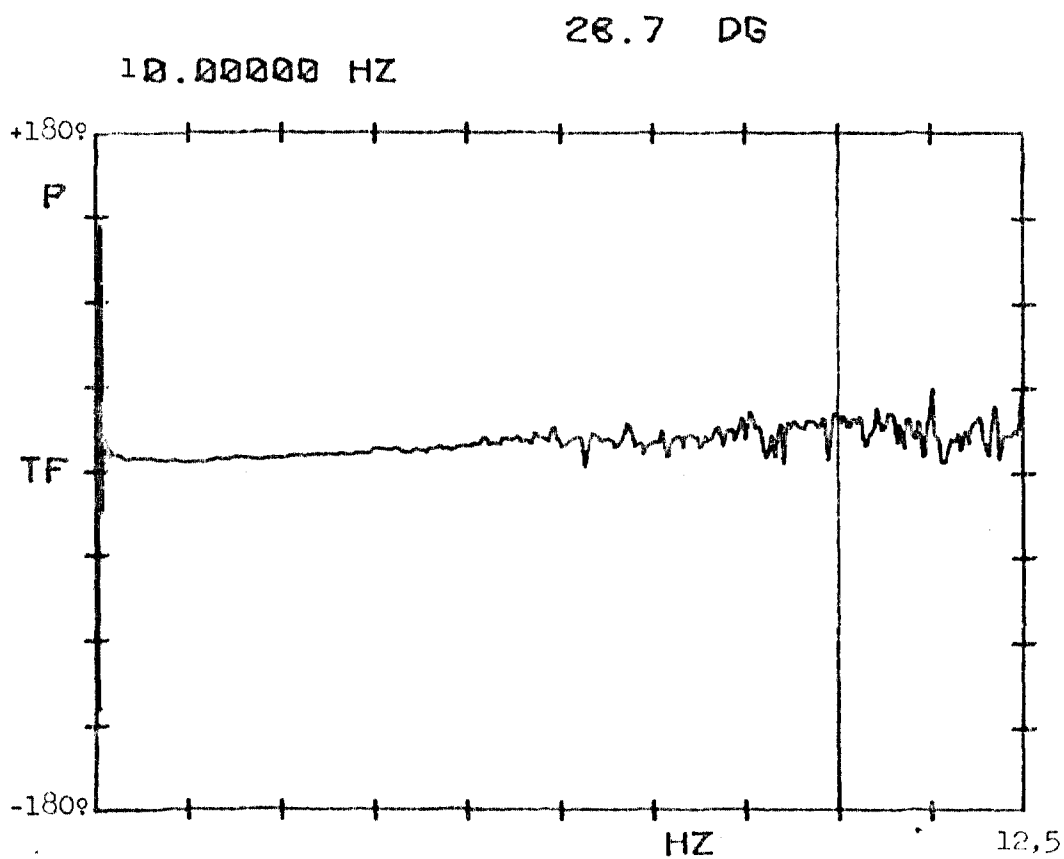


FIGURA 4.50- Fase (CIC-2/AB) - Reator 20 kW/Automático /
Bomba Ligada.

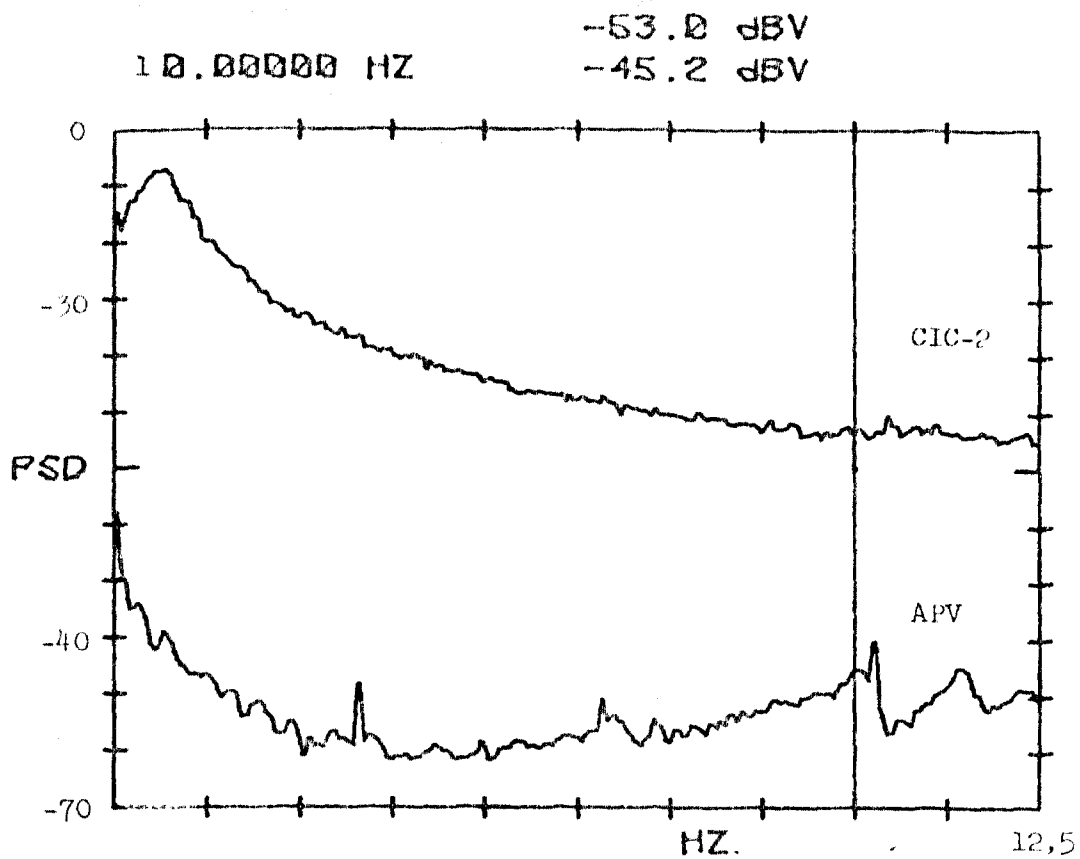


FIGURA 4.51- DEP (CIC-2/APV)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada.

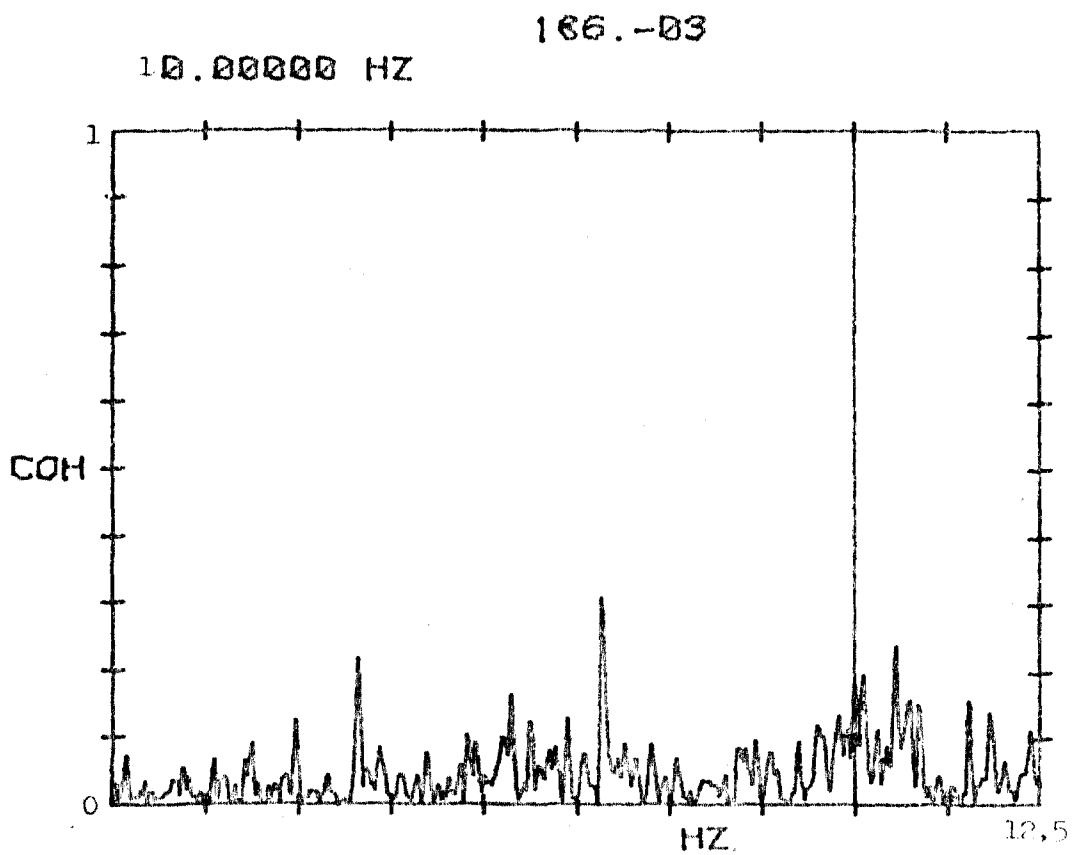


FIGURA 4.52- Coerência (CIC-2/APV)- Reator 20 kW/Automático/Bomba Ligada.

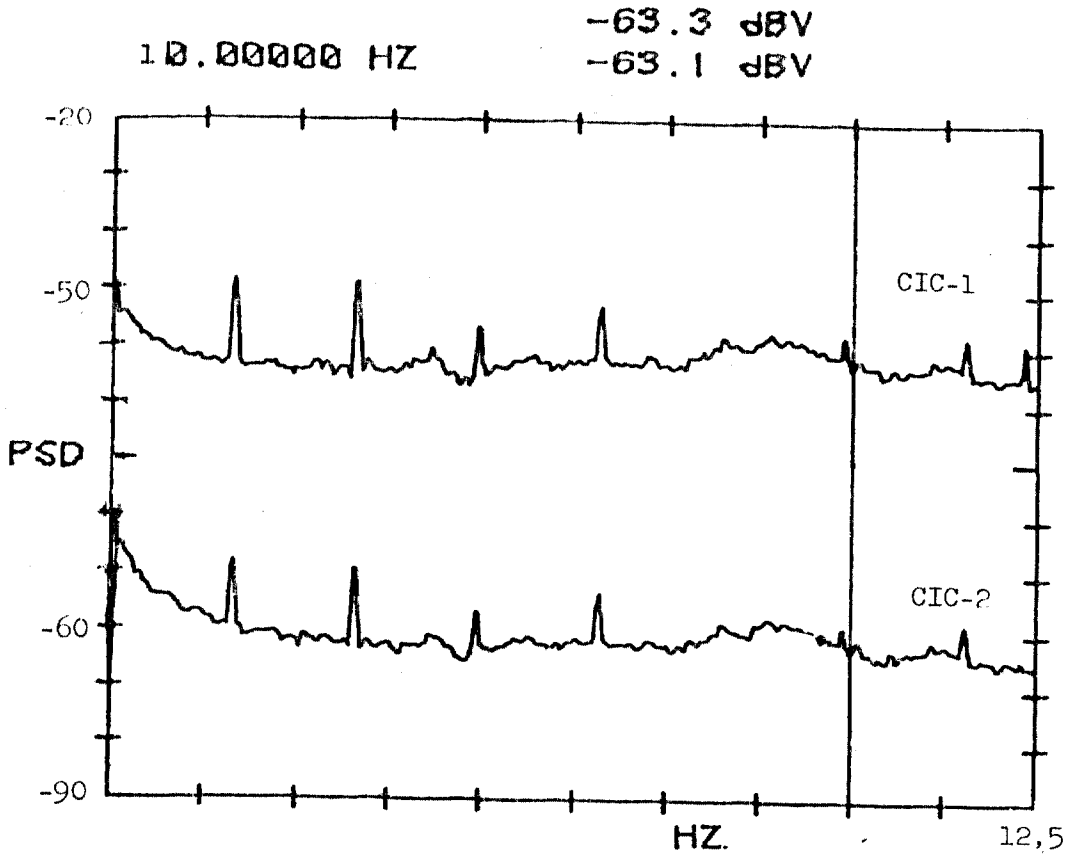


FIGURA 4.53- DEP (CIC-1/CIC-2)- Reator Desligado/Bomba Desligada.

