

APLICAÇÕES DESENVOLVIDAS NO ÂMBITO DA METROLOGIA ELÉCTRICA E DE VIBRAÇÃO NO INETI

Ribeiro, L. F.¹; Godinho, M. I. A.¹; Cabral, A.²; Oliveira, V.²
Nunes, M.C.¹; Rebordão, J. M.²;

¹ Laboratório de Medidas Eléctricas – INETI/LME

² Laboratório de Apoio às Actividades Aeroespaciais – INETI/LAER
Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, I. P.

Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa

RESUMO

São apresentados diversos módulos desenvolvidos em ambiente *LabView*, para controlo de instrumentação, processamento e tratamento estatístico de dados e determinação de incertezas, aplicados aos domínios da Metrologia Eléctrica e de Vibração no INETI.

É efectuada uma breve síntese do contexto técnico em que cada uma das aplicações se insere assim como uma descrição dos principais aspectos associados a cada módulo.

1. INTRODUÇÃO

O aparecimento de sistemas de desenvolvimento de aplicações baseados em linguagens gráficas e a sua capacidade de adaptação a sistemas multitarefa, como é o caso do *LabView*, tem facilitado a adopção e desenvolvimento de rotinas de automatização, permitindo que técnicos especializados nas diversas áreas metrológicas, possuindo apenas conhecimentos básicos de programação, desenvolvam e implementem modelos informáticos orientados para a resolução dos problemas que são normalmente específicos das suas áreas de actuação.

No LME, reconhecido pelo Instituto Português da Qualidade como laboratório primário para as grandezas eléctricas e de vibração, há muito que os seus técnicos implementam soluções informáticas na procura de condições conducentes à qualidade metrológica das medições.

2. AUTOMATIZAÇÃO EM METROLOGIA

Os objectivos que se pretendem atingir quando se implementam soluções de automatização em laboratórios de metrologia ^[1], estão focalizados em primeiro lugar na eficiência da medição, para o que, as premissas da sua qualidade metrológica deverão estar asseguradas, nomeadamente e entre outras:

- a minimização dos erros de operação e tempos de imobilização de equipamento;
- a reprodutibilidade dos métodos de medição e sua validação;
- a harmonização do conteúdo dos registos e das formas de tratamento e apresentação de resultados;
- a possibilidade de medir na ausência do operador, em casos em que tal ou é impossível, devido a ambiente hostil, ou seja necessária a realização de medições a intervalos de tempo prefixados;
- a monitorização e controlo remoto de processos de medição e ensaio em tempo real via infra-estruturas de comunicação local ou alargada.

Como requisitos básicos para a implementação de tais sistemas automáticos, pretende-se eficiência e funcionalidade na realização das tarefas típicas associadas aos processos metrológicos, entre outros:

- controlo do fluxo da informação desde os processos de controlo ou sensores a medir, através de periféricos inteligentes;
- validação, monitorização e análise dos dados adquiridos em tempo real ou *a posteriori*;
- gestão dos dados obtidos nas formas de registo, impressão ou transmissão;

- simplicidade de operação;
- adequabilidade aos sistemas de qualidade implementados.

Para a definição e desenvolvimento de modelos de automatização em ambiente laboratorial de grande rigor, como é o caso da metrologia, algumas regras básicas deverão ser seguidas de modo a potenciar a sua optimização pelos técnicos envolvidos, que na maior parte das vezes desenvolvem os métodos e/ou os artefactos de medição para se constituírem como utilizadores finais:

- conhecimento do historial e estado de calibração dos equipamentos e padrões utilizados;
- conhecimento das capacidades de cada equipamento;
- conhecimento de todos os parâmetros que possam influenciar o processo de medição;
- conhecimento dos procedimentos técnicos implementados;
- conhecimento dos registos necessários para a realização dos cálculos *offline*.

Assim, a utilização de aplicações desenvolvidas à medida e pelo técnico especializado e interessado no procedimento a automatizar, supera em vantagens relativamente ao *customized off-the-shelf software* que, embora possa ser adquirido a fabricantes especializados e que em alguns casos acompanha os equipamentos adquiridos, comporta normalmente funcionalidades supérfluas com o óbvio acréscimo de custo, para além de nem sempre ser de fácil integração.

