

**APLICAÇÃO DE TÉCNICA DE RECONHECIMENTO PADRÃO A SINAIS
ALEATÓRIOS PARA VIGILÂNCIA AUTOMÁTICA DE REATORES
NUCLEARES E MÁQUINAS ROTATIVAS**

Jamii Alves do Nascimento

**PUBLICAÇÃO IPEN 41
IPEN - Pub - 41**

FEVEREIRO/1982

CONSELHO DELIBERATIVO

MEMBROS

Prof. Dr. Luiz Cintra do Prado – Presidente
Dr. Edgardo Azevedo Soares Júnior – Vice-Presidente

CONSELHEIROS

Dr. Hécio Modesto da Costa
Dr. Ivano Humbert Marchesi
Prof. Dr. Waldyr Muniz Oliva
Prof. Dr. José Augusto Martins

REPRESENTANTES

Dr. Jacob Charcot Pereira Rios
Dr. Samuel Angarita Ferreira da Silva

SUPERINTENDENTE

Hernani Augusto Lopes de Amorim

**APLICAÇÃO DE TÉCNICA DE RECONHECIMENTO PADRÃO A SINAIS
ALEATÓRIOS PARA VIGILÂNCIA AUTOMÁTICA DE REATORES
NUCLEARES E MÁQUINAS ROTATIVAS**

Jamil Alves do Nascimento

CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
SÃO PAULO – BRASIL

Série PUBLICAÇÃO IPEN

INIS Categories and Descriptors

E24

PATTERN RECOGNITION: Reactors

REACTORS: Pattern recognition

INSPECTION: Reactors

STATISTICS: Pattern recognition

SIGNALS: Reactors

CEN

Recebida em Agosto 1981.

Aprovada para publicação em Dezembro 1981.

Nota: A redação, ortografia, conceitos e revisão final são de responsabilidade do Autor.

APLICAÇÃO DE TÉCNICA DE RECONHECIMENTO PADRÃO A SINAIS ALEATÓRIOS PARA VIGILÂNCIA AUTOMÁTICA DE REATORES NUCLEARES E MÁQUINAS ROTATIVAS*

Jamil Alves do Nascimento**

RESUMO

É descrito um programa automático de reconhecimento padrão, PSDREC, desenvolvido para vigilância automática de reatores nucleares e máquinas rotativas e a teoria relevante é esboçada. Análise por reconhecimento padrão da componente de ruído de parâmetros de sistemas dinâmicos é uma técnica poderosa para estabelecer a "normalidade do sistema". Este programa, que aplica 8 testes estatísticos a uma distribuição de densidade espectral de potência (DEP) calculada, foi instalado inicialmente em um computador PDP-11/45 no IPEN.

Neste trabalho ele foi usado para analisar separadamente sinais de três sistemas, a saber: um reator de potência BWR operacional (sinais neutrônicos), uma bomba de água e um motor diesel (sinais de vibrações). Resultados dos testes são considerados satisfatórios.

1 - INTRODUÇÃO

Muitos sistemas dinâmicos com que o homem trabalha atualmente são de natureza multivariável. Geram um número elevado de informações sobre seu estado de operação e requerem um número significativo de pessoas envolvidas na aquisição e análises destas informações. Adquirir e analisar estes dados é importante porque os resultados obtidos são elementos essenciais e vitais em um processo de decisão que afete o comportamento do sistema.

Para a monitoração de sistemas dinâmicos existem basicamente dois métodos⁽³⁾: o primeiro é o de um modelo aproximado obtido de considerações físicas, e o segundo é o de uma aproximação por análise de sinais e teoria de decisão para obter-se informações sobre as condições de operação do sistema observado. O presente trabalho está relacionado a este último tipo.

Em processos contínuos, como o da geração de energia elétrica, o manuseio de dados para fins de monitoração tem sido realizado por computadores, que também permitiu reviver teorias antes impossibilitadas de serem aplicadas para estes fins, como é o caso de métodos de análises estatística.

Uma técnica que utiliza estes recursos anteriores e que vem sendo estudada para vigilância de reatores nucleares^(3,4,5,10) e máquinas rotativas⁽¹⁰⁾ é o que se denomina reconhecimento padrão ('pattern recognition').

Um código de computação chamado PSDREC ('Power Spectrum Density Recognition') conjuga estes princípios anteriores e objetiva a monitoração automática do descritor de ruído DEP (Densidade Espectral de Potência), originalmente desenvolvido em ORNL⁽¹⁰⁾, foi implantado em um trabalho anterior⁽⁹⁾ em um computador PDP 11/45 do Centro de Engenharia Nuclear do IPEN.

* Extrato baseado em dissertação de mestrado apresentada no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) e financiada pelo IPEN, São Paulo - SP.

** Centro de Engenharia Nuclear - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) - Cx. Postal 11049 - 01000 - São Paulo - SP.

1 - Oak Ridge National Laboratory - E. U. A.

Neste trabalho foi estudada a teoria relacionada ao algoritmo sendo este testado com sinais aleatórios de três sistemas dinâmicos gravado em fita magnética, a saber: um reator nuclear¹ BWR operacional (sinais neutrônicos); um sistema motor elétrico bomba de água² e um motor diesel³ (sinais de vibração).

