

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE AQUISIÇÃO DE DADOS E ANÁLISE DE SINAIS E DESENVOLVIMENTO DE ANÁLISE POR VARREDURA SENOIDAL EM TESTES DE VIBRAÇÃO

Rovilson Emilio da Silva, rovilson@lit.inpe.br¹
Eduardo Hidenori Enari, eduardoenari@gmail.com¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas 1758 São José. dos Campos – SP, CEP. 12.227-010,

²Universidade de Taubaté, Rua Daniel Danelli s/n, Jardim Morumbi, Taubaté, SP, CEP 12060-440

Resumo: *A qualificação de satélites do programa espacial brasileiro demanda a definição de testes ambientais visando determinar se o ambiente interfere de alguma maneira no seu desempenho. Este trabalho visa à solução de deficiências e instabilidade operacional do sistema de aquisição de dados utilizado nos testes de vibração, com foco no teste por varredura senoidal. Durante o desenvolvimento deste trabalho, tornou-se necessária a avaliação do sistema original e a decodificação de sua base de dados, com a finalidade de identificar as razões de suas instabilidades. Foram empreendidos esforços na compreensão dos testes senoidais e técnicas de processamento digital de sinais. A avaliação, o estudo e o acesso às informações decodificadas possibilitaram a definição de um método alternativo para a análise de vibração. O método delimitou a atuação do sistema original, isolando suas funcionalidades instáveis; definiu procedimentos para transferências e compartilhamento de arquivos e motivou a implementação dos programas para análise da vibração. Isso permitiu o reaproveitamento parcial do sistema original e economia de recursos. Ao final, o trabalho permitiu a implantação do novo método para análise dos testes de vibração por varredura senoidal. Os recursos de análise de teste, apresentação e compartilhamento de resultados foram melhorados substancialmente em relação ao sistema original, atendendo plenamente as requeridas funcionalidades. No bojo desse esforço, o conhecimento adquirido foi aplicado na implementação dos programas de análise para testes de vibração aleatória, transiente e choque. O trabalho elevou a competência em programação e processamento digital de sinais e contribuiu na manutenção da confiabilidade na qualificação de satélites. Os programas desenvolvidos disponibilizaram recursos que tornaram mais eficiente as análises dos resultados. A eficiente análise dos resultados conduz à correta avaliação do comportamento dinâmico e identificação de tendências a falhas, tornando ágil e qualificando a tomada de decisão quanto à condução do programa de testes previsto.*

Palavras-chave: *testes ambientais, vibração, aquisição de dados, varredura senoidal*

1. INTRODUÇÃO

O Laboratório de Integração e Testes – LIT, foi especialmente projetado e construído nas instalações do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, para atender às necessidades do programa espacial brasileiro e representa um dos instrumentos mais sofisticados para a qualificação de produtos industriais que exijam alto grau de confiabilidade. O laboratório é dotado de uma estrutura física e de recursos humanos especializados, sendo único do gênero no hemisfério sul.

Esse laboratório vem desempenhando papel fundamental desde 1993, quando o Brasil passou a figurar entre os países que possuem tecnologia para desenvolver satélites artificiais, indispensáveis a vida moderna.

Sua atuação compreende a qualificação de componentes, a montagem, a integração e a plena execução da matriz de testes requerida para dispositivos espaciais. Essas atividades correspondem a conjuntos de procedimentos e à execução de uma sequência de eventos logicamente inter-relacionados, cujo propósito é obter um alto grau de confiança no funcionamento do dispositivo espacial e a garantia de que todas as especificações de projeto e desempenho sejam plenamente alcançadas. No caso dos satélites, todas as condições operacionais e ambientais, às quais estão sujeitos, desde o lançamento até a operação em órbita, são simuladas no laboratório. As condições ambientais simuladas compreendem as vibrações mecânicas e acústicas, que ocorrem durante o lançamento; as condições de vácuo e temperaturas adversas, que ocorrem durante a operação em órbita e a susceptibilidade às radiações eletromagnéticas, que ocorrem no espaço de sua órbita.

Conforme Smith (1976), os testes de confiabilidade medem ou demonstram a confiabilidade de um equipamento, ou seja, sua habilidade de desempenhar sua função adequadamente num específico intervalo de tempo sob condições estabelecidas. O objetivo dos testes é identificar as fragilidades e obter informação sobre a tendência à falhas de um equipamento e as consequências destas falhas.

A norma MIL-STD-810G (2008), descreve na primeira parte, o gerenciamento, a engenharia e as competências no processo de identificação das condições ambientais específicas que um equipamento vai encontrar em sua vida útil e de criação do programa de testes requerido. Na segunda parte, a norma apresenta métodos de laboratório para um programa de teste genérico ou específico, como descrito na primeira parte. A segunda parte é semelhante a norma IEC-68-1 (1982), sendo que cada tópico específico é coberto por uma série de outras normas IEC.

Conforme a norma IEC-68-1 (1982), a expressão “testes ambientais” cobre ambientes naturais e artificiais aos quais os equipamentos e os componentes podem ser expostos para fins de avaliação de desempenho sob condições de uso, transporte e armazenamento.

A parte 2-1 da norma MIL-STD-810G (2008), apresenta métodos para definição de análises, critérios de teste e avaliação de resultados para várias condições que possam afetar a integridade e o desempenho de equipamentos.

Conforme o Método 514-6 da norma MIL-STD-810G (2008), as vibrações resultam em deflexões mecânicas e essas deflexões associadas a velocidades e acelerações podem causar ou contribuir para a fadiga e deterioração dos equipamentos e seus componentes. Os sintomas típicos de problemas induzidos por vibração são: fadiga de cabecamentos, perda de fixadores e componentes, contatos elétricos intermitentes, curtos-circuitos elétricos, deformação de lacres, falhas em componentes, desalinhamento mecânico ou óptico, trincas ou quebras de estruturas entre outros. Os procedimentos para mitigar esses efeitos estão englobados no controle de choque e vibração.

Similarmente às demais normas do gênero, a norma MIL-STD-810G (2008), classifica as vibrações ambientes por meio de categorias, conforme a fase dentro do ciclo de vida, a plataforma e a forma de fixação. A norma associa à cada categoria um de seus anexos e também o teste aplicável. Na descrição do teste aplicável são recomendados os Métodos de Testes de Laboratório adequados. Segundo o Anexo A do Método 514.6 – Vibração, os equipamentos estão sujeitos, na maioria das vezes, à níveis de vibração caracterizados por um amplo espectro de frequência, com amplitudes variando periodicamente, aleatoriamente ou de forma mista. Dessa forma, os testes são caracterizados pelo tipo de excitação requerida, que pode ser aleatória, senoidal, mista, transiente ou equivalente.

