UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DOIS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA

Mário N'Fon Vasconcellos da Silva Nosoline

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Rio de Janeiro – RJ
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DOIS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA

Mário N'Fon Vasconcellos da Silva Nosoline

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Área de concentração:Sistemas de potência
Orientador: Alessandro Manzoni

Rio de Janeiro – RJ
2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE DOIS MÉTODOS DE MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA

Mário N'Fon Vasconcellos da Silva Nosoline

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

_____

Prof. Alessandro Manzoni, D.Sc. (Orientador)

_____

Eng. Orsino Oliveira Filho

_____

Prof. Sérgio Sami Hazan , Ph.D

Rio de Janeiro – RJ
2007

NOSOLINE, MÁRIO N'FON VASCONCELLOS DA SILVA. **Estudo comparativo entre dois métodos de medição de impedância.** Rio de Janeiro 2007. 74 páginas. Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro

À minha querida mãe Elvi, amiga, que esteve sempre ao meu lado nas horas difíceis e que sem ela eu não seria a pessoa que sou hoje e não teria conseguido fazer as coisas que fiz.

AGRADECIMENTOS

A todos que, direta ou indiretamente, contribuiram para a realização deste trabalho.

À minha mãe Elvi, que proporcionou toda condição necessária para a conclusão desta faculdade e às minhas irmãs Inês e Sumaya, pela amizade.

Ao Professor Antônio Carlos Siqueira de Lima pelo apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Orsino Oliveira Filho pela sua inestimável amizade e apoio durante meus anos de estágio.

Aos colegas de classe , com quem nesses anos tive a felicidade de conviver.

NOSOLINE, MÁRIO N'FON VASCONCELLOS DA SILVA. **Estudo comparativo entre dois métodos de medição de impedância.** Rio de Janeiro 2007. 74 páginas. Monografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Resumo

Esta monografia teve por objetivo fazer a comparação entre dois métodos de medição de impedância no domínio da freqüência dentre os vários existentes, especificamente, os dois mais utilizados na indústria, no sentido de mostrar suas principais características e peculiaridades no que se refere à eficiência e eficácia da medição para diferentes configurações dos sistemas a serem medidos. Os métodos aos quais o trabalho se refere são o método de varredura de freqüência, no qual um sinal senoidal é aplicado com sua freqüência variando, medindo-se a resposta do sistema, e o método de impuslo de baixa tensão, no qual um impuslo de tensão é aplicado ao sistema e o espectro da resposta do sistema é calculado. Em ambos os métodos é feita a análise de resposta em freqüência para obter o valor da impedância. O estudo faz referência aos softwares utilizados bem como ao hardware de aquisição. Uma introdução teórica sobre o domínio da freqüência também é apresentada neste estudo para fins de contextualização. A pesquisa bibliográfica, o uso de simulações e coleta de dados experimentais foram os métodos escolhidos para que o objetivo fosse atingido. Os resultados deste estudo demonstram que ambos os métodos são eficazes para se medir a impedância, porém, as principais diferenças são na resolução em determinada faixa de freqüência, na quantidade de instrumentos utilizados e na rapidez com que são feitas as medições.

Palavras chave: Medição de Impedância no Domínio da frequência, Análise de resposta em freqüência, método de varredura de freqüência, método de impulso de baixa tensão

NOSOLINE, MÁRIO N'FON VASCONCELLOS DA SILVA. **Comparative Study between two methods of impedance measurement.** Rio de Janeiro 2007. 74 pages. Monograph, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Abstract

The objective of this monograph is to make the comparison between two methods of impedance measurement in the frequency domain among the various existents, specifically, the two most used in industry, with the purpose of show the principal characteristics and peculiarities in the means of efficiency and efficacy of the measurements for different configurations of the systems to be measured. The methods listed in this work are the Sweep Frequency method, in which a sinusoidal signal is applied with a variant frequency and the response of the system is measured. The other method is the Low Voltage Impulse, in which a voltage impulse is applied in the system and the spectral response of the system is calculated. In both methods a Frequency Response Analysis is done in order to obtain the impedance value. The study makes reference of the software used and the acquisition hardware. A theorical introduction about the frequency domain was made in order to make a contextualization. The bibliographic research, the use of simulation and experimental data collection were the chosen methods to reach the objective. The results of this study show that both methods are effective to measure impedance, however, the main differences are in the resolution in a specific frequency band, in the number of instruments used and the quickness of measures.

Key words: Frequency domain measurements, Frequency Response Analysis, Sweep Frequency Method, Low Voltage Impulse Method

Lista de ilustrações

Figura 2.1 - Circuito *RC* de 1.ª ordem p.18
Figura 2.2 - Diagramas de amplitude e de fase da resposta em freqüência (lineares).....p.19
Figura 2.3 – Diagrama simplificado de uma função de transferência……p.20
Figura 2.4 **-** Circuito *RL* no domínio do tempo , no dom. fasorial e no dom. Freq.....p.21
Figura 2.5 - Diagrama de pólos e zeros.....p.23
Figura 2.6 - Determinação gráfica da amplitude e da fase da resposta em freqüência.....p.26
Figura 2.7 - Painel frontal do programa teórico de Z_F……....p.27
Figura 3.1 – Arranjo para medição por Varredura……p.31
Figura 3.2 – Arranjo para medição por Impulso…….....p.32
Figura 3.3 – Exemplo de impulso de tensão aplicado……p.33
Figura 3.4 – Exemplo de corrente medida pelo Método do impulso……p.33
Figura 4.1 – Painel frontal do programa de medição de imedância Z_F Ponte HP……...p.38
Figura 4.2 – Parte do diagrama de blocos em Labview do programa Z_F Ponte HP.....p.39
Figura 4.3 – Ponte de medição de impedância terminal HP4192A.....p.40
Figura 4.4 - Fluxograma dos processos do programa……p.43
Figura 4.5 - Controles do painel frontal……p.43
Figura 4.6 - Diagrama de blocos principal do programa……...p.44
Figura 4.7 - Case 0 – configurar ……...p.45
Figura 4.8 - Painel Frontal da Sub VI de configuração……p.46
Figura 4.9 - Case 1 – Aquisitar e processar……..……p.47
Figura 4.10- Diagrama de blocos da Sub VI Aquisita_Z_F……..p.48
Figura 4.11 - Diagrama de blocos da Sub VI Processa Z_F……..p.49
Figura 4.12 – Diagrama dos cálculos de Fourier no programa de medição por impulso.....p.50
Figura 4.13 - Case 2 – salvar……..p.50
Figura 4.14 - Painel Frontal da sub VI salva Z_F……p.51
Figura 4.15 - Case 3 – sair……p.51
Figura 4.16 – Sistema de Aquisição de Dados da National Instruments, um PXI……p.52
Figura 5.1 – Circuito RLC série aquisitado pelo método de Varredura de Freqüência: módulo, fase p.53
Figura 5.2 – Detecção de defeito pelo método do impulso.....p.54
Figura 5.3 – Detecção de defeito utilizando o método de Varredura.....p.55
Figura 5.4 – Impedância de um transformador 30MVA utilizando os dois métodos.....p.56
Figura 5.5 – Impedância de um transformador de 30MVA em baixas freqüências.....p.56

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características dos elementos resistência, capacitor e indutor.....p.22

Lista de Abreviaturas e siglas

A/D – Analógico/Digital
CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
FRA – Frequency Response Analysis
GPIB – General Purpose Interface Bus
IV – Instrumento Virtual
LabVIEW - Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LED – Light Emissor Diode
PC – Personal Computer
PXI - PCI eXtensions for Instrumentation

SUMÁRIO

Resumo
Abstract
Lista de ilustrações
Lista de tabelas
Lista de Abreviaturas e siglas
1 INTRODUÇÃO..... 12
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS..... 14
2.1 Fundamentos teóricos sobre o domínio da freqüência..... 14
2.1.1 Domínio da freqüência..... 14
2.1.2 Representações de Fourier..... 15
2.1.3 Análise da Resposta em Freqüência..... 17
2.1.4 Função de Transferência..... 20
2.2 Cálculo de Z(f)..... 27
3 DESCRIÇÃO DOS METODOS..... 28
3.1 Método de Varredura de Freqüência..... 28
3.1.1 Arranjo para o método de Varredura..... 30
3.1.2 Procedimento para a medição..... 31
3.2 Método do Impulso de Baixa Tensão..... 31
3.2.1 Arranjo para o método de impulso..... 32
3.2.2 Procedimento de medição..... 33
4 APLICAÇÃO PRÁTICA..... 35
4.1 Introdução ao Labview..... 35
4.1.1 Método de programação..... 35
4.1.2 Desvantagens..... 35
4.2 Equipamento utilizado no método de Varredura de Freqüência..... 37
4.2.1 Software utilizado no método de Varredura..... 37
4.2.1.1 Painel Frontal do Programa Z_F Ponte HP..... 37
4.2.2 Hardware utilizado na medição..... 40
4.3 Equipamento utilizado no método do Impulso de Baixa Tensão..... 42
4.3.1 Software utilizado no método do Impulso..... 42
4.3.1.1 Fluxograma do programa..... 42
4.3.1.2 Painel Frontal..... 43
4.3.1.3 Diagrama de blocos..... 44
4.3.2 Hardware utilizado no método de Impulso..... 52
5 RESULTADOS..... 53
6 CONCLUSÕES..... 57
BIBLIOGRAFIA..... 58
Anexos..... 59

1 INTRODUÇÃO

A medição de impedância no domínio da freqüência ou Z(f) em Sistemas de Potência tem sido amplamente discutida e desenvolvida nas últimas décadas. O conhecimento deste parâmetro dos equipamentos é de essencial importância para que se consiga administrar os sistemas. Com ele, pode-se analisar o comportamento de um determinado dispositivo em condições anormais de operação e com isso previnir danos e planejar melhor operações de proteção. É muito utilizada no diagnóstico de defeitos em transformadores de potência e normalmente é feita off-line (o equipamento está desligado do sistema). Técnicas de medição on line têm sido desenvolidas, mas ainda apresentam dificuldades práticas para implementação, sobretudo as dificuldades associadas a interferências eletromagnéticas.

A impedância tem sua importância na área de sistemas de potência. No caso de transformadores de potência, estes são freqüentemente submetidos à altas correntes de curto circuito, o que provoca esforços mecânicos internos ao equipamento. Isto pode causar deslocamento nos enrolamentos e mudar as suas características. Por isso a medição de impedância voltada para esta aplicação será evidenciada neste trabalho.

Outra aplicação importante é a medição de Z(f) de arranjos em circuitos elétricos de grandes dimensões. Tais arranjos, como por exemplo: trechos de linhas de transmissão, mesmo quando desenergizados e eletricamente isolados, atuam como antenas e recebem induções eletromagnéticas. Estas condições dificultam as medições de Z(f) com instrumentos convencionais.

Atualmente, há formas diferentes para se medir a impedância, com divergências de opiniões sobre quais técnicas são mais eficientes. Em frente à existência de diferentes técnicas para tal, e a não existência de um padrão que direcione um determinado método à uma certa aplicação, este trabalho tem como principal objetivo apresentar duas das mais relevantes, utilizadas na indústria, e que corresponde às duas principais vertentes de onde os autores desenvolveram suas variações. Faz também uma comparação em termos de eficiência, no sentido apenas de destacar algumas peculiaridades de cada método. Os dados experimentais coletados servem somente ao propósito de ressaltar algumas características dos resultados de cada método.

Ambas as técnicas são muito utilizadas na identificação de defeitos de transformadores. As técnicas abordadas serão a de medição por Varredura de Freqüência e medição pelo método de Impulso de Baixa Tensão. Este tema será desenvolvido no corpo deste trabalho e se apresentará da seguinte forma:

- Capítulo 2: apresenta uma introdução teórica sobre o domínio da freqüência e de alguns tópicos que dão base à parte prática do trabalho. É apresentado também neste capítulo, um programa simples desenvolvido para simular e calcular impedâncias de circuitos RLC numa determinada faixa.

- Capítulo 3: são descritos os métodos e os procedimentos práticos e teóricos para a realização destes.

- Capítulo 4: é apresentado o equipamento utilizado nos tipos de medição estudados.

- Capítulo 5: são apresentados alguns casos teste realizados em laboratório.

- Capítulo 6: são apresentadas as conclusões sobre a comparação entre os dois métodos.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Fundamentos teóricos sobre o domínio da freqüência

Neste capítulo será feita uma breve introdução ao domínio da freqüência e de algumas características importantes para o presente trabalho, para fins de contextualização.

2.1.1 Domínio da freqüência

Domínio da freqüência é o termo utilizado para descrever a análise de funções matemáticas ou sinais em relação à freqüência. O que acontece no domínio do tempo é referido como sendo *temporal* e no domínio da freqüência como *espectral*. Pode-se dizer que o domínio do tempo mede quanto tempo um evento leva para acontecer e o domínio da freqüência mede o quão rápido ou devagar ele acontece. São duas formas de se ver o mesmo evento. Muitos sinais e processos envolvem componentes rápidas e lentas, acontecendo ao mesmo tempo. A análise no domínio da freqüência separa essas componentes e ajuda a rastreá-las.

Magnitude e fase

A representação nesse domínio pode incluir informações do deslocamento de fase que deve ser aplicado ao sinal, a fim de ser possível recombinar as componentes de freqüência para recompor o sinal original no domínio do tempo.

Usando laplace, transformada Z, transformada de Fourier, o espectro da freqüência é complexo e pode-se definir uma magnitude e uma fase para os sinais. Deixando de lado a informação da fase, é possível simplificar a informação na representação no domínio da freqüência, gerando um espectro de freqüências somente com a magnitude.

Decomposição harmônica

Quando se é necessário determinar o conteúdo espectral de um sinal periódico, é possível decompô-lo em uma *série de Fourier*, que é uma soma de senóides harmonicamente relacionadas. Se o sinal não for periódico, no entanto, pode-se pensar nele como um sinal

periódico com período infinito, e a série de Fourier vira *transformada de Fourier.* (ANSWERS.COM)

2.1.2 Representações de Fourier

Na representação de sinais e sistemas no domínio da freqüência, o objetivo principal é analisar as informações contidas em toda a faixa de freqüência do fenômeno representado.

Fourier enunciou importantes ferramentas matemáticas para a representação de qualquer fenômeno, permitindo fazer uma análise detalhada de todas as informações contidas neste fenômeno.

As representações de Fourier tiveram origem nos trabalhos de Jean Baptista Joseph Fourier que viveu na França de 1768 a 1830, onde teve também destacada participação política. Dentre seus primeiros e principais trabalhos destacam-se o anuncio de suas idéias sobre séries temporais em 1802 e o trabalho publicado em 1822 sobre séries harmônicas aplicadas à difusão do calor.

Uma das ferramentas mais poderosas de análise de sistemas lineares é a sua representação matemática no domínio da freqüência. Então, para que os conceitos físicos sejam corretamente transportados para a teoria matemática, serão enunciadas primeiramente as representações de Fourier para sinais e sistemas.

O conceito de resposta em freqüência, é uma operação linear dinâmica. De uma forma genérica, uma operação linear pode ser interpretada matematicamente pela seguinte expressão:

$$Ax_i = \lambda_i x_i \tag{2.1}$$

Onde:

A: imagem do operador linear;

λi , *xi:* respectivamente, auto-valor e auto-vetor de ***A.***

Este conceito transportado para o domínio da freqüência e aplicado a sinais e sistemas pode ser descrito matematicamente pela expressão:

$$\begin{cases} y(t,n) = H\{u(t,n)\} \\ u(t,n) = e^{jwt}, e^{j\Omega n} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} y(t) = e^{jwt} H(jw) \\ y(n) = e^{j\Omega n} H\left(e^{j\Omega}\right) \end{cases} \tag{2.2}$$

Onde:

- $u(t)=e^{jwt}$; $u(n)=e^{j\Omega n}$: sinais de entrada;
- $H(jw)$, $H(e^{j\Omega})$: imagens dos operadores lineares;
- e^{jwt}, $e^{j\Omega n}$: as respectivas auto-funções de H.

