Universidade Federal do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Departamento de Eletrônica e de Computação

Analisador de Amplitude e Fase

Autor: _____
Bruno Portella Tassara

Orientador: _____
Geraldo Antônio Guerrera Cidade, D. Sc.

Coorientador: _____
Heraldo Luis Silveira de Almeida, D.Sc.

Avaliador: _____
Joarez Bastos Monteiro, D.Sc.

Avaliador: _____
Leandro Schaeffer Marturelli, D. Sc.

DEL

Março de 2009

Agradecimentos

Agradeço a Deus. Agradeço a minha mãe, meu pai e minha esposa, pela paciência ao longo dos anos. Ao meu orientador, professor Geraldo Cidade, grande amigo e mentor. Ao professor Leandro Marturelli, pelo apoio em momentos críticos. Aos docentes do DEL, em especial aos professores Heraldo Almeida e Joarez Monteiro, pelos quais tenho grande admiração.

Resumo

A motivação deste trabalho veio da necessidade de avaliar o desempenho global (eletrônico e mecânico) de um Microscópio de Força Atômica (AFM) de alta velocidade de varredura, que vem sendo desenvolvido em uma parceria entre a UFRJ e o Inmetro. Este projeto tem como proposta o desenvolvimento e a montagem de um equipamento capaz de realizar medidas da resposta em frequência de um circuito eletrônico qualquer, apresentando os resultados na forma de Diagramas de Bode de amplitude e fase. Este tipo de avaliação permite a identificação dos modos de ressonância bem como uma caracterização do circuito quanto à estabilidade. O protótipo, ora designado Analisador de Amplitude e Fase (AAF), conta com o auxílio de um circuito eletrônico para a medição de fase e por um multímetro digital de precisão para a obtenção da curva de amplitude e utiliza um aplicativo desenvolvido em LabVIEW (National Instruments Inc. [a]) para controle e exibição dos diagramas. Desta forma o protótipo desenvolvido neste projeto é capaz de oferecer uma metodologia de baixo custo abrangendo uma faixa de 20Hz até 100KHz.

Abstract

This work's motivation has come from the need of evaluating the global performance, both mechanical and electronic of high speed Atomic Force Microscope (AFM) that has been being developed in a partnership between Inmetro and UFRJ.

The project's goal is the development and assembling of an equipment capable of acquiring the frequency response of any given electronic circuit. The results are shown in the form of Bode Plots (Magnitude and Phase). This kind of evaluation allows the identification of resonant modes as well as a measure of the stability of the circuit. The prototype acknowledged as Analisador de Amplitude e Fase (AAF) counts with the help of an electronic circuit to measure the phase and with a precision digital multimeter for the magnitude measurements. An application developed with the LabVIEW software is responsible for controlling the process as well as exhibiting the results. This way, the project offers a low cost methodology covering the 20 Hz – 100 KHz range.

Palavras Chave

- Resposta em frequência
- Circuito de medição de fase
- LabVIEW
- *Network Analyzer*

Índice

Resumo....3
Abstract....4
1 Introdução....11
2 Diagramas de Bode....13
2.1 Frequência de corte de um circuito....13
2.2 Formas de obtenção dos Diagramas de Bode....14
2.3 Valor RMS de um sinal....14
3 Materiais e Métodos....16
3.1 Esquema de funcionamento do AAF....16
3.2 Placa de Aquisição de Dados da National Instruments: PCI6036E....18
3.3 Gerador de Funções....20
3.4 Multímetro Digital....20
3.5 Metodologia de medição de fase....26
3.6 Tratamento dos Sinais Utilizados na Detecção da Fase....28
3.7 Circuito de Medição de Fase....30
3.8 Softwares....38
3.9 Conceitos e Principais Características do LabVIEW....38
3.10 Aplicativo de Controle e Exibição de Dados....39
3.11 Equipamentos e Dispositivos Utilizados....44
4 Roteiro de Utilização....45
5 Resultados e Discussão....51
5.1 Circuito RC com frequência de corte na faixa de 100 Hz....51
5.2 Circuito RC com frequência de corte na faixa de 10KHz....57
5.3 Resultados para o circuito RLC sintonizado em 7,1 KHz....63
5.4 Resultados das medições no microscópio de força atômica....65
5.5 Comentários sobre os circuitos de teste....66
6 Conclusão....68
Apêndice A....69
Microscopia de Força Atômica....70
A.1 Técnicas de Microscopia....70
A.2 A Técnica de Microscopia de Força Atômica (AFM)....71
A.3 Funcionamento de um AFM....72
A.4 Principais modos de operação de um AFM....74
A.4.1 Modo Contato....75
A.4.2 Modo Contato com Força Constante....75
A.4.3 Modo Tapping....75
A.5 Aplicações da Técnica AFM....76
A.6 Microscópios da nova geração....76
A.7 Microscopia de força atômica de alto desempenho (FAST-AFM)....77
Apêndice B....79
Tabelas Adicionais....79
Apêndice C....81
Application Notes....81
Apêndice D....82
Datasheets....82
D.1 Principais características elétricas do LM360....82
Apêndice E....84
Aplicativo de Controle e Aquisição de Dados....84

E.1 Análise da lógica de controle a partir do diagrama de blocos.....85
Referências Bibliográficas.....112
Referências Adicionais.....113

Índice de Figuras

Fig. 2.1: Resposta em frequência, amplitude e fase, de um circuito passa-baixa.....13
3.2. Esquema básico de funcionamento do AAF.....16
Fig. 3.3. Diagrama em blocos do AAF.....17
3.4. Placa de aquisição de dados da National Instruments.....18
3.5. Módulo de conectores para utilização com a placa da National Instruments.....18
Fig. 3.6. Descontinuidade nas medidas do multímetro para um sinal senoidal de frequência variante, de 1 KHz a 1 MHz, e amplitude de 3,5 Vpp.....21

Fig. 3.7. Valor RMS de um sinal senoidal de 2vpp medido pelo multímetro Fluke 8845A....22
Fig. 3.8. Parte da tabela usada no Origin para gerar as curvas de calibração do multímetro Fluke 8845A....24
Fig. 3.9. Conjunto de curvas de calibração do multímetro para sinais senoidais de amplitudes de 100 mVpp até 900 mVpp....24
Fig. 3.10. Conjunto de curvas de calibração para sinais senoidais de amplitudes de 1 Vpp até 10 Vpp....24
Fig. 3.11. Parte da tabela usada no Origin e contendo os dados normalizados pelos valores RMS dos sinais senoidais....25
Fig. 3.12. Curva de calibração do multímetro para um sinal senoidal de 100 mVpp....25
Fig. 3.13. Curva de calibração do multímetro para um sinal senoidal de 10 Vpp....25
3.14. Detecção de cruzamento por zero de um sinal senoidal....26
Fig. 3.15. Ondas defasadas (a e b) gerando pulsos na saída a partir de uma porta lógica do tipo XOR....27
3.16. Diagrama em blocos do funcionamento da medição da diferença de fase....28
Fig. 3.17. Em verde, sinal originário da referencia, em amarelo, o da resposta, e em azul, o sinal na saída do XOR....29
Fig. 3.18. Onda quadrada na saída do buffer TTL, com nível alto em 4,5 V (sinal representado em amarelo)....29
Fig. 3.19. Sinal de saída dos comparadores com nível alto em aproximadamente 3 V.. 29
Fig. 3.20. Onda quadrada na saída do buffer TTL, em amarelo, e em azul a onda após ter sua frequência dividida por dois....29
Fig. 3.21. Entradas do XOR, em verde e amarelo, e saída, em azul....29
3.22: Circuito de medição de fase. Referência: sinal vindo do gerador de funções. Resposta: Resposta do circuito a ser analisado. LabVIEW 1: Sinal de controle da modulação do gerador de funções antes de ser dividido por dez. LabVIEW 2: Sinal de controle vindo do LabVIEW para reinicializar os flip-flops. LabVIEW 3: sinal enviado ao LabVIEW para informar o sinal da fase. LabVIEW 4: Sinal que indica a diferença de fase através da largura de pulso....31
Fig. 3.23. Circuito de apoio com os comparadores em destaque....32
Fig. 3.24: Circuito de apoio com os divisores de frequência em destaque....33
Fig. 3.25. Circuito detecção de fase com o detector de sinal de fase em destaque....34
Fig. 3.26. Circuito com a porta lógica XOR em destaque....35
Fig. 3.27. Circuito de detecção de fase com os reguladores de tensão em destaque....36
Fig. 3.28. Circuito de apoio com os buffers analógicos em destaque....37
Fig. 3.29. Circuito com os buffers digitais em destaque....38
Fig. 3.30. Vista do painel frontal do aplicativo principal....40
3.31. Esquema de execução do aplicativo em LabVIEW....42
Fig. 4.32. Sweep Control....47
Fig. 4.33. Sinal da Fase....47
Fig. 4.34. Largura de Pulso....47
Fig. 4.35. Reset do Flip Flop....47
Fig. 4.36. Visa Configuration....48
Fig. 4.37. Sweep Parameters....49
Fig. 4.38. Botão em forma de seta que serve para iniciar o aplicativo....50
Fig. 4.39. Botão Start, que inicia a varredura....50
Fig. 5.40: Modelo do circuito passa-baixa usado para os testes....52
Fig. 5.41: Modelo do circuito passa-alta usado para os testes....52

Fig. 5.42: Resposta em frequência do circuito passa-alta com frequência de corte em 100 Hz.....53
Fig. 5.43. Resultados em detalhes com a frequência de corte do circuito em destaque.. 54
Fig. 5.44: Resposta do circuito passa-alta com frequência de corte em 100 Hz.....55
Fig. 5.45. Resultado com a frequência de corte em destaque.....56
Fig. 5.46. Resultados para um circuito passa-baixa com frequência de corte em 10 KHz 59
Fig. 5.47. Resultados com a frequência de corte realçada para o circuito do tipo passa-alta.....60
Fig. 5.48. Resposta de um circuito passa-alta com frequência de corte em 10 KHz.....61
Fig. 5.49. Frequência de corte do circuito na configuração passa-alta.....62
Fig. 5.50. Resultados para o circuito RLC sintonizado.....64
Fig. 5.51. Resultado do teste no microscópio de força atômica.....66

Índice de Tabelas

Tabela 3.1. Valores RMS medidos no multímetro para um sinal senoidal de 200 mVpp. 23
Tabela 3.2. Valores RMS medidos no multímetro para um sinal senoidal de 2vpp.....23
Tabela 5.3: Valores teóricos e reais dos componentes usados no circuito de teste de frequência de teste 100 Hz.....52
Tabela 5.4. Erro porcentual entre o valor real e o valor medido para a frequência de corte no circuito do tipo passa-baixa.....57

Tabela 5.5: Erro porcentual medido a partir dos valores reais e medidos para a frequência de corte no circuito passa-alta.....57
Tabela 5.6: Valores teóricos e valor real dos componentes e da frequência de corte para o circuito.....57
Tabela 5.7. Erro porcentual entre o valor real e o valor medido para a frequência de corte para o circuito na configuração passa-baixa.....63
Tabela 5.8. Erro porcentual de acordo com a frequência de corte real e medida para o circuito na configuração do tipo passa-alta.....63

Capítulo 1

1 Introdução

O desenvolvimento de um circuito eletrônico requer que tanto o seu comportamento dinâmico como o dos dispositivos que o compõem sejam conhecidos.

Embora o comportamento de um circuito em uma única frequência possa ser facilmente obtido através de um osciloscópio, sua resposta em frequência pode ser entendida como uma avaliação do seu comportamento quando operando em diferentes frequências. Os resultados desta abordagem são usualmente apresentados na forma de Diagramas de Bode de amplitude e fase e são de grande importância para se determinar a estabilidade e os modos de ressonância. Um equipamento conhecido por *Network Analyzer* é o indicado para realizar este tipo de medida, no entanto apresenta um custo elevado.

O objetivo deste trabalho é oferecer uma metodologia de custo mais baixo capaz de obter a resposta em frequência de um circuito eletrônico qualquer, especialmente para a utilização no desenvolvimento de um Microscópio de Força Atômica (AFM) de alto desempenho. A solução proposta pode ser utilizada para determinar modos de ressonância e parâmetros de estabilidade de alguns dispositivos que compõem o microscópio (piezoelétricos e amplificadores de alta voltagem).

A metodologia se resume na geração de um sinal senoidal de frequência variável e a aquisição da resposta do circuito em teste. Um aplicativo desenvolvido em LabVIEW é responsável por estas etapas, controlando um gerador de funções no modo de modulação FM, e coletando a resposta a partir de um multímetro digital, e de um circuito de medição de fase desenvolvido especialmente para esta aplicação.

Como interface de comunicação entre os dispositivos e o aplicativo em LabVIEW utilizou-se uma placa de aquisição de dados, PCI 6036E (National Instruments Inc.) [a].

O capítulo 2 discute os diagramas de Bode e comenta sucintamente alguns fundamentos teóricos pertinentes, tais como resposta em frequência e valor eficaz de sinais que variam no tempo. O capítulo 3 apresenta a metodologia proposta e detalha o *hardware* e o *software* utilizado para o projeto. No capítulo 4 encontra-se um roteiro para utilização do equipamento. Os resultados obtidos realizando-se medições em alguns circuitos de teste com resposta bem conhecida são apresentados no capítulo 5, que também traz uma avaliação dos dispositivos empregados em um microscópio de força atômica. O capítulo 6 conclui o trabalho, avaliando as dificuldades encontradas para o desenvolvimento do projeto e as limitações do equipamento. Um detalhamento sobre a técnica de Microscopia de Força Atômica (AFM) encontra-se no apêndice A.

Capítulo 2

2 Diagramas de Bode

Entende-se por resposta em frequência de um sistema o módulo do ganho e a fase de sua função de transferência em relação a uma faixa de frequências. As curvas ou diagramas de Bode ilustram este comportamento em um gráfico onde o eixo das ordenadas representa o valor do ganho em decibéis (dB) (fig. 2.2a) ou a fase em graus (fig. 2.2b) entre os sinais de entrada e o de resposta, e o eixo das abscissas representa o intervalo de freqüências, normalmente em escala logarítmica. [1]

A figura 2.1 ilustra o exemplo clássico de um circuito RC, de onde as curvas da figura 2.2 foram obtidas.

0

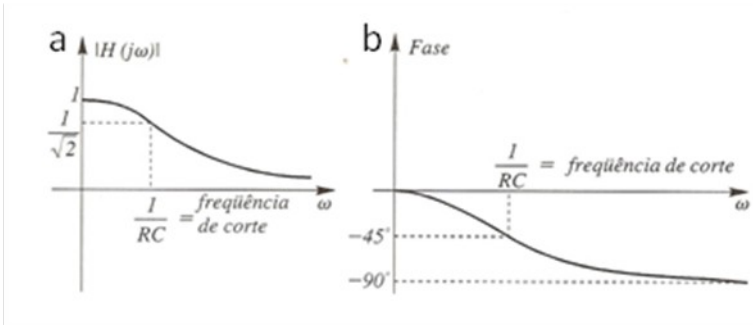


Fig. 2.1: Resposta em frequência, amplitude e fase, de um circuito passa-baixa.

2.1 Frequência de corte de um circuito

A Frequência de corte (ou de meia potência) é aquela em que a potência na saída é reduzida à metade daquela fornecida pelo gerador ao longo de sua banda passante. Ao referir-se ao ganho, esta redução corresponde a uma atenuação do sinal de saída para aproximadamente setenta por cento do valor máximo, observado no gerador.

A frequência de corte de um circuito RC pode ser calculada a partir da equação 2.1. [2]

$$F = \frac{1}{2\pi RC} \qquad \text{Eq. 2.1}$$

Onde F é o valor em Hz, R em Ohms e C em Farads.

2.2 Formas de obtenção dos Diagramas de Bode

A obtenção dos diagramas de Bode pode dar-se a partir do método teórico, a partir de uma função de transferência.

Os gráficos de Bode também podem ser obtidos a partir do método experimental, no qual se mede ponto a ponto a resposta do circuito para diferentes frequências do sinal de entrada, sendo que o *Network Analyzer* é o equipamento indicado para este tipo de medição.

2.3 Valor RMS de um sinal

O valor RMS (*Root Mean Square*), ou valor médio quadrático de um sinal, também é conhecido como valor eficaz. Este valor é de especial interesse na medida da energia contida em um sinal variável no tempo. Quando se faz uma medida AC de um ponto qualquer de um circuito através de um multímetro, o valor normalmente indicado é o equivalente RMS.

Para qualquer sinal periódico, o valor RMS pode ser obtido a partir da equação 2.3. [2]

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} \left(f(x)\right)^2 dx} \qquad \text{Eq. 2.3}$$

Para um sinal senoidal de amplitude V_p o valor RMS corresponde a

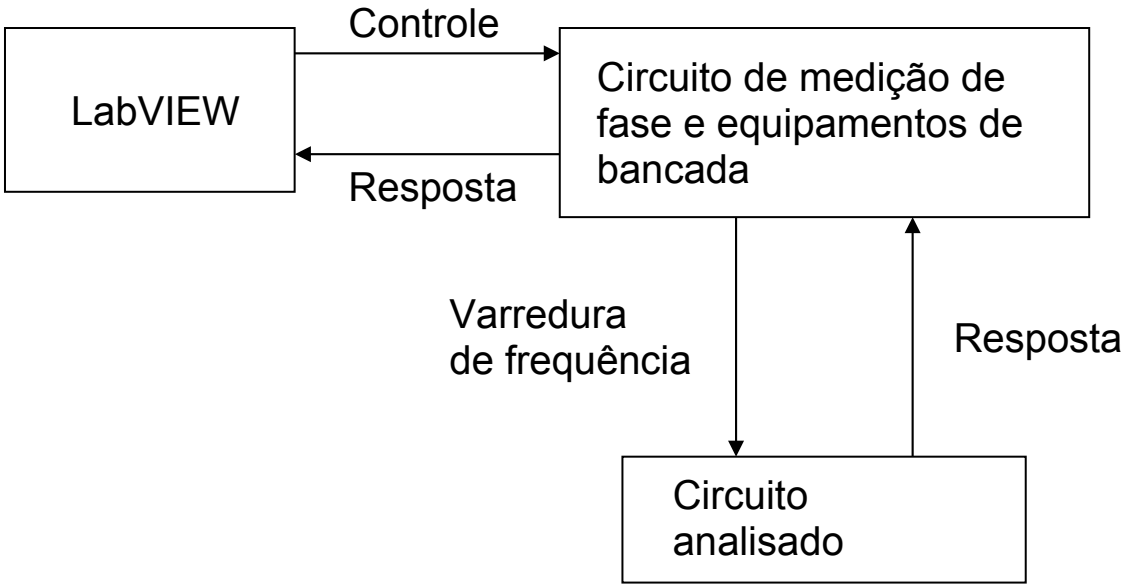
$$V_{RMS} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \qquad \text{Eq. 2.4}$$

Este valor será de especial interesse para a geração dos gráficos de Bode de amplitude.

Capítulo 3

3 Materiais e Métodos

O Analisador de Amplitude e Fase (AAF) desenvolvido neste trabalho é composto por um circuito de medição de fase e equipamentos auxiliares (multímetro digital e gerador de funções) controlados por um aplicativo desenvolvido em LabVIEW (fig. 3.1)



3.2. Esquema básico de funcionamento do AAF.

3.1 Esquema de funcionamento do AAF

O LabVIEW envia uma rampa de voltagem ao gerador de funções (AFG 3022, Tektronix Inc. [b]) configurado no modo de modulação FM para variar a frequência de saída de uma onda senoidal de amplitude constante que é utilizada como sinal de entrada para o circuito de teste. Tanto a saída do

gerador como a do circuito de teste passam separadamente por circuitos comparadores que fazem uma detecção de cruzamento por zero para a partir destes sinais senoidais gerar ondas quadradas. Cada uma destas ondas quadradas passa por um divisor de frequência de fator 2 antes de serem enviadas a uma porta lógica do tipo XOR, que detecta o módulo da fase, e a um *flip-flop*, que detecta se a fase é positiva ou negativa. A saída destes dois componentes é enviada ao LabVIEW para que seja computada a diferença de fase entre os dois sinais e seja gerado o diagrama de Bode de fase. O diagrama de amplitude é gerado com um sinal vindo de um multímetro digital que mede o valor RMS da senóide de saída do circuito de teste.

A figura 3.3 ilustra este funcionamento por meio de um diagrama de blocos.

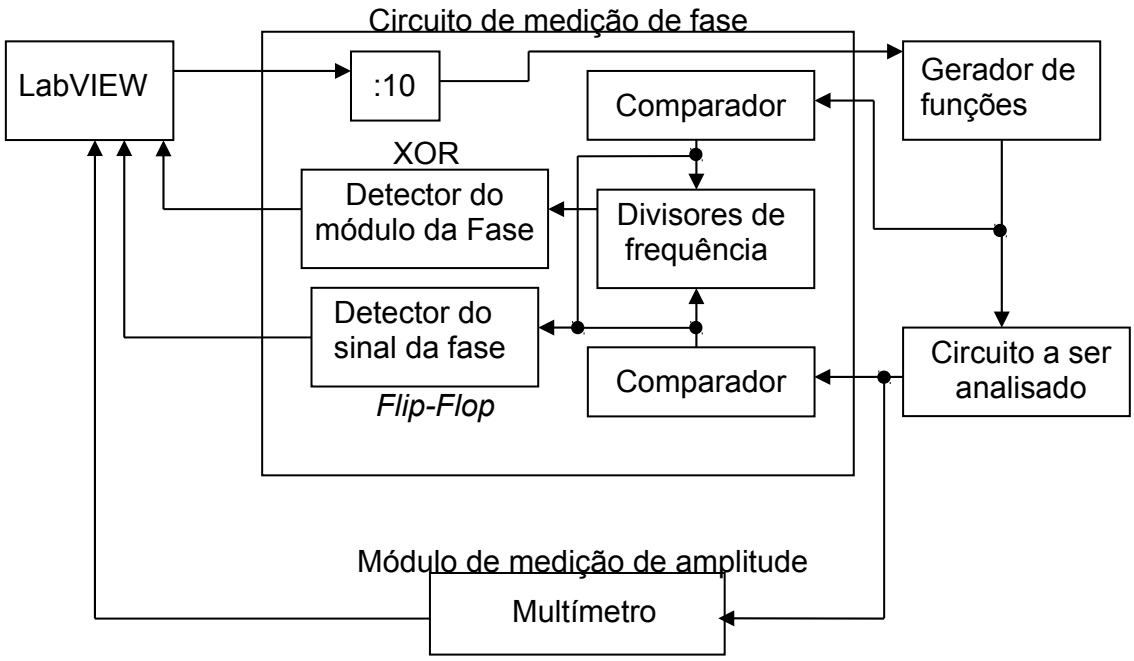


Fig. 3.3. Diagrama em blocos do AAF.

3.2 Placa de Aquisição de Dados da National Instruments: PCI6036E

A placa PCI6036E da National Instruments Inc. (fig. 3.3) é conectada a um módulo onde se encontram vários conectores BNC (fig. 3.4) para que se possa ter acesso às suas funções.

3.4. Placa de aquisição de dados da National Instruments.

3.5. Módulo de conectores para utilização com a placa da National Instruments.

Esta placa faz geração e aquisição de sinais analógicos e digitais. As suas especificações mais importantes podem ser vistas na tabela B2 no apêndice B.

Dentre as características mais relevantes da placa para a aplicação neste projeto, está a resolução dos canais de entrada e saída.

Os canais analógicos de entrada apresentam uma resolução de 16 bits e podem ser configurados para faixas desde +/-50,00 mV a +/-10,00 V, o que possibilita uma precisão muito grande nas medidas.

A faixa dos canais de saída é fixa, com valores que vão de -10,00 V até 10,00 V. Mesmo que sejam definidos outros limites, a resolução é a mesma, com passo mínimo de aproximadamente 2,47 mV. Esta limitação afetaria diretamente a faixa da varredura em frequência do sinal senoidal, pois este controle deve situar-se entre -0,955 V e 1,00 V. Para contornar esta limitação, o sinal enviado da placa é 10x maior, ou seja, varia entre -9,55 V e 10,00 V, e passa por um divisor de tensão antes de exercer o controle da varredura. Com um valor mínimo fixado em 2,5mv para cada incremento de voltagem, a faixa de -0,955 V e 1 V poderia ser dividida em praticamente 784 pontos. Com esta

estratégia, o numero de pontos disponíveis para controle da varredura senoidal passa para 7840, que corresponde a um passo de 12,752 Hz na faixa mais extensa de varredura.

3.3 Gerador de Funções

O gerador de funções AFG3022 possibilita a modulação FM de um sinal. Esta modulação pode ser controlada interna ou externamente, sendo que o modo externo foi utilizado. Nele, seleciona-se uma frequência central (Fc) e um desvio (D), que deve ser menor do que a frequência central. Segundo o manual do fabricante, o sinal de controle desta modulação deve variar entre -1,0 V e + 1,0 V. Com o valor 0 V correspondendo à frequência central e os valores extremos a Fc-D e Fc+D, respectivamente. Um estudo mais detalhado do funcionamento do equipamento indicou que na verdade o limite inferior para este tipo de modulação está limitado a -0,955 V e tem como ponto central aproximadamente 0,02 V.

3.4 Multímetro Digital

O multímetro utilizado foi o modelo 8845A da Fluke [c], responsável pelas medidas obtidas para a elaboração do diagrama de Bode de amplitude, que representa o valor eficaz (RMS) do circuito em teste.

O instrumento dispõe de uma saída serial do tipo RS232, que permite ao *software* de controle obter os valores lidos além de programar seus parâmetros de configuração. A comunicação bidirecional com o software é feita através da porta serial do computador. De fato, quase todas as opções acessíveis pelo painel do equipamento podem ser controladas por *software*.

Os comandos do equipamento são *strings* curtas que podem ser seguidas de valores de configuração, conforme ilustrado na tabela B3 do apêndice B.

3.4.1 Limitações na quantidade de medidas

Uma das limitações do equipamento é a quantidade de medidas por segundo que ele é capaz de adquirir, estando limitada a 20, ou seja, 1 a cada 50 ms. No entanto, para colocar uma medição em forma de *string*, com notação científica, no *buffer* de leitura para que o *software* possa acessá-la, o multímetro leva mais tempo do que 50 ms. Testes foram realizados chegando-se a um limite de 75 milissegundos, abaixo do qual *strings* incompletas podem ocorrer.

3.4.2 Descontinuidades na leitura

Ainda restando alguns pontos a serem contornados para que se obtenham as medidas mais confiáveis possíveis, constatou-se que o multímetro apresenta 4 faixas de leitura, 100 mV, 1 V, 10 V e 100 V. Em regime de altas frequências, ao passar de uma escala para outra verificou-se um aumento de cerca de 30 mV AC.

A partir de uma determinada frequência o multímetro começa a registrar valores menores do que deveria. Estes são cada vez menores de acordo com o aumento da frequência até chegar a um ponto em que o equipamento detecta a necessidade de uma troca de escala, o que resulta em uma descontinuidade nos valores medidos. A figura 3.5 ilustra uma destas trocas, um chaveamento da escala de 1 V para a de 100 mV, realizado a aproximadamente 750 KHz.

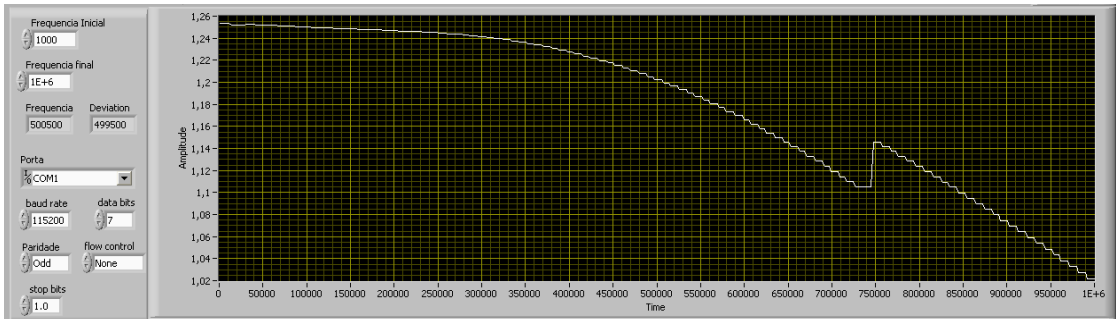


Fig. 3.6. Descontinuidade nas medidas do multímetro para um sinal senoidal de frequência variante, de 1 KHz a 1 MHz, e amplitude de 3,5 Vpp.

Esta descontinuidade, da ordem de 30 mV, é muito menor na faixa de operação normal do multímetro (que é abaixo de 350KHz) podendo ser desconsiderada sem maiores problemas.

3.4.3 Valores RMS e faixa de operação

Como foi visto anteriormente, o valor RMS de um sinal senoidal (Eq. 2.3) é de 70% do seu valor de pico. É comum nos equipamentos que efetuam este tipo de medida uma frequência a partir da qual a leitura deixa de ser o equivalente RMS e valores menores do que o esperado são indicados. No caso do multímetro utilizado, a partir de 350KHz o valor lido deixa de ser o equivalente RMS, e em frequências baixas, o valor indicado é um pouco maior do que deveria ser.

Utilizando o LabVIEW para controlar o gerador de funções, foi gerado um sinal senoidal de 2 Vpp, com a frequência variando de 1 KHz até 1 MHz. As medições feitas pelo multímetro foram enviadas ao LabVIEW, sendo gerada uma tabela utilizada no Origin (Origin Corporation [d]) para gerar o gráfico da figura 3.6.

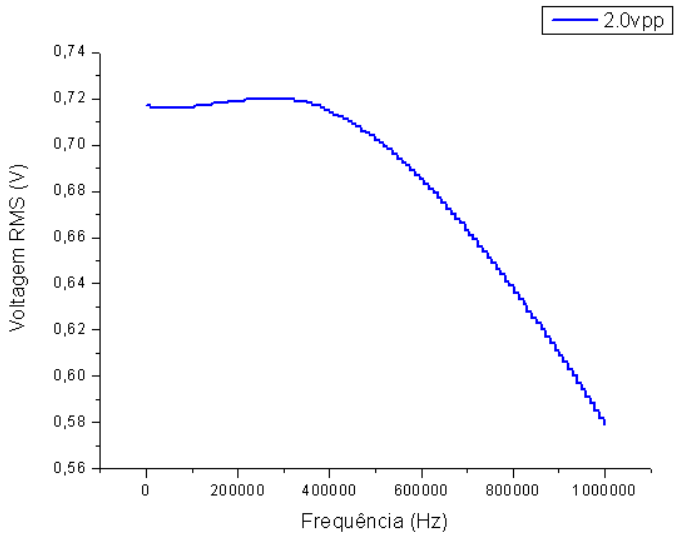


Fig. 3.7. Valor RMS de um sinal senoidal de 2vpp medido pelo multímetro Fluke 8845A.

Para minimizar erros, foi proposta uma metodologia de correção.

3.4.4 Metodologia de correção

As frequências de interesse deste projeto não vão além de 100KHz, no entanto, a correção dos valores lidos pelo multímetro estende-se a 1 MHz.

Antes de proceder a essas correções, foi necessária uma análise de discrepância detalhada do comportamento do multímetro.

Constatou-se que para amplitudes diferentes de um sinal senoidal a queda no valor lido pelo multímetro era diferente. As tabelas 3.1 e 3.2 ilustram um resumo do comportamento das leituras do multímetro para sinais senoidais de 200 mVpp e 2 mVpp em frequências de 1KHz e 1MHz.

Frequência (Hz)	Valor RMS (V)
1000	0,072
...	...
...	...
1000000	0,046

Tabela 3.1. Valores RMS medidos no multímetro para um sinal senoidal de 200 mVpp.

Frequência (Hz)	Valor RMS (V)
1000	0,717
...	...
...	...
1000000	0,579

Tabela 3.2. Valores RMS medidos no multímetro para um sinal senoidal de 2vpp.

Fazendo uma comparação:

0,046/0,072 = 0,638

0,579/0,717 = 0,807

Estes resultados podem ser interpretados como curvas de inclinações diferentes, sendo mais um fator a ser considerado para o ajuste dos valores. Para ajustá-los ao que deveria ser o valor RMS verdadeiro, um processo de coleta de dados foi elaborado para a caracterização das chamadas *curvas de calibração do multímetro*.

O procedimento para obtenção das tabelas e do gráfico da figura 3.6 foi repetido para coletar dados referentes a varreduras na frequência de sinais senoidais variando de 1 KHz até 1 MHz (com passos de aproximadamente 2548 Hz) de sinais com amplitudes de 100 mVpp, 200 mVpp, 300 mVpp, 400 mVpp, 500 mVpp, 600 mVpp, 700 mVpp, 800 mVpp, 900 mVpp, 1 Vpp, 1,5 Vpp, 2 Vpp, 3 Vpp, 4 Vpp, 5 Vpp, 7,5 Vpp e 10 Vpp.

Os resultados armazenados pelo LabVIEW foram inseridos no Origin, resultando em uma tabela contendo todos os dados para calibração do multímetro. Uma parte da tabela resultante pode ser vista na figura 3.7. As figuras 3.8 e 3.9 ilustram o conjunto das curvas obtidas.