A excitação por vibração senoidal é largamente utilizada para testes de desenvolvimento pela simplicidade e por apresentar propriedades determinísticas bem definidas e caracterizadas pela frequência fundamental e suas harmônicas. O teste de vibração senoidal é usado para simular a vibração ambiental produzida por máquinas rotativas, motores à pistão e conforme os conceitos e definições do manual de operação 2560-0130 Sine Operating Manual, Spectral Dynamics (1999), é também utilizada em testes de desenvolvimento que visam identificar as propriedades dinâmicas, estudar os efeitos de frequências de excitação no desempenho e determinar as frequências críticas ou de ressonâncias onde ocorre alguma degradação.

1.1. Problema

Devido às dimensões físicas e à maior complexidade tecnológica dos satélites, houve a necessidade da expansão do laboratório e de vários sistemas de testes. O programa espacial brasileiro, em função de programas de cooperação internacional, demandou um sistema para testes de vibração e acústica com maior capacidade de monitoração. Estruturas grandes possuem maior superfície e, portanto requerem um número maior de sensores de monitoração. A compra do sistema de aquisição de dados demandou um complexo e dispendioso processo de licitação internacional.

O sistema que operava anteriormente foi totalmente desativado, tanto pela sua obsolescência quanto pela necessidade de espaço físico.

À época, o cronograma do laboratório previa duas campanhas de testes para os programas de cooperação internacional – um com a Argentina (satélite SAC-D) e outro com a China (satélite CBERS-2B). Apesar dos compromissos, o sistema implantado não conseguiu apresentar os níveis esperados de estabilidade e desempenho.

Dentre as principais deficiências do sistema implantado destacam-se:

- Instabilidade durante a realização do teste:
Durante a aquisição e análise de dados, ocorrem abruptas interrupções, com travamento parcial ou completo do sistema. Quase sempre a medida mais segura é desligar o sistema integralmente e religá-lo novamente. Normalmente as interrupções causam a perda dos dados do teste.
- Poucos recursos de processamento de dados e de visualização:
O sistema não permite alterar os parâmetros de processamento de dados e apresenta poucos recursos para exposição dos resultados.
- Precariedade de compartilhamento de resultados:
A limitada e defeituosa geração de arquivos para exportação e o sistema operacional incomum, dificultam o intercâmbio de informações entre os diversos agentes do teste de vibração.
- Ineficiência na análise dos resultados.
Para que o teste possa ser analisado eficientemente, todos os resultados do teste precisam ser disponibilizados. Além disso, devem existir ferramentas que permitam a manipulação das informações, adequações de escalas, comparações entre resultados e entre testes, sobreposições de dados, alguns cálculos matemáticos etc.

Neste sistema os dados de um mesmo teste são analisados por visualização em gráficos independentes na tela do computador ou por suas impressões. A comparação entre testes diferentes ocorrem por visualização de gráficos impressos, por sobreposição dos mesmos e exposição contra a luz. Infelizmente os gráficos impressos de testes anteriores nem sempre estão na escala adequada para a comparação e as escalas logarítmicas, normalmente utilizadas, podem mascarar diferenças importantes. Além disso, a ineficiente comparação devido à baixa transparência do papel fica ainda mais dificultada quando os gráficos possuem diferentes elementos de destaque tais como cores, cursores e legendas, grades nos eixos etc. Outro ponto é que muitas vezes os gráficos de testes anteriores são peças de relatórios concluídos, disponibilizados no conjunto ou por meio de cópias reprográficas, dificultando ainda mais sua manipulação.

Os testes de vibração e acústica são testes severos que não podem ser repetidos sob pena de danificar o dispositivo em teste e invalidar o programa de teste. Portanto na perda dos dados do teste, a continuação depende de formalização e de autorização de todos os envolvidos. A perda dos dados num teste no qual tenha havido alguma ocorrência grave, como a quebra da uma estrutura, impede a completa análise do teste, mascarando a fragilidade e a tendência à falha.

A condução desastrosa do programa de testes pode causar desgaste nos programas de cooperação internacional a nível de estado e muito desconforto em função dos prazos, custos e empresas envolvidas.

1.2. Objetivo

A despeito das suas instabilidades, o sistema implantado apresenta todas as características de um sistema de aquisição de dados portentoso e moderno. Visando evitar maiores desgastes internos e economizar recursos oficiais, tornou-se mandatório seu reaproveitamento ao invés de um novo processo de compra.

O objetivo geral deste trabalho é disponibilizar uma alternativa para resolver as instabilidades do sistema de análise de vibração que faz parte do sistema de ensaios dinâmicos do Laboratório de Integração e Testes (LIT).

Tem como meta resolver as deficiências identificadas, restringindo a atuação do sistema original, isolando suas funcionalidades instáveis e introduzindo um novo método baseado em novos procedimentos de aquisição e de transferência de arquivos juntamente com programas para recuperação das informações, análise e apresentação de resultados.

Além de resolver as instabilidades e com vistas a dinamizar e qualificar ainda mais as tomadas de decisões quanto ao andamento do programa de testes, esse desenvolvimento tem como objetivos específicos tornar mais eficientes e dinamizar as análises do teste; potencializar a apresentação de resultados; prover um nível adequado de compartilhamento de informações e resultados e criar mecanismos de comparação de resultados do mesmo teste e de resultados de testes diferentes.

O trabalho visa ainda elevar a competência em análise de vibração baseada em processamento digital de sinais, aplicando-se a larga experiência interna em análise de vibração e em linguagens de programação, criando as bases para o desenvolvimento de programas de análise para os demais tipos de testes de vibração realizados no laboratório.

Desta forma o trabalho tem como metas muito claras a aplicação da experiência em programação e análise de vibração, o uso das instalações de teste e o reaproveitamento sistema de aquisição de dados implantado, focando especificamente no teste de vibração, o qual envolve a varredura senoidal (*sweep sine test*).

2. MÉTODOS E MATERIAIS

Não obstante as instabilidades, o sistema original apresenta as requeridas características de um sistema de aquisição de dados moderno. Atende às especificações elétricas e mecânicas, de sistema operacional, de velocidade de processamento e capacidade de memória, de topologia, de salvamento de dados em discos e fitas magnéticas, de impressão, de rede, de interface com o usuário etc. Em linhas gerais, o sistema original está baseado numa robusta e portentosa plataforma de aquisição de dados, o que motiva a opção pelo desenvolvimento ao invés de adquirir um novo sistema

Em função da brevidade requerida pelo cronograma de testes, da necessidade de poupar recursos e de evitar maiores desgastes, a missão principal foi identificar uma forma alternativa para o uso do sistema de aquisição de dados, restringindo sua atuação e implantando medidas adicionais para resolver as deficiências identificadas.