Então, supondo-se que um sinal de entrada genérico seja escrito pela expressão

$$\begin{cases} u(t) = \sum_{i=1}^{M} a_i e^{jw_i t} \\ u(n) = \sum_{i=1}^{M} a_i e^{j\Omega_i n} \end{cases} \tag{2.3}$$

O sinal de saída será então representado pela expressão:

$$\begin{cases} y(t) = \sum_{i=1}^{M} a_i e^{jw_i t} H(jw_i) \\ y(n) = \sum_{i=1}^{M} a_i e^{j\Omega_i n} H\left(e^{j\Omega_i}\right) \end{cases} \tag{2.4}$$

Cujas principais características podem ser assim interpretadas:

O sinal ***y(t, n)*** está sendo escrito, no domínio da freqüência, como uma superposição ponderada de senóides complexas;

a_i $H(jw_i)$ Representa o peso ou ponderação com que a componente senoidal de freqüência W_i entra na composição do sinal ***y(t)*** (análogo para o caso discreto).

As representações de sinais genéricos no domínio da freqüência por Fourier são assim classificadas:

- ***Série de Fourier:*** representação, no domínio da freqüência, de sinais periódicos contínuos e discretos no tempo*;*

- ***Transformada de Fourier:*** representação, no domínio da freqüência, de sinais genéricos contínuos e discretos no tempo.

(MENEZES, B., R.)

2.1.3 Análise da Resposta em Freqüência

Designa-se por análise da resposta em frequência o estudo da variação com a frequência do quociente entre dois fasores. A representação do quociente entre fasores em notação polar, entenda-se a representação da amplitude e da fase, define as funções amplitude e fase da resposta em freqüência, que explicitam a relação existente entre as amplitudes e a diferença entre as fases das senóides subjacentes aos fasores. Na variação da amplitude e da fase com a frequência inscrevem-se a seletividade em amplitude e o atraso de fase em frequência, que suportam a construção de filtros elétricos de tipo passa-baixa, passa-alta, passa-faixa, rejeita-faixa, e de equalização de amplitude e de fase.

As representações gráficas das funções amplitude e fase da resposta em freqüência, em escala logarítmica, designam-se por diagramas de Bode de amplitude e de fase. Nos diagramas de Bode de amplitude, o eixo das freqüências (horizontal) representa-se em escala logarítmica (fato que permite abranger num mesmo gráfico uma gama muito mais ampla de freqüências), ao passo que na escala vertical se representa a função $20\log_{10}$(amplitude), em vez da amplitude apenas, cuja unidade se designa por decibell (dB) de amplitude.

A grandeza Z(f) pode ser também caracterizada pela análise de resposta em freqüência, considerando-se que, por definição, a impedância é o quociente entre tensão elétrica e corrente elétrica. Sendo a tensão e corrente no domínio da freqüência, obtêm-se a impedância no domínio da freqüência.

Resposta em Freqüência

A resposta em freqüência é muito utilizada no diagnóstico de defeitos em equipamentos elétricos, principalmente transformadores, e sua base teórica será melhor descrita abaixo através de análise simples de circuitos. Analogamente pode-se considerar também a resposta em freqüência para obtenção de Z(f).

Circuito *RC*

Considere-se o circuito *RC* de 1.ª ordem representado na Figura 2.1 e admita-se que o fasor da fonte de tensão senoidal é $V_s = V\angle 0$.

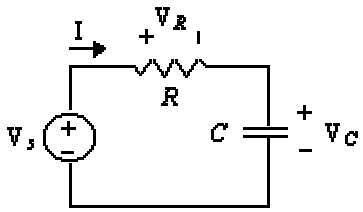


Figura 2.1 - Circuito *RC* de 1.ª ordem

A aplicação da regra do divisor de tensão ao circuito permite obter o fasor da tensão nos terminais do capacitor

$$V_c = \frac{Z_c}{Z_c + Z_R} V_s = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{\frac{1}{j\omega C} + R} V_s = \frac{1}{1 + j\omega RC} V_s \tag{2.5}$$

a partir do qual se pode definir o cociente entre fasores

$$H(j\omega) = \frac{V_C}{V_s} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle - arctg[\omega RC] \tag{2.6}$$

A resposta em freqüência, $H(j\omega)$, é uma função da freqüência, definindo em geral um número complexo cuja representação se pode efetuar tanto no formato retangular, com parte real e parte imaginária, quanto no formato polar, com amplitude e fase. Por exemplo, no formato polar

$$H(j\omega) = H(\omega)\angle\phi(\omega) \tag{2.7}$$

em que $H(\omega)$ e $\phi(\omega)$ representam, respectivamente, a amplitude e a fase da função complexa $H(j\omega)$. Por exemplo, no caso do circuito *RC* considerado anteriormente

$$H(w) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2}} \tag{2.8}$$

e

$$\phi(\omega) = -arctg\left[\frac{\omega}{\omega_p}\right] \tag{2.9}$$

em que se define $\omega_p = 1/RC$.

Um exemplo alternativo é a resposta em freqüência do cociente entre os fasores da tensão aos terminais da resistência e da fonte de sinal

$$H(j\omega) = \frac{V_R}{V_S} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \angle\left(\frac{\pi}{2} - arctg[\omega RC]\right) \tag{2.10}$$

onde se inscrevem as funções amplitude e fase da resposta em freqüência, respectivamente,

$$H(\omega) = \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} = \frac{\frac{\omega}{\omega_p}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^2}} \tag{2.11}$$

e

$$\phi(\omega) = \frac{\pi}{2} - arctg\left[\frac{\omega}{\omega_p}\right] \tag{2.12}$$

Na Figura 2.2 representam-se os diagramas de amplitude e de fase da resposta em frequência definida pelas expressões (2.8) e (2.9).

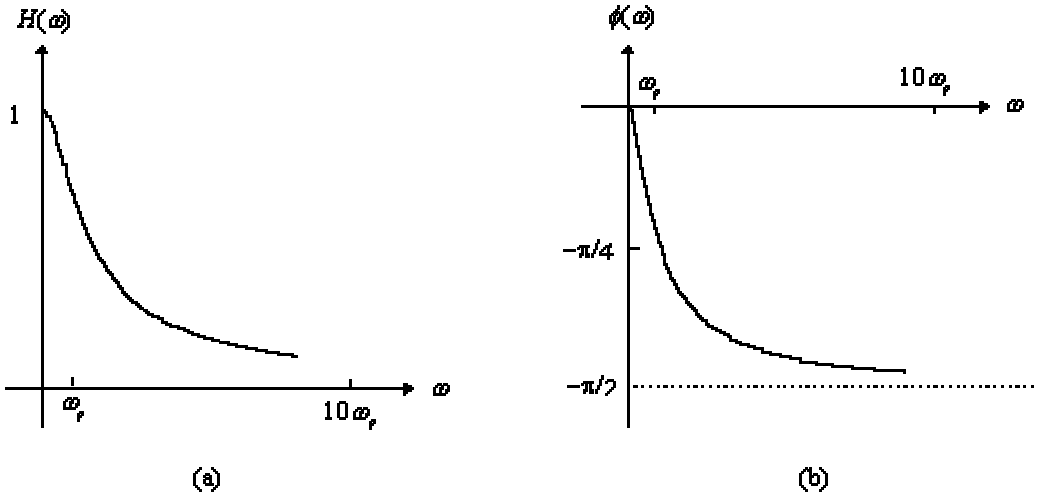


Figura 2.2 - Diagramas de amplitude (a) e de fase (b) da resposta em freqüência (lineares)

Assim:

(i) Na freqüência angular ω=0 rad/s a amplitude da resposta em freqüência é unitária e a fase é nula;

(ii) Na freqüência angular $\omega=\omega_p$ rad/s a amplitude decresce de um fator de $1/\sqrt{2}$, ao passo que a fase vale $-\pi/4$ radianos;

no limite quando $\omega \rightarrow \infty$ a amplitude tende para zero e a fase para $-\pi/2$ radianos.

Conclui-se, assim, que os diagramas de amplitude e de fase da resposta em freqüência dão uma indicação do modo como os sinais são transferidos entre os componentes (ou nós) considerados, em particular informação relativa à atenuação ou amplificação da amplitude e ao atraso ou avanço da fase da senóide. Recorrendo-se ao exemplo considerado na Figura 2.2, verifica-se que os sinais senoidais, cuja freqüência angular satisfazem a condição $\omega<<\omega_p$ sofrem pouca atenuação e atraso de fase entre a fonte e os terminais do capacitor (na amplitude e na fase), ao passo que aqueles para os quais $\omega>>\omega_p$ são atenuados e sofrem um atraso de fase crescente. Como tal, este circuito constitui um filtro de tipo passa-baixa, deixando passar os sinais de baixa freqüência e atenuando os de alta freqüência. (CARREIRA, R.; FONSECA)

2.1.4 Função de Transferência

De acordo com a teoria de controle, o comportamento de um sistema linear de entrada única e saída única, pode ser obtido com uma resposta ao impulso ou pela sua função de transferência como mostrado na figura 2.3.

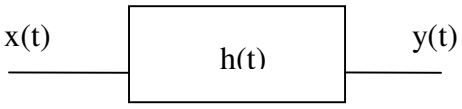


Figura 2.3 – Diagrama simplificado de uma função de transferência

A função de transferência de qualquer sistema linear deve ser independente do sinal de entrada e pode ser descrita como sendo a “impressão digital” do sistema. Sendo assim, seu estudo possui muitas aplicações no campo de medição e diagnóstico, uma das delas é no monitoramento on line de transformadores de potência. Nesse caso, a "impressão digital" é caracterizada para o equipamento novo e monitorada ao longo do tempo. Variações na "impressão digital" podem indicar tendências de ocorrências danosas ao equipamento.

Através de análise de circuitos este tópico será melhor aprofundado.

Considere-se o circuito *RL* na Figura 2.4.a e admita-se que a fonte de sinal é senoidal.

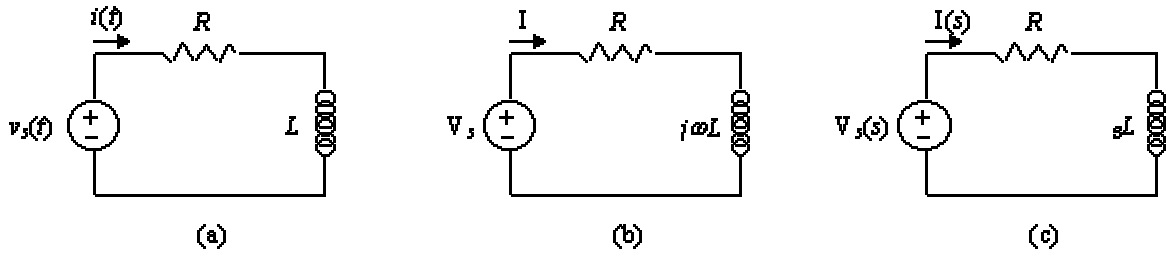


Figura 2.4 - Circuito *RL* no domínio do tempo (a), no dom. fasorial (b) e no dom. da freq. (c)

A aplicação da Lei de Kirchhoff das tensões ao circuito permite escrever, no domínio do tempo,

$$v_s(t) = Ri(t) + L\frac{di(t)}{dt} \tag{2.13}$$

e em notação fasorial (Figura 2.4b)

$$V_s = RI + j\omega LI = (R + j\omega L)I \tag{2.14}$$

Por exemplo, em notação fasorial pode-se definir a resposta em frequência

$$H(j\omega) = \frac{I}{V_s} = \frac{1}{R + j\omega L} \tag{2.15}$$

que, neste caso, expressa a admitância do circuito vista a partir dos terminais da fonte. Contudo, a aplicação da transformada de Laplace à equação (2.13), admitindo condições iniciais nulas (Figura 2.4.c), permite escrever

$$V_s(s) = RI(s) + sLI(s) = (R + sL)I(s) \tag{2.16}$$

em que $s=\sigma+j\omega$ define uma variável no plano complexo. O cociente

$$H(s) = \frac{I(s)}{V_s(s)} = \frac{1}{R + sL} \tag{2.17}$$

designa-se por função de transferência entre as variáveis tensão na entrada e corrente no circuito.

A relação entre a resposta em freqüência e a função de transferência é

$$H(j\omega) = H(s)\,\big|_{s=j\omega} \tag{2.18}$$

isto é, a resposta em freqüência coincide com a função de transferência calculada sobre o eixo imaginário (recorde-se que s é uma variável complexa). Esta igualdade permite escrever as impedâncias dos elementos resistência e indutância na notação de Laplace

$$\begin{aligned} R &\rightarrow R \\ j\omega L &\rightarrow sL \end{aligned} \tag{2.19}$$

podendo facilmente demonstrar-se que no caso do capacitor obtém-se

$$\frac{1}{j\omega C} \rightarrow \frac{1}{sC} \tag{2.20}$$

Na Tabela 2.1 indicam-se as características da resistência, do capacitor e do indutor no domínio do tempo, em notação fasorial e na notação de Laplace.

COMPONENTE	**DOMÍNIO TEMPO**	**NOTAÇÃO FASORIAL**	**NOTAÇÃO LAPLACE**	**IMPEDÂNCIA FAS./LAPLA.**
resistência	$v(t)=R.i(t)$	$V=RI$	$V(s)=RI(s)$	R
capacitor	$i(t) = C\frac{dv(t)}{dt}$	$I=j\omega CV$	$I(s)=sCV(s)$	$\frac{1}{j\omega C}$ $\frac{1}{sC}$
indutor	$v(t) = L\frac{di(t)}{dt}$	$V=j\omega LI$	$V(s)=sLI(s)$	$j\omega L$ sL

Tabela 2.1 - Características dos elementos resistência, capacitor e indutor

As funções de transferência são em geral definidas por um quociente de dois polinômios

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{a_0 + a_1 s + a_2 s^2 + \ldots + a_N s^N}{b_0 + b_1 s + b_2 s^2 + \ldots + b_D s^D} \tag{2.21}$$

que, por sua vez, podem ser escritos na forma de um produto de fatores

$$H(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{(s+z_1)(s+z_2)\ldots(s+z_N)k}{(s+p_1)(s+p_2)\ldots(s+p_D)} \tag{2.22}$$

As raízes dos polinômios no numerador ($-z_i$) e no denominador ($-p_i$) designam-se por zeros e pólos da função da transferência, respectivamente, raízes que dependem dos parâmetros do circuito e são, no caso geral, números complexos.

Considerem-se então os três circuitos representados nas Figuras 2.5.a, 2.5.b e 2.5.c.