	Frequência[X]	100mvpp[Y]	200mvpp[Y]	300mvpp[Y]	400mvpp[Y]	500mvpp[Y]	600mvpp[Y]	700mvpp[Y]	800mvpp[Y]	900mvpp[Y]	1.0vpp[Y]
1	1000	0,036	0,072	0,108	0,144	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
2	3548,469	0,036	0,072	0,108	0,144	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
3	6096,939	0,036	0,072	0,108	0,144	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
4	8645,408	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
5	11193,878	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
6	13742,347	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
7	16290,816	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,286	0,322	0,358
8	18839,286	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,286	0,322	0,358
9	21387,755	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,286	0,322	0,358
10	23936,224	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,286	0,322	0,358
11	26484,694	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
12	29033,163	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
13	31581,633	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
14	34130,102	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358
15	36678,571	0,036	0,072	0,108	0,143	0,179	0,215	0,251	0,287	0,322	0,358

Fig. 3.8. Parte da tabela usada no Origin para gerar as curvas de calibração do multímetro Fluke 8845A.

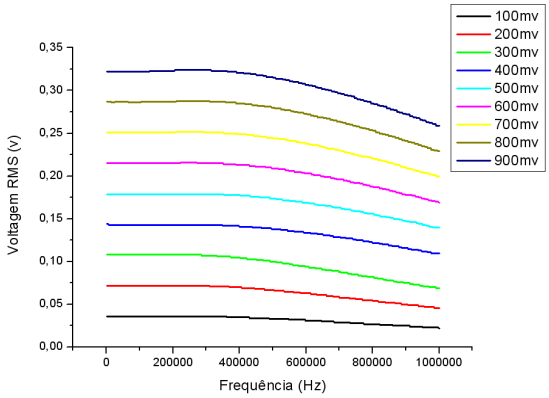


Fig. 3.9. Conjunto de curvas de calibração do multímetro para sinais senoidais de amplitudes de 100 mVpp até 900 mVpp.

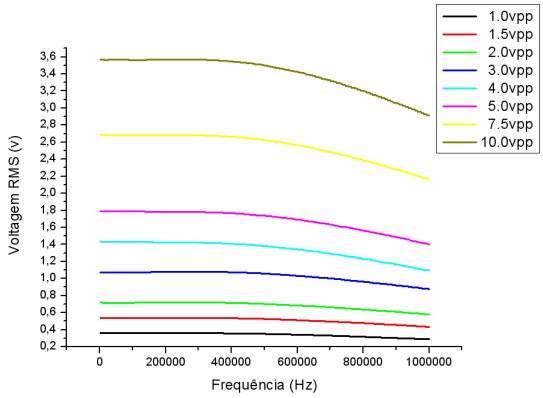


Fig. 3.10. Conjunto de curvas de calibração para sinais senoidais de amplitudes de 1 Vpp até 10 Vpp.

Após a aquisição das curvas, os valores da tabela foram normalizados pelo que deveria ser o valor RMS verdadeiro para cada sinal senoidal: 0,035 V para o sinal de 100 mVpp, 0,0707 V para o sinal de 200 mVpp e assim por diante. Este procedimento dá uma idéia da variação porcentual das medidas. Uma parte da tabela resultante é mostrada na figura 3.10.

	Frequência[X]	100mvpp[Y]	200mvpp[Y]	300mvpp[Y]	400mvpp[Y]	500mvpp[Y]	600mvpp[Y]	700mvpp[Y]	800mvpp[Y]	900mvpp[Y]	1.0vpp[Y
1	1000	1,02857	1,01408	1,01887	1,02128	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
2	3548,469	1,02857	1,01408	1,01887	1,02128	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
3	6096,939	1,02857	1,01408	1,01887	1,02128	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
4	8645,408	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
5	11193,878	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
6	13742,347	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
7	16290,816	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,0106	1,01258	1,0141
8	18839,286	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,0106	1,01258	1,0141
9	21387,755	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,0106	1,01258	1,0141
10	23936,224	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,0106	1,01258	1,0141
11	26484,694	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
12	29033,163	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
13	31581,633	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
14	34130,102	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141
15	36678,571	1,02857	1,01408	1,01887	1,01418	1,0113	1,01415	1,01619	1,01413	1,01258	1,0141

Fig. 3.11. Parte da tabela usada no Origin e contendo os dados normalizados pelos valores RMS dos sinais senoidais.

A partir dos dados normalizados, foi gerado um gráfico de pontos para cada valor de amplitude do sinal senoidal. Sobre o gráfico resultante, foi utilizada a ferramenta de *aproximação polinomial* do Origin com ordens variáveis para os polinômios até que se encontrasse a que melhor se adequaria ao gráfico. Desta maneira chegou-se a curvas aproximadas do perfil de leitura do multímetro. As figuras 3.11 e 3.12 ilustram algumas curvas com as aproximações polinomiais e a tabela 3.7 apresenta os coeficientes para todas as curvas de calibração.

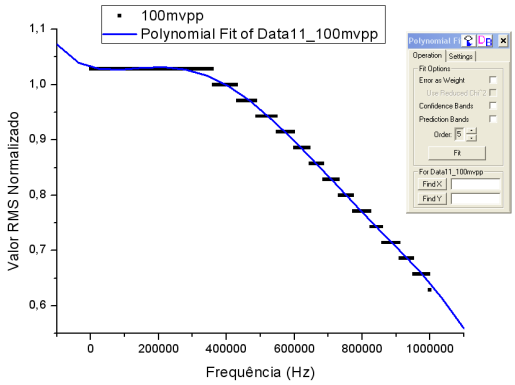


Fig. 3.12. Curva de calibração do multímetro para um sinal senoidal de 100 mVpp.

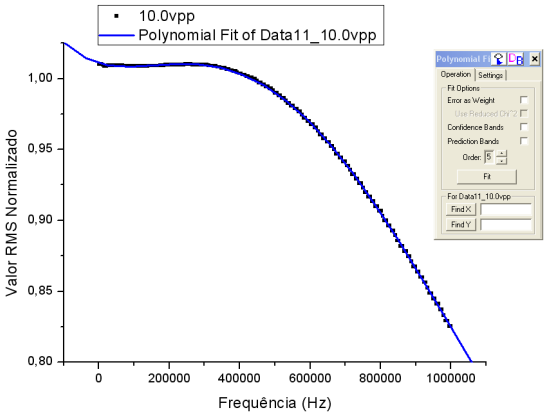


Fig. 3.13. Curva de calibração do multímetro para um sinal senoidal de 10 Vpp.

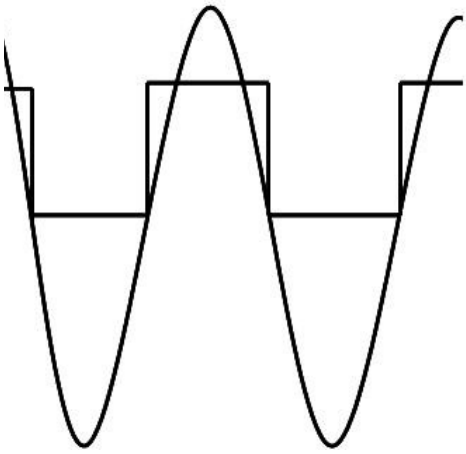
As curvas obtidas são as do tipo definido na equação 3.1.

$$Y = A + B_1 X + B_2 X^2 + B_3 X^3 + B_4 X^4 + B_5 X^5 \qquad \text{Eq. 3.1}$$

O conjunto de coeficientes das equações de calibração para as diversas faixas encontra-se na tabela B1 no apêndice B. O uso destas equações é feito pelo LabVIEW e será detalhado mais a frente neste capítulo.

3.5 Metodologia de medição de fase

A medição da diferença de fase entre dois sinais senoidais pode ser feita tomando-se por base o ponto de onde estes sinais passam pelo valor zero (*zero-crossing*), fazendo-os corresponder a uma onda quadrada (figura 3.13).



3.14. Detecção de cruzamento por zero de um sinal senoidal.

Realizando este procedimento para dois sinais senoidais defasados, as ondas quadradas resultantes podem ser enviadas a uma porta lógica do tipo XOR, resultando em uma série de pulsos, como mostra a figura 3.14.

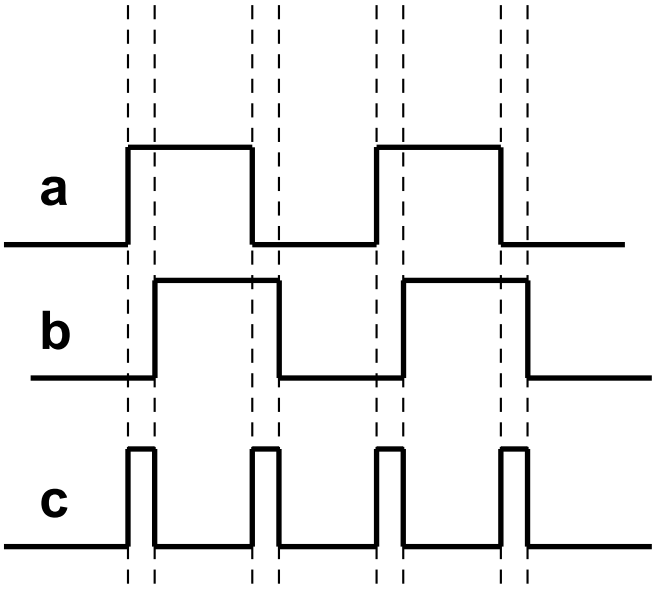
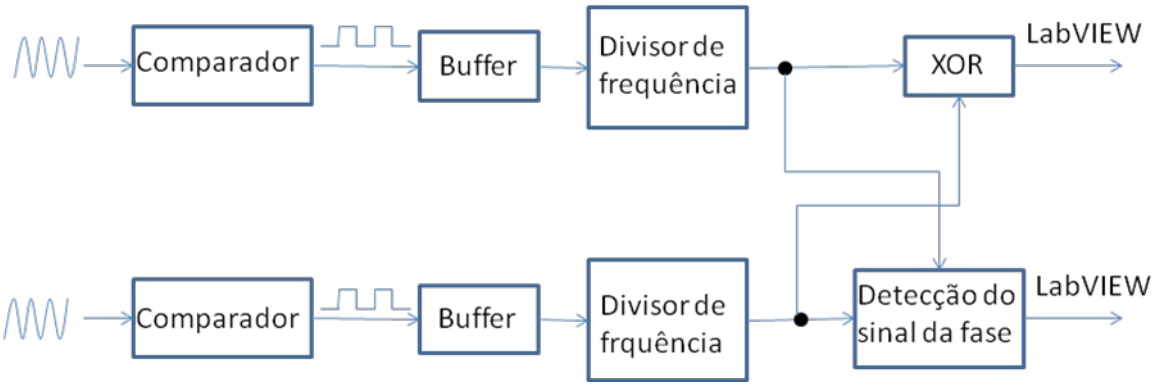


Fig. 3.15. Ondas defasadas (a e b) gerando pulsos na saída a partir de uma porta lógica do tipo XOR.

Dividindo-se a largura do pulso na saída da porta XOR pelo período das ondas quadradas obtém-se um valor proporcional à diferença de fase. Multiplicando-se este valor por 360 o resultado é o módulo da diferença de fase em graus entre os dois sinais senoidais. Para a detecção do atraso ou adiantamento entre os dois sinais, as mesmas ondas quadradas usadas para a detecção do módulo podem ser conectadas a um *flip-flop* do tipo D. Neste caso, a saída Q indicará o atraso ou adiantamento do sinal de acordo com o nível lógico “0” ou “1”.

Para fazer uso desta metodologia foi desenvolvido um circuito eletrônico para a medição da fase. O diagrama em blocos da figura 3.15 ilustra o funcionamento deste circuito. A presença dos divisores de frequência será discutida em detalhes.



3.16. Diagrama em blocos do funcionamento da medição da diferença de fase.

3.6 Tratamento dos Sinais Utilizados na Detecção da Fase

As saídas dos comparadores têm um tempo de subida muito pequeno, mas quando a amplitude do sinal de entrada diminui a onda demora para retornar ao valor inferior, isto se traduz em uma distorção do ciclo de trabalho deste sinal, que deixa de ser de 50%. Isto resulta em pulsos assimétricos na saída do XOR, como pode ser observado na figura 3.16.

Somado a isto, há o problema da saída dos comparadores apresentarem um nível alto em aproximadamente 3 V, como pode ser visto em detalhes na figura 3.17, o que, combinado com oscilações nos momentos de chaveamento do circuito, pode resultar em um chaveamento espúrio dos *flip-flops*.

Para evitar problemas gerados pela baixa amplitude dos sinais de saída dos comparadores foram inseridos os buffers TTL, que elevam o nível na saída para aproximadamente 4,5 V como ilustra a figura 3.18.

Para garantir um ciclo de trabalho de 50%, os dois sinais passam por *flip-flops*, configurados como divisores de frequência. Esta configuração utiliza somente a subida do sinal e como resultado os dois sinais em forma de onda quadrada na saída dos *flip-flops* apresentam ciclos de trabalho iguais e de 50%, ideais para a detecção de fase. A figura 3.19 mostra um destes sinais em conjunto com o sinal original, antes de ter sua frequência dividida. O resultado na saída do XOR em conjunto com os sinais já com a frequência dividida é mostrado na figura 3.20.

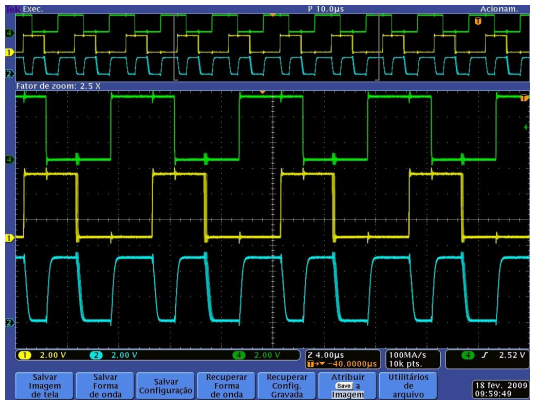


Fig. 3.17. Em verde, sinal originário da referencia, em amarelo, o da resposta, e em azul, o sinal na saída do XOR.

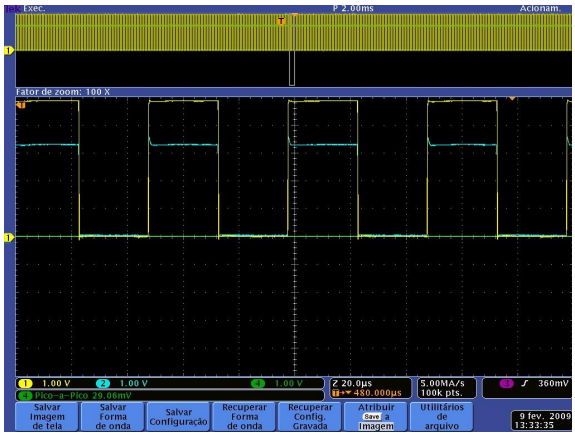


Fig. 3.18. Onda quadrada na saída do buffer TTL, com nível alto em 4,5 V (sinal representado em amarelo).

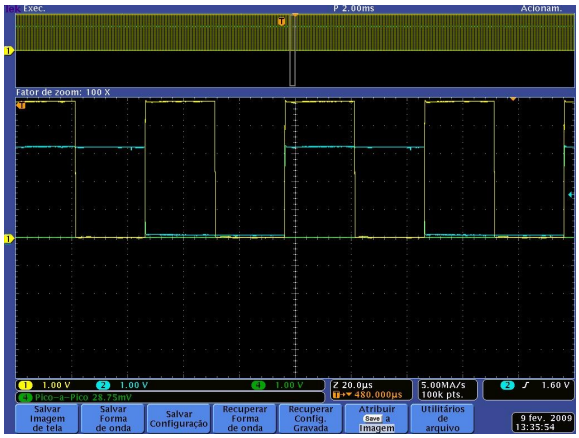


Fig. 3.20. Onda quadrada na saída do buffer TTL, em amarelo, e em azul a onda após ter sua frequência dividida por dois.

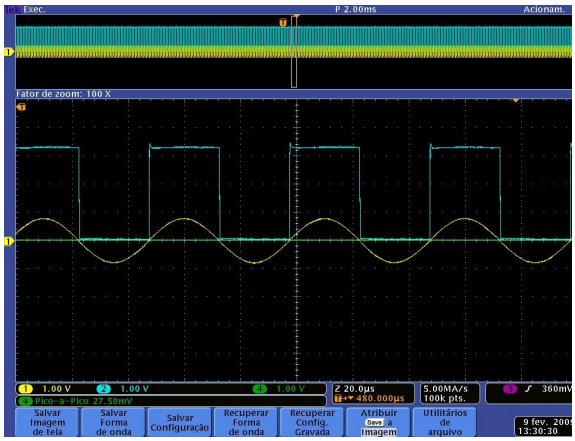


Fig. 3.19. Sinal de saída dos comparadores com nível alto em aproximadamente 3 V.

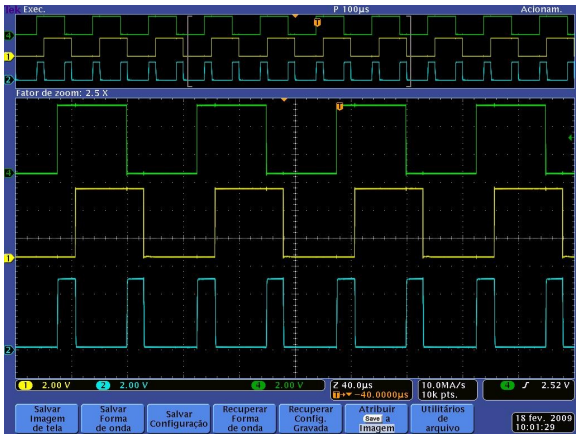
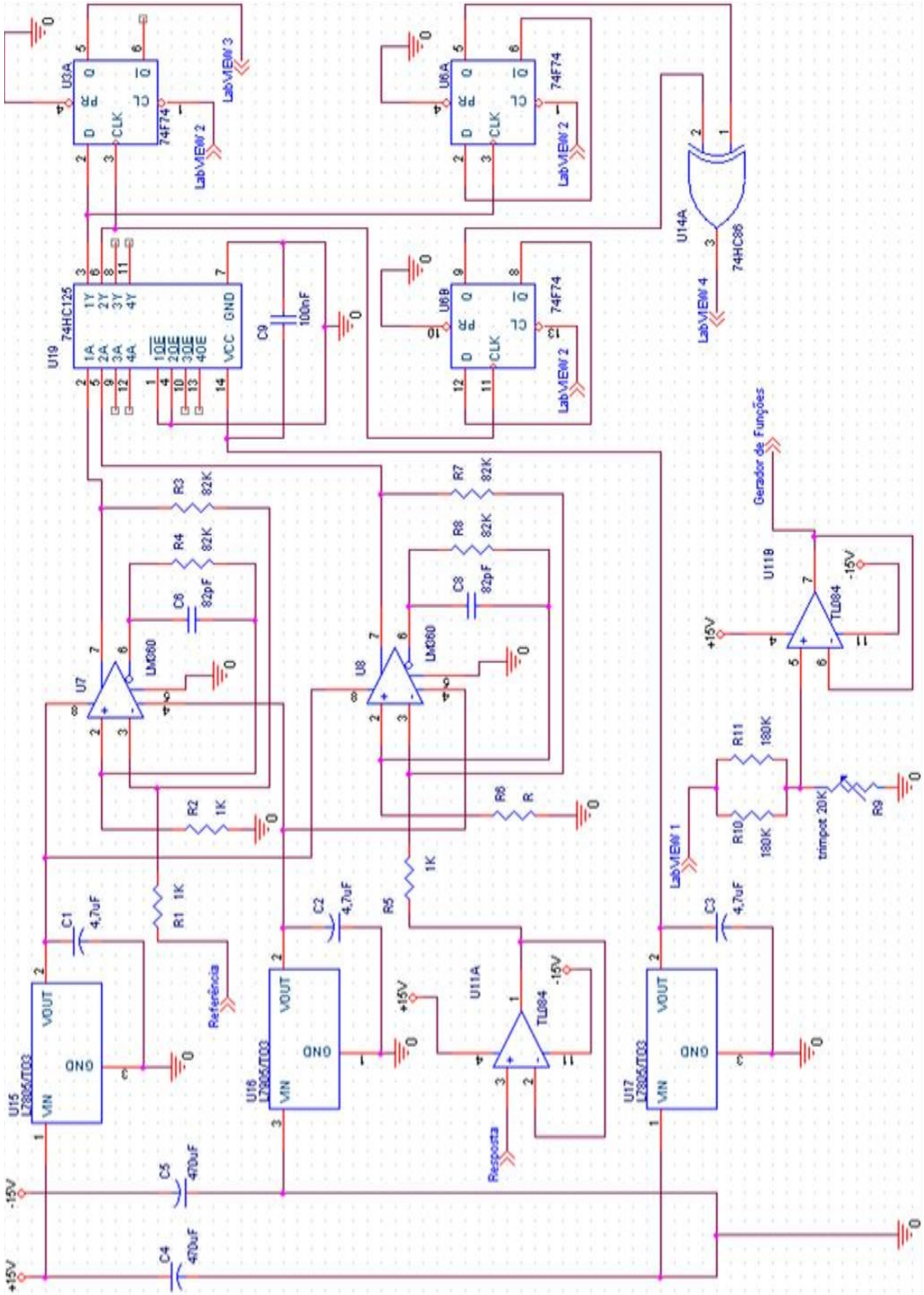


Fig. 3.21. Entradas do XOR, em verde e amarelo, e saída, em azul.

3.7 Circuito de Medição de Fase

O circuito de medição de fase realiza a medição do módulo e do sinal da fase entre a referência, proveniente do gerador de funções, e a resposta do circuito em teste. Uma parte deste circuito é responsável por dividir por 10 a tensão enviada pelo LabVIEW para controlar o gerador de funções. A figura 3.21 ilustra um diagrama esquemático do circuito.



3.22: Circuito de medição de fase. Referência: sinal vindo do gerador de funções. Resposta: Resposta do circuito a ser analisado. LabVIEW 1: Sinal de controle da modulação do gerador de funções antes de ser dividido por dez. LabVIEW 2: Sinal de controle vindo do LabVIEW para reinicializar os flip-flops. LabVIEW 3: sinal enviado ao LabVIEW para informar o sinal da fase. LabVIEW 4: Sinal que indica a diferença de fase através da largura de pulso.

Todos os integrados TTL tiveram sua alimentação desacoplada com capacitores de 100 nF do tipo cerâmico conectados diretamente nas proximidades dos pinos de alimentação.

Para facilitar o entendimento, o circuito será analisado em módulos.

3.7.1 Comparadores

Esta etapa do circuito emprega comparadores de alta velocidade (LM360) perfazendo a função de *zero-crossing* e geração das ondas quadradas. Este é um dispositivo robusto capaz de detectar variações de até 50mv de amplitude. Os sinais senoidais provenientes do gerador (que excita o circuito a ser analisado) e do circuito a ser analisado (resposta) passam pelo LM360. A montagem do LM360 baseia-se no application note nº 87 da National Semiconductors [e] (apêndice C). O apêndice D.1 apresenta algumas das principais características elétricas deste dispositivo, A figura 3.22 ilustra os comparadores em destaque no circuito.

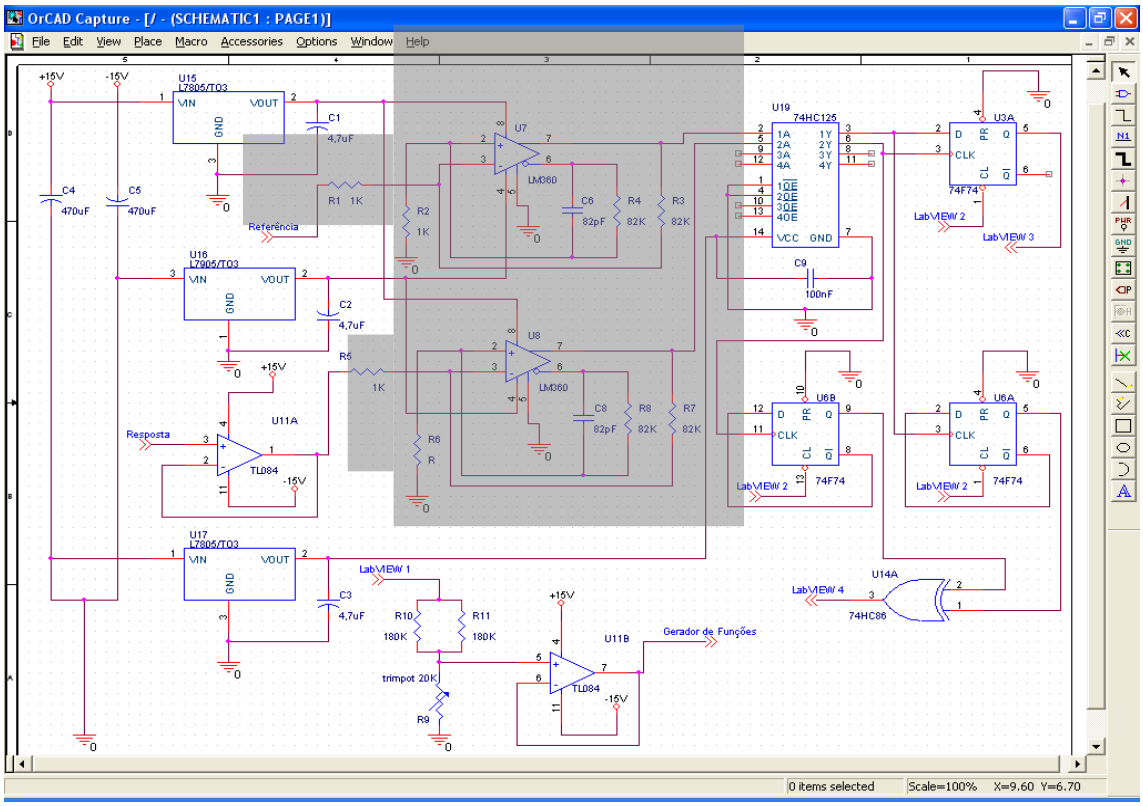


Fig. 3.23. Circuito de apoio com os comparadores em destaque.

3.7.2 Detectores do Módulo e Sinal da Fase

A tarefa de detecção de diferença de fase é dividida em duas etapas: detecção do módulo da fase e detecção do sinal da fase. A faixa de operação do AAF é limitada em 100 KHz devido a estes estágios do circuito.

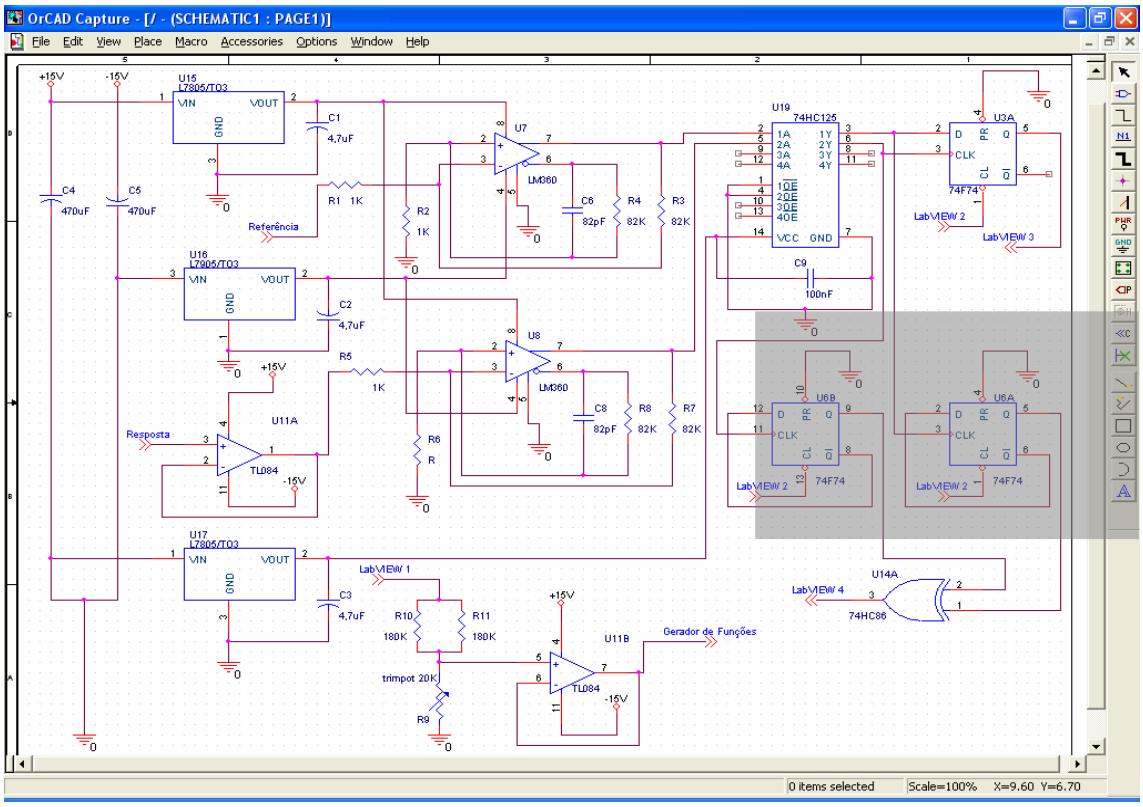


Fig. 3.24: Circuito de apoio com os divisores de frequência em destaque.

3.7.3 Detector do Sinal da Fase

A detecção do sinal da fase é feita por um flip-flop tipo D. A onda quadrada referente ao sinal do gerador serve como *clock* e a onda quadrada referente ao circuito a ser analisado é inserida na entrada D do *flip-flop*. A saída

Q indica se o sinal de resposta está atrasado ou adiantado de acordo com os níveis lógicos “0” e “1”, respectivamente. A figura 3.24 ilustra o detector do sinal de fase em destaque no circuito.

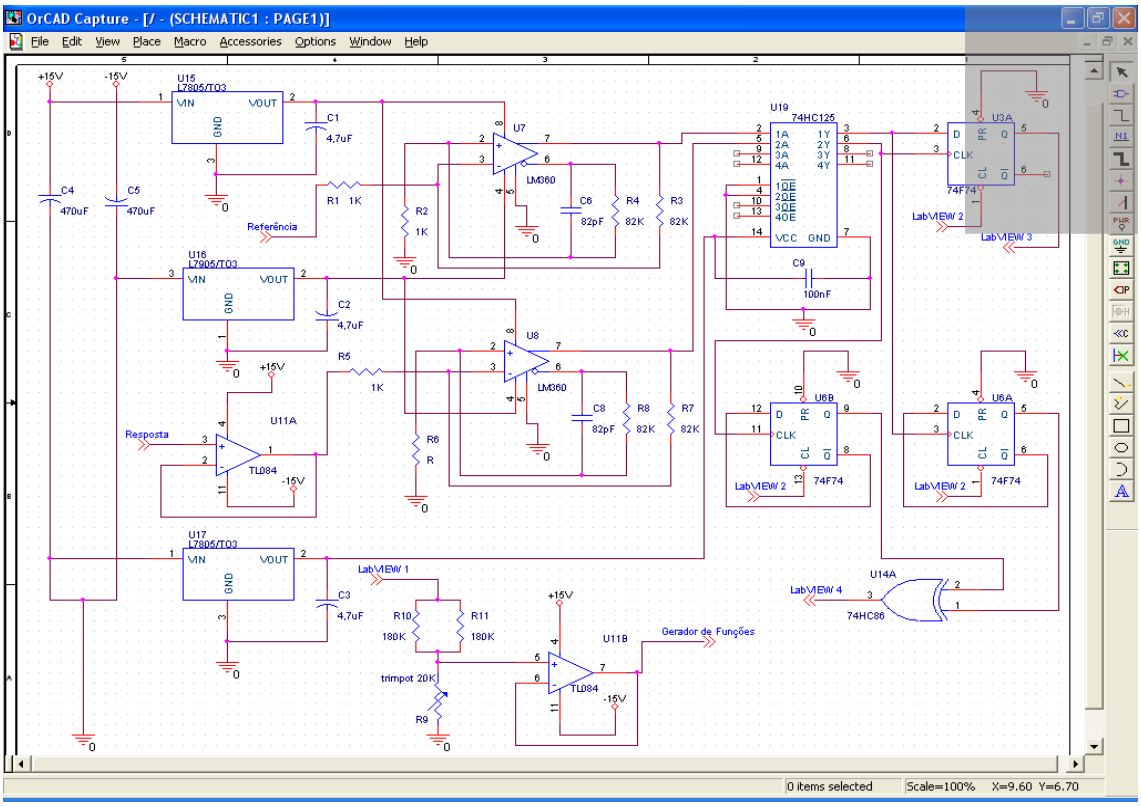


Fig. 3.25. Circuito detecção de fase com o detector de sinal de fase em destaque.

3.7.4 Detector do módulo da fase

Esta parte do circuito utiliza uma porta lógica do tipo XOR (fig. 3.25) para gerar um pulso de largura correspondente ao atraso. O integrado utilizado foi um 74HC86 que responde bem em altas frequências, mas, para se obter um desempenho ainda melhor, ele pode ser trocado por um 74F86.

