

Universidade Federal de Minas Gerais

CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMAS DE MEDIÇÃO

# **AULAS DE LABORATÓRIO**

**Prof. Flávio Henrique Vasconcelos**  
**Prof. Hilton de Oliveira Mota**



## Sumário

### Sumário

OBJETIVOS DAS AULAS DE LABORATÓRIO .....	2
SEGURANÇA NO LABORATÓRIO .....	3
ORGANIZAÇÃO E CUIDADOS NO AMBIENTE LABORATORIAL .....	5
Módulo-01 USO DA INSTRUMENTAÇÃO BÁSICA: multímetro e osciloscópio.....	7
Módulo-02 CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	12
Módulo-03 FONTES DE INCERTEZA EM SM: efeito de carga.....	14
Módulo-04 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA .....	17
Módulo-05 MEDIÇÃO DE SINAIS AC – MÉTODO DO VALOR MÉDIO ABSOLUTO.....	19
Módulo-06 MEDIÇÃO DE SINAIS AC – MÉTODO DO VALOR VERDADEIRO.....	24
Módulo-07 VISUALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DO ALIASING .....	31
Módulo-08 FILTROS ANTI-ALIASING.....	35
Módulo-09 PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS LABVIEW .....	41
A. Desenvolvendo um projeto básico .....	43
B. Adicionando controles ao painel frontal.....	43
B. Editando e adicionando funcionalidades ao instrumento .....	44
C. Conectando os módulos.....	46
D. Ligando o instrumento.....	47
E. Tornando a execução automática.....	48
F. Desafios.....	49
G. Digitalizando sinais com o LabView e o NI-Elvis.....	51
Módulo-10 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA ELÉTRICA.....	68
Módulo-11 MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS .....	72
Apêndice–A Modelo de Relatório .....	74
Apêndice–B Procedimento de Medição.....	75
Apêndice–C Principais Componentes Eletrônicos.....	77
Apêndice–D Equipamentos e Ferramentas de Laboratório.....	79
Apêndice–F Leitura do Valor de Capacitores .....	82
Apêndice–G Protoboard do NI-Elvis .....	85
Apêndice–H <b>COMO USAR OSCILOSCÓPIOS DIGITAIS</b> .....	87



## OBJETIVOS DAS AULAS DE LABORATÓRIO

Desenvolver atitudes de organização e segurança:

- a) quanto a segurança pessoal;
- b) quanto a organização do espaço laboratorial e o cuidado com o equipamento e durante experimento.

Elaborar procedimento para realização da atividade experimental

- a) com descrição detalhada da metodologia (como fazer) usada no teste;
- b) com diagramas ilustrativos que facilitem a montagem;
- c) tendo uma relação prévia e com detalhes suficientes dos componentes e equipamentos.

Desenvolver capacidade de executar o experimento com sucesso

- a) observando a qualidade da montagem;
- b) cuidando dos instrumentos e demais equipamentos do laboratório;
- c) obtendo informações e adquirindo dados com qualidade.

Desenvolver documentação qualificada da atividade realizada, contendo os seguintes itens:

- a) indentificação e descrição do mensurando;
- b) principais instrumentos de medição e equipamentos utilizados;
- c) metodologia (o fazer) com detalhes suficientes para que possa ser repetido por outros;
- d) resultados;
- e) análise e discussão dos resultados;
- f) bibliografia



## SEGURANÇA NO LABORATÓRIO

### Por que devemos nos preocupar com a segurança nos Laboratórios?

A eletricidade é amplamente reconhecida por apresentar grande risco a vida das pessoas que ficam sujeitas a sofrer choques elétricos, queimaduras, lesões, etc. Em um laboratório de eletricidade ou eletrônica os usuários estão expostos às partes vivas dos circuitos



### Por que os acidentes acontecem?

A variedade de riscos nos laboratórios é muito ampla. Dentre as causas de acidentes em laboratórios podem ser citadas:

- instruções inadequadas.
- supervisão insuficiente e ou inapta do executor.
- uso incorreto de equipamentos.
- alterações emocionais e exibicionismo.