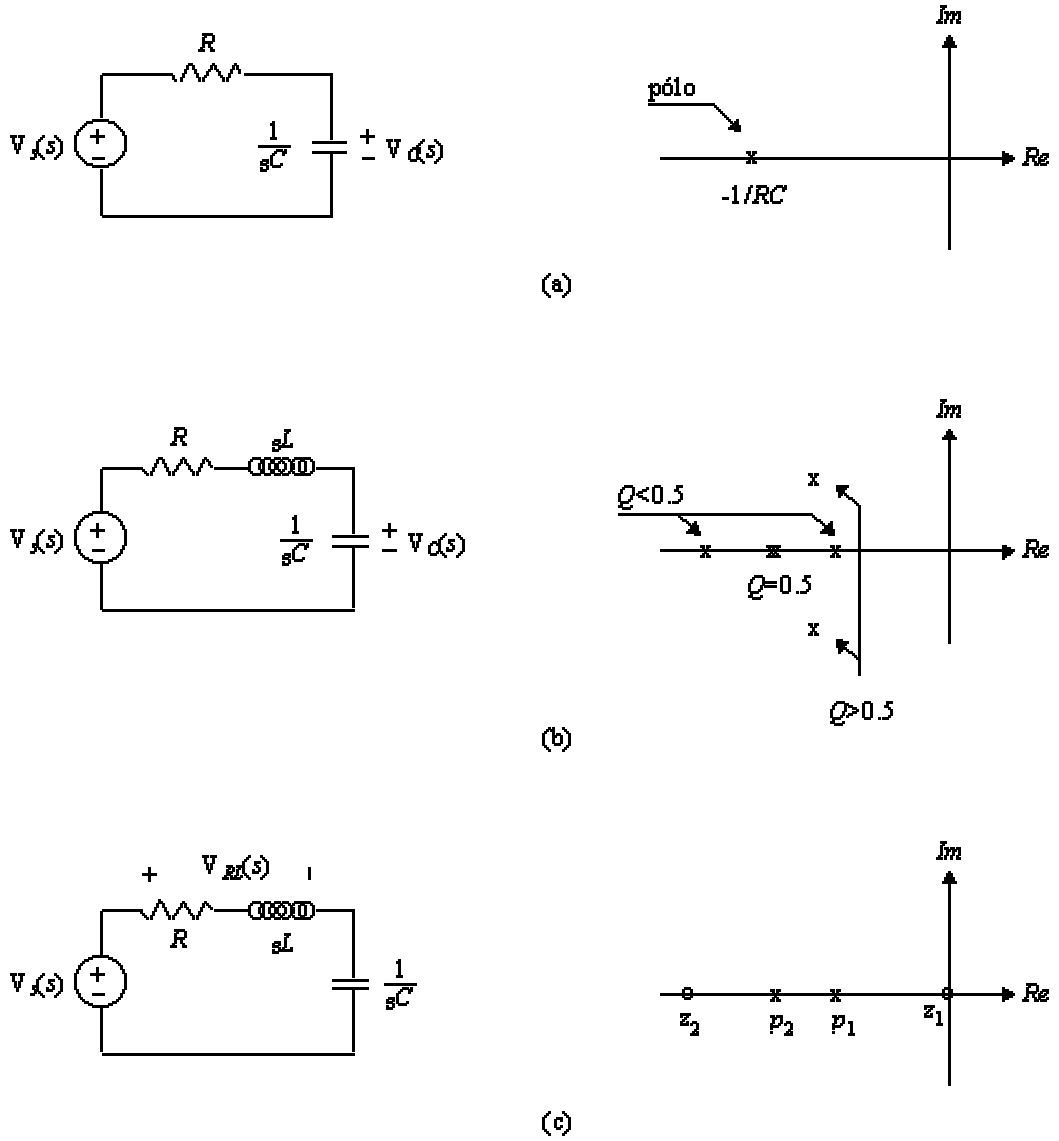


Figura 2.5 - Diagrama de pólos e zeros

No primeiro caso, Figura 2.5.a, a função de transferência entre as variáveis $V_s(s)$ e $V_C(s)$ é expressa pelo cociente

$$H(s)\frac{V_c(s)}{V_s(s)} = \frac{1}{1+sRC} = \frac{1}{RC}\frac{1}{s+\frac{1}{RC}} \tag{2.23}$$

e apresenta um pólo real negativo em -1/*RC*. Por outro lado, no caso do circuito *RLC* representado na Figura 2.5.b, a função de transferência entre a fonte de sinal e a tensão aos terminais do capacitor é dada pelo cociente

$$H(s)=\frac{V_c(s)}{V_s(s)}=\frac{\frac{1}{sC}}{\frac{1}{sC}+R+sL}=\frac{1}{LCs^2+RCs+1}=\frac{\omega_0^2}{s^2+\frac{\omega_0}{Q}s+\omega_0^2} \tag{2.24}$$

cuja representação na forma de um produto de fatores é

$$H(s)=\frac{\omega_0^2}{(s+p_1)(s+p_2)} \tag{2.25}$$

em que

$$p_{1,2}=-\frac{\omega_0}{2Q}\pm\frac{\omega_0}{2Q}\sqrt{1-4Q^2} \tag{2.26}$$

Os pólos em (2.26) podem ser reais, negativos e distintos (Q<0.5); reais, negativos e iguais (Q=0.5); ou ainda complexos conjugados (Q>0.5). Finalmente, no caso do circuito da Figura 2.5.c, a função de transferência entre os terminais da fonte de sinal e os terminais da resistência e do indutor é

$$H(s)=\frac{V_{RL}(s)}{V_S(s)}=\frac{R+sL}{\frac{1}{sC}+R+sL}=\frac{s\left(\frac{R}{L}+s\right)}{s^2+\frac{R}{L}s+\frac{1}{LC}}=\frac{s\left(\frac{\omega_0}{Q}+s\right)}{s^2+\frac{\omega_0}{Q}s+\omega_0{}^2} \tag{2.27}$$

ou seja,

$$H(s)=\frac{s(s+z_2)}{(s+p_1)(s+p_2)} \tag{2.28}$$

em que z_1=0, z_2=R/L=ω_0/Q e p_1 e p_2 são dados pela expressão (2.26) anterior. Neste caso, e como indicado na Figura 2.5.c, a função de transferência é composta por dois zeros, um dos quais na origem, e dois pólos, neste caso considerados como reais, negativos e distintos (Q<0.5).

Uma das vantagens da notação de Laplace, e em particular da escrita da função de transferência na forma de um produto de fatores, é a possibilidade de, a partir do diagrama de pólos e zeros, ser possível identificar o andamento da amplitude e da fase da resposta em freqüência correspondente. Considere-se então a função de transferência

$$H(s)=\frac{(s+2)}{(s+1-j)(s+1+j)} \tag{2.29}$$

neste caso com um zero real negativo e dois pólos complexos conjugados (Figura 2.6.a). A resposta em freqüência coincide com a função de transferência calculada sobre o eixo imaginário

$$H(j\omega) = H(s)\,\big|_{s=j\omega} = \frac{(j\omega+2)}{(j\omega+1-j)(j\omega+1+j)} \tag{2.30}$$

cuja representação em formato polar é

$$H(j\omega) = \frac{\sqrt{\omega^2+4}}{\sqrt{(\omega-1)^2+1}\sqrt{(\omega+1)^2+1}} \angle\left(arctg\left[\frac{\omega}{2}\right] - arctg\left[\frac{\omega-1}{1}\right] - arctg\left[\frac{\omega+1}{1}\right]\right) \tag{2.31}$$

Como se vê nas Figuras 2.6.b a 2.6.g, a amplitude e a fase podem ser identificadas com as amplitudes e os ângulos (com o eixo real positivo) dos segmentos que unem os pólos e os zeros ao ponto no eixo imaginário correspondente à freqüência angular. Por exemplo, nas Figuras 2.6.b e 2.6.c representam-se as amplitudes e os ângulos dos vetores correspondentes à freqüência angular ω=0 rad/s; nas Figuras 2.6.d e 2.6.e considera-se a freqüência angular ω=1 rad/s; e nas Figuras 2.6.f e 2.6.g considera-se o limite quando a freqüência angular tende para infinito. Constata-se, assim, que a fase na origem (ω=0 rad/s) é nula e tende para $-\pi/2$ radianos no limite sempre que a freqüência angular tende para infinito.

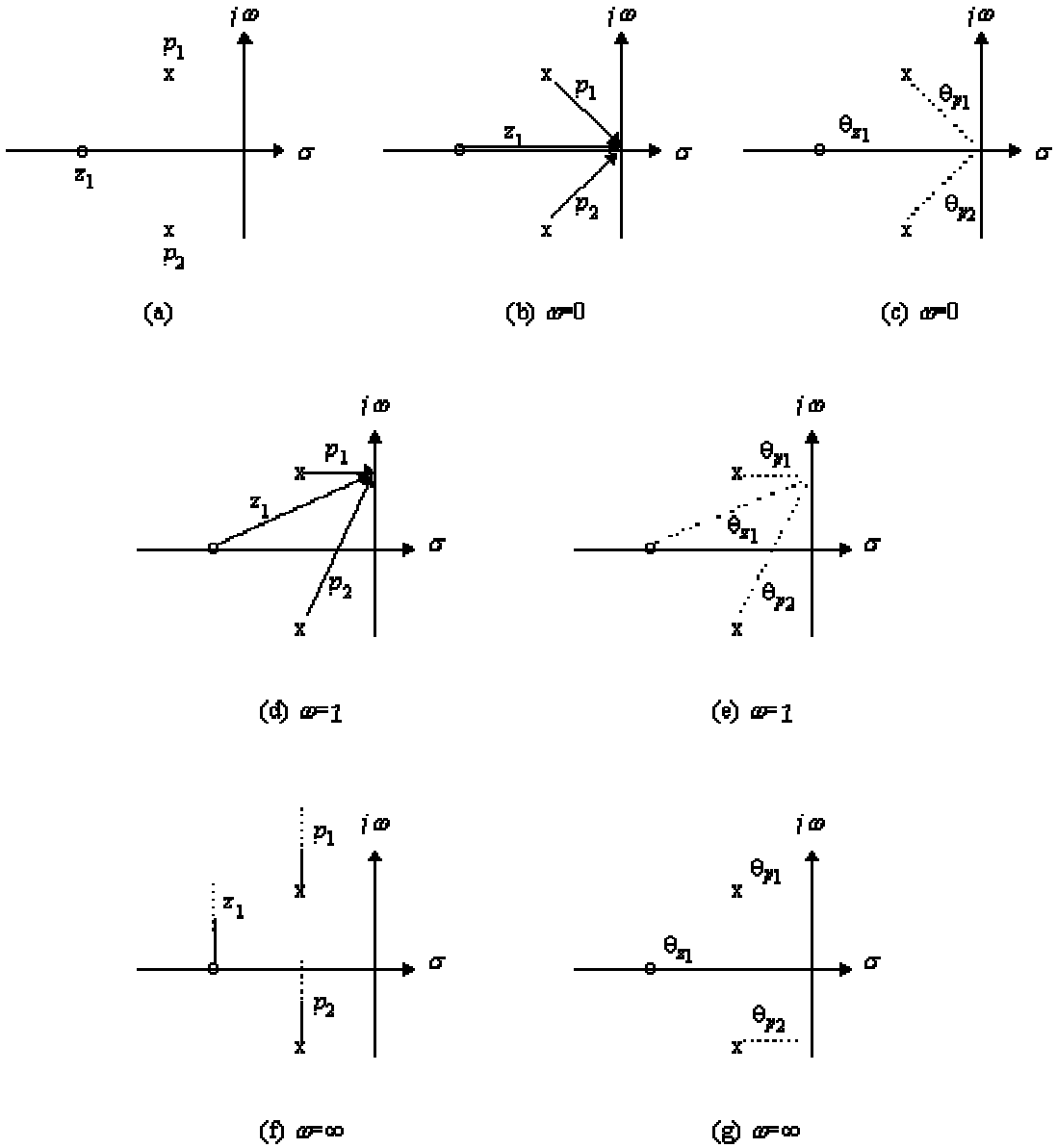


Figura 2.6 - Determinação gráfica da amplitude e da fase da resposta em freqüência

(CARREIRA, R.; FONSECA)

2.2 Cálculo de Z(f)

A fim de auxiliar nos resultados deste estudo, um modelo teórico de cálculo de impedâncias foi desenvolvido em LabVIEW, onde é possível entrar com parâmetros de R, L ,C e a faixa de freqüência, num arranjo especificado, e a impedância deste sistema é calculada. Estes cálculos foram utilizados na determinação de alguns dos sistemas que foram ensaiados em laboratório.

Abaixo está representado o painel frontal do programa de cálculo

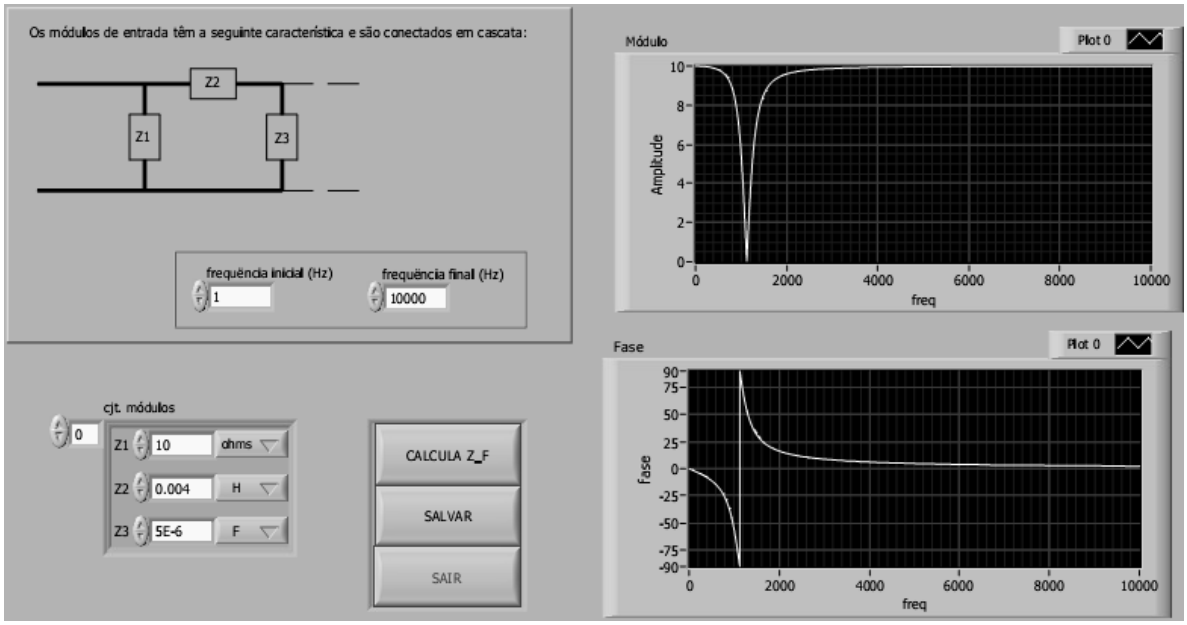


Figura 2.7 - Painel frontal do programa teórico de Z_F

Sua interface é simples, bastando o usuário entrar com os parâmetros de Z1, Z2 e Z3, que compõem um módulo. É possível fazer composição de módulos em cascata, bastando adicionar mais elementos através do controle “cjt. módulos” .

O programa simplesmente faz a varredura de freqüência calculando a impedância equivalente em módulo e fase para cada freqüência.

3 DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS

A análise de resposta em freqüência, conhecida como FRA (Frequency Response Analysis), consiste em medir a impedância do equipamento (geralmente é muito utilizada em transformadores de potência) sobre uma larga faixa de freqüências e compará-la com um valor de referência pré-estabelecido em forma de "impressão digital" (normalmente fornecido pelo fabricante). Diferenças podem indicar algum dano, o qual pode ser investigado posteriormente fazendo utilização de outra técnica ou por exame do seu interior.

Há atualmente dois métodos utilizados para abranger as freqüências necessárias à análise: em um deles, é aplicado um impulso de tensão nos terminais do equipamento, conhecido como Método do Impulso de Baixa Tensão e no outro a freqüência do sinal senoidal aplicado varia dentro da faixa especificada e sua resposta é medida, conhecido como Método de Varredura de Freqüência . Ambos os métodos são utilizados largamente na indústria hoje em dia e algumas das principais aplicações são na detecção de defeitos em transformadores de potência e na medição de arranjos de circuitos elétricos.(TENBOHLEN, S.; RYDER, S. A)

Este capítulo fará uma descrição dos dois métodos apresentados.

3.1 Método de Varredura de Freqüência

A necessidade de se medir a resposta em freqüência de sistemas/equipamentos elétricos existe desde o começo das aplicações de engenharia em alta freqüência. A carência por caracterização de dispositivos em torno de uma faixa mais ampla de freqüências, levou ao desenvolvimento contínuo de técnicas de medição deste parâmetro em função da freqüência. As técnicas pelo método de varredura têm sido desenvolvidas gradualmente desde o final da década de 40 e início da década de 50.