Para a definição e o desenvolvimento dos modelos de automatização têm-se seguido métodos de validação, que passam pelo estudo prévio da sua aplicabilidade, simulando os procedimentos a implementar através da utilização de folhas de cálculo, aplicando as respectivas funções matemáticas e comparando com resultados reais.

Especial cuidado tem sido tomado nas actualizações das versões dos sistemas operativos e do próprio sistema de desenvolvimento, pois situações de incompatibilidade acarretam sempre prejuízos temporais sob a forma de reconfiguração dos módulos já desenvolvidos.

3. METROLOGIA ELÉCTRICA

De uma forma sucinta, são apresentados alguns exemplos dos módulos desenvolvidos, no domínio da metrologia eléctrica.

3.1. Sistema de Efeito de Josephson

A descoberta em 1962 do efeito de *Josephson* veio permitir a realização do *volt* através de um padrão intrínseco, dependendo de constantes fundamentais em vez dos artefactos físicos e, portanto, imune à deriva com o tempo, instabilidade térmica e a problemas com transporte e manuseamento inerentes aos padrões até então utilizados para representar o *volt*.

A implementação do sistema de Josephson no LME [2] veio a concretizar-se em 2004, para o que muito contribuiu o desenvolvimento de quatro módulos aplicativos em ambiente *LabView* utilizando uma placa de aquisição tipo PCI 6503 e controladores PCI-GPIB e isolador óptico GPIB 140A.

i. Controlo da instrumentação

O módulo desenvolvido para o controlo de instrumentação, para além de permitir realizar a configuração independente de cada instrumento, determina a média de 20 leituras, validada para um desvio padrão da ordem dos 2×10^{-9} V no detector. São programados seis conjuntos de leituras de polaridades contrárias, a realizar num intervalo de cerca de 1 minuto e meio após a estabilização do *array* num degrau pré-seleccionado. É determinado o número do degrau, o valor da diferença entre o *array* e a referência a calibrar, o valor da frequência de microondas e respectiva potência e da temperatura ambiente ou das termistências das referências.

Por forma a otimizar as leituras, as escalas são automaticamente seleccionadas a partir do valor nominal da referência a calibrar, os valores lidos são aceites a partir de um limiar mínimo e, no caso da estabilidade do degrau seleccionado não ser suficiente, é aplicado um algoritmo de normalização dos valores obtidos pelo detector.

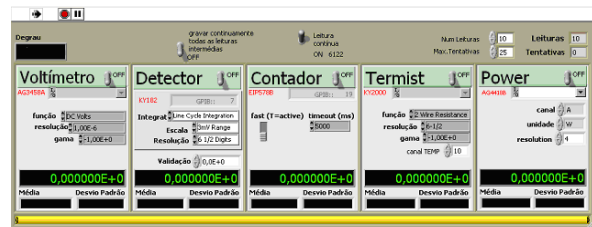


Figura 1 - Painel frontal do módulo de aquisição.

ii. Resolução do modelo matemático implementado

O desenvolvimento e aplicação de um algoritmo para o cálculo numérico específico, veio facilitar a automatização do sistema permitindo que, imediatamente após as leituras e através da

resolução do modelo matemático implementado (aplicando o método dos mínimos quadrados e resolvendo um sistema de equações), seja possível determinar e validar, em modo *run time*, a melhor estimativa para os valores a determinar.

iii. Cálculo de incertezas

O cálculo da incerteza associada a cada medida foi também objecto do desenvolvimento de um módulo, que utiliza o modelo teórico definido e é executado de imediato com os parâmetros recém determinados, eliminando assim a necessidade de realizar *a posteriori* o trabalho de análise estatística.