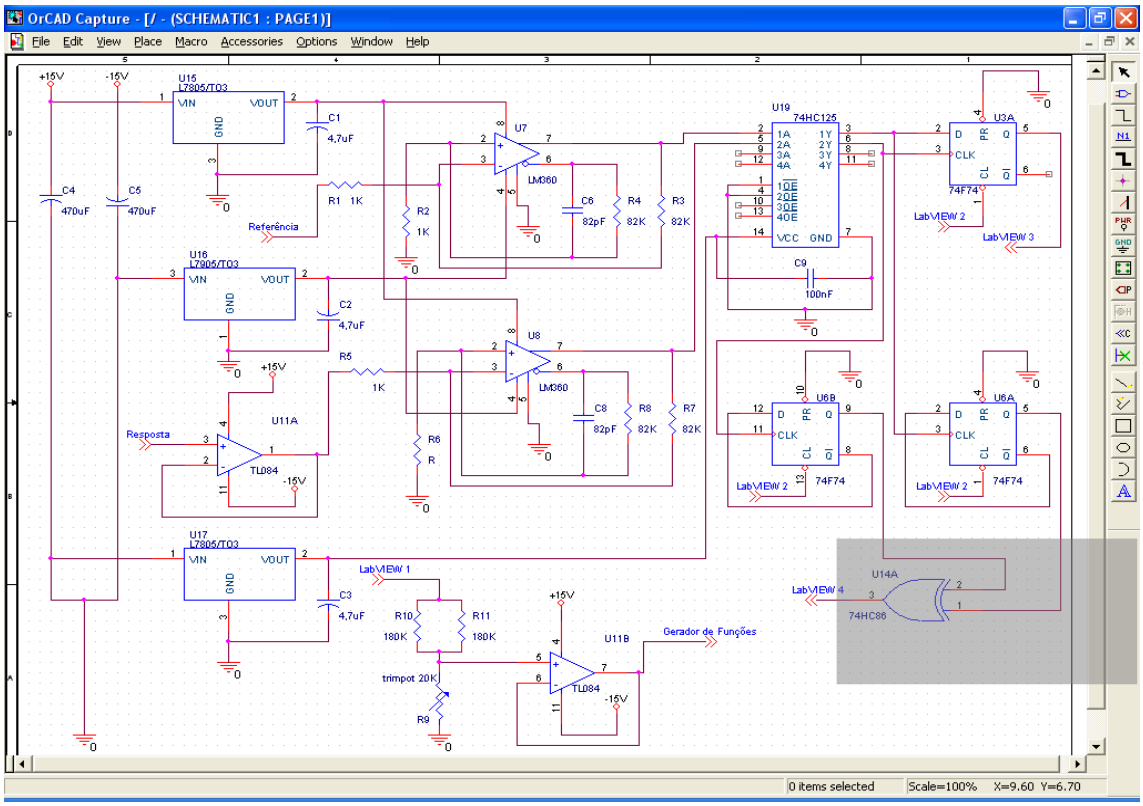


Fig. 3.26. Circuito com a porta lógica XOR em destaque.

A largura do pulso é detectada pelo LabVIEW, que faz os cálculos de acordo com a frequência do sinal de referencia, que é conhecida, pois é controlada pelo próprio LabVIEW.

3.7.5 Reguladores de Tensão

Foram usados 3 reguladores de tensão, dois 78L05 e um 79L05. A figura 3.26 ilustra os reguladores em destaque.

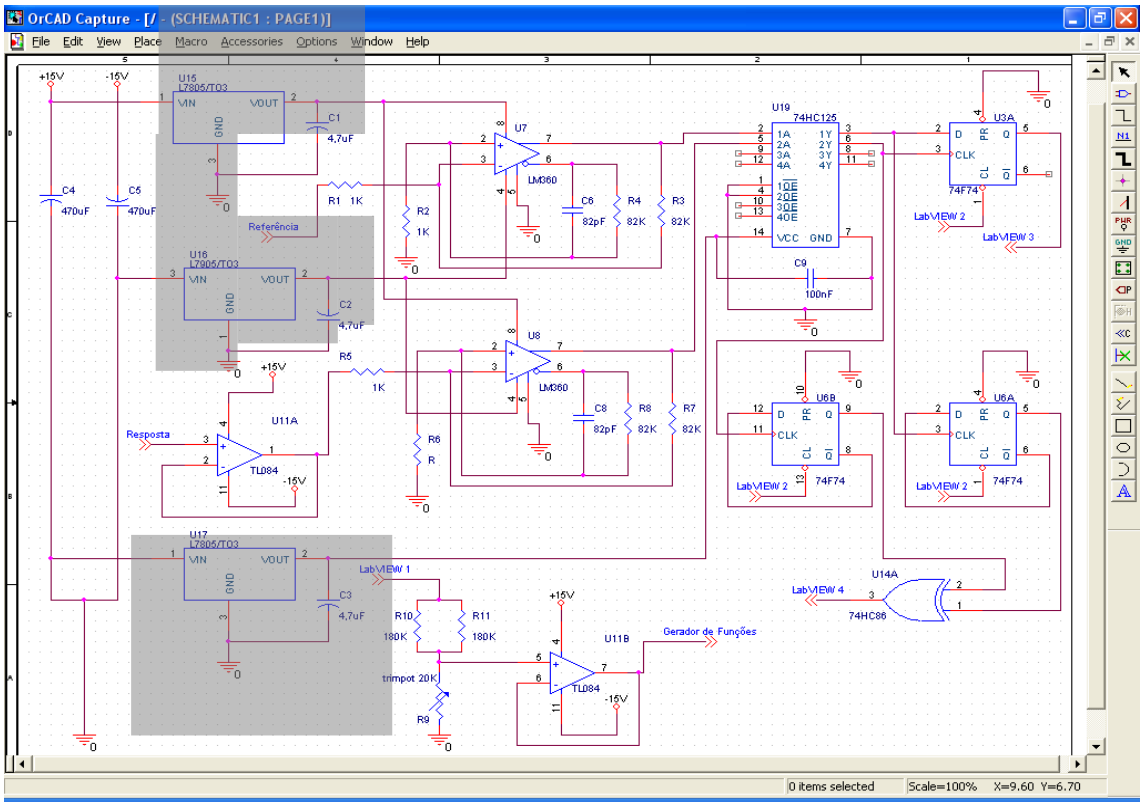


Fig. 3.27. Circuito de detecção de fase com os reguladores de tensão em destaque.

O uso de dois reguladores positivos se justifica pelo fato de a alimentação da parte TTL ter sido dividida do resto do circuito para evitar problemas devido ao chaveamento de das ondas quadradas.

3.7.6 Buffers

Foram usados buffers analógicos e digitais. Os buffers analógicos foram implementados com circuitos integrados TL084 e para os buffers digitais foram utilizados os do 74HC125.

3.7.6.1 Buffers Analógicos

O circuito integrado TL084 foi utilizado como buffer (figura 3.27). O produto ganho banda deste amplificador é de 3 MHz e seu *slew rate* é de 13 V/us. No apêndice D.2 pode-se conferir mais detalhes do desempenho do

TL084. Um deles serve para isolar a resposta do circuito da entrada de um dos comparadores, o outro isola um divisor de tensão da entrada de modulação do gerador de funções.

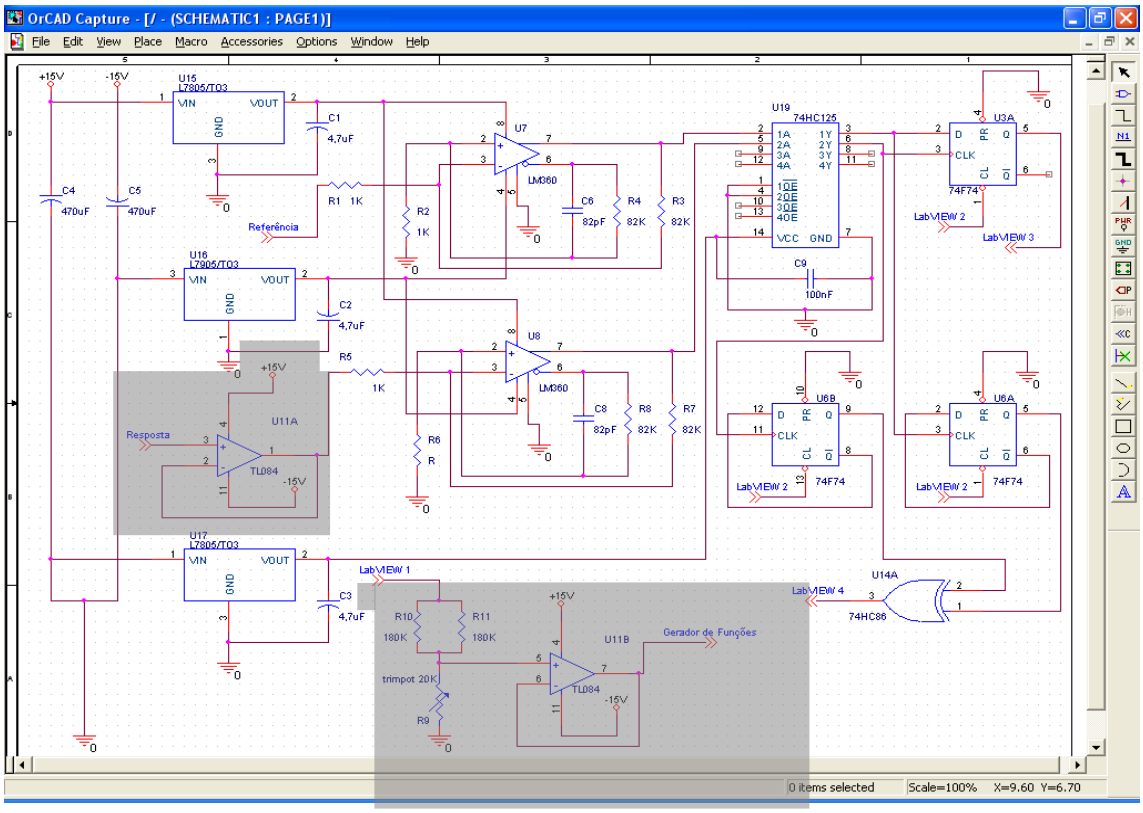


Fig. 3.28. Circuito de apoio com os buffers analógicos em destaque.

3.7.6.2 Buffers Digitais

Estes buffers, figura 3.28, foram utilizados para garantir o nível de tensão próximo a 5V para os sinais utilizados para a detecção de fase.

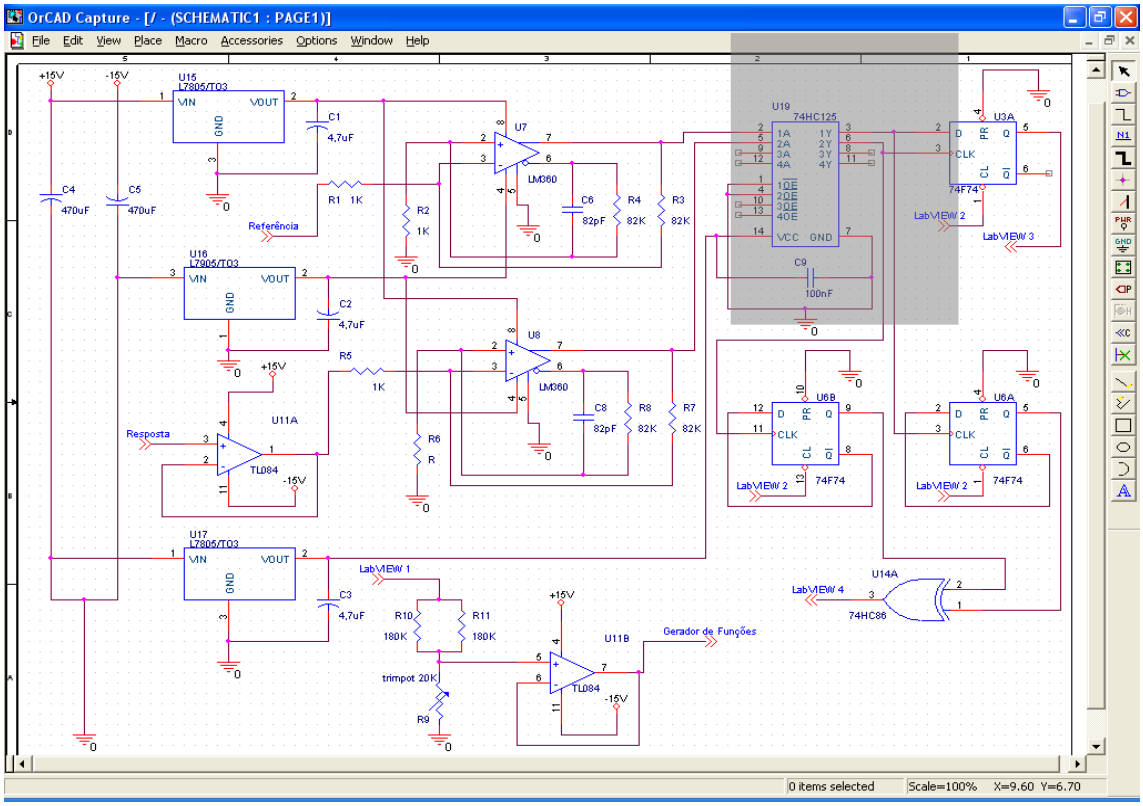


Fig. 3.29. Circuito com os buffers digitais em destaque.

3.8 Softwares

Para o desenvolvimento deste projeto foram usados três *softwares*.

i) O LabVIEW (National Instruments Inc.), para criar o aplicativo de controle do equipamento e para fazer a interface com o usuário. Dentre estes, o LabVIEW é o que merece maior atenção;

i) O Origin (OriginLab), para manipulação de dados e geração de curvas e equações de calibração;

ii) O Orcad (Cadence Design Systems, Inc. [f]), para gerar o desenho do circuito.

3.9 Conceitos e Principais Características do LabVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engeneering Workbench) é um software que permite a criação de instrumentos virtuais. Em conjunto com uma

placa de aquisição de dados, ele é capaz de emular o funcionamento de osciloscópios, multímetros e uma série de outros instrumentos.

Para placas com conversores DA, é possível gerar sinais, emulando o funcionamento de um gerador de funções ou ainda, gerar sinais para aplicações de controle e automação. A capacidade de geração e aquisição de sinais depende das taxas de aquisição e geração de amostras, que são parâmetros de cada placa e são medidos em amostras por segundo (*samples per second*).

O LabVIEW também pode ser usado para uma série de aplicativos que não precisam de placas de aquisição, como a análise de plantas de sistemas e espectros de frequência.

A placa disponível para o desenvolvimento deste projeto é uma placa multifunção (capaz de fazer a geração e aquisição de sinais analógicos e digitais) de baixo custo que apresenta algumas limitações, como taxas não muito elevadas de geração e aquisição de sinais.

Para a aquisição, a placa trabalha com uma taxa de 200 mil amostras por segundo. Com taxas maiores, algumas das estratégias de medição deste projeto poderiam ter sido inteiramente implementadas em LabVIEW. Por exemplo, com uma taxa de aquisição de 500MS/s dividida para dois canais seria possível a medição da diferença de fase de dois sinais senoidais de 1MHz com uma precisão de 1,5°. Placas com taxas desta ordem podem ser encontradas no mercado, mas são dedicadas apenas a aquisição de sinais analógicos por exemplo. Desta forma, seria necessária uma outra placa para geração de sinais. Como a proposta do projeto não previa mais investimentos na aquisição novas placas, as estratégias de medida utilizadas neste projeto foram as mais simples possíveis com o equipamento disponível, mas poderiam ser ainda mais simples caso o hardware disponível fosse melhor.

3.10 Aplicativo de Controle e Exibição de Dados

Os aplicativos em LabVIEW são denominados VIs (*virtual instruments*). Cada VI possui dois elementos, um é o painel frontal, que é a interface com o usuário, o outro é o diagrama de blocos onde é feita a programação. Cada VI

pode conter diversos SubVIs, numa analogia a funções auxiliares utilizadas dentro de outras funções em uma linguagem de programação escrita.

A figura 3.29 ilustra o painel frontal do aplicativo principal.

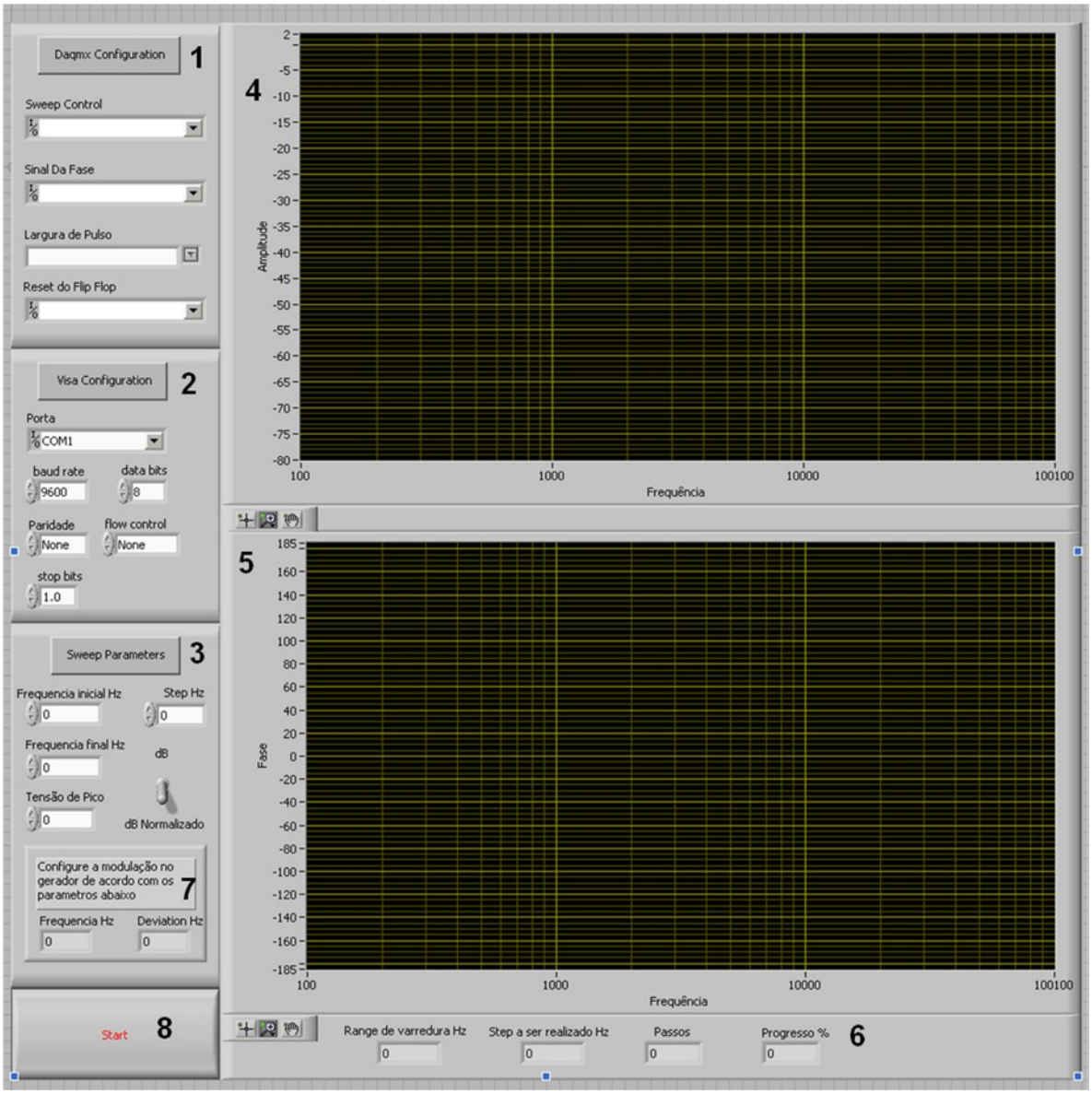


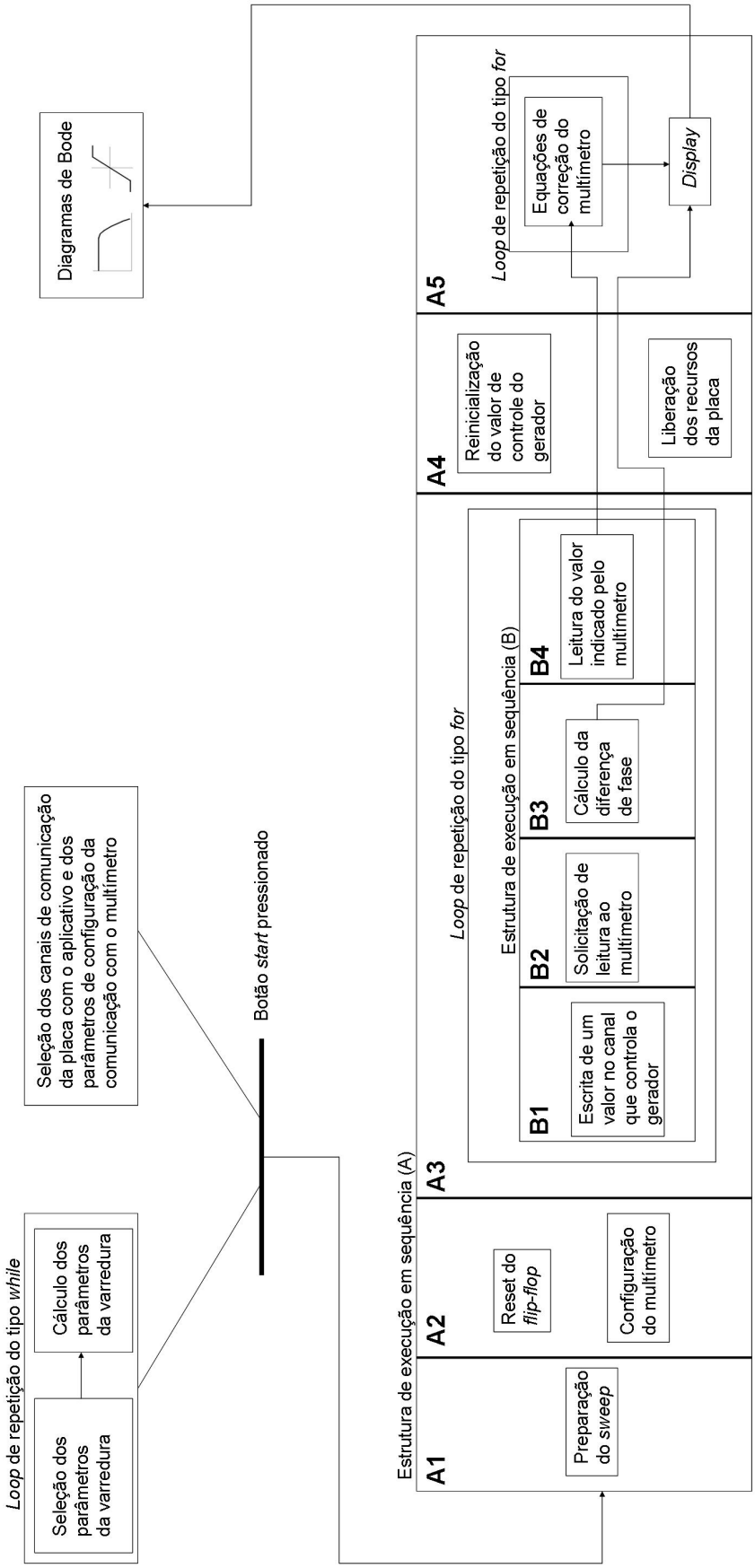
Fig. 3.30. Vista do painel frontal do aplicativo principal.

1) *Daqmx Configuration*: esta parte corresponde a quais canais da placa serão utilizados;
2) *Visa Configuration*: parâmetros de configuração da comunicação do multímetro com o software;
3) *Sweep Parameters*: condições em que se deseja realizar a análise, sendo elas: “Frequência inicial”, “Frequência final” e “*Step*” a ser

realizado. O seletor entre “dB” e “dB Normalizado” serve para que seja alterado o modo como se calcula o valor em dB da resposta. No “dB”, o valor informado no campo “Tensão de Pico” corresponde ao valor de 0 dB, no “dB Normalizado”, o valor correspondente a 0 dB é o maior valor obtido na resposta;

4) Diagrama de Bode de magnitude;
5) Diagrama de Bode de fase;
6) Parâmetros informativos sobre o processo;
7) Parâmetros que devem ser configurados no gerador de funções para que se possa realizar as medidas;
8) Botão que inicia o processo.

A este painel frontal corresponde um diagrama de blocos que é o equivalente ao código fonte do aplicativo. Este capítulo apresenta uma representação gráfica (figura 3.30) e comenta o algoritmo executado pelo aplicativo. O código fonte detalhado se encontra no apêndice E.



3.31. Esquema de execução do aplicativo em LabVIEW.

A seleção dos parâmetros da varredura é feita pelo usuário no painel frontal do aplicativo. Esta seleção e os cálculos feitos a partir dela ficam dentro de um loop de repetição do tio *while* para que a qualquer mudança feita sejam os novos parâmetros de configuração do gerador de funções.

O processo se inicia quando o botão *start* é pressionado.

A estrutura de execução seqüencial “A” garante que cada parte do processo seja executada separadamente, evitando que partes diferentes do aplicativo tentem acessar o mesmo recurso da placa ao mesmo tempo, o que geraria um erro de execução.

Em “A1” é realizado o preparo para a varredura com o valor de tensão no canal de saída que controla o gerador de funções no valor mínimo, -9,55 V. A seguir, em “A2” ocorrem simultaneamente o *reset* do *flip-flop* e a configuração do multímetro (medição AC e quantidade de medidas por segundo). Em “A3” há um *loop* de repetição do tipo *for*. A cada execução deste *loop* um novo valor é escrito na saída analógica da placa e é feita uma aquisição da diferença de fase e uma leitura do multímetro. Estes passos ficam separados em uma estrutura de execução em sequência “B”. A escrita do valor é feita em “B1”. Em “B2” é feita a solicitação de leitura ao multímetro, esta leitura é completada em “B4”. Em “B3” é feito o cálculo da diferença de fase. Em “A4” o valor de controle do gerador é levado novamente para o menor valor possível, -9,55 V e os recursos da placa são liberados. Na parte da sequência identificada por “A5” os valores adquiridos através do multímetro, que foram colocados em um vetor são passados para dentro de um *loop* do tipo *for* onde é feita a correção das leituras a partir das equações de calibração do multímetro (os detalhes deste processo encontram-se no apêndice E) . Um SubVi denominado *display* recebe os vetores contendo as medições de diferença de fase e as leituras da amplitude já corrigida e prepara os dados para serem exibidos no painel frontal, na forma de diagramas de Bode de amplitude e fase.

3.11 Equipamentos e Dispositivos Utilizados

- Circuito Eletrônico medição de fase
  - LM 360 - comparador de alta velocidade;
  - TL084 - amplificador operacional;
  - 74f74 - *flip-flop*;
  - 74HC125 - buffer TTL;
  - 7805 - regulador de tensão;
  - 7905 - regulador de tensão;
  - 7008 - regulador de tensão;
  - 74HC86 - porta lógica XOR.

- Equipamentos de Bancada
  - Gerador de funções Tektronix AFG 3022;
  - Multímetro digital Fluke 8845A;
  - Fonte Icel PS-6100;
  - Osciloscópio Tektronix DPO 4034 (para o acompanhamento dos resultados e testes);
  - Multímetro digital *de mão* Fluke 189 (para acompanhamento dos resultados e testes).

- Computador do tipo PC (Pentium 4 3 GHz, 512 MB RAM) equipado com uma placa PCI 6036E da National Instruments Inc.

- Softwares
  - LabVIEW 8.5 (National Instruments Inc);
  - Origin 7 (OriginLab Corporation);
  - Orcad 9.1 (Cadence Desingn Systems Inc.);

Capítulo 4

4 Roteiro de Utilização

Com o intuito de facilitar o uso do equipamento segue um roteiro para a realização de medições.

1) Selecionar os canais da placa que serão utilizados (*Daqmx Configuration*). Estes canais são acessados pelo módulo de conectores BNC (figura 3.4). As conexões com o circuito de medição de fase são indicadas nos itens abaixo e remetem a figura 3.21.
    a. *Sweep Control* (figura 4.1). Conexão com o ponto indicado por "LabVIEW 1" na figura 3.21.
        i. Dev1/ao0
        ii. Dev1/ao1
    b. Sinal da Fase (figura 3.2). Conexão com o ponto indicado por "LabVIEW 3" na figura 3.21.
        i. Dev1/Port0/line0
        ii. Dev1/Port0/line1
        iii. Dev1/Port0/line2
        iv. Dev1/Port0/line3
        v. Dev1/Port0/line4
        vi. Dev1/Port0/line5
        vii. Dev1/Port0/line6
        viii. Dev1/Port0/line7
    c. Largura de Pulso (figura 4.3). Conexão com o ponto "LabVIEW 4" na figura 3.21.
        i. PFI9
        ii. PFI4
    d. Reset do Flip Flop (figura 4.4). Conexão com o ponto "LabVIEW 3" na figura 3.21.
        i. Dev1/Port0/line0
        ii. Dev1/Port0/line2

iii. Dev1/Port0/line3
iv. Dev1/Port0/line4
v. Dev1/Port0/line5
vi. Dev1/Port0/line6
vii. Dev1/Port0/line7

Nesta sessão, qualquer canal dos que foram mostrados podem ser selecionados, o único cuidado que se deve ter é selecionar canais diferentes para os itens b e d.

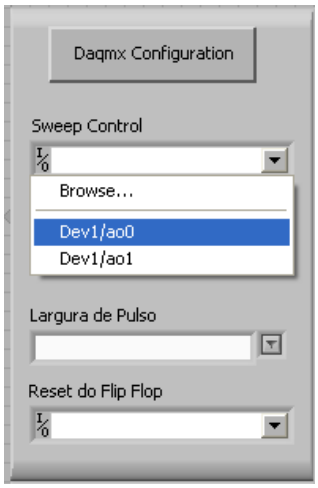


Fig. 4.32. *Sweep Control*.

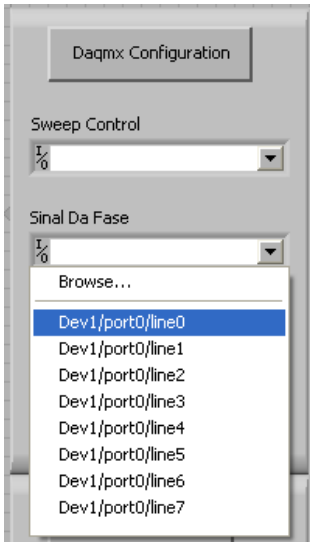


Fig. 4.33. Sinal da Fase.

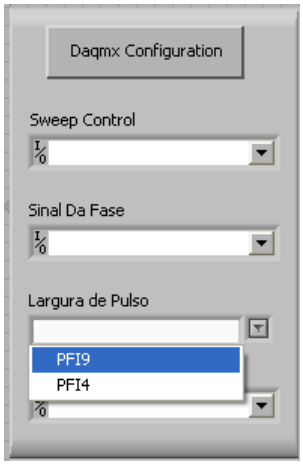


Fig. 4.34. Largura de Pulso.

Fig. 4.35. *Reset* do *Flip Flop*.

2) Selecionar os parâmetros de comunicação do multímetro com o LabVIEW (Visa Configuration) (figura 4.5). Os parâmetros mostrados na figura foram os utilizados nos testes deste projeto, mas o usuário pode configurá-los de outra forma. No entanto, o item a deve ser selecionado como COM1 e para os itens b,c,d,e e f deve-se selecionar os mesmos valores na configuração do multímetro, por meio de seu painel de controle. O ponto "Resposta" indicado no circuito de medição de fase na figura 3.21, deve ser conectado ao multímetro.

   a. Porta
      i. COM1
      ii. LPT1
   b. Baud Rate
   c. Data Bits
   d. Paridade
   e. Flow Control
   f. Stop Bits

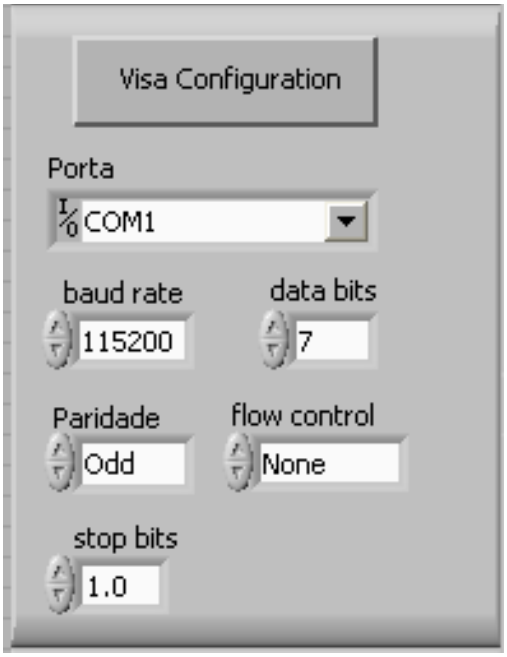


Fig. 4.36. *Visa Configuration*.