### Medidas de segurança para o laboratório

1. Não trabalhe sozinho, principalmente fora do horário de expediente.
2. É imprescindível o conhecimento da localização dos acessórios de segurança.
3. Procure conhecer o equipamento antes de utiliza-lo. Leia as instruções de uso, manuais, etc. Certifique-se qual é a tensão de trabalho antes de conectá-los à rede elétrica. Quando não estiverem em uso, os aparelhos devem permanecer desconectados.
4. Usar roupas adequadas como calças compridas, sapatos fechados.
5. Sempre que os equipamentos estiverem ligados, usar os óculos de segurança.
6. Não são permitidos alimentos nas bancadas dos laboratórios.
7. Se tiver cabelos compridos, conserva-los presos.
8. Planeje o experimento procurando conhecer os riscos envolvidos e as precauções a serem tomadas.
9. Só opere equipamentos quando fios, tomadas e plugues estiverem em perfeitas condições e o fio terra estiver ligado.
10. Não opere equipamentos elétricos sobre superfícies úmidas.
11. Verifique periodicamente a temperatura do conjunto de plugue-tomada.



12. Certifique-se do valor da tensão da tomada antes de plugar o equipamento.
13. Não deixe equipamentos elétricos ligados após terminar a atividade.
14. Combata o fogo em equipamentos elétricos somente com extintores de CO<sub>2</sub>.
15. COMUNICAR QUAISQUER ACIDENTES AO PROFESSOR.

Concentre-se no que estiver fazendo.

**LEMBRE-SE QUE DURANTE A AULA O SEU COMPORTAMENTO QUANTO À SEGURANÇA ESTARÁ SENDO AVALIADO.**



## ORGANIZAÇÃO E CUIDADOS NO AMBIENTE LABORATORIAL

- O laboratório deve estar sempre organizado.

- Em cada bancada deverão estar até dois alunos, salvo em períodos excepcionais, quando o número de bancadas for insuficiente para acomodar todos estudantes da turma.
- Os nomes dos componentes deverão ser comunicados ao professor e o grupo deve permanecer o mesmo ao longo do semestre.
- Ao iniciar a atividade experimental, remova da bancada todo material estranho ao trabalho como bolsa, livro, blusa e mesmo equipamentos que não fazem parte de seu experimento.
- Não entre, em hipótese alguma, com alimentos no ambiente laboratorial.
- Mantenha limpo de resíduos o tampo da bancada do laboratório.
- Faça uso de um caderno de laboratório<sup>1</sup> para fazer anotações de todas as informações relevantes produzidas durante o experimento, incluindo problemas da montagem, ocorrências inesperadas e resultados do experimento.
- Para remover componentes e fios do protoboard use, preferencialmente, um alicate de bico ou ferramenta similar. **NÃO DANIFIQUE OS EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS DO LABORATÓRIO.**
- Procure montar o circuitos com a fiação rente ao protoboard para facilitar a tarefa de identificação de possíveis erros e minimizar ruídos eletromagnéticos.
- Comunique ao professor mal-funcionamento de qualquer equipamento e/ou dispositivo do laboratório.

DURANTE O SEMESTRE CORRENTE OS EQUIPAMENTOS E INSTRUMENTOS DO LABORATÓRIO SÃO PARA O SEU USO E DE SEUS COLEGAS. PRESERVE-OS DA MELHOR MANEIRA POSSÍVEL.

**LEMBRE-SE QUE EM TODA AULA O SEU COMPORTAMENTO QUANTO À ORGANIZAÇÃO E ADEQUAÇÃO DE PROCEDIMENTOS ESTARÁ SENDO AVALIADO E RECEBERÁ NOTAS.**

<sup>1</sup> O caderno de laboratório deve ser para uso exclusivo no laboratório. Preferencialmente, ele é de tamanho pequeno e não deve ocupar muito espaço na bancada. As anotações feitas no mesmo servirão para compor o relatório da atividade.



Sistemas de Medição

Laboratório

# AULAS



## Módulo-01 USO DA INSTRUMENTAÇÃO BÁSICA: multímetro e osciloscópio

### OBJETIVOS

- Aprender a usar corretamente os instrumentos básicos do laboratório para realizar medições de grandezas elétricas.
- Discutir e avaliar na prática os recursos e limitações dos sistemas de medição.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

Após realizar esta atividade o aluno deverá demonstrar que é capaz de:

- Descrever as funcionalidades e características metrológicas dos multímetros e osciloscópios quanto à sua capacidade para realizar medições de grandezas elétricas.
- Usar de maneira competente multímetros (voltímetros, amperímetros e ohmímetros), osciloscópios, fontes, etc. da plataforma NI-ELVIS para medição de grandezas elétricas.
- Manter organizado o ambiente laboratorial.
- Utilizar instrumentos de medição sem expor a si e outros a riscos de acidentes.