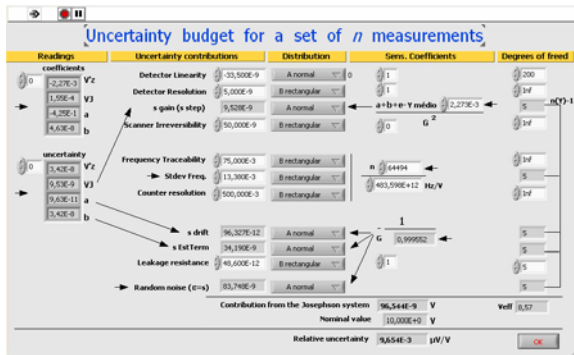


Figura 2 - Painel frontal do módulo para o cálculo de incertezas, mostrando um exemplo da calibração de uma referência no valor nominal de 10 V.

iv. Gestão de dados

Toda e qualquer medida realizada pelo sistema é inscrita numa única tabela, associando um conjunto de 16 parâmetros, designadamente entre outros, a identificação do equipamento medido, o canal seleccionado no *scanner*, o grupo data hora, o ganho do detector calculado e os valores estimados para os parâmetros que se querem determinar.

A aplicação desenvolvida, permite seleccionar um conjunto de registos de medidas, a partir de filtros de escolha como: intervalos entre datas, equipamento medido ou valor nominal (figura 3). Os valores são visualizados de forma gráfica, é aplicado um ajuste linear aos pontos seleccionados e calculada a incerteza expandida, com base no número de graus de liberdade determinado.

Assim, é possível eliminar *outliers*, calcular a incerteza expandida associada e preparar os dados para inserir nos certificados de calibração.

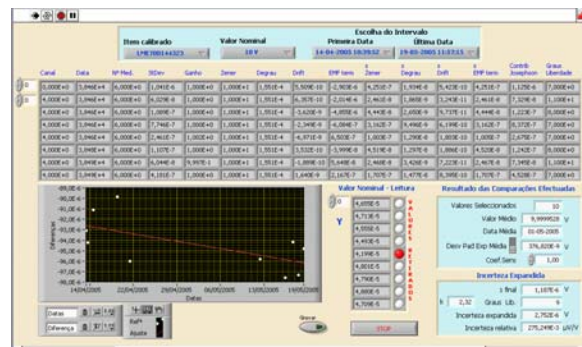


Figura 3 - Painel frontal do módulo para a gestão de dados.

3.2. Estudo de Nanovoltímetros

Com a metodologia implementada no LME^[3], é possível determinar, com a exactidão permitida pela utilização do efeito *Josephson*, os ganhos e as linearidades de nanovoltímetros e estudar a sua evolução ao longo do tempo de forma a permitir a aplicação de distribuições normais com incertezas muito inferiores.

Foram desenvolvidos dois módulos, que permitem não só controlo do padrão *Josephson* mas também a análise numérica temporal e respectiva visualização gráfica, de uma forma expedita.

i. Módulo para o controlo de instrumentação

Por forma a tornar eficiente o processo de geração de sinal e tomada de leituras, essencial para este estudo, foi definido e desenvolvido um modelo de automatização, assente num módulo (figura 4) com capacidade para:

- variar a polarização do *array*, de forma sequencial e em patamares igualmente distribuídos, entre os limites pretendidos para cada escala do nanovoltímetro a estudar, sob a forma de cliente do sistema controlador do padrão *Josephson*;
- configurar o equipamento em estudo, controlar e validar a realização das leituras pretendidas, em cada patamar estabilizado, utilizando as interfaces de comunicação do tipo GPIB, que são comuns neste tipo de instrumentação;
- registar em base de dados a informação obtida para posterior análise.

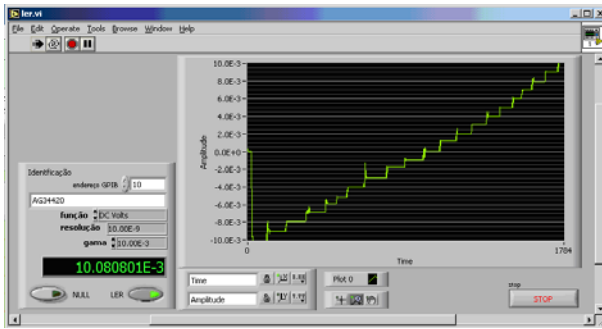


Figura 4 – Exemplo de um painel frontal do módulo de leitura dos nanovoltímetros, onde pode ser visualizada a evolução sequencial da leitura dos diferentes degraus ao longo de uma escala.

ii. Módulo para a análise numérica

Dado o grande volume de dados que um estudo distribuído pelo tempo permite gerar, associado à necessidade de criar competências de registo de informação relativa não só a equipamentos próprios como de potenciais clientes, o desenvolvimento deste módulo, tinha como pressuposto inicial a criação de capacidades de interrogação da base de dados a partir de três filtros:

- selecção do equipamento,
- escala pretendida,
- data da calibração.