Para poder encontrar uma forma alternativa para reaproveitamento deste sistema tornou-se necessária a avaliação de suas instabilidades. A tarefa não incluiu a análise detalhada de todas as fontes de instabilidade e nem mesmo a procura pormenorizada de elementos responsáveis pelas falhas, quer a nível de programas ou de componentes eletrônicos etc. As análises causais demandariam um trabalho muito mais prolongado.

Em razão da superficialidade das análises e para evitar surpresas desagradáveis durante testes futuros, delimitou-se a atuação do sistema original dramaticamente, restringindo-o, na medida do possível, à tarefa onde é especialista e essencial – a aquisição de dados. Desta forma, assim que foi identificada uma situação de estabilidade, definiu-se o método alternativo. No método alternativo proposto, para evitar o ambiente instável e para lançar mão de toda a experiência interna, transferiu-se a maior parte do processamento para o ambiente mais amigável – O PC.

O trabalho impôs identificar meios de acesso aos arquivos de configuração, à base de dados e aos arquivos de resultados, estudar a teoria e as normas de análise de teste vibração, implementar os programas para processamento de varredura senoidal e finalmente, a implantação de um novo método para processamento de dados e análise de vibração.

O trabalho foi desenvolvido utilizando-se o sistema de testes de vibração descrito na seção 2.1 Equipamentos

envolvidos. Todos os programas foram implementados na plataforma PC com sistema operacional Windows (Microsoft), baseado no repertório de funções de processamento digital de sinais oferecido no pacote de funções matemáticas e no pacote de análise de som e vibração (*NI Sound and Vibration Toolkit*) para a linguagem de programação LabVIEW®, ambos fornecidos pela companhia americana National Instruments Corporation.

O laboratório atente à norma MIL-STD-810G (DoD, 2008) e o Método 514.6 referente à vibração, que indica o uso de instalações de teste, incluindo todo equipamento auxiliar, capaz de prover as condições de vibrações específicas com tolerâncias e estratégias adequadas de controle.

Nos testes de vibração são usados vibradores dotados de plataformas deslizantes e adaptadores. A escolha do vibrador depende do tamanho e massa do equipamento em teste somado ao adaptador requerido, da faixa de frequência, da força, da aceleração, da velocidade e do deslocamento requeridos (Smallwood, 2002).

O sistema possui três vibradores eletrodinâmicos dotados de **amplificadores de potência** para suprir a corrente elétrica em função da demanda por carga, aceleração e velocidade e de **equipamentos de refrigeração** para prover o adequado funcionamento das partes, uma vez que a demanda por altos valores de corrente elétrica eleva a temperatura do sistema (Smallwood, 2002).

São aplicados acelerômetros piezoelétricos como transdutores (sensores) de vibração. Eles convertem o movimento ou a deformação mecânica em sinal elétrico permitindo o adequado controle e a análise do comportamento do equipamento em teste. Contudo a informação elétrica como forma básica de informação pode não ser adequadamente representativa (Randall, 2002). Os sinais provenientes dos acelerômetros são condicionados por meio de amplificadores ENDEVCO-2782A e amplificadores desenvolvidos localmente.

A principal tarefa do sistema de controle é prover o sinal correspondente à vibração requerida e salvaguardar o equipamento em teste, bem como as partes envolvidas por meio de realimentação e de acordo com parâmetros de tolerância, alarmes e emergência. A relevância dessa atuação impôs que a aquisição de dados para testes de grandes estruturas ocorresse em paralelo e independente. O sistema de aquisição de dados não atua na malha de controle, o que permite a implantação de método para aquisição de dados baseado em processamento posterior. Quase sempre existe certo grau de interdependência entre ambos, tais como sinal de referência, sinal de disparos etc.

O sistema possui dois controladores SD-2560. Cada um consiste de um periférico de análise e controle (*Analysis and Control Peripherals – ACP*), dotado de microprocessadores de alto desempenho, armazenamento de dados em disco externo de 9 GB por interface SCSI, 2 saídas e até 38 entradas sendo controlado por uma estação de trabalho SUN-ULTRA 10 com sistema operacional Solaris, versão 7.

O sistema de aquisição de dados exerce o papel de converter a informação de movimento em valores representativos que permitem a quantificação e análise do comportamento do equipamento em teste, abrangendo toda logística para medida, redução de dados, armazenamento, análise, apresentação e compartilhamento de resultados. O sistema de aquisição é formado de quatro periféricos de análise e controle (ACP) melhor descritos no manual 2560-0100/D-System Description, Spectral Dynamics (2002). É composto de três periféricos de análise e controle, com microprocessadores de alto desempenho, armazenamento de dados em disco externo de 9 GB por interface SCSI, 2 saídas e até 98 canais de entrada - SD2570/ e um SD-2560/ , similar aos dois controladores. A configuração conforme a Figura 1 permite a aquisição de até 322 canais e é controlada por uma única estação de trabalho SUN-ULTRA 10 com sistema operacional Solaris, versão 7.

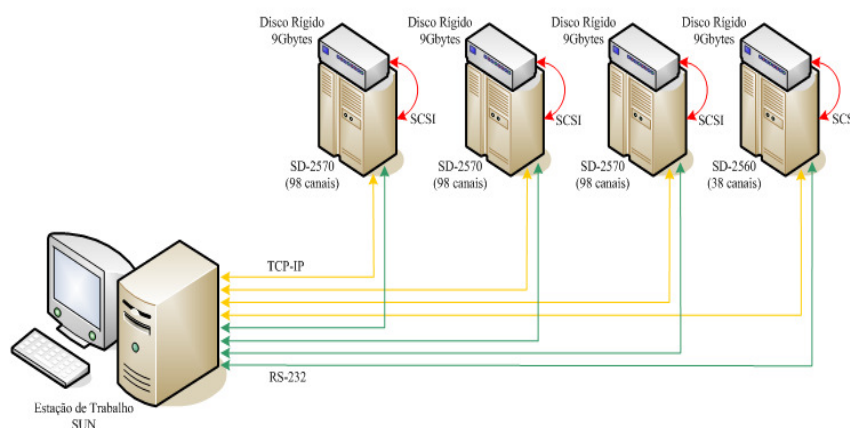


Figura 1. Sistema de Aquisição de Dados

A implementação baseada em quatro sistemas individuais demandou a centralização do controle e um complexo mecanismo de sincronização das unidades (ACP). A centralização é necessária para a logística de coleta, tratamento, análise e armazenamento dos dados, estabelecendo uma única interface de controle e entrada de parâmetros, enquanto a sincronização possibilita em última instância, a correlação de dados. Para fins de análise de vibração, de modo geral, é requerida aquisição sincronizada de todos os canais, propiciando a medida de fase entre quaisquer canais. Os aplicativos devem operar o sincronismo eletrônico durante o teste e manipular convenientemente os conteúdos dos discos na fase de análise. O sistema de aquisição de dados dispõe de aplicativos para diferentes tipos de testes e dentre outros, um aplicativo chamado *SIGNAL ANALYSIS* (*SIGNAL ANALYSIS - 2560-0650*, V.3.4.1), Spectral Dynamics (1999), voltado

à aquisição de dados independentemente do tipo de teste. Ele apresenta as informações na base do tempo, como um osciloscópio digital ou da frequência, como um analisador de espectro digital. Infelizmente essas informações são insuficientes em análise de vibração.