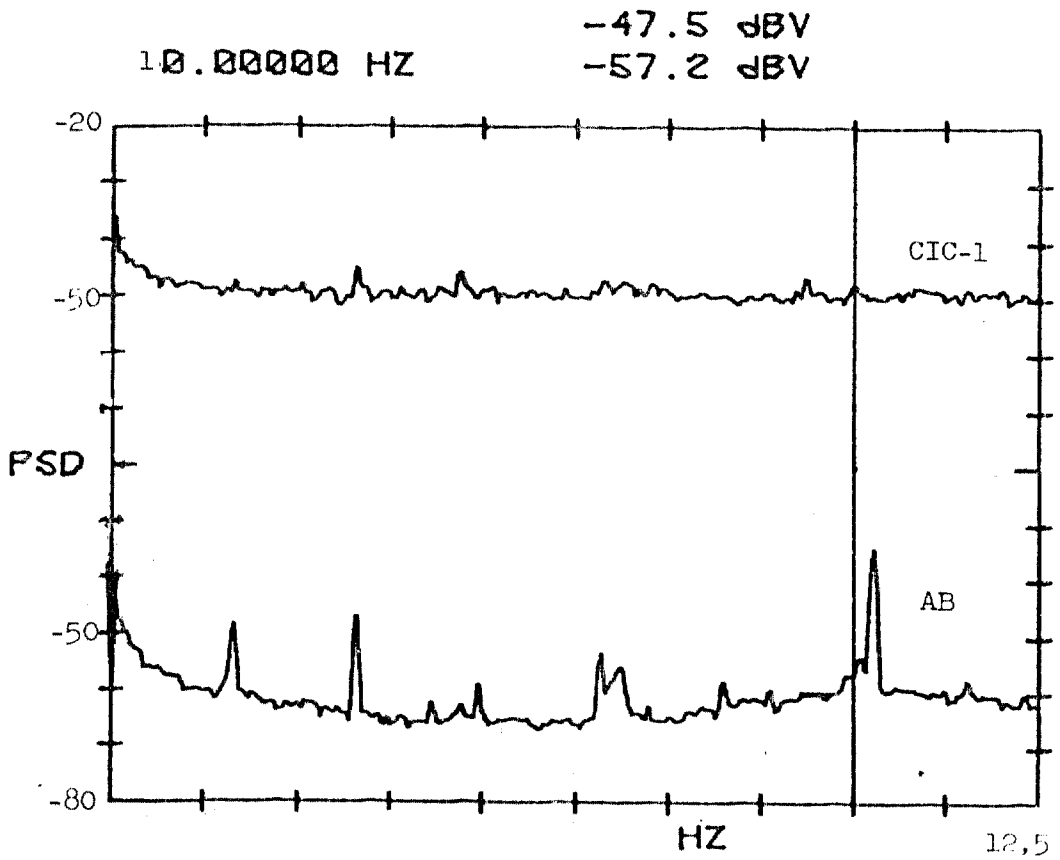


FIGURA 4.54- DEP (CIC-1/AB)- Reator Desligado/Bomba Desligada.

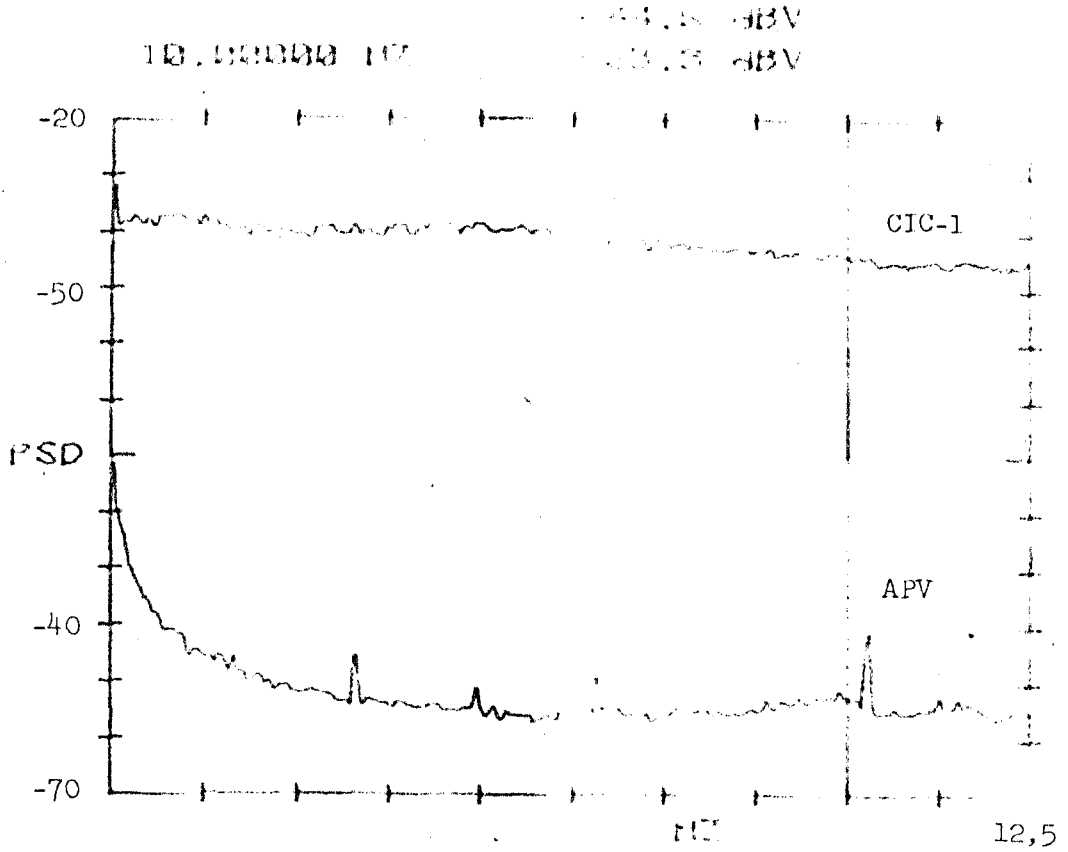


FIGURA 4.55- DEP (CIC-1/APV) - Reator Desligado/Bomba Desligada.