### ESTUDO DOS INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO

– Pesquise na internet e na bibliografia indicada<sup>2</sup> e faça uma descrição dos parâmetros especificados abaixo, utilizados tipicamente para caracterizar instrumentos de medição:

- i. resolução;
  - ii. erro máximo (exatidão);
  - iii. impedância de entrada;
  - iv. resposta em frequência;
  - v. máxima tensão de entrada;
  - vi. máxima tensão de modo-comum;
  - vii. “voltage-drop” ou “voltage-burden” (medições de corrente);
  - viii. medidor “RMS verdadeiro”.
- Análise dos multímetros:  
Consulte os manuais do NI-ELVIS e dos multímetros ICEL MD-6450 e JDR DMM-200. Determine as especificações destes instrumentos com relação aos seguintes parâmetros:
    - i. Resolução da escala de 200 mVAC do JDR DMM-200.
    - ii. Resolução da escala de 40 VDC do ICEL MD-6450.
    - iii. Erro máximo admissível da escala de 200 mADC do do JDR DMM-200.
    - iv. Resposta em frequência para medição de tensão e corrente AC do ICEL MD-6450.
    - v. Máxima tensão de modo-comum do JDR DMM-200.
    - vi. Especifique se os multímetros são “RMS verdadeiro”.
  - Análise do NI-ELVIS:  
O NI-ELVIS é um sistema de medição para laboratórios cujo enfoque é otimizar a flexibilidade e a organização dos trabalhos. Isto é obtido por meio da disponibilização de

<sup>2</sup> Notas de aula, VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.



vários instrumentos em um único módulo, bem como pela capacidade de criação de instrumentos virtuais.

Consulte os manuais do NI-ELVIS I e II, sobretudo os seus painéis frontais, e identifique quais instrumentos estão disponíveis para uso imediato.

Com relação ao multímetro digital (DMM) do NI-ELVIS II (ou I):

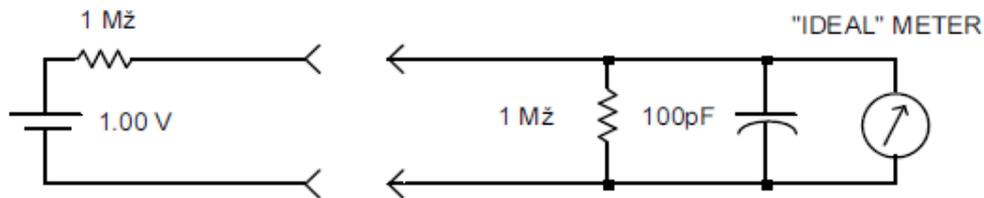
- i. identifique qual é a máxima tensão de entrada na função de voltímetro.
  - ii. Identifique qual é a máxima corrente de entrada na função de amperímetro.
  - iii. Determine a impedância de entrada nas funções de voltímetro e amperímetro.
  - iv. Informe o valor da resolução da escala digital do DMM.
  - v. Determine as faixas de medição de tensão AC e de corrente DC.
  - vi. Determine a faixa de frequência do sinal que pode ser medida.
  - vii. Informe a exatidão do DMM para as faixas de 0 a 10V, DC e AC, e 0 a 2A, DC e AC.
  - viii. Qual o efeito da temperatura sobre a exatidão do DMM na medição de tensão DC?
  - ix. Determine o valor da tensão de modo-comum máxima suportável pelo DMM.
  - x. Explique o significado do termo “voltage burden” (tensão de carga) nas especificações de corrente do DMM.
- 

• Osciloscópios (todos):

- Olhe para um osciloscópio real ou tome por base a figura no apêndice e descreva sucintamente os 3 principais sistemas de controle dos osciloscópios.
- Inspeção a tela do osciloscópio, identifique como são fornecidas informações sobre:
  - i. Amplitude do sinal;
  - ii. periodicidade do sinal;
  - iii. início (disparo) do sinal
- Tente explicar a utilidade da tecla “Coupling” (acoplamento) AC/DC.
- Os sinais elétricos podem ser classificados como periódicos ou não-periódicos (transitórios).
  - i. Se o sinal a ser adquirido for do tipo periódico – uma onda senoidal, por exemplo – como o instrumento deve ser configurado para que fique continuamente sendo visualizado na tela?
  - ii. Se o sinal a ser adquirido for do tipo não-periódico, como deve ser ajustado para que não desapareça rapidamente da visualização na tela?
- Os osciloscópios possuem um conector BNC para cada canal no qual o cabo coaxial que contém o sinal a ser medido será conectado. O condutor interno transporta o sinal e a malha externa do cabo coaxial é aterrada. Essa situação é a mesma para os 2 canais. Assim, o sinal em cada uma das entradas é referenciado à terra. Com base nessa informação, explique como é possível medir a diferença de potencial entre 2 pontos de um circuito em que nenhum deles está diretamente conectado a terra?