3) Selecionar os parâmetros da varredura (*Sweep Parameters*) (figura 4.6). Os itens f e g não devem ser configurados. Ao iniciar o aplicativo eles irão indicar os valores que devem ser configurados para os parâmetros "Frequency" e "Deviation" no gerador de funções.
   a. Frequência Inicial Hz
   b. Frequência Final Hz
   c. Sep Hz
   d. dB ou dB Normalizado
   e. Tensão de Pico
   f. Frequency
   g. Deviation

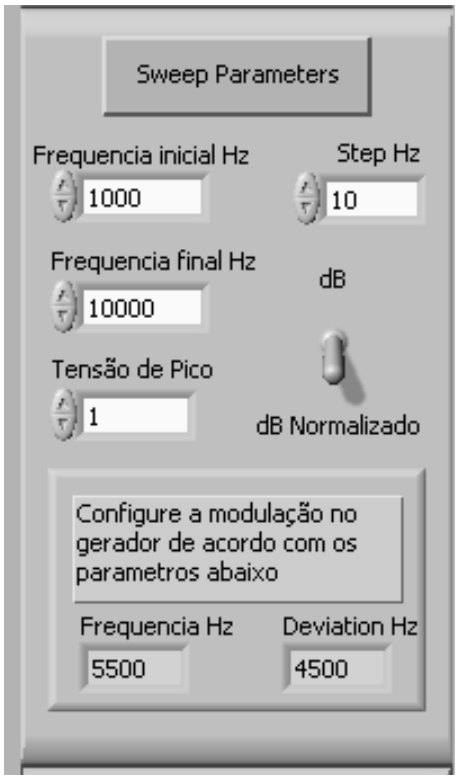


Fig. 4.37. *Sweep Parameters*.

4) Configurar o gerador de funções no modo de modulação com os parâmetros “Frequency Hz” e “Deviation Hz” que foram indicados pelo aplicativo (figura 4.6). A amplitude do sinal precisa coincidir com o valor Tensão de Pico para o caso de ser selecionado o modo dB.

5) O botão com o desenho de uma seta no topo da tela do aplicativo inicia o mesmo (figura 4.7).

Fig. 4.38. Botão em forma de seta que serve para iniciar o aplicativo.

6) Para iniciar a varredura o botão start deve ser pressionado (figura 4.8).

Fig. 4.39. Botão Start, que inicia a varredura.

Capítulo 5

5 Resultados e Discussão

Para demonstrar o funcionamento da montagem, foram testados circuitos básicos com resposta conhecida. Dois destes circuitos são circuitos RC com frequências de corte nas faixas de 100 Hz e 10 KHz. Um outro circuito do tipo RLC com frequência de sintonia em torno de 7,1KHz também foi utilizado. As equações 4.1 e 4.2 foram usadas para calcular as frequências de corte dos circuitos RC e RLC respectivamente.

$$Fc = \frac{1}{2\pi RC}$$ Eq. 5.1

$$Fc = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$ Eq. 5.2

Além dos circuitos de teste são apresentados neste capítulo os resultados dos testes realizados nos dispositivos utilizados no microscópio de força atômica.

5.1 Circuito RC com frequência de corte na faixa de 100 Hz.

Para este circuito, arbitrando-se um valor de 10 KΩ para o resistor e 100 Hz para a frequência, pela equação 5.1 chega-se a um valor de 159 nF para o capacitor. O valor comercial mais próximo é 150 nF. O circuito foi montado como mostra a figura 5.1, em uma configuração do tipo passa-baixa, e em passa-alta como mostrado na figura 5.2.

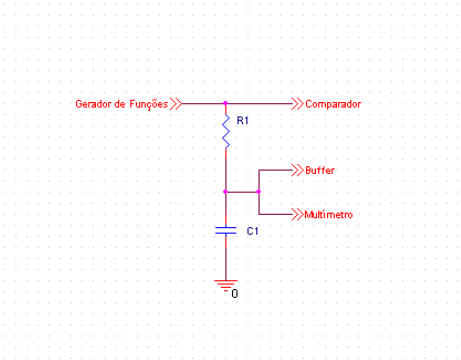


Fig. 5.40: Modelo do circuito passa-baixa usado para os testes.

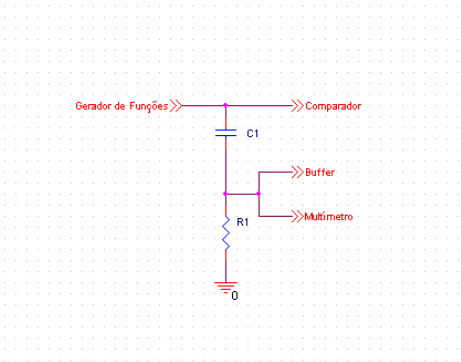


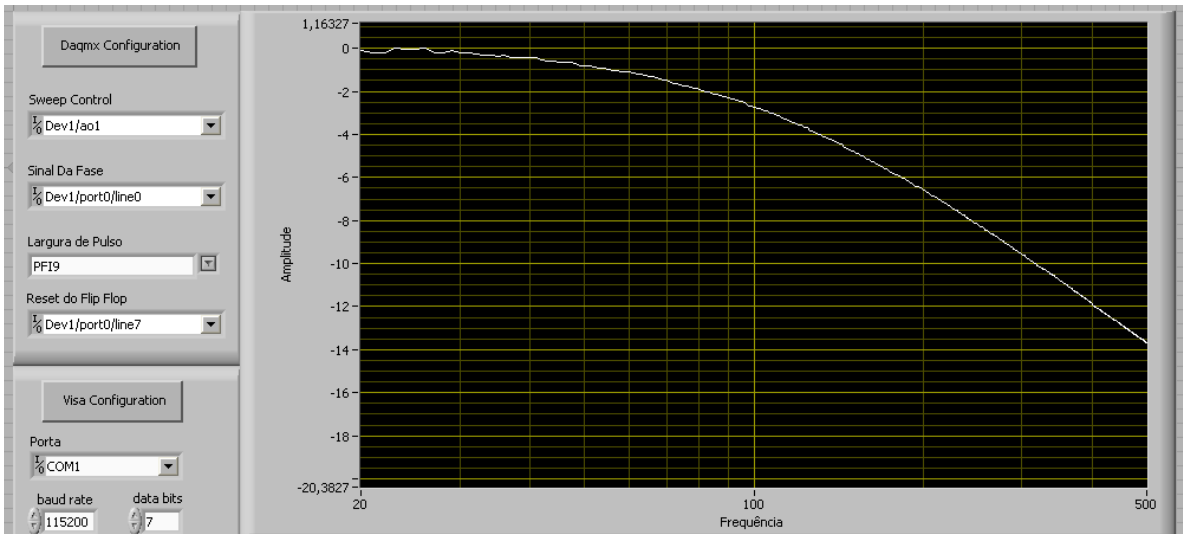
Fig. 5.41: Modelo do circuito passa-alta usado para os testes.

Os componentes utilizados foram medidos com um multímetro, obtendo-se assim seus valores reais. A tabela a seguir ilustra a relação entre os valores teóricos e reais dos componentes, bem como as respectivas frequências de corte do circuito RC montado com eles.

Valores	R1	C1	Frequência
Teórico	10 KΩ	159,15 nF	100 Hz
Real	9,89 KΩ	158 nF	101,85 Hz

Tabela 5.3: Valores teóricos e reais dos componentes usados no circuito de teste de frequência de teste 100 Hz.

Para a análise prática foi configurada uma varredura de 20 Hz até 500 Hz com um passo de 1 Hz e uma amplitude de 2 Vpp para o sinal senoidal na saída do gerador. Os resultados para o circuito configurado como passa-baixa podem ser observados na figura 5.3 e em detalhes na figura a 5.4. As figuras 5.5 e 5.6 ilustram os resultados para a configuração passa-alta.



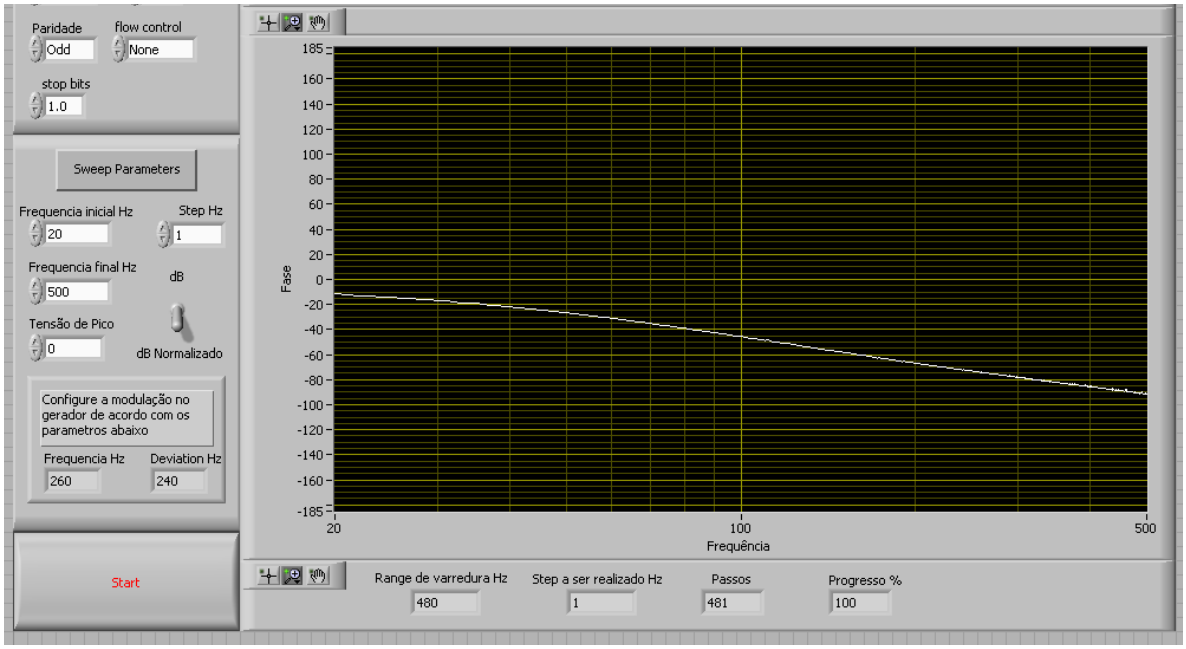
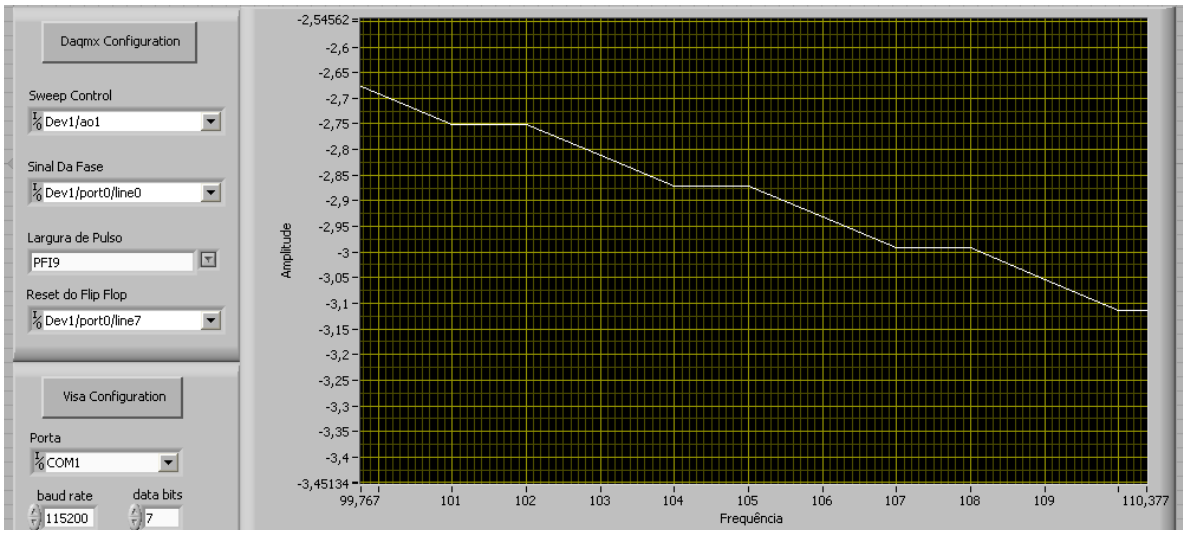


Fig. 5.42: Resposta em frequência do circuito passa-alta com frequência de corte em 100 Hz.



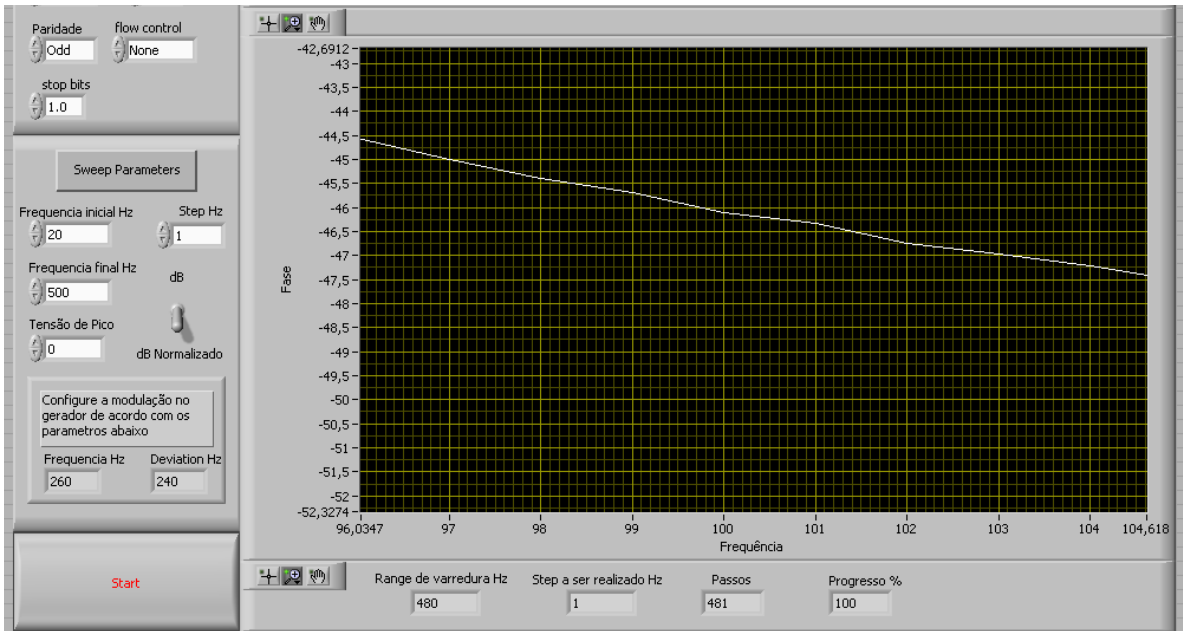
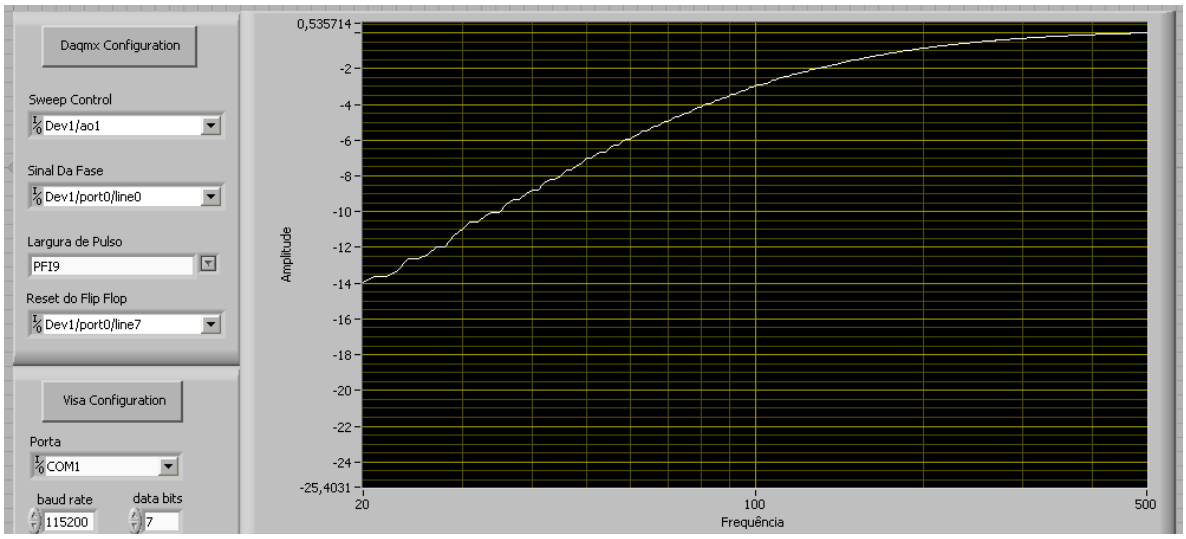


Fig. 5.43. Resultados em detalhes com a frequência de corte do circuito em destaque.



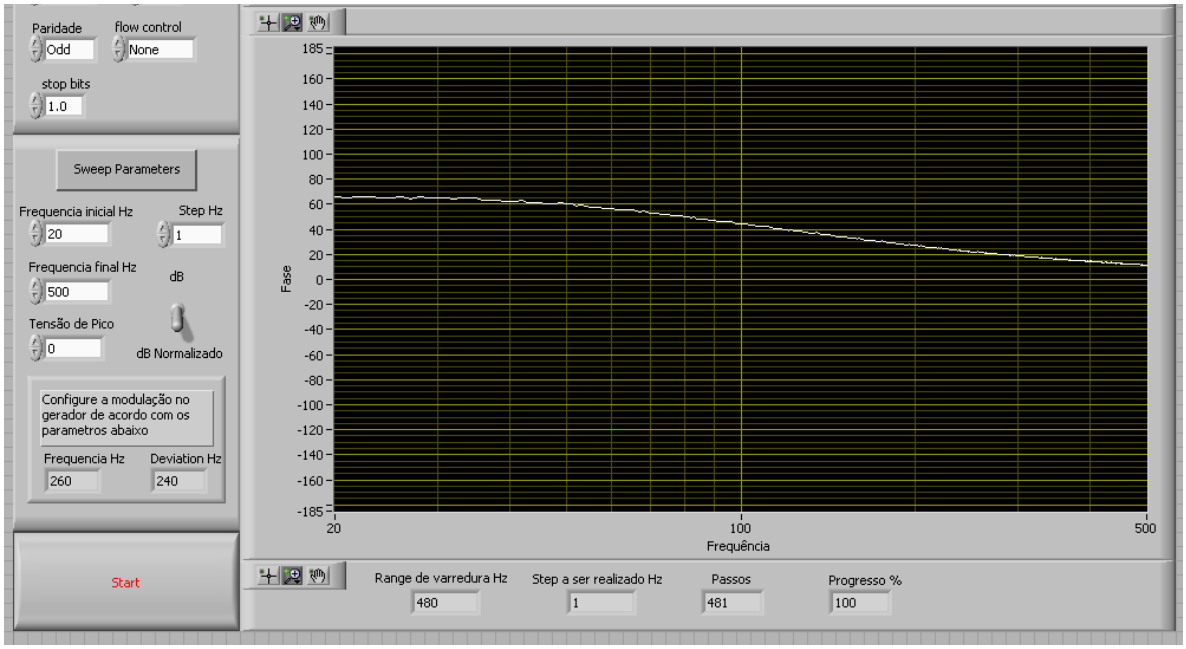
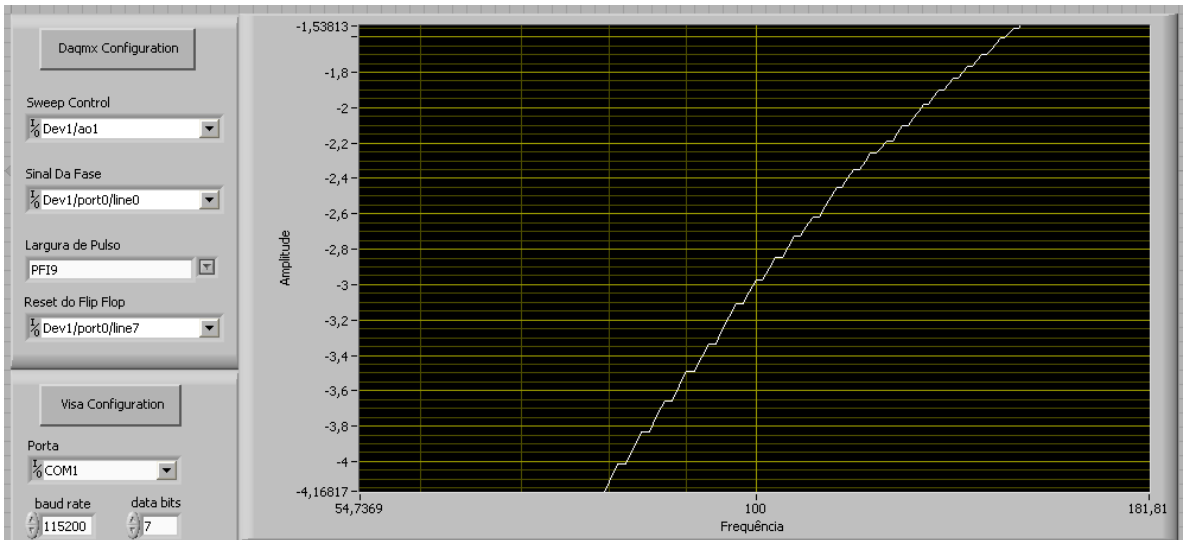


Fig. 5.44: Resposta do circuito passa-alta com frequência de corte em 100 Hz.



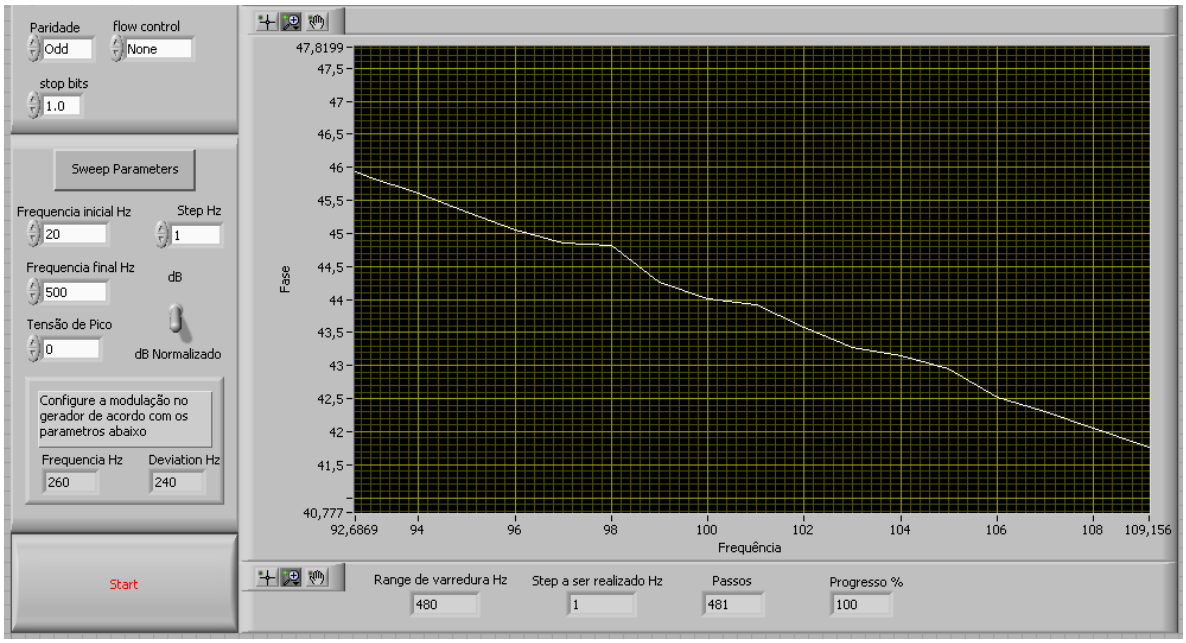


Fig. 5.45. Resultado com a frequência de corte em destaque.

Identificando-se a frequência de corte pelo ponto de -3dB e pelo ponto de -45° foram obtidos valores ligeiramente diferentes em torno de 5% do valor real da frequência de corte. A tabela 5.2 relaciona os valores reais e medidos e indica o erro nas medidas para o circuito do tipo passa-baixa, já a tabela 5.3

realiza o mesmo procedimento para o circuito do tipo passa-alta. Quando a resposta é vista em detalhes na figura 5.4 pode-se notar que alguns valores foram repetidos na leitura, por exemplo para as frequências de 101 Hz e 102 Hz. Isto pode ter resultado de uma string repetida enviada pelo multímetro ao aplicativo. Isto pode ser corrigido com o aumento do tempo que o aplicativo leva para buscar a *string* colocada pelo multímetro no buffer de leitura. Pode estimar-se, pelo formato da resposta que o erro gerado por este fato seja da ordem de 0,025 dB não influi significativamente nas medições.

Valor	Amplitude	Fase
Real	101,85	101,85
Medido	107	97
Erro %	5,05 %	4,76 %

Tabela 5.4. Erro porcentual entre o valor real e o valor medido para a frequência de corte no circuito do tipo passa-baixa.

Valor	Amplitude	Fase
Real	101,85	101,85
Medido	100	96
Erro %	1,56 %	5,74 %

Tabela 5.5: Erro porcentual medido a partir dos valores reais e medidos para a frequência de corte no circuito passa-alta.

5.2 Circuito RC com frequência de corte na faixa de 10KHz.

Para este circuito foi realizado um procedimento semelhante ao anterior. A tabela 4.4 compara os valores teóricos com os reais. com R1=1 KΩ e C1 = 15,9 nF

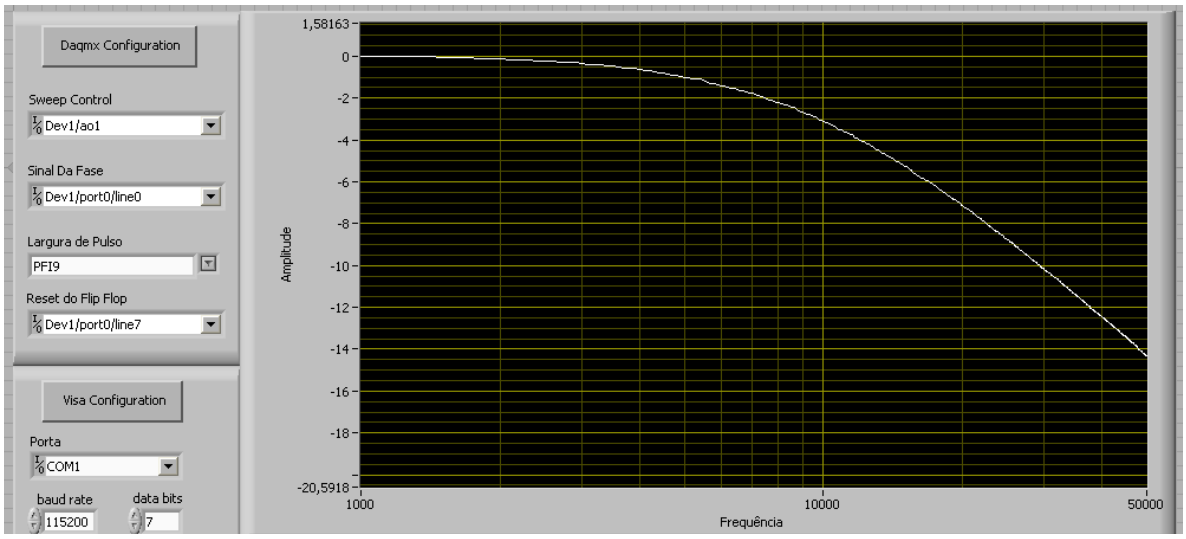
Valores reais: R1=0,99 KΩ C1 =15,8 nF

	R1	C1	Frequência
Teórico	1 KΩ	15,9 nF	10 KHz
Real	0,99 KΩ	15,8 nF	10,175 KHz

Tabela 5.6: Valores teóricos e valor real dos componentes e da frequência de corte para o circuito

Para esta análise foi configurada uma varredura desde 1 KHz até 50 KHz com passos de 100 Hz e amplitude de saída do sinal senoidal do gerador em 2 Vpp.

Os resultados obtidos encontram-se nas figuras 5.7 para a configuração passa-baixa (detalhes sobre a frequência de corte na figura 5.8) e na figura 5.9 para a configuração passa-alta (detalhes na figura 5.10). A comparação entre os valores reais e os valores medidos encontra-se na tabela 5.6 para o circuito passa-baixa e na tabela 5.7 para o circuito passa-alta.



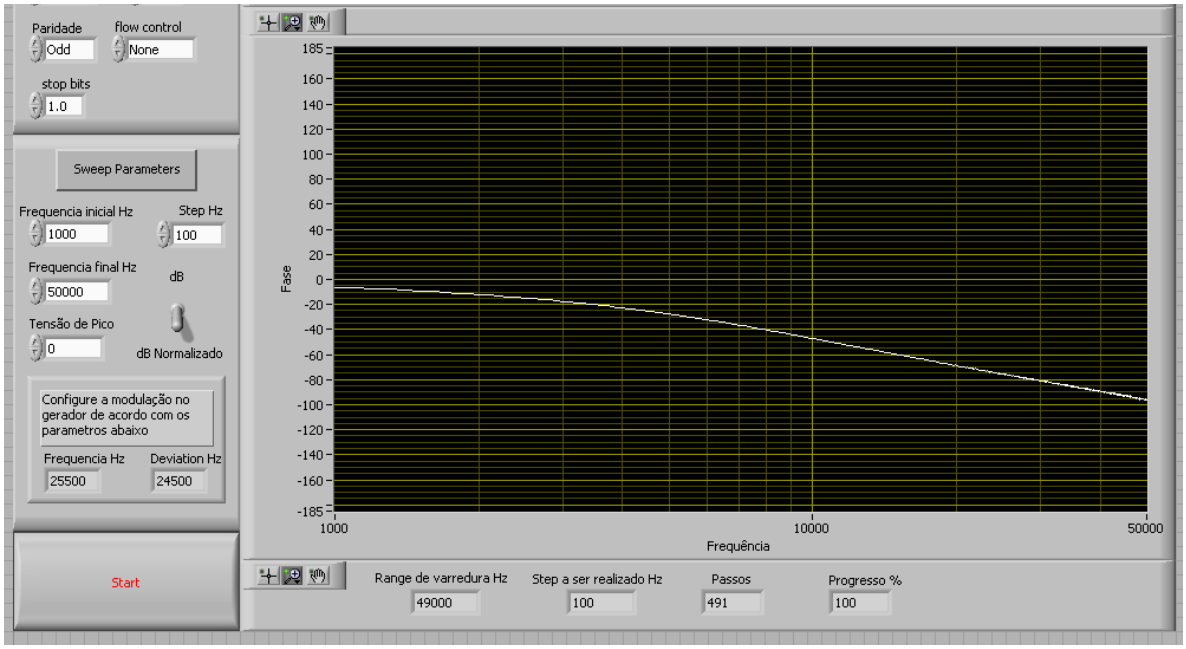
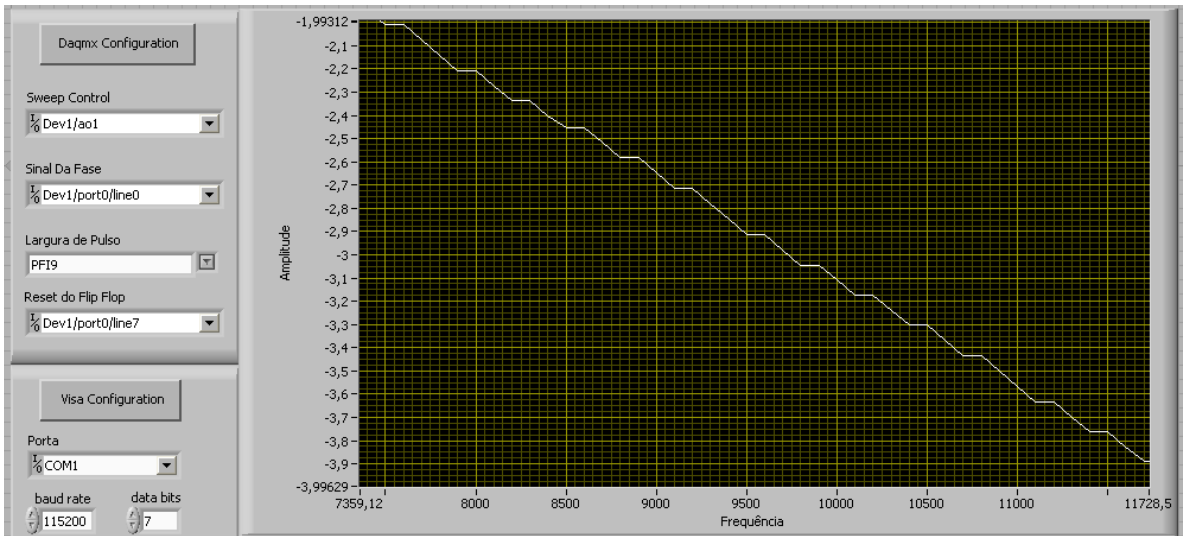


Fig. 5.46. Resultados para um circuito passa-baixa com frequência de corte em 10 KHz



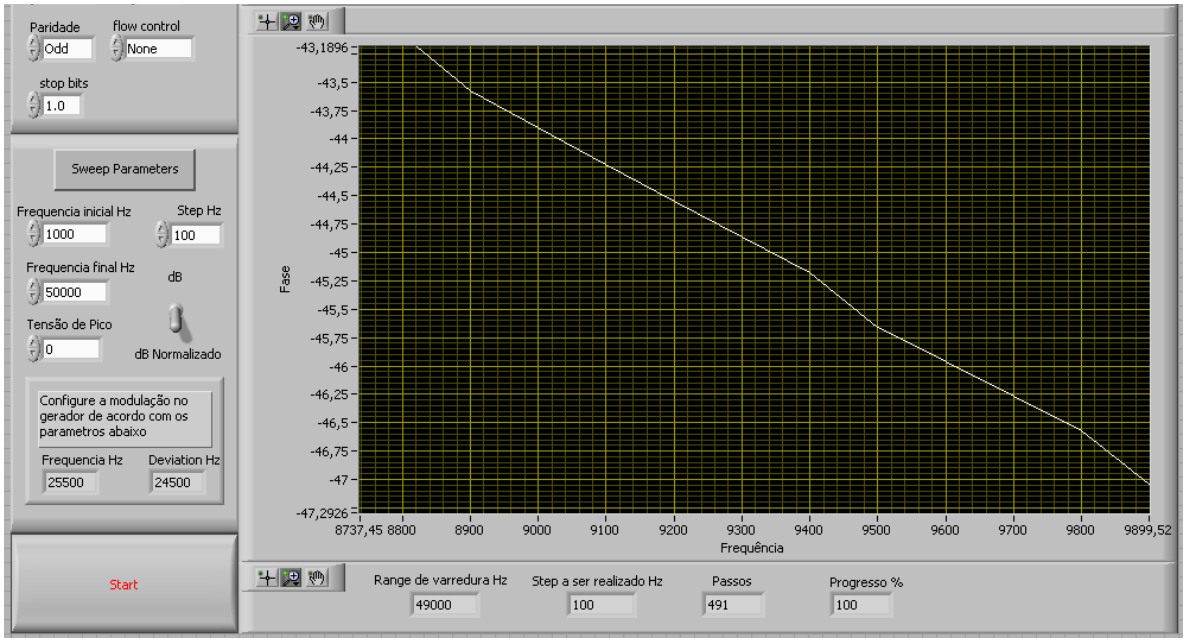
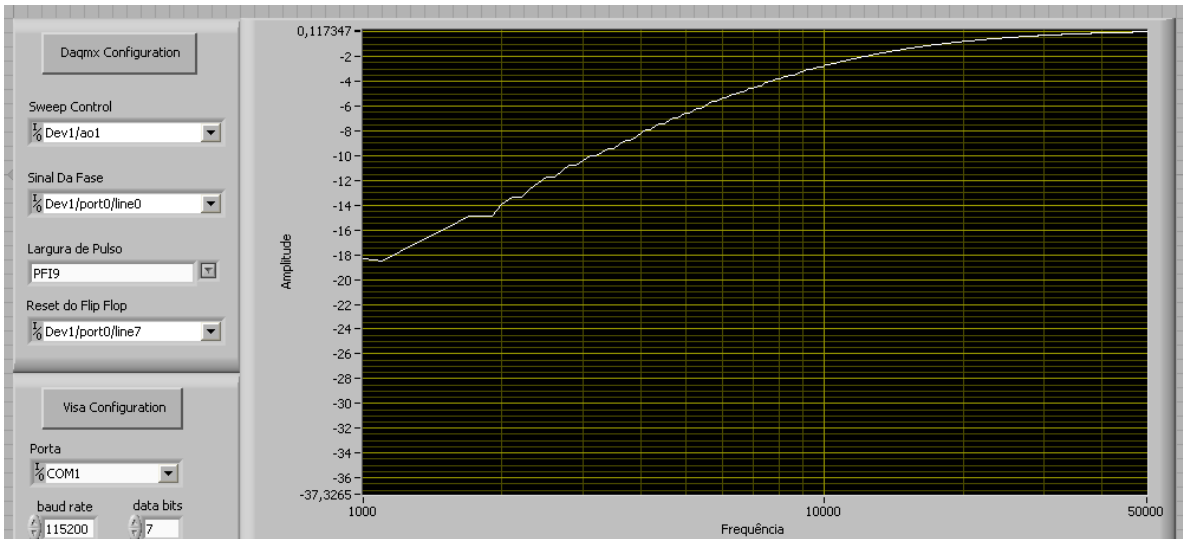


Fig. 5.47. Resultados com a frequência de corte realçada para o circuito do tipo passa-alta.