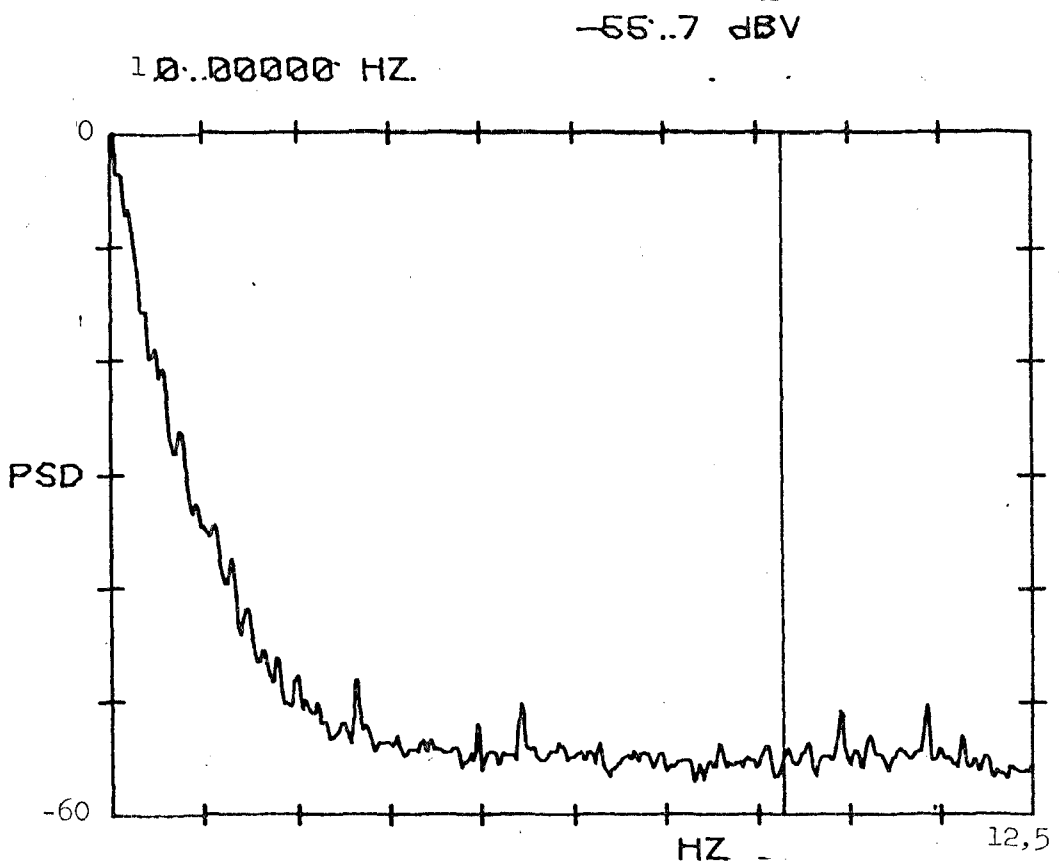


FIGURA 4.56- DEP (T) - Reator Desligado/Bomba Desligada

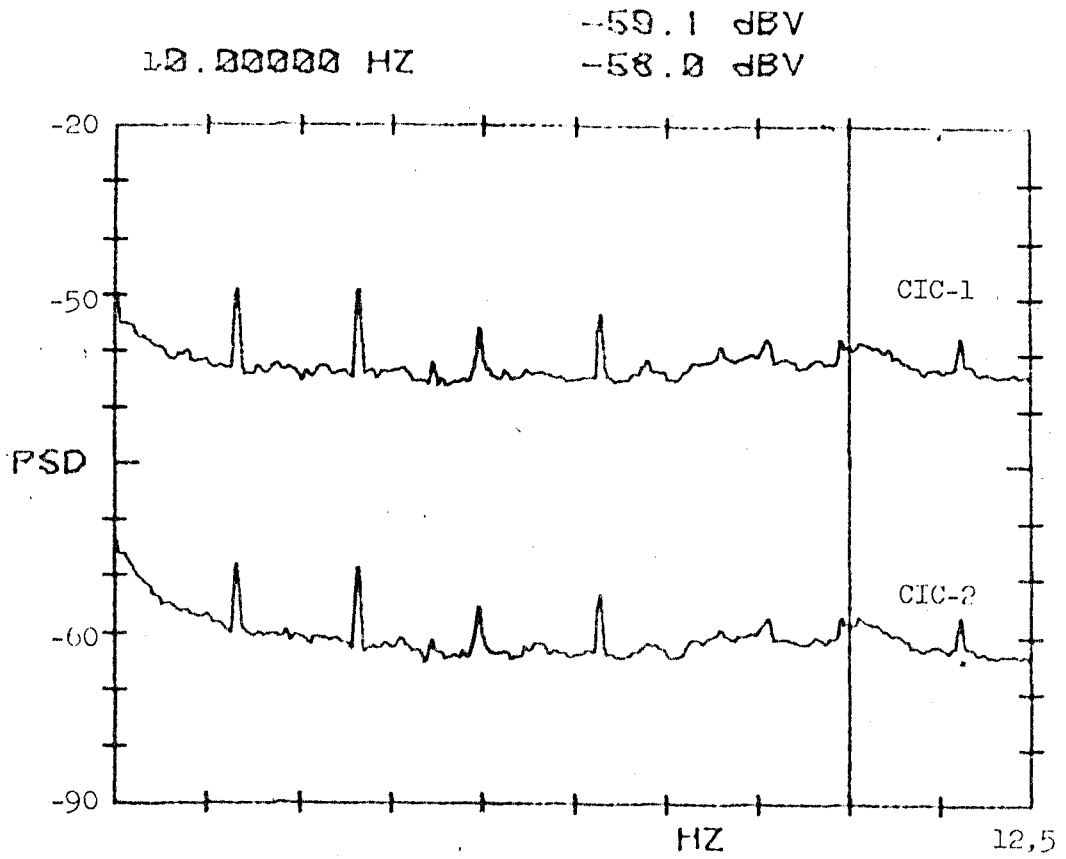


FIGURA 4.57- DEP (CIC-1/CIC-2) - Reador Desligado/Bomba Ligada

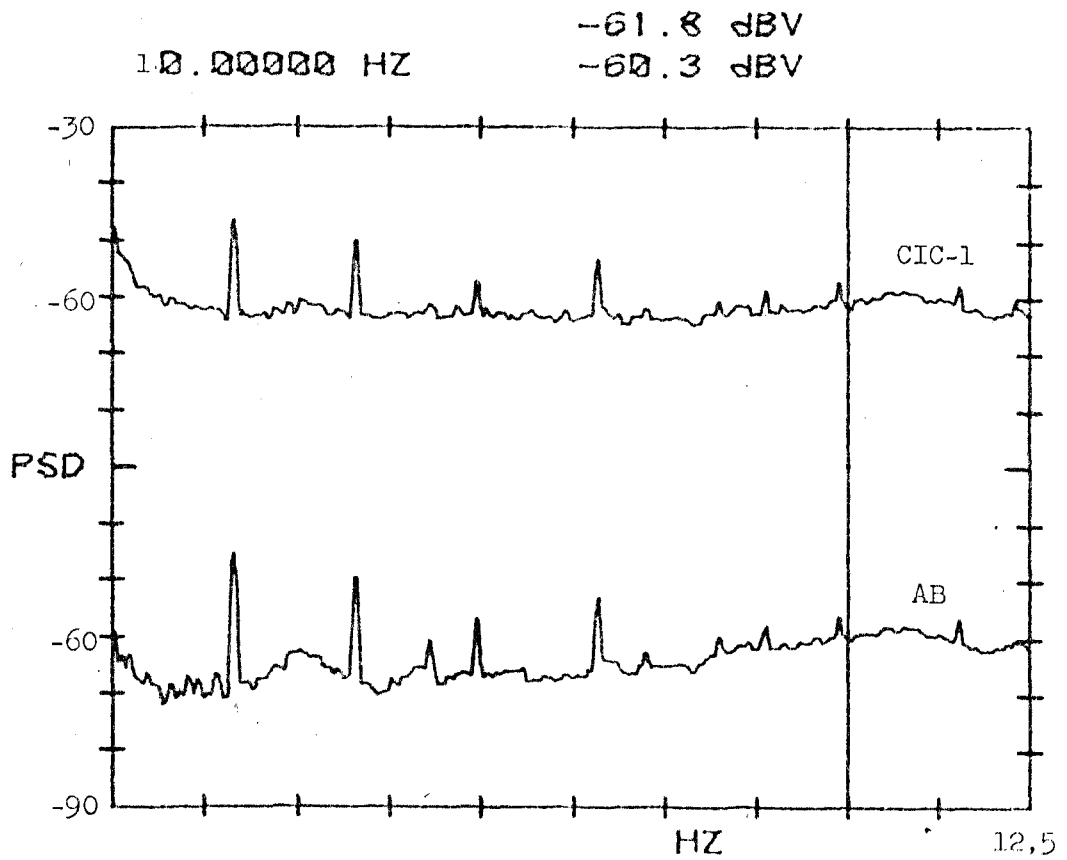


FIGURA 4.58- DEP (CIC-1/AB) - Reator Desligado/Bomba Ligada

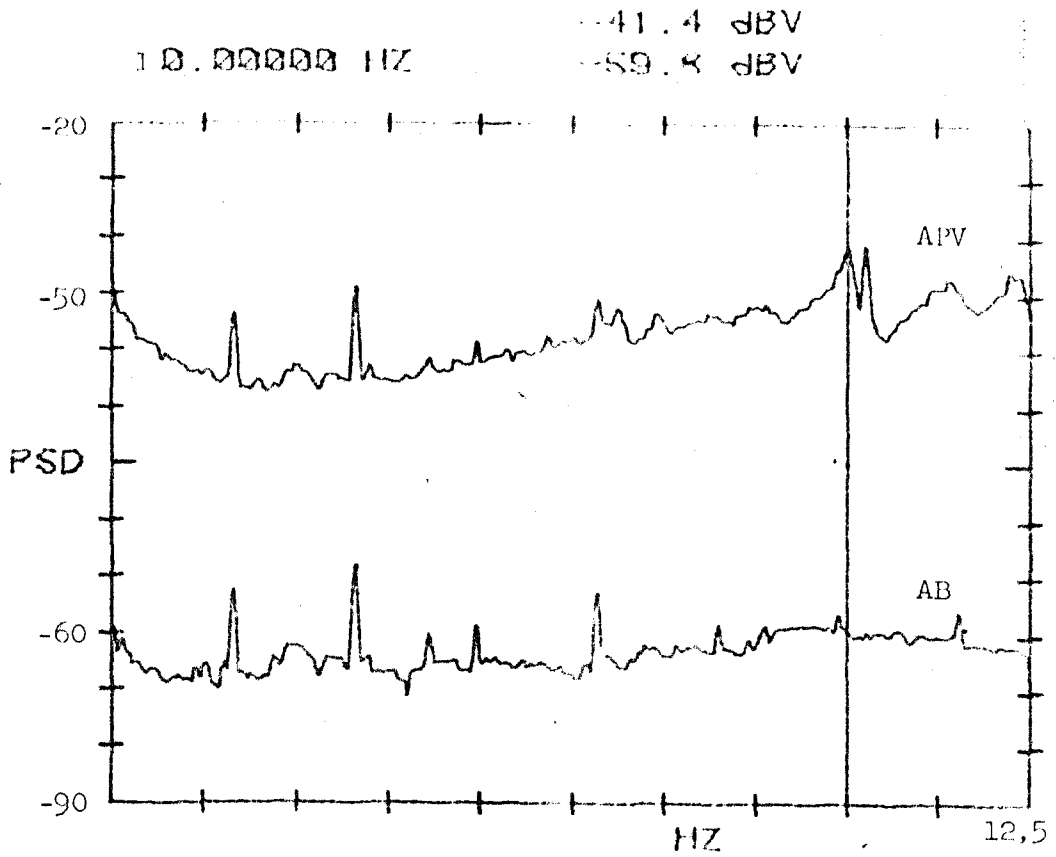


FIGURA 4.59- DEP (AB/APV) - Reator Desligado/Bomba Ligada.

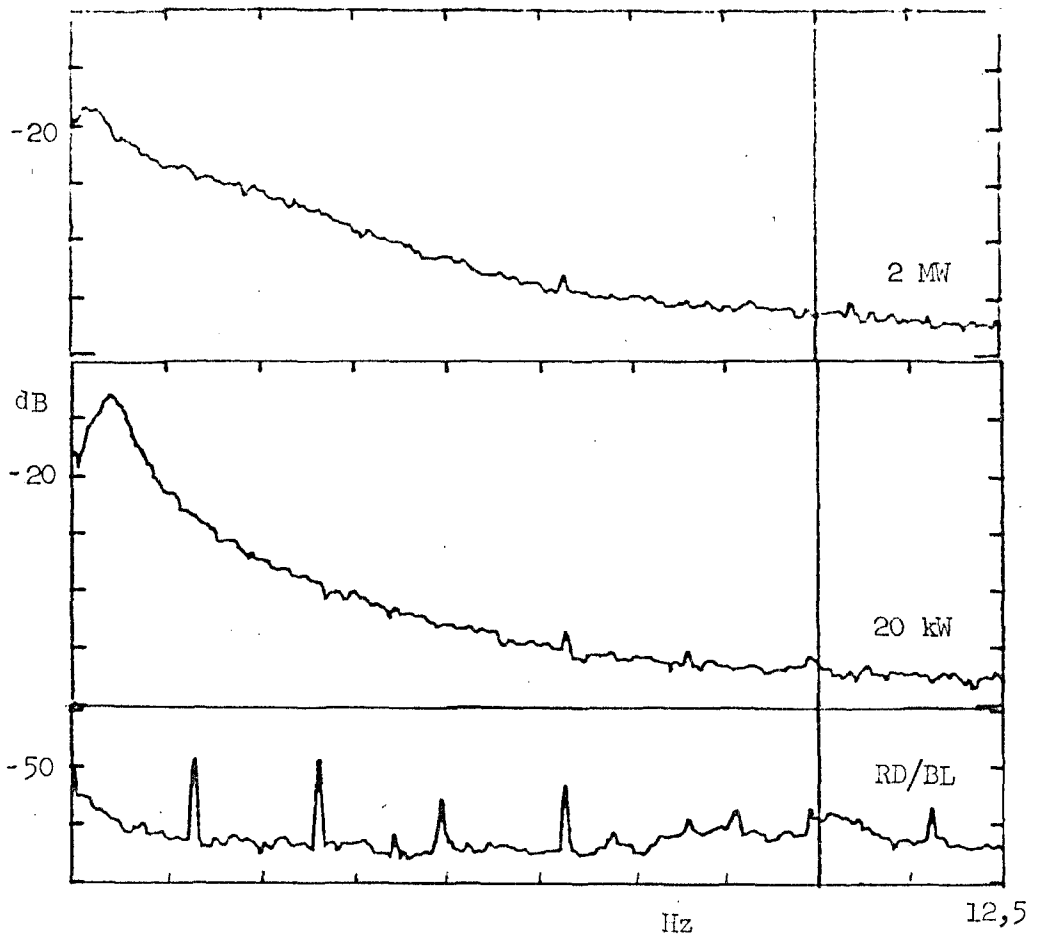


FIGURA 4.60- DEP (CIC-1)- Reator (2 MW - 20 kW - Desligado) / Automático/Bomba Ligada.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Verificou-se neste trabalho a necessidade de um sistema de suporte para os detectores de nêutrons adequadamente rígido, pois é essencial minimizar o ruído proveniente do movimento do detector.