Em laboratórios de pesquisa, o método de varredura oferece ferramentas eficientes para otimizar projetos. É possível plotar rapidamente os parâmetros críticos de um dispositivo para uma ampla faixa de freqüência. Medidas ponto-a-ponto não são somente ineficientes, mas também restringem a quantidade de dados disponíveis ao engenheiro.

As medições com varredura de freqüência deram grandes contribuições para produção e para controle de qualidade de equipamentos elétricos. Estes podem ser caracterizados rapidamente em uma ampla faixa de freqüências, até MHz. Anomalias que excedem as

especificações em algumas poucas freqüências são rapidamente descobertas e tratadas. (ELY, P. C. JR)

A análise de resposta em freqüência pelo método de Varredura de Freqüência abrange toda a faixa de freqüências necessárias para o estudo em questão. O sinal senoidal utilizado neste método é gerado por um analisador de redes, que pode também ser utilizado para realizar as medições de tensão e processar os resultados. Um grande número de medidas e configurações é possível. A mais utilizada é a aplicação do sinal de tensão no terminal de entrada e a medição da tensão na saída. No modelo do circuito equivalente do sistema deve-se incluir as impedâncias da fonte de sinal e das pontas de prova de medição.

O uso do método da varredura permite somente ser feita uma medida de cada vez. O tempo utilizado pelo gerador do analisador para variar a freqüência na faixa considerada varia entre pouco menos de um minuto até 10 minutos.

Há algumas formas de se apresentar os resultados obtidos pelas medições utilizando-se este método. O mais difundido é a plotagem de um gráfico da amplitude, medida pelo analisador, pela freqüência. Ambas escalas, linear e logarítmica, são utilizadas.

Exemplo de aplicação: Monitoramento de um transformador

Transformadores de potência de alta tensão estão entre os elementos mais caros em um sistema de potência e sua falha é um evento que traz muitas conseqüências operacionais e financeiras. O monitoramento e técnicas de diagnóstico, que podem avaliar a integridade do transformador, são essenciais para avaliar a confiabilidade do equipamento. Para tanto, uma diversa série de métodos de medição é usada no transformador, cada uma aplicada a um tipo específico de problema e tem seus próprios méritos. Estes métodos porém não servem para medir deformações nos enrolamentos de um transformador.

Quando o transformador é submetido a correntes de defeito muito altas, a estrutura física e seus enrolamentos são submetidos a forças mecânicas severas, podendo causar o movimento dos enrolamentos e deformações nos mesmos. Pode também resultar em danos na isolação.

As deformações nos transformadores são difíceis de se identificar por outros métodos de diagnóstico (utilizando-se o domínio do tempo por exemplo) e resultam em mudanças internas significativas na indutância e capacitância. Estas mudanças podem ser detectadas externamente pelos métodos de resposta em freqüência por varredura e pelo impulso de baixa tensão. O diagnóstico é feito comparando-se o resultado da análise de resposta em freqüência,

feita em qualquer tempo após instalação, com valores de referência do transformador, medidos com o transformador novo. (NIRGUDE, P., M.)

3.1.1 Arranjo para o método de Varredura

Abaixo está representada uma figura de um arranjo para medição de impedância utilizando este método.

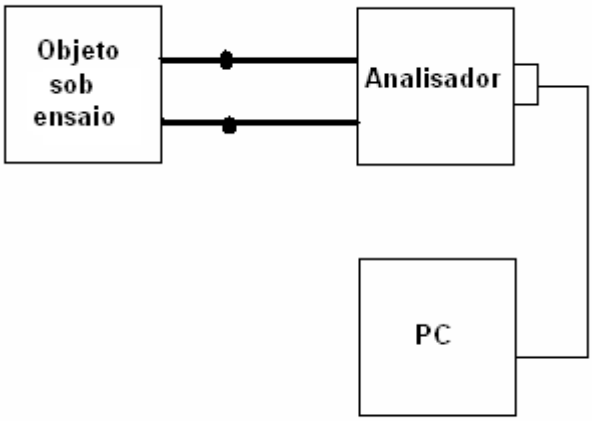


Figura 3.1 – Arranjo para medição por Varredura

A faixa de freqüência coberta depende do analisador adotado. Isto varia dependendo do fabricante. O analisador utilizado neste trabalho, que consiste em uma Ponte HP4192A, está melhor descrito no próximo capítulo e no anexo 2. Normalmente esse tipo de instrumento é dotado de conexão para computador, a fim de guardar e manipular os resultados obtidos em laboratório.

Quando o ensaio é feito em transformadores os terminais do analisador devem ser conectados nos dois lados dos enrolamentos.

3.1.2 Procedimento para a medição

A medição consiste em conectar o objeto sob ensaio no analisador, e este a um computador, que fará o controle dos sinais injetados (especificamente das freqüências que o analisador irá produzir e do nível de tensão) e receberá os resultados.

Para o caso do intrumento utilizado, o sinal aplicado corresponde a uma tensão senoidal de no máximo 1,1Vrms.

Há analisadores que possuem variação automática de freqüência, facilitando a medição em termos de rapidez de processamento. No caso apresentado neste trabalho, não foi utilizada esta função pois o software de controle não estava implementado para tal.

A cada passo, o computador enviará o valor de freqüência para o analisador, que irá aplicar um ciclo de um sinal senoidal no objeto sob ensaio, receberá a resposta deste sinal e calculará a impedância. Neste caso, a impedância é calculada internamete, ou seja, o processamento matemático dependo deste instrumento.

3.2 Método do Impulso de Baixa Tensão

O método de impulso de baixa tensão tem sido muito utilizado na detecção de defeitos mecânicos e distúrbios nos enrolamentos dos transformadores, e se mostrou um método muito útil e com vantagens associadas a interferências eletromagnéticas.

Por ele é possível visualizar no domínio da freqüência mudanças na fase nos pontos ressonantes na função de transferência.

Esta técnica, quando usada nos transformadores no entanto, tem sido limitada na prática por causa da sensibilidade da função de transferência a diferentes parâmetros no tempo do impulso aplicado, sensibilidades à variáveis como condição e temperatura do óleo.(COFFEEN, L.)

Durante o ensaio com o impulso de baixa tensão, que é um ensaio não destrutivo, um impulso padrão de tensão de 1.2/50µs com magnitude de 100V à 1000V é aplicado aos terminais do equipamento e a corrente de saída é medida.

No caso do transformador, se um defeito maior está presente nos enrolamentos, será observado um desvio significante na forma de onda de tensão e na corrente aquisitada, porém,

se for um defeito pequeno, o desvio é mínimo, e é muito difícil analisar a forma de onda somente no domínio do tempo. Para contornar isso, os sinais são analisados no domínio da freqüência, ou seja, este método, processado no domínio da freqüência, é mais eficiente no caso de defeitos menores.(KUMAR, N. P)

3.2.1 Arranjo para o método de impulso

Para este ensaio, o seguinte arranjo simplificado é utilizado:

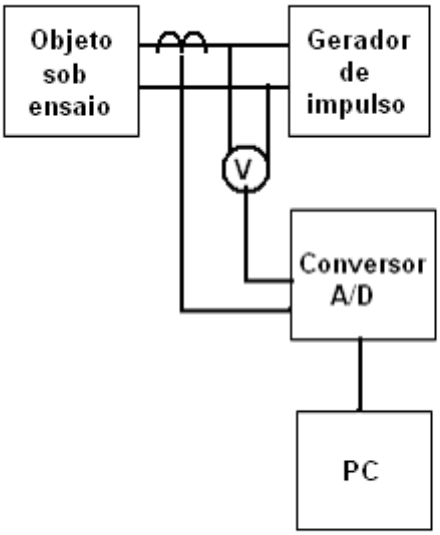


Figura 3.2 – Arranjo para medição por Impulso

O Gerador de impulso é conectado nos terminais do objeto sob ensaio. O Impulso de tensão é gerado e tanto a tensão quanto a corrente são medidos. Eles devem passar por um conversor A/D para serem processados.

No caso do transformador, como a impedância é medida de um enrolamento ao outro, a corrente deve ser aquisitada no outro terminal do transformador.

No caso de medição de impedância direta, os sinais de tensão e corrente são medidos nos mesmos terminais.

3.2.2 Procedimento de medição

A medição é baseada na aplicação de um curto impulso de baixa tensão em um dos terminais do dispositivo sob ensaio e na aquisição da corrente do terminal de saída.

As figuras 3.3 e 3.4 mostram gráficos típicos da tensão aplicada e da corrente medida.

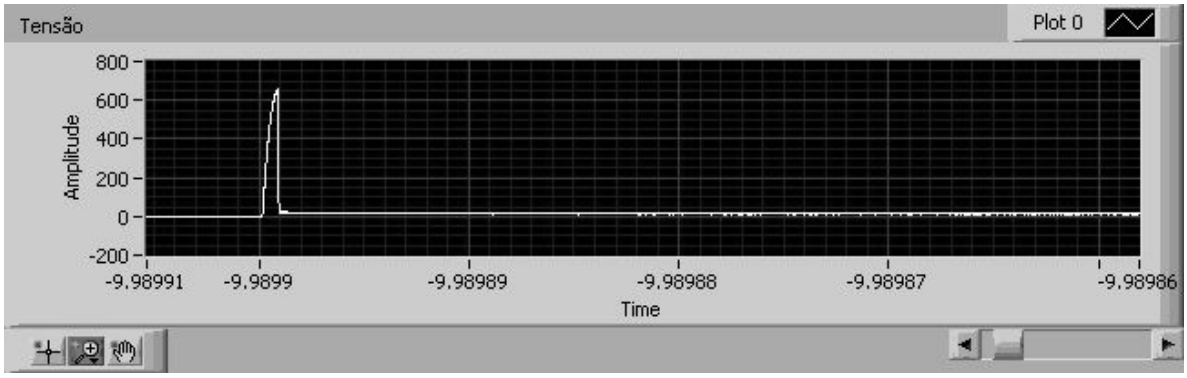


Figura 3.3 – Exemplo de impulso de tensão aplicado

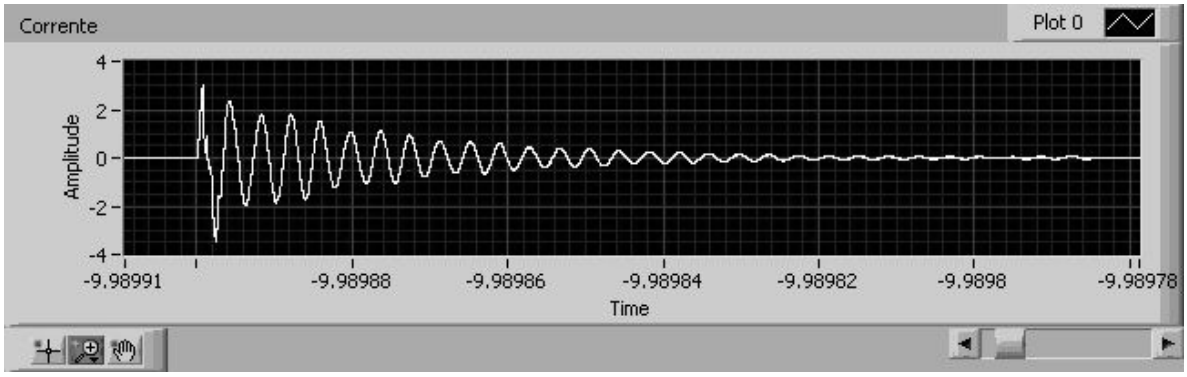


Figura 3.4 – Exemplo de corrente medida pelo Método do impulso

Após a aplicação do impulso, os dados são enviados à um computador e os cálculos para a análise em resposta em freqüência são computados.

Uma transformada de Fourier é então feita para os sinais. A transformada de Fourier da corrente de saída medida é dividida pela transformada da tensão de entrada. Sendo assim calculada a função de transferência para a faixa de freqüências contidas no impulso. No caso de medições em transformadores, deslocamento nos enrolamentos e defeitos podem ser identificados comparando-se os resultados obtidos com os resultados de fabricação. No caso

dos sinais de tensão e corrente serem medidos nos terminais de entrada de um arranjo ou equipamento, a transformada de Fourier da tensão dividida pela transformada da corrente caracteriza a Z(f) vista pelos terminais de entrada.

4 APLICAÇÃO PRÁTICA

4.1 Introdução ao Labview

No CEPEL, onde os ensaios foram realizados, a maioria dos hardwares de aquisição de dados utiliza como software o Labview, portanto suas características serão brevemente descritas neste tópico.

LabVIEW é uma linguagem de programação gráfica pertencente à National Instruments. O Acrónimo vem de "**Lab**oratory **V**irtual **I**nstrument **E**ngineering **W**orkbench".

A primeira versão surgiu em 1986 para o Macintosh. Hoje existem ambientes de desenvolvimento integrado também para Windows, Linux e Solaris.

O principal campo de aplicação do LabVIEW é na técnica de medição e na Automatização. A programação é feita através do modelo data flow, que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e sua manipulação.

Os programas LabVIEW são chamados de Instrumentos virtuais ou simplesmente IVs. São compostos por dois elementos: o painel frontal contem a Interface, o diagrama de blocos contém o código gráfico do programa. O programa não é tratado por um interpretador, mas compilado. Deste modo, a sua performance é comparável com a das linguagens de alto nível. A sua linguagem gráfica é chamada de "G".

4.1.1 Método de programação

Blocos de funções são designados por Instrumentos Virtuais. Isto é assim porque em princípio, cada programa (Sub-IV) pode ser usado como sub-programa por qualquer outro programa desenvolvido ou pode simplesmente rodar sozinho. Devido ao princípio de fluxo de dados, as chamadas recursivas não são possíveis, podendo-se no entanto com algum esforço extra conseguir esse efeito.

O programador conecta IVs com linhas (fios) de ligação e define deste modo o fluxo de dados. Cada IV pode possuir entradas ou saídas. A execução de um IV começa quando todas as entradas são existentes; a IV é processada e os resultados são então colocados nos terminais de saída. Desta forma a ordem na qual as tarefas são executadas é definida em função da ordem em que os dados vão sendo disponibilizados. Uma ordem pré-definida (por exemplo "da esquerda para a direita") não existe.

Uma importante consequência destas regras é a facilidade com que processos paralelos podem ser programados no LabVIEW. Basta haver dois sub IVs sem interdependência dos dados para que eles sejam processados em Multithreading.

Caso um sub-IV não possua entradas, ele será executado ao início do programa. Caso ele não possua saídas, os dados resultantes são ignorados ou então usados de outras maneiras: escrever para o disco rígido ou para a rede, impressão... Da mesma forma, um sub-IV sem entradas pode receber dados de aparelhos periféricos ou gerar os seus próprios dados (por exemplo gerador aleatório).

Os sub-IVs podem estar profundamente interconectados. Muitas das funções próprias do LabVIEW são por sua vez IVs normais, que também podem ser processadas pelo programador (o que não é recomendável). Todas as IVs baseiam-se numa série de funções básicas, chamadas Primitivas, que não podem ser abertas como IVs.

Muitas IVs e primitivas em LabVIEW são polimorfas, ou seja, a sua funcionalidade adapta-se ao tipo de dados que recebem. Por exemplo, a função Build-Array pode ser usada para a criação de quaisquer variáveis, ou seja strings, inteiros ou também arrays e clusters. Também é possível construir as suas próprias IVs polimorfas, que tratam-se de uma coleção de várias IVs com diferentes tipos de dados, entradas e saídas.

Fontes de dados podem ser ligadas ao Painel frontal através de manipuladores. Por exemplo uma entrada de números pode ser dependente de um variador do tipo uma manivela e uma saída de uma variável booleana pode ser realizada por um LED.

O painel frontal do LabVIEW é um meio confortável para construir programas com boa interface gráfica. O programador não precisa escrever qualquer linha de código, apesar de ser possível em caso de preferência. A apresentação gráfica dos processos aumenta a facilidade de leitura. Uma grande vantagem em relação as linguagens baseadas em texto é a facilidade com que se cria componentes que rodam paralelamente. Em projetos de programação extensos é muito importante usar uma programação estruturada desde o início.