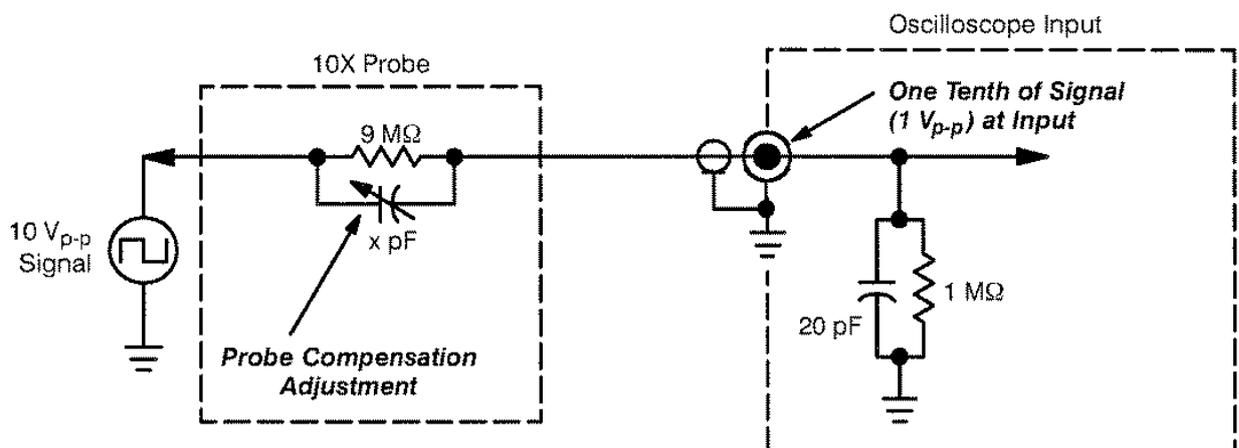


- A impedância de entrada de um osciloscópio normalmente é composta por um resistor em paralelo com um capacitor. Considere que este aparelho será utilizado para medir a tensão no circuito mostrado na figura abaixo, onde o osciloscópio é representado pelo medidor ideal.



- Idealmente, qual deveria ser a tensão medida?
- Calcule qual será a tensão medida no caso real.
- Agora, considere que a fonte de tensão contínua será substituída por um gerador AC com tensão RMS de 1V e frequência de 10 Hz. Qual será a tensão RMS medida?
- Considere agora que a frequência do gerador será elevada para 10 kHz. Qual será o novo valor da tensão?
- A que conclusões você chegou a respeito da análise realizada?
- Pesquise na internet e na bibliografia indicada e descreva os motivos para uso de um resistor em paralelo com capacitor nas entradas dos osciloscópios.

Alguns dos efeitos observados no exercício anterior podem ser reduzidos com o auxílio de pontas de prova com atenuação, normalmente na faixa de 10x. A figura abaixo mostra um diagrama simplificado da estrutura interna de uma ponta de prova passiva, conectada à entrada de um osciloscópio. Descreva como este dispositivo melhora as condições da medição realizada anteriormente.



- Descreva o processo de compensação de pontas de prova e por que é importante realizá-lo.

Com relação ao osciloscópio do NI-ELVIS II:

- identifique qual é a máxima tensão de entrada na função de osciloscópio.
- Determine a impedância de entrada do osciloscópio.



- iii. Determine a resolução.
- iv. Determine a faixa de passagem.
- v. Determine a máxima taxa de amostragem.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL<sup>3</sup>

- Introdução: identificação de funcionalidades e principais características do NI-ELVIS. Faça uma inspeção no NI-ELVIS, procurando identificar as suas funcionalidades e os pontos de acesso aos seguintes recursos:
  - i. Fontes de tensão contínua: + 5 V,  $\pm 15$  V (onde estão os pontos de acesso? Quais são as correntes máximas fornecidas por estas fontes?).
  - ii. Fontes de tensão alternada (idem).
  - iii. Entradas do multímetro digital (DMM).
  - iv. Entradas do osciloscópio.
  - v. Saída do gerador de funções.
- Medição de tensão contínua:

Monte um circuito<sup>4</sup> constituído por dois resistores ligados em série e conectados a uma fonte de tensão contínua de 8 V referenciada à terra. Os resistores devem ser de 1 k $\Omega$  e 3,3 k $\Omega$ , sendo o último conectado ao terminal de terra da fonte.