Dos três sistemas estudados, a saber: "Três Cordas de Nylon", "Tripé" e "Tubo de Retenção", somente o terceiro - ofereceu os requisitos necessários para redução das vibrações dos detectores.

Conforme pode ser visto no Capítulo 4, não se encontrou nenhuma ressonância na DEP do sinal do sistema de detecção de nêutrons, bem como, na DEP do sinal das vibrações da barra de controle. Esse fato foi inesperado pois, ressonâncias são encontradas nas medidas de ruído em outros reatores tipo piscina, como por exemplo, o HOR da "Interuniversity Reactor Institute" - Holanda, cujas características são semelhantes às do Reator IEAR-1 /62/ (Vide Apêndice B).

Observou-se também, que os dois parâmetros citados acima, flutuação do fluxo de nêutrons e vibração da barra de controle, são altamente correlacionados.

Na faixa de frequência de 0 a 5 Hz o mesmo fato não ocorre com a vibração da estrutura do reator e a flutuação da temperatura de entrada, pois obteve-se uma coerência insignificante ($< 0,4$) entre esses parâmetros e as

flutuações neutrônicas.

Tanto a ausência de ressonância como a incoerência entre o ruído neutrônico e a flutuação de temperatura deverão ser estudados com maior cuidado posteriormente.

Para se obter a quantidade máxima de informações das experiências de análise de ruído num reator, deve-se ter um modelo teórico com o qual os dados possam ser comparados. No Apêndice B apresenta-se o modelo teórico utilizado nos estudos do comportamento dinâmico do reator - HOR /62/; modelo este que não foi utilizado neste trabalho pela ausência de ressonâncias no ruído neutrônico característico do Reator IEAR-1.

Deve-se enfatizar que as medidas apresentadas nesta dissertação representam uma primeira etapa no entendimento completo do ruído neutrônico do Reator IEAR-1. Necessitar-se-á a feitura de uma série de experiências adicionais, citadas abaixo, para que este trabalho seja continuado.

1. As medidas de ruído foram feitas usando-se cabos coaxiais convencionais entre os detectores de nêutrons e o primeiro amplificador. O ruído do sistema pode ser significativamente reduzido usando-se cabos especiais de baixo ruído conectados adequadamente.

2. Usar a CIC para medir $(n + \gamma)$ e γ separadamente.

3. Uso de outros detectores de nêutrons, em particular, detectores auto-alimentados. Estes detectores são significativamente menores, reduzindo, portanto, a perturbação no fluxo medido. Devido ao seu tamanho menor (≈ 5 mm de diâmetro) tem-se maiores possibilidades para seu posicionamento.

4. Medir as variações de potência por meio da radiação Cerenkov. Estes detectores, foto multiplicadores, têm uma resposta significativamente maior que os detectores - tipo CIC.

5. Medir a combinação do efeito das variações de vazão e da potência por meio de análise da intensidade do ^{16}N no refrigerante do reator na tubulação, que, sai da piscina e vai até o tanque de decaimento.

6. Determinar a resposta do reator através de medidas pseudo aleatórias da barra de controle. Essas medidas definirão conclusivamente a frequência de corte do ruído neutrônico (isto é da potência).

É bem possível que dos resultados obtidos ao se executar as experiências citadas anteriormente, novas sugestões poderão ser indicadas.

APÊNDICE A - DETERMINAÇÃO DA TENSÃO DAS BATERIAS DE ALIMENTAÇÃO DOS DETECTORES DE NÊUTRONS

Para se determinar a tensão de operação dos detectores de nêutrons, uma vez que baterias foram utilizadas, foi necessário medir a distribuição do fluxo de nêutrons na região de posicionamento das CIC's (cerca de 1 m acima do topo do cerne do reator).

Na Figura A.1 tem-se as curvas características das CIC's usadas ("Westinghouse" WL-6377), relacionando tensão de operação com o fluxo de nêutrons / 28 /.

Mediu-se a distribuição espacial do fluxo de nêutrons térmicos por meio da ativação de folhas de ouro / 30 /. Essas medidas foram feitas no eixo do tubo de retenção, localizado na posição 6 da placa matriz, com um total de trinta folhas sustentadas em placas de lucite até uma distância de 2,30m, do plano centro-horizontal do cerne à superfície da piscina do reator (vide Figura A.2). As folhas de ouro foram irradiadas durante 8,11 horas com o reator operando a 2 MW.

Nas posições de Y_1 a Y_{18} irradiaram-se folhas pequenas (diâmetro = 8 mm e espessura = 0,013mm) e nas posições de Y_{18} a Y_{29} foram usadas folhas maiores (diâmetro = 25,4mm e espessura = 0,051mm) para melhorar a estatística de contagem.

Determinou-se a atividade das folhas de ouro com um detector cintilador de Na I(Tl) de 76 mm x 76 mm, calibrado em relação a um sistema por coincidência do tipo $4\pi\beta\text{-}\gamma$.

O fluxo de nêutrons térmico para cada uma das posições, $\phi(y_i)$, é dado por:

$$\phi_{\text{térmico}}(y_i) = B C_{\text{nua}}(y_i) \quad \text{A.1}$$

onde:

$C_{\text{nua}}(y_i)$ = taxa de reação de ativação por unidade de área para folhas nuas na posição y_i (centro da folha).

B = constante, que será discutida posteriormente.

A taxa de reação de ativação para cada folha é dada por:

$$C(y_i) = \frac{\Lambda_0}{S(1 - e^{-\lambda t_{\text{irrad}}})} \quad \text{A.2}$$

onde:

λ = constante de desintegração do ouro

Λ_0 = atividade inicial das folhas

S = área da folha = $m/\rho d$

(m = massa, ρ = densidade, d = espessura)

t_{irrad} = tempo total de irradiação.

Por sua vez,

$$A_0 = A(t) e^{\lambda t} \quad \text{A.3}$$

onde,

$$A(t) = \frac{\text{contagem /segundo} - BG/\text{segundo}}{\eta \text{ (eficiência do detector)}} \quad \text{A.4}$$

A eficiência do detector foi determinada, para as folhas Y_{18} (pequena e grande), por meio da relação:

$$\eta = \frac{\text{Razão de contagens (medida no detector NaI(Tl))}}{\text{atividade absoluta (medida no sistema } 4\pi\beta\gamma)}$$

A.5

Calculou-se a constante B por meio da equação / 30 /:

$$C_{nua} = 5,98 \times 10^{-3} \phi_{\text{t\u00e9rmico}} + 6,04 \times 10^{-2} \phi_{\text{epit\u00e9rmico}}$$

A.6

ou seja,

$$C_{nua} / \phi_{\text{t\u00e9rmico}} = 5,98 \times 10^{-3} + 6,04 \times 10^{-2} \phi_{\text{epit\u00e9rmico}} / \phi_{\text{t\u00e9rmico}}$$

A.7

$$\text{Como } \phi_{\text{t\u00e9rmico}}/\phi_{\text{epit\u00e9rmico}} = (R_{\text{cd}}^{-1}) \frac{I_r}{\bar{\Sigma}_a(\text{Au})} \quad \text{A.8}$$

onde,

$$R_{\text{cd}} = \frac{1,27}{0,651} = 1,95 = \text{valor m\u00e9dio da raz\u00e3o de c\u00e1dmio. Es}$$

te valor foi determinado por Mestnik Filho / 30 / para folhas ativadas dentro do cerne do reator na regi\u00e3o mais pr\u00f3xima ao refrigerante,

$$I_r = 1582 \text{ barns} = 1582 \times 10^{-24} \times 5,91 \times 10^{22} \text{ cm}^{-1} = \text{integral de res}$$

son\u00e2ncia,

$$\bar{\Sigma}_a(\text{Au}) = 4,74 \text{ cm}^{-1} = \text{sec\u00e7\u00e3o de choque macrosc\u00f3pica m\u00e9dia do}$$

ouro.

Portanto,

$$\phi_{\text{epit\u00e9rmico}}/\phi_{\text{t\u00e9rmico}} = 5,34 \times 10^{-2} \quad \text{A.9}$$

Logo,

$$C_{\text{nua}}/\phi_{\text{t\u00e9rmico}} = 5,98 \times 10^{-3} + 3,23 \times 10^{-3} \quad \text{A.10}$$

ou seja:

$$\phi_{\text{t\u00e9rmico}} = C_{\text{nua}}/9,21 \times 10^{-3} = 1,09 \times 10^2 C_{\text{nua}} \quad \text{A.11}$$

Os resultados apresentam-se na Figura A.3. Deve-se sali^uentar que nosso interesse está apenas na ordem de grandeza do fluxo de nêutrons térmicos.

Comparando-se as Figuras A.1 e A.3 , observa-se que - uma bateria de no mínimo 300 V seria suficiente para a alimenta^ução dos detectores, uma vez que na região de posicionamento das CIC's tem-se um fluxo de nêutrons térmicos da ordem de 10^6 .

A.1 - Dados e Resultados de Cálculos

$$\lambda = 0,0107124 \text{ horas}^{-1}$$

$$t_{\text{irrad}} = 8,11 \text{ horas}$$

$$\rho = 19,32 \text{ g/cm}^3$$

$$d_{\text{folha pequena}} = 0,0013 \text{ cm}$$

$$d_{\text{folha grande}} = 0,0051 \text{ cm}$$

$$m_{\text{folha pequena}} = 0,0119 \text{ g}$$

$$m_{\text{folha grande}} = 0,5075 \text{ g}$$

$$n_{\text{folha pequena}} = 1,85 \times 10^{-1} \text{ contagens/dps}$$

$$n_{\text{folha grande}} = 1,94 \times 10^{-1} \text{ contagens/dps}$$

$$C_{\text{folha pequena}} = \frac{A_0}{3,91 \times 10^{-2}} \quad \text{A. 12}$$

$$C_{\text{folha grande}} = \frac{A_0}{4,29 \times 10^{-1}} \quad \text{A. 13}$$

A.2- Fator de Correção para o Cálculo do Fluxo de Nêutrons Térmicos por meio das Folhas Grandes

O fluxo de nêutrons térmicos obtido por meio da ativação das folhas de ouro grandes foi calculado usando-se:

$$\phi_{\text{térmico}}(y_{i_{18+29}}) = \frac{\phi_{\text{térmico}}(y_{18})_{\text{pequena}}}{\phi_{\text{térmico}}(y_{18})_{\text{grande}}} \times \phi_{\text{térmico}}(y_{i_{18+29}})_{\text{grande}}$$

A.14

$$\phi_{\text{térmico}}(y_{i_{18+29}}) = 0,276 \phi_{\text{térmico}}(y_{i_{18+29}})_{\text{grande}} \quad \text{A.15}$$

A.3- Erro Máximo na Determinação do Fluxo de Nêutrons Térmicos

Obtêm-se um erro máximo, no cálculo do fluxo de

nêutrons t ermicos, quando se despreza a contribui o do fluxo de nêutrons epitermicos para a determina o da taxa de rea o de ativa o.