A relevância da atuação do sistema de controle impôs que a aquisição de dados para testes de grandes estruturas ocorresse em paralelo e independente. O sistema de aquisição de dados não atua na malha de controle, o que permite a implantação de método para processamento de dados baseado em processamento posterior. Quase sempre existe certo grau de interdependência entre ambos, tais como sinal de referência, sinal de disparos etc.

Inicialmente foram realizadas simulações de testes com auxílio de gerador de sinal para identificar em quais circunstâncias ocorriam falhas. Nas simulações, o gerador era programado para gerar sinais equivalentes aos dos testes reais. Foram avaliadas todas as versões dos aplicativos do sistema de aquisição de dados e os parâmetros alterados nas simulações foram: Número de canais em cada ACP, Banda de Frequência (*Bandwidth*), Frequência de Amostragem (*Sampling Frequency e Rate Multiplier*) e Duração de Quadro de Aquisição (*Frame Duration*).

Com exceção do aplicativo Signal Analysis (SIGNAL ANALYSIS - 2560-0650, V.3.4.1,), todos os demais apresentaram deficiências tais como travamentos, perdas de dados e limitações de análise e geração de resultados. Essa avaliação mostrou que, independentemente da configuração, o sistema de aquisição é estável quando associado ao programa Signal Analysis. A análise causal das instabilidades sistêmicas demandaria um conhecimento muito amplo por se tratar de um sistema distribuído, sistema supervisorio em estação de trabalho SUN e sistema operacional Solaris 7.0, além de interfaces múltiplas para controle (RS-232), troca de dados (TCP-IP) e sincronismo (GPIB). Optou-se por explorar mais adequadamente o Signal Analysis e identificar formas alternativas para análise do teste de vibração.

O Signal Analysis funciona eficientemente como um gravador digital de sinais de grande capacidade, contudo não possui as requeridas ferramentas de análise de vibração, apresentando as informações como um osciloscópio ou um analisador de espectro. Como exposto, o sistema de aquisição de dados não participa da malha de controle do teste. Desde que definida uma abordagem adequada, o Signal Analysis pode prover a base para o sistema pretendido. Dessa forma os dados podem ser gravados por meio do Signal Analysis e depois processados para gerar os indicadores do teste. Considerou-se então, que uma alternativa viável para realização de testes com reaproveitamento de funcionalidades do sistema original abordaria o uso do Signal Analysis, a adoção de novos procedimentos e o desenvolvimento de programas específicos. No novo contexto, as informações do teste seriam armazenadas nos discos externos em tempo real, e a análise de vibração, realizada em seguida, por meio de procedimentos e outros aplicativos desenvolvidos para compartilhar e decodificar a base de dados gerada pelo Signal Analysis.

Conforme o método proposto e apresentado na Figura 2, os discos externos dos sistemas de aquisição de dados são previamente montados no sistema de arquivos da estação de trabalho por meio de “*scripts*” de comandos UNIX (Jarbas, 2008). O sistema é configurado no pré-teste, com todos os parâmetros requeridos: número de canais, canais habilitados, banda de frequência, taxa de amostragem etc. Durante o teste, o sistema funciona como um grande gravador digital de sinais. No pré-teste e durante o teste, o sistema funciona como originalmente concebido. No pós-teste, os conteúdos dos discos externos são transferidos para a estação de trabalho e dela para o PC. Uma vez implementados os programas de processamento e análise e a partir dos arquivos de configuração e de dados brutos, o teste pode ser analisado no PC.

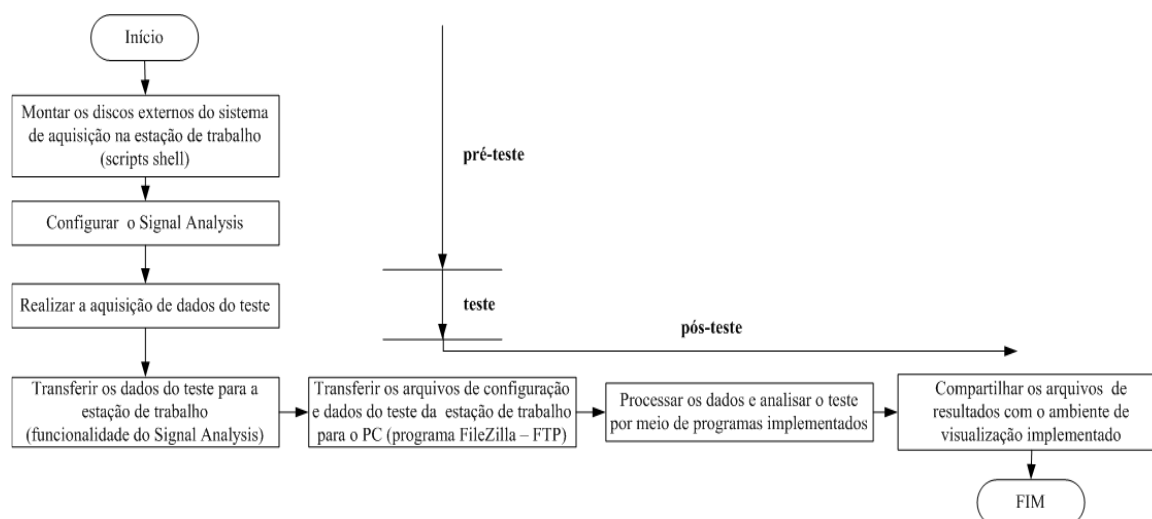


Figura 2. Método de análise proposto

Durante o teste, o sistema executa todas as tarefas pertinentes à aquisição de dados. Ele capta os sinais provenientes dos sensores instalados no dispositivo em teste, define escalas, verifica e sinaliza atingimento de limites, aplica os acoplamentos e filtros selecionados, digitaliza e armazena as informações nos discos rígidos.