A necessidade de sistematizar o cálculo por forma a minimizar erros de operação, a validação dos resultados e tempos de imobilização dos equipamentos, esteve na base da definição de um modelo com capacidade para:

- aplicar ao conjunto de dados pretendidos e de forma interactiva, o polinómio a adaptar ao estudo da linearidade;
- apresentar de forma gráfica (figuras 5 e 6), os ganhos e linearidades determinados em cada escala e a sua evolução temporal;
- calcular o respectivo balanço de incertezas.



Figura 5 – Painel frontal do módulo do cálculo de linearidades, que permite seleccionar o grau de polinómio de ajuste.

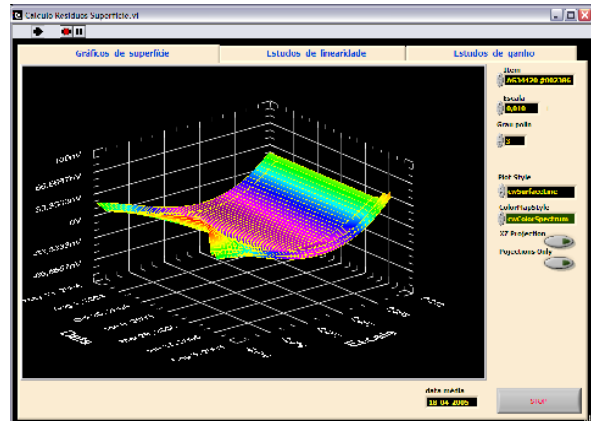


Figura 6 - Painel frontal do módulo do cálculo de linearidades, visualizando-se, neste exemplo, a evolução temporal numa determinada escala ao longo de um ano.

3.3. Ponte de Wheatstone Modificada

Para a determinação de altos valores óhmicos, foi desenvolvida no LME^[4] uma ponte de *Wheatstone* modificada em que um dos ramos é constituído por dois geradores de tensão, ocupando o lugar das habituais resistências, uma referência de tensão e um calibrador de tensão com saída variável. No outro ramo encontram-se as duas resistências-padrão que se pretende comparar. A ponte possui também um circuito de guarda activa, em que as resistências de guarda têm valores nominais 10 vezes superiores aos das resistências-padrão do circuito principal. Na configuração que se veio a adoptar a detecção do equilíbrio da ponte é obtida com um electrómetro digital.

Para a implementação deste sistema apenas uma configuração automática permitiria obter a exactidão desejada considerando os diferentes condicionalismos impostos, nomeadamente:

- o elevado número de medições de valores de tensão e corrente a ser realizado no menor espaço de tempo possível;
- a necessidade de validar cada medição dentro de limites muito apertados;
- as diferentes configurações possíveis para uma determinação;
- a necessidade de realizar cálculos quer intermédios quer finais em modo *real time*;
- o registo de todas as determinações;
- a necessidade de isolar fisicamente a ponte do operador, em virtude das elevadas impedâncias envolvidas;
- a obrigatoriedade de aplicar elevados valores de tensão de uma forma incremental;

- a exigência de manter uma base de dados com os dados relativos a cada observação, permitindo realizar cálculos de estabilidade a longo prazo e determinar coeficientes de temperatura e humidade relativa.

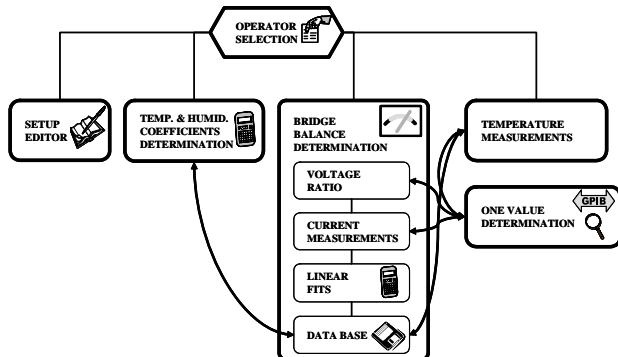


Figura 7 – Diagrama funcional da aplicação.