2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A metodologia de vigilância utiliza-se da análise espectral. A técnica para mudanças de domínio de análise é a conhecida FFT ('Fast Fourier Transform'), descrita⁽²⁾ como um método eficiente de cálculo da transformada de Fourier discreta e finita (TDF), definida por:

$$S_x(m\Delta f) = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} x(n\Delta t) \exp\left(\frac{-i2\pi mn}{N}\right), \quad m = 0, 1, \dots, N-1, \quad (1)$$

onde $x(n\Delta t)$ são os pontos digitados do sinal temporal $x(t)$.

A amostragem de um sinal temporal em N pontos a intervalos Δt possibilitará uma frequência máxima de análise (f_{an}), tal que:

$$\Delta t = \frac{1}{2f_{an}} = \frac{1}{f_{am}}, \quad e \quad (2)$$

$$\Delta f = \frac{1}{T}; \quad T = N\Delta t,$$

onde f_{am} = frequência de amostragem do sinal temporal.

2.1 – A Função Densidade Espectral de Potência (DEP)

No domínio da frequência a potência de um sinal no intervalo de f a $f + \Delta f$ é definida como o valor quadrático médio do sinal dentro deste intervalo,

$$\psi^2(f, \Delta f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x^2(t, f, \Delta f) dt. \quad (3)$$

Para Δf pequeno define-se uma função densidade espectral de potência $G_x(f)^{(1)}$, positiva e real, tal que:

$$\psi^2(f, \Delta f) \simeq G_x(f) \Delta f. \quad (4)$$

Sendo S_x a TDF do sinal temporal $x(t)$, a função DEP pode ser escrita de um modo mais conveniente,

$$G_x(f) = S_x(f) S_x^*(f), \quad (5)$$

onde (*) indica o complexo conjugado.

1 - Central de Brunsbuettel, Rep. Fed. Alem. (BRD).

2 - Conjunto de Testes de Bombas da Firma KSB de Jundiaí - SP.

3 - Motor Diesel do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT - SP).

3 – METODOLOGIA DA TÉCNICA DE VIGILÂNCIA

O programa PSDREC incorpora a técnica de reconhecimento padrão e possui duas fases distintas:

- 1 - Período de Aprendizado ('Learning Period'); durante esta fase o algoritmo forma dois espectros básicos e aprende o comportamento estatístico do sistema. O sistema é considerado em operação normal. O aprendizado é supervisionado, isto é, os dados apresentados ao algoritmo são de uma classe conhecida.
- 2 - Período de Monitoração ('Monitoring Period'); nesta fase o algoritmo classifica, com base nas informações passadas, se o sinal que está sendo analisado é normal ou não. Se condições normais prevalecerem os critérios de aceitação são atualizados em intervalos de tempos especificados.

Esta técnica garante ao algoritmo duas propriedades importantes: adaptabilidade a características dos dados e capacidade de aprender, seguir mudanças e atualizar os dados básicos.

3.1 – Espectros Básicos

O programa PSDREC mantém armazenado dois espectros básicos com os quais procura descrever as taxas com que uma mudança ocorre:

- 1 - DEPT (Densidade Espectral de Potência Tendência) - Espectro Tendência; caracteriza o comportamento mais recente de operação normal do sistema. No período de monitoração, de tempos em tempos, um novo DEPT substitui o antigo, se condições normais prevalecerem. Este espectro tem a característica de se adaptar a pequenas mudanças normais do sistema. Comparações contra este espectro são sensíveis a fenômenos de desenvolvimento rápido ou abrupto.
- 2 - DEPB (Densidade Espectral de Potência Básica) - Espectro Básico Inicial; caracteriza o comportamento inicial de operação normal do sistema, este nunca é trocado. Comparações contra este espectro permite uma sensibilidade máxima para fenômenos de desenvolvimento lento.

Além destes dois espectros é calculado um espectro instantâneo (DEPZ) para comparação com o espectro tendência.

3.2 – Discriminantes de Decisão

Os discriminantes de decisão são as funções calculadas que serão comparadas com valores fixos, níveis de aceitação, para a verificação da "normalidade do sistema". O PSDREC calcula 8 discriminantes que procuram detetar as possíveis mudanças espectrais que possam ocorrer, tais como, (I) mudança na integral de potência, (II) desvio de amplitude em uma dada frequência, (III) deslocamentos de picos em frequência, e (IV) mudanças na forma espectral.

Inicialmente o algoritmo calcula critérios de aceitação teóricos para os discriminantes de decisão de dados de entrada fornecidos. Estes critérios são derivados da hipótese de que os dados amostrados tem distribuição de amplitudes Gaussiana e que as estimativas das DEP's são independentes. Os critérios de aceitação de normalidade possuem dois níveis, um nível de alerta e um de perigo. A violação do nível

de alerta por duas vezes consecutivas ou a violação do nível de perigo somente uma vez, por qualquer discriminante ocasionará uma advertência e os critérios de aceitação de normalidade não serão atualizados.

3.2.1 – Definição dos Discriminantes

Os discriminantes de decisão são baseados na razão de uma DEP de teste $P(f_i)$ com um espectro básico $P^*(f_i)$, onde f_i é uma frequência da estimativa.

Os cinco primeiros (D_1, D_{II}, \dots, D_V) são discriminantes paramétricos e assumem que o sinal analisado tem distribuição de amplitude Gaussiana.