Terminado o teste, o operador transfere os conteúdos dos discos externos para a estação de trabalho por meio de uma funcionalidade do Signal Analysis. Esta funcionalidade permite que os conteúdos dos discos rígidos, ditos dados brutos, fluam em blocos pela interface SCSI, dos discos rígidos até as respectivas unidades de aquisição e em seguida, até o disco rígido da estação de trabalho pela interface TCP-IP. Os conteúdos são transferidos integralmente um a um,

da primeira até a quarta unidade. Cada transferência gera um arquivo nomeado automaticamente no disco da estação de trabalho. Como exemplo, o arquivo “17_12_08_CXSQ09_data_a1_s0.001” é o arquivo de dados brutos do teste “17_12_08_CXSQ09”. O radical “data_a1_s0” indica que os dados se referem a primeira unidade de aquisição. A extensão “001” indica que os dados se referem a primeira execução deste teste.

Por meio do aplicativo FileZilla (software livre) para as transferências de arquivos por protocolo FTP (*File Transfer Protocol*), os arquivos de dados brutos e os arquivos de configuração do teste são transferidos ao PC pela interface TCP-IP. A partir daí, em existindo o programa de processamento, os dados podem agora ser analisados na plataforma PC.

Identificada uma condição de estabilidade, decidiu-se por abandonar complexas análises causais e optou-se por uma solução alternativa com uso do único programa estável - o Signal Analysis. Foram realizadas outras simulações para compreender o mecanismo de codificação da base de dados do Signal Analysis, de maneira que outro programa pudesse analisá-la posteriormente provendo assim, ferramentas e informações relevantes para análise da vibração.

Para identificar como as amostras eram armazenadas na base de dados do Signal Analysis, foram realizadas simulações de teste. Os sinais aplicados aos canais de aquisição eram bem definidos, no caso, um sinal senoidal de 1 V de amplitude e frequência de 100 Hz. Cada simulação era realizada, a base de dados transferida dos discos externos para o disco da estação de trabalho e então ao PC. Por meio de análise de circuitos e do manual de manutenção 2560-0101 Service Manual, Spectral Dynamics (1999), pode-se observar que os conversores analógicos / digitais utilizados são de 16 bits. Portanto o menor fragmento do sinal é uma amostra representada por 2 bytes (quantização), que podem ser convertidos e representados por 4 dígitos hexadecimais para facilitar a manipulação humana.

Partindo do pressuposto que a base de dados armazene a forma mais compacta da informação, considerou-se razoável que ela fosse quase integralmente composta de representações de 2 bytes das amostras de cada canal. Foi implementado um protótipo na linguagem de programação gráfica LabVIEW® na plataforma PC, cuja tarefa se resumia em abrir e ler o arquivo no formato binário, fazer a conversão à cada 2 bytes para a base decimal e apresentar o resultado num gráfico.

Na primeira simulação, foram ativados todos os canais, aplicando-se o sinal padrão apenas no primeiro canal, mantendo-se em aberto os demais. Rapidamente notou-se no gráfico o comportamento senoidal, embora que de forma descontinuada e sem indicação de frequência e amplitude. Outra constatação foi que existiam intervalos regulares que não apresentavam o aspecto senoidal. Percebeu-se que os intervalos denotavam que o teste era salvo em blocos.

Com um pouco mais de esforço foi possível perceber que cada bloco possui informações em posições fixas. Seu identificador numérico – um contador crescente a partir de 1, representado por 4 bytes, seu instante no teste, as informações necessárias para a interpretação da amplitude das amostras (Fundo de Escala, Offset e Quantização) e, sabendo-se o método, a associação dessa amostra com o canal amostrado.

Nas demais simulações foram adicionados ou removidos outros canais e por fim alteradas as configurações de teste tais como Banda de Frequência, Frequência de Amostragem e Duração de Quadro de Aquisição. Ao fim de inúmeras simulações e análises da base de dados foi possível determinar a organização das informações.

O arquivo de dados pode ser dividido em blocos de informação por meio da localização dos campos de Contador de Bloco e a partir daí, localizados os demais campos de cada bloco. O valor do contador de bloco é obtido pela conversão direta de seus 4 bytes para a base decimal em valores numéricos inteiros. As informações de Instante do Teste são representadas por dois campos de 4 bytes. A conversão direta desses campos para a base decimal em valores numéricos inteiros fornece o instante do teste em segundos e nano segundos, respectivamente. O efetivo instante de teste é obtido pela soma desses dois valores. A diferença entre os Instantes do Teste de dois blocos sucessivos permite conhecer o tempo armazenado em cada bloco. O tempo coberto pelos blocos do teste é constante e normalmente igual a 5 ms. Por meio da base de tempo é possível determinar a frequência do sinal armazenado e recuperar informações de fase, importantes na análise de vibração.

As informações de Fundo de Escala e Offset são gravadas no mesmo formato. As informações são representadas por 4 bytes e sequenciadas até o número de canais do teste. Ambas as informações são convertidas diretamente para a base decimal em valores numéricos reais para obtenção dos efetivos valores de fundo de escala e offset. Dividindo-se o valor de fundo de escala por 32.768 (conversor bipolar de 16 bits) obtêm-se a resolução do conversor analógico/digital.

O número de canais pode ser determinado indiretamente pelo tamanho do campo de Fundo de Escala ou de Offset e considerando o número de canais igual ao menor múltiplo de 10, maior que o último canal da configuração do teste.

O número de amostras por canal depende da frequência de amostragem. Quanto maior a frequência do sinal que se queira amostrar, maior o número de amostras por canal. Foram manipulados arquivos com blocos de informação com 64, 128, 256 e 512 amostras por canal.

O número de amostras por canal também é determinado de forma prática. Isolando-se o campo da Quantização Reduzida e dividindo-se seu tamanho pelo número de canais e novamente dividindo-se por 2, já que cada amostra é representada por 2 bytes.

Desta forma, no campo da Quantização Reduzida, as amostras se referem a quantização reduzida de cada canal específico segundo a regra:

1. Duas amostras sucessivas do canal são alternadas quatro vezes com duas amostras sucessivas do canal imediatamente superior, perfazendo 8 amostras por canal;
(0.0 1.1 0.0 1.1 0.0 1.1 0.0 1.1)
2. O processo 1 se repete para os dois canais seguintes até os dois últimos canais;
(2.2 3.3 2.2 3.3 2.2 3.3 2.2 3.3) ... (98.99 98.99 98.99 98.99 98.99 98.99 98.99 98.99)

3. Os processos 1 e 2 se repetem até que seja alcançado o número de amostras por canal.

Essas amostras são convertidas diretamente para a base decimal em valores numéricos inteiros para obtenção dos valores de quantização reduzida. O valor efetivo de amplitude da amostra é obtido quando o valor da quantização reduzida é multiplicado pelo fator de correção 1,4125 (-3dB), multiplicado novamente pela resolução do conversor do canal e por fim reduzido do valor de offset do canal.

Desta forma a base de dados tornou-se plenamente conhecida, com meios para a reconstrução dos sinais, permitindo a análise do teste conforme a norma e técnicas aplicáveis.