Optou-se por uma plataforma baseada num PC com interface PCI-GPIB, tendo sido desenvolvidos vários módulos de controlo de instrumentação e de análise numérica, nomeadamente para a determinação:

- de um valor, representado pela média validada de um conjunto de 20 leituras;
 - do equilíbrio inicial das tensões a aplicar, controlando e seleccionando o valor da razão de tensões inicial;
 - da temperatura ambiente e do banho de ar utilizado;
 - da corrente de equilíbrio;
 - dos ajustes lineares e da razão entre resistências;
- bem como, para registo dos dados obtidos e posterior análise numérica em base de dados dedicada;

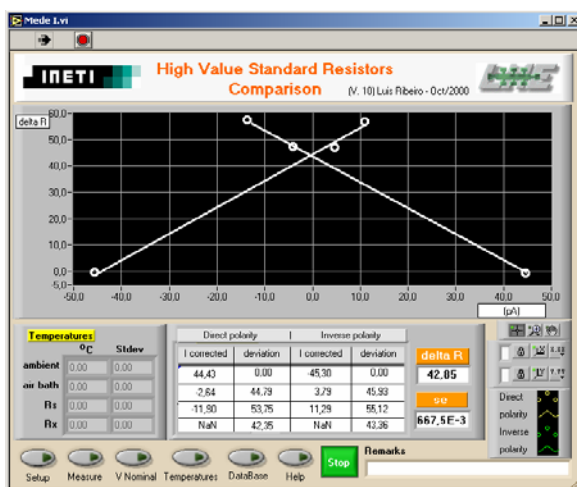


Figura 8 - Painel frontal do módulo dos ajustes lineares determinando da razão entre resistências.

3.4. Efeito de Hall Quântico

Em Março 2005, foi implementado no LME [5] um Padrão Primário de Resistência baseado no Efeito de Hall Quântico – EHQ, que permite manter e medir a unidade eléctrica de resistência, relacionando-a com as constantes fundamentais e – carga elementar e h – constante de Plank, possibilitando a diminuição da incerteza na medição de resistências para valores uma década inferiores aos anteriormente obtidos.

Uma das aplicações implementadas, cujo painel frontal é apresentado na figura 9, destina-se à caracterização de amostras de Hall e compreende basicamente os seguintes aspectos:



Figura 9 – Aplicação para aquisição de dados e controlo de equipamento.

- parametização e controlo de todos os equipamentos utilizados;
- aquisição de valores correspondentes à intensidade de campo magnético, temperatura da amostra, intensidade de corrente, tensão longitudinal e tensão de Hall;
- representação gráfica dos valores da resistência de Hall e da resistência longitudinal em função dos respectivos valores de campo magnético.

Na figura 10 é apresentado o painel frontal correspondente à aplicação utilizada para a calibração de resistências-padrão, através do método potenciométrico. É efectuada a medição da razão entre o valor da resistência a calibrar e o valor correspondente ao patamar considerado de uma amostra de Hall, sendo ambas as resistências percorridas pelo mesmo valor de corrente. Neste caso, o valor da resistência a calibrar é dado pela seguinte relação: $R_X = R_H * Razão$

Esta aplicação permite efectuar também a parametrização e o controlo da fonte de corrente utilizada e de um multímetro digital de elevada exactidão, aquisição de dados e o respectivo tratamento estatístico.

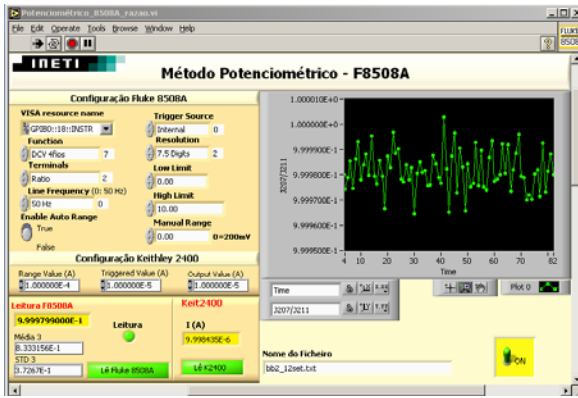


Figura 10 – Aplicação para medição de razões de Resistência-Padrão.