D_1 é um discriminante sensível à mudança na integral de potência em r estimativas, sendo dado por,

$$D_1 = \log_{10} \frac{\sum_1^r P(f_i)}{\sum_1^r P^*(f_i)} \quad (6)$$

Os discriminantes D_{II} e D_{III} são medidas simples de desvios em frequências, e são dados por,

$$D_{II} = \min \left\{ \log_{10} \frac{P(f_i)}{P^*(f_i)} \right\}, \forall_i \quad (7)$$

$$D_{III} = \max \left\{ \log_{10} \frac{P(f_i)}{P^*(f_i)} \right\}, \forall_i \quad (8)$$

O discriminante D_{IV} é a média da razão calculada em r estimativas; é uma medida da diferença integral entre espectros,

$$D_{IV} = \frac{1}{r} \sum_1^r \left[\log_{10} \frac{P(f_i)}{P^*(f_i)} \right] \quad (9)$$

Para evitar os efeitos de cancelamento do discriminante D_{IV} construiu-se D_V , como sendo,

$$D_V = \frac{1}{r} \sum_1^r \left[\log_{10} \frac{P(f_i)}{P^*(f_i)} \right]^2 \quad (10)$$

Os discriminantes não paramétricos D_{VI} , D_{VII} e D_{VIII} estão baseados no teste do sinal, no número de sequências de sinais ('runs') e na maior sequência de sinal que podem ter as razões logarítmicas em relação à mediana da distribuição assumida,

$$D_{VI} = \text{maior} \{(\text{n}^\circ \text{ razões log} > \text{mediana}) \text{ ou } (\text{n}^\circ \text{ de razões log} < \text{mediana})\}, \quad (11)$$

$$D_{VII} = \{(\text{n}^\circ \text{ de runs} > \text{mediana}) + (\text{n}^\circ \text{ de runs} < \text{mediana})\}, \quad (12)$$

$$D_{VIII} = \text{máximo comprimento} \{(\text{runs} > \text{mediana}) \text{ ou } (\text{runs} < \text{mediana})\}, \quad (13)$$

3.2.2 – Critérios Limites Teóricos

Assumindo que o sinal temporal tem distribuição de amplitudes Gaussiana e sendo a transformada de Fourier uma transformação linear⁽¹⁾, a função complexa resultante tem, em cada frequência, componentes também Gaussianas. Para ter-se uma estimativa consistente da verdadeira DEP calcula-se uma DEP média (\hat{P}) em n estimativas. Notando que cada frequência tem distribuição χ^2 com $2n$ graus de liberdade, tem-se para a razão de duas DEP's tomadas a tempos diferentes a distribuição $F_{2n_1, 2n_2}$ ⁽¹⁾, i. e.

$$F_{2n_1, 2n_2} = \frac{\hat{P}_1(f_i)}{\hat{P}_2(f_i)} = \frac{2n_2 \chi_{2n_1}^2}{2n_1 \chi_{2n_2}^2}. \quad (14)$$

Esta nova variável não é simétrica se $n_2 > 2$ e é positiva. Para melhorar as características de simetria faz-se uma transformação logarítmica deste modo as características da distribuição normal podem ser usadas com mais confiança.

O cálculo das médias e variâncias teóricas dos discriminantes paramétricos são feitos por aproximações funcionais⁽¹⁰⁾. Para os discriminantes não paramétricos considerando grandes conjuntos de dados, pode-se construir variáveis normais padrões e testar-se os discriminantes.

3.2.3 – Correção e Atualização

A estatística amostral calculada (médias e variâncias) durante o período de aprendizado é usada para corrigir os valores teóricos, levando-se em conta que a distribuição teórica está correta e que somente as médias e variâncias contêm erros. Basicamente o que se faz é uma normalização dos discriminantes com os parâmetros calculados e os critérios de aceitação com as médias e variâncias teóricas calculadas.

Se condições normais prevalecem durante o período de monitoração um novo critério de aceitação é obtido do antigo critério por correção com uma razão do erro novo com o erro antigo.

3.3 – Implementação do Programa PSDREC

O PSDREC está implantado em um computador PDP-11/45 com 32 "kilowords" de memória e 1,25 "megawords" de memória virtual em disco magnético. O sistema digital está configurado com os periféricos: um terminal de vídeo, um terminal impressor, uma unidade de fita magnética e um conversor A/D com 192 canais. O sistema operacional utilizado é o RSX11M da Digital.

A acomodação do programa na memória foi realizada em estrutura 'overlay'.

Na Figura 1 apresenta-se um fluxograma sucinto da tarefa executada pelo algoritmo.

4 – TESTES DE DESEMPENHO DO ALGORITMO

Apesar de uma certa generalidade de utilização do programa existem algumas observações para seu uso, (I) a estatística utilizada é derivada estritamente para o descritor de ruído DEP, (II) a distribuição assumida é a Gaussiana, (III) no período de aprendizado o sistema que está sendo analisado é assumido em operação normal, (IV) a detecção de condições anormais é determinada por discriminantes de decisão, (V) não tem capacidade de diagnosticar as anomalias acusadas, (VI) só é aplicável a estado estacionário do sistema.

O algoritmo foi testado com sinais gravados em fita magnética de parâmetros amplamente discutidos como significativos para análise de ruído e monitoração dos sistemas onde foram obtidos. Estes parâmetros são: fluxo de nêutrons^(4,5,13) de reatores de potência e vibração^(6,7) de máquinas rotativas.