Nesse caso a equa o A.6 se reduz a:

$$C'_{nua} = 5,98 \times 10^{-3} \phi_{t ermico} \quad A.16$$

Comparando-se as equa es A.11 e A.16 tem-se:

$$\frac{C'_{nua}}{C_{nua}} = 0,65$$

Portanto isso corresponde a um erro m ximo de 35%. Deve-se salientar que esse erro n o   importante, uma vez que se est  interessado apenas na ordem de grandeza do fluxo de nêutrons t ermicos.

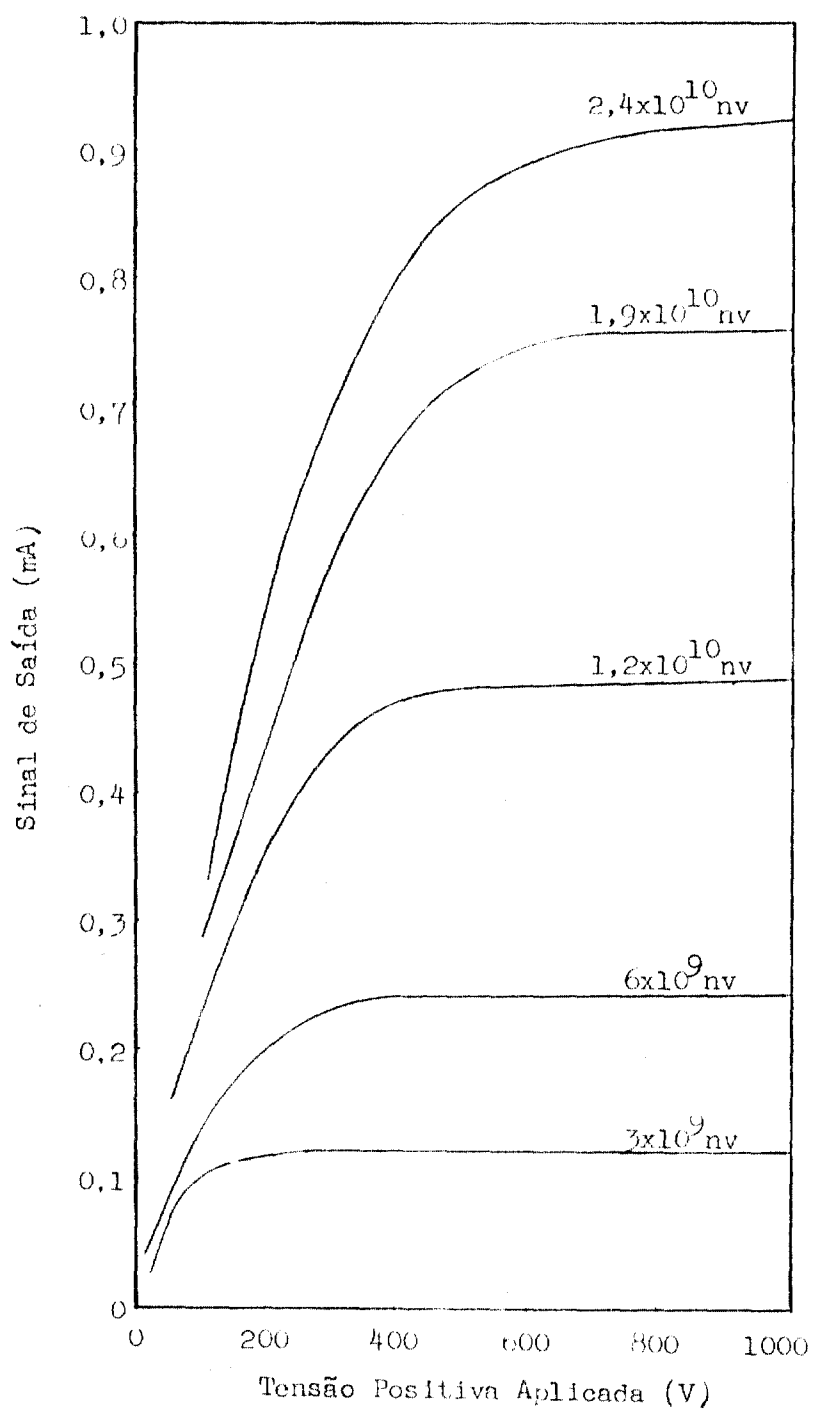


FIGURA A.1 - Curvas Características de Saturação da CIC (WL-6377).

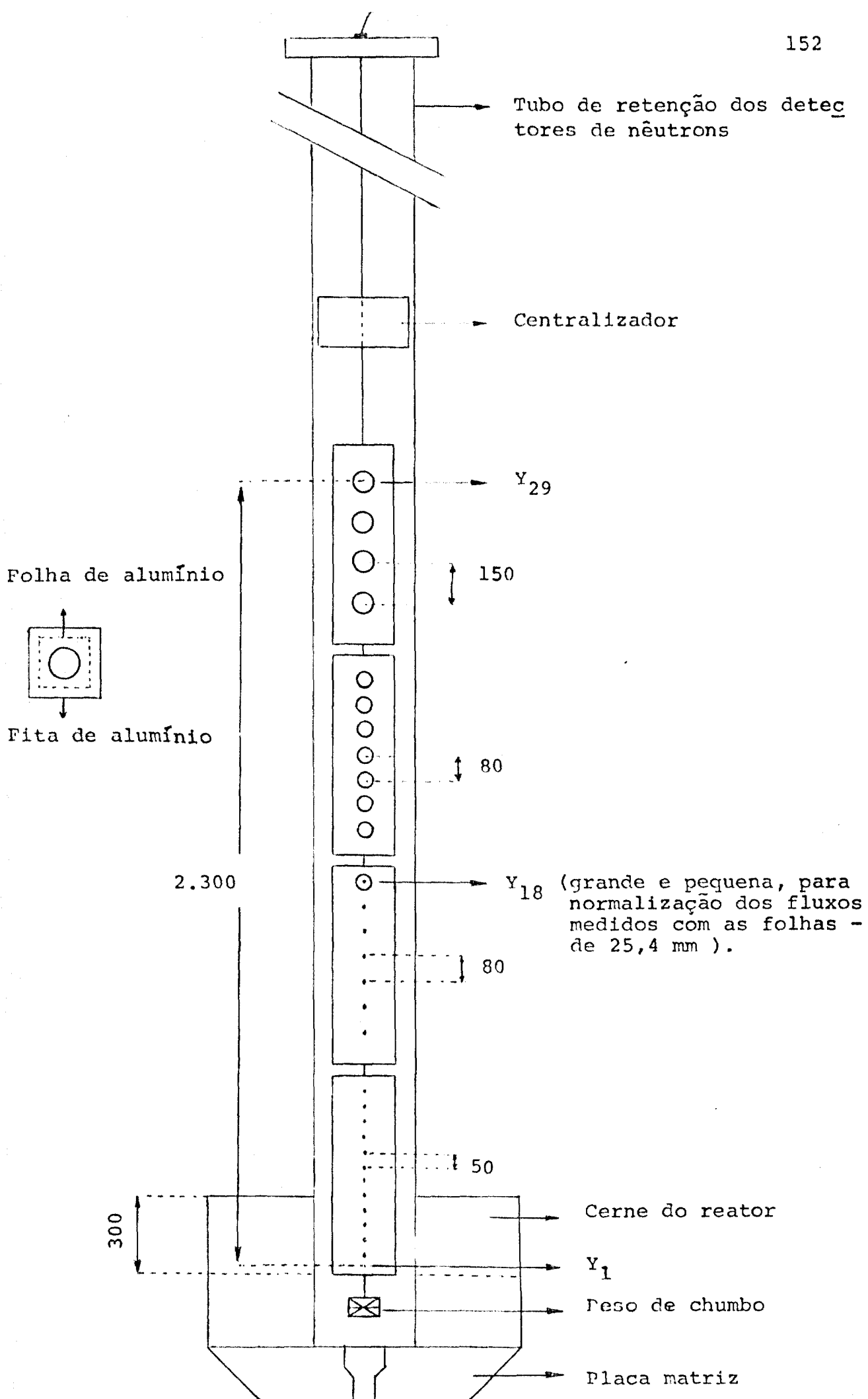


FIGURA A.2- Arranjo Experimental para a Medida da Distribuição Espacial do Fluxo de Nêutrons por meio da Ativação de Folhas de Ouro.