4. METROLOGIA DE VIBRAÇÃO

Em 1998, o LME em colaboração com o LAER, iniciou a sua actividade na área da Acelerometria, com vista à implementação de um “Sistema de Calibração Absoluta de Acelerómetros-Padrão” por Interferometria Laser, com detecção homodina.

Foi desenvolvido um método absoluto de calibração de acelerómetros-padrão [6] baseado no interferómetro de *Michelson* que permitiu determinar o valor da sensibilidade de carga de acelerómetros-padrão na gama entre 20 Hz e 1 kHz, com valores de incerteza expandida inferiores a 1%.

Posteriormente, foi implementado um sistema experimental com base em interferometria relativa com detecção heterodina [7], que permitiu efectuar a calibração primária de acelerómetros numa gama de valores de frequência entre alguns Hz e os 10 kHz.

Os sistemas experimentais implementados são controlados através de um computador pessoal com uma placa de aquisição PCI de 12 bit, taxa de amostragem de 10 MS/s e 4 canais, através de aplicações informáticas para a aquisição, tratamento e análise de dados desenvolvidas em ambiente *LabView*.

4.1. Interferometria com Detecção Homodina

A figura 11 apresenta o painel frontal da aplicação utilizada para controlo de equipamento e aquisição de dados correspondente ao sistema interferométrico com detecção homodina. São utilizados três canais, para a aquisição do sinal óptico proveniente de um fotodetector (janela superior), do sinal de excitação proveniente de um controlador de vibração (janela inferior direita) e a amplitude do sinal de aceleração, à saída de um pré-amplificador de carga, através de um voltímetro digital de elevada exactidão (janela inferior

esquerda). Para estes últimos, existe também a possibilidade de efectuar a análise espectral dos respectivos sinais. A frequência de amostragem e o número total de pontos são calculados através do número de pontos por franja, do número de ciclos, da frequência de excitação e do valor nominal da aceleração.

Nesta figura é apresentada (janela superior), como exemplo, uma forma de onda associada com um padrão de interferência obtido com $f = 800$ Hz e $a = 10$ m*s⁻², considerando 100 ciclos de vibração e 20 pontos por franja.

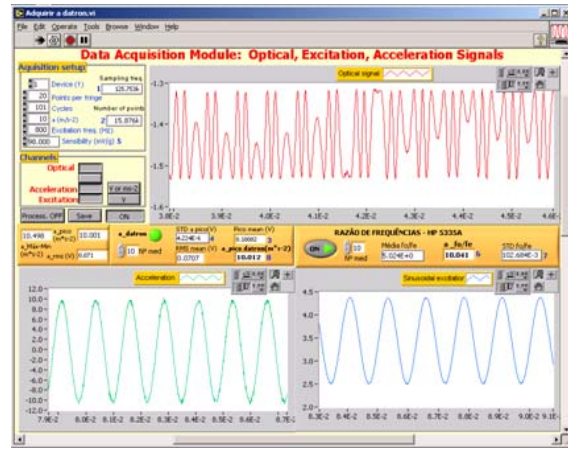


Figura 11 – Módulo para controlo de instrumentação e aquisição de dados do interferómetro homodino

A figura 12 representa o painel frontal correspondente ao módulo implementado para o processamento e tratamento de dados, efectuado *a posteriori*. Esta figura apresenta uma forma de onda filtrada correspondente a um padrão de interferência (janela superior) e os pontos calculados para a velocidade instantânea e o correspondente ajuste sinusoidal efectuado (janela inferior). Os pares de valores tempo-intensidade (janela superior) são utilizados para determinar o deslocamento através do método de contagem de franjas e a velocidade baseada nos intervalos de tempo entre franjas consecutivas.