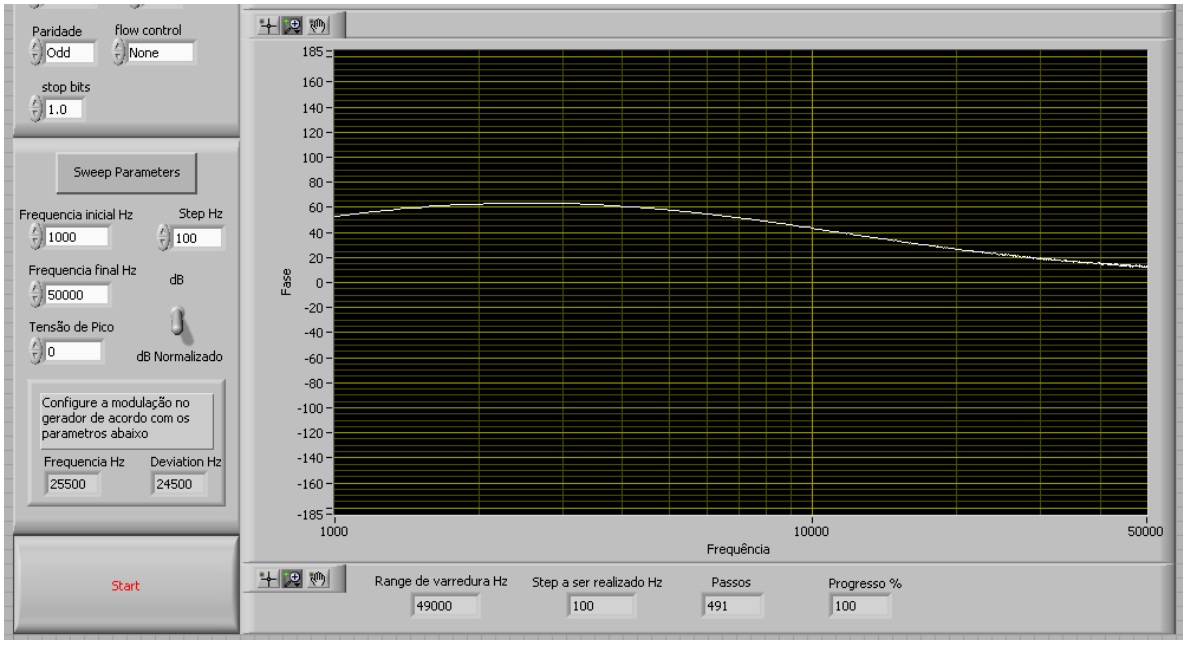
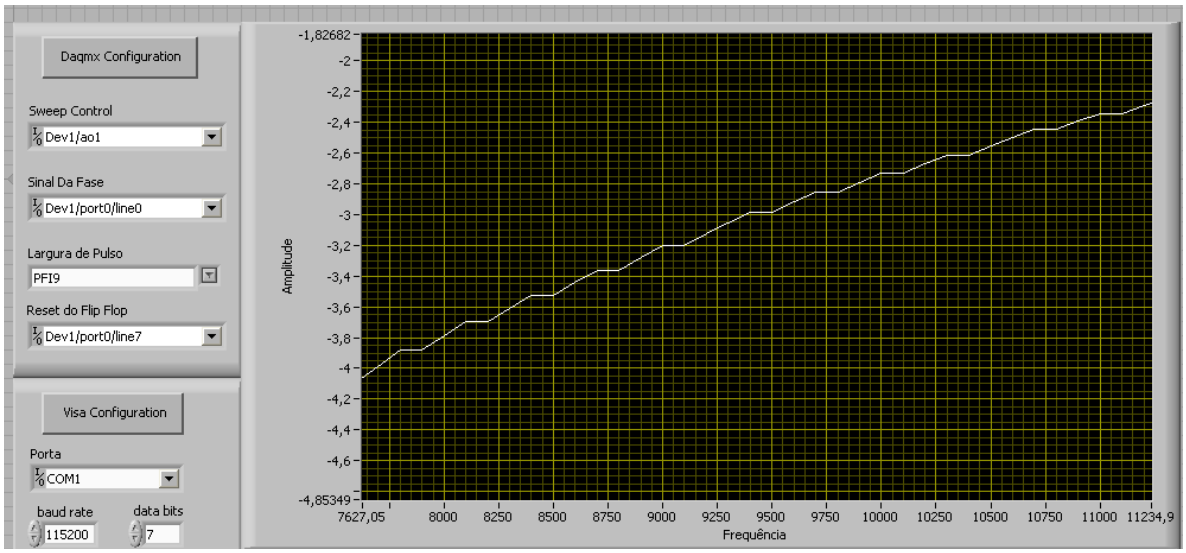


Fig. 5.48. Resposta de um circuito passa-alta com frequência de corte em 10 KHz.



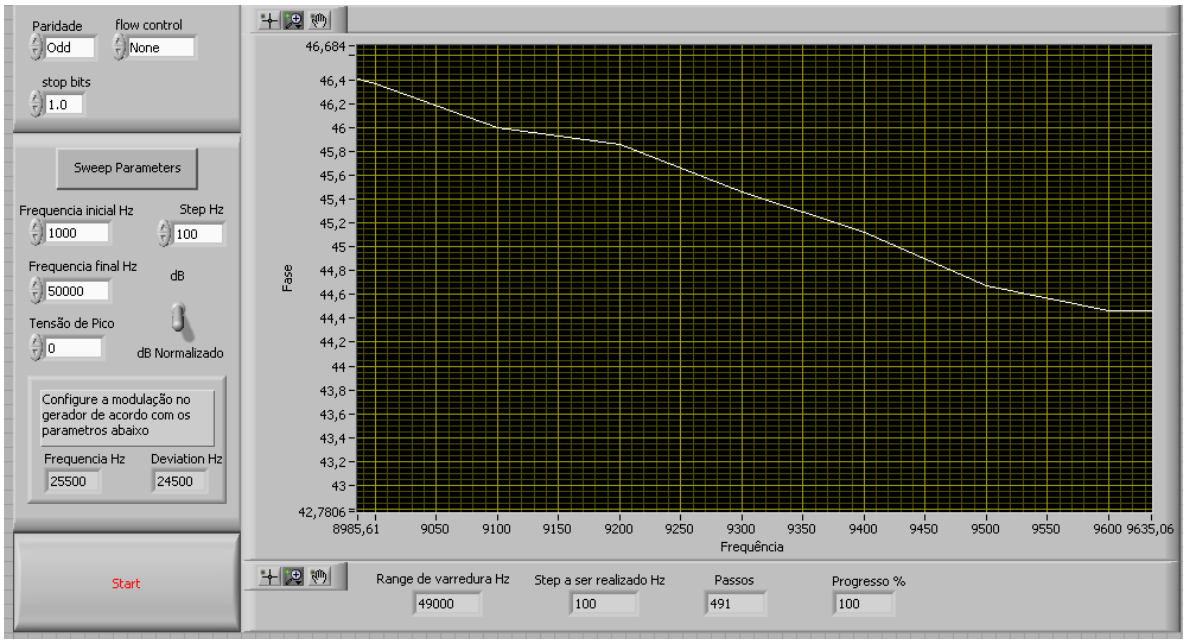


Fig. 5.49. Frequência de corte do circuito na configuração passa-alta.

Valor	Amplitude	Fase
Real	10,175 KHz	10,175 KHz
Medido	9,750 KHz	9,350 KHz
Erro %	5,05 %	4,76 %

Tabela 5.7. Erro porcentual entre o valor real e o valor medido para a frequência de corte para o circuito na configuração passa-baixa.

Valor	Amplitude	Fase
Real	10,175 KHz	10,175 KHz
Medido	9,5 KHz	9,425 KHz
Erro %	6,63 %	7,37 %

Tabela 5.8. Erro porcentual de acordo com a frequência de corte real e medida para o circuito na configuração do tipo passa-alta.

Quando analisada em detalhes a resposta de amplitude apresentou novamente alguns valores repetidos como no circuito anterior. A resposta de fase para este circuito quando testado na configuração passa-alta apresentou um comportamento diferente do esperado nos pontos de frequência mais baixa. O que se espera é que a fase tenda para 90° à medida que a frequência diminui. No entanto a fase deixa de se aproximar deste valor quando a frequência se aproxima de 1 KHz. Isto se deve ao fato de neste ponto o sinal de resposta do circuito estar muito atenuado e comparador não pode fazer uma detecção precisa do cruzamento por zero.

5.3 Resultados para o circuito RLC sintonizado em 7,1 KHz

Para este circuito de teste foi montado um circuito RLC sintonizado em aproximadamente 7,1 KHz. Os valores medidos dos componentes foram 710 uH para o indutor, 701 nF para o capacitor e 0,99 KΩ para o resistor. De acordo com a equação 5.2 a frequência de sintonia do circuito situa-se em 7,133 KHz.

Para esta análise foi selecionada uma varredura de 5 KHz a 10 KHz com passos de 10 Hz e uma amplitude do sinal senoidal de 5 Vpp. Os resultados encontram-se na figura 5.11.

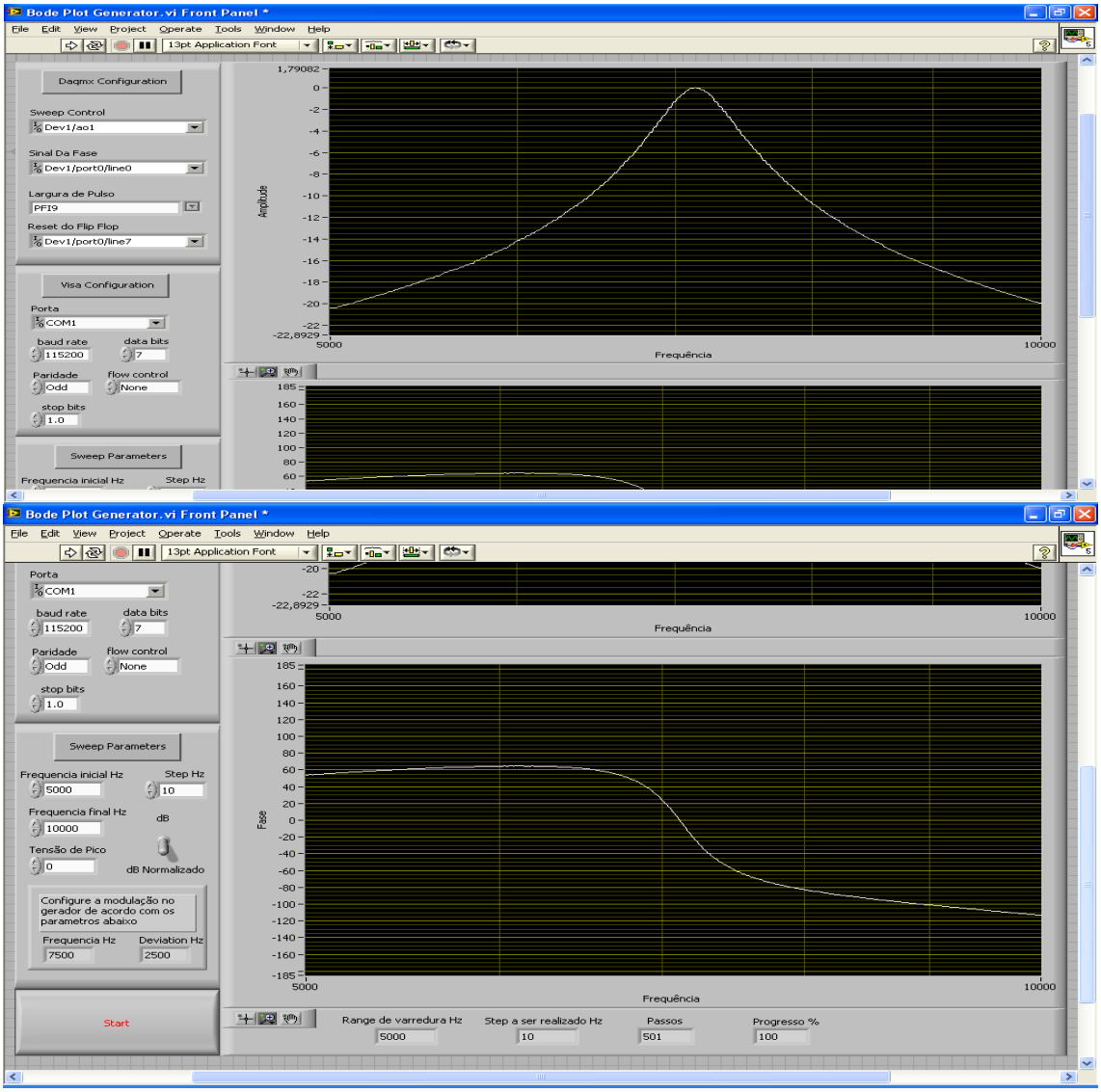
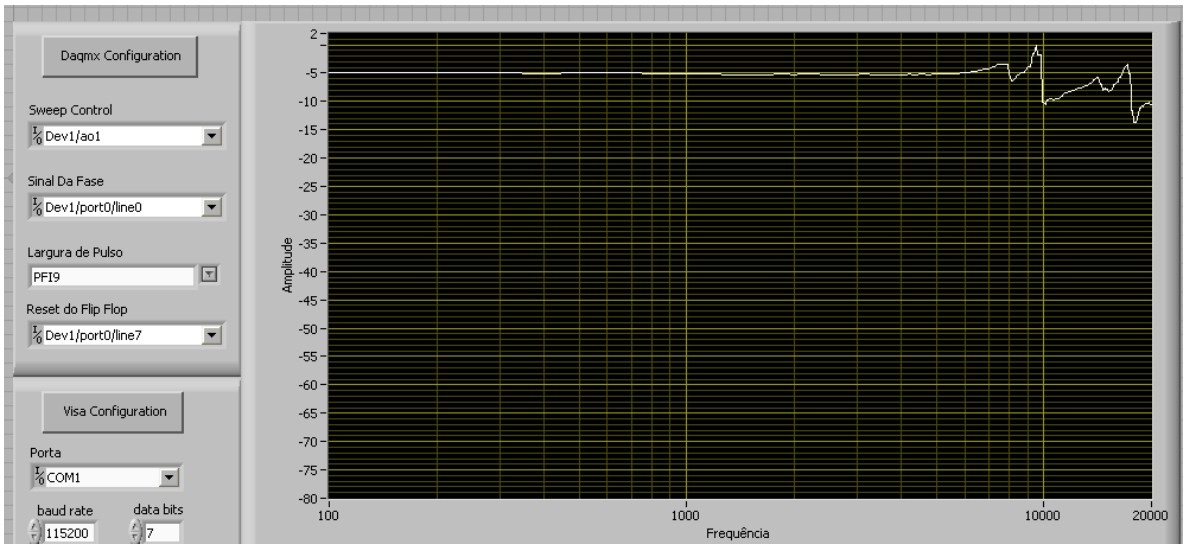


Fig. 5.50. Resultados para o circuito RLC sintonizado.

A resposta apresentou um aspecto muito próximo do esperado para este tipo de circuito. O pico no gráfico de amplitude coincidiu com a mudança na fase quando o circuito passa de capacitivo para indutivo.

5.4 Resultados das medições no microscópio de força atômica

Os testes realizados no microscópio de força atômica foram feitos com um sinal senoidal com amplitude de 2 Vpp em uma varredura de 1 KHz a 20 Hz. O sinal de resposta veio a partir de um sensor fotônico detectando a oscilação mecânica de um piezoelétrico. A varredura foi repetida diversas vezes apresentando sempre o mesmo resultado. O resultado de amplitude está de acordo com o esperado segundo o fabricante do piezoelétrico que informa a presença de um ressonância em torno de 9 KHz, no entanto a fase não condiz com este fato. Isto se deve ao sinal do fotodetector que apresentou uma amplitude muito pequena o que afeta a detecção de cruzamento por zero feita pelos comparadores, o que é essencial para a detecção da diferença de fase. Os resultados se encontram na figura 5.12.



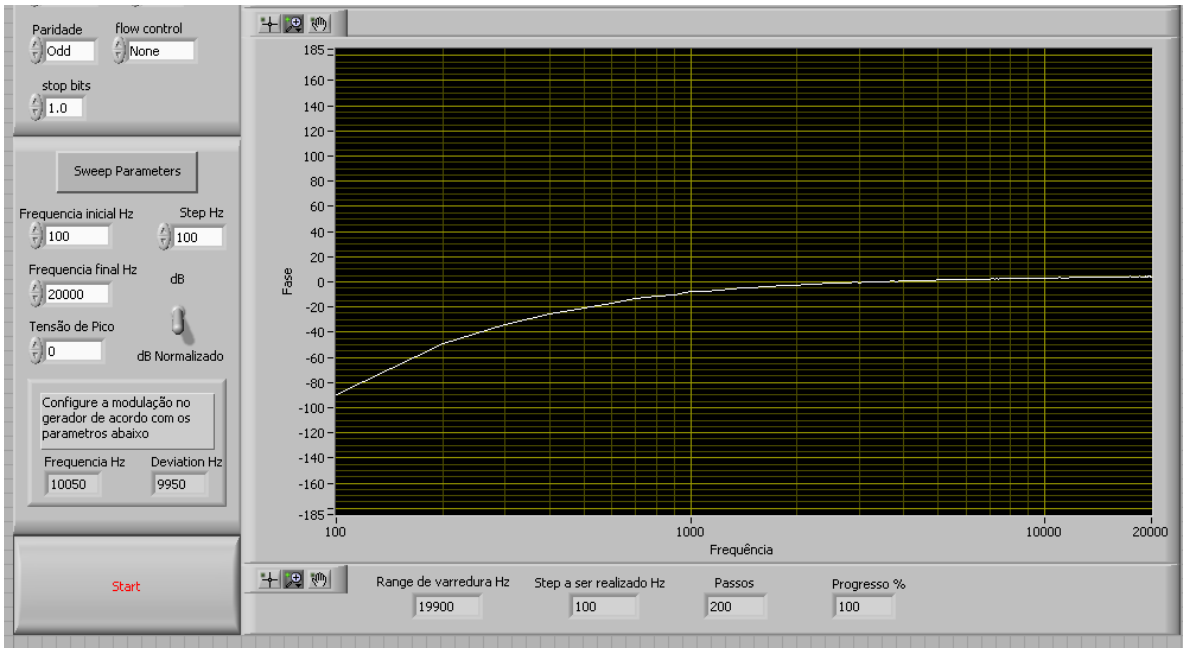


Fig. 5.51. Resultado do teste no microscópio de força atômica.

5.5 Comentários sobre os circuitos de teste

Para os circuitos RC testados foi possível perceber que os resultados para a amplitude e fase são coerentes com um erro em torno de 5% na maioria dos casos. Também é possível notar que o erro tende a crescer um pouco à medida que a frequência de corte se eleva. Isto se deve ao fato desta frequência estar mais próxima do valor limite para a utilização do AAF, 100 KHz.

O circuito sintonizado RLC ilustra o funcionamento do AAF em um momento de mudança brusca de diferença de fase. Este é um fator importante para confirmar o seu funcionamento.

Os testes realizados com o microscópio de força atômica servem como ilustração do funcionamento do AAF realizando o papel para o qual foi inicialmente idealizado.

Capítulo 6

6 Conclusão

A metodologia proposta para a análise da resposta em frequência de circuitos mostrou-se eficaz.

O equipamento desenvolvido se comportou bem ao medir circuitos de diferentes frequência de corte, apresentando resultados bem próximos aos esperados de acordo com a teoria. O equipamento ficará disponível para uso no LAINS, Laboratório de Instrumentação, na Divisão de Materiais do Inmetro.

A correção proposta para as medidas RMS do multímetro da Fluke foi tão eficaz que um aplicativo em LabVIEW será desenvolvido para uso exclusivo com este multímetro, expandindo sua banda de operação até 1 MHz.

Os maiores problemas no desenvolvimento do projeto foram causados pela falta de um hardware adequado. Por exemplo, quando se chegou à conclusão de que seria necessário o uso de dois comparadores de alta velocidade, a melhor opção depois de alguma pesquisa foi o integrado LM360, o qual demorou quase três semanas para ser entregue, pois teve que ser importado. Este tipo de demora e falta de disponibilidade imediata de componentes de primeira linha no mercado nacional acaba gerando atrasos desnecessários e impedindo que possíveis soluções alternativas sejam testadas em tempo hábil.

Na atual conjuntura o equipamento desenvolvido apresenta algumas limitações que podem ser contornadas, melhorando seu desempenho. Entre estas limitações está a sensibilidade do comparador implementado com o LM360 que pode detectar o cruzamento por zero de sinais de até 50mv de amplitude. A detecção da diferença de fase depende diretamente da obtenção de sinais em forma de onda quadrada fornecidos como resposta deste componente. Quando a resposta do circuito testado cair a um valor menor do que 50 mv de amplitude, a fase não poderá mais ser detectada, pois não será possível fornecer uma onda quadrada ao 74HC86. Um amplificador operacional mais robusto do que o TL084, com um *slew rate* mais adequado poderia ser configurado com um ganho 100 (combinado com um limitador para manter a tensão em um nível que não danifique o comparador) para manter a saída do circuito analisado em um nível que permita a geração de ondas quadradas.

Para um amplificador funcionar nestas condições sem distorcer a resposta do circuito em frequências altas como 100 KHz é necessário um slew rate da ordem de 1000V/us e um produto ganho banda de pelo menos 100 MHz.

Uma outra maneira de melhorar o desempenho do equipamento é o uso de uma placa de aquisição de dados mais robusta, que entre outras melhorias, possibilitaria a simplificação do circuito de medição de fase.

Apêndice A

Microscopia de Força Atômica

A.1 Técnicas de Microscopia

Com os constantes avanços da nanotecnologia e da nanociência, é imperativo para estas áreas do conhecimento que seja possível a visualização das estruturas envolvidas. Devido esta demanda, as técnicas de microscopia têm avançado com grande velocidade nos últimos anos. Dentre as técnicas mais utilizadas encontram-se as técnicas de SPM – *scanning probe microscopy*- ou microscopia de varredura por sonda.

A técnica SPM é um ramo da microscopia, que na verdade consiste de um conjunto de técnicas que seguem o mesmo princípio básico: a obtenção de uma imagem através do deslocamento de uma sonda sobre a superfície de uma amostra.

Existem diversos tipos de sonda, daí o conjunto de técnicas SPM. A primeira destas técnicas foi a STM, *Scanning Tunneling Microscopy*, criada em 1981 por Binnig e Rohrer na IBM-ZURICH, o que lhes conferiu o premio Nobel de Física em 1986 [3]. Nesta técnica um fenômeno conhecido como corrente de tunelamento, onde elétrons passam da ponta da sonda para a superfície da amostra ou vice versa é utilizado para se adquirir um perfil da superfície. A intensidade desta transferência depende de características físicas específicas de cada superfície.

O conjunto de técnicas SPM engloba vários outros tipos de sonda. Praticamente qualquer propriedade física pode dar origem a uma técnica de SPM.

Alguns exemplos de técnicas já utilizadas são:

- AFM, *atomic force microscopy*
    - *Contact* AFM;
    - *Non-contact* AFM;
    - *Dynamic contact* AFM;
    - *Tapping* AFM;

- EFM, *electrostatic force microscope*;
- ESTM *electrochemical scanning tunneling microscope*;
- FMM, *force modulation microscopy*;
- KPFM, kelvin *probe force microscopy*;
- MFM, *magnetic force microscopy*;
- MRFM, *magnetic resonance force microscopy*;
- NSOM, *near-field scanning optical microscopy* (ou SNOM, *scanning near-field optical microscopy*);
- PFM, *Piezo Force Microscopy*;
- PSTM, *photon scanning tunneling microscopy*;
- PTMS, *photothermal microspectroscopy/microscopy*;
- SAP, *scanning atom probe*;
- SECM, *scanning electrochemical microscopy*;
- SCM, *scanning capacitance microscopy*;
- SGM, *scanning gate microscopy*;
- SICM, *scanning ion-conductance microscopy*;
- SPSM *spin polarized scanning tunneling microscopy*;
- SThM, *scanning thermal microscopy*;
- STM, *scanning tunneling microscopy*;
- SVM, *scanning voltage microscopy*;
- SHPM, *scanning Hall probe microscopy*.

As técnicas mais largamente utilizadas são a de STM e AFM.

A.2 A Técnica de Microscopia de Força Atômica (AFM)

A técnica de AFM utiliza-se da interação de forças de atração e repulsão dos átomos da superfície da amostra com o átomo do extremo de uma ponta de prova (sonda). As forças predominantes nesta interação são as forças de Wan der Walls e as forças de Pauli. A haste nada mais é do que uma mola de reduzidas dimensões denominada *cantilever*, onde fica apoiada a ponta de prova (*tip*) responsável pela interação atômica. Estas estruturas podem ser vistas em detalhes nas figuras 3.1 e 3.2.

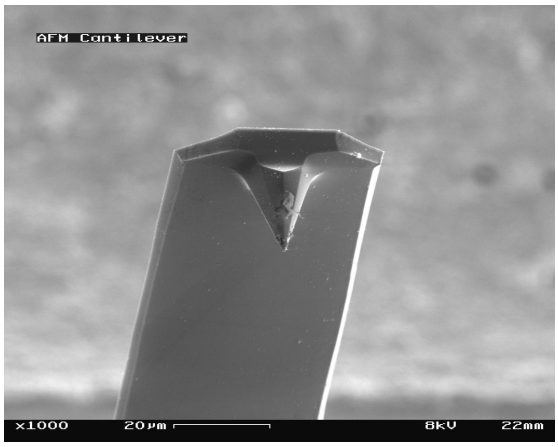


Fig. A.1. *Cantilever* e *Tip*.

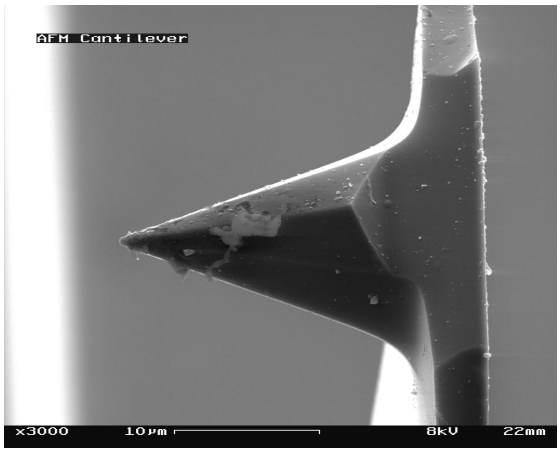


Fig. A.2. *Tip* em detalhes.

A técnica AFM é muito versátil e permite a realização de uma série de medidas que não são possíveis em outras técnicas de microscopia. Na microscopia eletrônica de transmissão por exemplo, as amostras devem ser cortadas em espessuras muito finas e recobertas com ouro antes que se possa fazer imagens. Diversas outras técnicas também necessitam que se fixe a amostra para análise. Na microscopia de força atômica as amostras podem ser observadas in vivo. Ou seja, é possível observar células vivas ou outras estruturas orgânicas sem a necessidade de corantes ou fixadores. Além da aquisição da topologia de uma amostra, gerando uma imagem tridimensional dela, é possível fazer medidas de rugosidade e dureza de superfícies mais rígidas como metais, medidas de força de ligação entre moléculas e elasticidade de polímeros, entre outras.

A.3 Funcionamento de um AFM

Embora novos métodos de controle tenham surgido e novas montagens sejam mais eficientes, o funcionamento de um AFM ainda é muito similar ao daqueles da primeira geração.

Em um AFM a amostra a ser analisada fica sobre uma plataforma apoiada em um tubo piezoelétrico. Este tubo, de acordo com diferenças de potencial em determinados pontos de sua estrutura, é capaz de realizar movimentos nos eixos X, Y e Z.

Acima da amostra fica situado o conjunto *cantilever-tip*. A amostra é aproximada deste conjunto até que as forças de interação atômicas entrem em ação. Um feixe de laser incide sobre a ponta do *cantilever*, que é coberta com uma camada de ouro. Este feixe é refletido sobre um fotodetector. A amostra é movida sobre o conjunto *cantilever-tip*, se houver uma elevação na superfície o *cantilever* será empurrado para cima e o feixe será desviado do centro do fotodetector. De maneira semelhante, se houver um vale o *cantilever* será puxado para baixo, deslocando o feixe do centro do fotodetector. O sinal deste detector é enviado a um circuito eletrônico que controla o tubo piezoelétrico que reposiciona a amostra de forma a trazer o feixe de laser para o centro do fotodetector e colocar o *cantilever* em uma situação de relaxamento novamente.

A figuras 3.3 ilustra uma esquema desta montagem e a figura 3.4 mostra a interação entre o *tip* e a superfície da amostra.

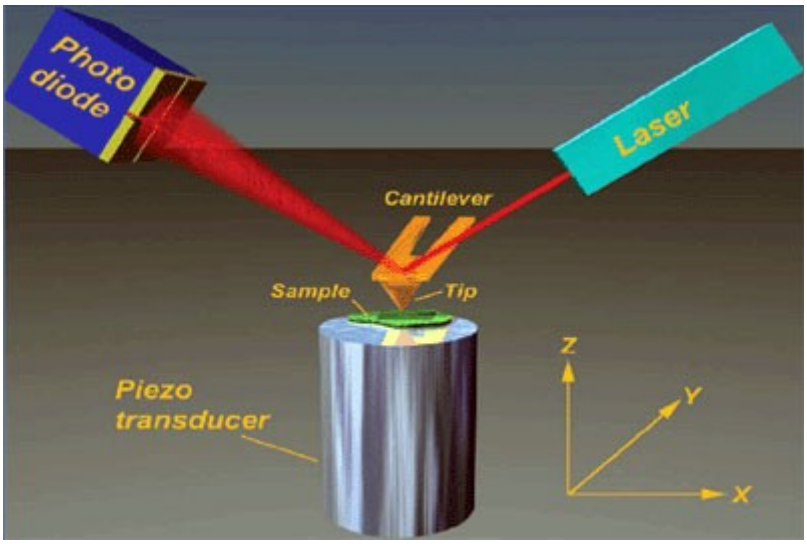


Fig. A.3. Esquema de funcionamento de um AFM.