Os sinais neutrônicos foram obtidos por detectores localizados dentro do caroço de um reator nuclear tipo BWR da central alemã de Brunbuettel⁽¹²⁾. Os detectores localizavam-se em 2 posições horizontais com quatro detectores verticais cada uma, Figura 2. Estes sinais foram filtrados com filtro passa baixa em 40 Hz e filtro passa alta em 1 Hz e gravados em fita de 14 canais FM. Posteriormente esta fita foi reprocessada para fita de 2 canais FM.

Os sinais de vibração foram obtidos por acelerômetros posicionados em dois sistemas rotativos: um sistema motor elétrico/bomba de água da firma KSB de Jundiaí, e um motor diesel do IPT⁽⁸⁾. No Conjunto motor/bomba os acelerômetros foram posicionados na bomba propriamente (sinal B) e no acoplador do eixo motor/bomba (sinal A). No motor diesel os acelerômetros foram posicionados no cabeçote do motor (sinal A) e em um sistema simulador de carga (sinal B) acoplado ao motor.

Para reprodução e preparação dos sinais foi montado o sistema eletrônico da Figura 3. O gravador utilizado é de 4 canais sendo 2 no modo FM e 2 direto, foi necessário uma fonte DC para elevar o nível do sinal de saída do gravador ao intervalo aceito pelo conversor A/D. O filtro "anti-aliasing" teve por finalidade atenuar os efeitos de superposição de informação das frequências mais altas nas mais baixas. Um disparador externo para o conversor foi utilizado a fim de obter-se frequências de amostragem mais baixas do que a obtida com disparo no modo interno. Este sistema foi testado preliminarmente com ruído branco para verificação de sua operacionalidade.

4.1 – Definições de Taxas de Alarme

Em programas para vigilância automática de sistemas dinâmicos deve-se ter uma taxa de alarme falso pequena, isto é, situações consideradas normais não devem ser acusadas como anormais. Para se avaliar esta característica do algoritmo definiu-se 2 taxas de alarme:

1 - Taxa de Alarme (TA) (%)

$$T. A = \frac{\text{Número de condições suspeitas acusadas pelo algoritmo}}{\text{Número total de comparações instantâneas realizadas}} \times 100$$

Esta taxa é uma indicação de:

- a) Alarme falso se o sinal monitorado for o mesmo do aprendizado.

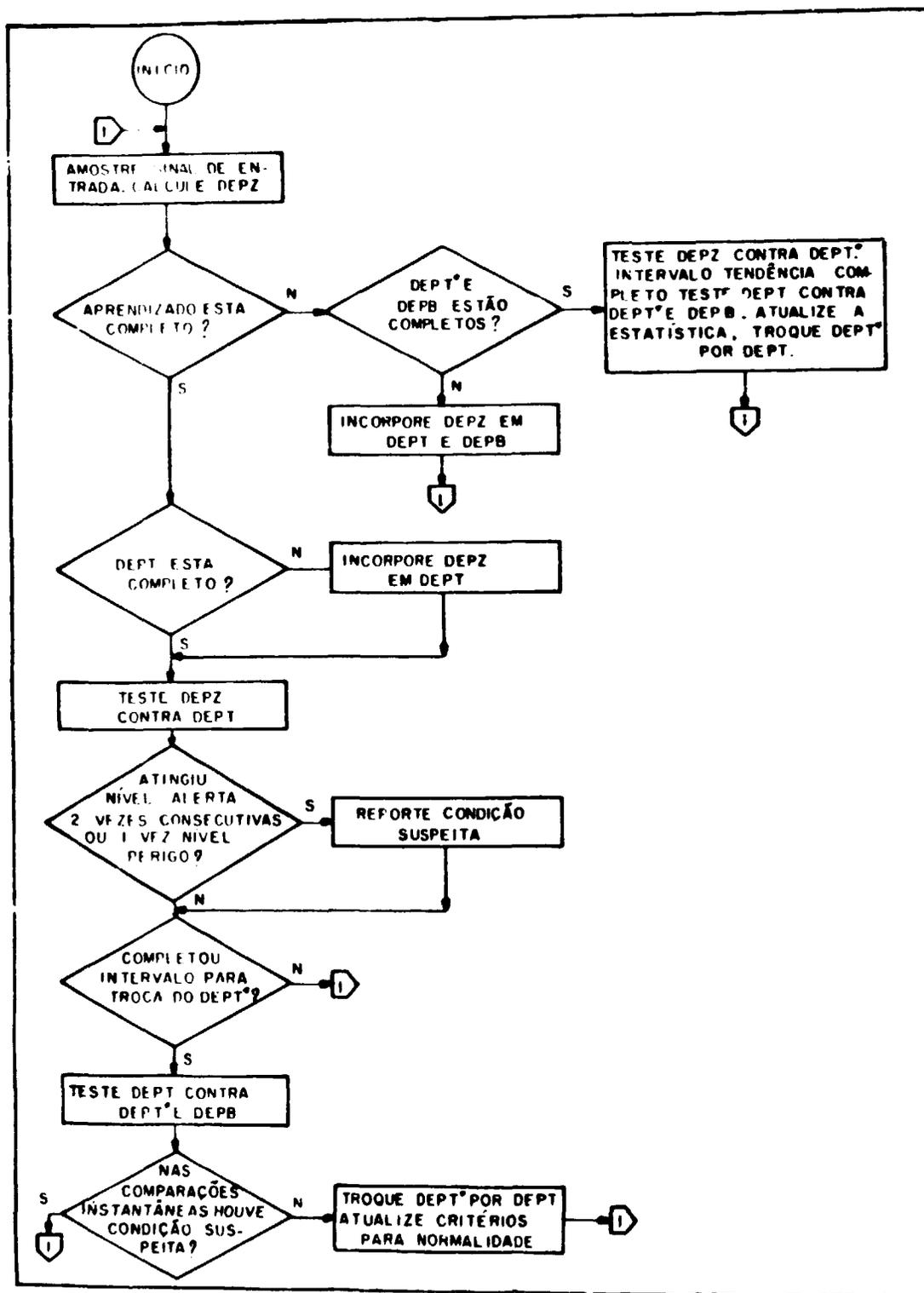


Figura 1 – Fluxograma sucinto do programa PSDREC.

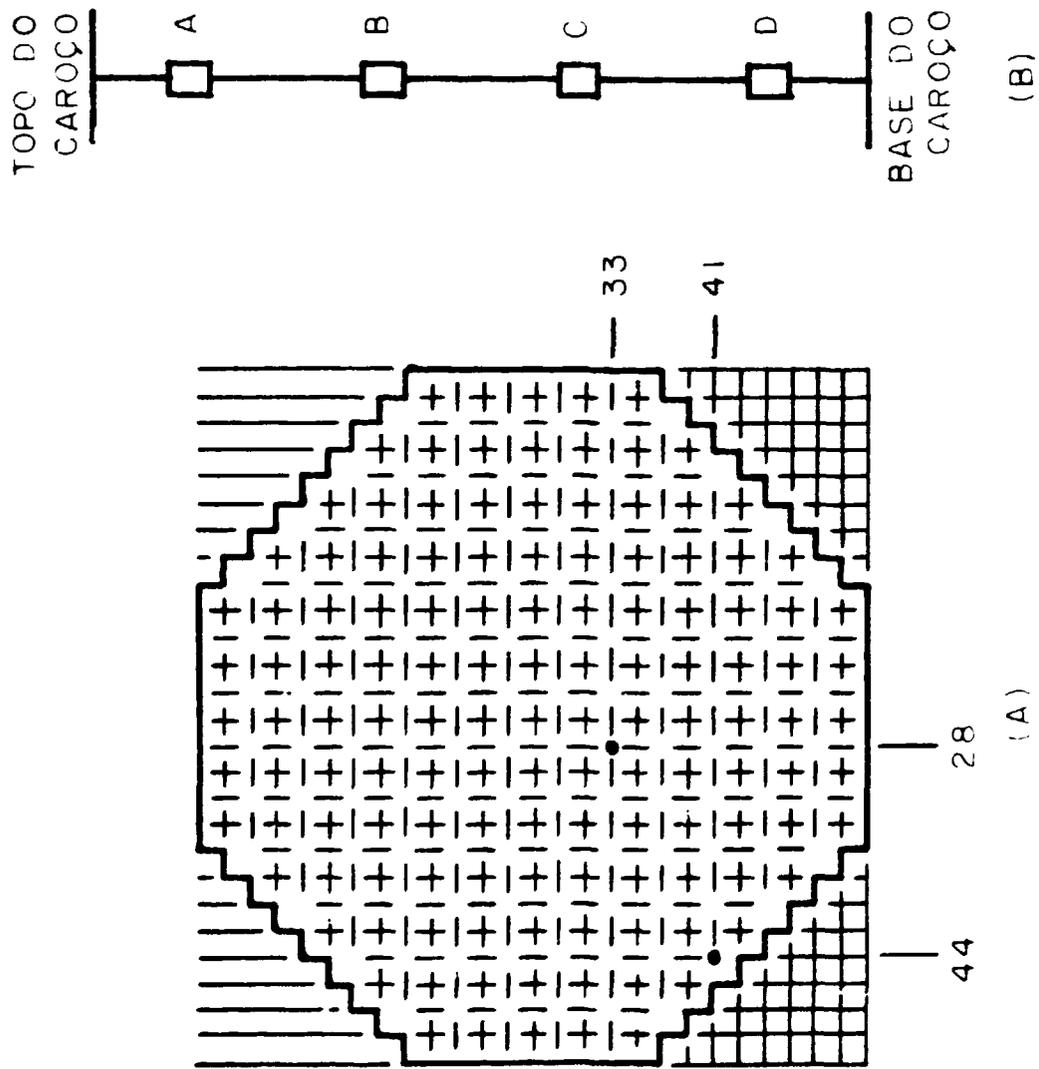


Figure 2 -- a) Localização das fileiras de detectores dentro do caroço do reator; b) posicionamento vertical dos detectores em uma fileira.

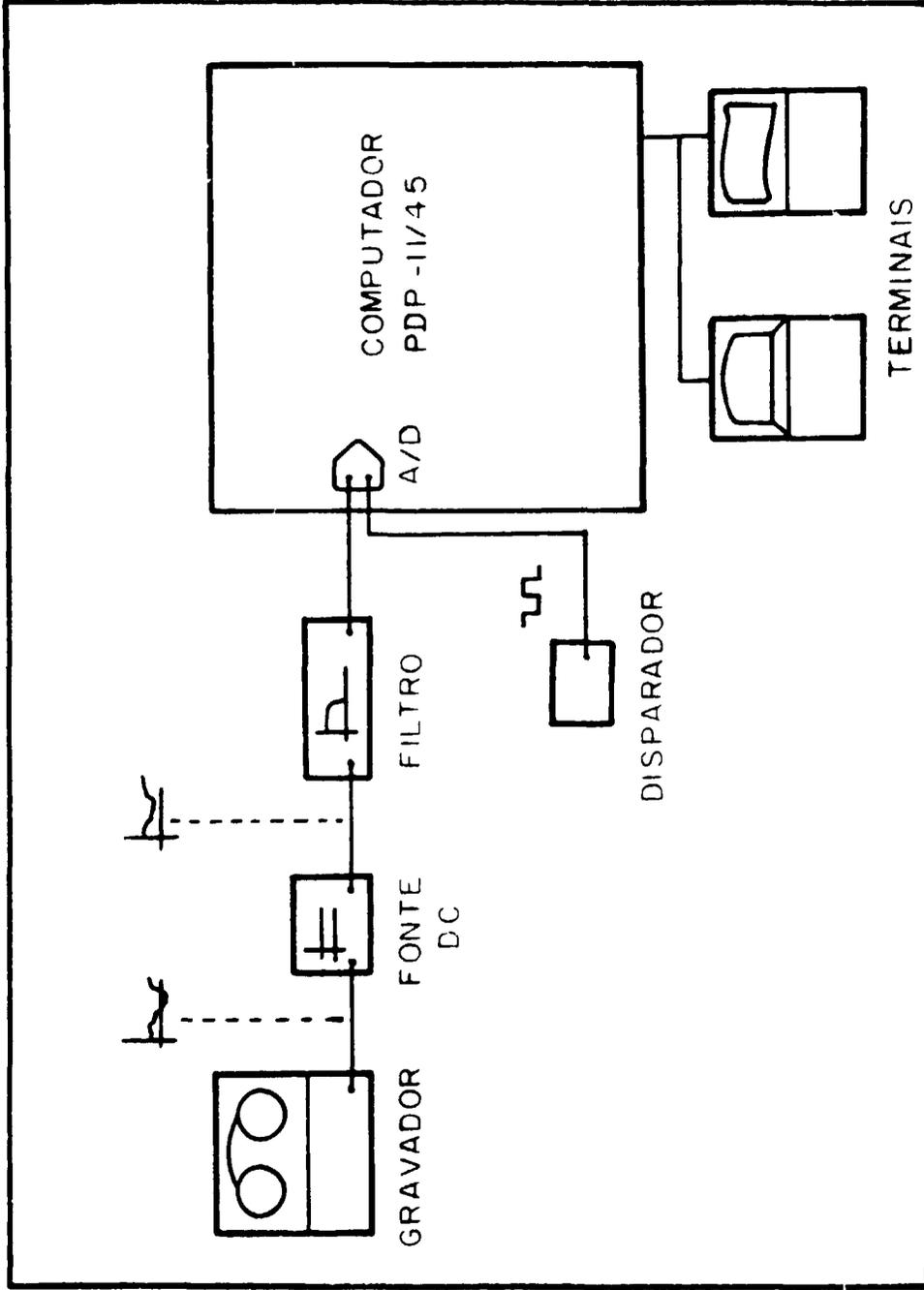


Figura 3 - Sistema eletrônico montado para os testes de desempenho do programa PSDREC.

- b) Se o sinal monitorado for o mesmo sinal do aprendido para um outro regime de trabalho do sistema, ou um sinal de outro ponto do sistema, é uma indicação da sensibilidade do algoritmo no reconhecimento da diferença entre o sinal aprendido e o monitorado.

2 - Taxa de Alarme de Discriminante (TAD) (%)

Para ter-se uma característica do desempenho de cada discriminante em acusar diferenças nos espectros definiu-se esta taxa;

$$TAD = \frac{\text{Número total de vezes que o discriminante } D_i \text{ (} i = 1, \dots, VIII \text{) excedeu o limite de alerta ou perigo nas comparações instantâneas}}{\text{Número total de comparações instantâneas realizadas}} \times 100$$

Procedimento realizado nos testes de desempenho do programa:

- 1 - Aprendizado pelo algoritmo das características de um sinal obtido em um determinado regime de trabalho do sistema.
- 2 - Finalizado o aprendizado, monitoração deste sinal.
- 3 - Simulação de uma anomalia genérica com sinais obtidos no mesmo ponto em outros regimes de trabalho, ou outros sinais, obtidos em outros pontos do sistema.

Nos testes realizados um sinal diferente do sinal utilizado para o aprendizado tinha, para fins práticos de análise, uma conotação anômala.

4.2 – Definição dos Parâmetros de Análise.

Como o algoritmo faz análise no domínio da frequência os seguintes parâmetros precisam ser definidos:

- 1 - Frequência de análise (f_{an}).

Para o sistema motor elétrico/bomba de água o intervalo inicial de análise foi escolhido de acordo com a resposta dos acelerômetros em frequência. A resposta do acelerômetro decaiu de 3dB em aproximadamente 1000 Hz. Para este sistema esta foi a máxima frequência de análise. Para o motor diesel possuíamos 2 tipos de gravação, FM e Direto. Inicialmente escolheu-se o intervalo até a frequência de 1000 Hz devido a que a velocidade de gravação permitiu resposta até 1250 Hz. Posteriormente fizeram-se análises a frequências mais altas com a gravação direta, até 20.000 Hz. Esta última frequência foi escolhida de modo a evitar os efeitos da ressonância do acelerômetro.

Nos dados do reator primeiramente fez-se análises até a frequência de 40 Hz. Esta escolha deve-se a filtragens realizadas durante a gravação. Posteriormente fez-se uma análise mais precisa, até 25 Hz.

A escolha da frequência de corte (f_c) do filtro anti-aliasing foi determinada por estas frequências de análises máximas e foi de tal maneira que $f_c = 1,25 f_{an}$.

- 2 - A frequência de amostragem (f_{am})

A frequência de amostragem deve ser no mínimo o dobro da frequência de análise. Bendat⁽¹⁾ sugere uma frequência de amostragem de até quatro vezes a frequência de análise, no entanto, uma

frequência de amostragem ótima ainda é objeto de estudo. Nos testes usou-se $f_{am} = 4 \cdot f_{an}$.

3 - Resolução em frequência.

No sistema utilizado a máxima resolução possível é 512 frequências.

Para as análises dos sinais de vibração a resolução foi a máxima permitida. Os espectros destes sinais apresentam muitas ressonâncias umas perto das outras, uma resolução menor poderia mascarar estas ressonâncias.

Para os sinais neutrônicos a resolução escolhida foi a de 256 frequências. Esta escolha deve-se ao tempo de sinal disponível e a que os espectros destes sinais são bem comportados não apresentando ressonâncias muito juntas.

Período de Aprendizado

O período de aprendizado é um parâmetro difícil de se determinar. Sides⁽¹¹⁾ explicita 'algumas horas' como seu período de aprendizado. Piety⁽¹⁰⁾ apresenta 1 hora, enquanto que Gonzalez⁽⁵⁾ estabelece 12 horas. Esta variedade de tempos está relacionado ao pouco estudo realizado nesta área, ao tipo de reconhecimento padrão, a experiência do analista com o sistema. Portanto nos aspectos de aprendizado o empirismo prevalece.

Nos testes realizados o período de aprendizado esteve restrito pelo tempo de sinal gravado disponível, e foi o máximo permitido.

Para os sistemas motor/bomba, motor diesel e reator nuclear estes tempos foram de aproximadamente 6 minutos, 13 minutos e 100 minutos respectivamente.

6 – DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

A verificação do desempenho de algoritmo para vigilância automática é comprovada depois de muitas horas de testes reais. Como o tempo de sinal gravado era de alguns minutos ou dezenas de minutos não podemos tirar conclusões categóricas do desempenho do programa, além disso, a taxa de alarme falso adotada, que é o parâmetro quantitativo de desempenho precisa ser mais flexível do que em um teste "on-line" propriamente. Assim estipulou-se arbitrariamente que uma taxa TA de 25% era satisfatória para conclusões preliminares. Normalmente esta taxa deve ser pequena para um sistema de monitoração praticamente utilizável.

Analisando as Tabelas I, II, III e levando-se estas taxas, TA e TD, em consideração podemos afirmar:

- Nos testes com sinais neutrônicos e de vibração do conjunto do motor/bomba e motor diesel o algoritmo monitorou como satisfatório, os sinais do aprendizado, testes de Índice A, em 75%, 100% e 66% dos testes respectivamente.
- Nas simulações de situações anômalas, testes de Índices B e C, o programa apresentou quase sempre uma alta sensibilidade de reconhecimento (altas TAD e TA) da diferença de sinais, tanto para as situações de mudanças de regime (vazão e carga) como para a simulação de anomalias genéricas (sinais de outros pontos do sistema dinâmico).
- Com respeito ao desempenho de cada discriminante nos testes realizados é difícil estabelecer qual o discriminante mais eficiente no reconhecimento da diferença entre os sinais aprendido e o monitorado, isto porque os discriminantes são muitas vezes

Tabela I

Testes com Sinais Neutrônicos de um Reator Nuclear.

| TESTE Nº | INTERVALO DE ANÁLISE | APRENDIZADO | | MONITORAÇÃO | | TAXA DE ALARME DE DISCRIMINANTE (T. A. D.)% | | | | | | | | TAXA DE ALARME (T. A.)% |
|-------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|----------------------------------|
| | | DETECTOR (POSICÃO) | CLASSE POTÊNCIA (MWe) | DETECTOR (POSICÃO) | CLASSE POTÊNCIA (MWe) | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | |
| 1A | | A(28-33) | 783 | A(28-33) | 783 | - | - | - | - | - | 8 | - | 8 | - |
| 1B | | | | B(28-33) | 783 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | - | 25 | 50 |
| 2A | (0,3-40)HZ | D(28-33) | 783 | D(28-33) | 783 | - | 25 | 38 | 13 | 38 | 13 | 13 | 50 | 25 |
| 2B | | | | C(28-33) | 783 | - | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 3A | | D(44-41) | 783 | D(44-41) | 783 | - | - | - | - | - | - | 25 | 100 | 100 |
| 3B | | | | C(44-41) | 783 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 4A | | B(44-41) | 783 | B(44-41) | 783 | - | 25 | - | - | - | - | - | - | 25 |
| 5A | | | | A(28-33) | 783 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 6A | (0,1-15)HZ | D(28-33) | 783 | D(28-33) | 783 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7A | | | | B(44-41) | 783 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7B | | B(28-33) | 783 | B(28-33) | 783 | 100 | - | 50 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 8A | | | | D(44-41) | 783 | - | - | 100 | - | 100 | - | 100 | - | - |

Tabela II

Testes com Sinais de Vibração de um Sistema Motor Elétrico/bomba de Água.

| TESTE | INTERVALO DE ANÁLISE | APRENDIZADO | | | MONITORAÇÃO | | | TAXA DE ALARME DE DISCRIMINANTE (T. A. D.)% | | | | | | | | TAXA DE ALARME (T. A.)% | | |
|-------|----------------------|-------------|----------------------------|---------------|-------------|----------------------------|-------------|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------------------------|-----|-----|
| | | SINAL | CLASSE | | SINAL | CLASSE | | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | | | |
| | | | VAZÃO m ³ /hora | ROTAÇÃO N rpm | | VAZÃO m ³ /hora | ROTAÇÃO rpm | | | | | | | | | | | |
| 1A | | | | | A | 700 | 1780 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 1B | (4-1000)HZ | A | 700 | 1780 | A | 850 | 1780 | 100 | - | - | 100 | - | - | 25 | - | - | - | 50 |
| 1C | | | | | B | 700 | 1780 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 2A | | | | | B | 700 | 1780 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 25 | - |
| 2B | (4-1000)HZ | B | 700 | 1780 | B | 850 | 1780 | 37 | - | 25 | 62 | 25 | 12 | 50 | 12 | 50 | 12 | 12 |
| 2C | | | | | A | 700 | 1780 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |

redundantes. Para os sinais aleatórios testados raramente um discriminante apenas causa uma situação anômala ensaiada.

- Em monitoração "on-line" de sistemas dinâmicos um ponto importante é o tempo que o programa leva para reconhecer uma alteração 'significativa' das condições de operação. No programa PSDREC, para as situações ensaiadas, este tempo foi determinado basicamente pelo tempo de aquisição dos dados que compunham o espectro instantâneo. Para os sinais do reator foi de aproximadamente 2,6 e 7,6 minutos, para o sistema motor/bomba aproximadamente 16 seg, e para o motor diesel 27 seg e 30 seg.
- Com base nas afirmativas anteriores pode-se estabelecer preliminarmente que o algoritmo PSDREC mostrou ser potencialmente aplicável para fins de vigilância de reatores nucleares, utilizando-se sinais neutrônicos, e sistemas rotativos onde a vibração é um parâmetro importante para a verificação das condições de operação.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Dr. Dieter Stegemann, à firma KSB e ao IPT que forneceram os dados para este trabalho. Ao Dr. Lao Holland pelos incentivos durante o transcorrer do trabalho.

ABSTRACT

An automatic pattern recognition program PSDREC, developed for the surveillance of nuclear reactor and rotating machinery is described and the relevant theory is outlined. Pattern recognition analysis of noise signals is a powerful technique for assessing "system normality" in dynamic systems. This program, which applies 8 statistical tests to calculated power spectral density (PSD) distribution, was earlier installed in a PDP-11/45 computer at IPEN.

~~In this work it has been used to separately~~ ^{to} analyse recorded signals from three systems, namely an operational BWR power reactor (neutron signals), a water pump and a diesel engine (vibration signals). Results of the tests are considered satisfactory. *the results are good*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS*

1. BENDAT, J. S. & PERSOL, A. G. *Random data: analysis and measurement procedures*. New York, N. Y., Wiley, 1971.
2. COCHRAN, W. T.; COOLEY, J. W.; FAVIN, D. L.; HELMS, H. D.; KAENEL, R. A.; LANG, W. W.; MALING JR., G. C.; NELSON, D. E.; RADER, C. M.; WEELCH, P. D. What is the fast fourier transform, *IEEE Trans. Audio Electroacustics*, 15(2): 45-55, 1967.
3. DUBUISSON, B. & LAVISON, P. Surveillance of a nuclear reactor by use of a pattern recognition methodology. *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, 10(10):603-9, 1980.
4. GONZALEZ, R. C.; FRY, D. N.; KRYTER, R. C. Results in the application of pattern recognition methods to nuclear core component surveillance. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 21(1):750-56, 1974.
5. GONZALEZ, R. C.; HOWINGTON, L. C.; SIDES JR, W. H.; KRYTER, R. C. A multivariate statistical pattern recognition system for reactor noise analysis, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 23(1):342-49, 1976.

(*) As referências bibliográficas relativas a documentos localizados pelo IPEN foram revistas e enquadradas na NB-66 da Associação Brasileira de Normas Técnicas.

6. HEWLETT PACKARD Detecting sources of vibration and noise using H. P. fourier analysers. Application note 140-1
7. HEWLETT PACKARD *Measurement of machine tool vibration*. Application note 140-6, April 1973.
8. IPT. Comunicação pessoal.
9. MONTEIRO, J. R. M. *Implantação do programa PSDREC e sua utilização para o reconhecimento automático de espectros de potência dos sistemas dinâmicos*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 1979. (Dissertação de mestrado).
10. PIETY, K. R. Statistical algorithm for automated signature analysis of power spectral density data. *Prog. Nucl. Energy*, 1(2-3):781-802, 1977.
11. SIDES JR., W. H. & PIETY, K. R. Automated pattern recognition system for noise analysis. *Trans. Am. Nucl. Soc*, 84(1):720-22, 1980.
12. STEGEMANN, D. Comunicação pessoal.
13. THIE, J. A. Neutron noise sources in PWR'S. *Prog. nucl. Energy*, 1(2-4):283-92, 1977.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Caixa Postal, 11 049 – Pinheiros
CEP 05508
01000 – São Paulo – SP

Telefone: 211-6011
Endereço Telegráfico – IPENUCLEAR
Telex – (011) 23592 - IPEN - BR