Com a decodificação da base de dados do Signal Analysis, decidiu-se estudar as normas pertinentes aos testes de vibração por varredura senoidal para identificar a técnicas e processamentos digitais aplicáveis e as análises de vibração requeridas. Conhecendo-se a base de dados e os parâmetros do teste por varredura senoidal, é possível o desenvolvimento do programa para a análise de vibração. Os parâmetros da varredura senoidal são determinados em função do equipamento que será testado e as normas requeridas. A varredura tem uma duração definida, portanto uma velocidade determinada, podendo avançar de modo crescente ou decrescente, com taxa linear ou logarítmica. Ela parte da frequência inicial até a frequência final por meio de um número de passos de frequência, percorridos numa velocidade determinada.

O sinal da varredura senoidal é produzido pelo sistema de controle por meio de sintetizador digital. Devido a limitação dos sintetizadores digitais, a varredura ocorre por passos de frequência ao invés de um crescimento ou decrescimento contínuo. A partir dos parâmetros da varredura senoidal é possível determinar o vetor das frequências que serão geradas e aplicadas no equipamento em teste.

O sintetizador digital possui duas saídas. A primeira é um sinal analógico de controle com frequência conforme o vetor de frequências e amplitude conforme o espectro de referência. Esse sinal é amplificado em potência e aplicado no vibrador. A segunda é um sinal analógico de referência. Ele segue a frequência do sinal de controle, mas tem amplitude constante. Sua amplitude constante facilita a medida de frequência, favorecendo o acompanhamento do teste, tanto para os operadores, quanto para os sistemas de análise de dados. Esse sinal é enviado ao sistema de aquisição durante o teste e adquirido simultaneamente aos sinais provenientes dos sensores. Esse processo permite a correlação entre os sinais de resposta e o vetor de frequências. O conhecimento do vetor das frequências possibilita as análises requeridas para testes por varredura senoidal e a determinação das frequências de excitação favorece a análise do comportamento dinâmico do equipamento em teste.

No processamento dos dados coletados, ao longo da varredura é aplicada a função de Transformada Rápida de Fourier (FFT) para identificar os sucessivos passos de frequência, conforme o vetor de frequências e a duração definida para a varredura. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) impõe o processamento de um número inteiro de períodos ou o processamento por janelamento (Convolução Periódica) para evitar o espalhamento espectral (*leakage*) e consequentemente, erros na indicação de amplitude e fase. Além disso, a resolução é inversamente proporcional ao tempo coberto pela informação processada (Randall, 2002). Assim a quantidade de informação a ser processada é função da resolução requerida e da frequência do sinal. Desta forma, os passos de frequência determinam as quantidades de informação, ou seja, a duração do bloco de dados que deve ser processado de cada vez. Cada bloco de informação é forçado a ter número inteiro de períodos e em alguns casos, processado por janelamento. Esses blocos de dados, que tem duração variável ao longo do teste, são tratados como bandas quando vistos no domínio da frequência.

Os principais processamentos apresentam os resultados em forma de gráficos XY, onde a coordenada X, contida no vetor de frequências da varredura, é a frequência da maior componente do espectro do sinal (banda) enquanto a coordenada Y depende do tipo de processamento:

Processamento por Valor Eficaz em Banda Larga (*BroadBand RMS*): é o valor eficaz (RMS) calculado em banda larga. Este resultado considera que a avaliação da resposta pelo valor médio quadrático é a mais adequada. Neste caso, para cada bloco de informação do Sinal de Resposta, simultâneo e proporcional ao bloco de informação do Sinal de Referência que foi processado, calcula-se valor quadrático médio (RMS).

Processamento por Valor de Pico em Banda Larga (*BroadBand Peak*): é o valor de pico do sinal em banda larga. Este resultado identifica os valores máximos que a estrutura atingiu e é possível identificar também ruídos e interferências mascaradas por outros processamentos. Neste caso, para cada bloco de informação do Sinal de Resposta, simultâneo e proporcional ao bloco de informação do Sinal de Referência que foi processado, identifica-se a maior amplitude alcançada (valor pico).

Processamento por Valor de Pico da Componente Principal (*Fundamental*): é o valor de pico da componente principal. É identificada a resposta para cada passo de frequência de excitação, quando outras componentes de frequência são desconsideradas. Veja a Figura 3. Neste caso, cada bloco de informação do Sinal de Resposta, simultâneo e proporcional ao bloco de informação do Sinal de Referência que foi processado, similarmente ao canal de referência, é processado via Transformada Rápida de Fourier, para identificar a preponderante frequência e seus valores de pico e fase. O gráfico da Figura 3 apresenta o processamento de um bloco de informação dos sinais gravados, que representa um instante específico do teste. O processamento dos dados do teste ocorre bloco a bloco, do início ao fim do arquivo de dados e o resultado final é o registro dos resultados destes sucessivos processamentos apresentado nos gráficos de Resposta em Frequência. Pode-se observar nesta figura, o Sinal de Controle, o Sinal de Referência. Estes dois sinais representam as duas saídas do sintetizador digital. O Sinal de Resposta representa o efeito em um ponto específico do dispositivo em teste em função da vibração aplicada, e que é proporcional ao Sinal de Controle.

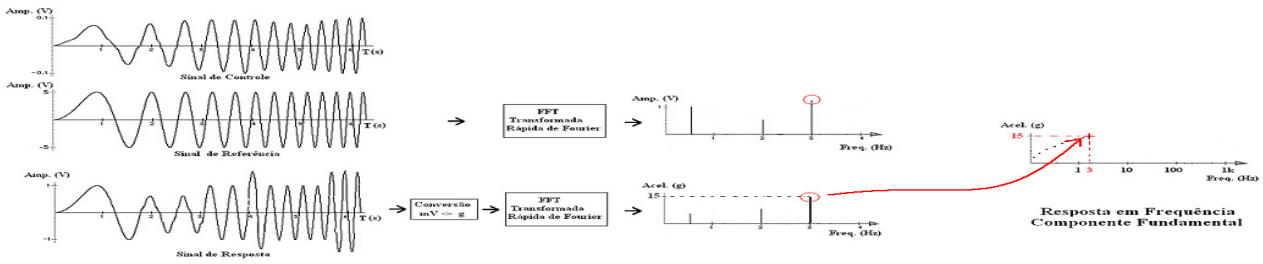


Figura 3. Processamento pela fundamental

Processamento por Valor de Fase (Phase): é valor da fase entre dois canais previamente definidos. Esta resposta está associada à análise da componente principal (Fundamental). Identificadas as frequências preponderantes dos dois canais, é calculada a diferença entre seus valores de fase para determinar a fase entre eles.

Com base nesse conhecimento e determinado o formato da base de dados, o programa de processamento de varredura senoidal foi implementado na linguagem de programação gráfica LabVIEW® e seu repertório de funções de processamento digital de sinais, oferecido no pacote de funções matemáticas e no pacote de análise de som e vibração (NI Sound and Vibration Toolkit).

3. RESULTADOS

O trabalho atingiu todas as metas definidas inicialmente. Uma meta primordial alcançada diz respeito ao prazo de conclusão sem impacto no cronograma de testes; a outra, o reaproveitamento do sistema original, evitando grandes gastos e maiores desgastes internos. O trabalho permitiu que a base de dados gerada pelo Signal Analysis se tornasse conhecida e propiciou a implementação de métodos para a recuperação das informações e reconstrução dos sinais. A partir daí, foi implantado satisfatoriamente um novo método de análise que reúne todas as funcionalidades necessárias. Este novo método potencializou o processamento dos dados, melhorou substancialmente a visualização e o compartilhamento de resultados. A análise do teste tornou-se mais dinâmica e mais qualificada.

Outro resultado expressivo foi o estabelecimento das bases para a implementação de programas de análise para todos os demais tipos de testes de vibração

Como resultados intermediários destacam-se a decodificação da base de dados proprietária; a definição do novo método para análise do teste; a implementação do programa para processamento em testes por varredura senoidal; a implementação do programa para pós-processamento e análise; a implementação do programa para análise e comparação de resultados de testes.

Conforme o novo método de análise, na fase de aquisição de dados são utilizados o sistema de aquisição original e o programa Signal Analysis. Os dados são manipulados por meio de procedimentos implantados e processados pelos programas desenvolvidos. Dessa forma, os dados são transferidos para a estação de trabalho SUN após o teste. O PC acessa os arquivos e os processa os dados. Em seguida, os resultados do processamento podem ser analisados e também compartilhados para análise na sala de visualização por meio dos programas de pós-processamento e de comparação de resultados.

A Figura 4 apresenta o método para o sistema de análise implantado.

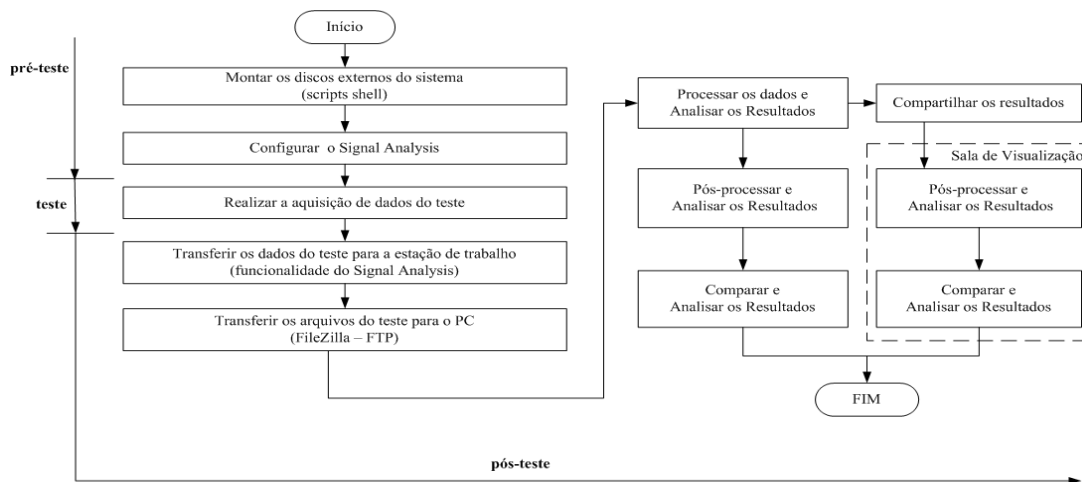


Figura 4. Novo método de análise do teste.

Conforme a reorganização dos ambientes após a implantação, a sala de visualização possui computador para manipulação das informações, escolha de canais, destaques, cursores, escalas, sobreposição de diferentes canais, sobreposição de canais de diferentes testes, geração de arquivos-texto para compartilhamento de resultados etc.

Os resultados podem ser visualizados por meio de imprimíveis, diretamente na tela do computador ou projetados

em tela grande e também exportados para produção de relatórios no formato texto ou imagens HTML.

O programa de processamento, que é o mais importante dentre os programas implementados, tem a função de acessar os arquivos de configuração e de dados brutos proveniente da estação de trabalho e previamente importados por FTP (FileZilla) e processar as informações após a definição de parâmetros de processamento. Ele converte o arquivo de configuração para obter as informações referentes aos canais da unidade de aquisição e os parâmetros para o processamento dos dados. Estas informações permitem a recuperar e reconstruir os sinais contidos no arquivo de dados brutos, e em função dos definidos parâmetros de processamento, gere os indicadores para a análise do teste.

O processamento pode ser em modo contínuo ou quadro a quadro. O segundo modo permite localizar a parte de ideal do teste e identificar o momento exato da ocorrência de algum comportamento mecânico impróprio. O usuário pode escolher qual tipo de resposta em frequência visualizar durante ou após o processamento. A escolha do tipo processamento, diz respeito ao tipo de informação que se queira destacar para facilitar a análise comportamento dinâmico do dispositivo. Os processamentos, mostrados em gráficos, podem ser selecionadas a critério do usuário, pois ocorrem concorrentemente. O programa exibe ainda, os sinais reconstruídos na base do tempo, como um osciloscópio digital. Todos os gráficos podem apresentar até 20 canais com recursos de seleção e sobreposição de diversos canais, com seleção de escala automática ou manual, destaques das curvas, disposição de cursores e legendas, além de indicadores numéricos etc.

Para prover mais recursos de processamento de dados e compartilhamento de resultados e efetivamente mais recursos para análise do teste, foram implementados também os programas de pós-processamento e para comparação de resultados de testes.

O programa de pós-processamento possui além das funcionalidades anteriores, funcionalidades especiais de relatório automático e publicação de dados pela rede. O programa de comparação possui ainda recursos para sobreposição num mesmo gráfico de resultados de testes diferentes. Ele é empregado para avaliar se um dispositivo em teste está sofrendo alguma degradação. Estes recursos tornam ágeis e qualificam a tomadas de decisão quanto à condução do programa de testes previsto. Ajudam a decidir se o programa de teste deve prosseguir, ser acrescido de etapas intermediárias ou abortado visando preservar a integridade do dispositivo em teste.

Estes dois programas possibilitam a manipulação dos arquivos gerados pelo programa de processamento, inclusive de testes realizados anteriormente. Eles possuem recursos de manipulação de cursores e escalas, supressão de descontinuidades, seleção de canais do mesmo teste, geração de imprimíveis e de arquivos ASCII e HTML etc. Eles não dependem da manipulação dos arquivos de configuração e de dados do teste, portanto podem ser disponibilizados para um usuário externo. Por outro lado, a manipulação dos arquivos de configuração e de dados do teste e seu processamento devem ser atribuições dos especialistas da área.