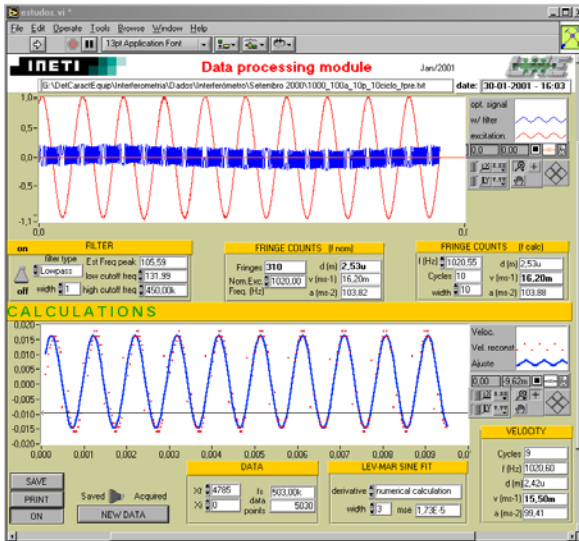


Figura 12 – Aplicação para processamento e tratamento de dados do interferómetro homodino.

Os principais passos deste processo são os seguintes:

- análise espectral, FFT, para determinar o valor máximo de frequência do sinal de entrada;
- o valor anterior é usado para definir os parâmetros do filtro a aplicar, ficando os respectivos resultados disponíveis na janela superior;
- contar o número de vezes que o flanco positivo do sinal filtrado cruza o zero, no instante t_i – contagem de franjas;

Os intervalos de tempo $\Delta t_i = t_{i+1}$ são então calculados para estimar os valores da velocidade instantânea $v_i = (\lambda/2)/\Delta t_i$, cujo gráfico apresenta a forma de um seno rectificado;

- É aplicado um ajuste sinusoidal do tipo *Levenberg-Marquart* aos pontos calculados, usando o *phase unwrapping* para remover a ambiguidade do sinal, e determinar os valores da amplitude e frequência da velocidade do movimento do acelerómetro a calibrar;
- A amplitude da velocidade e da aceleração são também calculadas através do método de contagem de franjas usando o valor da frequência de excitação do movimento.

4.2. Interferometria com Detecção Heterodina

O sistema de aquisição de dados é constituído essencialmente por dois detectores e um amplificador *lock-in* digital, que converte os sinais detectados, X e Y , na forma de um arco de tangente.

Foram desenvolvidos dois módulos de *software*, um para controlo de instrumentação e aquisição de dados e outro para o tratamento e o processamento de sinal. No primeiro módulo (figura 13), são utilizados dois canais para a aquisição dos sinais ópticos provenientes do amplificador *lock-in*. Este módulo permite determinar a diferença de fase através do arco de tangente dos sinais obtidos (Y/X), e através de um multímetro digital de elevada exactidão, determinar o valor nominal da amplitude da aceleração à saída de um pré-amplificador de carga.

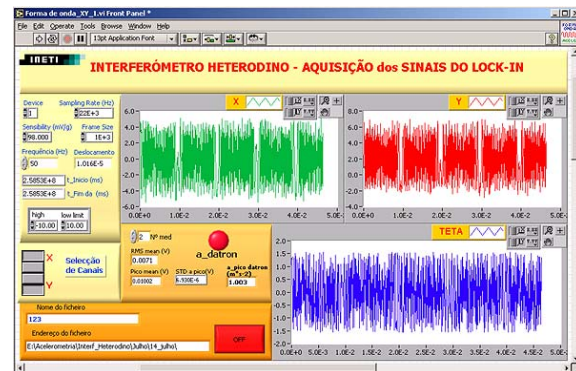


Figura 13 – Aplicação para controlo de instrumentação e aquisição dos sinais provenientes do *lock-in*.

A figura 14 representa o painel frontal da aplicação utilizada para efectuar o tratamento e análise de dados e determinação do valor da amplitude da aceleração do acelerómetro-padrão a calibrar.

As três janelas à direita apresentam (do topo para a base) os valores da fase, utilizando o *phase unwrapping*, o valor de deslocamento depois da aplicação de um filtro apropriado e o correspondente valor de aceleração para cada meio ciclo. À esquerda na figura, é possível observar o comportamento espectral da frequência com o filtro respectivo.