4.1.2 Desvantagens

Quanto às desvantagens face à programação por texto, elas são:

- Pequenas mudanças podem obrigar a novas restruturações do programa, uma vez que sempre que se cria um novo lugar ou nova variável de entrada/saída é necessário reconectar os fios e símbolos para restabelecer o funcionamento.

- Afim de evitar confusões de fios, é usual introduzir mais variáveis do que estritamente o necessário, diminuindo a velocidade e indo contra ao modelo fluxo de dados.

Por um lado é confortável programar sem código, mas não se deve esquecer que no LabVIEW é muito importante planejar muito bem o projeto antes de começar.(WIKIPÉDIA)

4.2 Equipamento utilizado no método de Varredura de Freqüência

Nesta medição, geralmente são usados um computador pessoal, um gerador de sinais com freqüências variáveis e um digitalizador.

O arranjo de como a medição é feita foi mostrado no capítulo anterior.

O hardware utilizado foi uma Ponte HP4192 de medição de impedância terminal e um Notebook com conexão GPIB. Para maiores informações sobre GPIB consulte o anexo 1.

4.2.1 Software utilizado no método de Varredura

O software desenvolvido consiste no programa de aquisição e processamento de dados feito em Labview **Z_F Ponte HP**

4.2.1.1 Painel Frontal do Programa Z_F Ponte HP

A seguir é mostrado o painel frontal do programa Z_F Ponte HP.

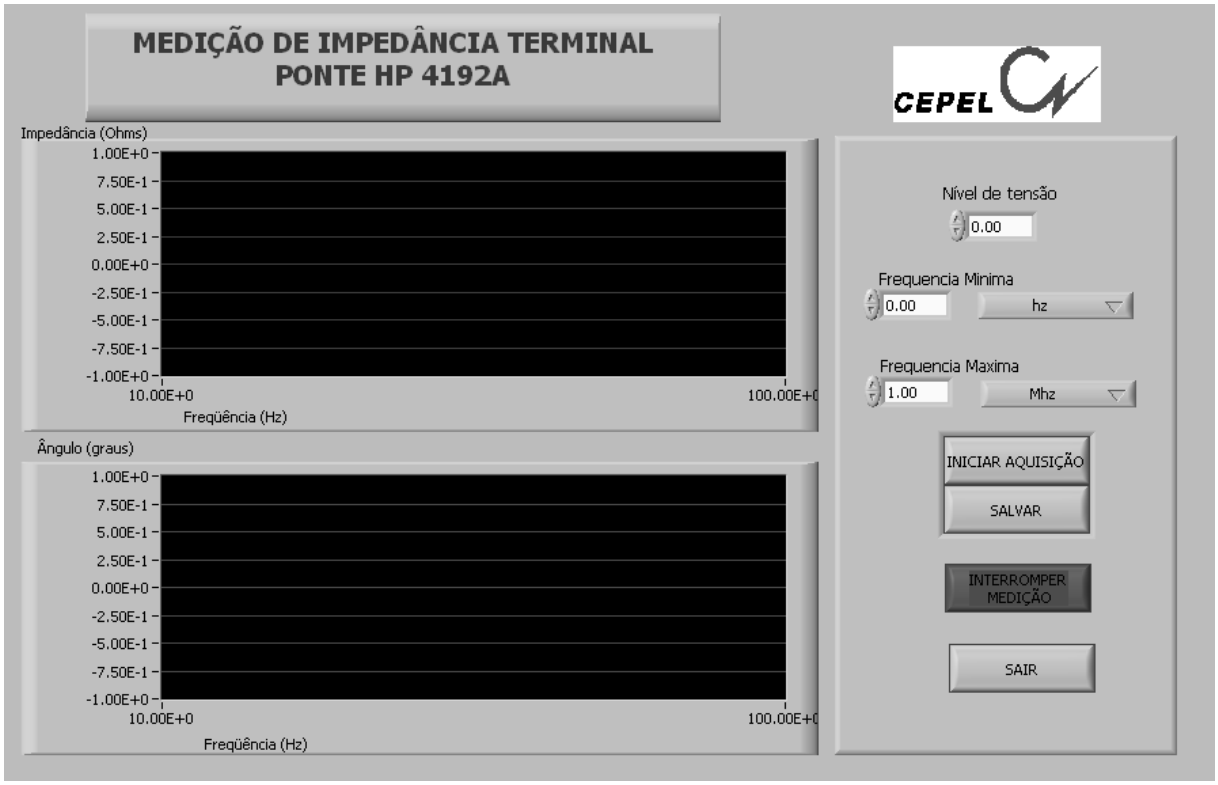


Figura 4.1 – Painel frontal do programa de medição de imedância Z_F Ponte HP

O programa consiste apenas em controlar as freqüências desejadas e mandar esta informação para que a ponte gere os sinais e meça os resultados, enviando os valores de módulo e ângulo para o computador, ou seja, toda a parte de cálculo é externo a este.

Cada step do programa consiste em enviar um valor de freqüencia para a ponte através de uma conexão GPIB, esperar que ela gere o sinal, meça e mande o resultado para o computador e acumular este valor em um array, que após o término da rotina será plotado.

Abaixo se encontra uma figura de como essa comunicação é feita.

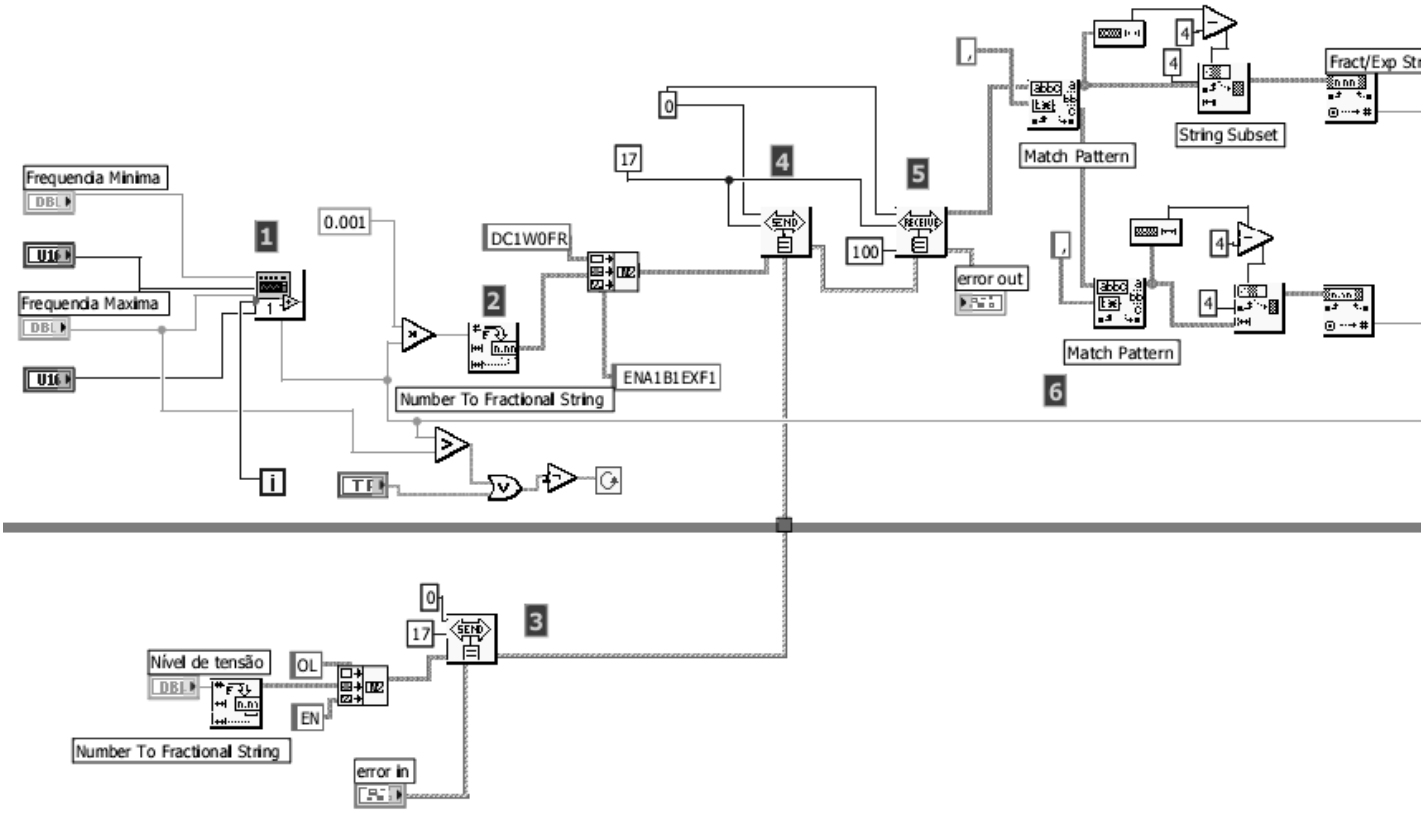


Figura 4.2 – Parte do diagrama de blocos em Labview do programa Z_F Ponte HP

- Em 1, os steps de freqüência são calculados.
- Em 2, esses valores são convertidos em string de texto, para que sejam mandados via conexão GPIB para o equipamento.
- Em 3, Informações relevantes sobre o nível de tensão são passados ao instrumento pelo bloco “SEND”
- Em 4, um step de freqüência é enviado ao equipamento.
- Em 5, através do bloco “RECEIVE”, os dados do resultado são lidos em forma de string de texto
- Em 6, os valores de módulo e ângulo são separados do array e convertidos para números, que posteriormente formarão arrays de módulo e ângulo para serem plotados.

4.2.2 Hardware utilizado na medição:

Nos ensaios foram utilizados um notebook comum com labview e a ponte de medição de impedância terminal HP4192 (mostrada na figura 4.4), cujas algumas características se encontram abaixo:

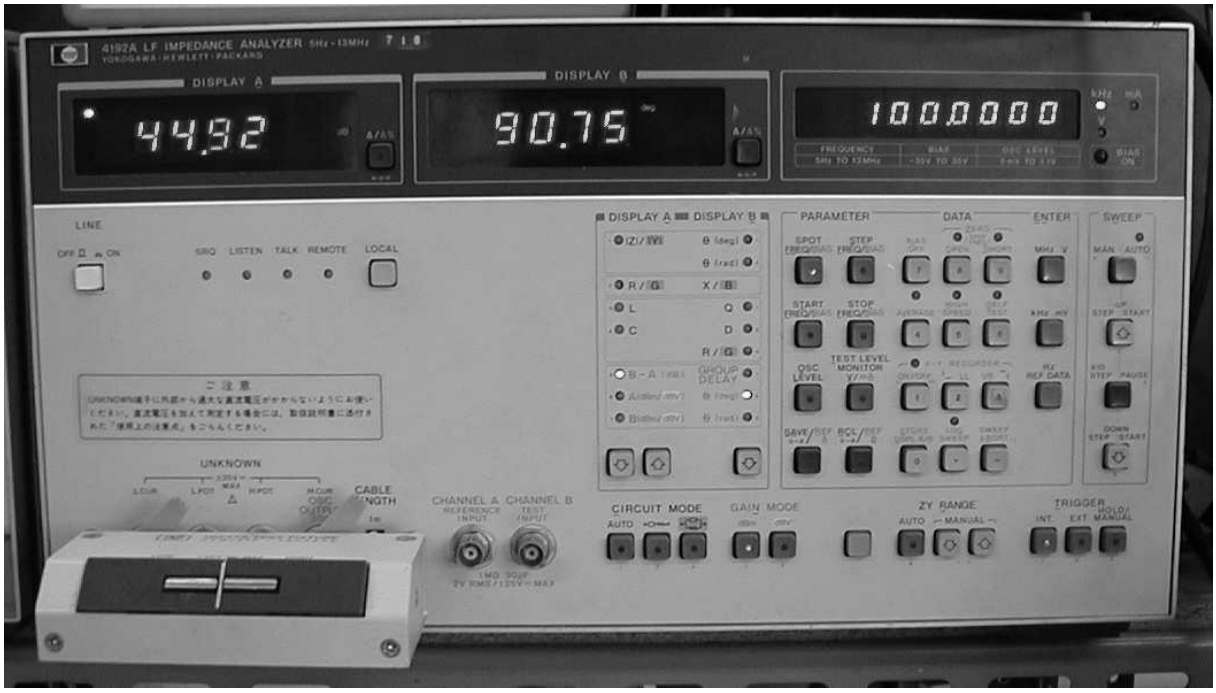


Figura 4.3 – Ponte de medição de impedância terminal HP4192A

LF Impedance Analyzer, 5Hz a 13Mhz

- Medidas de Ganho e fase: amplitude, fase, desvio
- Flutuações ou dispositivos de aterramento.
- Medição de impedância: |Z|, |Y|, Ø, R, X, G, B, L, C, D, Q, modo de desvio

Especificações

Modo de medição

Medição única

Medição por varredura: linear ou logarítmica

Medição de amplitude e fase

Parâmetro medido: amplitude relative B-A (dB) e fase Ø (graus ou radianos), B-A e desvio de grupo, amplitude absoluta A (dBm ou dBV) ou B (dBm ou dBV), e desvio de todos os parâmetros.

Medição e impedância

Parâmetros	Faixa de medição	Precisão básica
|Z|, R, X	1.0000ohms a 1.000Mohms	0.15%
|Y|, G, B	10.000µS a 10.00S	0.15%
Ø	-180.00° a +180.00°	0.08°
L	100.00nH a 1000H	0.27%
C	1.0000pF a 199**mF	0.15%
D (1/Q)	0.0001 to 19.999	0.001 (Medição de C) 0.003 (Medição de L)

Maiores informações sobre o instrumento citado, vide anexo 2.

4.3 Equipamento utilizado no método do Impulso de Baixa Tensão:

Nesta medição geralmente é usado um computador pessoal, um gerador de impulso retangular uma unidade de controle e um rápido digitalizador.

O arranjo deste método foi mostrado no capítulo anterior

O equipamento utilizado foi um calibrador de impulso de tensão Dr. Strauss (vide anexo 4) e o sistema de Aquisição de Dados PXI.

4.3.1 Software utilizado no método do Impulso

O software desenvolvido utilizado nas aquisições consistiu no programa de aquisição e processamento de dados feito em Labview **Z_F impulso** apresentado a seguir:

4.3.1.1 Fluxograma do programa

Basicamente, assim que o programa é inicializado, ele espera até que o usuário entre com os parâmetros iniciais de configuração e aperte algum botão. A seqüência lógica para se apertar os botões é mostrada na figura 4.5

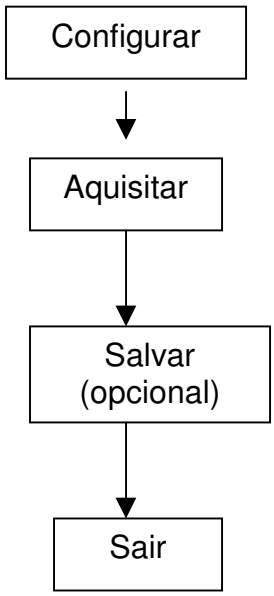


Figura 4.4 - Fluxograma dos processos do programa

4.3.1.2 Painel Frontal

No painel frontal há duas guias: uma para configuração e a outra para mostrar os resultados. Na guia de configuração se encontram os Gráficos de Tensão e corrente e os controles de ajuste (fatores de escala e etc.)