  - i. Calcule<sup>5</sup> a queda de tensão sobre o resistor de 3,3 k $\Omega$ .
  - ii. Meça a queda de tensão usando o DMM do NI-ELVIS. Registre o resultado.
  - iii. Compare os resultados e faça comentários sobre eventuais desvios e algarismos significativos.
  - iv. Você considera que a medição foi realizada de forma correta? O resultado foi fornecido de forma completa? Comente.
- Medição de tensão alternada:

Monte um circuito similar ao anterior, entretanto utilizando o gerador de funções.

Caso-1: utilize dois resistores de 10 k $\Omega$  e uma onda senoidal com amplitude de 2 V de pico.

  - i. Calcule<sup>6</sup> a queda de tensão RMS sobre o resistor ligado à referência de terra da fonte.
  - ii. Meça a queda de tensão usando o DMM do NI-ELVIS. Registre o resultado.
  - iii. Meça a queda de tensão usando o multímetro JDR DMM-200. Registre o resultado.

Caso-2: utilize dois resistores de 10 k $\Omega$  e uma onda quadrada com amplitude de 2 V de pico.

  - iv. Repita os procedimentos anteriores e registre os resultados.
  - v. Compare os resultados obtidos nos dois casos e discuta eventuais discrepâncias.

<sup>3</sup> Os procedimentos de medição devem ser registrados em seu relatório.

<sup>4</sup> Não faça “gambiarras”. Procure realizar montagens “limpas”, com os fios correndo rentes ao proto-board. Utilize cabos apropriados para conectar os instrumentos visando evitar danos aos mesmos e inserir erros nas suas medições.

<sup>5</sup> Atenção para o número de algarismos significativos ao reportar os resultados.

<sup>6</sup> Atenção para o número de algarismos significativos ao reportar os resultados.



- Para osciloscópios:
  - Use o gerador de sinais e com um cabo coaxial (ou ponta de prova) aplique um sinal periódico (senoidal) no canal-1 do osciloscópio. Em seguida, proceda os ajustes dos controles horizontal, vertical e trigger para que este sinal apareça estável na tela. Se for necessário use o controle de posição vertical para que o sinal seja mostrado no centro da tela. Anote a posição de cada um dos controles.
  - Altere a amplitude do sinal no gerador de sinais e refaça o ajuste do osciloscópio.
  - Faça o mesmo quando a frequência do sinal é alterada.
  - Se o sinal original não tiver nenhuma componente CC (+ ou -), altere mais uma vez o Gerador de Sinais para inseri-la. Tendo sido constatada a existência dessa componente no sinal, use o controle de Coupling (acoplamento) AC/DC e verifique a ação sobre o sinal. Descreva o que acontece.
  - Coloque no outro canal do osciloscópio o sinal (onda quadrada) proveniente do gerador interno do próprio osciloscópio.
    - Use os controles do osciloscópio para visualizar apenas a onda quadrada na tela do osciloscópio.
    - Os osciloscópios possuem um controle para introduzir ou remover um filtro passa-baixas de 20 MHz para filtrar o sinal. Descreva a ação do filtro sobre a onda quadrada.
  - Acione a tecla “SLOPE” (Inclinação) e veja o resultado na tela do osciloscópio. Descreva o resultado.
  - Acione a tecla “trigger position” (posição do trigger) e veja o resultado na tela do osciloscópio. Descreva o resultado.
  - Determine o período do sinal senoidal na tela do osciloscópio usando apenas os cursores existentes.

#### QUESTÕES:

1. Com o gerador de sinais do NI-Elvis é possível gerar uma onda de amplitude fixa e frequência variável? Explique.
2. Com o gerador de sinais do NI-Elvis é possível gerar uma onda senoidal deformada? Explique.
3. Explique sucintamente as diferenças entre os modos de operação Normal, Automático e SWP (Single sweep ou single shot), normalmente encontrados em osciloscópios.
4. Qual o valor da resistência de saída do gerador de sinais do NI-Elvis?
5. É possível medir a amplitude de um sinal contínuo com o osciloscópio?
6. É possível usar uma ponta de prova tradicional no osciloscópio do NI-Elvis da mesma forma que com osciloscópios convencionais?
7. Faça uma descrição de como pode ser adquirido um sinal periódico com o osciloscópio do NI-Elvis. Informe inclusive os controles que devem ser ajustados.



## