

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Mecânica
Projeto Mecânico

ANÁLISE EM TEMPO REAL DE SOLICITAÇÕES ALEATORIAS
PARA CÁLCULO DE FADIGA

Autor: Roberto Polese

Orientador: Raúl Gonzales Lima

1988

"Não cessaremos nunca de explorar
E o fim de toda a nossa exploração
Será chegar ao ponto de partida
E o lugar reconhecer ainda
Como da primeira vez que o vimos.
Pela desconhecida, relembrada porta
Quando o último palmo de terra
Deixado a nós por descobrir
Aqui lo for que era o princípio."

T. S. Eliot

A meus pais

AGRADECIMENTOS

à Vera

ao Raúl

aos amigos do IPT

e aos amigos de Comunhão e Libertação

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
2. Objetivos.....	1
3. Fadiga Mecânica.....	2
3.1 Breve Histórico.....	2
3.2 O Início da Fratura.....	4
3.3 Curvas S-N.....	6
3.4 Cálculo de Fadiga.....	9
3.5 Cargas em Fadiga.....	12
3.6 Métodos de Contagem.....	13
4. Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados.....	23
4.1 Descrição do Equipamento.....	23
4.2 Utilização do Sistema para Análise de Fadiga.....	25
5. Adaptação do Método "Rainflow" para o Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados.....	26
5.1 Entrada de Dados.....	27
5.2 Saída de Dados.....	28
5.3 Escolha do Algoritmo.....	29
5.4 Adaptação do Algoritmo.....	30
6. Simulação e Análise dos Resultados.....	33
6.1 Programa "Rainflow".....	33
6.2 Simulação do Carregamento.....	38
6.3 Análise dos Resultados.....	46
7. Conclusão.....	50
Bibliografia e Apêndices.....	51

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no Centro de Desenvolvimento Ferroviário do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e é parte de um sistema que está sendo projetado para fazer aquisição e tratamento de dados visando o estudo de diversos parâmetros de interesse para a indústria ferroviária. A preocupação específica deste trabalho é com o problema de fadiga e, portanto, vai tratar exclusivamente de uma parte do sistema. A princípio deveríamos incluir neste trabalho a descrição de um exemplo, instalando o sistema num automóvel e analisando o resultado do processamento dos dados de variação de carga para efeito do cálculo de fadiga de um elemento qualquer. No entanto, o "hardware" do sistema não ficou pronto em tempo hábil e deixamos, então, uma lacuna.

2. OBJETIVOS

O objetivo central do presente trabalho é a elaboração de um programa para fazer estimativa de dano cumulativo de fadiga, a ser utilizado em um sistema que processa em tempo real, através de um método de contagem, um carregamento aleatório medido em campo. A utilização de um método de contagem adequado evita hipóteses simplificadoras (por exemplo, considerar valores médios), com resultados mais precisos. Este sistema, adaptável a condições de campo severas, evita o acúmulo de informações armazenadas processando em tempo real os dados aquisitados e armazenando os resultados

preparados para posterior cálculo de fadiga em memória de corpo sólido.

3. FADIGA MECÂNICA

3.1 - BREVE HISTÓRICO

A palavra "fadiga" foi introduzida por volta de 1840 para designar falhas em estruturas devido a ciclos repetitivos de tensões. Como eram observadas rupturas geralmente após algum tempo de serviço, o termo sugeria que o material se "cansasse" de resistir a tensões. O maior impacto surgiu a partir da indústria ferroviária, onde foram identificadas falhas regulares nos rebaixos dos eixos ferroviários. A primeira recomendação foi a eliminação dos cantos vivos. Era o início do estudo do fenômeno da fadiga mecânica.

A primeira hipótese feita sobre o mecanismo de falha por fadiga foi a de que ocorreria uma "cristalização" do metal devido à vibração, hipótese refutada tão logo se verificou que as ligas metálicas são cristalinas desde o momento da sua solidificação.

August Wöhler, por volta de 1860, fez os primeiros ensaios sistemáticos, chegando à conclusão de que o aumento da amplitude das tensões aplicadas em um corpo de prova levava à ruptura por fadiga em um menor número de ciclos. Diminuindo-se a amplitude das tensões aplicadas, a ruptura se dava em um número de ciclos maior, sendo que havia uma faixa de tensões abaixo da qual não haveria ruptura, qualquer que fosse o número de ciclos aplicado. Estes trabalhos levaram ao conceito de curvas tensão x vida (curvas S-N) e ao conceito de limite de fadiga.

Entre 1870 e 1890, outras pesquisas levaram a um aprofundamento dos trabalhos de Wöhler. Gerber pesquisou a influência da tensão média e Goodman propôs uma teoria simplificada para estudá-la.

A partir de 1900 começou-se a utilizar microscópios óticos para o estudo de fadiga, permitindo a observação de microtrincas e sua propagação até a fratura. Era o início do estudo da Mecânica da Fratura, cujo precursor é considerado Griffith, a partir dos resultados dos experimentos realizados em materiais frágeis, publicados em 1920. Era do maior interesse, no entanto, o estudo da ocorrência do fenômeno em materiais dúteis.

Foi observado que fraturas frágeis de materiais dúteis revelam sinais de uma pequena camada de material deformado plasticamente. Orowan sugeriu, em 1950, que as equações de Griffith (modificadas para casos tridimensionais) fossem adaptadas pela adição de um termo que representaria a dissipação de energia na deformação plástica. Esta adaptação foi feita por Irwin, em 1956.

Soluções para o problema elástico de placas de tração contendo uma fenda central levaram ao conceito do Fator Intensidade de Tensão (Stress Intensity Factor, K) e verificou-se que o valor crítico de K , a partir do qual a fenda se propaga de forma instável, constitui, sob certas condições, uma propriedade do material.

Na década de 50 surgiram os primeiros estudos sobre a propagação de fraturas sob cargas cíclicas. A contribuição mais notável foi dada por Paris, que relacionou a velocidade de propagação da trinca ao fator K . Diversas equações empíricas ou semi-empíricas foram propostas por diferentes pesquisadores. Mais tarde foram criados modelos para levar em consideração a interação entre diversos

ciclos de carga, como por exemplo o retardamento da propagação após a aplicação de um ciclo de tensão alta em tração, de modo a permitir estimativas do crescimento da trinca sob um carregamento aleatório.

A Mecânica da Fratura representa um campo mais atraente para o pesquisador do que o tratamento clássico, e o processo gerador da fadiga é responsável por um número muito grande dos trabalhos de pesquisa realizados na área. Projetar uma peça para uma certa vida em serviço, ou calcular a durabilidade de um elemento existente sob um carregamento conhecido, no entanto, são necessidades do engenheiro projetista que ainda não encontraram solução satisfatória dentro da Mecânica da Fratura. Desta maneira, ainda se necessita, em algumas situações, de usar o tratamento tradicional do problema de fadiga (regra de Miner do dano cumulativo).

3.2 - O INÍCIO DA FRATURA

A falha por fadiga de um elemento estrutural envolve três fases:

- (1) Nucleação da trinca
- (2) Propagação da trinca
- (3) Fratura estática final

Podemos traçar um gráfico da variação da resistência estática de um elemento estrutural ao longo da sua vida operacional, como mostrado na fig. 1.

Durante algum tempo não se fez distinção, para fins práticos, entre a nucleação e a propagação da trinca. Isto é razoável quando uma das duas fases é muito mais longa do que a outra. No entanto, ao nível de conhecimento que temos hoje, cada fase deve

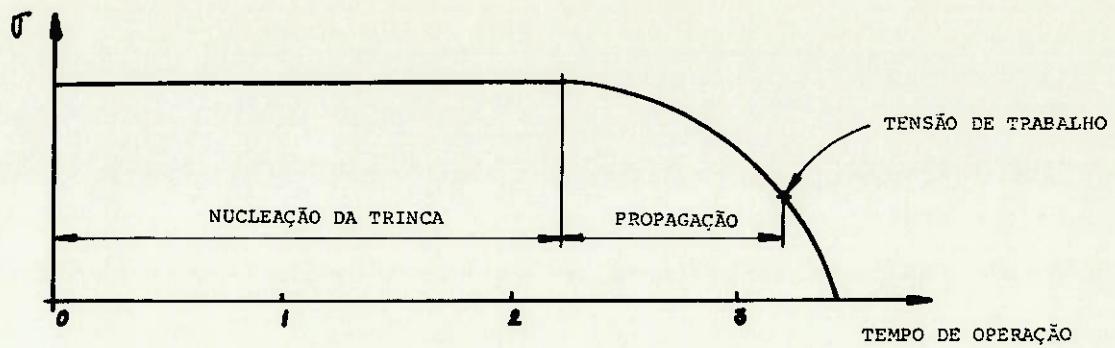


FIGURA 1 - Gráfico da resistência estática x tempo de vida operacional.

ser tratada por um método diferente. É intuitivo que, em essência, os mecanismos de nucleação e propagação não sejam muito diferentes, principalmente se pensarmos que o material, por mais perfeito que seja, terá sempre alguma descontinuidade que pode agir como uma microtrinca já existente. Assim, o fenômeno se resumirá na propagação desta microfissura até a falha.

O problema da estimativa do tempo para o início da fratura não é fácil, devido ao grande número de fatores influentes, alguns dos quais de difícil tratamento. Por exemplo:

- temperatura
- umidade (fadiga + corrosão)
- tensões residuais
- "fretting"
- microestrutura do material (tratamento térmico, composição)
- inclusões
- tratamento superficial
- acabamento
- concentração de tensões
- tipo de carregamento
- defeitos accidentais

- danos decorrentes da própria operação

Em função destes fatores, é necessário sempre um volume considerável de experimentações no desenvolvimento de estruturas onde a fadiga é o critério de projeto. Ainda assim existe sempre uma dispersão muito grande nos resultados experimentais, de modo que o tratamento estatístico na análise dos dados está sempre implícito.

3.3 - CURVAS S-N

Desde os primeiros estudos do fenômeno de fadiga, a principal dúvida era saber a quantos ciclos de uma determinada tensão nominal uma peça de um certo material poderia resistir.

Os primeiros trabalhos neste sentido foram realizados por Wöhler. Consistiram basicamente na aplicação de uma tensão alternada (S_a) de amplitude constante em um corpo de prova liso até a ruptura. Repetindo este ensaio para diversas amplitudes da tensão alternada, obteve-se uma curva (fig. 2) que se convencionou chamar de curva S-N para este material. Posteriormente foi estudado o efeito da tensão média na vida em fadiga. Um corpo de prova submetido a tensões alternadas de amplitude constante porém variando em torno de uma tensão média positiva apresenta falha por fadiga em um número de ciclos menor do que em torno de uma tensão média nula, e ainda menor em torno de uma tensão média negativa. Em outras palavras, em relação à tensão média nula, o efeito da tração abrevia a vida em fadiga e o efeito da compressão prolonga-a. Desta forma, o efeito da tensão média (S_m) dá lugar a uma família de curvas (fig. 3).

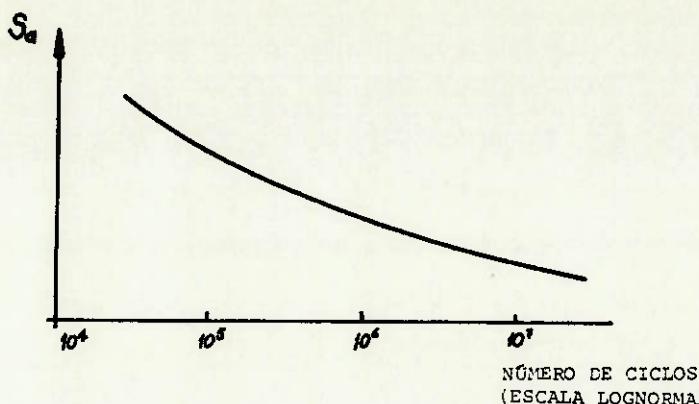


FIGURA 2 - Esboço de uma curva S-N.

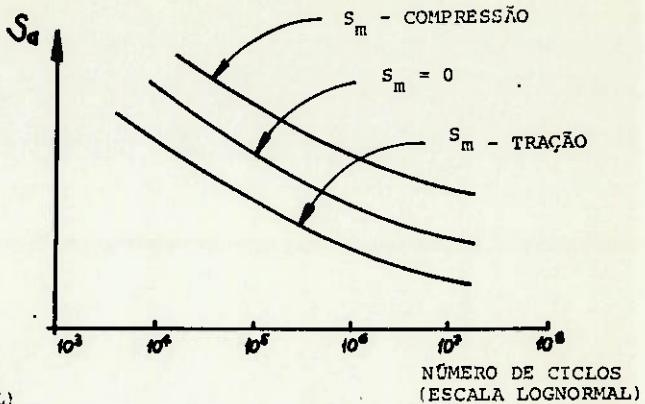


FIGURA 3 - Influência da tensão média.

Há diversas maneiras de se apresentar estes dados, como por exemplo fixando-se a relação entre a tensão máxima e a tensão mínima $R = S_{\max}/S_{\min}$ e construindo-se o gráfico $S_{\max} \times N$. Uma outra maneira de apresentar dados de ensaio é através dos diagramas de vida constante, como o da fig. 4.

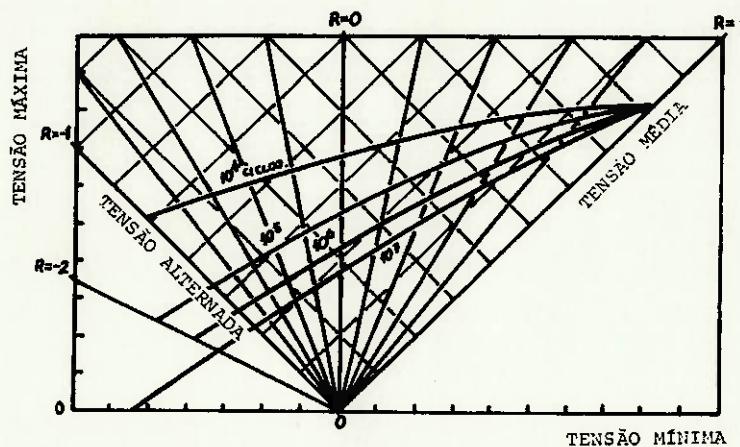


FIGURA 4 - Diagrama de vida constante.

As curvas S-N, de qualquer tipo, são determinadas estatisticamente. O valor médio para os pontos obtidos corresponde a uma estimativa da média da população, ou 50% de sobrevivência. Mais comumente se usa uma distribuição lognormal para a vida. A fig. 5 apresenta curvas S-N típicas. Na fig. 5(b) podemos notar o comportamento de alguns poucos materiais (aços de baixa resistência, por exemplo), onde a curva apresenta um patamar de tensão na faixa de

10^6 a 10^7 ciclos, caracterizando o limite de fadiga. "Vida em fadiga", "resistência de fadiga" e "limite de fadiga" são termos comuns usados nas curvas S-N. As definições destes termos pela ASTM são dadas abaixo.

Vida em fadiga, N , é o número de ciclos de tensão ou deformação de característica especificada que um dado corpo de prova suporta antes que ocorra uma falha de natureza especificada. Resistência de fadiga é o valor hipotético de tensão para que a falha ocorra após exatamente N ciclos, determinado em uma curva S-N. Limite de fadiga, S_f , é o valor limite médio de resistência de fadiga onde o número de ciclos para a falha é muito grande. Todas estas definições são baseadas em uma estimativa média da população, ou 50% de sobrevivência.

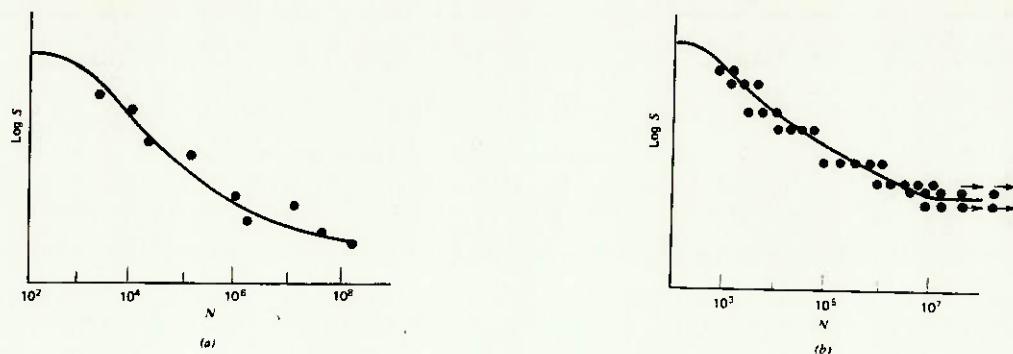


FIGURA 5 - Curvas S-N típicas.

Levantar experimentalmente uma família de curvas de fadiga implica num volume grande de ensaios, de modo que, freqüentemente, são usadas certas relações empíricas para deduzir as curvas a partir de um número relativamente pequeno de pontos.

O diagrama de Goodman modificado representa uma destas relações. Usando S_u (tensão de ruptura) como a tensão média correspondente a S_a (tensão alternada) = 0 e traçando uma reta a partir do valor obtido para S_{a0} (tensão alternada correspondente à

tensão média $S_m = 0$), obtém-se o diagrama de Goodman modificado. A equação para a reta será:

$$\frac{S_a}{S_{ao}} + \frac{S_m}{S_u} = 1$$

Gerber propôs uma curva do segundo grau no lugar da reta. A curva aproxima melhor os pontos obtidos em ensaios que a reta proposta por Goodman.

$$\frac{S_a}{S_{ao}} + \left(\frac{S_m}{S_u} \right)^2 = 1$$

Soderberg propôs usar a tensão de escoamento (S_y) no lugar da tensão de ruptura (S_u):

$$\frac{S_a}{S_{ao}} + \frac{S_m}{S_y} = 1$$

Por estas expressões, escolhidas considerando efeitos de entalhes, tamanho, acabamento superficial e outros efeitos do ambiente, podemos determinar o número de ciclos esperado para que o material apresente uma trinca quando submetido a ciclos de carga com S_a e S_m .

3.4 - CÁLCULO DE FADIGA

A determinação da vida em fadiga por consulta à curva S-N do material, como vimos até agora, tem uma aplicação muito restrita, pois a maioria das estruturas que são analisadas por fadiga estão submetidas a carregamentos cíclicos onde cada ciclo é definido por uma tensão alternada e uma tensão média próprias.

Milton A. Miner propôs, em 1945, o seguinte raciocínio: um material submetido a um carregamento cíclico com amplitudes e tensão

média constantes durante um número de ciclos correspondente à metade do esperado na curva S-N "consumiria" metade de sua vida em fadiga. Numa outra faixa de tensões, a falha por fadiga deveria aparecer após o material ter "consumido" a outra metade da sua vida, ou seja, num número de ciclos também correspondente à metade do esperado pela curva S-N.

Para o caso geral, Miner propôs uma regra para se estimar a vida em fadiga. Suponhamos que o carregamento seja definido por uma seqüência de blocos de ciclos, cada um com uma S_a e uma S_m . Se uma tensão S_1 leva a falha por fadiga após N_1 ciclos, a fração da vida em fadiga de uma peça submetida a um bloco de n_1 ciclos de tensão S_1 , será dada por n_1/N_1 . Se esta peça for submetida a outros blocos de ciclos com S_2 e n_2 , S_3 e n_3 , S_4 e n_4 , etc, a falha por fadiga ocorrerá quando:

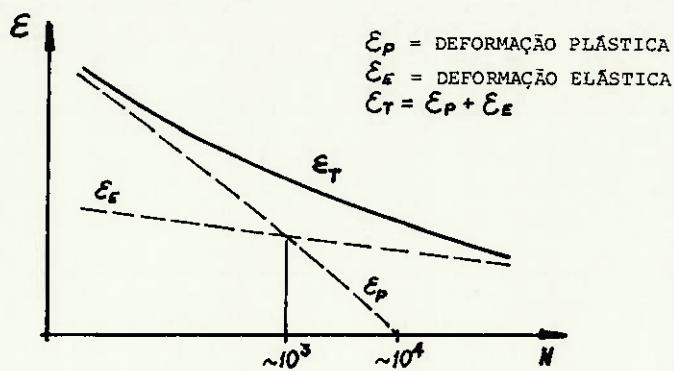
$$\sum_i \frac{n_i}{N_i} = 1$$

Esta é a Regra de Miner do Dano Cumulativo. É uma regra empírica e, a princípio, deveria ser aplicada somente dentro das condições experimentais que a geraram. A deficiência mais evidente é não levar em conta a seqüência em que as cargas são aplicadas, o que pode acarretar em erros consideráveis em alguns casos. Mesmo assim, ela pode dar uma idéia da durabilidade do elemento, sendo utilizada numa ampla faixa de aplicações.

Para efeito de cálculo de fadiga, deve ser determinada com precaução a tensão no elemento, para posteriormente ser consultada a curva S-N e aplicada a regra de Miner. Tradicionalmente é utilizada como variável a tensão nominal aplicada, juntamente com um fator de concentração de tensões para levar em conta os entalhes, de onde

surge, em geral, a trinca. Esta abordagem, no entanto, não considera a deformação plástica e portanto chega a resultados mais razoáveis na faixa de baixas tensões e alto número de ciclos, onde há predominância da deformação elástica.

Na faixa de altas tensões e baixo número de ciclos, a deformação plástica predomina e, portanto, nos ensaios de fadiga de baixo número de ciclos, a variável de controle utilizada é a deformação. Se construirmos a curva para análise de fadiga em termos de deformação, ao invés de tensão, teremos (fig. 6):



A utilização de uma tensão local no lugar da tensão nominal, como variável no cálculo de fadiga, remete a melhores resultados porque reproduz melhor o que acontece no fundo do entalhe. Podemos visualizar algumas características importantes do comportamento elastoplástico de um material através das curvas tensão-deformação. Uma curva típica é apresentada na fig. 7, onde podemos notar a diferença entre a curva monotônica e a curva cíclica.

Para diferentes tipos de materiais, o efeito da aplicação de um carregamento alternado pode ser de um endurecimento cíclico ou de um amolecimento cíclico, o que corresponde a uma curva acima ou abaixo, respectivamente, da curva monotônica. Quando uma carga capaz

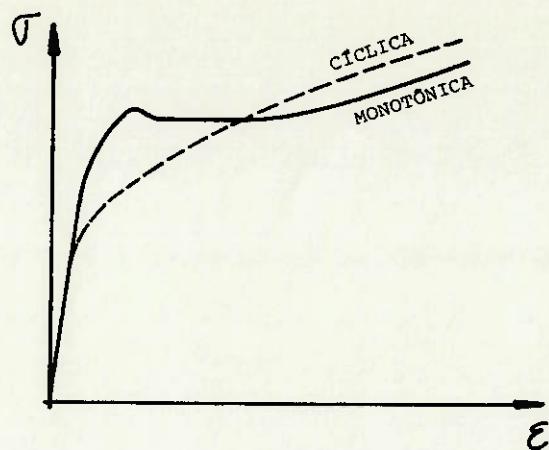


FIGURA 7 - Curva tensão-deformação para carregamento cíclico e monotônico.

de induzir a uma deformação plástica é aplicada repetidamente, ocorre a formação de ciclos de histerese (fig. 8a), onde podemos notar outro fenômeno importante: a capacidade do material voltar à sua trajetória no plano tensão-deformação após um ciclo para uma tensão menor (fig. 8b).

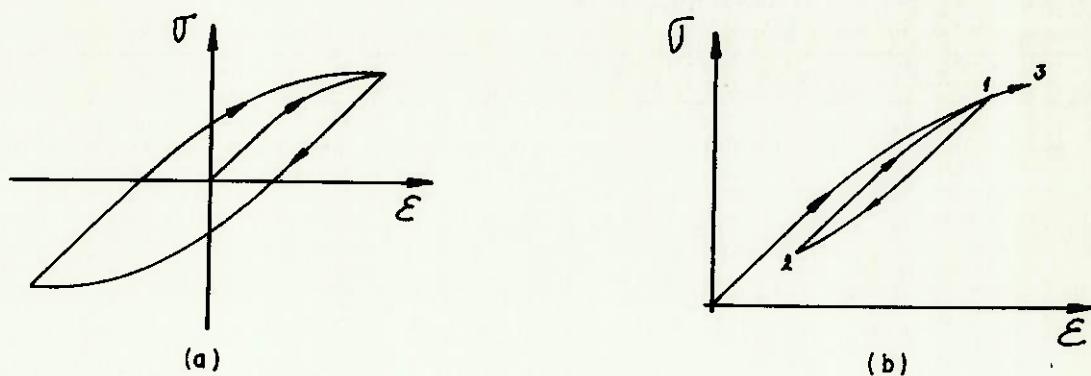


FIGURA 8 - Ciclos de histerese no plano tensão-deformação.

Esta característica de "memória" do material é fundamental para aplicação do método de contagem de ciclos escolhido, como veremos mais tarde. Não entraremos aqui em maiores detalhes quanto aos diversos procedimentos existentes para cálculo de fadiga.

3.5 - CARGAS EM FADIGA

O fenômeno da fadiga mecânica está associado diretamente à natureza cíclica da variação das cargas aplicadas. Em muitas situações, é exatamente este fenômeno o responsável pelo critério de dimensionamento. Nestes casos, não vai importar tanto o valor máximo atingido por uma determinada carga, podendo inclusive ser a carga que leva à ruptura por fadiga de ordem de amplitude muito menor do que a que levaria à ruptura por, digamos, tração. Da mesma forma, os efeitos dinâmicos de aplicação das cargas terão apenas uma importância secundária, ou seja, não terá maior influência, por exemplo, a velocidade com que uma determinada carga é aplicada. O tempo aqui tem um outro significado que num ensaio dinâmico, sendo importante apenas por definir a sequência de aplicação das cargas.

Na maioria das estruturas que encontramos no cotidiano da engenharia, o carregamento que provoca fadiga no material é, além de variável, de natureza aleatória. Para efeito de cálculo de fadiga, esta variação complexa da carga será traduzida numa sequência de eventos discretos, através de um processo de contagem dos ciclos de carga, e a resposta da estrutura será calculada de forma determinística.

Traduzir uma variação complexa de carga em eventos discretos faz com que se perca necessariamente alguma informação, como em qualquer tratamento estatístico. O método de contagem a ser empregado deve discretizar adequadamente a variação de cargas para minimizar a perda de informações importantes.

3.6 - MÉTODOS DE CONTAGEM

O procedimento de contagem se faz sobre a variação de uma grandeza em função do tempo ou de outra variável independente adequada para a análise do resultado, por exemplo a variação de uma carga (P) com o espaço percorrido. Normalmente os eventos contados são, ou quando a variável atinge um pico, positivo ou negativo, ou quando a variável cruza um nível pré-determinado em um dos sentidos, ou ainda quando a variável efetua uma transição de um pico para o seguinte, o que chamaremos de excursão.

A seguir apresentaremos rapidamente alguns dos métodos de contagem desenvolvidos para diversas finalidades.

MÉTODO DA CONTAGEM DE PICOS (Peak Count Method) - Este método conta todos os máximos acima do zero e todos os mínimos abaixo do zero, sendo o nível zero um nível médio de carga pré-estabelecido (fig. 9). As duas seqüências apresentadas na figura, diferentes, têm o mesmo resultado de contagem por este método, evidenciando sua limitação.

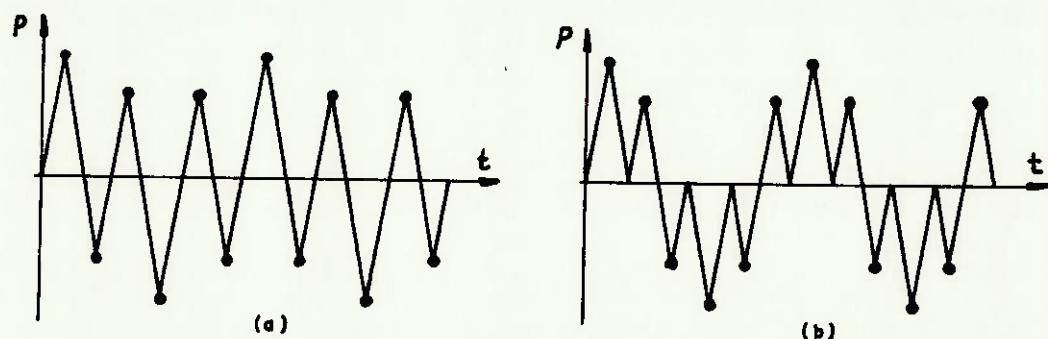


FIGURA 9 - Método da contagem de picos.

MÉTODO DA CONTAGEM DE PICOS APÓS CRUZAMENTO DA MÉDIA (Mean Crossing Peak Count) - Este método conta apenas um máximo ou um mínimo entre dois cruzamentos consecutivos da média (nível zero).

Evita-se, desta forma, a contagem de pequenas flutuações de carga, mas pode-se também deixar de contar variações significativas (fig. 10).

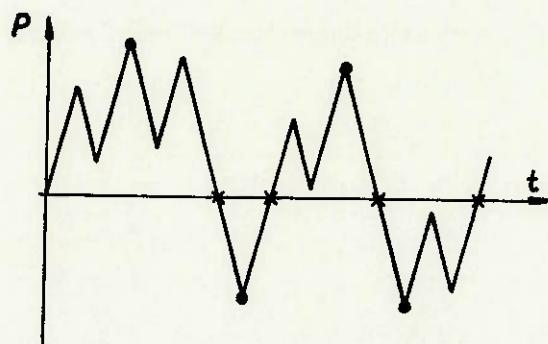


FIGURA 10 - Método da contagem de picos após cruzamento da média.

MÉTODO DO CRUZAMENTO DE NÍVEIS (Level Crossing Count Method) - Este método conta o número de vezes em que a variável cruza um nível pré-determinado com derivada positiva, quando acima da linha média, ou com derivada negativa, quando abaixo da linha média (fig. 11).

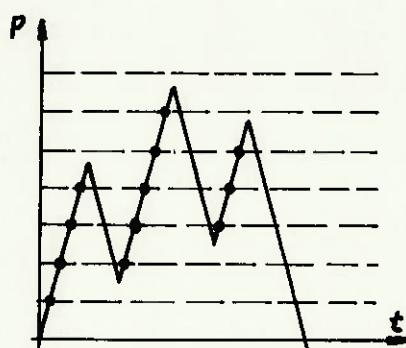


FIGURA 11 - Método do cruzamento de níveis.

A maior vantagem deste método é a eliminação de pequenas excursões.

MÉTODO "FATIGUE-METER" - Este método foi desenvolvido pelo "Royal Aeronautic Establishment" da Inglaterra, na década de 50, para uso num instrumento feito para investigar a ocorrência de falhas durante rajadas e manobras do avião, e recebeu o nome inadequado de "fatigue-meter".

Similar ao cruzamento de níveis, este método reduz o efeito das pequenas variações de carga e pressupõe o perfeito conhecimento do valor constante que define o nível zero (P_0). A partir deste nível são definidos os níveis de cruzamento. A contagem do cruzamento de um nível atingido quando a carga, por exemplo, se afasta do nível zero só é feita quando a carga cruzar um segundo nível mais próximo do nível zero (fig. 12). A diferença entre estes dois níveis corresponde à amplitude abaixo da qual excursões serão desconsideradas.

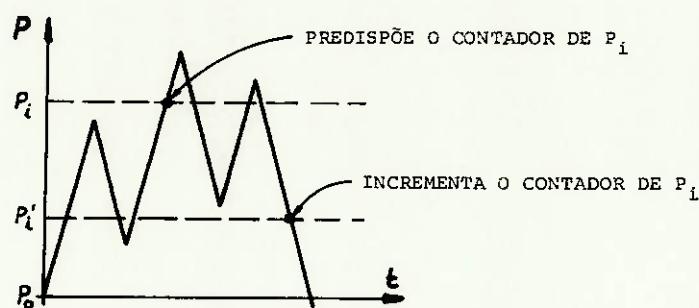


FIGURA 12 - Método "fatigue-meter".

MÉTODO DA CONTAGEM DAS EXCURSÕES (Range Count Method) - Este método conta excursões. Uma excursão é a variação do valor da variável entre dois picos e será positiva caso o pico de mínimo ocorra primeiro que o de máximo, negativa caso contrário (fig. 13). Por este método perde-se o valor absoluto das cargas.

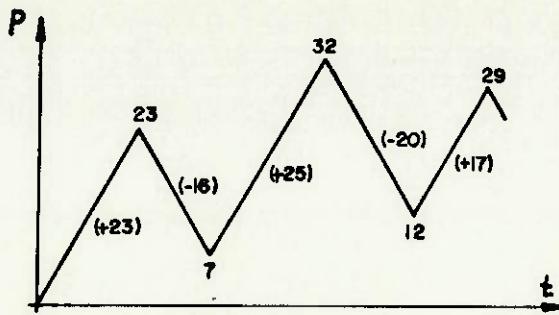


FIGURA 13 - Método da contagem das excursões.

MÉTODO DA CONTAGEM DAS EXCURSÕES E MÉDIAS (Range-mean Count Method) - Este método procura corrigir o defeito do anterior contando também o valor médio de cada excursão (fig. 14). A grande desvantagem tanto deste método quanto do anterior é que os resultados serão muito sensíveis ao valor mínimo de excursão considerado.

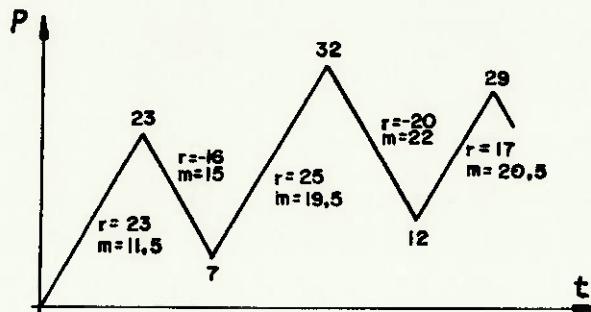


FIGURA 14 - Método da contagem das excursões e médias.

Todos os métodos considerados até aqui foram desenvolvidos há bastante tempo e contêm sérias deficiências para representar uma contagem adequada à análise de fadiga. Na fig. 9, das duas sequências de picos e vales apresentadas, a sequência a) é muito mais prejudicial ao material no que se refere à fadiga do que a sequência b), no entanto os métodos apresentados até aqui não são capazes de distingui-las. Os dois métodos apresentados a seguir são mais

modernos e os resultados para contagem de históricos complexos muito mais razoáveis.

MÉTODO DA CONTAGEM DE PARES DE EXCURSÕES E MÉDIAS (Range-mean Pairs Count Method) - Este método trabalha sobre uma lista dos picos e vales na ordem em que aparecem, e de onde se extraem pares de valores, usando como critério de seleção os pares que apresentem as menores excursões. Uma vez selecionado um par, ele não é reutilizado. Os picos adjacentes ao par são então considerados contínuos e poderão formar um novo par. Cada par de valores extraído será posteriormente usado como o máximo e o mínimo de um ciclo (fig. 15). Na sequência do exemplo serão extraídos os seguintes pares, nesta ordem: 3-4, 6-7, 1-2, 8-9, 11-12, 5-10.

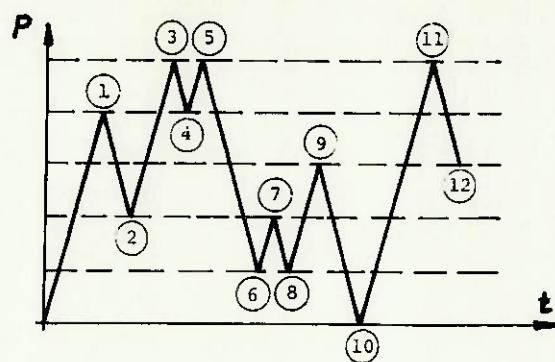


FIGURA 15 - Método da contagem de pares de excursões e médias.

Este processo só é praticável em sequências muito curtas. Ele é muito usado com o método da tensão local para cálculos de fadiga quando há uma variação periódica de cargas, tal como se encontram numa série de ensaios de fadiga. A sua dificuldade reside no fato de que é preciso considerar simultaneamente todas as excursões, ou toda a sequência de picos e vales.

O MÉTODO "RAINFLOW" - Este método está relacionado com a formação de ciclos de histerese no plano tensão-deformação. Foi apresentado pela primeira vez em 1968 por M. Matsuishi e T. Endo. O gráfico da variação da grandeza considerada, como foi apresentado, se montado com o eixo do tempo (ou outra variável independente) para baixo, a 90° da posição tradicionalmente usada, lembra uma pilha de "telhados", onde a aplicação das regras do método sugere a chuva escorrendo por eles, daí o nome.

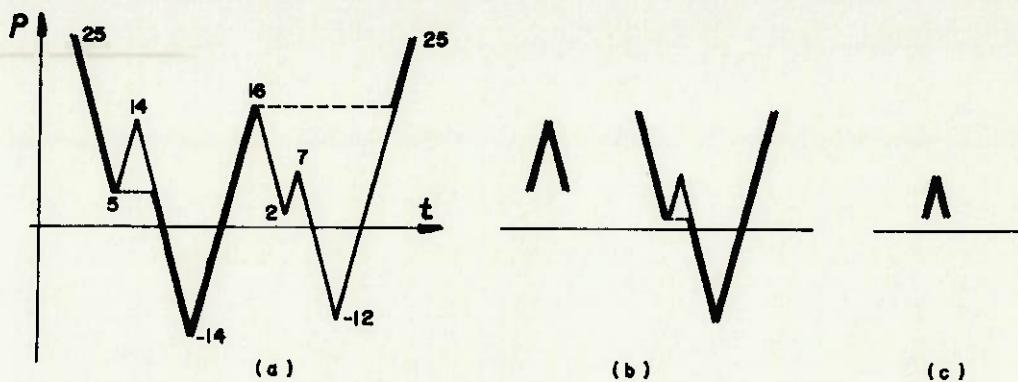
Uma operação do método "rainflow" é mostrada na fig. 16, através de um histórico consistindo de quatro picos e quatro vales. As regras, segundo H. O. Fuchs [1], são:

1. Reorganize o histórico para iniciar com o maior pico;
2. Partindo do maior pico, desça até a próxima inversão. Continue horizontalmente até a próxima excursão inclinada, e assim até que seja atingido o menor vale. Inverta, então, e caminhe para cima até a próxima inversão;
3. Repita o mesmo procedimento para cima e continue estes passos até o final;
4. Repita este procedimento para todas as excursões e pedaços de excursões que não foram usados nos passos anteriores.

Na fig. 16(a), a primeira travessia é mostrada. Excursões remanescentes estão na fig. 16(b). O procedimento aplicado na fig. 16(b) novamente deixa um par de excursões não usadas, contadas a seguir e mostradas na fig. 16(c).

Um resultado desta contagem poderia ser uma lista de ciclos:

ciclos: 25/-14 14/5 16/-12 7/2



A vantagem da contagem pelo método "rainflow" acontece quando ela é combinada com uma análise de deformação, como mostrada na fig. 17. O dano pode então ser computado para cada ciclo, assim que for identificado no procedimento de contagem, e as excursões correspondentes podem ser descartadas.

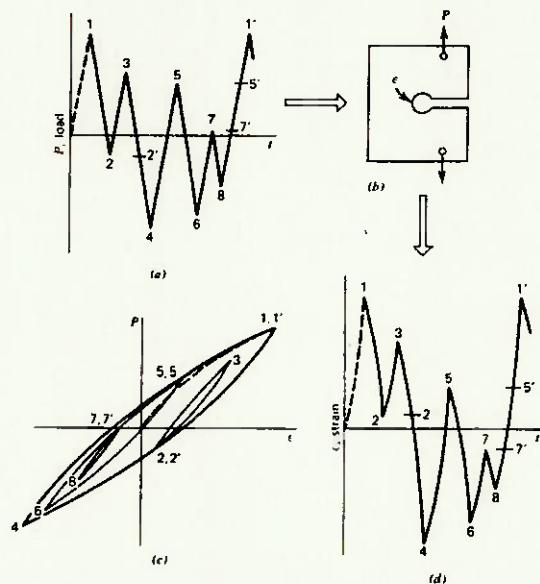


FIGURA 17 - Um histórico carga x tempo cíclico aplicado em uma peça entalhada e a resultante resposta de deformação no fundo do entalhe.

Outra grande vantagem do método é a facilidade de ser implantado num computador digital.

Por estes motivos, este será o método a ser utilizado.

A seguir apresentaremos dois algoritmos computacionais propostos para executar contagens segundo o método "rainflow". O primeiro algoritmo, fig. 18, é o proposto por H. O. Fuchs e corresponde ao procedimento indicado acima, onde cada valor de pico ou vale é armazenado em uma pilha $E(n)$.

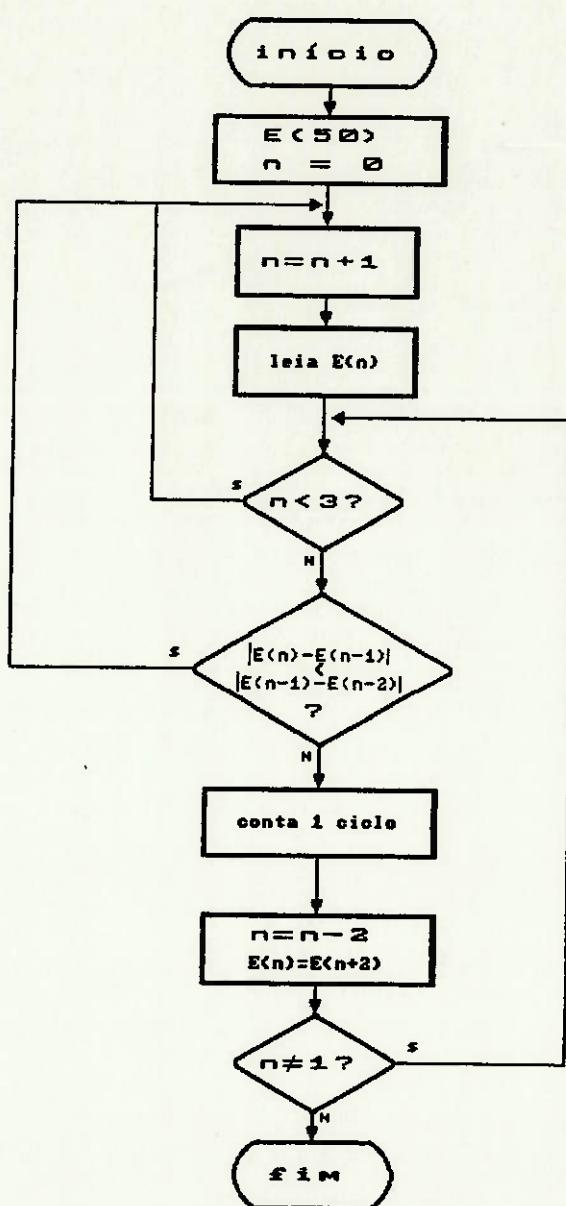


FIGURA 18 - Diagrama de blocos do algoritmo computacional do método "rainflow" proposto por Fuchs [1].

O segundo algoritmo que citaremos é o algoritmo original apresentado por Endo, numa versão voltada apenas para a contagem de ciclos, e não para o cálculo completo do dano em fadiga, como foi desenvolvido. Neste algoritmo, fig. 19, é usada uma pilha para as excursões não casadas, simbolizada por uma variável indexada $A(i)$. O valor da variável após cada excursão é guardado em P .

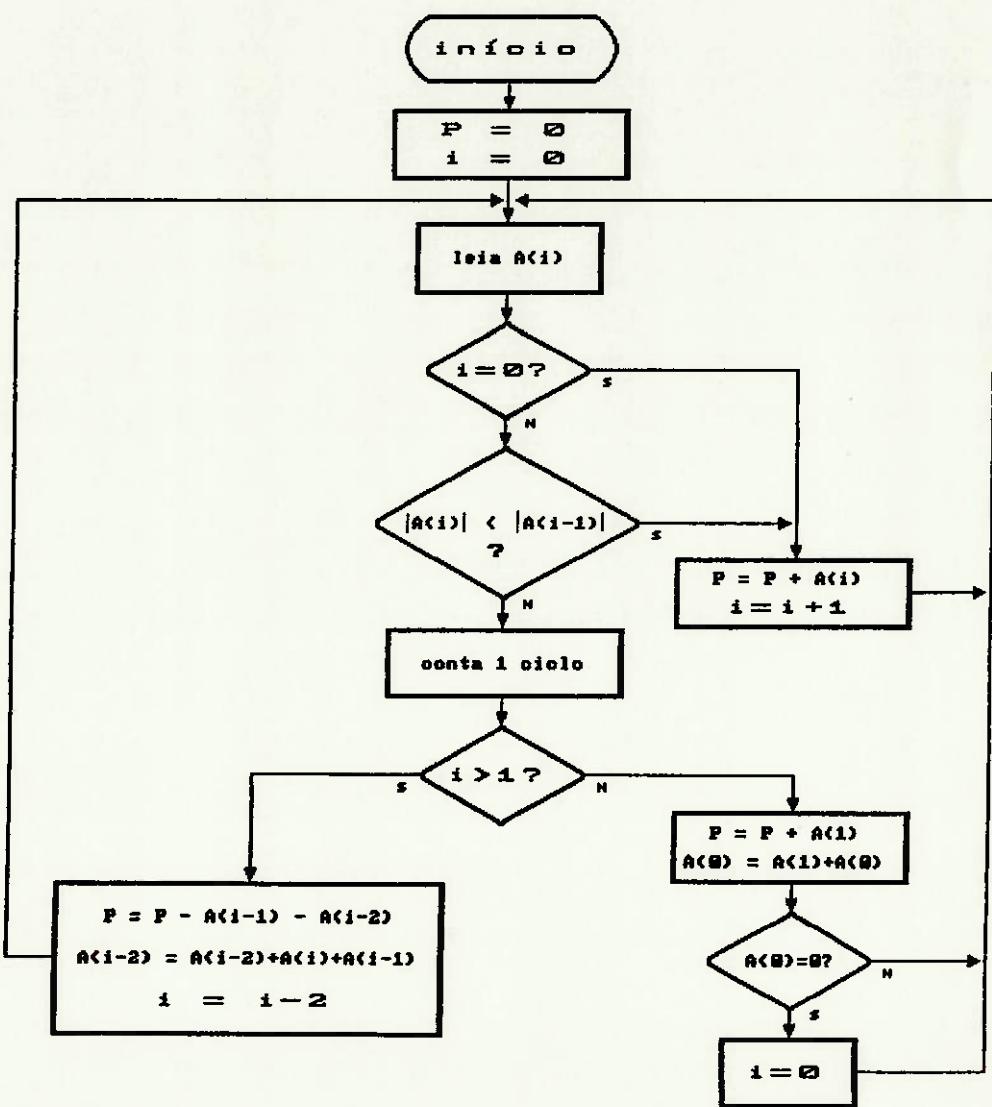


FIGURA 19 - Diagrama de blocos simplificado do algoritmo computacional do método "rainflow" proposto por Endo.

Para o nosso trabalho, o primeiro algoritmo traz algumas vantagens que serão comentadas mais adiante.

4. SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

A avaliação do desempenho de uma locomotiva ou de um TUE (trem de unidade elétrica), necessita do registro de sinais básicos que forneçam informações a respeito de alguns aspectos operacionais, de forma a permitir a correção de falhas e otimização do sistema. Particularmente é importante avaliar o comportamento de elementos estruturais quanto à fadiga.

Atualmente a monitoração e o registro desses sinais são feitos através de registradores gráficos e gravadores magnéticos, que são equipamentos importados e de alto custo.

Por outro lado, após a obtenção dos dados em um registrador ou em um gravador, é necessário realizar a análise, o que no caso dos registradores gráficos é uma tarefa muito demorada e sujeita a erros e, no caso das gravações em fita, implica numa fase de aquisição em computador cujo tempo é igual ao tempo real de coleta de dados.

Por estas razões está sendo desenvolvido um equipamento de baixo custo, utilizando componentes de origem nacional, o que permitirá substituir, em algumas aplicações, os registradores gráficos e os gravadores magnéticos.

4.1 - DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO

Este instrumento utilizará um microprocessador Z80 para o controle da aquisição e armazenamento dos sinais digitalizados em

bancos de memórias de estado sólido (RAM estática), conversores A/D e D/A e uma interface de comunicação serial.

O instrumento será portátil, constituído de módulos para expansão ou desenvolvimento de novas interfaces e terá as seguintes características:

- 8 canais de entradas analógicas (-5V a +5V);
- 8 canais de entradas analógicas (0 a 10V);
- 8 canais de entradas digitais;
- 6 canais de saídas analógicas;
- 8 canais de saídas digitais;
- escala de tempo de aquisição de 10ms a 50s;
- 256 kbytes de memória;
- interface de comunicação serial RS-232-C;
- alimentação de 110 VAC/220 VAC.

Quanto ao conversor analógico-digital, as seguintes características serão importantes para a avaliação do desempenho do programa "rainflow":

- conversor AD7581, 8 bits, 8 canais multiplexados;
- clock de 1200 kHz;
- tempo de conversão mínimo de $66,6 \times 10^{-6}$ s por canal.

O diagrama de blocos simplificado do instrumento é mostrado na fig. 20.

Os diversos sinais serão medidos através de transdutores e condicionadores específicos conectados ao instrumento. O microprocessador fará a leitura dos sinais digitalizados através de uma varredura pré-determinada e poderá enviá-los, diretamente ou processando-os, para armazenamento nos bancos de memórias. Após a fase de leitura de dados, será possível efetuar análises em

microcomputador pela interface de comunicação, ou registrar os dados simplesmente armazenados em um registrador gráfico através das saídas D/A. Os dados armazenados são conservados por uma bateria que mantém a alimentação contínua das memórias.

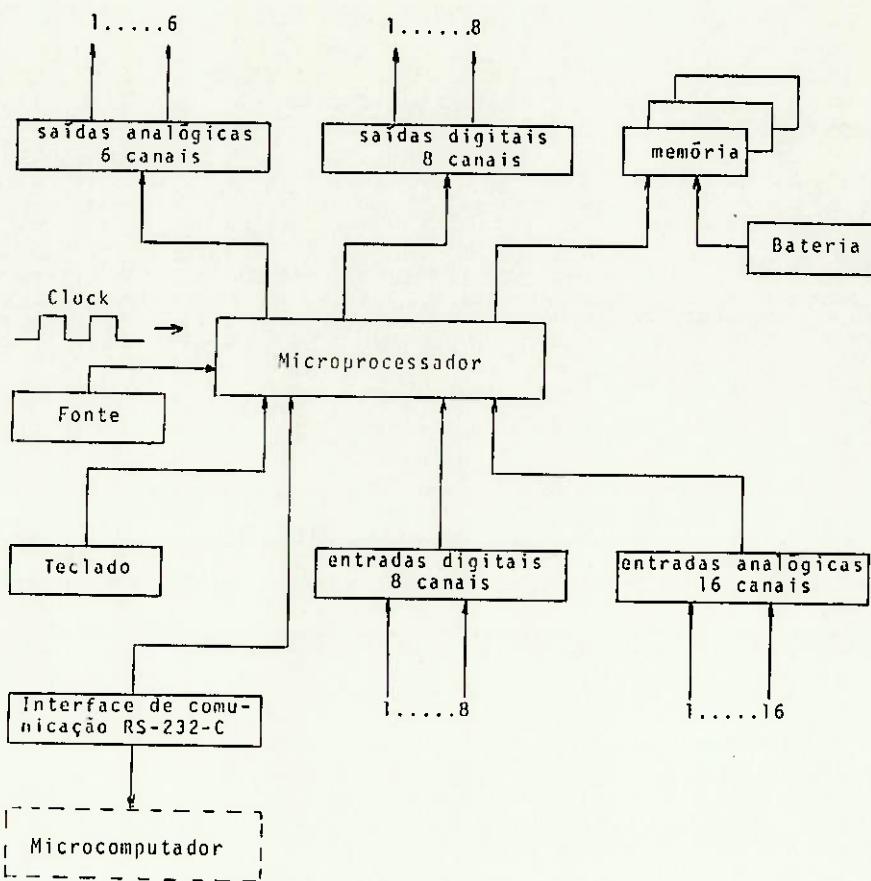


FIGURA 20 - Diagrama de blocos simplificado do registrador de sinais.

4.2 - UTILIZAÇÃO DO SISTEMA PARA ANÁLISE DE FADIGA

Este sistema pode ser utilizado para analisar um histórico complexo de variação de carga para efeito de cálculo de vida em fadiga. A previsão de vida em fadiga de um eixo de um vagão ferroviário, por exemplo, pode ser feita de diversas maneiras.

Podemos fazer um ensaio em laboratório, simulando o carregamento, o que necessariamente exige hipóteses às vezes bastante conservativas quanto ao carregamento. Se pudermos medir o carregamento real em campo, teremos resultados, sem dúvida, muito mais precisos. No entanto, registrar a variação de carga para posterior análise de fadiga durante um percurso crítico de um trem traz alguns problemas. Nem sempre as condições de campo permitem a instalação de um equipamento delicado como um registrador gráfico ou um gravador magnético. Mesmo armazenando, num sistema similar ao nosso, para posterior processamento, todo o histórico de carregamento em memória de estado sólido, teríamos uma grave limitação de percurso vinculada à limitação da capacidade de memória. Uma opção, objeto deste trabalho, é o processamento dos dados a medida que vão sendo lidos, com o armazenamento de resultados prévios para o cálculo de fadiga, o que ocupa um espaço limitado do banco de memórias.

Voltando ao nosso exemplo, conhecer o histórico de carregamento real do eixo em questão permite fazer uma boa estimativa de quanto tempo de operação ainda resta para que o eixo venha a apresentar alguma falha por fadiga. Podemos também, conhecendo o histórico de carregamento real, otimizar o projeto de novos eixos ou ainda elaborar procedimentos de ensaios muito mais eficazes para certificá-los.

5. ADAPTAÇÃO DO MÉTODO "RAINFLOW" PARA O SISTEMA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

O sistema de aquisição e tratamento de dados conterá, gravado em memória EPROM, um programa escrito em linguagem de máquina

que executará a contagem de pontos segundo o método "rainflow", o qual passaremos a chamar de "programa rainflow".

O programa "rainflow" gera, como vimos, uma lista dos ciclos que vão sendo fechados a medida que os dados vão sendo lidos. Para o nosso sistema, devemos considerar quais serão as características exigidas quanto à entrada e a saída de dados do programa e, evidentemente, quanto ao programa em si. Vamos começar analisando a entrada de dados.

5.1 - ENTRADA DE DADOS

Para o cálculo de fadiga, interessam apenas os pontos de inversão em uma variação de carga cíclica aleatória qualquer, ou seja, a seqüência dos picos e vales assim como apareceriam em um gráfico carga x tempo.

A entrada do programa "rainflow" deve ser esta seqüência de dados. O transdutor, no entanto, envia continuamente um sinal analógico que informa sobre a situação da variação da carga naquele instante. Uma vez digitalizado, este sinal deve ser continuamente verificado por uma rotina no programa que vai monitorar a entrada de dados. Esta rotina, que não é objeto deste trabalho, deverá identificar cada inversão na variação da carga e enviar este dado como entrada para o programa "rainflow".

Não levando em consideração a precisão na calibração do transdutor, outros problemas poderiam gerar resultados irreais. Deve ser considerada a flutuação no resultado da conversão analógico-digital e a rotina que monitora a entrada de dados deve ser capaz de identificar com boa precisão a variação real da carga. Desta forma,

o programa "rainflow" pode receber como entrada o valor do pico ou do vale assim que ocorra a inversão na variação real da carga.

5.2 - SAÍDA DE DADOS

A saída do programa "rainflow" será uma contagem de ciclos de determinada amplitude e de determinada tensão média. Todavia, se fossemos contar a ocorrência de ciclos com todos os valores possíveis de amplitude e tensão média, esbarraríamos novamente no problema da capacidade de memória do sistema.

Quando o sinal da variação da carga é digitalizado, isto significa também que o valor a ser utilizado no processamento está discretizado em uma das 256 faixas possíveis da variação total medida pelo transdutor (quando utilizado um microprocessador de 8 bits). Ainda que fosse viável reservar espaço na memória para uma matriz de dimensão 255, restaria saber se é necessária uma contagem de ciclos com valores tão precisos de amplitude e tensão média, uma vez que as curvas S-N ou equivalente, dados experimentais para o cálculo de fadiga, são aproximadas e construídas para classes de tensões médias.

A nossa solução será incrementar a contagem de ciclos em classes de amplitudes e tensões médias. Escolhemos incrementar a contagem dos ciclos em uma matriz com 20 classes de amplitude, e consequentemente 10 classes de tensões médias positivas e 10 negativas, para seguir o padrão utilizado pela Association of American Railroad (AAR) [3].

Como exemplo, imagine que todos os ciclos definidos por valores variando de zero até um décimo do máximo valor de carga mensurável, o que corresponderia a sinais do transdutor entre 0 e

0,5V (o máximo sinal é de 5V), seriam contados por incrementos na posição de memória correspondente à primeira classe de amplitude e à primeira classe de tensão média positiva.

5.3 - ESCOLHA DO ALGORITMO

Os dois algoritmos apresentados anteriormente traduzem as duas formas básicas normalmente utilizadas para fazer contagens segundo o método "rainflow": a contagem dos ciclos a medida em que vão sendo fechados (primeiro algoritmo - fig. 18) e a contagem de excursões (segundo algoritmo - fig. 19).

Qualquer que seja a forma básica do algoritmo utilizado, o resultado da contagem será o mesmo. Podemos notar por simples observação dos diagramas de blocos que o primeiro algoritmo é mais simples que o segundo, realiza um menor número de "loops" lógicos, contém um menor número de blocos de decisão e portanto realiza um menor número de comparações até que seja identificado um ciclo, incrementando a matriz de contagem. Esta simplificação resulta do fato de que este primeiro algoritmo impõe que o histórico deva ser rearranjado para iniciar com o pico de maior valor.

Para uma contagem feita em tempo real, ou seja, utilizando dados que são obtidos a medida que são lidos, não podemos rearranjar o histórico, e é absolutamente improvável que uma contagem destas seja iniciada no exato momento de um pico máximo. No entanto, este primeiro algoritmo tem uma vantagem muito importante. Por ser mais simples, o programa equivalente escrito em linguagem de máquina ocupa um menor espaço na memória e, o que é fundamental, gasta um tempo de processamento menor desde a leitura de um dado até estar pronto para

ler o próximo dado. Este tempo de processamento é crítico pois enquanto o programa está comparando o dado lido com os anteriores para guardá-lo numa pilha ou realizar operações aritméticas e incrementar a matriz de contagem, ele não está apto a receber o dado seguinte, o que pode significar a perda de dados importantes e então o emprego do sistema estaria limitado a baixas freqüências mecânicas. A avaliação dos tempos de processamento para o programa escrito em linguagem de máquina será feita adiante.

Neste ponto estamos propondo uma modificação no algoritmo original proposto por Fuchs para adaptá-lo à análise em tempo real.

5.4 - ADAPTACAO DO ALGORITMO

Vamos tomar como exemplo uma solicitação aleatória qualquer (fig. 21) e aplicar as regras do algoritmo em questão.

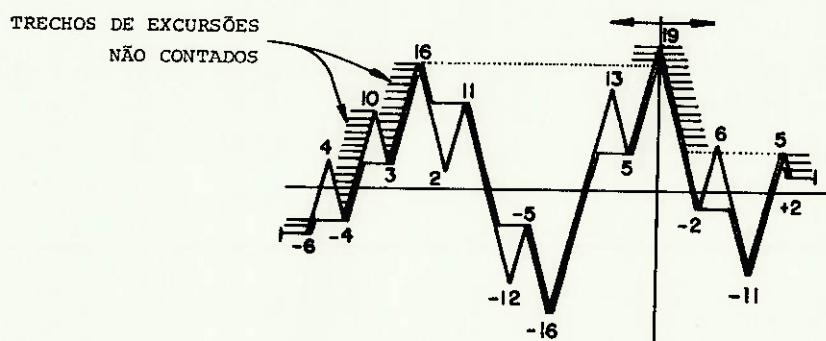


FIGURA 21 - Contagem de ciclos pelo algoritmo "rainflow" original.

Para poder realizar a contagem, identificamos o máximo pico e aplicamos as regras nos dois sentidos. Os ciclos contados são os seguintes (definiremos aqui cada ciclo pelos valores mínimo e máximo, ou seja, pelos valores do vale e do pico):

para a direita : -2/6 -11/5

para a esquerda : 5/13 -12/5 2/11 -16/16 3/10 -4/4

Podemos notar pelo resultado que alguns trechos de excursões não foram utilizados, ou, dizendo de outro modo, alguns ciclos não foram fechados. Esta é uma característica comum a praticamente todos os históricos de carregamento aleatório submetidos a um processo de contagem de ciclos.

Caso a contagem fosse inicializada com um valor hipotético maior que o máximo valor possível a ser lido, seguido por todos os valores correspondentes a um histórico qualquer, teríamos, ao introduzir novamente o valor hipotético do início, o término da contagem com todos os ciclos fechados e contados, independentemente do histórico.

Na fig. 22, tomamos o mesmo histórico da fig. 20 e o submetemos ao nosso algoritmo de contagem modificado, da esquerda para a direita, inicializando e finalizando com um valor hipotético (50). O resultado da contagem é o seguinte (na sequência cronológica em que os ciclos são fechados) :

-4/4 3/10 2/11 -6/16 -12/5 5/13 -2/6 2/5 -11/9 -16/50

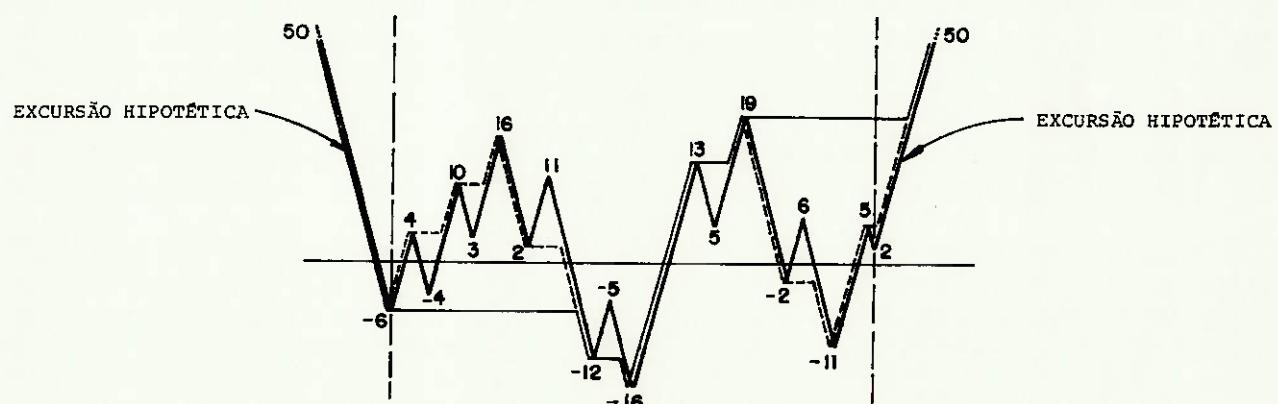


FIGURA 22 - Contagem de ciclos pelo algoritmo "rainflow" modificado.

Podemos notar que, dos 8 ciclos fechados pelo algoritmo original (fig. 20), 6 deles foram contados :

-2/6 5/13 -12/5 2/11 3/10 e -4/4 ,

sendo que a diferença para a contagem com o algoritmo modificado, fig. 22, é que os trechos de excursões não utilizadas anteriormente foram agora utilizados juntamente com excursões hipotéticas para fechar todos os ciclos. Estas excursões hipotéticas são aquelas à esquerda e à direita dos pontos de início e final, respectivamente, do histórico real.

A proposta de modificação no algoritmo original torna-o adequado à implementação no sistema de aquisição e tratamento de dados para análise de qualquer histórico de carregamento em tempo real, uma vez que, se introduzirmos na memória do sistema, já antes do início da contagem, um valor de pico maior que o máximo valor que o transdutor pode enviar, sabemos que, após a "leitura" de um histórico de carregamento qualquer, introduzindo na memória novamente este valor de máximo, a contagem estará terminada e todos os ciclos serão fechados e contados. Introduzir um valor hipotético na memória do sistema é um artifício que o próprio programa pode realizar no início e final da contagem.

Temos, no entanto, dois problemas básicos a serem resolvidos. O primeiro é a contagem de um ciclo com uma amplitude que vai do valor hipotético do início até o menor valor lido. Em alguns casos, este valor de amplitude pode ser demasiadamente alto em relação à variação real da carga, e, mesmo sendo um único ciclo, pode influir no resultado. O segundo problema refere-se ao número de ciclos que estiverem abertos quando cessar a aquisição de dados, pois este algoritmo modificado irá fechá-los e, a princípio, não sabemos se é significativo o número de ciclos nesta condição.

Quanto ao ciclo hipotético de amplitude máxima, bastaria que, ao final da contagem, o algoritmo não o considerasse. Esta solução, no entanto, elimina alguns trechos de excursões reais. Uma proposta que minimiza o problema é guardar os valores de máximo pico e mínimo vale durante a aquisição de dados e introduzir um ciclo definido por estes valores após a eliminação do ciclo hipotético.

Quanto à questão do número máximo de ciclos abertos, realizamos uma série de simulações para avaliá-lo, o que é objeto do próximo capítulo.

6. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para verificar o funcionamento do algoritmo modificado, escrevemos o programa "rainflow" em linguagem de alto nível estruturada e realizamos uma série de testes. Já para a avaliação do número máximo de ciclos a serem fechados com o último ponto, foi necessário simular um carregamento aleatório típico através do próprio programa.

6.1 - O PROGRAMA "RAINFLOW"

O programa que apresentaremos a seguir foi escrito em Turbo Pascal versão 3.0 e é fiel ao algoritmo com as modificações comentadas anteriormente. Para efeito de simples verificação, os dados de entrada serão fornecidos pelo teclado e vamos admitir que cada dado fornecido corresponderá a um valor de pico ou de vale, alternados, variando entre -100 e 100, sempre números inteiros. Estes valores extremos equivaleriam à variação do sinal enviado por

um transdutor. Para testar o programa, basta introduzir um valor hipotético maior que 100 (por exemplo, 500), e então introduzir, na seqüência, os valores de vales e picos de um histórico qualquer. Após o último dado do histórico, introduzindo novamente o valor inicial (500), a contagem estará terminada e o programa imprimirá uma matriz com a contagem dos ciclos em classes de amplitude e tensão média. Se este histórico de pontos inteiros variando entre -100 e 100 for reproduzido em um gráfico, e se executarmos manualmente as regras do algoritmo modificado, poderemos verificar a correta aplicação do método de contagem pelo programa "rainflow".

Cada elemento da matriz, resultado da contagem, define uma classe de amplitude e uma classe de tensão média. A primeira classe de amplitude, por exemplo, corresponde ao número de ciclos contados com amplitudes variando entre 0 (inclusive) e 10, a segunda entre 10 (inclusive) e 20, e assim por diante. A última classe de amplitude não admitiria o valor exato 200, correspondente a um ciclo possível de amplitude máxima, mas para contornar este problema, o programa guarda numa variável (p) a quantidade de ciclos nesta condição. É evidente que este ciclo de amplitude máxima possui tensão média nula.

Da mesma forma, uma vez que não existirão ciclos de tensão média -100 ou 100, valores exatos, teremos uma classe que conta os ciclos de tensão média entre -100 e -90 (inclusive), entre -90 e -80 (inclusive), etc, assim como entre 100 e 90 (inclusive), entre 90 e 80 (inclusive), etc. Os ciclos de tensão média nula serão contados na primeira classe de tensão média negativa.

Segue abaixo uma listagem do programa "rainflow" e o resultado (fig. 23) da contagem do histórico utilizado como exemplo no capítulo anterior.

```
*****
```

PROGRAMA "RAINFLOW"

```
{$U+}
PROGRAM RainFlow_2;

VAR
  matriz           : ARRAY [1..20,-9..10] OF Integer;
  le              : ARRAY [0..50] OF Integer;
  n, m, p, ap, tm, max, min : Integer;
  exe             : Boolean;

BEGIN
  exe := True;
  n := 0;           { n - utilizada na logica do algoritmo      }
  m := 0;           { m - controla a impressao dos pontos      }
  p := 0;           { p - contador dos ciclos de amplitude 200 }
  max := 0;          { max - guarda o valor do maximo pico   }
  min := 0;          { min - guarda o valor do minimo vale   }

  {zerando a matriz : }

FOR ap := 1 TO 20 DO FOR tm := -9 TO 10 DO matriz [ap,tm] := 0;

WRITELN (LST, ' ');
WRITELN (LST, 'sequencia dos picos e vales :');           {impressora}
WRITELN (LST, ' ');

CLRSCR;
WRITELN ('sequencia dos picos e vales :');                  { tela }
WRITELN;

REPEAT

  REPEAT

    REPEAT

      IF exe
      THEN BEGIN
        n := n+1;
        m := m+1;
        WRITE (m:3);
        WRITE (' = ');
        WRITE (LST, m:5);
        WRITE (LST, ' = ');
        READ (le[n]);           {leitura dos dados}

        IF (le[n] > max) AND (le[n] <= 100)
          THEN max := le[n];    { maximo pico }
        IF le[n] < min THEN min := le[n];    { minimo vale }

        WRITELN;

      END;
    END;
  END;
END;
```

```

        IF m/6 - INT(m/6) = 0
            THEN WRITELN (LST, le[n]:4)
            ELSE WRITE (LST, le[n]:4)
        END;
        exe := True

        UNTIL n >= 3

        UNTIL ABS (le[n]-le[n-1]) >= ABS(le[n-1]-le[n-2]);

        IF ABS (le[n-1]-le[n-2]) = 200 THEN p := p+1;

                                            {calcula a amplitude}
        ap := TRUNC (ABS (le[n-1]-le[n-2])/10) + 1;           { e a tensao media }

        IF le[n-1] + le[n-2] > 0
        THEN tm := TRUNC ((le[n-1]+le[n-2])/20) + 1
        ELSE tm := TRUNC ((le[n-1]+le[n-2])/20);           {incrementa a matriz}

        matriz [ap,tm] := matriz [ap,tm] + 1;

        n := n-2;
        le[n] := le[n+2];

        IF n >= 3 THEN exe := False

        UNTIL n = 1;

        WRITELN (LST, ' ');
        WRITELN (LST, ' ');
        WRITE (LST, 'MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) ');
        WRITELN (LST, 'POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)');
        WRITELN (LST, ' ');

        FOR ap := 20 DOWNTO 1 DO                                { imprime a matriz }
        BEGIN
            FOR tm := -9 TO 10 DO
            BEGIN

                IF tm = 1 THEN                                { imprime o eixo das ordenadas}
                BEGIN
                    WRITE (LST, ' ');
                    WRITE (LST, ap:2);
                    WRITE (LST, ' ')
                END;                                         { imprime em forma de triângulo}
                IF ap < (24-2.2*ABS(tm-0.5))
                THEN WRITE (LST, matriz [ap,tm]:2)
                ELSE WRITE (LST, ' ');

                WRITE (LST, ' ')
            END;
            WRITELN (LST, ' ')
        END;
        WRITELN (LST, ' ');

```

```

        {imprime o eixo das abscissas}

WRITE (LST, ' 0  9  8  7  6  5  4  3  2  1');
WRITELN (LST, '           1  2  3  4  5  6  7  8  9  0');

WRITELN (LST, ' ');

IF p > 0 THEN
BEGIN
    WRITE (LST, ' ');
    WRITE (LST, p);
    WRITELN (LST, ' ciclos de amplitude maxima')
END
ELSE
BEGIN
    WRITE (LST, ' ');
    WRITELN (LST, max);
    WRITE (LST, ' ');
    WRITELN (LST, min)
END;
WRITELN (LST, ' ')

```

```

END.
*****
```

```

sequencia dos picos e vales :
```

```

1 = 500   2 = -6   3 = 4   4 = -4   5 = 10   6 = 3
7 = 16   8 = 2   9 = 11   10 = -12   11 = -5   12 = -16
13 = 13   14 = 5   15 = 19   16 = -2   17 = 6   18 = -11
19 = 5   20 = 2   21 = 500

```

```

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSAO MEDIA (abscissa)
```

```

          0 0 20 0 0
          0 0 19 0 0
          0 0 0 18 0 0 0
          0 0 0 0 17 0 0 0
          0 0 0 0 0 16 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 15 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 14 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 13 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 12 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 11 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 10 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 9 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 8 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 7 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 6 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 4 1 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 3 1 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0 0 0 0 0
          0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 1 5 0 0 0 0 0 0 0
          0 9 8 7 6 5 4 3 2 1   1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

```

```

maximo pico = 19
minimo vale = -16

```

FIGURA 23 - Matriz de contagem do histórico da fig. 21.

6.2 - SIMULAÇÃO DO CARREGAMENTO

Para avaliar o comportamento do programa "rainflow" numa contagem de centenas de milhares de ciclos, não poderíamos introduzir dados via teclado. Será feita, então, uma alteração no programa para gerar internamente os pontos de um histórico, utilizando uma função que gera números aleatórios. Resta saber que tipo de distribuição deverá ter este gerador de números aleatórios. Um procedimento simples garantirá que os dados utilizados como entrada serão sempre picos e vales alternados. Deveremos fornecer como parâmetro o número de pontos a serem contados, assim o programa introduzirá um valor hipotético (500) no início e no final da contagem, encerrando-a.

O objetivo da nossa simulação é avaliar a quantidade máxima de ciclos abertos em um determinado instante qualquer de uma contagem de pontos realizada sobre um histórico de carregamento típico. No nosso caso, tomaremos como base, para gerar o histórico de carregamento típico, as informações contidas no manual de normas e recomendações da AAR (Association of American Railroads) [3].

O capítulo VII deste manual apresenta o resultado de uma série de testes onde foram feitas contagens de ciclos utilizando o método "rainflow" (para posterior cálculo de fadiga) em elementos de veículos ferroviários percorrendo percursos padrões. A primeira observação a ser feita é que o número de pontos contados de cada histórico varia de 100 mil a 1 milhão e 300 mil, conforme a grandeza que está sendo medida e a distância e qualidade do percurso. O resultado de uma das contagens está reproduzido na fig. 24.

Podemos observar pelos resultados da AAR que num histórico de carregamento aleatório típico, a distribuição dos pontos não é

uniforme, o que equivaleria a uma matriz de contagem com ciclos uniformemente distribuidos pelos seus elementos, mas o número de ciclos contados se concentra nas classes mais próximas do zero, ou seja, a maioria dos ciclos é de pequena amplitude e flutua em torno da tensão média nula. Por simples observação, também notamos que a distribuição dos pontos de picos e vales se aproxima de uma distribuição normal em torno do zero. A simulação de um histórico de carregamento típico será feita, portanto, através de um gerador de números aleatórios com distribuição normal.

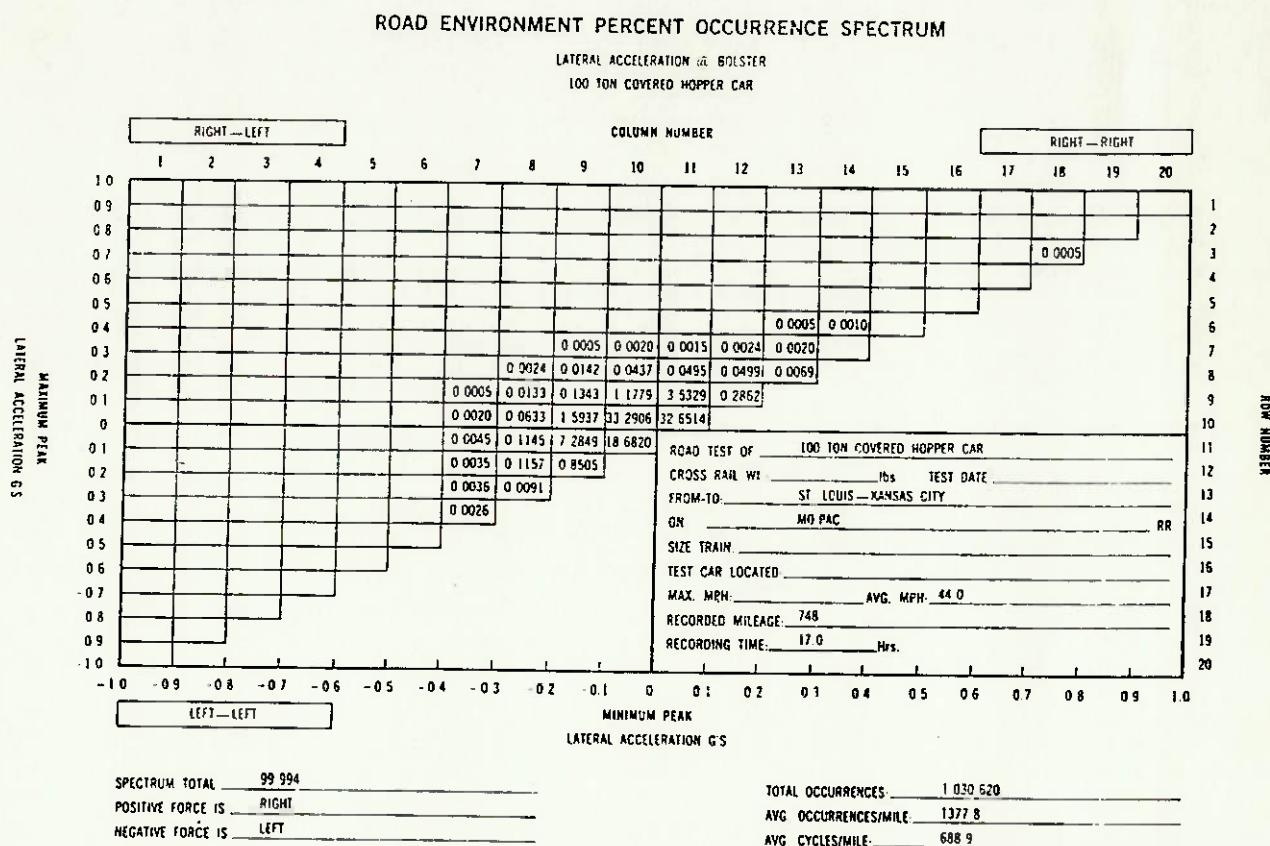


FIGURA 24 - Matriz de contagem típica da AAR [3].

Para conseguirmos uma variável aleatória com distribuição normal a partir de uma variável aleatória com distribuição uniforme, construiremos primeiramente uma variável aleatória de Rayleigh [7]. Uma variável aleatória de Rayleigh (r) é obtida da seguinte maneira:

$$r = \sqrt{-2 a^2 \ln u}$$

onde u = variável aleatória com distribuição uniforme $(0 < u < 1)$

a = constante (será o valor do desvio padrão)

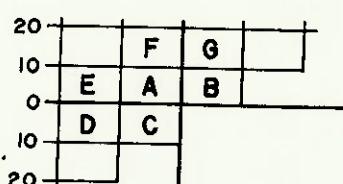
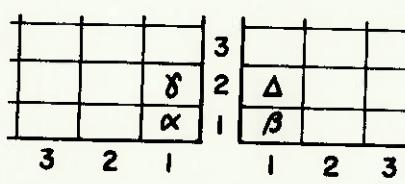
Temos então uma variável aleatória com distribuição normal

(n) dada por:

$$n = r \cos(\pi \cdot u)$$

O nosso programa utilizará como dados de entrada, pontos de picos e vales gerados aleatoriamente pelo processo descrito acima. Resta ainda escolher qual o desvio padrão dos pontos a serem gerados.

Tomamos novamente como referência os resultados da AAR. Adotamos para efeito de comparação a porcentagem de ciclos fechados nos quatro elementos principais da nossa matriz de contagem, ou seja, compreendidos entre as primeiras classes de tensão média positiva e negativa e as duas primeiras classes de amplitude. O equivalente na matriz de contagem da AAR, onde cada elemento é definido pelos próprios valores de pico e vale (o resultado é análogo), está mostrado na fig. 25.



$$\alpha + \beta + \gamma + \Delta = A + B + C + \frac{D}{2} + \frac{E}{2} + \frac{F}{2} + \frac{G}{2}$$

FIGURA 25 - Equivalência entre as matrizes de contagem.

Dos diversos resultados da AAR, a porcentagem média de ciclos fechados no equivalente às quatro classes principais da nossa matriz de contagem é de 73%. Realizamos, então, uma série de simulações de um carregamento aleatório de dez mil pontos com distribuição normal, variando o desvio padrão da curva normal, ou seja, variando o valor da constante a , e calculando a porcentagem nas quatro classes principais. Os resultados, ou seja, as matrizes de contagem, estão no apêndice A.

A fig. 26 apresenta um gráfico com a variação desta porcentagem em função da constante a . Podemos notar que um valor de 73% corresponde a um desvio padrão equivalente a uma constante $a = 10$.

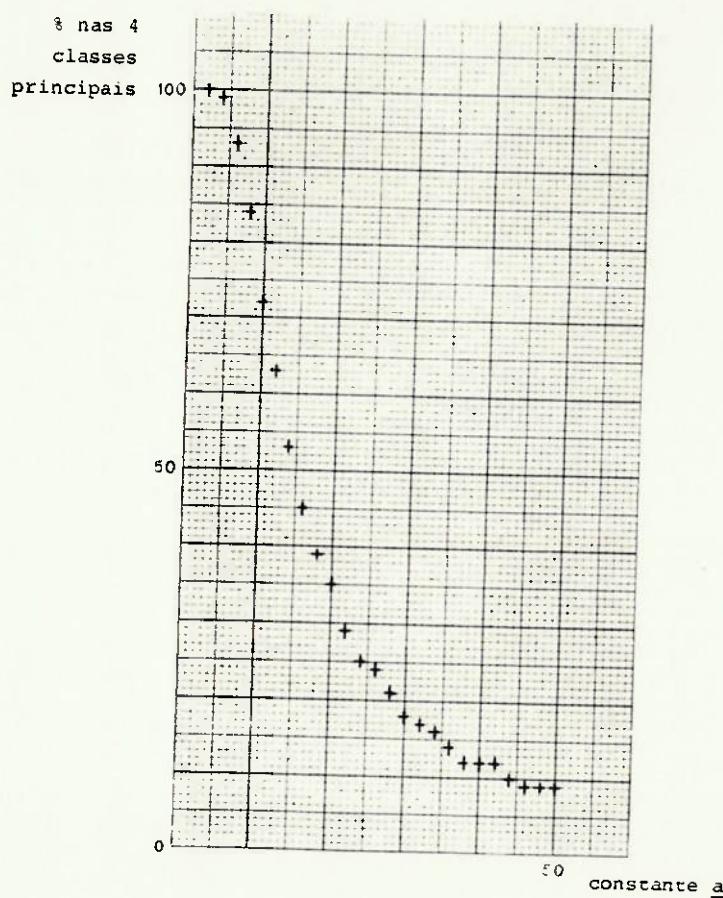


FIGURA 26 - Gráfico da variação da porcentagem de ciclos fechados nas quatro classes principais em função da constante a .

Aproveitamos estas contagens para registrar a variação do número máximo de ciclos abertos (n) em função da constante a (gráfico na fig. 27). Podemos observar pelo gráfico que o valor de n flutua bastante, mesmo sendo contados sempre dez mil pontos, e independe do desvio padrão da distribuição dos pontos. Esta última observação é importante pois mostra que a variável que influi no número máximo de ciclos abertos é o número total de pontos contados, independente da natureza da distribuição dos pontos aleatórios.

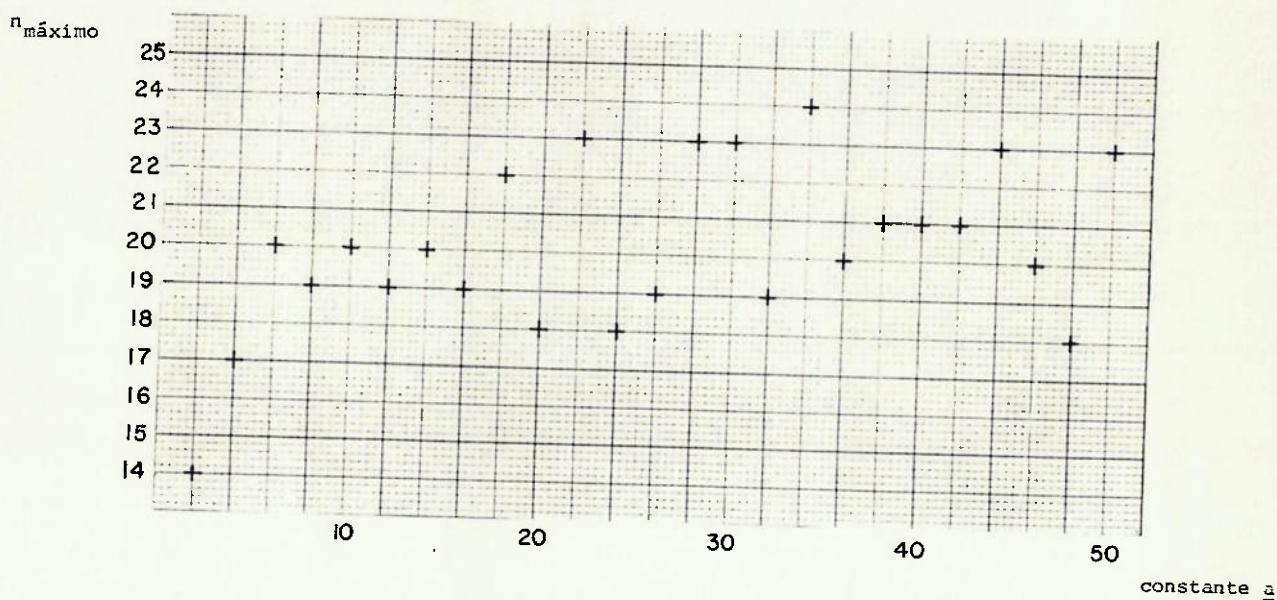


FIGURA 27 - Gráfico da variação de $n_{\text{máximo}}$ em função da constante a .

Uma vez definida a simulação do carregamento, apresentamos abaixo uma listagem com o programa "rainflow" adaptado para realizar contagens simulando um carregamento aleatório típico, nas condições expostas anteriormente, com um número de pontos definido pela variável **b**, em milhares de pontos.

PROGRAMA "RAINFLOW" MODIFICADO

```

{ $U+
PROGRAM RainFlow_14;

VAR
  matriz : ARRAY [1..20,-9..10] OF Integer;
  le    : ARRAY [0..50] OF Integer;
  a, b, n, p, q, v, ap, tm : Integer;
  max, min : Integer;
  m, r, u : Real;
  exe, pico : Boolean;

BEGIN
  exe := True;
  pico := False;
  a := 10;           { a - desvio padrao da curva gaussiana }
  b := 1;            { b - define o numero total de (mil) pontos }
  n := 1;            { n - utilizada na logica do algoritmo }
  m := 0;            { m - numero de pontos aleatorios gerados }
  p := 0;            { p - contador dos ciclos de amplitude 200 }
  q := 0;            { q - guarda o valor maximo atingido por n }
  r := 0;            { r - variavel aleat. c/ distr. de Rayleigh }
  u := 0;            { u - variavel aleatoria com distr. normal }
  max := 0;          { max - guarda o valor do maximo pico }
  min := 0;          { min - guarda o valor do minimo vale }

  le[1] := 500;       { inicializa com o valor 500. O mesmo valor }
  { sera utilizado para encerrar a contagem }

  { zerando a matriz : }

FOR ap := 1 TO 20 DO FOR tm := -9 TO 10 DO matriz [ap,tm] := 0;
REPEAT

  REPEAT

    REPEAT

      IF exe THEN
        BEGIN
          n := n+1;
          IF n > q THEN q := n; { guarda o maior valor de n }
          m := m+1;

          IF m/1000 = b
            THEN le[n] := 500 { encerra a contagem }
            ELSE
              BEGIN

                IF pico { garante valores alternados }

                THEN
                  BEGIN

```

```

        REPEAT r := SQRT(-2*SQR(a)*LN(RANDOM));
          u := r * COS(PI*RANDOM);
          le[n] := TRUNC (u);
          v := le[n] - le[n-1]
        UNTIL (v > 0) AND (ABS(le[n]) <= 100);
          pico := False
        END

      ELSE
        BEGIN
          REPEAT r := SQRT(-2*SQR(a)*LN(RANDOM));
            u := r * COS(PI*RANDOM);
            le[n] := TRUNC (u);
            v := le[n-1] - le[n]
          UNTIL (v > 0) AND (ABS(le[n]) <= 100);
            pico := True
          END;

        IF le[n] > max THEN max := le[n]; { maximo pico }
        IF le[n] < min THEN min := le[n] { minimo vale }
      END
    END;
    exe := True

    UNTIL n >= 3

    UNTIL ABS (le[n]-le[n-1]) >= ABS (le[n-1]-le[n-2]);
      {conta ciclos de amplitude maxima : }

    IF ABS (le[n-1]-le[n-2]) = 200 THEN p := p+1;

      ap := TRUNC (ABS (le[n-1]-le[n-2])/10) + 1; {calcula a amplitude}
      IF le[n-1] + le[n-2] > 0 { e a tensao media }
      THEN tm := TRUNC ((le[n-1]+le[n-2])/20) + 1
      ELSE tm := TRUNC ((le[n-1]+le[n-2])/20);
      matriz [ap,tm] := matriz [ap,tm] + 1; {incrementa a matriz}

    n := n-2;
    le[n] := le[n+2];

    IF n >= 3 THEN exe := False

  UNTIL n = 1;

  WRITELN (LST, ' ');
  WRITE (LST, 'MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada)');
  WRITELN (LST, 'POR TENSAO MEDIA (abiscissa)');
  WRITELN (LST, ' ');
  WRITELN (LST, ' ');

  FOR ap := 20 DOWNTO 1 DO { imprime a matriz }

```

```

BEGIN
  FOR tm := -4 TO 5 DO
    BEGIN
      IF tm = 1 THEN
        BEGIN
          WRITE (LST, ' ');
          WRITE (LST, ap:2);
          WRITE (LST, ' ')
        END;
      IF ap < (24-2.2*ABS(tm-0.5)) {imprime em forma de triangulo}
        THEN WRITE (LST, matriz [ap,tm]:6)
        ELSE WRITE (LST, ' ');
      WRITE (LST, ' ')
    END;
    WRITELN (LST, ' ')
  END;
  WRITELN (LST, ' ');
  WRITELN (LST, ' ');
  WRITE (LST, ' ', 5, 4, 3, 2, 1, 3, 4, 5) {imprime o eixo das abscissas};
  WRITELN (LST, ' ', 1, 2, 3, 4, 5);
  WRITELN (LST, ' ');
  WRITELN (LST, ' ');
  WRITE (LST, ' ');
  WRITE (LST, TRUNC (m/1000) );
  WRITELN (LST, ' mil pontos contados');

  WRITELN (LST, ' ');
  WRITE (LST, ' ');
  WRITE (LST, 'n maximo = ');
  WRITELN (LST, q);

  WRITELN (LST, ' ');
  IF p > 0 THEN
    BEGIN
      WRITE (LST, ' ');
      WRITE (LST, p);
      WRITELN (LST, ' ciclos de amplitude maxima');
      WRITELN (LST, ' ');
    END
    ELSE
      BEGIN
        WRITE (LST, ' ');
        WRITE (LST, 'maximo pico = ');
      END;

```

```
WRITELN (LST, max);
WRITE (LST, ' ');
WRITE (LST, 'minimo vale = ');
WRITELN (LST, min)
END

END.
```

```
*****
```

6.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

As diversas simulações que realizamos, gerando históricos de diversos tamanhos, ou seja, variando o número total de pontos contados, estão apresentadas no apêndice B. Para cada uma destas simulações, o programa "rainflow" obteve o valor máximo atingido pela variável n , que corresponde a $n/2$ ciclos abertos. O gráfico com a variação de n máximo, em escala lognormal, em função do número total de pontos contados está apresentado na fig. 28. Podemos notar que uma reta aproxima muito bem os pontos obtidos experimentalmente, portanto podemos afirmar através do gráfico que somente para contagens da ordem de 200 milhões de pontos teríamos n máximo na ordem de 30. Um histórico deste porte está muito longe da utilização prática do nosso sistema, que trabalhará com históricos na ordem de um milhão de pontos, portanto podemos afirmar com segurança que nas nossas contagens o número máximo de ciclos abertos não será maior que 15.

Este resultado tem duas consequências muito importantes. A primeira está relacionada ao espaço necessário na memória para a "pilha" com os valores de picos e vales de ciclos ainda não fechados. Agora sabemos que será suficiente reservar na memória espaço para uma "pilha" de 30 valores.

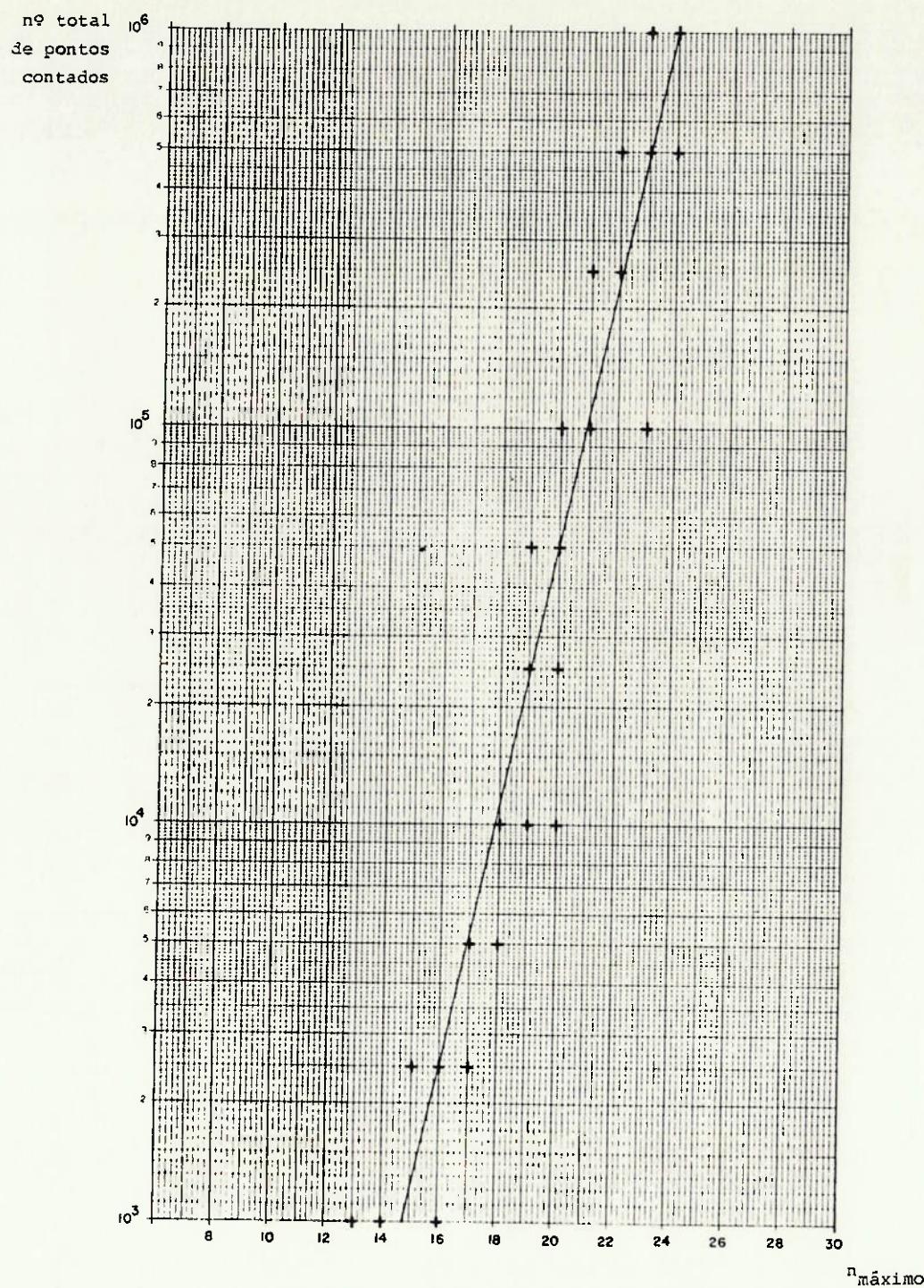


FIGURA 28 - Gráfico da variação de $n_{\text{máximo}}$ em função do número total de pontos contados.

A segunda consequência é ainda mais importante. A modificação feita no algoritmo original do método "rainflow", como foi descrita anteriormente, implica acrescentar alguns trechos de

excursões hipotéticos para fechar os ciclos que ao final da aquisição dos pontos ainda estiverem abertos. Sabemos agora que o número máximo de ciclos nesta condição é limitado e da ordem de 30 para uma contagem de milhões de pontos. Portanto, a influência de alguns trechos de excursões na contagem de alguns ciclos é absolutamente irrelevante diante do número total de ciclos contados.

Uma última palavra sobre a avaliação do tempo de processamento feita sobre o programa escrito em linguagem de máquina. O "clock" do microprocessador Z80 é de 2MHz, ou seja, cada ciclo de máquina corresponde a $0,5 \mu s$. Contando a quantidade de ciclos de máquina gastos por cada uma das instruções do programa, podemos avaliar o tempo de processamento entre duas leituras sucessivas. Devemos levar em conta que o "clock" do conversor A/D é diferente do Z80, sendo que uma conversão ocorre a cada 1066 ciclos de máquina do Z80.

O tempo de processamento máximo entre duas leituras ocorre quando o programa fecha um ou mais ciclos, lembrando que, por exemplo, após a seguinte sequência de picos e vales:

50, -50, 40, -40, 30, -30, 20, -20, 10, -10,

se o programa ler um dado maior ou igual a 50, serão fechados cinco ciclos de uma só vez, e o programa deverá calcular amplitudes, tensões médias, e incrementar a matriz de contagem para os cinco ciclos.

Uma avaliação aproximada mostra que o programa em linguagem de máquina gasta 1960 ciclos de máquina entre duas leituras sucessivas quando conta um ciclo, e 1380 ciclos de máquina para cada ciclo a mais contados de uma só vez.

O tempo máximo gasto pelo programa entre duas leituras sucessivas limita a freqüência máxima do sinal que pode ser lido sem se perder dados. Quanto ao carregamento real, aleatório, o sinal de variação de carga não tem uma freqüência constante. Tomemos, para efeito de comparação, um sinal aleatório gerado com distribuição normal, como descrito anteriormente. A possibilidade do programa "rainflow" contar n ciclos de uma só vez é estatística. Para qualquer quantidade de pontos contada, aproximadamente 62% dos pontos lidos não fecham nenhum ciclo, 29% fecham um ciclo, 7% fecham dois ciclos de uma só vez, 1,6% fecham três ciclos, 0,3% fecham quatro ciclos, etc. Desta forma, se considerarmos um sinal com uma freqüência constante de 200Hz, o intervalo de tempo entre um pico e o vale seguinte corresponderá a 5000 ciclos de máquina do Z80, ou seja, somente quando o programa fechar quatro ou mais ciclos de uma só vez o tempo gasto entre duas leituras sucessivas será superior ao intervalo de tempo real entre um pico e o vale seguinte, e o programa consideraria como vale o primeiro dado lido após o tempo de processamento, ocasionando um erro. Esta situação ocorreria em 0,4% dos pontos lidos.

Uma vez que o carregamento real, a ser analisado pelo nosso sistema, não tem uma freqüência constante, aos trechos de freqüência máxima corresponde um número de ocorrências pequeno em relação ao número total de pontos que serão lidos, e podemos afirmar seguramente que podemos trabalhar com freqüências máximas em torno de 200Hz ou maiores, com um erro na contagem dos ciclos desprezível, faixa que é mais do que suficiente para a análise de fadiga, na indústria ferroviária, que se quer realizar.

7. CONCLUSÃO

Processar em tempo real dados aquisitados de um carregamento aleatório medido em campo exige um programa simples, com um tempo de processamento mínimo. De outra forma, ao receber dados aquisitados com uma frequência alta, o programa não consideraria um dado de entrada se ainda estivesse processando o dado anterior, e a contagem não estaria correta.

O algoritmo do método de contagem "rainflow" mais simples necessita que o histórico dos pontos de inversão de carga seja rearranjado antes de se iniciar a contagem. Para adaptá-lo à análise de um carregamento em tempo real, foi proposta uma modificação que, no entanto, fecha os ciclos ainda abertos ao final da aquisição dos dados.

Por meio da simulação de carregamentos aleatórios típicos, avaliamos que o número máximo de ciclos abertos varia em função do número total de pontos contados, ficando abaixo da faixa de quinze ciclos para contagens de dezenas de milhões de pontos.

Concluímos, então, que o resultado de uma contagem realizada em tempo real por meio do algoritmo proposto leva a resultados bastante realistas, pois é irrelevante a influência de dezenas de ciclos no dano cumulativo provocado por milhões de ciclos.

Uma avaliação do programa "rainflow" escrito em linguagem de máquina, levando em conta o desempenho do sistema de aquisição e tratamento de dados, mostra que o sistema está apto a realizar análises em carregamentos com frequências mecânicas na ordem de 200Hz, sem que haja erros significativos.

BIBLIOGRAFIA

1. Fuchs, H. O. e Stephens, R. I., "Metal Fatigue in Engineering", JOHN WILEY & SONS, New York, 1980.
2. Gomes, J. I., "Fadiga sob Cargas Aleatórias", notas de aula, FDTE/EPUSP/IPT, 1984.
3. Association of American Railroads - Mechanical Division, Manual of Standards and Recommended Practices, chapter VII, "Fatigue Design of Freight Cars", 1983.
4. Miner, M. A., "Cumulative Damage in Fatigue", Journal of Applied Mechanics, 1 setembro 1945.
5. Dowling, N. E., "Fatigue Failure Predictions for Complicated Stress-Strain Histories", Journal of Materials, Vol. 7, nº 1, 1972.
6. Mitchell, M. R. e Wetzel, R. M., "Cumulative Fatigue Damage Analysis of a Light Truck Frame", authorized reprint from Journal of Testing and Evaluation, Vol. 3, nº 6, ASTM, 1975.
7. Lima, R. G., "Teste Modal", monografia nº 6, Biblioteca do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, 1988.

APÊNDICE A

Matrizes de contagem de históricos simulados de carregamento aleatório de dez mil pontos com distribuição normal, variando-se o desvio padrão (constante a) na geração dos pontos de cada histórico.

Os gráficos com os resultados desta simulação estão apresentados nas figuras 26 (pág. 40) e 27 (pág. 42).

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

							0	0	20	0	0			
							0	0	19	0	0			
							0	0	18	0	0			
							0	0	17	0	0			
							0	0	16	0	0			
							0	0	15	0	0			
							0	0	14	0	0			
							0	0	13	0	0			
							0	0	12	0	0			
							0	0	11	0	0			
							0	0	10	0	0			
							0	0	9	0	0			
							0	0	8	0	0			
							0	0	7	0	0			
							0	0	6	0	0			
							0	0	5	0	0			
							0	0	4	0	0			
							0	0	3	0	0			
							0	0	33	2	4	0	0	0
							0	0	2626	1	2336	0	0	0
7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	

10 mil pontos contados

constante a = 2
100% nas 4 classes principais

n maximo = 14
maximo pico = 6
minimo vale = -6

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

							0	0	20	0	0			
							0	0	19	0	0			
							0	0	18	0	0			
							0	0	17	0	0			
							0	0	16	0	0			
							0	0	15	0	0			
							0	0	14	0	0			
							0	0	13	0	0			
							0	0	12	0	0			
							0	0	11	0	0			
							0	0	10	0	0			
							0	0	9	0	0			
							0	0	8	0	0			
							0	0	7	0	0			
							0	0	6	0	0			
							0	0	5	0	0			
							0	0	4	0	0			
							0	0	19	3	14	0	0	0
							0	0	337	2	241	0	0	0
							0	0	2299	1	2089	0	0	0
7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7	

10 mil pontos contados

constante a = 4
99% nas 4 classes principais

n maximo = 17
maximo pico = 13
minimo vale = -12

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

							0	0	20	0	0					
							0	0	19	0	0					
							0	0	18	0	0					
							0	0	17	0	0					
							0	0	16	0	0					
							0	0	15	0	0					
							0	0	14	0	0					
							0	0	13	0	0					
							0	0	12	0	0					
							0	0	11	0	0					
							0	0	10	0	0					
							0	0	9	0	0					
							0	0	8	0	0					
							0	0	7	0	0					
							0	0	6	0	0					
							0	0	5	0	0					
							0	0	15	4	21	0	0			
							0	0	143	3	114	0	0			
							0	1	509	2	407	1	0			
							0	0	29	1928	1	1810	21	0		
7	6	5	4	3	2	1				1	2	3	4	5	6	7

10 mil pontos contados

constante a = 6
93% nas 4 classes principais

n maximo = 20
maximo pico = 21
minimo vale = -19

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

							0	0	20	0	0					
							0	0	19	0	0					
							0	0	18	0	0					
							0	0	17	0	0					
							0	0	16	0	0					
							0	0	15	0	0					
							0	0	14	0	0					
							0	0	13	0	0					
							0	0	12	0	0					
							0	0	11	0	0					
							0	0	10	0	0					
							0	0	9	0	0					
							0	0	8	0	0					
							0	0	7	0	0					
							0	1	6	2	0	0	0			
							0	0	17	5	17	0	0			
							0	0	85	4	58	0	0			
							0	0	218	3	212	0	0			
							0	8	554	2	439	8	0			
							0	0	86	1626	1	1599	69	0		
7	6	5	4	3	2	1				1	2	3	4	5	6	7

10 mil pontos contados

constante a = 8
84% nas 4 classes principais

n maximo = 19
maximo pico = 27
minimo vale = -25

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissas)

10 mil pontos contados

constante a = 10
72% nas 4 classes principais

```
n maximo = 20  
maximo pico = 33  
minimo vale = -31
```

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissas)

10 mil pontos contados

constante a = 12
63% nas 4 classes principais

maximo = 19
maximo pico = 43
minimo vale = -38

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

							0	0	20	0	0		
							0	0	19	0	0		
							0	0	18	0	0		
							0	0	17	0	0		
							0	0	16	0	0		
							0	0	15	0	0		
							0	0	14	0	0		
							0	0	13	0	0		
							0	0	12	0	0		
							0	0	11	0	0		
							0	0	10	1	0		
							0	0	6	9	5		
							0	0	13	8	15		
							0	0	1	39	7		
							0	0	2	64	6		
							0	0	1	106	5		
							0	0	0	17	152		
							0	0	4	43	280		
							0	0	4	117	471		
							0	0	37	291	896		
7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7

10 mil pontos contados

constante a = 14
53% nas 4 classes principais

n maximo = 20
maximo pico = 46
minimo vale = -44

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

							0	0	20	0	0		
							0	0	19	0	0		
							0	0	18	0	0		
							0	0	17	0	0		
							0	0	16	0	0		
							0	0	15	0	0		
							0	0	14	0	0		
							0	0	13	0	0		
							0	0	12	1	0		
							0	0	1	11	3	0	
							0	0	6	10	5	0	
							0	0	13	9	16	0	
							0	0	21	8	31	0	
							0	0	57	7	48	0	
							0	0	3	73	6	68	
							0	0	6	116	5	119	
							0	0	3	29	185	4	
							0	0	5	73	258	3	
							0	0	2	18	141	408	
							0	0	3	61	293	729	
7	6	5	4	3	2	1	1	2	3	4	5	6	7

10 mil pontos contados

constante a = 16
45% nas 4 classes principais

n maximo = 19
maximo pico = 59
minimo vale = -51

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

							0	0	20	0	0					
							0	0	19	0	0					
							0	0	18	0	0					
							0	0	17	0	0					
							0	0	16	0	0					
							0	0	15	0	0					
							0	0	14	0	0					
							0	0	13	0	0					
							2	12	1	0	0					
							6	11	8	0	0					
							16	10	11	0	0					
							0	28	9	22	1	0				
							0	1	39	8	30	3	0			
							0	4	67	7	46	5	0			
							1	15	93	6	85	11	0			
							0	24	118	5	128	19	1			
							4	48	162	4	144	43	9			
							2	9	104	197	3	202	93			
							4	30	164	403	2	358	176			
							13	79	322	641	1	548	312			
7	6	5	4	3	2	1				1	2	3	4	5	6	7

10 mil pontos contados

constante a = 18

39% nas 4 classes principais

n maximo = 22

maximo pico = 57

minimo vale = -57

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

							0	0	20	0	0					
							0	0	19	0	0					
							0	0	18	0	0					
							0	0	17	0	0					
							0	0	16	0	0					
							0	0	15	0	0					
							0	0	14	0	0					
							6	13	2	0	0					
							8	12	4	0	0					
							9	11	15	0	0					
							21	10	22	2	0					
							3	29	9	32	6	0				
							6	55	8	41	5	0				
							9	66	7	52	8	0				
							1	15	114	6	85	17	1			
							4	36	127	5	103	34	7			
							1	5	58	169	4	141	56			
							2	23	97	187	3	177	108			
							5	45	153	356	2	318	171			
							3	16	107	275	543	1	536			
7	6	5	4	3	2	1				1	2	3	4	5	6	7

10 mil pontos contados

constante a = 20

35% nas 4 classes principais

n maximo = 18

maximo pico = 63

minimo vale = -63

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0							
		0	0	19	0	0							
		0	0	0	18	0	0	0					
		0	0	0	17	0	0	0					
		0	0	0	16	2	0	0	0				
		0	0	0	15	0	0	0	0				
		0	0	0	14	6	0	0	0				
		0	0	0	5	13	5	0	0				
		0	0	0	13	12	15	1	0				
		0	0	0	0	18	11	15	1	0			
		0	0	0	2	25	10	26	3	0			0
		0	0	0	8	37	9	34	7	0			0
		0	0	0	10	58	8	61	14	0			0
		0	0	0	2	17	62	7	65	15	2	0	0
		0	0	0	3	28	84	6	71	24	3	0	0
		0	0	0	5	37	108	5	113	31	11	1	0
		0	0	5	15	62	134	4	125	61	21	2	0
		0	0	5	28	115	183	3	184	113	28	8	0
1	2	4	28	116	285	436	1	431	289	130	36	2	1
7	6	5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	6
								1	2	3	4	5	7

10 mil pontos contados

constante a = 22
29% nas 4 classes principais

n maximo = 23
maximo pico = 83
minimo vale = -70

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0							
		0	0	19	0	0							
		0	0	0	18	0	0	0					
		0	0	0	17	0	0	0					
		0	0	0	16	4	0	0	0				
		0	0	0	15	1	0	0	0				
		0	0	0	5	14	9	0	0				
		0	0	0	1	6	13	6	2	0	0	0	0
		0	0	0	0	15	12	16	1	0	0	0	0
		0	0	0	2	29	11	27	4	0	0	0	0
		0	0	0	3	29	10	38	6	1	0	0	0
		0	0	0	10	46	9	49	13	0	0	0	0
		0	0	0	1	13	58	8	52	16	1	0	0
		0	0	0	3	13	72	7	59	23	5	0	0
		0	0	2	3	34	85	6	85	39	4	0	0
		0	0	1	0	11	44	97	5	100	48	16	3
		0	0	5	25	81	126	4	112	72	20	7	0
	1	0	8	35	114	156	3	182	136	47	11	2	0
0	3	6	27	69	165	245	2	273	160	87	24	6	0
0	2	8	33	97	243	391	1	355	262	126	47	9	2
7	6	5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	6
								1	2	3	4	5	7

10 mil pontos contados

constante a = 24
25% nas 4 classes principais

n maximo = 18
maximo pico = 81
minimo vale = -76

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissas)

10 mil pontos contados

constante a = 26
24% nas 4 classes principais

n maximo = 19
maximo pico = 82
minimo vale = -83

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

10 mil pontos contados

constante a = 28
21% nas 4 classes principais

```
n maximo = 23  
maximo pico = 96  
minimo vale = -89
```

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

10 mil pontos contados

constante a = 30
18% nas 4 classes principais

n maximo = 23
maximo pico = 95
minimo vale = -95

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

10 mil pontos contados

constante a = 32
17% nas 4 classes principais

```
n maximo = 19
maximo pico = 100
minimo vale = -100
```

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (absoissca)

10 mil pontos contados

constante a = 34
16% nas 4 classes principais

```
n maximo = 24
maximo pico = 100
minimo vale = -99
```

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissas)

10 mil pontos contados

constante a = 36
14% nas 4 classes principais

```
n maximo = 20
maximo pico = 99
minimo vale = -100
```

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

10 mil pontos contados

constante a = 38
12% nas 4 classes principais

n maximo = 21
2 ciclos de amplitud maxima

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (-1, 0, 1)

10 mil pontos contados

constante a = 40
12% nas 4 classes principais

```
n maximo = 21
maximo pico = 100
minimo vale = -100
```

A10

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	11	20	8	0								
		0	12	19	14	0								
		0	3	19	18	18	0	0						
		0	6	22	17	17	5	0						
		0	6	21	16	25	7	0						
		0	2	11	25	15	26	9	0	0				
		0	4	17	26	14	24	4	1	0	0	0		
		0	3	14	26	13	21	17	5	0	0	0		
		0	2	3	13	29	12	24	21	4	1	0		
	0	1	3	6	22	27	11	35	19	6	1	1	0	
0	1	2	5	11	32	34	10	20	16	7	0	0	0	
0	2	6	7	15	28	50	8	40	29	14	6	1	1	0
0	3	4	15	21	31	34	7	35	34	16	7	2	0	1
0	3	13	12	35	47	46	6	41	37	23	8	6	2	1
2	0	10	36	37	41	75	5	54	49	42	17	10	3	2
5	10	13	27	45	67	70	4	76	66	43	29	14	3	3
6	10	29	50	60	83	79	3	74	89	41	32	23	7	3
8	20	33	52	85	112	140	2	134	108	85	35	29	19	8
11	27	51	64	96	123	164	1	157	123	96	68	37	24	7
7	6	5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	6	7

10 mil pontos contados

constante a = 42

12% nas 4 classes principais

n maximo = 21

2 ciclos de amplitude maxima

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	16	20	12	0								
		0	12	19	13	0								
		0	2	21	18	18	3	0						
		0	4	16	17	19	1	0						
		0	0	9	23	16	30	7	0	0				
		0	4	14	22	15	25	10	0	0				
	0	0	2	11	29	14	19	13	1	0	0			
0	0	6	14	27	13	31	17	5	0	0				
0	0	4	9	10	35	12	25	15	7	2	0			
0	1	3	9	18	25	11	28	27	10	0	2	0		
1	1	1	6	21	26	10	51	22	20	1	1	0		
0	0	3	5	17	27	41	9	33	36	13	7	1	0	
0	0	5	13	23	33	39	8	37	30	23	8	2	1	0
0	4	9	11	20	31	41	7	35	43	16	9	7	2	0
0	3	7	15	31	40	48	6	40	48	29	12	6	4	0
3	1	9	22	33	40	65	5	47	52	46	23	7	3	2
8	5	18	22	44	67	74	4	67	82	49	25	14	4	4
9	6	18	42	50	90	107	3	74	90	60	35	15	15	3
11	14	35	44	75	69	115	2	120	97	79	58	30	17	4
16	23	47	63	89	122	129	1	139	107	105	77	46	25	11
7	6	5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	6	7

10 mil pontos contados

constante a = 44

10% nas 4 classes principais

n maximo = 23

2 ciclos de amplitude maxima

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissas)

10 mil pontos contados

constante a = 46
9% nas 4 classes principais

n maximo = 20
3 ciclos de amplitud maxima

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

					0	27	20	15	0						
					0	13	19	20	0						
			0		2	16	18	23	4						
			0		2	25	17	21	10						
		0	0		12	28	16	20	11	0		0			
		0	0	4	8	27	15	26	13	2	0				
	0	0	0	4	21	23	14	32	10	7	0		0		
	0	0	0	3	13	27	13	26	19	7	1	0			
	0	0	5	15	15	26	12	32	20	16	5	1			
0	0	0	3	13	22	25	11	20	20	11	2	1		0	
0	0	3	7	14	32	32	10	25	23	16	7	1	0		
0	0	1	5	13	39	26	9	33	28	22	17	2	1	0	0
0	1	7	15	17	33	26	8	41	23	19	12	1	0		
0	2	6	15	24	32	37	7	30	38	21	10	5	3	1	0
2	4	2	14	33	36	41	6	46	32	33	17	10	6	0	0
2	11	13	13	27	51	63	5	52	48	38	23	15	6	0	
4	9	20	29	48	52	62	4	59	57	49	25	14	12	5	
5	11	27	30	58	54	75	3	74	74	53	43	28	11	6	
14	22	35	59	67	80	100	2	115	90	79	47	43	21	15	
15	32	50	70	76	134	126	1	123	110	88	78	44	27	22	
7	6	5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	6	7	

10 mil pontos contados

constante a = 48
9% nas 4 classes principais

n maximo = 18
4 ciclos de amplitud maxima

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

10 mil pontos contados

constante a = 50
9% nas 4 classes principais

n maximo = 23
3 ciclos de amplitud maxima

APÊNDICE_B

Matrizes de contagem de históricos simulados de carregamento aleatório com uma determinada distribuição normal, variando-se o número total de pontos contados.

O gráfico com os resultados desta simulação está apresentado na figura 28 (pág. 47).

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				
		0	0	15	0	0				
		0	0	14	0	0				
		0	0	13	0	0				
		0	0	12	0	0				
		0	0	11	0	0				
		0	0	10	0	0				
		0	0	9	0	0				
		0	0	8	0	0				
		0	0	7	0	0				
		0	0	6	3	0				
		0	0	5	2	0				
		0	0	22	4	8	0	0	0	0
		0	0	31	3	27	1	0	0	0
		0	0	3	46	2	46	2	0	0
		0	0	20	136	1	128	18	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

1000 pontos contados

n maximo = 16

maximo pico = 30

minimo vale = -30

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				
		0	0	15	0	0				
		0	0	14	0	0				
		0	0	13	0	0				
		0	0	12	0	0				
		0	0	11	0	0				
		0	0	10	0	0				
		0	0	9	0	0				
		0	0	8	0	0				
		0	0	7	0	0				
		0	0	6	2	0				
		0	0	5	1	0				
		0	0	4	18	9	0	0	0	0
		0	0	3	30	3	18	0	0	0
		0	0	2	56	2	58	1	0	0
		1	1	23	143	1	113	11	1	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

1000 pontos contados

n maximo = 13

maximo pico = 30

minimo vale = -27

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

1.000 pontos contados

n maximo = 14

maximo pico = 31
minimo vale = -27

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissas)

2.500 pontos contados

n maximo = 16

maximo pico = 30
minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0			
			0	0	19	0	0			
			0	0	18	0	0			
			0	0	17	0	0			
			0	0	16	0	0			
			0	0	15	0	0			0
0	0	0	0	0	14	0	0			0
0	0	0	0	0	13	0	0			0
0	0	0	0	0	12	0	0			0
0	0	0	0	0	11	0	0			0
0	0	0	0	0	10	0	0			0
0	0	0	0	0	9	0	0			0
0	0	0	0	0	8	0	0			0
0	0	0	0	0	7	0	0			0
0	0	0	0	0	6	5	0			0
0	0	0	0	0	12	5	15	0	0	0
0	0	0	0	0	37	4	29	0	0	0
0	0	0	1	72	3	52	3	0	0	0
0	0	0	9	139	2	118	15	0	0	0
0	0	2	39	357	1	291	51	2	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

2500 pontos contados

n maximo = 17

maximo pico = 31
minimo vale = -29

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0			
			0	0	19	0	0			
			0	0	18	0	0			
			0	0	17	0	0			
			0	0	16	0	0			
			0	0	15	0	0			0
0	0	0	0	0	14	0	0			0
0	0	0	0	0	13	0	0			0
0	0	0	0	0	12	0	0			0
0	0	0	0	0	11	0	0			0
0	0	0	0	0	10	0	0			0
0	0	0	0	0	9	0	0			0
0	0	0	0	0	8	0	0			0
0	0	0	0	0	7	1	0			0
0	0	0	0	0	6	6	2	0		0
0	0	0	0	0	18	5	9	0		0
0	0	0	0	0	39	4	30	0		0
0	0	0	2	62	3	57	2	0		0
0	0	0	11	146	2	116	8	0		0
0	0	0	45	379	1	274	41	1	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

2500 pontos contados

n maximo = 15

maximo pico = 36
minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0		
			0	0	19	0	0		
			0	0	18	0	0		
			0	0	17	0	0		
			0	0	16	0	0		0
			0	0	15	0	0	0	0
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
0	0	0	0	0	7	0	0	0	0
0	0	0	0	3	6	11	0	0	0
0	0	0	0	32	5	21	0	0	0
0	0	0	0	85	4	52	0	0	0
0	0	0	2	145	3	106	4	0	0
0	0	0	16	269	2	239	19	0	0
0	0	3	94	726	1	582	87	3	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4
									5

5 mil pontos contados

n maximo = 17

maximo pico = 31

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0		
			0	0	19	0	0		
			0	0	18	0	0		
			0	0	17	0	0		
			0	0	16	0	0		0
			0	0	15	0	0	0	0
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
0	0	0	0	2	7	2	0	0	0
0	0	0	0	9	6	8	0	0	0
0	0	0	0	28	5	20	0	0	0
0	0	0	0	66	4	56	0	0	0
0	0	0	4	128	3	136	2	0	0
0	0	1	21	251	2	272	15	0	0
0	0	1	67	631	1	676	83	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4
									5