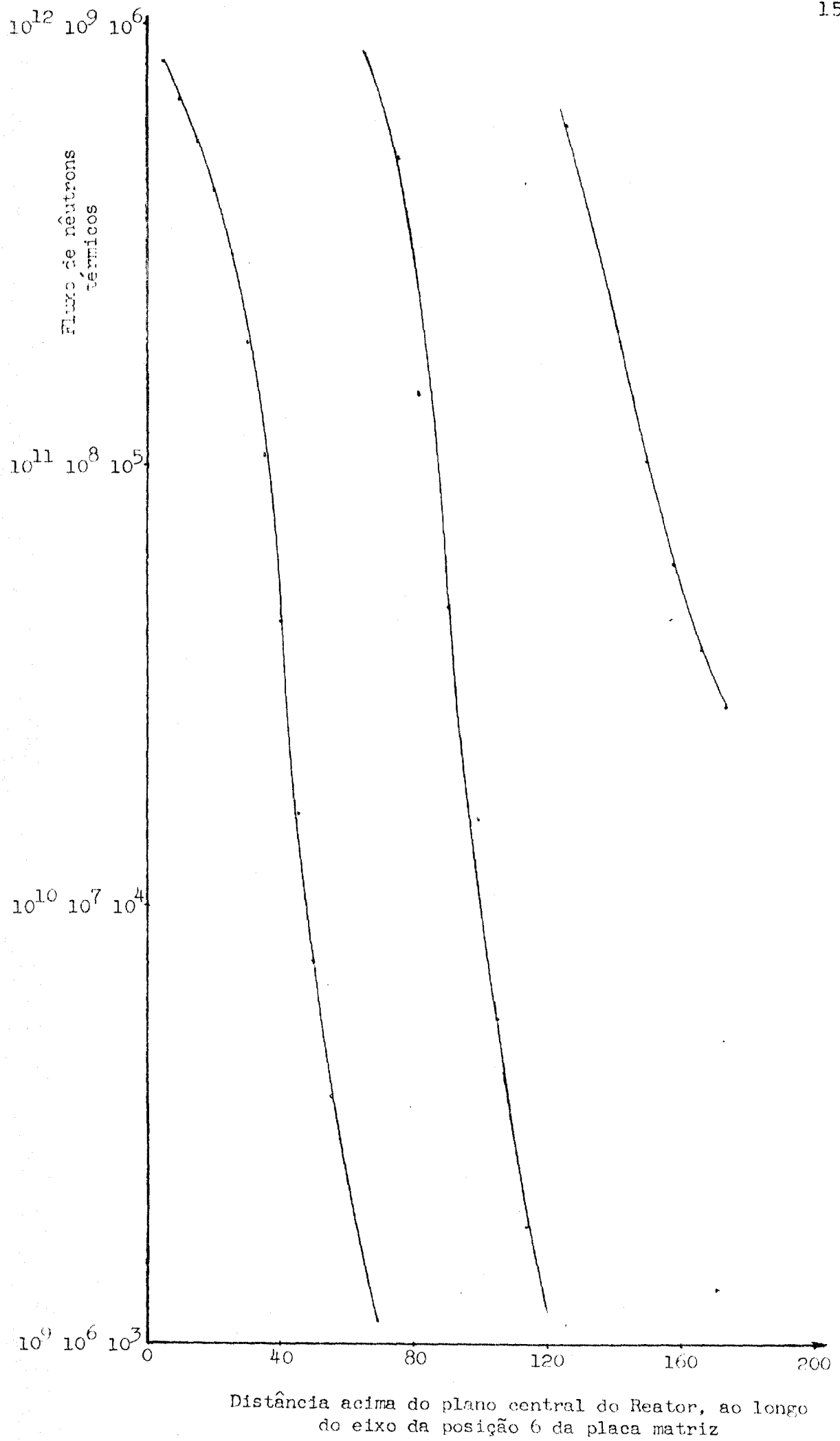


FIGURA A.3- Distribuição Espacial do Fluxo Neutrônico do Reator IFAR-1.

APÊNDICE B- MODELO MATEMÁTICO PARA ANÁLISE DE RUÍDO EM
REACTORES DE PESQUISA TIPO PISCINA

Este modelo matemático é idêntico ao empregado nas medidas de ruído de Reator de Pesquisa HOR, tipo piscina do "Interuniversity Reactor Institute" em Delft, nos Países Baixos; uma vez que suas características são semelhantes às do Reator IEAR-1/ 62/, conforme Tabela B.1.

TABELA B.1- Comparação das Características dos Reactores IEAR-1 e HOR

	IEAR-1	HOR
Potência de operação	2 MW	2 MW
Enriquecimento	93 %	93 %
Tipo de elemento combustível	MTR*	MTR*
Nº de elementos combustível	25 (4 de controle)	34 (5 de controle)
Dimensões do cerne (cm)	60x40x38	60x49x46

B .1- Ruído Neutrônico Induzido por Vibrações Mecânicas

Sabe-se que o refrigerante, fluindo a uma alta velocidade através do cerne do reator, é uma fonte de energia que pode induzir e sustentar vibrações nos componentes estruturais do reator / 7 /.

A causa mais comum de vibrações mecânicas aleatórias é a turbulência do fluxo refrigerante, que são flutuações de pressão ao longo da parede de um elemento combustível ou barra de controle / 25/.

Medidas de ruído neutrônico fornecem um caminho eficaz para monitorar muitos tipos de vibrações internas de

* MTR - Material Testing Reactor.

um reator, as quais induzem perturbações aleatórias na reatividade afetando, portanto, o comportamento cinético do sistema. Este potencial ficou evidente durante a história do desenvolvimento de reatores / 19 , 56 , 58 / e são bem estabelecidos por meio da análise de vários problemas de vibrações com o reator em funcionamento / 20 , 40 , 54 /.

Merecem discussão especial , os trabalhos de Robinson / 40/ e Stephenson / 54 /. Estes autores têm estudado o espectro de ruído do "Oak Ridge Research Reactor (ORR)" e tentado isolar várias fontes de ruído.

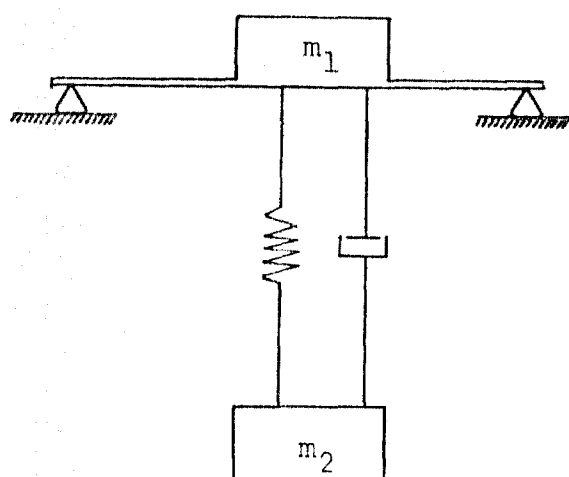
Stephenson concluiu que as duas fontes predominantes de ruído originam-se de flutuações da temperatura de entrada do refrigerante e vibrações da barra de controle.

Exemplos do efeito da vibração da barra de controle são citados por Robinson. Ele mostrou DEP's do "ORR" em muitas condições similares mas em ocasiões diferentes . Nas primeiras medidas vê-se um pico , bem definido, de 5 cps; enquanto que em medidas posteriores este pico esteve ausente. Investigações mostraram que no período intermediário o suporte superior da barra foi substituído para reduzir a vibração .

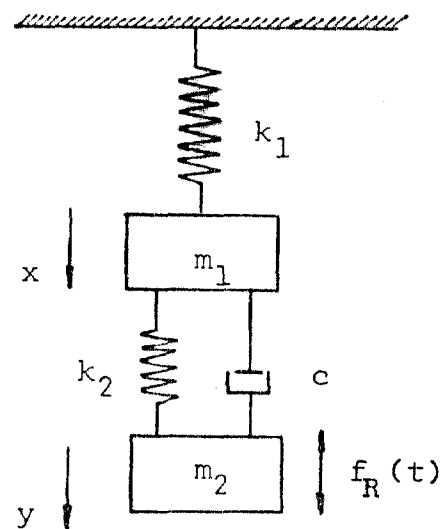
No presente estudo, analisar-se-ã flutuações na reatividade; conseqüentemente no nível de potência, devidas a vibrações da ponte e barra de controle do reator.

A Figura B.1.a Mostra uma situação simplificada onde o suporte do cerne e a ponte do reator podem vibrar; a vibração da ponte é análoga a de uma viga em balanço. Na Figura B.1.b tem-se uma simplificação adicional, onde admite-se uma força aleatória, f_R , agindo no cerne do reator.

Uma das principais fontes de flutuações de reatividade é o deslocamento das barras de controle. Admitir-se-ã que a união entre as barras de controle e a ponte é completamente rígida; isto significa que um deslocamento relativo entre o cerne e a ponte causa um efeito na reatividade.



- a -



- b -

FIG.B.1- Modelo Simplificado da Estrutura do Reator. A Massa da Ponte e a do Cerne são Respectivamente m_1 e m_2 . A Força aleatória $f_R(t)$ está agindo no cerne.

O sistema vibracional indicado na Figura B.1b é descrito pelas equações / 62 / :

$$m_1 \ddot{x} + c \dot{x} + (k_1 + k_2) x = c\dot{y} + k_2 y \quad \text{B.1}$$

$$m_2 \ddot{y} + c\dot{y} + k_2 y = c\dot{x} + k_2 x + f_R(t) \quad \text{B.2}$$

onde:

$$m_1 = \text{massa da ponte do reator} \quad / \text{ kg } /$$

$$m_2 = \text{massa do cerne do reator} \quad / \text{ kg } /$$

$$c = \text{coeficiente linear de amortecimento} \quad / \text{ Nsm}^{-1} /$$

$$k_1 = \text{constante elástica (linear) da mola da ponte} \quad / \text{ Nm}^{-1} /$$

$$k_2 = \text{constante elástica (linear) da mola do suporte do cerne} \quad / \text{ Nm}^{-1} /$$

$$f_R = \text{força aleatória agindo no cerne} \quad / \text{ N } /$$

A função de transferência ($H(f)$) entre a deflexão da ponte (entrada) e a distância entre o cerne e a ponte (saída), pode ser deduzida da equação (B.1).

$$H(f) = \frac{Y-X}{X} = - \frac{m_1 w^2 + k_1}{jwc + k_2} \quad \text{B.3}$$

onde:

$$Y = \frac{(-m_1 w^2 + jwc + (k_1 + k_2)) F_R(jw)}{(-m_2 w^2 + jwc + k_2) (-m_1 w^2 + jwc + (k_1 + k_2)) - (jwc + k_2)^2}$$

B.4

$$X = \frac{(jwc + k_2) F_R(jw)}{(-m_2 w^2 + jwc + k_2) (-m_1 w^2 + jwc + (k_1 + k_2)) - (jwc + k_2)^2}$$

B.5

A relação entre a transformada de Fourier do sinal neutrônico (detector fora do cerne) e a do sinal do acelerômetro (fixo na ponte) é dada por / 62 /:

$$F(n) = \frac{\partial \rho}{\partial z} H(f) H_0 \frac{F(a)}{w^2} \quad \text{B.6}$$

onde:

F = operador transformada de Fourier

n = sinal amostra do detector de nêutrons

a = sinal amostra do acelerômetro

$\partial \rho / \partial z$ = reatividade diferencial total da barra de controle
/m⁻¹/

H₀ = função de transferência a potência zero.

Ainda podemos deduzir uma relação entre a DEPC_a e

a DEP_a e entre a DEP_n e a DEP_a; isto é,

$$\text{DEPC}_a = \frac{1}{w^2} \frac{\partial \rho}{\partial z} H_0^* H(f)^* \text{DEP}_a \quad \text{B.7}$$

$$\text{DEP}_n = \frac{1}{w^4} \frac{\partial \rho}{\partial z} |H_0|^2 |H(f)|^2 \text{DEP}_a \quad \text{B.8}$$

onde (seção 2.1.2):

$$\text{DEP}_n = F(n) * F(n) \quad | \text{sm} | \quad \text{B.9}$$

$$\text{DEP}_a = F(a) * F(a) \quad | \text{m}^2 \text{s}^{-3} | \quad \text{B.10}$$

$$\text{DEPC}_a = F(n) * F(a) \quad | \text{ms}^{-1} | \quad \text{B.11}$$

* - indica o complexo conjugado da variável.

B.2 - Ruído Neutrônico Induzido pelas Flutuações da Temperatura de Entrada e Velocidade do Refrigerante

As irregularidades no fluxo refrigerante de um reator podem resultar do mal funcionamento de uma das bombas de refrigeração ou qualquer outra anomalia no seu sistema de circulação. Seifritz / 49/ sugeriu um modelo matemático para o cálculo da DEP do ruído neutrônico induzido por tais irregularidades. Um estudo similar tem sido desenvolvido por Schawalm / 48 /. Saito / 41, 42 / examinou as características gerais das fontes de ruído de um reator de potência incluindo a flutuação do fluxo refrigerante. Morishima / 33/ apresentou uma teoria geral de flutuações estocásticas num reator de potência e examinou-a com relação ao ruído neutrônico devido às flutuações do fluxo refrigerante.