Depois de todo o desenvolvimento adicional, o novo método implantado foi avaliado por comparação por meio de análises de vibração concorrentes por sistemas distintos. Todos os sinais provenientes dos sensores de controle e medida foram encaminhados para ambos os sistemas. A comparação dos resultados das análises atestou desempenho muito satisfatório.

O conhecimento adquirido permitiu a implementação dos programas de análise para os testes de vibração aleatória, transiente e choque. Todas as análises utilizam o novo método implantado, permitindo a uniformização de procedimentos. O desempenho é plenamente satisfatório em termos de estabilidade de funcionamento, rapidez de processamento e análise, qualidade dos resultados e compartilhamento de informações.

4. CONCLUSÕES

O trabalho permitiu poupar recursos a partir do reaproveitamento parcial do sistema original e resolveu a instabilidade no sistema de aquisição, contribuindo para que o laboratório mantenha os níveis de desempenho e segurança requeridos em testes de dispositivos especiais.

Os resultados permitem concluir que o método para análise de vibração implantado suplantou o desempenho do sistema original por meio da descentralização das atividades; por meio do programa de processamento que reúne diversas características inovadoras que potencializam o processamento dos dados do teste; por meio do programa de pós-processamento que possibilita a manipulação dos arquivos de resultados e o efetivo compartilhamento, inclusive para testes realizados anteriormente; por meio do programa de comparação de resultados que possibilita a sobreposição gráfica de resultados de testes diferentes, tornando-se indispensável na avaliação da existência de degradação do dispositivo em teste e do atendimento dos requisitos do teste etc.

Os recursos disponibilizados nos programas tornaram mais eficiente a análise dos resultados, mais ágil a tomada de decisão quanto à condução do programa de testes previsto e qualificaram as análises do comportamento dinâmico.

O desempenho alcançado e o atendimento ao prazo possibilitaram a realização das campanhas de testes do programa CBERS-2B, em cooperação com a China e SAC-D em cooperação com a Argentina, entre outros.

O trabalho elevou a competência da equipe em programação e processamento digital de sinais e, no bojo desse esforço, o conhecimento adquirido permitiu a implementação dos programas de análise para os testes de vibração aleatória, transiente e choque. Todas as análises utilizam o novo método implantado, permitindo a uniformização de procedimentos.

O repertório de algoritmos disponíveis permite implementar programas de análise para outros tipos de testes de vibração, desde que conhecidas as normas, as propriedades, as análises e respostas requeridas para cada tipo de teste específico. Para trabalhos futuros, pode-se destacar que o acesso aos resultados em formato digital permite realimentar

métodos para estimativa de comportamento de sistemas dinâmicos. Essas estimativas podem auxiliar na condução dos testes e permitem a escolha de níveis de excitação adequados que asseguram a integridade dos equipamentos.

5. REFERÊNCIAS

- Department of Defense (DOD), 2008, "MIL – STD - 810G: environmental engineering considerations and laboratory tests - revision G", Washington, D. C., 804 p.
- International Electrotechnical Commission (IEC), 1982, "IEC – 68 - 1: basic environmental testing procedures - general and Guidance", Genebra. 47 p.
- _____, 1982, "IEC – 68 – 2 - 6: tests – test fc and guidance: vibration (sinusoidal)". 5. ed., Genebra. 59 p.
- Jarbas, A. M., 2008, "Shell script professional", Novatec Editora, São Paulo, 480 p.
- Randall, R. B., 2002, "Vibration measurement instrumentation", In: Harris, C. M.; Piersol, A. G. (eds.) "Vibration and shock handbook", McGraw-Hill, Inc., New York, cap. 13, p.447-463.
- Smallwood, D. O., 2002, "Vibration testing machines". In: Harris, C. M.; Piersol, A. G. (eds.) "Vibration and shock handbook", McGraw-Hill, Inc., New York, cap. 25, p.773-794.
- Smith, C. O., 1976, "Introduction to reliability in design", McGraw-hill, Tokyo, 269 p.
- Spectral Dynamics, Inc., 2002, "2560-0100/D – system description" San Jose, 61 p.
- _____, 1999, "2560-0101 service manual", San Jose, 100 p.
- _____, 1999, "2560-0130 sine operating manual", San Jose, 214 p.
- _____, 1999, "2560-0150 signal analysis operating manual", San Jose, 88 p.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Rovilson Emilio da Silva, rovilson@lit.inpe.br¹
Eduardo Hidenori Enari, eduardoenari@gmail.com¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas 1758 São José. dos Campos – SP, CEP. 12.227-010,

²Universidade de Taubaté, Rua Daniel Danelli s/n, Jardim Morumbi, Taubaté, SP, CEP 12060-440

OTIMIZATION FOR DATA ACQUISITION AND SIGNAL ANALYSIS AND DEVELOPMENT OF SWEPT SINE ANALYSIS FOR VIBRATION TESTS

Rovilson Emilio da Silva, rovilson@lit.inpe.br¹
Eduardo Hidenori Enari, eduardoenari@gmail.com¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Av. dos Astronautas 1758 São José. dos Campos – SP, CEP. 12.227-010,

²Universidade de Taubaté, Rua Daniel Danelli s/n, Jardim Morumbi, Taubaté, SP, CEP 12060-440

Abstract: The qualification of satellites at the Brazilian space program requires the definition of environmental tests to determine if the environmental condition interferes in any way in the performance. The work aims at solving operational deficiencies and instability of the data acquisition system used in vibration testing, with focus on swept sine test. During the development of this work, it became necessary to evaluate the system and decoding of the original database. Efforts have been made in understanding the sinusoidal tests and digital signal processing techniques. The assessment, study and access to information decoded allowed the definition of an alternative method for vibration analysis. The method narrowed the performance of the original system, isolating its unstable features; defined procedures for file transfers and sharing and led the implementation of programs for vibration analysis. This method allows save resources by partial reuse of the original system. Finally, this work allowed the establishment of the new method for swept sine test analysis. The analysis capabilities of test, presentation and sharing of results were substantially improved compared to the original system, taking full account of all required features. In addition to this effort, the knowledge acquired was applied in the implementation of programs for analysis of random, shock and transient vibration tests. The work raised the competence in programming and digital signal processing and it contribute to maintain the reliability in the satellites qualification. The resources delivered in the programs developed make the most efficient test analysis. The efficient analysis of results leads to the correct evaluation of the dynamic behavior and fault trends analysis, speeding and improving the decision related to conducting the testing program reviewed.

Keywords: environmental tests, vibration, data acquisition, swept sine.