5 mil pontos contados

n maximo = 18

maximo pico = 34

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0			
			0	0	19	0	0			
			0	0	18	0	0	0		
			0	0	17	0	0	0		
			0	0	16	0	0	0	0	
			0	0	15	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	7	2	0	0	0
0	0	0	0	0	12	6	12	0	0	0
0	0	0	0	0	26	5	25	0	0	0
0	0	0	0	0	51	4	70	0	0	0
0	0	0	0	1	136	3	109	4	0	0
0	0	0	0	11	253	2	268	22	0	0
0	0	0	0	77	690	1	641	80	8	0
5	4	3	2	1			1	2	3	4
										5

5 mil pontos contados

n maximo = 18

maximo pico = 31

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0			
			0	0	19	0	0			
			0	0	18	0	0	0		
			0	0	17	0	0	0		
			0	0	16	0	0	0	0	
			0	0	15	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	2	7	3	0	0	0
0	0	0	0	0	19	6	12	0	0	0
0	0	0	0	0	69	5	39	0	0	0
0	0	0	0	0	146	4	130	0	0	0
0	0	0	0	2	255	3	238	6	0	0
0	0	0	0	35	541	2	518	28	0	0
0	0	2	150	1382	1	1245	175	2	0	0
5	4	3	2	1			1	2	3	4
										5

10 mil pontos contados

n maximo = 18

maximo pico = 36

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0			
			0	0	19	0	0			
			0	0	18	0	0			
			0	0	17	0	0			
			0	0	16	0	0			
0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	5	7	5	0	0	0
0	0	0	0	0	20	6	10	0	0	0
0	0	0	0	0	51	5	54	0	0	0
0	0	0	1	139	4	136	0	0	0	0
0	0	0	8	263	3	255	6	0	0	0
0	0	0	39	514	2	516	41	0	0	0
0	0	3	174	1302	1	1285	169	3	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

10 mil pontos contados

n maximo = 19

maximo pico = 35

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0			
			0	0	19	0	0			
			0	0	18	0	0			
			0	0	17	0	0			
			0	0	16	0	0			
0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	7	4	0	0	0
0	0	0	0	0	16	6	22	0	0	0
0	0	0	0	0	45	5	51	1	0	0
0	0	0	0	0	155	4	111	1	0	0
0	0	0	6	279	3	235	7	0	0	0
0	0	1	31	550	2	479	51	0	0	0
0	0	3	160	1324	1	1284	179	3	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

10 mil pontos contados

n maximo = 20

maximo pico = 33

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				0
		0	0	15	0	0			0	0
0	0	0	0	14	0	0			0	0
0	0	0	0	13	0	0			0	0
0	0	0	0	12	0	0			0	0
0	0	0	0	11	0	0			0	0
0	0	0	0	10	0	0			0	0
0	0	0	0	9	0	0			0	0
0	0	0	0	8	0	0			0	0
0	0	0	0	6	7	5	0	0	0	0
0	0	0	0	45	6	37	0	0	0	0
0	0	0	0	147	5	126	0	0	0	0
0	0	0	0	314	4	324	1	0	0	0
0	0	0	0	19	647	3	608	16	0	0
0	0	0	0	107	1319	2	1239	82	0	0
0	0	10	411	3373	1	3209	445	9	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

25 mil pontos contados

n maximo = 19

maximo pico = 35
minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				0
		0	0	15	0	0			0	0
0	0	0	0	14	0	0			0	0
0	0	0	0	13	0	0			0	0
0	0	0	0	12	0	0			0	0
0	0	0	0	11	0	0			0	0
0	0	0	0	10	0	0			0	0
0	0	0	0	9	0	0			0	0
0	0	0	0	8	0	0			0	0
0	0	0	0	12	7	5	0	0	0	0
0	0	0	0	44	6	46	0	0	0	0
0	0	0	0	135	5	130	0	0	0	0
0	0	0	1	325	4	302	3	0	0	0
0	0	0	25	667	3	587	14	0	0	0
0	0	0	75	1321	2	1243	101	0	0	0
0	0	9	484	3291	1	3234	436	9	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

25 mil pontos contados

n maximo = 20

maximo pico = 34
minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0				
			0	0	19	0	0				
			0	0	18	0	0				
			0	0	17	0	0				
			0	0	16	0	0				
			0	0	15	0	0				0
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	7	6	0	0	0	0
0	0	0	0	0	37	6	50	0	0	0	0
0	0	0	0	0	140	5	134	0	0	0	0
0	0	0	2	341	4	319	2	0	0	0	0
0	0	0	15	687	3	579	14	0	0	0	0
0	0	0	101	1375	2	1201	98	0	0	0	0
0	0	12	467	3295	1	3143	461	8	0	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	

25 mil pontos contados

n maximo = 20

maximo pico = 36

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0				
			0	0	19	0	0				
			0	0	18	0	0				
			0	0	17	0	0				
			0	0	16	0	0				
			0	0	15	0	0				0
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	20	7	12	0	0	0	0
0	0	0	0	0	88	6	84	0	0	0	0
0	0	0	0	0	275	5	263	0	0	0	0
0	0	0	0	0	691	4	615	1	0	0	0
0	0	0	42	1330	3	1199	38	0	0	0	0
0	0	2	173	2703	2	2476	183	0	0	0	0
0	0	17	896	6633	1	6361	872	22	0	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	

50 mil pontos contados

n maximo = 20

maximo pico = 47

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				0
		0	0	15	0	0				0
0	0	0	0	14	0	0				0
0	0	0	0	13	0	0				0
0	0	0	0	12	0	0				0
0	0	0	0	11	0	0				0
0	0	0	0	10	0	0				0
0	0	0	0	9	0	0				0
0	0	0	0	8	1	0				0
0	0	0	0	21	7	10	0	0	0	0
0	0	0	0	121	6	80	0	0	0	0
0	0	0	0	268	5	263	0	0	0	0
0	0	0	2	677	4	576	2	0	0	0
0	0	0	29	1319	3	1135	40	0	0	0
0	0	0	177	2801	2	2490	180	1	0	0
0	0	19	915	6736	1	6254	857	25	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

50 mil pontos contados

n maximo = 20

maximo pico = 43

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				0
		0	0	15	0	0				0
0	0	0	0	14	0	0				0
0	0	0	0	13	0	0				0
0	0	0	0	12	0	0				0
0	0	0	0	11	0	0				0
0	0	0	0	10	0	0				0
0	0	0	0	9	0	0				0
0	0	0	0	8	0	0				0
0	0	0	0	14	7	9	0	0	0	0
0	0	0	0	83	6	70	0	0	0	0
0	0	0	0	312	5	233	0	0	0	0
0	0	0	0	655	4	627	1	0	0	0
0	0	0	34	1329	3	1175	34	0	0	0
0	0	0	191	2699	2	2460	164	0	0	0
0	0	18	850	6795	1	6376	855	15	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

50 mil pontos contados

n maximo = 19

maximo pico = 36

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSAO MEDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0			
			0	0	19	0	0			
			0	0	18	0	0			
			0	0	17	0	0			
			0	0	16	0	0			
			0	0	15	0	0			
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	1	0	0	0	0
0	0	0	0	42	7	26	0	0	0	0
0	0	0	0	172	6	165	0	0	0	0
0	0	0	0	581	5	519	0	0	0	0
0	0	0	3	1361	4	1227	3	0	0	0
0	0	0	76	2636	3	2389	76	0	0	0
0	0	5	382	5292	2	4928	331	3	0	0
0	0	45	1840	13297	1	12736	1808	55	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

100 mil pontos contados

n maximo = 21

maximo pico = 39

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSAO MEDIA (abscissa)

			0	0	20	0	0			
			0	0	19	0	0			
			0	0	18	0	0			
			0	0	17	0	0			
			0	0	16	0	0			
			0	0	15	0	0			
0	0	0	0	0	14	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	13	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	11	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	8	1	0	0	0	0
0	0	0	0	34	7	20	0	0	0	0
0	0	0	0	187	6	155	0	0	0	0
0	0	0	0	558	5	552	1	0	0	0
0	0	0	3	1362	4	1222	6	0	0	0
0	0	5	59	2533	3	2462	70	0	0	0
0	0	374	5377	2	5061	380	3	0	0	0
0	0	41	1840	13188	1	12666	1802	37	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

100 mil pontos contados

B10

n maximo = 23

maximo pico = 43

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

	0	0	20	0	0						
	0	0	19	0	0						
	0	0	0	18	0						
	0	0	0	17	0						
	0	0	0	16	0					0	
0	0	0	0	15	0				0	0	
0	0	0	0	14	0				0	0	
0	0	0	0	13	0				0	0	
0	0	0	0	12	0				0	0	
0	0	0	0	11	0				0	0	
0	0	0	0	10	0				0	0	
0	0	0	0	9	0				0	0	
0	0	0	0	8	0				0	0	
0	0	0	0	48	7	27	0	0	0	0	
0	0	0	0	169	6	179	0	0	0	0	
0	0	0	0	580	5	523	0	0	0	0	
0	0	0	0	7	1377	4	1205	9	0	0	
0	0	0	0	55	2660	3	2396	78	0	0	
0	0	0	0	348	5450	2	4931	399	2	0	
0	0	0	0	35	1658	13419	1	12694	1706	41	0
5	4	3	2	1			1	2	3	4	5

100 mil pontos contados

n maximo = 20

maximo pico = 38
minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

	0	0	20	0	0						
	0	0	19	0	0						
	0	0	0	18	0						
	0	0	0	17	0						
	0	0	0	16	0					0	
0	0	0	0	15	0				0	0	
0	0	0	0	14	0				0	0	
0	0	0	0	13	0				0	0	
0	0	0	0	12	0				0	0	
0	0	0	0	11	0				0	0	
0	0	0	0	10	0				0	0	
0	0	0	0	9	0				0	0	
0	0	0	0	8	1	0			0	0	
0	0	0	0	107	7	46	0	0	0	0	
0	0	0	0	442	6	408	0	0	0	0	
0	0	0	0	2	1445	5	1306	1	0	0	
0	0	0	0	11	3360	4	3061	8	0	0	
0	0	0	0	175	6632	3	5950	193	0	0	
0	0	0	0	10	887	13595	2	12471	907	5	0
0	0	0	0	94	4350	33482	1	31556	4393	101	0
5	4	3	2	1			1	2	3	4	5

250 mil pontos contados

n maximo = 22

maximo pico = 41
minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				
		0	0	15	0	0				
		0	0	14	0	0				
		0	0	13	0	0				
		0	0	12	0	0				
		0	0	11	0	0				
		0	0	10	0	0				
		0	0	9	0	0				
		0	0	8	0	0				
		0	0	100	7	54	0	0	0	0
		0	0	461	6	387	0	0	0	0
		0	0	1497	5	1344	0	0	0	0
		0	0	15	3433	4	2995	15	0	0
		0	0	171	6672	3	5821	164	0	0
		2	0	828	13444	2	12673	888	12	0
	0	99	4362	33324	1	31725	4407	106	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

250 mil pontos contados

n maximo = 22

maximo pico = 38

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MEDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				
		0	0	15	0	0				
		0	0	14	0	0				
		0	0	13	0	0				
		0	0	12	0	0				
		0	0	11	0	0				
		0	0	10	0	0				
		0	0	9	0	0				
		0	0	8	0	0				
		0	0	110	7	56	0	0	0	0
		0	0	449	6	384	0	0	0	0
		0	0	1	1472	5	1262	0	0	0
		0	0	9	3401	4	3071	16	0	0
		0	0	150	6523	3	5949	183	0	0
		6	0	887	13578	2	12353	912	3	0
	0	99	4330	33619	1	31830	4241	105	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

250 mil pontos contados

n maximo = 21

maximo pico = 38

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSAO MEDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				0
0	0	0	0	15	0	0			0	0
0	0	0	0	14	0	0			0	0
0	0	0	0	13	0	0			0	0
0	0	0	0	12	0	0			0	0
0	0	0	0	11	0	0			0	0
0	0	0	0	10	0	0			0	0
0	0	0	0	9	0	0			0	0
0	0	0	0	8	0	0			0	0
0	0	0	0	189	7	137	0	0	0	0
0	0	0	0	901	6	793	0	0	0	0
0	0	0	1	3011	5	2504	1	0	0	0
0	0	0	19	6961	4	6110	34	0	0	0
0	0	1	339	13190	3	11862	347	0	0	0
0	0	13	1837	27280	2	24639	1810	10	0	0
0	0	195	8958	66830	1	62936	8903	188	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

500 mil pontos contados

n maximo = 23

maximo pico = 38

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSAO MEDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0				
		0	0	19	0	0				
		0	0	18	0	0				
		0	0	17	0	0				
		0	0	16	0	0				0
0	0	0	0	15	0	0			0	0
0	0	0	0	14	0	0			0	0
0	0	0	0	13	0	0			0	0
0	0	0	0	12	0	0			0	0
0	0	0	0	11	0	0			0	0
0	0	0	0	10	0	0			0	0
0	0	0	0	9	0	0			0	0
0	0	0	0	8	1	0			0	0
0	0	0	0	189	7	123	0	0	0	0
0	0	0	0	913	6	764	0	0	0	0
0	0	0	2	2956	5	2523	4	0	0	0
0	0	0	29	6735	4	5970	36	0	0	0
0	0	1	314	13430	3	11945	333	1	0	0
0	0	10	1771	27403	2	24687	1743	12	0	0
0	0	199	8811	66992	1	63172	8739	191	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5

500 mil pontos contados

n maximo = 22

maximo pico = 39

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0					
		0	0	19	0	0					
		0	0	18	0	0					
		0	0	17	0	0					
		0	0	16	0	0					
		0	0	15	0	0					0
0	0	0	0	14	0	0					0
0	0	0	0	13	0	0					0
0	0	0	0	12	0	0					0
0	0	0	0	11	0	0					0
0	0	0	0	10	0	0					0
0	0	0	0	9	0	0					0
0	0	0	0	8	0	0					0
0	0	0	0	218	7	116	0	0	0	0	0
0	0	0	0	910	6	791	0	0	0	0	0
0	0	0	1	2990	5	2495	0	0	0	0	0
0	0	0	23	6793	4	6080	26	0	0	0	0
0	0	0	310	13209	3	11816	354	0	0	0	0
0	0	13	1738	27171	2	24758	1770	12	0	0	0
0	0	185	8778	67143	1	63410	8698	191	0	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	

500 mil pontos contados

n maximo = 24

maximo pico = 38

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSÃO MÉDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0					
		0	0	19	0	0					
		0	0	18	0	0					
		0	0	17	0	0					
		0	0	16	0	0					0
		0	0	15	0	0					0
0	0	0	0	14	0	0					0
0	0	0	0	13	0	0					0
0	0	0	0	12	0	0					0
0	0	0	0	11	0	0					0
0	0	0	0	10	0	0					0
0	0	0	0	9	0	0					0
0	0	0	0	8	7	0					0
0	0	0	0	440	7	210	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1899	6	1550	0	0	0	0	0
0	0	0	3	5925	5	4991	3	0	0	0	0
0	0	0	58	13781	4	12231	75	0	0	0	0
0	0	1	662	26437	3	23591	719	0	0	0	0
0	0	32	3513	54145	2	49899	3378	30	0	0	0
0	0	371	17609	133704	1	126518	17806	411	0	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	

1000 mil pontos contados

n maximo = 24

maximo pico = 44

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSAO MEDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0					
		0	0	19	0	0					
		0	0	18	0	0					0
		0	0	17	0	0					0
		0	0	16	0	0					0
0	0	0	0	15	0	0					0
0	0	0	0	14	0	0					0
0	0	0	0	13	0	0					0
0	0	0	0	12	0	0					0
0	0	0	0	11	0	0					0
0	0	0	0	10	0	0					0
0	0	0	0	9	0	0					0
0	0	0	0	8	3	0					0
0	0	0	0	422	7	223	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1863	6	1569	0	0	0	0	0
0	0	0	0	6	5891	5	5007	4	0	0	0
0	0	0	0	60	13722	4	12165	55	0	0	0
0	0	0	0	692	26217	3	23883	646	1	0	0
0	0	25	3493	53417	2	49962	3535	27	0	0	0
0	0	406	17504	133881	1	127310	17624	386	0	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	

1000 mil pontos contados

n maximo = 23

maximo pico = 41

minimo vale = -31

MATRIZ DE AMPLITUDES (ordenada) POR TENSAO MEDIA (abscissa)

		0	0	20	0	0					
		0	0	19	0	0					
		0	0	18	0	0					0
		0	0	17	0	0					0
		0	0	16	0	0					0
0	0	0	0	15	0	0					0
0	0	0	0	14	0	0					0
0	0	0	0	13	0	0					0
0	0	0	0	12	0	0					0
0	0	0	0	11	0	0					0
0	0	0	0	10	0	0					0
0	0	0	0	9	0	0					0
0	0	0	0	8	7	0					0
0	0	0	0	400	7	245	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1892	6	1630	0	0	0	0	0
0	0	0	2	5930	5	4952	3	0	0	0	0
0	0	0	68	13708	4	12114	74	0	0	0	0
0	0	0	686	26279	3	23721	743	0	0	0	0
0	0	20	3569	54169	2	49720	3621	16	0	0	0
0	0	390	17516	132920	1	127384	17830	390	0	0	0
5	4	3	2	1		1	2	3	4	5	

1000 mil pontos contados

n maximo = 24

maximo pico = 44

minimo vale = -31