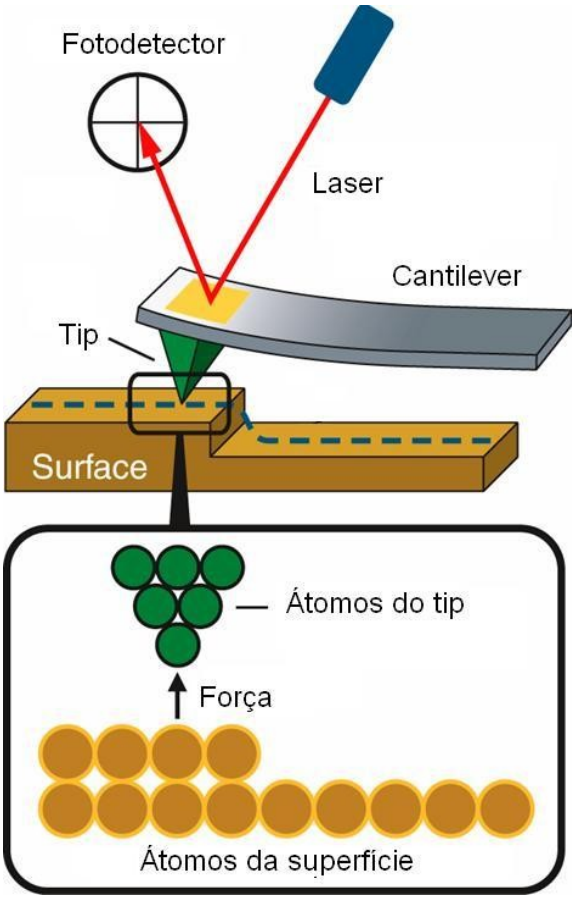


Fig. A.4. Interação entre o *tip* e os átomos da superfície da amostra.

A.4 Principais modos de operação de um AFM

A forma como o conjunto *cantilever-tip* se comporta durante a aquisição de uma imagem é chamada de modo de operação. Existem muitos modos de operação de um AFM. Três se destacam como os principais.

A figura A.5 ilustra um esquema básico dos três modos de operação mencionados.

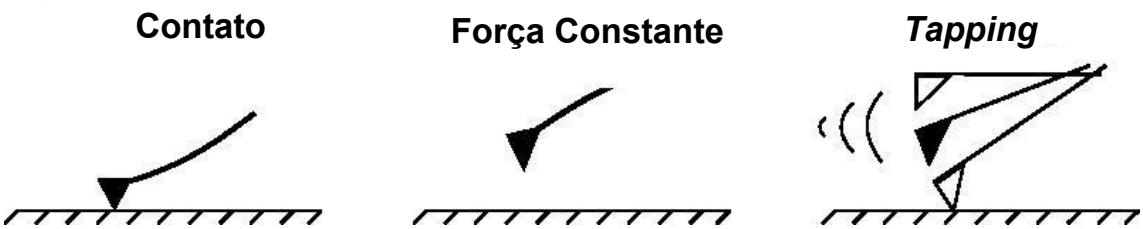


Fig. A.5. Principais modos de operação de um AFM.

A.4.1 Modo Contato

Neste modo o *tip* fica em contato constante com a amostra. O *cantilever* fica constantemente flexionado e a imagem é gerada de acordo com o grau de deflecção dele. É um método utilizado para amostras de elevada dureza e que não correm o risco de serem danificadas pelo *tip*. É muito utilizado para realizar medidas de rugosidade.

A.4.2 Modo Contato com Força Constante

Neste modo, o *cantilever* é aproximado até que as forças interatômicas entrem em ação.

Após ser iniciada a varredura, uma realimentação tenta manter constante a força de interação entre o *tip* e a amostra, através do reposicionamento da mesma. O feixe de laser, refletido na ponta do *cantilever* e incidente no fotodetector, informa a medida de elevação ou rebaixamento necessário para que seja mantida a força constante. Este modo tenta evitar que o *tip* entre em contato com a superfície analisada e é de particular interesse para aplicações biológicas onde normalmente as amostras são mais frágeis.

A.4.3 Modo *Tapping*

Este modo é parecido com o modo força constante, porém nele o *cantilever* fica constantemente vibrando. É um método útil para análises de amostras biológicas *in vivo*. Caso a realimentação não consiga reposicionar a amostra a tempo, pode ocorrer do *tip* encostar na superfície da amostra que está sendo analisada. Esta interação pode danificá-la. No modo *tapping*, este risco é minimizado.

A.5 Aplicações da Técnica AFM

A microscopia de força atômica encontra aplicações cada vez mais numerosas, principalmente na área da nanotecnologia. Áreas clássicas do conhecimento também vêm fazendo uso da técnica.

- Materiais
  - Medidas de dureza e rugosidade.
  - Elasticidade de polímeros

- Biologia
  - Análise de células vivas

- Química e Farmacêutica
  - Análise de enzimas, definindo formatos mais adequados a cada receptor, melhorando assim a eficiência de diversos medicamentos.

A.6 Microscópios da nova geração

Os microscópios mais antigos utilizam um tubo piezoelétrico para a movimentação da amostra nos eixos X, Y e Z. Embora esta tenha sido uma solução muito utilizada, apresenta alguns problemas. Dentre eles os mais evidentes são a interferência entre os eixos, conhecida como *cross-talk* e limitações quanto à frequência de resposta destes piezos tubulares. Atualmente há uma tendência dos novos microscópios em utilizar um conjunto de piezos menores (*stack piezos*) e independentes para cada eixo, minimizando o *cross-talk* e ampliando a faixa de frequências em que se pode trabalhar.

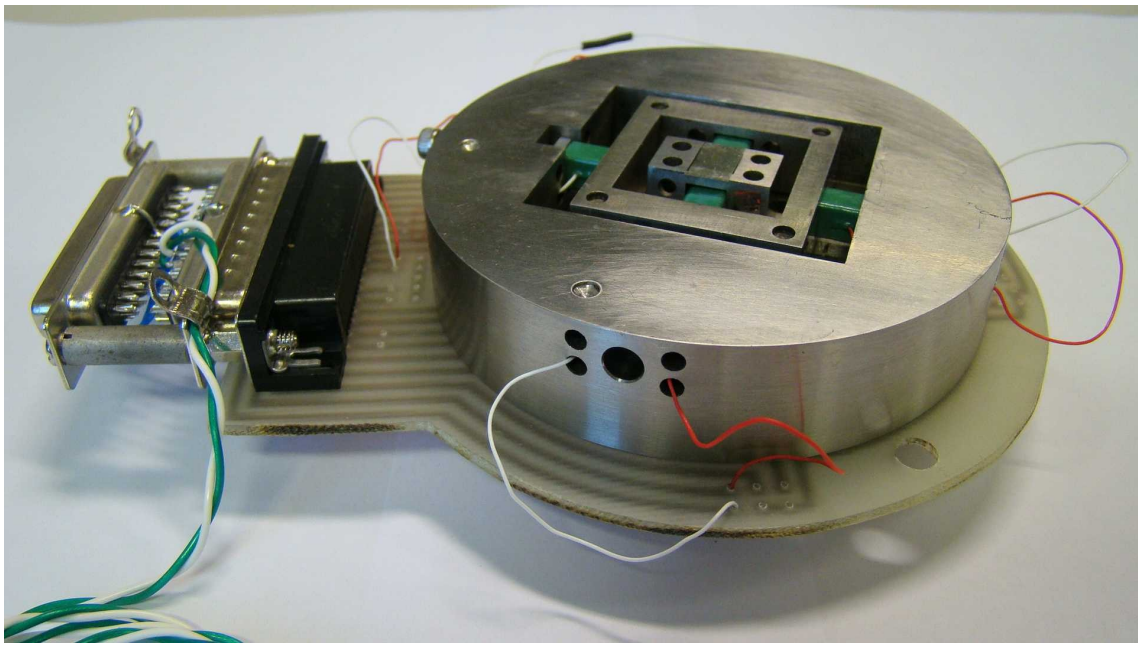


Fig. A.6. Scanner projetado no Laboratório de Instrumentação, LAINS, do Departamento de Metrologia de Materiais do Inmetro.

A.7 Microscopia de força atômica de alto desempenho (FAST-AFM)

Uma imagem obtida com um AFM convencional, leva de 5 a 15 minutos para ser completada, podendo levar mais dependendo da resolução e da extensão da varredura.

No campo biológico, é de grande interesse que possam ser visualizadas não somente as estruturas, mas também os processos que envolvem estas estruturas.

Para que processos dinâmicos possam ser observados, é preciso que imagens sejam obtidas em uma taxa muito maior do que aquelas mencionadas. Surge então a proposta de um AFM de alto desempenho, conhecido como *fast scanning* AFM.

Nesta técnica espera-se a aquisição de imagens a taxas que chegam a 30 quadros por segundo. Esse processo de aceleração na aquisição de dados gera uma série de restrições quanto ao controle da varredura mecânica e reposicionamento da amostra. Como a principal área de interesse para esta aplicação de alto desempenho é a área biológica, o reposicionamento da amostra torna-se crítico para que o material analisado não seja danificado pelo

tip. Sendo assim, o comportamento dos amplificadores e dispositivos piezoelétricos responsáveis pela varredura e reposicionamento da amostra precisa estar muito bem determinado para que uma estratégia de controle possa ser implementada.

Apêndice B

Tabelas Adicionais

	A	B1	B2	B3	B4	B5
100mv	1,03128	$-1,6589e^{-7}$	$1,89641e^{-12}$	$-6,54407e^{-18}$	$6,81795e^{-24}$	$-2,39472e^{-30}$
200mv	1,01572	$-1,12215e^{-7}$	$1,40212e^{-12}$	$-5,17182e^{-18}$	$5,35802e^{-24}$	$-1,84793e^{-30}$
300mv	1,02085	$-1,18461e^{-7}$	$1,4193e^{-12}$	$-5,23203e^{-18}$	$5,45905e^{-24}$	$-1,9012e^{-30}$
400mv	1,01769	$-1,14523e^{-7}$	$9,90826e^{-13}$	$-2,8762e^{-18}$	$2,5175e^{-24}$	$-7,61646e^{-31}$
500mv	1,0103	$-4,2762e^{-9}$	$2,67289e^{-13}$	$-9,89044e^{-19}$	$5,05127e^{-25}$	0
600mv	1,01282	$3,88946e^{-9}$	$2,4788e^{-13}$	$-9,66442e^{-19}$	$5,03734e^{-25}$	0
700mv	1,01446	$1,45642e^{-8}$	$1,97924e^{-13}$	$-8,66724e^{-19}$	$4,48812e^{-25}$	0
800mv	1,01094	$2,06331e^{-8}$	$1,94172e^{-13}$	$-8,6152e^{-19}$	$4,47327e^{-25}$	0
900mv	1,00984	$3,99926e^{-8}$	$1,51939e^{-13}$	$-8,22809e^{-19}$	$4,37156e^{-25}$	0
1v	1,01211	$1,93378e^{-8}$	$2,19689e^{-13}$	$-9,02851e^{-19}$	$4,70196e^{-25}$	0
1,5v	1,01457	$-8,4298e^{-8}$	$9,78237e^{-13}$	$-2,96438e^{-18}$	$2,82209e^{-24}$	$-9,48371e^{-31}$
2v	1,0143	$-7,96312e^{-8}$	$9,45762e^{-13}$	$-2,84958e^{-18}$	$2,67549e^{-24}$	$-8,86651e^{-31}$
3v	1,01331	$-7,77652e^{-8}$	$9,61659e^{-13}$	$-2,82323e^{-18}$	$2,59956e^{-24}$	$-8,47705e^{-31}$
4v	1,01526	$-9,10896e^{-8}$	$5,81334e^{-13}$	$-1,60388e^{-18}$	$1,13022e^{-24}$	$-2,56913e^{-31}$
5v	1,01347	$-7,65522e^{-8}$	$5,63665e^{-13}$	$-1,57285e^{-18}$	$1,14447e^{-24}$	$-2,7895e^{-31}$
7,5v	1,0139	$-7,30856e^{-8}$	$5,88852e^{-13}$	$-1,57662e^{-18}$	$1,13361e^{-24}$	$-2,69844e^{-31}$
10v	1,01102	$-7,09963e^{-8}$	$6,01861e^{-13}$	$-1,58622e^{-18}$	$1,13832e^{-24}$	$-2,69227e^{-31}$

Tabela B.1. Coeficientes das curvas de calibração do multímetro.

Analog Input

Number of Channels	16 SE/8 DI
Sample Rate	200 kS/s
Resolution	16 bits
Simultaneous Sampling	No
Maximum Voltage Range	-10..10 V

Range Accuracy	7.56 mV
Minimum Voltage Range	-50..50 mV
Range Accuracy	0.0611 mV
Number of Ranges	4
On-Board Memory	512 samples
Analog Output	
Number of Channels	2
Update Rate	10 kS/s
Resolution	16 bits
Maximum Voltage Range	-10..10 V
Range Accuracy	2.417 mV
Minimum Voltage Range	-10..10 V
Range Accuracy	2.417 mV
Current Drive (Channel/Total)	5 mA

Tabela B.2. Principais características da placa de aquisição de dados.

AAC	Corrente AC
ADC	Corrente DC
CONT	Teste de continuidade
DIODE	Teste de diodo
FREQ	Frequência
OHMS	Resistência
VAC	Voltagem AC
VDC	Voltagem DC
AUTO	Coloca o multímetro em um modo de automático de seleção de faixa de voltagem
AUTO?	Indica se o modo automático de seleção de faixa está ligado ou desligado

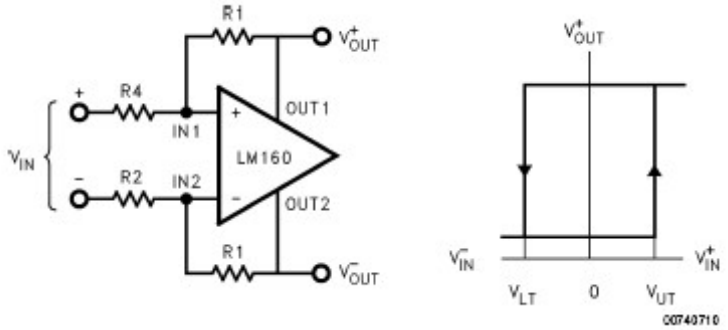
RANGE <range>	Seleciona a faixa de operação do multímetro
RATE <speed>	Seleciona a taxa com que as medidas são feitas. O campo <speed> pode ser substituído por S para 2,5 medidas por segundo, M para 5 medidas por segundo ou F para 20 medidas por segundo.
RATE?	Indica a taxa de amostragem atual do multímetro

Tabela B.3. Principais comandos do multímetro.

Apêndice C

Application Notes

C.1 Trecho do *Application Note* 87



$$V_{UT} = V_{OH}\left(\frac{R2}{R1}\right) - V_{OL}\left(\frac{R4}{R3}\right)$$

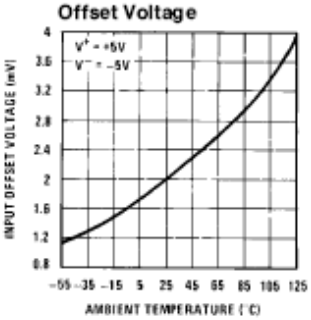
$$V_{LT} = V_{OL}\left(\frac{R2}{R1}\right) - V_{OH}\left(\frac{R4}{R3}\right)$$

Apêndice D

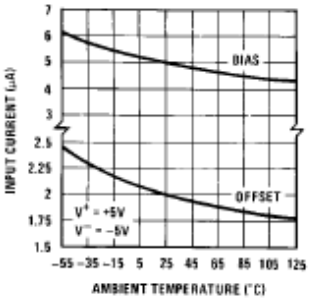
Datasheets

D.1 Principais características elétricas do LM360

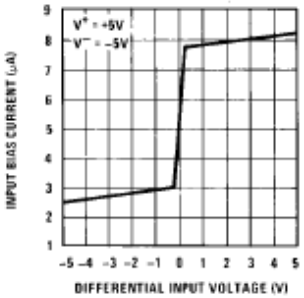
Offset Voltage



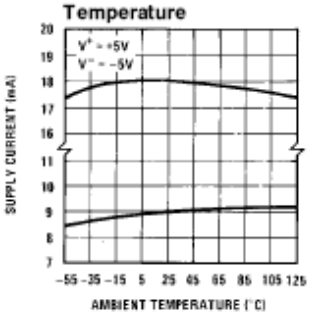
Input Currents vs Ambient Temperature



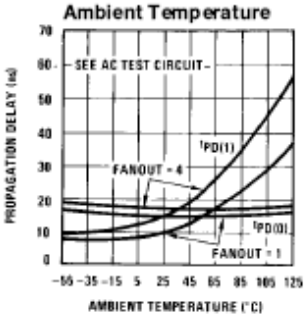
Input Characteristics



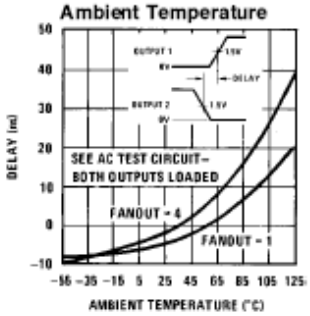
Supply Current vs Ambient Temperature



Propagation Delay vs Ambient Temperature



Delay of Output 1 With Respect to Output 2 vs Ambient Temperature



Apêndice E

Aplicativo de Controle e Aquisição de Dados

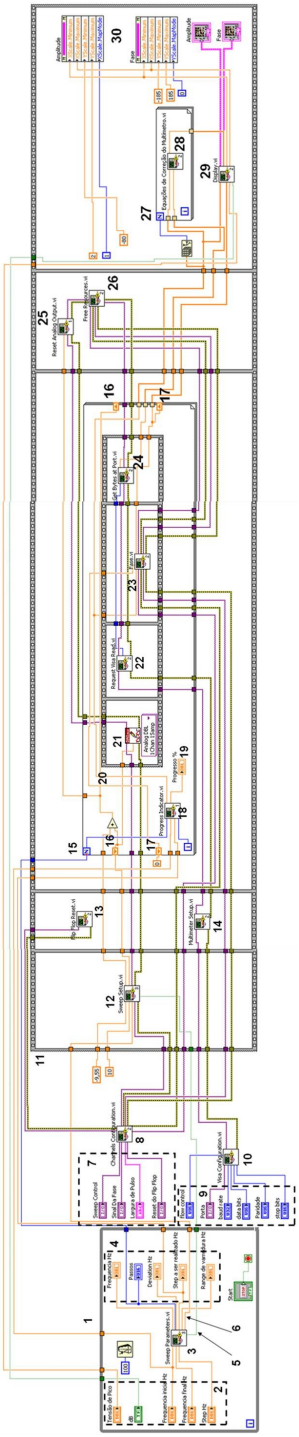


Fig. E.1. Diagrama de blocos do aplicativo principal

E.1 Análise da lógica de controle a partir do diagrama de blocos

Os aplicativos em LabVIEW apresentam um fluxo de dados da esquerda para direita no diagrama de blocos. O aplicativo desenvolvido será percorrido neste sentido e será detalhadamente explicado conforme a numeração da figura E.1.

Para uma melhor visualização, o diagrama foi separado em 3 partes que serão mostradas à medida que se for avançando no diagrama de blocos. A primeira parte é mostrada na figura E.2.

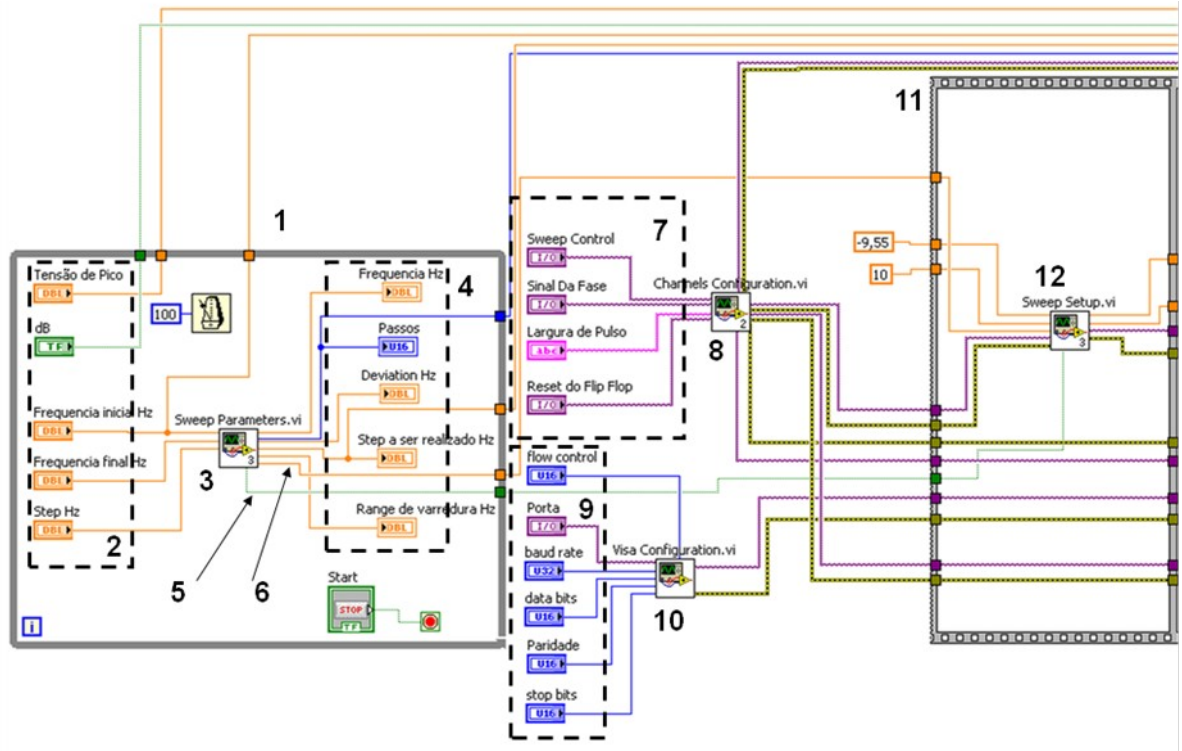


Fig. E.2. Primeira parte do diagrama de blocos.

1) A estrutura é um *loop* de repetição do tipo *while*, que se repete a cada 100 ms (valor controlado pela caixa numerada ao lado do metrônomo). A cada repetição o programa verifica se o botão "*start*" foi pressionado. Caso tenha sido, a repetição para e os valores são enviados às outras partes do diagrama de blocos;
2) Os valores destacados pela linha tracejada são parâmetros de entrada fornecidos pelo usuário e que vão controlar o procedimento. Estes valores são constantemente lidos a cada iteração do *loop while* e são enviados ao SubVI "*Sweep Parameters*";

3) *Sweep Parameters* SubVI.

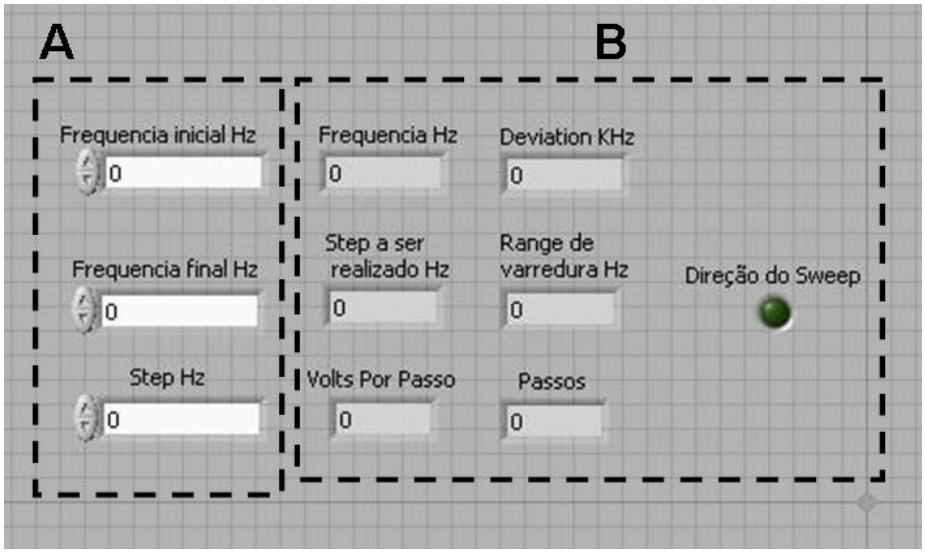


Fig. E.3. Painel frontal do SubVI *Sweep Parameters*.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

Todo SubVI precisa de um painel frontal, mesmo que os dados presentes nele não sejam diretamente acessados pelo usuário, pois é através deste painel que as conexões externas do SubVI são geradas.

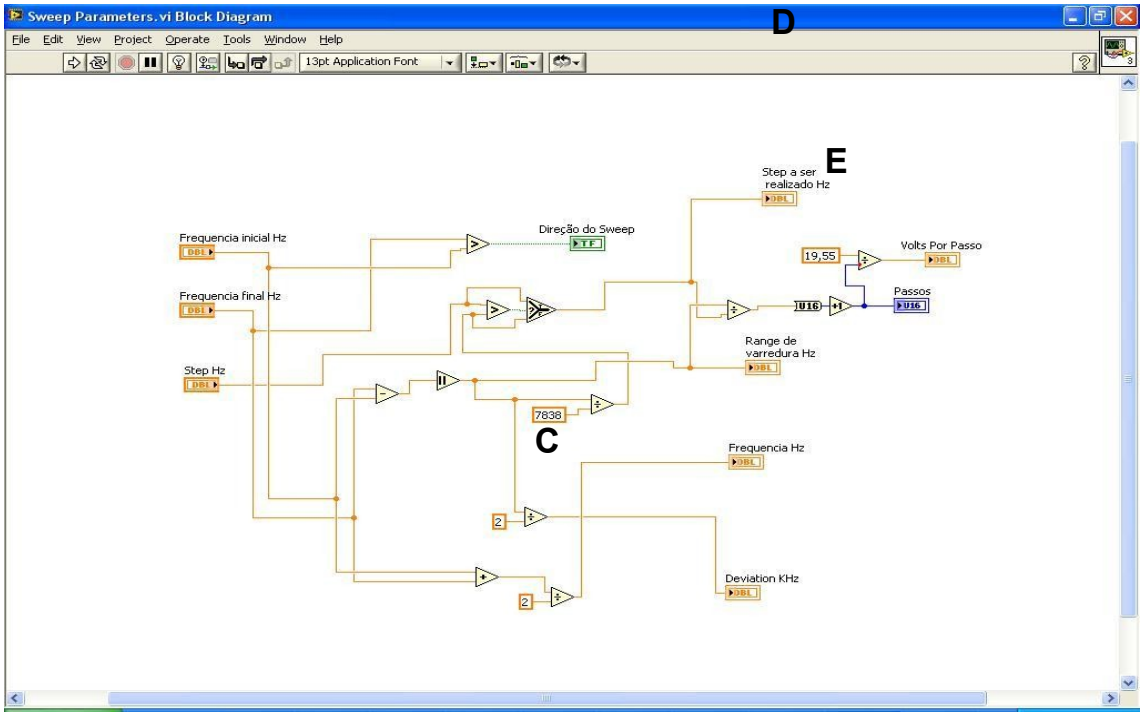


Fig. E.4. Diagrama de blocos do SubVI *Sweep Parameters*.

C) Este valor corresponde ao número máximo de passos possíveis do sinal analógico de tensão que controla a modulação do gerador de funções. Cada passo corresponde a 2,5 mV;

D) O valor "*step a ser realizado*" corresponde a um limite mínimo para cada salto de frequência, este valor corresponde ao módulo da diferença entre a frequência final e a inicial dividido pelo número máximo de passos (7838). Este valor é utilizado como passo da varredura se o valor escolhido pelo usuário para cada passo de frequência for menor do que ele;

E) *Range* total de voltagem na saída da placa, que vai de -9,55 V (devido a características do gerador de funções) até +10 V.

4) Valores de saída que precisam ser informados ao usuário, como por exemplo os parâmetros que precisam ser ajustados no gerador de funções. Estes valores são atualizados a cada iteração do *loop while* indicado pelo número 1, até que o botão "*start*" seja pressionado. Os fios que saem da estrutura de *loop* só passam os dados para os próximos componentes do diagrama de blocos após o término da execução do *loop*;

5) Sinal do tipo booleano que indica o sentido da varredura de frequência. Embora não seja um procedimento comum, o usuário pode querer realizar um experimento começando com um valor de alta frequência e terminando com um valor de baixa frequência. Este componente informa se a varredura é crescente ou decrescente;

6) Valor que indica qual incremento de voltagem corresponde ao incremento de frequência a ser realizado. Este é um parâmetro usado para a geração do sinal de controle que é enviado ao gerador de funções;

7) Valores conectados ao painel frontal (*DAQmx Configuration*). Informados pelo usuário, correspondem aos canais da placa a serem utilizados para as medidas;

8) *Channels Configuration* SubVI;

O painel frontal deste SubVI não executa nenhuma função que necessite ser exibida para o usuário. Na verdade as operações realizadas por ele poderiam estar no diagrama de blocos principal, mas por uma questão de organização, foram colocados em um SubVI.

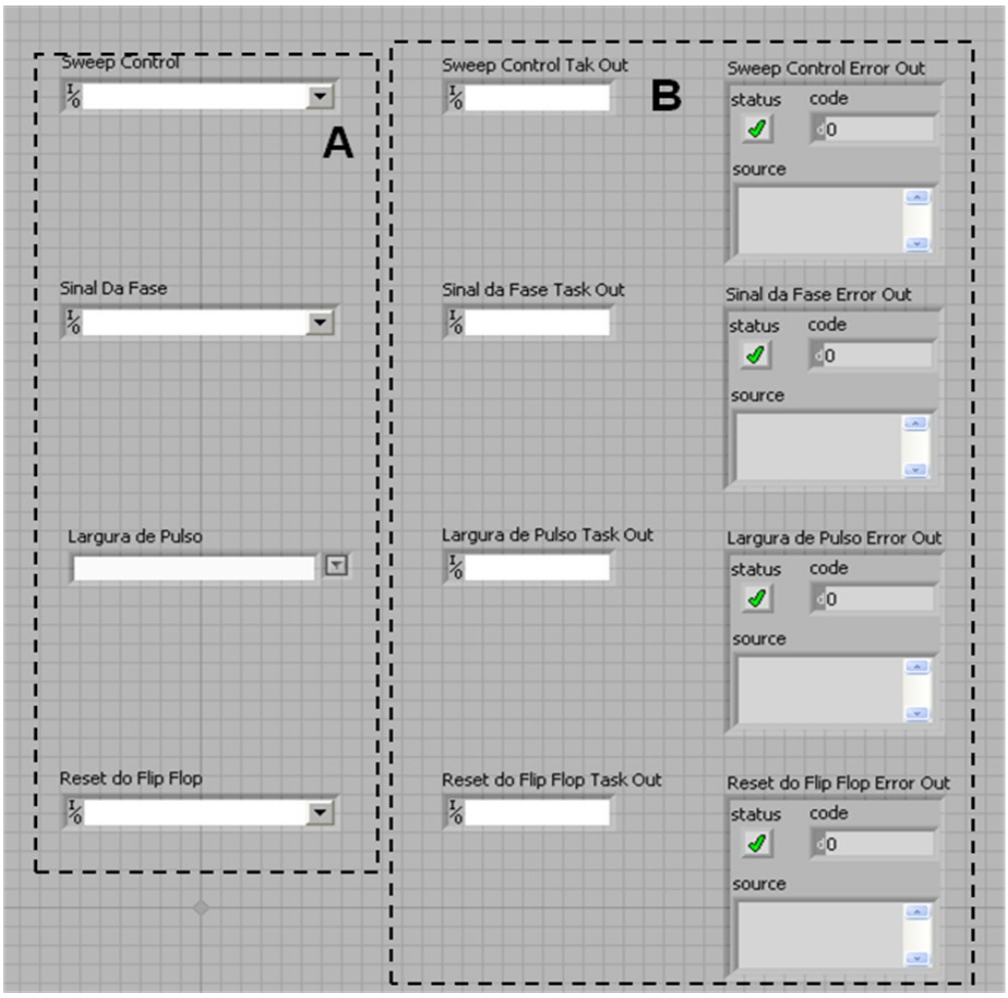


Fig. E.5. Painel frontal do SubVI *Channels Configuration*.

A) Parâmetros de entrada. Correspondem aos valores contidos no campo *DAQmx Configuration* no painel frontal do aplicativo principal;

B) Parâmetros de saída, usados em pontos mais adiante do diagrama de blocos para informar a configuração de cada canal e que tarefa deverá ser realizada, aquisição analógica ou digital, geração de sinal, e etc.