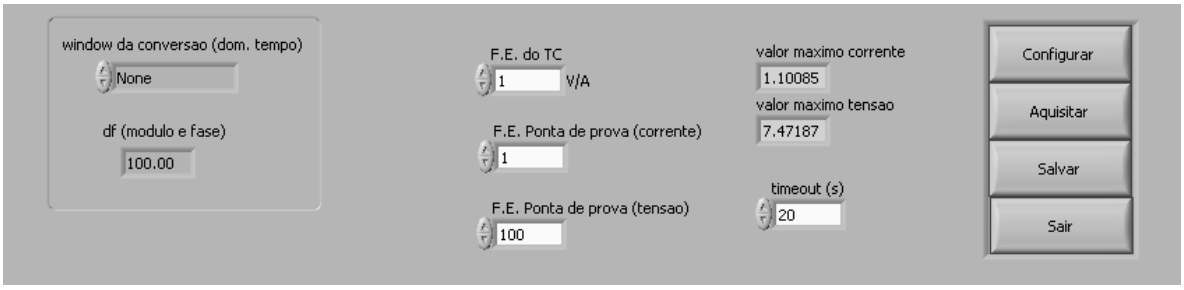


Figura 4.5 - Controles do painel frontal

Na segunda guia estão os gráficos dos resultados: módulo da impedância medida e ângulo de fase.

4.3.1.3 Diagrama de blocos

O diagrama de blocos do programa funciona da seguinte maneira: há um while loop que cobre toda a extensão do código e dentro dele há um Case structure. Esse tipo de configuração é chamado de “máquina de estados” e tem como finalidade facilitar a execução de muitas tarefas relacionadas ao clique de botões.

No painel frontal, há um cluster com os botões que se deseja colocar na máquina de estados.

No case de label “-1” (diagrama de blocos), tem-se uma função que procura sempre por um “verdadeiro” dentro do cluster. Quando este encontra, manda o índice encontrado (o do botão apertado) para o próximo loop, que irá verificar o case selector novo.

No label “0” tem-se o código para a ação de configurar

No label “1” tem-se o código para aquisitar e processar

No label “2” tem-se o código para salvar

No label “3” tem-se o código para finalizar o programa.

A figura a seguir mostra o diagrama de blocos. O case representado é o de label “-1”. Os próximos quadros do case são mostrados a seguir:

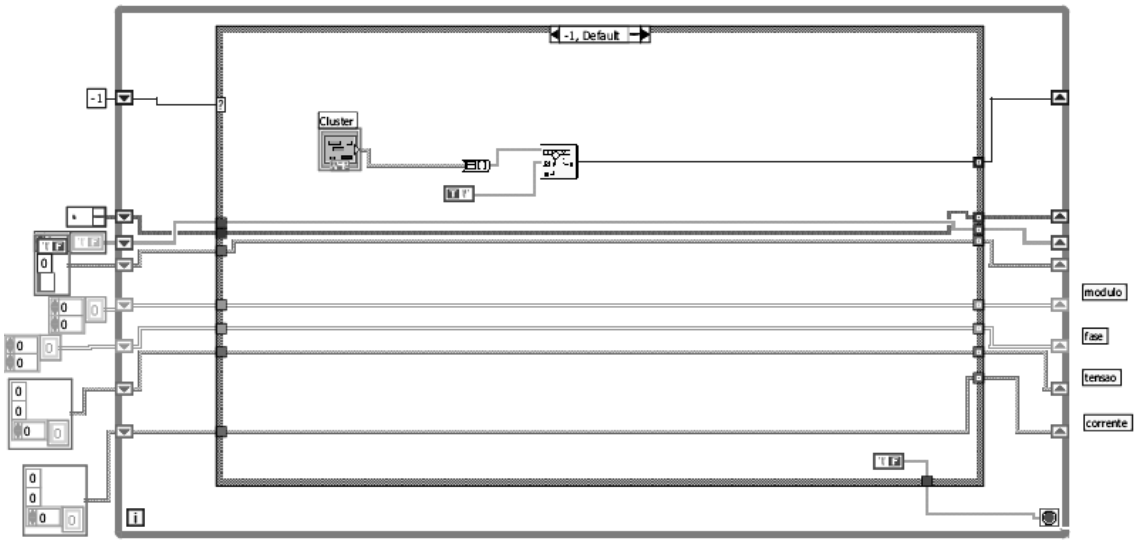


Figura 4.6 - Diagrama de blocos principal do programa

Case 0: Configurar:

A figura a seguir mostra o quadro do case 0 que está programado para executar a função de configurações. A sub vi mostrada abre uma janela onde o usuário entra com os parâmetros da aquisição e após configurado, retêm estas informações para a hora da aquisição.

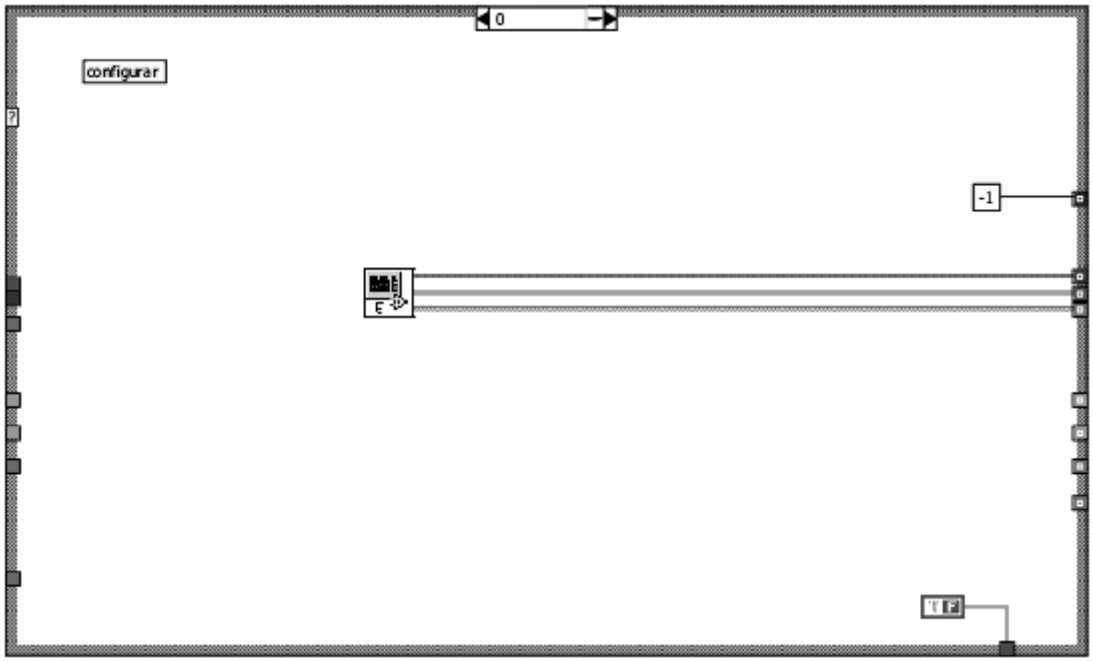


Figura 4.7 - Case 0 – configurar

Sub VI configura Z_F

A figura a seguir mostra o painel frontal da sub VI de configuração. Ele se abre por cima do painel frontal anterior.

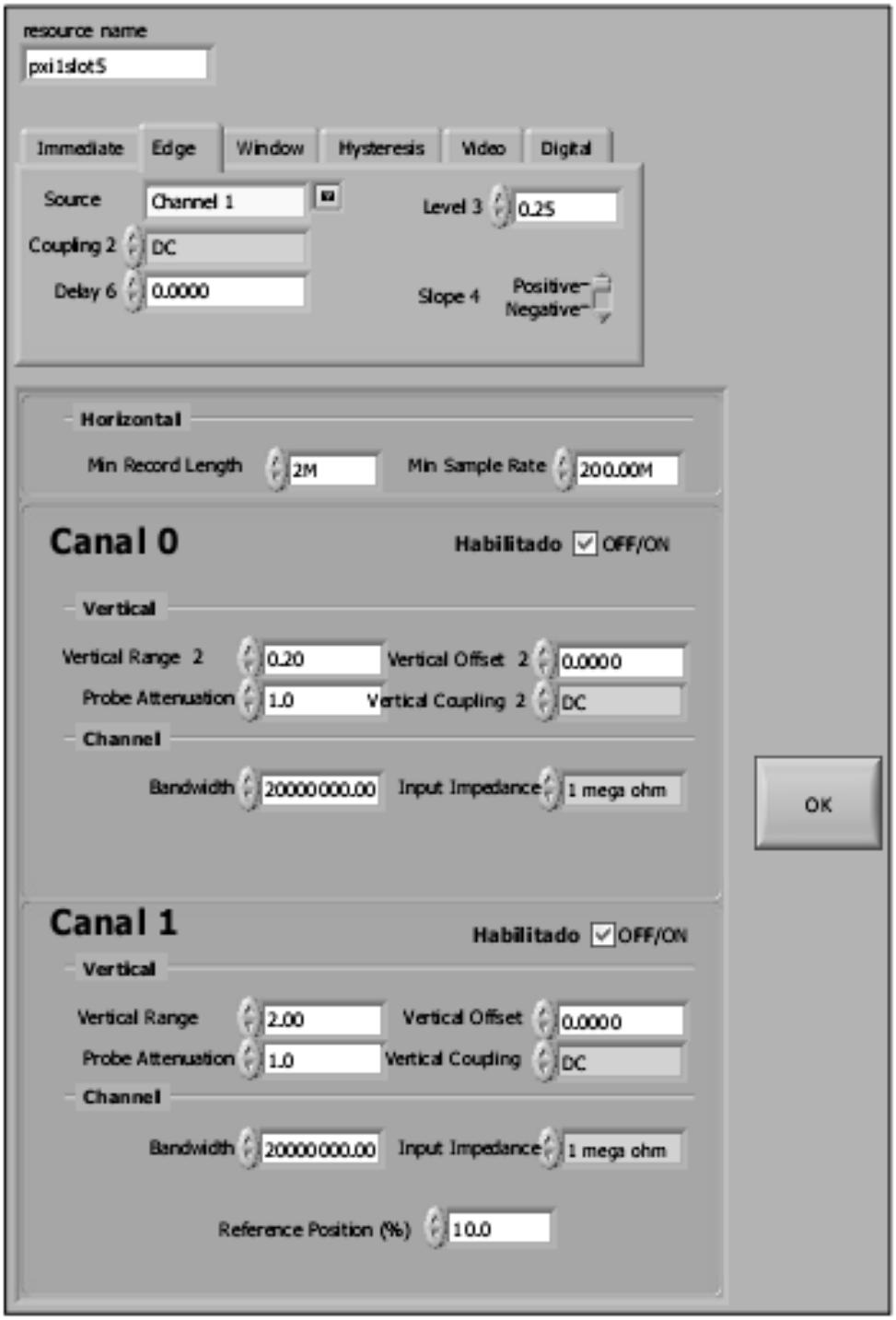


Figura 4.8 - Painel Frontal da Sub VI de configuração

É possível fazer os ajustes do vertical, horizontal, número de pontos, tipo de trigger, etc.

Case 1: Aquisitar e Processar

Após configurar, o programa volta a verificar se o usuário apertou algum botão. Se ele apertou "aquisitar", o programa entra no case representativo abaixo.

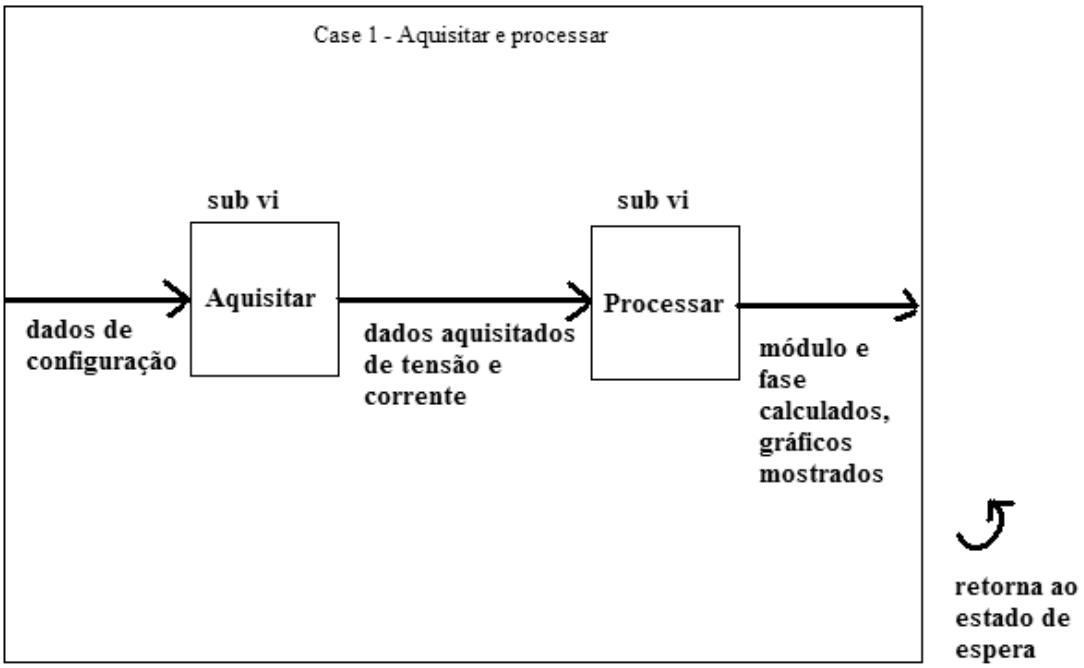


Figura 4.9 - Case 1 – Aquisitar e processar

De acordo com o diagrama, as informações de configuração entram na sub vi Aquisita_Z_F e espera pelo trigger. Com os dados obtidos, ela os manda para a sub vi de processamento (o próprio LabVIEW decompõe o sinal), processa Z_F, onde os fatores de escala são inseridos e os sinais são passados para o domínio da freqüência. Os resultados são então mandados para o painel frontal e também computados em forma de array para ser possível salvá-los. São mostrados também (calculado pela sub VI val_max_Z_F) os picos de tensão e de corrente.

Sub VI Aquisita

O diagrama de blocos desta sub VI está estruturado abaixo:

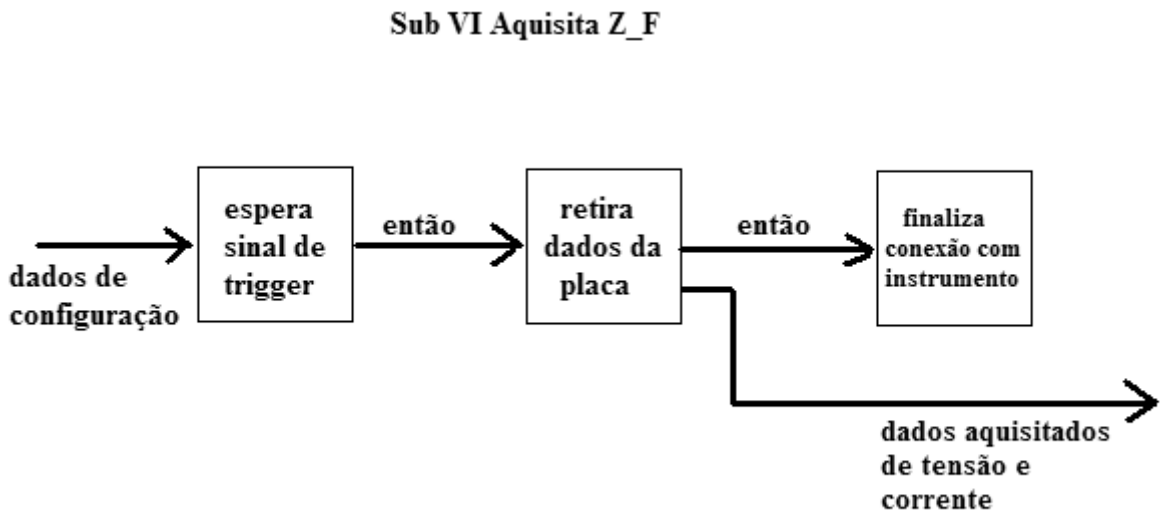


Figura 4.10- Diagrama de blocos da Sub VI Aquisita_Z_F

O programa espera pelo sinal de trigger e retira os dados da placa. Após a aquisição a conexão com a placa é desfeita e os dados são enviados para a VI superior.