O trabalho de Seifritz / 49 / baseia-se, diretamente, nas condições físicas:

- devido às flutuações do fluxo refrigerante há uma flutuação na quantidade de calor transportada por este, induzindo flutuações nas temperaturas do combustível e do refrigerante;
- as flutuações de temperatura induzem flutuações na densidade de nêutrons por meio dos coeficientes de temperatura de reatividade;
- como os valores da velocidade e do coeficiente de transferência de calor médio não são independentes, a velocidade flutuante resulta num coeficiente de transferência de calor flutuante. Isto induz flutuações adicionais nas temperaturas do combustível e refrigerante e, consequentemente, na densidade de nêutrons.

No estudo em pauta, que se baseia nos trabalhos de Seifritz / 14 / e Kosály / 24 / (fundamentados nas relações de transferência de calor entre o elemento combustível e o fluxo refrigerante), dá-se atenção aos efeitos das flutuações da densidade e temperatura do fluxo refrigerante.

Portanto, considerando-se um reator de potência com

refrigeração forçada, que é perturbado por irregularidades no fluxo refrigerante, as equações básicas do sistema incluem as equações cinéticas de um reator puntual e as relações hidrodinâmicas para transferência de calor.

Conseqüentemente, para um modelo termohidráulico - unidimensional com flutuações de temperatura e velocidade, as equações de transferência de calor entre os elementos combustíveis e o fluxo refrigerante são / 9 , 24 , 49 , 62 /:

$$C_C \frac{\partial T_C(z, \tau)}{\partial \tau} = P'(z, \tau) - K(\tau) |T_C(z, \tau) - T_R(z, \tau)| \quad \text{B.12}$$

$$C_R \frac{\partial T_R(z, \tau)}{\partial \tau} + C_R V(\tau) \frac{\partial T_R(z, \tau)}{\partial z} = K(\tau) |T_C(z, \tau) - T_R(z, \tau)| \quad \text{B.13}$$

Onde:

de: τ	=	variável tempo	/ s /
z	=	coordenada axial	/ m /
$V(\tau)$	=	velocidade do refrigerante	/ms ⁻¹ /
$P'(z, \tau)$	=	densidade de potência axial por unidade de comprimento	/ Wm ⁻¹ /
$T_C(z, \tau)$	=	temperatura do combustível	/ °C /
$T_R(z, \tau)$	=	temperatura do refrigerante	/ °C /
$K(\tau)$	=	coeficiente total de transferência de calor por unidade de comprimento	/W (°Cm) ⁻¹ /

C_c = capacidade térmica do combustível por
 unidade de comprimento /J (°Cm)⁻¹/

C_r = capacidade térmica do refrigerante por
 unidade de comprimento /J (°Cm)⁻¹/

Pode-se representar cada quantidade flutuante das equações (B.12) e (B.13) como uma soma de termos in dependentes (letras maiúsculas) e dependentes do tempo - (letras minúsculas); ou seja:

$$P'(z, \tau) = P(z) + p(z, \tau) \quad \text{B.14}$$

$$V(\tau) = V + v(\tau) \quad \text{B.15}$$

$$T_c(z, \tau) = T_c(z) + t_c(z, \tau) \quad \text{B.16}$$

$$T_r(z, \tau) = T_r(z) + t_r(z, \tau) \quad \text{B.17}$$

$$K(\tau) = K + k(\tau) \quad \text{B.18}$$

Inserindo-se as equações de (B.14) a (B.15) em (B.12) e (B.13), subtraindo-se os valores constantes e omitindo-se os termos de 2^a ordem, tem-se:

$$C_c \frac{\partial t_c(z, \tau)}{\partial \tau} = p(z, \tau) - K | t_c(z, \tau) - t_r(z, \tau) | - \\ - k(\tau) | T_c(z) - T_r(z) | \quad \text{B.19}$$

$$C_r \frac{\partial t_r(z, \tau)}{\partial \tau} + C_r v \frac{\partial t_r(z, \tau)}{\partial z} + C_r v(\tau) \frac{\partial T_r(z)}{\partial z} =$$

$$= k(\tau) |T_c(z) - T_r(z)| - K |t_c(z, \tau) - t_r(z, \tau)| \quad \text{B.20}$$

$$\text{onde: } k(\tau) = 0,8 \frac{v(\tau)}{V} K \quad \text{B.21}$$

Supondo-se uma forma cossenoidal para a distribuição do fluxo axial e levando-se em consideração que no caso de um cerne pequeno, como o do IEAR-1, o ganho do refletor não pode ser desprezível, tem-se a seguinte expressão para a densidade de potência:

$$P''''(z) = \frac{\pi P \cos(\pi z / \hat{H})}{2 H \hat{0} \sin(\pi H / 2 \hat{H})} \quad |W/m^3| \quad \text{B.22}$$

onde:

- H = altura do cerne sem refletor / m /
 \hat{H} = altura extrapolada do cerne / m /
 $\hat{0}$ = secção transversal do cerne no plano x - y /m² /
P = potência total do cerne /W /
z = 0 , corresponde ao plano central do cerne.

Desprezando-se a transferência de calor axial a seguinte relação é válida / 62 /:

$$f_r \rho' c_p V \frac{\partial T_r(z)}{\partial z} = P'''(z) \quad \text{B.23}$$

onde:

f_r = fração volumétrica de refrigerante no cerne

ρ' = densidade do refrigerante /kgm⁻³/

c_p = calor específico do refrigerante /J(°Ckg)⁻¹/

Resolvendo-se as equações (B.22) e (B.23), obtêm-se:

$$T_r(z) = T_{\text{entrada}} + \frac{P}{2f_r \rho' c_p V_0} \left| 1 + \frac{\text{sen}(\pi z / \hat{H})}{\text{sen}(\pi H / 2\hat{H})} \right| \quad \text{B.24}$$

Fazendo-se o balanço de calor desprezando-se a transferência de calor axial, obtêm-se / 62 /:

$$T_c(z) = T_r(z) + \frac{\pi P \cos(\pi z / \hat{H})}{2 K \hat{H} \text{sen}(\pi H / 2\hat{H})} \quad \text{B.25}$$

Inserindo-se as equações (B.21), (B.24), (B.25) em (B.19) e (B.20), e fazendo-se a transformada de Fourier, tem-se:

$$j\omega C_r t_r(z,w) + C_r V \frac{\partial t_r(z,w)}{\partial z} = K |t_c(z,w) - t_r(z,w)| + \frac{v(w)}{V} \left| \frac{\pi P \cos(\pi z / \hat{H})}{2\hat{H} \text{sen}(\pi H / 2\hat{H})} \left(0,8 - \frac{C_r}{\rho' c_p f_r V_0} \right) \right|$$

B.26

$$j\omega C_c t_c(z, \omega) = p(z, \omega) - K | t_c(z, \omega) - t_r(z, \omega) | -$$

$$- \frac{0,8 v(\omega)}{v} \cdot \frac{\pi P \cos(\pi z / \bar{H})}{2\bar{H} \sin(\pi H / 2\bar{H})} \quad \text{B.27}$$

Num cerne pequeno, semelhante ao do reator IEAR-1 o acoplamento neutrônico entre diferentes zonas é tão forte que nenhuma mudança de fase ocorrerá no fluxo de nêutrons, entre dois pontos espaciais, a baixa frequência; portanto, a seguinte relação será válida:

$$p(z, \omega) = p(\omega) \quad p(z) = p(\omega) \frac{\pi \cos(\pi z / \bar{H})}{2\bar{H} \sin(\pi H / 2\bar{H})} \quad \text{B.28}$$

As expressões de $t_c(z, \omega)$ podem ser deduzidas substituindo-se a expressão de $p(z, \omega)$ e resolvendo-se as equações (B.26) e (B.27) / 24 /, soluções, estas, que dependem das flutuações da temperatura de entrada do refrigerante $t(\omega)$, das flutuações da velocidade do mesmo $v(\omega)$ e das flutuações de potência $p(\omega)$.

De acordo com a teoria de um reator puntual, uma flutuação na potência, devida a uma pequena flutuação na reatividade, é dada por / 62, 24, 51 /,

$$p(\omega) = P H_0(\omega) \Delta\rho(\omega) \quad \text{B.29}$$

onde:

$\Delta\rho(w)$ = flutuação da reatividade no domínio de frequência

$H_0(w)$ = função de transferência de reatividade à potência zero.

A relação entre $\Delta\rho(w)$ e as flutuações da temperatura pode ser dada pelos coeficientes de temperatura de reatividade μ_r e μ_c / 9 , 40 /.

$$\Delta\rho(w) = \mu_r \langle t_r(w) \rangle + \mu_c \langle t_c(w) \rangle \quad \text{B.30}$$

onde:

μ_c = coeficiente de temperatura de reatividade do combustível

μ_r = coeficiente de temperatura de reatividade do refrigerante

$$\langle t_c(w) \rangle = \frac{\int_{-H/2}^{+H/2} t_c(z,w) \cos^2(\pi z/H) dz}{\int_{-H/2}^{+H/2} \cos^2(\pi z/H) dz} \quad / 9 , 24 , 62 / \quad \text{B.31}$$

$$\langle t_r(w) \rangle = \frac{\int_{-H/2}^{+H/2} t_r(z,w) \cos^2(\pi z/H) dz}{\int_{-H/2}^{+H/2} \cos^2(\pi z/H) dz} \quad / 9 , 24 , 62 / \quad \text{B.32}$$

Portanto, da expressão (B.29), pode ser deduzida uma relação explícita de $p(w)/P$ e calculada da DEP em função do conjunto de flutuações da temperatura de entrada e velocidade do refrigerante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBRECHT, R.W. & JESS, G.M. Reactor noise experiments in reflected plutonium assemblies. In: UHRIG, R.E., coordinador. Neutron noise, waves and pulse propagation: proceedings of a symposium at the University of Florida, Gainesville, February 14-16, 1966. Oak Ridge, Tenn., U.S. Atomic Energy Commission, May 1967. p.381-98. (CONF-660206).
2. AUSTIN, D.T.; ZOLOTAR, B.A.; CADY, K.B. Comparison of the waiting-time alpha with the Rossi-alpha. Trans. Am. Nucl. Soc., 10:591-2, 1967.
3. BABALA, D. Point-reactor theory of Rossi-alpha experiment. Nucl. Sci. Engng, 28:237-42, 1967.
4. BABALA, D. On the theory of Rossi-alpha experiment in Reactor Noise Studies. Nucl. Sci. Engng, 26:418-9, 1966.
5. BABALA, D. & OGRIN, R. Measurement of the prompt neutron decay constant of the NORA reactor by the internal distribution technique. Nucl. Sci. Engng, 29:367-72, 1967.
6. BADGLEY, R.W. & UHRIG, R.E. Power spectral density measurements in a subcritical nuclear reactor. Nucl. Sci. Engng, 19:158-63, 1964.
7. BENDAT, J.S. & PERSOL, A.G. Random data: analysis and measurement procedures. New York, N.Y., Wiley, 1971.
8. BIERMANN, S.R.; GARLICK, K.L.; ALBRECHT, R.W. Complementary use of pulsed-neutron and reactor-noise measurements. Nucl. Sci. Engng, 22:206-14, 1965.
9. BOARDMAN, F.D. Noise measurements in the Dounreay Fast Reactor, noise analysis in nuclear system. In: UHRIG, R. E., coordinador. Noise analysis in nuclear systems: proceedings of a symposium held at University of Florida, November 4-6, 1963. sem local, editor, data p.469.500. (TID-7679).