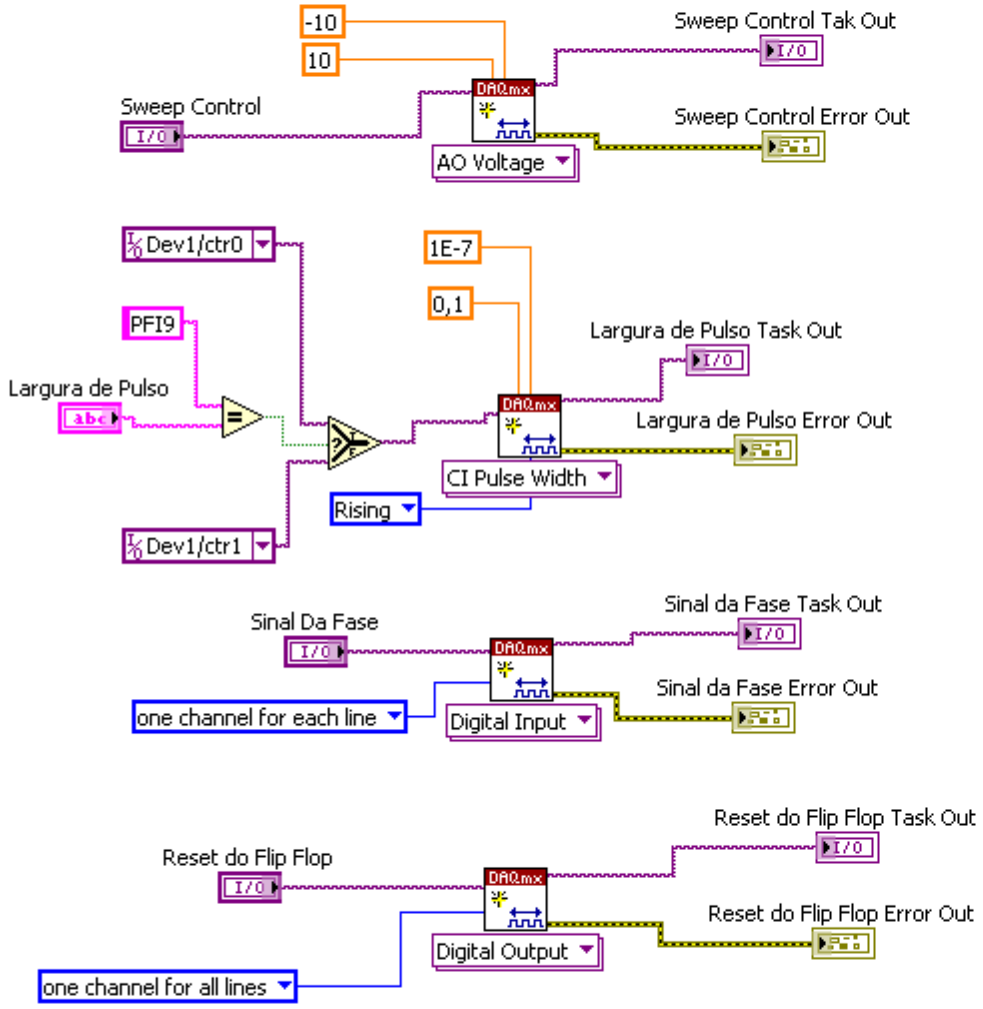


Fig. E.6. Diagrama de blocos do SubVI *Channels Configuration* contendo os valores de configuração de cada canal. Alguns valores são fixos e não podem ser selecionados pelo usuário.

9) Parâmetros de configuração da comunicação RS232 entre o multímetro e o LabVIEW;

10)Visa Configuration SubVI.

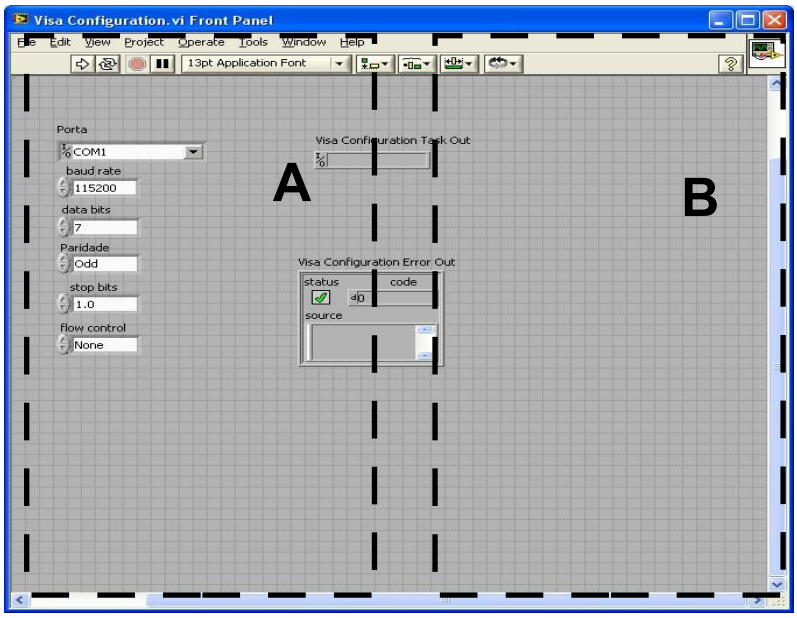


Fig. E.7. SubVI Visa Configuration responsável por configurar os parâmetros da comunicação serial entre o multímetro e o LabVIEW.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

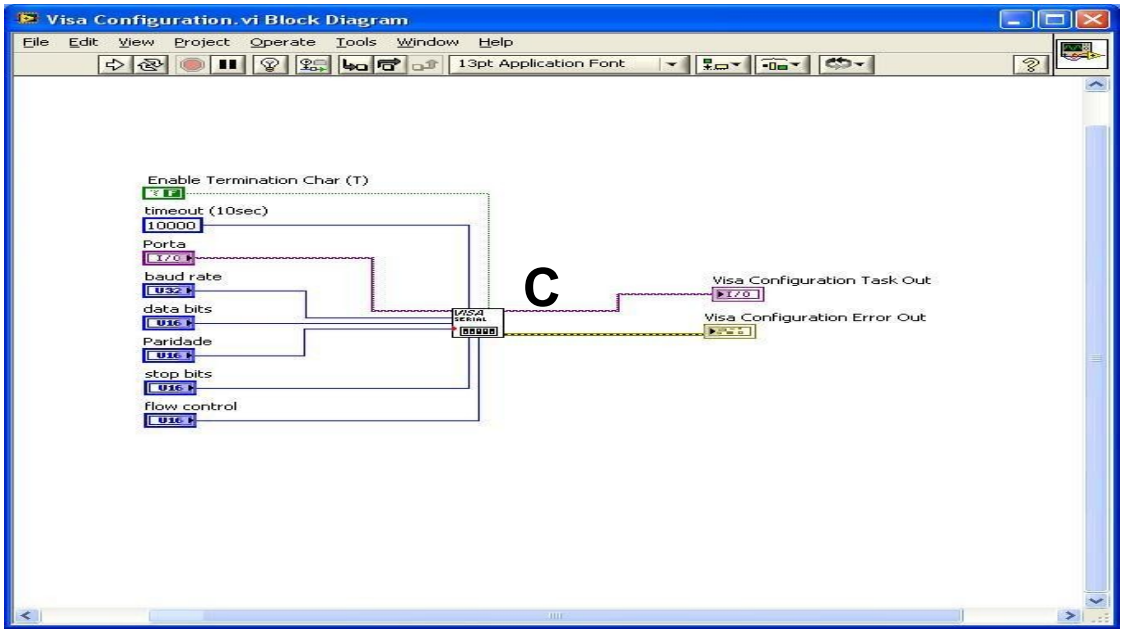


Fig. E.8. Diagrama de blocos do SubVI Visa Configuration.

C) Este bloco é o responsável por configurar a porta serial para a comunicação, de acordo com os parâmetros informados.

11) Estrutura do tipo sequência plana. Esta estrutura, que lembra o formato de um filme, executa um quadro de cada vez, em ordem e da esquerda para a direita. É uma estrutura muito útil para que blocos ou funções que utilizam recursos compartilhados da placa não tentem fazê-lo ao mesmo tempo, o que geraria um erro em tempo de execução;

12) *Sweep Setup* SubVI. Este SubVI recebe as informações passadas pelo usuário, bem como constantes de configuração do aplicativo e prepara a saída analógica para a execução da varredura em frequência. Preparar a saída analógica corresponde a reduzir o valor de tensão para o mínimo (-9,55 V) no caso de uma varredura que tenha início em uma frequência baixa, ou para o valor máximo (10 V) no caso de uma varredura que inicie com uma frequência alta. A tensão na saída da placa controla a frequência do sinal senoidal fornecido pelo gerador de funções para excitar o circuito a ser analisado. Isto quer dizer que se o aplicativo for solicitado para gerar uma varredura crescente de frequência, a tensão na saída deverá variar de -9,55 V até 10 V, e do contrário irá variar de 10 V a -9,55 V. Devido à forma como esta placa da National trabalha em conjunto com o LabVIEW, se a varredura for interrompida qualquer motivo, a tensão de saída da placa permanece constante e igual ao ultimo valor escrito naquele canal. De maneira semelhante, quando a o aplicativo é iniciado, não se tem controle sobre o valor de saída. O aplicativo foi montado de forma que ao final de uma varredura, por medida de segurança, a tensão é levada novamente para o menor valor possível. No caso de uma varredura decrescente ser solicitada pelo usuário, este SubVI leva a tensão e consequentemente a frequência para o valor de pico apenas no momento anterior ao início da varredura.

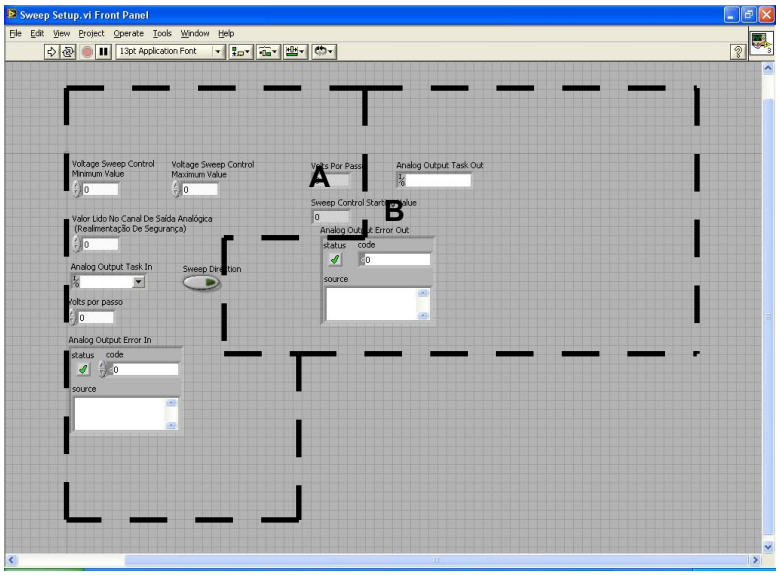


Fig. E.9. Painel frontal do SubVI *Sweep Setup*.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

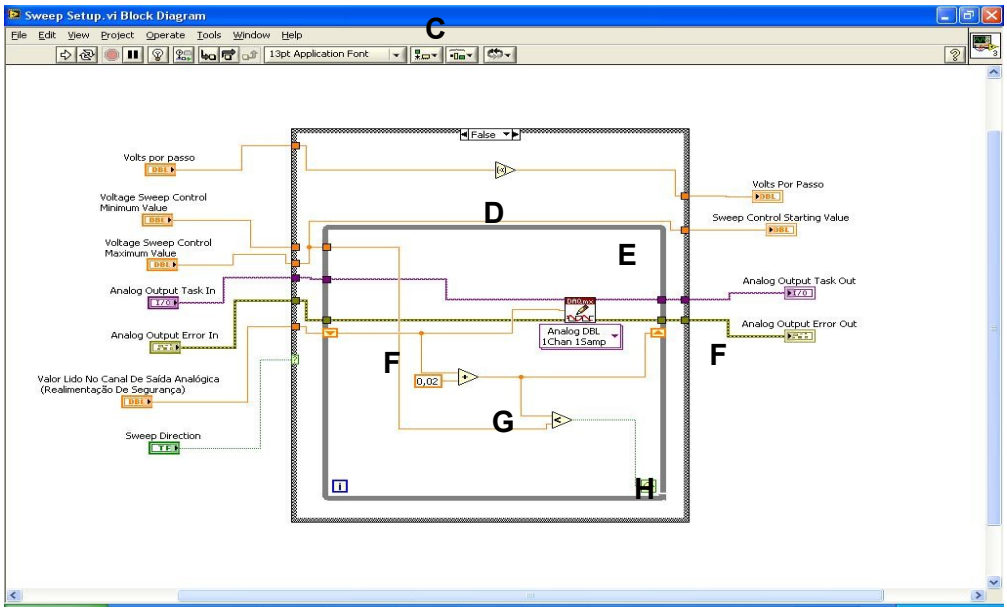


Fig. E.10. Diagrama de blocos do SubVI *Sweep Setup*.

C) Estrutura do tipo *case*. A entrada *Sweep Direction* controla a seleção entre falso e verdadeiro. A opção falso corresponde a uma varredura decrescente de frequência, e a opção verdadeiro a uma varredura crescente, que é a mais comumente utilizada;

D) *Loop* de repetição do tipo *while*. Este componente foi inserido para que se evite variações bruscas de tensão nos dispositivos piezoelétricos. Ele garante passos de 20mv até que se obtenha a tensão desejada;

E) VI polimórfico padrão, *DAQmx write*, configurado para escrever uma amostra de tensão em um canal;

F) Registrador de deslocamento. Estes tipo de componente armazena o valor conectado no terminal mais à direita da estrutura *while* e o recoloca no terminal mais a esquerda na iteração seguinte. O valor conectado a ele vindo de fora do *loop* é o valor de inicialização;

G) Valor adicionado a cada iteração do loop. O valor 0,02 corresponde a 20mv;

H) Condição de parada do *loop*.

A figura E.11 exibe a segunda parte do diagrama de blocos numerado.

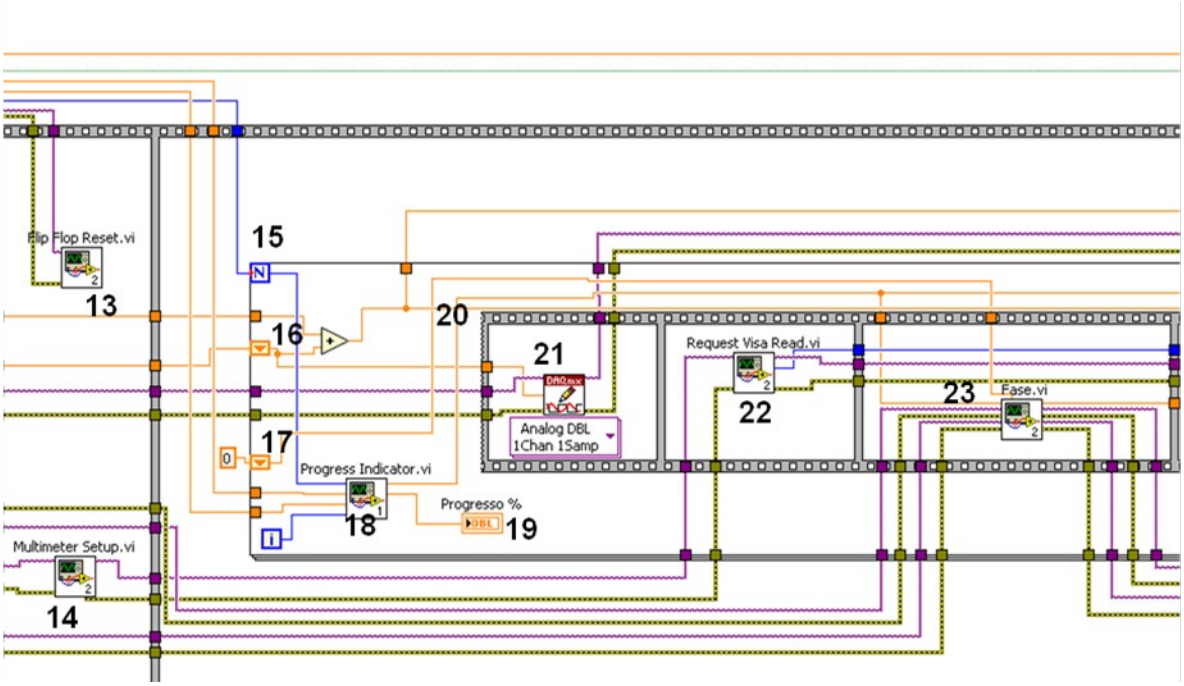


Fig. E.11. Segunda parte do diagrama de blocos do aplicativo principal.

13) SubVI *Flip-flop Reset*. Os *flip-flops* usados no circuito para dividir por dois a frequência e acertar as bordas dos sinais de saída dos comparadores, quando colocados em funcionamento constante,

algumas vezes apresentaram problemas, na forma de uma inversão do sinal. Para corrigir tais problemas, foi implementado um sinal para reiniciá-los, garantindo assim seu funcionamento correto no momento em que se inicia uma varredura. Se ocorrer uma inversão em tempo de execução a correção é feita por software dentro do SubVI Fase.

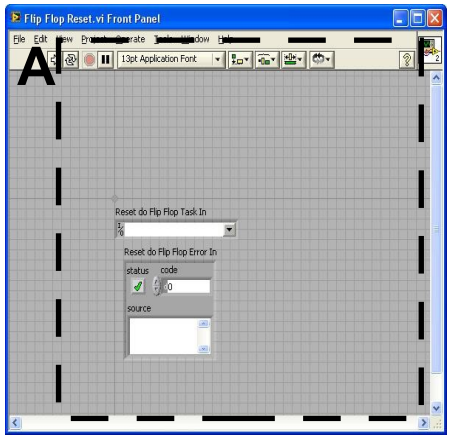


Fig. E.12. Painel frontal do SubVI *Flip-flop Reset*.

A) Parâmetros de entrada.

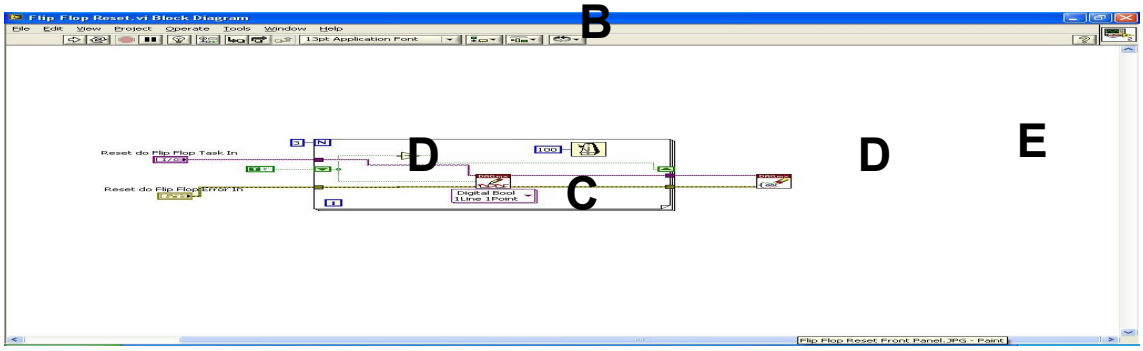


Fig. E.13. Diagrama de blocos do SubVI *Flip-flop* Reset.

B) *Loop* do tipo for configurado para fazer três iterações, com um intervalo de 100ms entre elas;

C) VI polimórfico padrão do LabVIEW, *Daqmx write*, configurado para escrever uma amostra digital de um bit uma vez;

D) Registrador de deslocamento. Este registrador foi inicializado com o valor *true*, este valor é passado para dentro do loop na primeira iteração, antes de ser conectado com a parte do registrador que

fica mais a direita no *loop*, uma inversão é feita, e o valor *false* é passado para a próxima iteração. Esta configuração garante que o pino de *clear* dos flip-flops receba um sequência de nível lógico 1, 0, 1, garantindo a reinicialização dos dispositivos;

E) VI padrão do LabVIEW, *DAQmx clear task*. Este VI libera o canal digital que estava reservado para que outros recursos possam acessá-lo.

14) *Multimeter Setup*. Este SubVI prepara o multímetro para as medidas a serem realizadas.

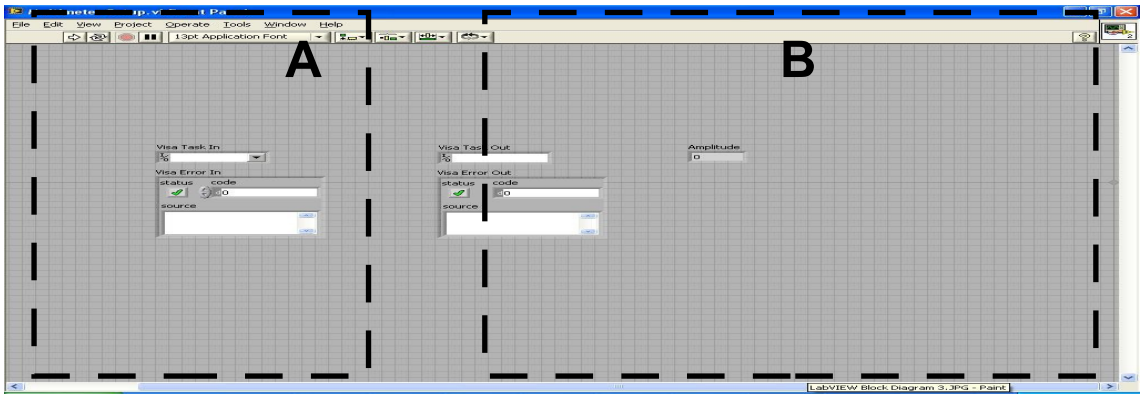


Fig. E.14. Painel frontal do SubVI Multimeter Setup.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

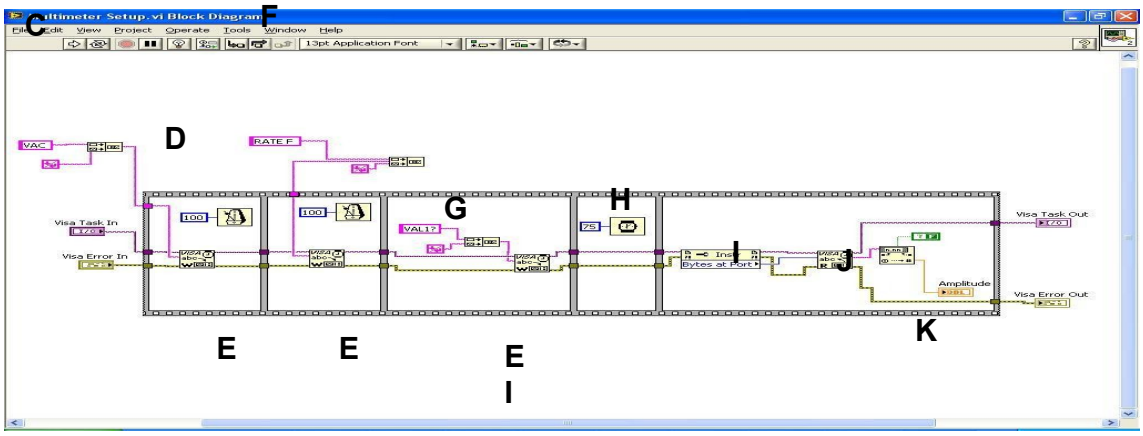


Fig. E.15. Diagrama de blocos do SubVI Multimeter Setup.

C) Comando que muda o modo do multímetro para realizar leituras de tensão AC. A *string* de comando é concatenada com um caractere de final de linha e de *carriage return* antes de ser enviada ao equipamento;
D) Estrutura de controle do tipo sequência plana. Esta estrutura serve para que os comandos enviados ao multímetro sejam executados um de cada vez e com intervalo de pelo menos 100ms entre eles;
E) Bloco para enviar um comando ao multímetro;
F) Comando que muda a taxa de aquisição do multímetro. A letra F na string RATE:F refere-se a *fast*, que é o modo em que são coletadas amostras na maior taxa possível;
G) Comando para o multímetro colocar valor que acabou de ser lido em um *buffer* para que o LabVIEW possa acessá-lo;
H) Esta parte da estrutura serve para que se espere 75 ms antes do software buscar o valor lido pelo multímetro. Valores inferiores a este podem resultar em uma *string* incompleta (vide item ???);
I) Bloco que verifica quantos bytes estão na porta de comunicação para serem lidos e envia esta informação para o bloco seguinte;
J) Bloco que lê o numero de bytes que estão prontos na porta;
K) Este componente formata a *string* de resposta para uso em outras partes do aplicativo.

Este bloco apenas realiza uma leitura para que o buffer seja limpo pois alguns testes mostraram disparates na primeira leitura realizada pelo multímetro após serem alteradas as suas configurações. O valor nomeado de amplitude, presente na parte mais a direita do diagrama de blocos e no painel frontal não é passado para outras partes do aplicativo, serve apenas para ser acessado caso seja necessário em algum teste.

15) *Loop* do tipo *for*. Este é o principal *loop* de controle do processo e dentro dele ocorre a geração da tensão de controle e a leitura dos valores necessários para que se gere os gráficos de Bode. O campo N corresponde ao numero de vezes que ele será executado. Este campo recebe o um valor calculado no início do diagrama de blocos, e corresponde à saída *passos* do bloco *sweep setup*, acrescida de 1. A

cada iteração do loop, o valor referente à amplitude de resposta do circuito que está sendo analisado é colocado em um vetor. O mesmo acontece com o valor referente à fase e o referente à frequência do sinal de referência, cada um em um vetor;

16) Registrador de deslocamento. Este registrador é inicializado com o valor -9,55 no caso de uma varredura crescente ou com o valor 10 no caso de uma varredura decrescente. O valor no registrador corresponde ao valor escrito na saída de controle que é conectada a um divisor de tensão antes de ir para o gerador de funções. Este mesmo valor é somado ao valor volts por passo, vindo do SubVI *sweep setup*, antes de ser passado para a próxima iteração do loop for;

17) Registrador de deslocamento que guarda o valor da fase lida na última iteração realizada. Caso haja um erro na medida o valor anterior é passado como resposta de fase;

18) SubVI *Progress Indicator*. Este é um SubVI simples com a função de informar ao usuário do progresso da varredura e ao mesmo tempo, calcular em que frequência o processo se encontra.

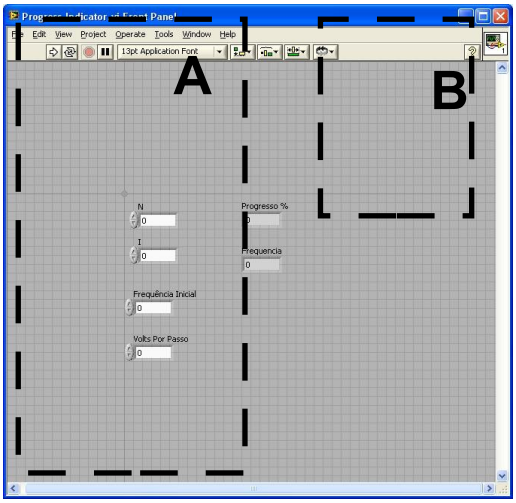


Fig. E.16. Painel frontal do SubVI *Progress Indicator*.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

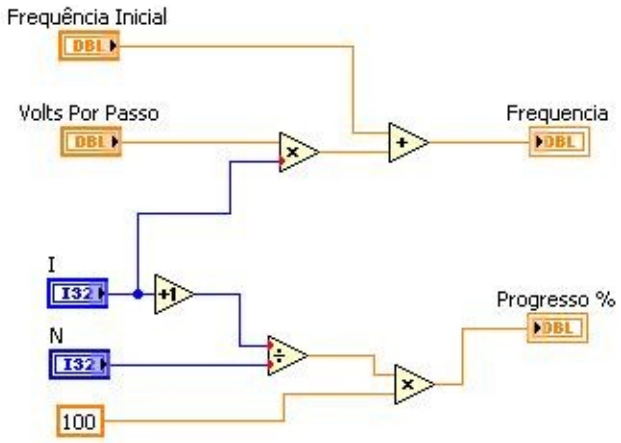


Fig. E.17. Diagrama de blocos do SubVI *Progress Indicator*.

19) Indicador de progresso que aparece no painel frontal;
20) Estrutura de execução em sequência que garante que as etapas principais do processo ocorram uma de cada vez;
21) VI padrão do LabVIEW, *DAQmx write*, configurado para escrever uma amostra em um canal analógico. O valor escrito é o valor que está no registrador de deslocamento. O canal analógico onde este VI escreve o valor está conectado a um divisor de tensão de fator 10 e depois segue até a entrada de controle da modulação do gerador de funções;
22) *Request Visa Read* SubVI. Este componente solicita ao multímetro, que fica constantemente efetuando medições, que coloque a última medida realizada em um *buffer* para leitura. É importante notar que o valor não é efetivamente lido pelo aplicativo. A leitura só ocorre mais adiante no diagrama de blocos.

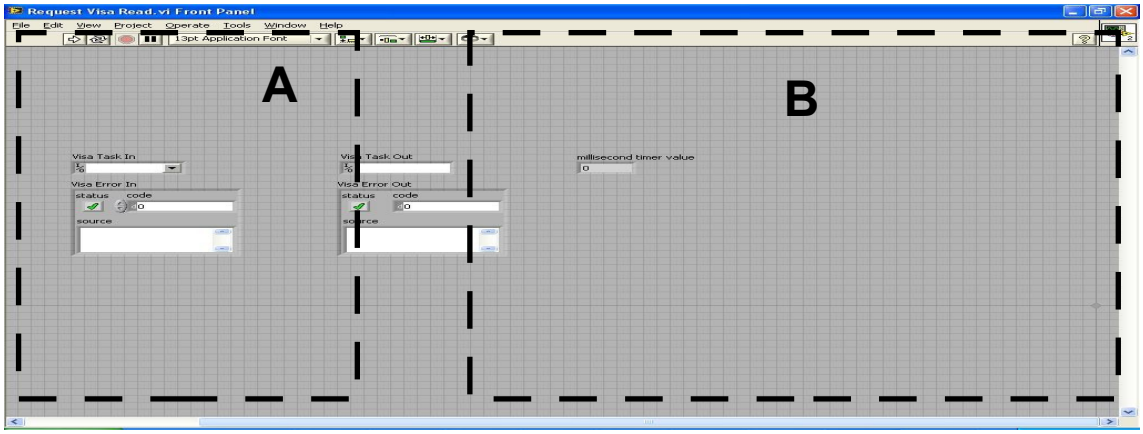


Fig. E.18. Painel frontal do SubVI Request Visa Read.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

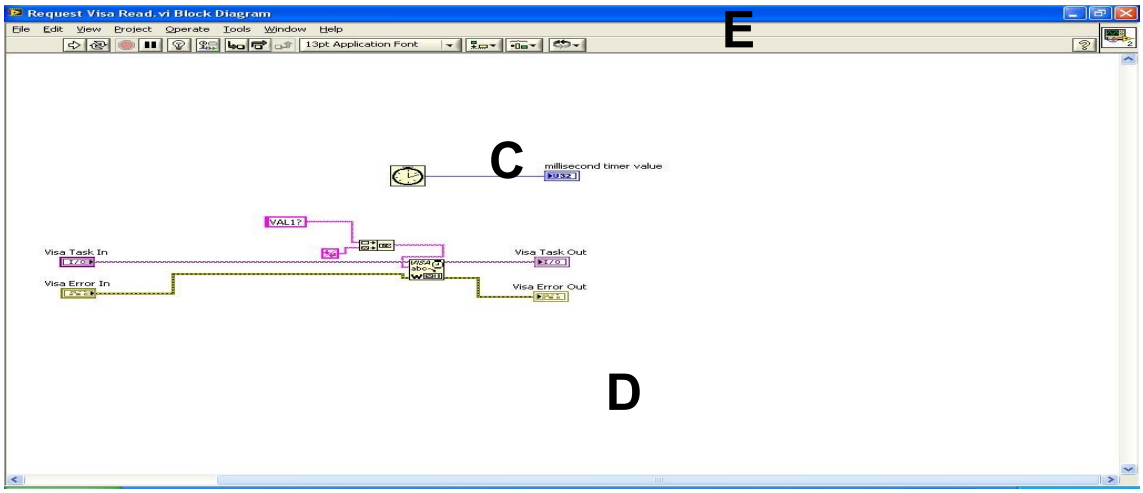


Fig. E.19. Diagrama de blocos do SubVI *Request Visa Read*.

C) Comando para que o multímetro coloque a última medida realizada no *buffer* de leitura;

D) Bloco que envia o comando ao multímetro através da porta serial em um protocolo RS232;

E) Este bloco marca o tempo do sistema em ms. O valor é conectado ao indicador *milisecond timer value* para que possa ser enviado para fora do SubVI. Este valor será usado quando o aplicativo for buscar o valor lido no buffer do multímetro.

23) SubVI Fase. Este bloco realiza a coleta dos dados de leitura da fase.

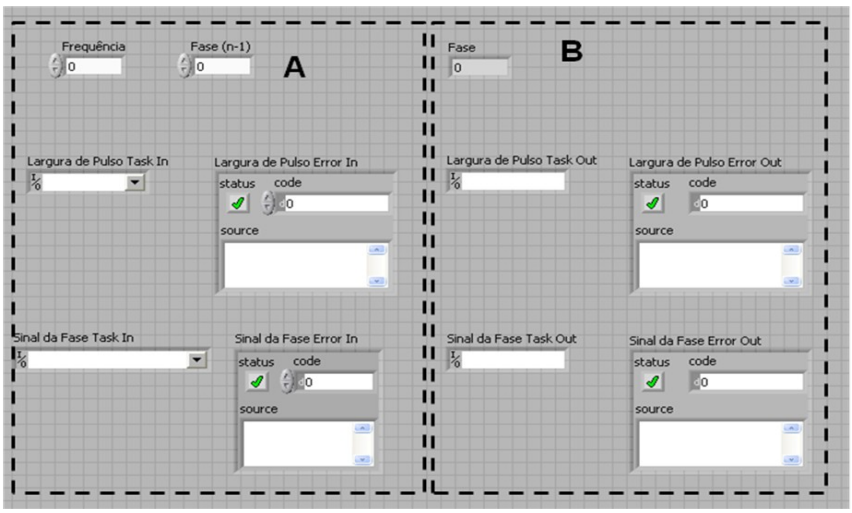


Fig. E.20. Painel frontal do SubVI Fase.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

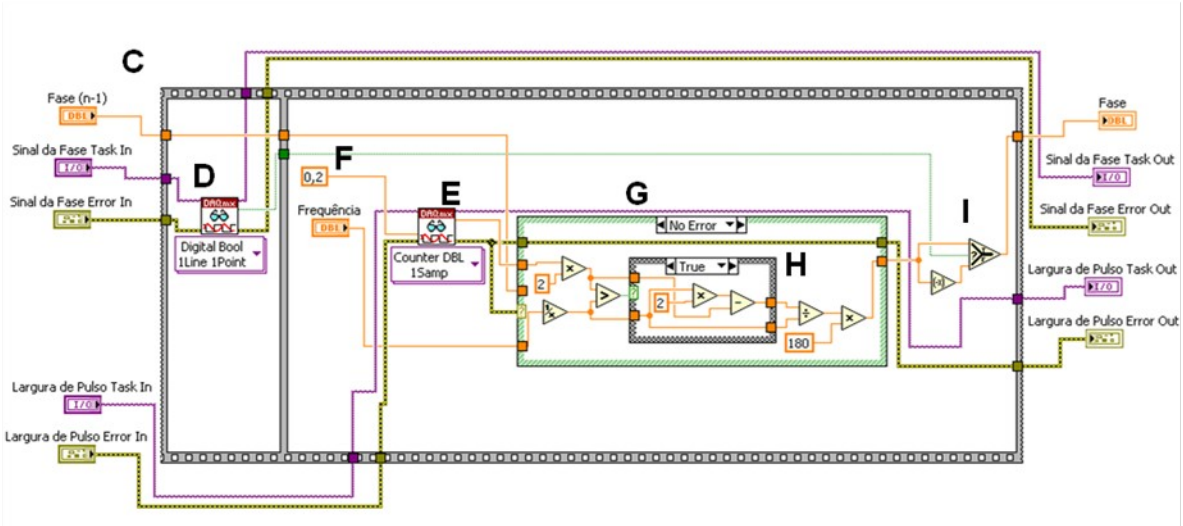


Fig. E.21. Diagrama de blocos do SubVI Fase.

C) Estrutura de execução em sequência;

D) VI padrão do LabVIEW, *DAQmx read*, configurado para executar a leitura de uma amostra digital em uma linha da porta digital (ler 1 bit uma vez);

E) VI padrão do LabVIEW, *DAQmx read*, configurado para fazer a leitura da largura de um pulso. O tempo de duração deste pulso é multiplicado por dois e dividido pelo semi-periodo do sinal de referência para que se chegue a uma proporção do desvio de fase. Este valor é multiplicado por 180 para que se chegue a um valor de diferença de fase em graus;

F) Este valor corresponde a um valor de *timeout* para o bloco de detecção da largura do pulso. Caso um pulso não seja identificado o bloco gera um sinal de erro. Em caso de erro o valor lido na última medida de fase é passado como valor lido. Isto evita falsos pontos de virada de fase ao longo do gráfico exibido ao final da varredura;

G) Esta é uma estrutura *case* que está conectada à saída de erro do bloco que faz a leitura da largura do pulso. Caso não haja erro, o cálculo é feito normalmente. Em caso de erro, o valor lido na última medida de fase é passado como valor lido. Isto evita falsos

pontos de virada de fase ao longo do Diagrama de Bode exibido ao final da varredura;

H) Esta estrutura também é uma estrutura de seleção de caso. Testes demonstraram que uma inversão pode ocorrer nos *flip-flops* durante uma varredura. Caso isto ocorra, pode haver uma inversão da saída do XOR. Neste caso o pulso lido é maior do que meio período do sinal de referência. Uma correção é feita para que não seja necessário começar uma nova varredura. O valor corrigido é o módulo da diferença entre o valor medido e o período do sinal de referência;

I) Este bloco recebe o valor lido pelo bloco que detecta o sinal da fase e usa esta informação para acrescentar ou não o sinal negativo no valor do módulo da fase.

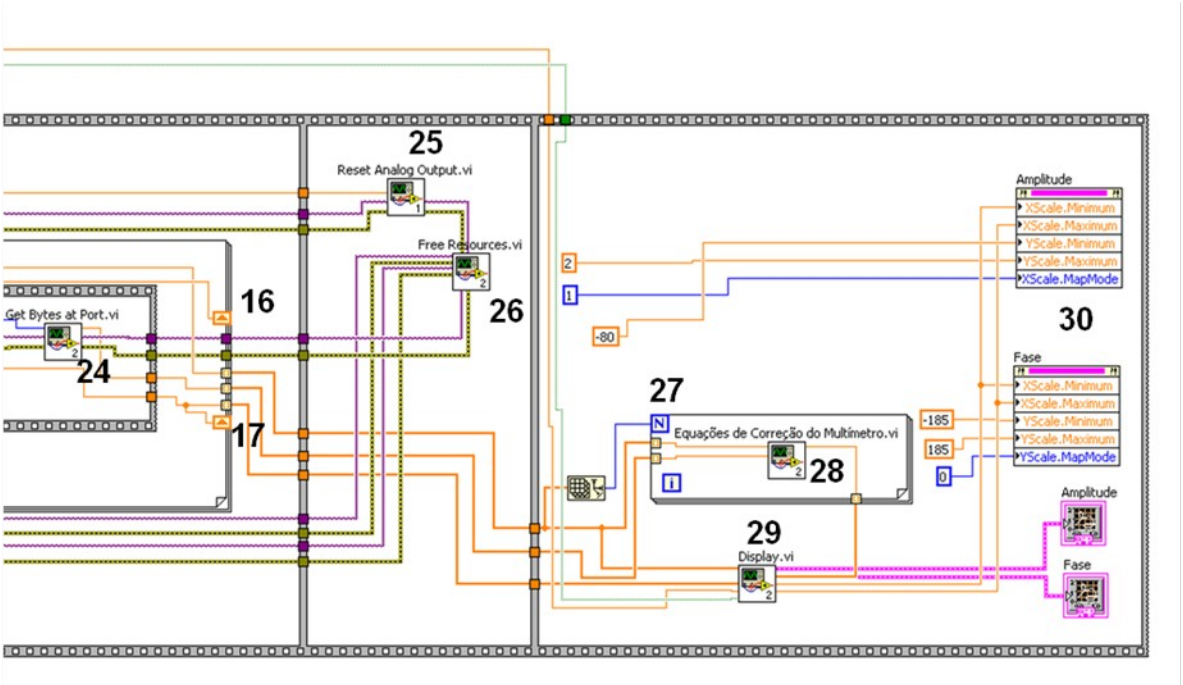


Fig. E.22. Terceira parte do diagrama de blocos numerado do aplicativo principal.

24) SubVI *Get Bytes at Port*. Este SubVI busca o valor colocado pelo multímetro no *buffer* para leitura.

Fig. E.23. Painel frontal do SubVI Get Bytes at Port.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

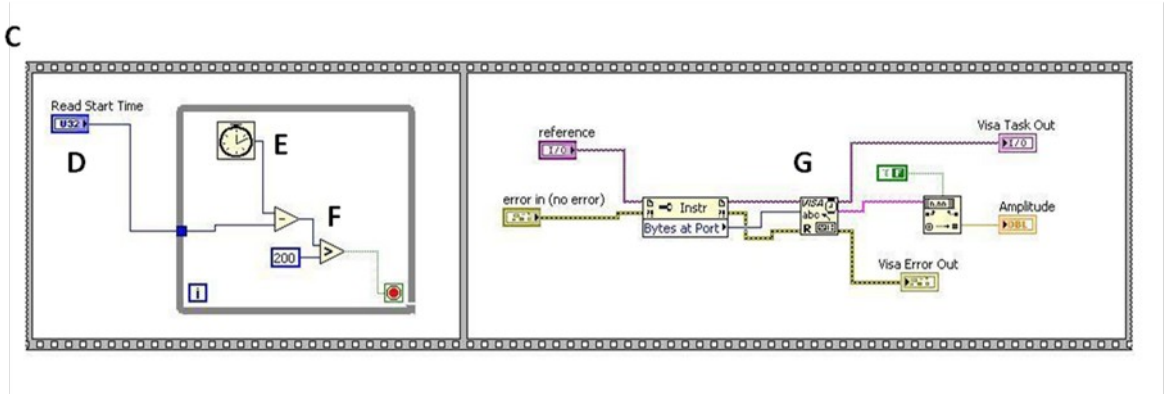


Fig. E.24. Diagrama de blocos do SubVI *Get Bytes at Port*.

C) Estrutura de execução seqüencial;

D) Valor recebido do SubVI *Request Visa Read* e que contém uma indicação do tempo do sistema no momento em que foi solicitado que o multímetro colocasse um medição no *buffer* de leitura;

E) Este bloco recupera novamente o tempo do sistema;

F) Aqui, dentro de uma estrutura de repetição do tipo *while*, o bloco que retorna o tempo do sistema é constantemente chamado até que o tempo decorrido desde a chamada do primeiro destes

blocos, no SubVI *Request Visa Read*, seja maior que 200 ms. Este valor foi adotado como medida de segurança para que o multímetro tenha tempo de escrever um valor no *buffer* de leitura.

G) Esta parte do diagrama é semelhante a do SubVI Multimeter Setup e é responsável por buscar um valor no buffer de leitura, uma string, e convertê-la em um formato que possa ser usado para gerar um Diagrama de Bode;

25) SubVI *Reset Analog Output*. Este bloco retorna o valor na saída que controla o gerador de funções para o valor mínimo, de -9,55 V;

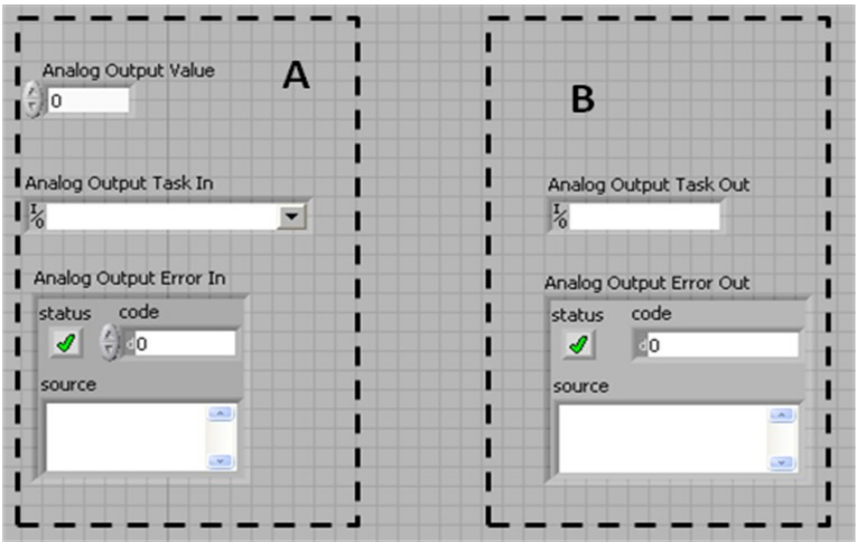


Fig. E.25. Painel frontal do SubVI Reset Analog Output.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

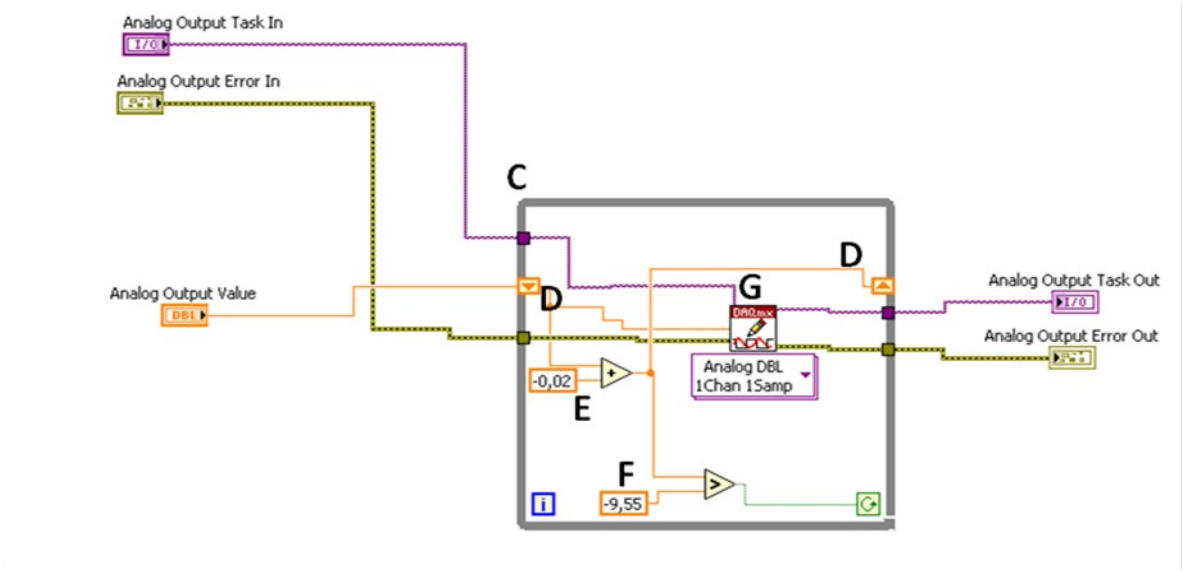


Fig. E.26. Diagrama de blocos do SubVI Reset Analog Output.

C) Estrutura de repetição do tipo *while*. Esta estrutura serve para que o valor escrito no canal analógico de saída, que controla o gerador de funções, seja colocado no menor valor possível, em pequenos passos de tensão;

D) Registrador de deslocamento iniciado com o último valor escrito no canal de saída que controla a varredura;

E) Valor que é adicionado ao conteúdo do registrador a cada iteração do loop *while*. Este valor corresponde a um acréscimo de 20 mV na saída analógica;

F) Este é o valor mínimo escrito no canal de saída. Este valor é dividido por 10 antes de ser inserido no gerador de funções;

G) VI padrão do LabVIEW, *DAQmx write*, configurado para escrever uma amostra analógica de tensão em um canal. Este bloco é responsável por retornar o valor de controle do gerador de funções para o valor mínimo.

26) SubVI *Free Resources*. Este SubVI libera todos os canais analógicos e digitais que haviam sido reservados para uso do aplicativo. Também encerra a comunicação com o multímetro;

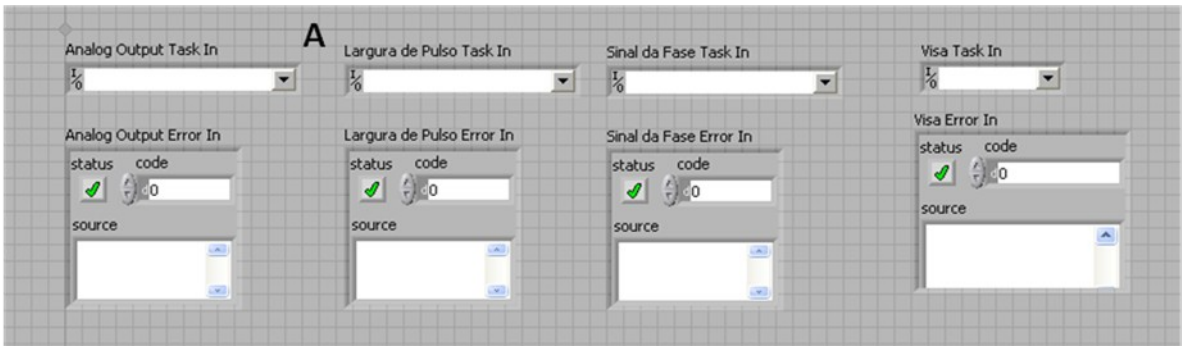


Fig. E.27. Painel frontal do SubVI Free Resources.

A) Este SubVI apresenta apenas parâmetros de entrada.

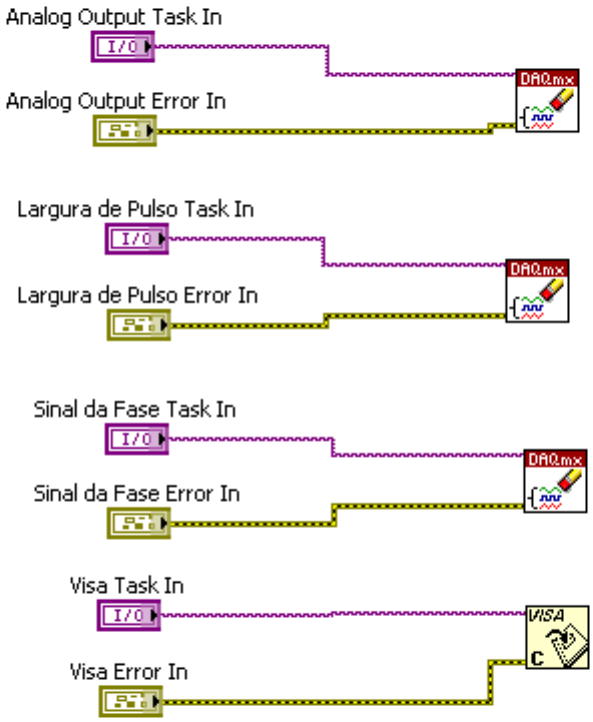


Fig. E.28. Diagrama de blocos do SubVI Free Resources.

Este SubVI pode ser alterado para que sejam exibidas caixas de diálogo com relatórios de erro sobre a execução do aplicativo.

27) *Loop* de repetição do tipo *for*. Este *loop* é executado uma vez para cada valor lido no multímetro. Os valores lidos no multímetro chegam a esse *loop* na forma de um vetor de valores do tipo **double**. Na primeira execução do loop o valor de índice 0 é passado para dentro do loop, na

segunda iteração, o valor de índice 1 é passado, e assim sucessivamente. Um vetor contendo os valores de frequência correspondentes a cada medida do multímetro também chega ao *loop*;

28) SubVI *Equações de Correção do Multímetro*. Este SubVI recebe um valor de voltagem lido pelo multímetro e um valor de frequência correspondente, utilizando as equações de correção para ajustar a tensão no que deveria ser o seu valor RMS verdadeiro.

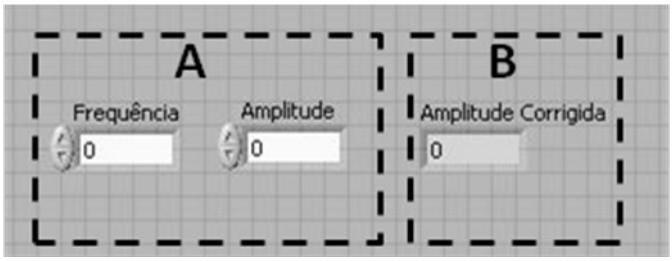


Fig. E.29. Painel frontal do SubVI Equações de Correção do Multímetro.

A) Parâmetros de entrada;
B) Parâmetros de saída.

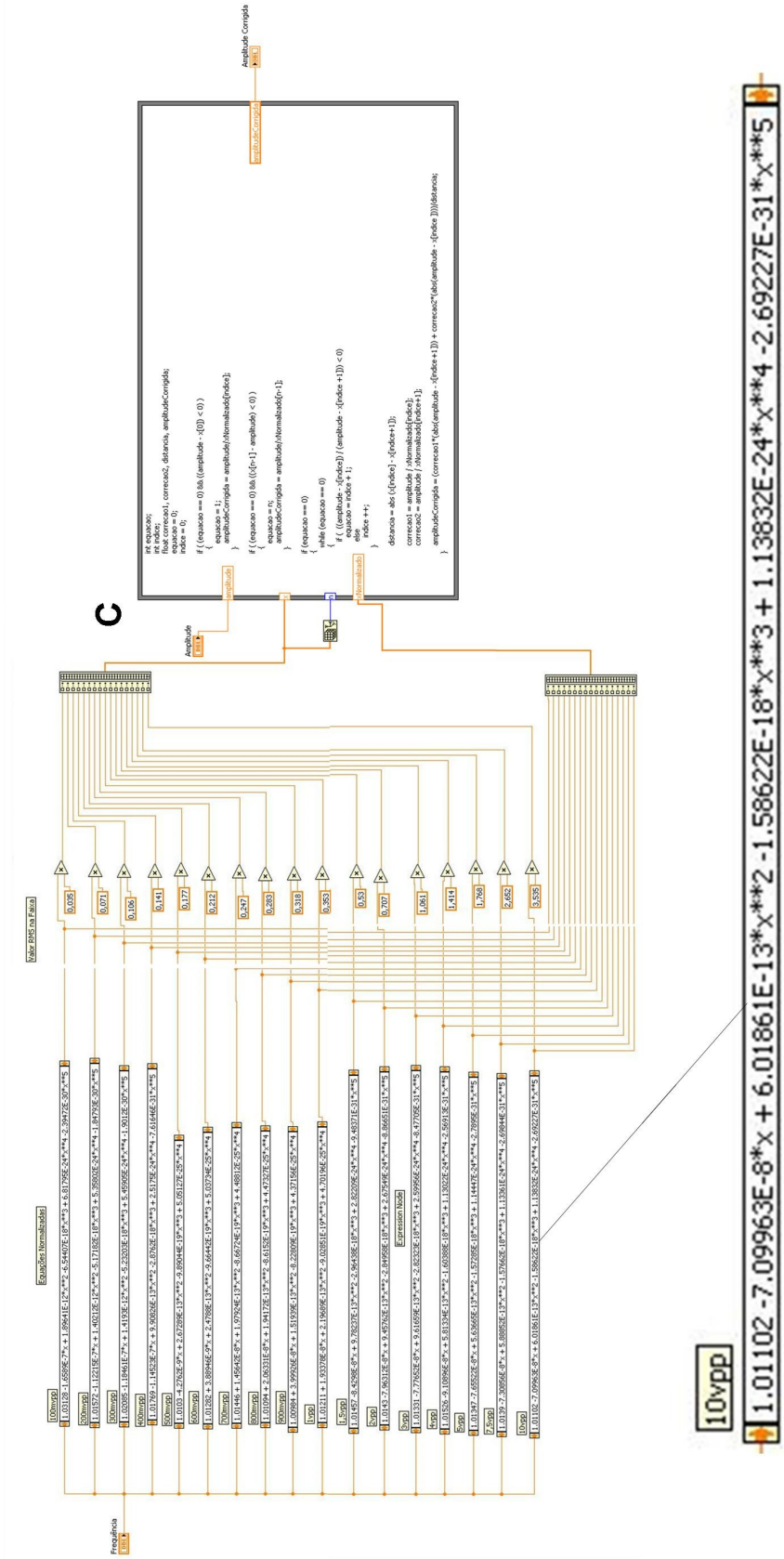


Fig. E.30. Diagrama de blocos do SubVI Equações de Correção do Multímetro.

C) Esta é uma estrutura chamada *formula node*. Ela permite a inserção de códigos em linguagem C no meio do diagrama de blocos. Para melhor visualização o código é mostrado a seguir.

```
int equacao;
int indice;
float correcao1, correcao2, distancia, amplitudeCorrigida;
equacao = 0;
indice = 0;

if ( (equacao == 0) && ((amplitude - x[0]) < 0) )
  {
    equacao = 1;
    amplitudeCorrigida = amplitude/xNormalizado[índice];
  }

if ( (equacao == 0) && ((x[n-1] - amplitude) < 0) )
  {
    equacao = n;
    amplitudeCorrigida = amplitude/xNormalizdo[n-1];
  }

if (equacao == 0)
  {
     while (equacao == 0)
       {
          if (  ((amplitude - x[indice]) / (amplitude - x[indice +1])) < 0)
            equacao = indice + 1;
          else
             indice ++;
        }

      distancia = abs (x[indice] - x[indice+1]);

      correcao1 = amplitude / xNormalizado[indice];
      correcao2 = amplitude / xNormalizado[indice+1];

      amplitudeCorrigida = (correcao1*(abs(amplitude - x[índice+1])) +
      correcao2*(abs(amplitude - x[indice])))/distancia;
   }
```

A variável xNormalizado é um vetor que contém o resultado de todas as equações de correção para a frequência recebida. O vetor X também tem origem nas equações de correção, porém cada elemento é multiplicado pelo valor RMS do sinal de referência que deu origem àquela equação.

O algoritmo compara a amplitude medida (A) com todos os elementos do vetor X e seleciona os dois valores mais próximos (B e C) a cada um destes dois valores corresponde um valor no vetor xNormalizado (Bn e Cn).
A amplitude corrigida (Ac) é calculada usando equação 3.3.

$$Ac = \frac{\left(\frac{A}{Bn} \times \left(|A - C|\right)\right) + \left(\frac{A}{Cn} \times \left(|A - B|\right)\right)}{|B - C|} \qquad \text{Eq. 3.3}$$

Valores muito pequenos ou muito grandes usam apenas as equações de calibração para 100 mVpp ou 10 Vpp respectivamente. A equação 3.4 ilustra este cálculo. O valor “equação” entre colchetes é substituído por “0” no caso em que a equação de 100 mVpp deve ser utilizada e por “n-1” no caso da correção se basear na equação de 10 Vpp. O valor n corresponde ao número de equações de calibração disponíveis.

$$Ac = \frac{A}{xNormalizado[equação]} \qquad \text{Eq. 3.4}$$

29) SubVI *Display*. Este SubVI formata os valores adquiridos durante a varredura para que sejam mostrados na forma de Diagramas de Bode. Ele recebe três vetores: um contendo os valores de frequência, outro com os valores da amplitude lida pelo multímetro (já corrigida) e o que contém os valores da diferença de fase.

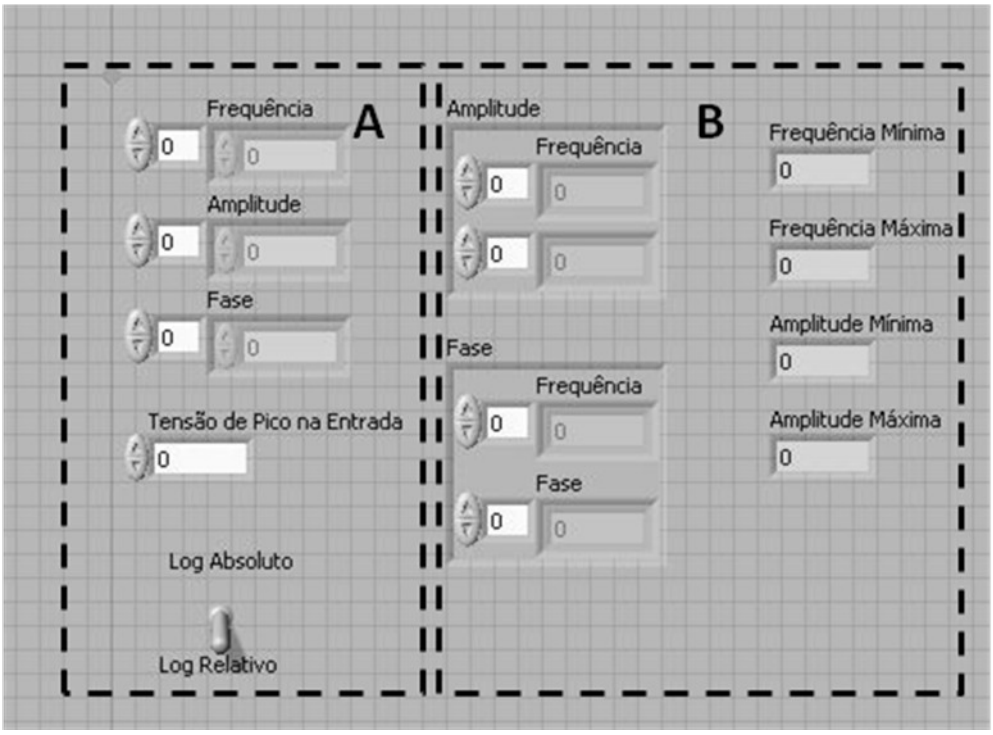


Fig. E.31. Painel frontal do SubVI Display.

A) Parâmetros de entrada;

B) Parâmetros de saída.

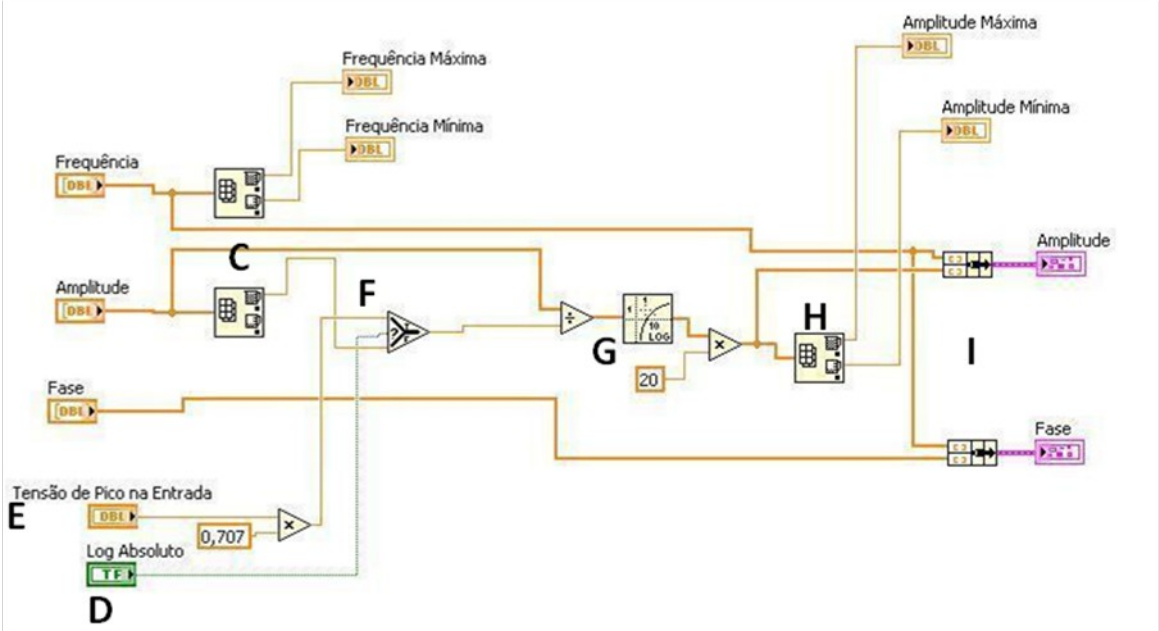


Fig. E.32. Diagrama de blocos do SubVi display.

C) Estes blocos determinam os valores máximo e mínimo do vetor que contém os valores da frequência e o valor máximo do vetor que contém os valores da amplitude corrigida;

D) Este comando é selecionado pelo usuário no painel frontal do aplicativo principal e seleciona um gráfico mostrando o valor 0dB em relação ao maior valor lido, o que foi chamado de “dB”, ou em relação ao valor de pico do sinal que excita o circuito, que foi chamado de “dB Normalizado”;

E) Este comando também vem do painel frontal do aplicativo principal e informa o valor de pico do sinal de referência para ser usado caso seja solicitada uma demonstração usando o “dB”;

F) Bloco que seleciona o maior valor do vetor de amplitudes ou o valor de pico do sinal de entrada multiplicado por 0,707, pois todas as contas referentes à amplitude usam valores RMS;

G) O cálculo da resposta em dB é feito dividindo-se os valores do vetor de amplitudes pelo maior valor deste vetor (no caso do modo “dB Normalizado”) ou pelo valor RMS do sinal que excita o circuito no caso do modo “dB”. O resultado desta divisão (B) é usado na fórmula: $A = 20 \times LogB$, onde A é o valor da amplitude da resposta do sistema em dB. Este processo é realizado para todos os valores do vetor de amplitudes, resultando em um novo vetor com os valores todos em dB;

H) O maior e o menor valor do vetor contendo os valores em dB são selecionados passados como parâmetros de saída do SubVI;

I) O vetor de amplitudes em dB e o vetor de frequências são concatenados em um vetor de duas dimensões para que possa ser corretamente representado em forma de gráfico. O mesmo é feito com o vetor contendo os valores de diferença de fase e o vetor de frequências. Os blocos indicando amplitude e frequência mais a direita no diagrama de blocos já são os conjuntos de valores prontos para a geração dos Diagramas de Bode.

30) Estes blocos são responsáveis pela configuração dos eixos e escalas dos Diagramas de Bode.

Referências Bibliográficas

[1] Ogata, Katsuhiki, Engenharia De Controle Moderno, 4ª Edição. Prentice Hall

[2] Quevedo, Carlos Peres, Circuitos elétricos e eletrônicos, 2ª Edição. Livros Técnicos e Científicos Editora SA.

[3] G. Binnig, H. Rohrer “Scanning tunneling microscopy” IBM Journal of Research and Development **30**,4 (1986)

Referências Adicionais

[a] www.ni.com

[b] www.tek.com

[c] www.fluke.com

[d] www.originLab.com

[e] www.national.com

[f] www.cadence.com