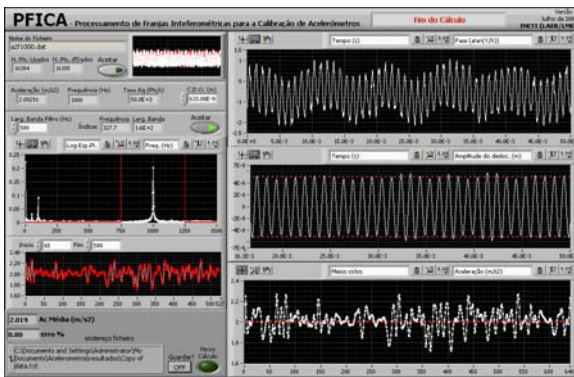


Figura 14 – Aplicação para processamento de sinal e determinação do valor da aceleração.

A aplicação de processamento de sinal compreende essencialmente as seguintes fases:

- cálculo da variação de fase, utilizando *phase unwrapping* para remoção da ambiguidade do sinal;
- manipulação do sinal no domínio da frequência, de modo a filtrar o ruído de baixa e alta frequência, com filtro passa-banda centrado no valor da frequência de excitação;
- determinação da amplitude do deslocamento de cada meio ciclo;
- cálculo da aceleração a partir dos valores de deslocamento calculados;
- selecção da janela útil para o cálculo da aceleração média e determinação do erro respectivo.

5. CONCLUSÕES

Considerando a actual diminuição quantitativa das equipas laboratoriais e a crescente necessidade da sua versatilidade em domínios tão diversos, tornou-se primordial a implementação de soluções de automatização, como os referidos nos exemplos apresentados, tendo como objectivos, entre outros:

- a minimização dos erros de operação e tempos de imobilização de equipamento;
- a validação das leituras, garantindo a qualidade dos dados obtidos e a redução das respectivas incertezas associadas;
- a repetibilidade e reprodutibilidade dos procedimentos técnicos implementados no âmbito de sistemas de gestão laboratoriais e a sua validação;
- a sistematização, o controlo, o registo, o acesso e a manutenção de registos técnicos e da qualidade, permitindo estudos a longo prazo;

- a reutilização e integração de *sub-vi's* de carácter genérico em módulos específicos.

Podemos deste modo concluir que, sem soluções de automatização, não teria sido possível desenvolver muitos dos melhoramentos implementados, nomeadamente na prossecução dos objectivos metrológicos de alcançar as melhores incertezas e desenvolver novos métodos de medição.

REFERÊNCIAS

1. Ribeiro, L., Godinho, M., Nunes, M.; "*Automação em Metrologia Eléctrica - O Exemplo do Laboratório Primário Português*"; 5º Seminário Internacional de Metrologia Eléctrica, T-04, V Semetro, INMETRO, Rio de Janeiro; Abril 10-12 2002.
2. Ribeiro, L., Nunes, M., "*Implementação do Efeito de Josephson no Laboratório Primário Português para as Grandezas Eléctricas*"; 6º Seminário Internacional de Metrologia Eléctrica, Setembro de 2005, Rio de Janeiro, Proceedings, 38-41.
3. Ribeiro, L., Nunes, M., "*Estudo e Caracterização de Nanovoltímetros Digitais*", 1ª Conferência Nacional "Medir Mais e Melhor", SPMet, Lisboa, 28-29 de Novembro de 2005.
4. Ribeiro, L., Nunes, M.; "*Software Application for Semi-Automatic Measurement of High Value Standard Resistors*"; in proc of Trends in Electrical Measurement and Instrumentation; ISBN 972-98115-4-7; (11th TC-4 Symposium) 208/211, Instituto Superior Técnico - Lisboa; September 13-14 2001.
5. Godinho, I., Nunes, M., "*Implementação de Um Padrão Primário de Resistência Baseado no Efeito de Hall Quântico*", 1ª Conferência Nacional "Medir Mais e Melhor", SPMet, Lisboa, 28-29 de Novembro de 2005.
6. Nunes, M., Godinho, M., Rebordão, J., Ribeiro, L.; "*Accelerometer Calibration by Laser Interferometry Using 'COTS' Components and Offline Data Processing*"; IMAC-XIX: Conference on Structural Dynamics, Florida - Laser Vibrometry II, - Hyatt Orlando, Florida, 734-739; February 5-8 2001.
7. Godinho, M. I.; Nunes, M.; Cabral, A.; Rebordão, J. M., Oliveira, V.; "*Absolute Calibration of Standard Accelerometers with Optical Interferometry*" - 7th Intl Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, Italy, 19 - 22 June 2006.