10. BORGWALDT, H. & STEGEMANN, D. A common theory for neutron noise analysis experiments in nuclear reactor. Nukleonik, 7:313-25, 1965.
11. BOUZYK, J.; CIECHANOWICZ, W.; FILIPCZAK, W.; LATEK, S. Reactor noise analysis by analogue computer techniques. Nukleonika, 13:815-25, 1968.
12. BRYCE, D.H. Some comments on the Rossi- α experiment. Nukleonik, 7:428, 1965.
13. CHRISTENSON, H.; BABALA, D.; BERGEM, T.; JOVANOVIC, S.; STORMARK, E.; SUWALSKI, W. A review of NORA project noise experiments. In: UHRIG, R.E., coordenador. Neutron noise waves and pulse propagation: proceedings of a symposium at the University of Florida Gainesville, February 14-16, 1966. Oak Ridge, Tenn., U.S. Atomic Energy Commission, May 1967. p.503-30. (CONF - 660206).
14. COHN, C.E. Determination of reactor kinetic parameters by Pile noise analysis. Nucl. Sci. Engng, 5:331-5, 1959.
15. COHN, C.E. A simplified theory of pile noise. Nucl. Sci. Engng, 7:472-5, 1960.
16. COURANT, E.D. & WALLACE, P.R. Fluctuations of the number of neutron in a Pile. Phys. Rev., 72(11):1038-48, 1947.
17. DRAGT, J.B. Reactor noise analysis by means of polarity correlation. Nukleonik, 8:225-6, 1966.
18. FEYMMAN, R.; HOFFMANN, F. de; SERBER, R. Dispersion of the neutron emission in U^{235} fission. J. nucl. Energy, 3:64-9, 1966.
19. FRY, D.N. Experience in reactor malfunction diagnosis using on-line noise analysis. Nucl. Technol., 10:273-82, 1970.

20. FRY, D.N.; KRYTER, R.C.; ROBINSON, J.C. Analysis of neutron-density oscillations resulting core Barrel motion in a PWR Nuclear Power Plant. Ann. nucl. Energy , 2:341-51, 1975.
21. GROTON, S. Transfer function measurement of ionization chambers with the use of uncorrelated reactor noise . J. Nucl. Sci. Technol. , 3:359-62, 1966.
22. IIJIMA, T. Remark on Rossi-alpha experiment. Nukeonik , 10:93-4, 1967.
23. KO, Y.C.; MA, P.Y.; CHIEN, J.P. The measurement of reactor noise by means of a multiscaler analyzer . Trans. Am. nucl. Soc. , 9(2):507-8, 1966.
24. KOSALY, A.G. & MESKO, L. Remarks on the transfer function relating inlet temperature fluctuations to neutron noise. Atomkernenergie , 20:33-6, 1972.
25. KOSALY, A.G. & WILLIAMS, M.M.R. Point theory of the neutron noise induced by inlet temperature fluctuations and Randon mechanical vibrations. Atomkernenergie , 18:203-8, 1971.
26. KUNZE, J.F.; PINLOCK, G.D.; SLIMS, F.L.; WALSH, W.P. Rossi alpha measurements on a multiple-component lifetime system. Trans. Am. nucl. Soc. , 9(2):467-8, 1966.
27. KURUHARA, K. & SEKIYA, T. A stochastic operator method of calculating the time interval distributions in neutron detection. J.Nucl. Sci. Technol. , 6:28-34, 1969.
28. McCREARY, H.S. & BAYARD, R.T. A neutron sensitive ionization chamber with electrically adjusted gamma compensation. Rev. scient. Instrum. , 25(2):161-4, Feb. 1954.
29. MATTHES, W. Statistical fluctuations and their correlation in reactor neutron distribution. Nukleonik , 4:213-26, 1962.

30. MESTINIK F9, J. A distribuição espacial do fluxo de nêutrons no núcleo do reator IEAR-1 obtida por meio da - ativação de folhas. São Paulo, 1978. (Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo).
31. MOGILNER, A.J. & SHVETSOV, D.M. Statistical methods of measuring the absolute Power of a Reactor. J. nucl. Energy, 3:64-9, 1956.
32. MOORE, M.N. The determination of reactor transfer functions from measurement at steady operation. Nucl. Sci. Engng, 3:387-94, 1958.
33. MORISHIMA, N. Theory of stochastic fluctuations in a power reactor. J. Nucl. Sci. Technol., 10(1):29-44, 1973.
34. NOMURA, T. Reactivity measurements by reactor noise analysis using two-detector correlation method. J. Nucl. Sci. Technol., 3:14-19, 1966.
35. NOMURA, T. & YAMAZI, K. Measurements of subcritical reactor noise spectra by correlation method. J. Nucl. Sci. Technol., 2:236-7, 1965.
36. NOMURA, T.; GOTOH, S.; YAMAKI, K. Reactivity measurements by the two-detector cross-correlation method and super-critical-reactor noise analysis. In: UHRIG, R.E., coordenador. Neutron noise, waves, and pulse propagation: proceedings of a symposium at the University of Florida, Gainesville, February 14-16, 1966. Oak Ridge, Tenn., U.S. Atomic Energy Commission, May 1967. p.217-46. (CONF. 560206).
37. ORNDOFF, J.D. Prompt neutron periods of metal critical assemblies. Nucl. Sci. Engng, 2:450-60, 1957.
38. RANDALL, R.L. & GRIFFIN, C.W. Application of power spectra to reactor-system analysis. In: UHRIG, R.E., coordenador. Noise analysis in nuclear systems: proceedings of a symposium held at University of Florida, November 4-6, 1963. sem local, editor, data. p.107-33. (TIO-7679).

39. RICKER, C.W.; FRY, D.N.; MANN, F.R.; HANOVER, S.H. Investigation of negative reactivity measurement by neutron-fluctuation analysis. In: UHRIG, R.E., coordinator. Noise analysis in nuclear systems: proceedings of a symposium held at University of Florida, November 4-6, 1963. sem local, editor, data. p.171-81. (TID-7679).
40. ROBINSON, J.C. Analysis of neutron fluctuation spectra in the Oak Ridge Research Reactor and the High Flux Isotope Reactor. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., 1967. (ORNL-4149).
41. SAITO, K. Analytical study of operating reactor noise on a single channel and a single phase flow model (I). Propagation of noise sources. J. Nucl. Sci. Technol., 10:259-67, 1973.
42. SAITO, K. Analytical study of operating reactor noise on a single channel and a single phase flow model (II), noise sources. J. Nucl. Sci. Technol., 10(6):348-52, 1973.
43. SAITO, K. Some basic relations in the waiting time analysis of neutron counting statistics. J. Nucl. Sci. Technol., 6(10):604-7, 1969.
44. SAITO, K. On the theory of Power Reactor Noise, I. Ann. Nucl. Sci. Engng., 1:31-48, 1974.
45. SAITO, K. On the theory of Power Reactor Noise, II. Ann. Nucl. Sci. Engng., 1:107-28, 1974.
46. SAITO, K. On the theory of Power Reactor Noise, III. Ann. Nucl. Sci. Engng., 1:209-21, 1974.
47. SCHULTZ, M.A. Shutdown reactivity measurements using noise techniques. In: UHRIG, R.E., coordinator. Noise analysis in nuclear systems: proceedings of a symposium held at University of Florida, November 4-6, 1963. sem local, editor, data. p.135-54. (TID-7679).

48. SCHWALM, V.D. Some remarks on failure detection in nuclear power reactor by noise measurements. Atomkernenergie, 19:263-70, 1972.
49. SEIFRITZ, W. At-power reactor noise induced by fluctuations of the coolant flow. Atomkernenergie, 16:29-34, 1970.
50. SEIFRITZ, W. & STEGEMANN, D. Comments on the comparison between cross and autospectral density measurements in nuclear reactors. Nukleonik, 10(3):158-61, 1967.
51. SEIFRITZ, W. & STEGEMANN, D. Reactor-noise analysis. Atom. Energy Rev., 9(1):129-76, 1971.
52. SEIFRITZ, W.; STEGEMANN, D.; VATH, W. Two-detector cross correlation experiments in the fast-thermal Argonaut Reactor (Stark). In: UHRIG, R.E., coordenador. Neutron noise, waves, and pulse propagation: proceedings of a symposium the University of Florida, Gainesville, February 14-16, 1966. Oak Ridge, Tenn., U.S. Atomic Energy Commission May, 1967. p.195-216. (CONF-660206).
53. SHRINIVASAN, M. & SAHNI, D.C. A modified statistical technique for the measurement of α in fast and intermediate reactor assemblies. Nukleonik, 9:155-7, 1967.
54. STEPHENSON, S.E.; ROUX, D.P.; FRY, D.N. Neutron fluctuation spectra in the Oak Ridge Research Reactor. Oak Ridge, Tenn., Oak Ridge National Lab., 1966. (ORNL-TM-1401).
55. SUZUKI, E. A method for measuring absolute reactor power through neutron fluctuation. J. Nucl. Sci. Technol., 3(3):98-105, 1966.
56. THIE, J.A. Noise analysis in reactor safety. Nucl. Saf., 7(3):271-8, 1966.

57. THIE, J.A. Noise in power reactors. A review of experiment analysis and theory. Reactor Fuel Process Technol., 11(4):167-71, 1968.
- ✓ 58. THIE, J. A. Operating information from reactor noise. Nucleonics, 21(3):72-5, 1963.
59. THIE, J.A. Reactor noise. New York, N.Y., Rowman and Littlefield, 1963.
60. UHRIG, R.E. Random noise techniques in nuclear reactor systems. New York, N.Y., Ronaldy, 1970.
61. UHRIG, R.E. Random variations of neutron density in a subcritical assembly. Trans. Am. nucl. Soc. 4(1):85-6, 1961.
62. UITERT, G.C. van & DAM, H. van . Analysis of pool-type reactor noise. Progr. Nucl. Energy, 1:649-62, 1977.
63. YAMADA, S. Reactor noise analysis of Swimming Pool Type Reactor. J. Nucl. Sci. Technol., 1:130-6, 1964.
64. ZOLOTUKHIN, V.G. & MOGILNER, A.I. Atomn. Energ. 15:11, 1963. apud SEIFRITZ, W. & STEGEMANN, D. Reactor-noise analysis. At. Energy Rev., 9(1):142, 1971.