Sub VI Processa Z_F

A figura abaixo mostra um trecho importante do diagrama de blocos desta Sub VI.

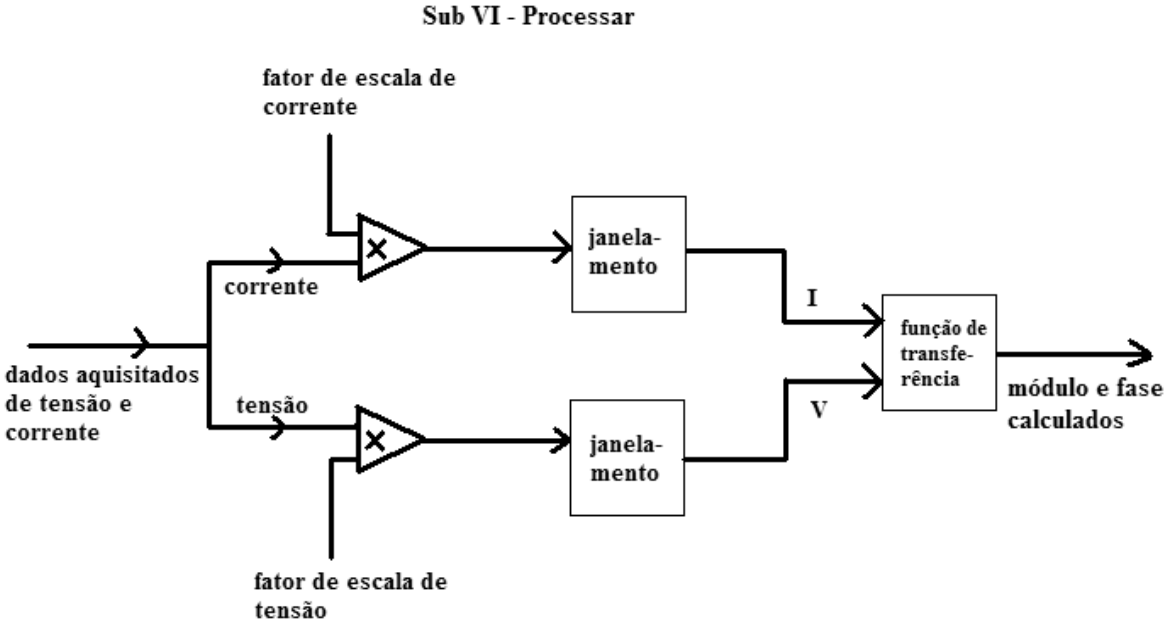


Figura 4.11: Diagrama de blocos da Sub VI Processa Z_F

Neste trecho do programa, os dados são ajustados de acordo com os fatores de escala e tanto o sinal de entrada quanto a resposta passam por um janelamento definido pelo usuário. É calculada então a função de transferência do sistema medido através dos dados obtidos da tensão e corrente. A função de transferência é calculada dividindo-se a FFT do sinal de saída pela FFT do sinal de entrada. O resultado é então formatado para ser mostrado num waveform graph.

Abaixo , uma figura de como se dá esse processo dentro da sub VI de função de transferência:

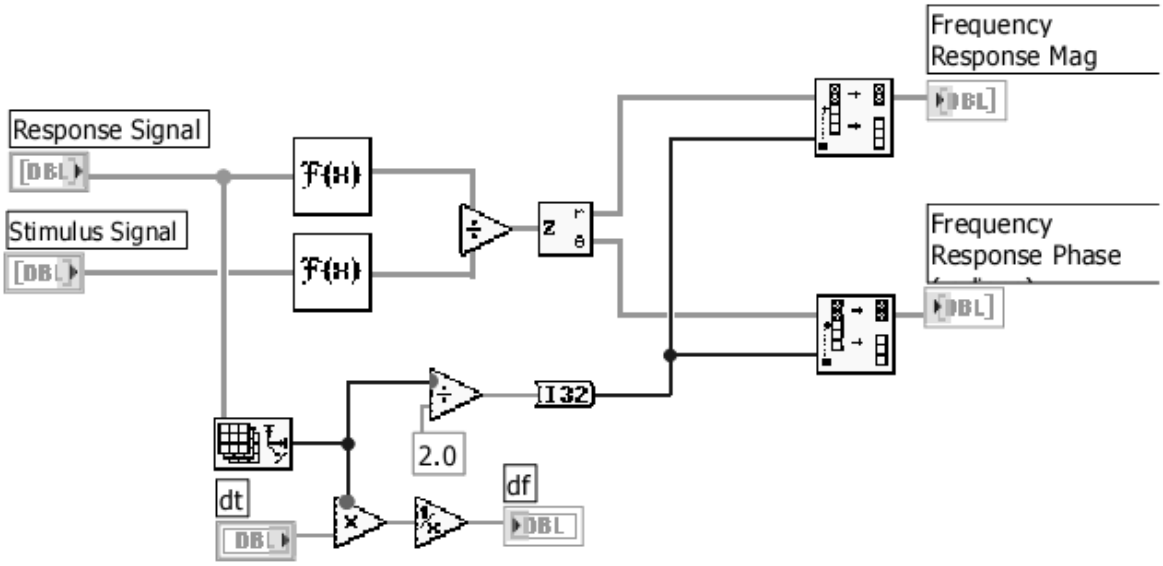


Figura 4.12 – Diagrama dos cálculos de Fourier no programa de medição por impulso

Case 2 – Salvar:

Neste Case temos a sub VI para salvar os arquivos.

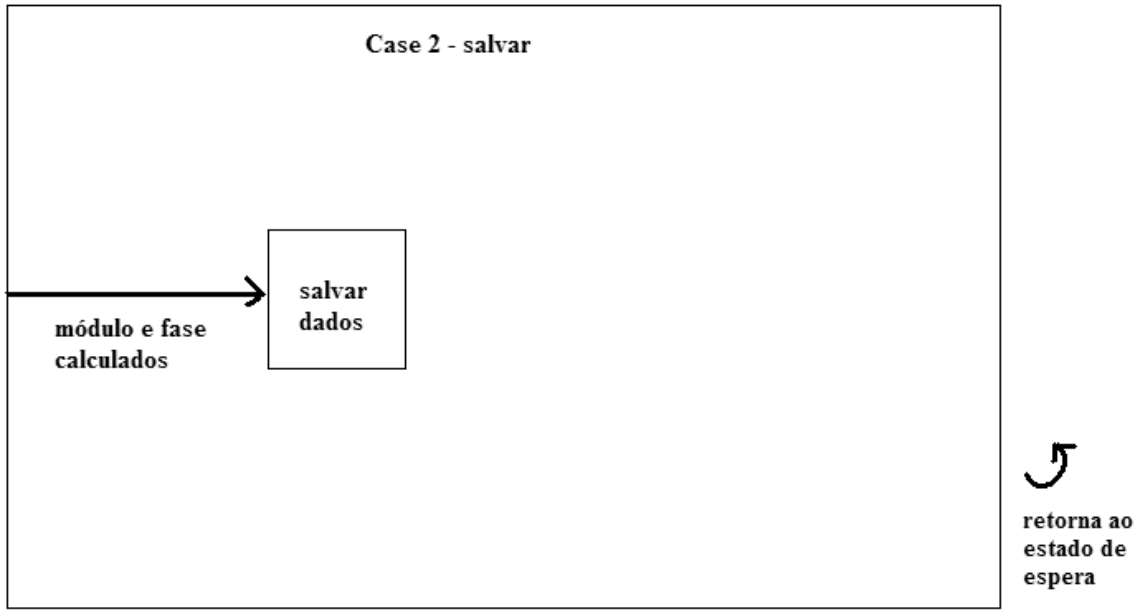


Figura 4.13 - Case 2 - salvar

A figura abaixo mostra o painel frontal do programa:

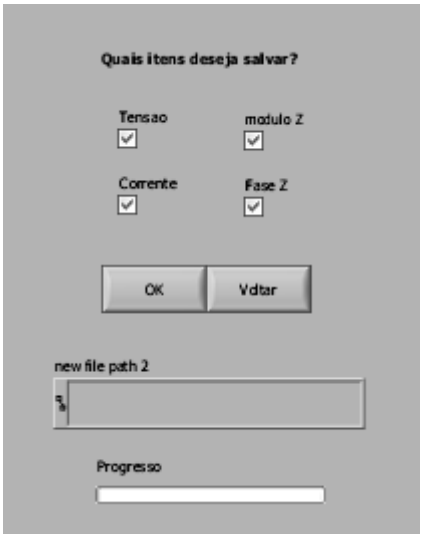


Figura 4.14 - Painel Frontal da sub VI salva Z_F

Nesta tela o usuário pode escolher quais formas de onda ele deseja salvar. Quando ele aperta OK o programa salva os arquivos marcados.

Case 3 – Sair

Na figura abaixo é mostrado o case Sair, que no caso limpa os waveform graphs e finaliza o while loop principal, terminando a execução do programa.

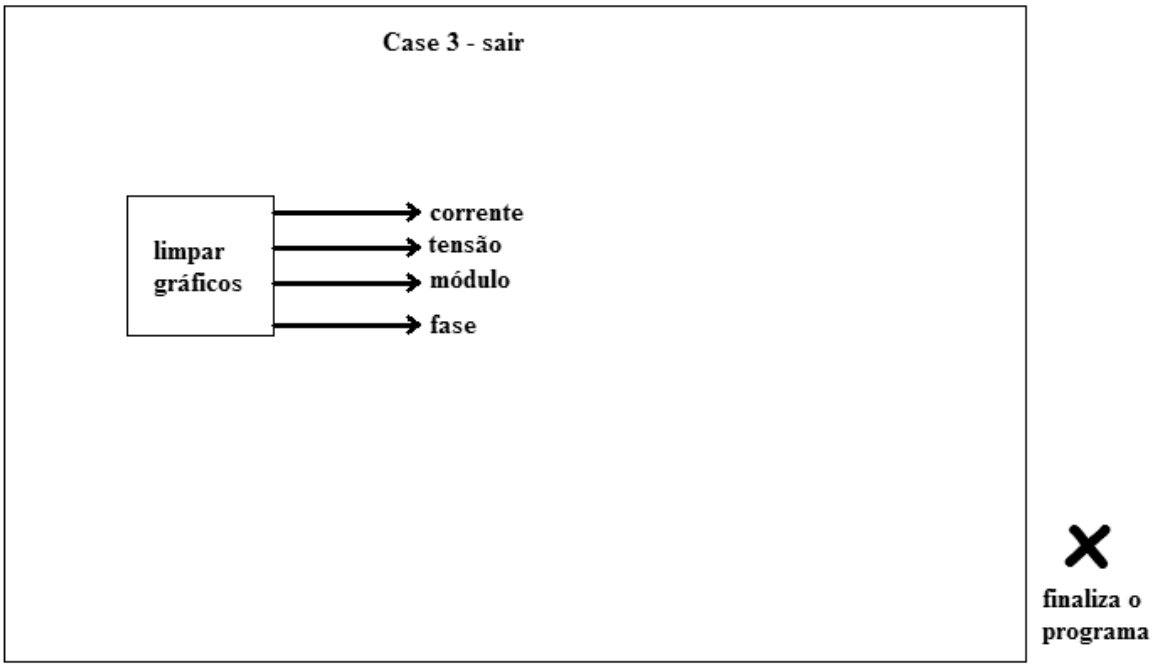


Figura 4.15 - Case 3 – sair

4.3.2 Hardware utilizado no método de Impulso

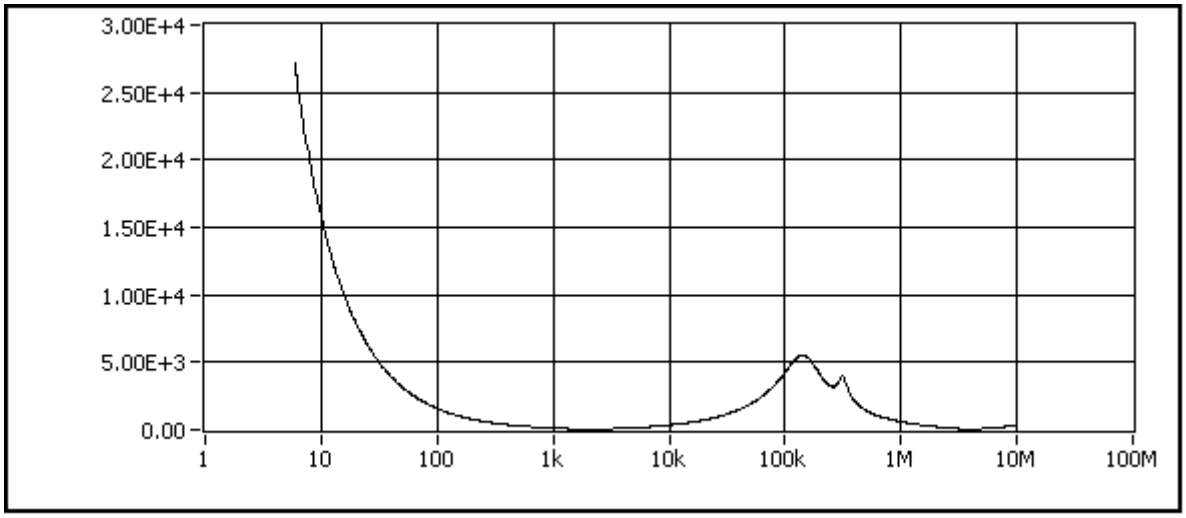
Neste ensaio foi utilizado um calibrador de impulso de tensão Dr. Strauss e o Sistema de Aquisição de dados da National Instruments, um PXI. Maiores informações, vide anexo 3.

Figura 4.16 – Sistema de Aquisição de Dados da National Instruments, um PXI

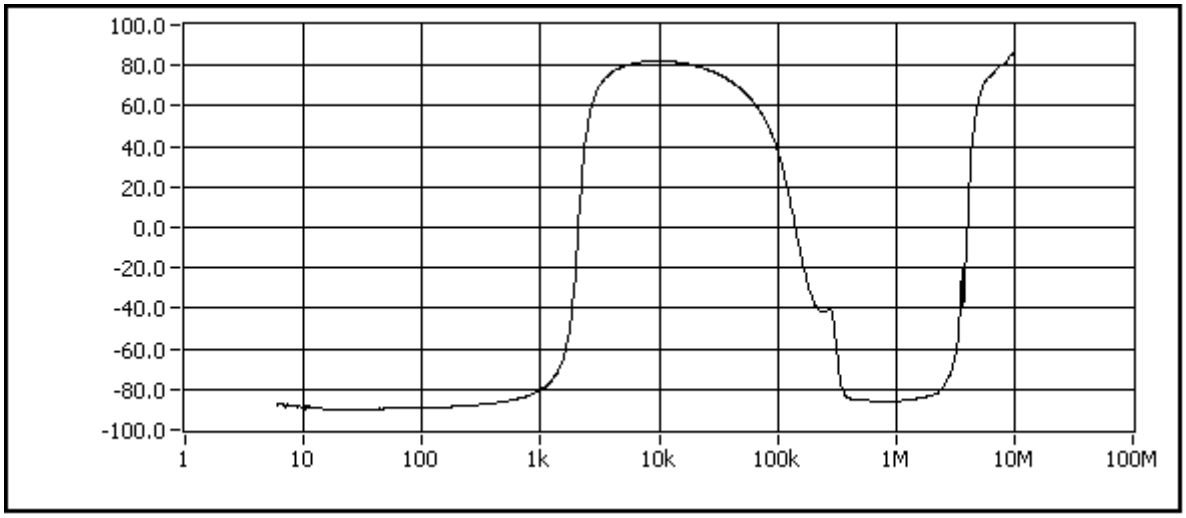
Ele possui slots com placas de aquisição, semelhantes à osciloscópios. Junto a ele está integrada uma unidade processadora com interface Windows, possibilitando a manipulação direta dos dados neste sistema.

5 RESULTADOS

Algumas medições foram realizadas com algumas configurações de RLC pelo método de varredura. A figura 5.1a e 5.1b mostra o módulo e fase de um circuito RLC série com os seguintes parâmetros: R=20ohms, C=1µF e L=6mH.



(a)



(b)

Figura 5.1 – Circuito RLC série aquisitado pelo método de Varredura de Freqüência: (a)módulo, (b) fase

O gráfico apresenta poucas distorções e a resolução é bem alta na faixa aquisitada.

Abaixo, algumas figuras comparativas de medições feitas em um transformador por outros pesquisadores (TENBOHLEN, S), através dos dois métodos. O transformador utilizado foi um de 30MVA 132/11.5KV

Na figura 5.2 tem-se a detecção de defeitos mecânicos simulados no transformador utilizando-se do método do impulso. O gráfico mostra as diferenças no gráfico da impedância de acordo com o tamanho do desvio no enrolamento.

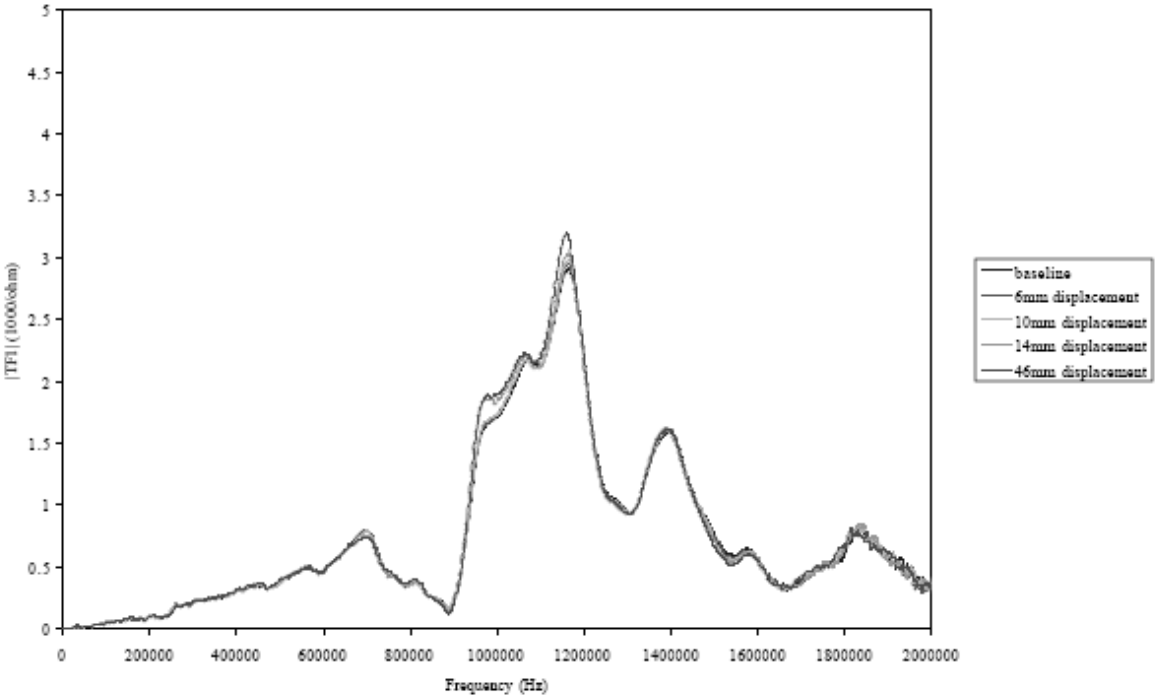


Figura 5.2 – Detecção de defeito pelo método do impulso

A figura 5.3 mostra a detecção feita pelo método de varredura.

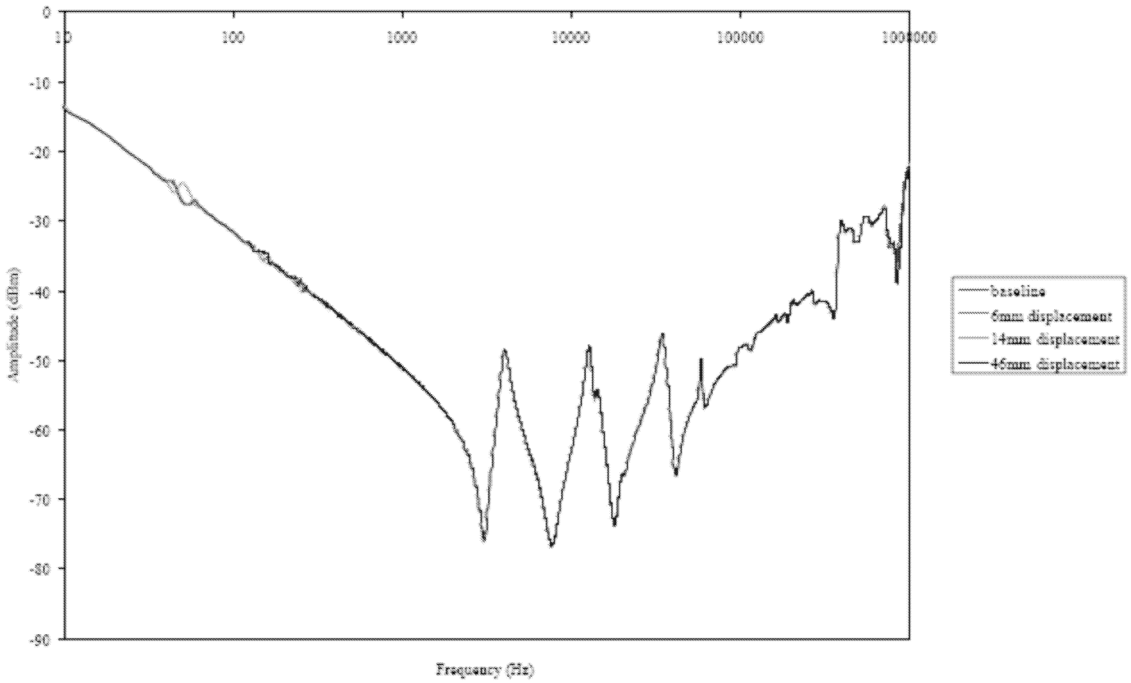


Figura 5.3 – Detecção de defeito utilizando o método de Varredura

Na figura 5.3 é imperceptível a diferença nos resultados, mostrando que o método de varredura não é sensível à pequenos defeitos mecânicos num transformador.

Os defeitos simulados consistiram em mover metade do tap do enrolamento por uma distância de no máximo 46mm. Isto é aproximadamente equivalente a mover 15% do enrolamento através de 3% da altura.

Os resultados de FRA do transformador sem defeito utilizando os dois métodos é mostrado nas figuras 5.4 e 5.5. Os resultados da figura 5.4 são apresentados utilizando escala linear para freqüência de 0Hz à 2MHz. Os resultados apresentados na figura 5.5 estão com a amplitude usando-se escala logarítmica de 10Hz à 1Mhz.

Há algumas diferenças nos resultados. Elas são causadas tanto por limitações dos métodos quanto pelos cálculos utilizados no processamento.

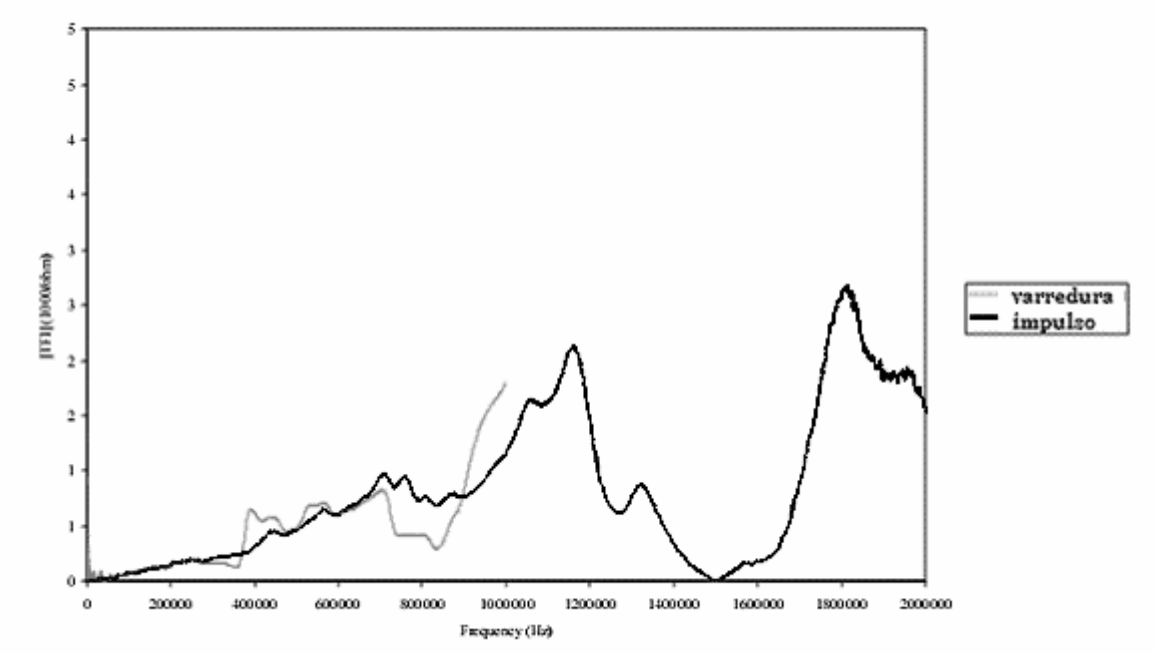


Figura 5.4 – Impedância de um transformador 30MVA utilizando os dois métodos

Nota-se que o método da resposta ao impulso possui uma maior faixa de freqüência coberta.

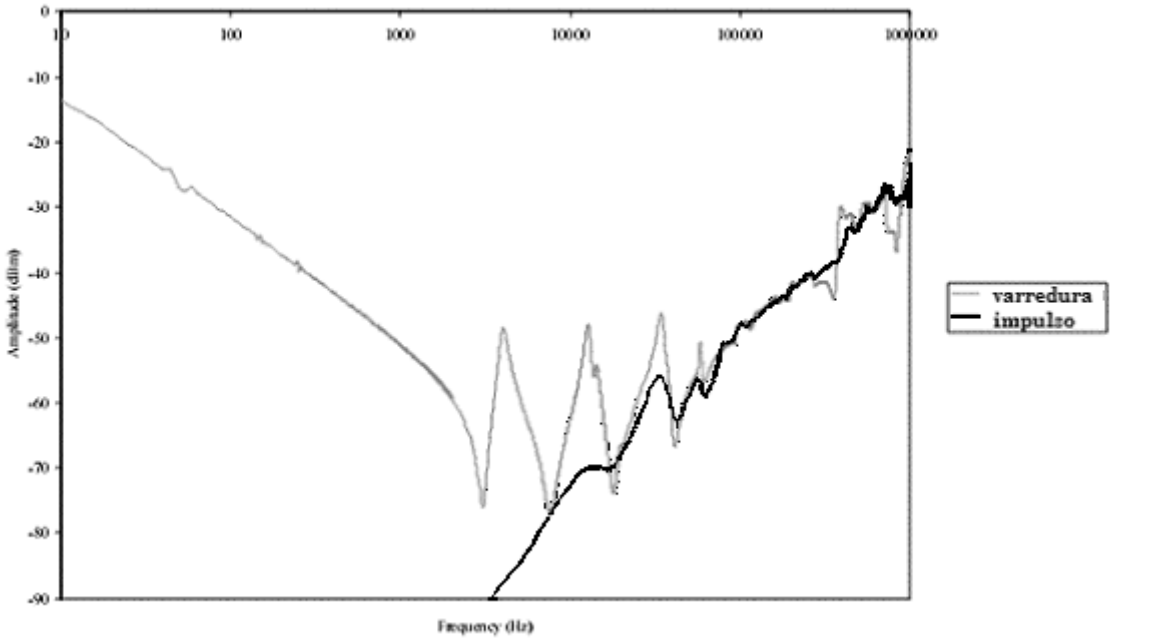


Figura 5.5 – Impedância de um transformador de 30MVA em baixas freqüências

Nota-se nesta figura que para baixas freqüências, a resolução fica melhor através do uso do método de variação de freqüência.(TENBOHLEN, S.)

6 CONCLUSÕES

Outras considerações são feitas abaixo:

O método de variação de freqüência possui as seguintes vantagens:

- Cobre uma grande faixa de freqüência
- É possível obter uma boa resolução em baixas freqüências, alternativamente, a resolução pode ser adaptada para a faixa de freqüência a ser medida.
- Poucos equipamentos utilizados para se efetuar a medida (somente a ponte de medição)

O método de variação de freqüência possui as seguintes desvantagens:

- Somente uma medida pode ser feita por vez. A determinação de mais de uma função de transferência não é possível
- tempo necessário para se completar cada medida é de cerca de alguns minutos.

O método da resposta ao impulso possui as seguintes vantagens:

- Várias funções de transferência podem ser medidas simultaneamente
- tempo necessário para se efetuar cada medida é de cerca de um minuto.
- O sinal de tensão aplicado é de maior amplidtude no domínio do tempo

O método da resposta ao impulso, baseado em FFT possui as seguintes desvantagens:

- A resolução de freqüência é fixa e em baixas freqüências é pobre.
- A quantidade de potência injetada no objeto sob ensaio é diferente a cada freqüência. Isto leva a diferenças na precisão em relação à faixa medida.
- Mais de um equipamento é necessário para efetuar as medidas (gerador de inpulsos, osciloscópio digital, conversor A/D)

Ambos os métodos são sensíveis às condições do ensaio, particularmente, à qualidade do aterramento e às interferências eletromagnéticas externas, apesar do método por impulso apresentar melhor desempenho na prática de medições de Z(f) em arranjos no campo.

BIBLIOGRAFIA

ANSWERS.COM, **Frequency domain**. Disponível em: <http://www.answers.com/topic/frequency-domain)>. Acesso em 05 nov. 2006.

CARREIRA, R.; FONSECA, P. Análise de circuitos eléctricos. **Sebenta Multimédia**. Desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico, 1996-1997. Apresenta um livro sobre eletricidade. Disponível em <http://www.ufrgs.br/eng04030/Aulas/teoria/capa.htm>. Acesso em 05 nov. 2006

KUMAR, N. P.; et al. "Identification of Winding Faults in Power Transformers by Low Voltage Impulse Test and Neutral Current Method using Wavelet Transform Approach". **IEEE**. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. P 140. 2005

TENBOHLEN, S.; RYDER, S. A. "Making Frequency Response Analysis Measurements: A Comparison of the Swept Frequency and Low Voltage Impulse Methods". **IEEE**. XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. Nova Zelândia. 2003.

ELY, P. C. JR. "Swept-Frequency Techniques". **Proceedings of the IEEE**. Vol 55, No. 6, p. 991-1002. Jun. 1967

NIRGUDE, P., M.; et al. "Frequency Response Analysis Approach For Condition Monitoring of Transformer". **IEEE**. Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. P186 – 189. 2004

COFFEEN, L.; BRITTON, J.; RICKMANN, J. "A New Technique to Detect .Winding Displacements in Power Transformers Using Frequency Response Analysis" **IEEE**. Bologna Power Tech Conference. Jun. 2003

WANG, M.; VANDERMAAR, A. J.; SRIVASTAVA, K. D. "Condition monitoring of transformers in service by the Low Voltage Impulse Test Method". **IEEE**. High Voltage Engineering Symposium. Ago 1999

MENEZES, B., R. ; **Análise de sistemas lineares**, UFMG 2005

WIKIPÉDIA, **LabVIEW**. Disponível em : <http://pt.wikipedia.org/wiki/LabVIEW>. Acesso em 05 nov. 2006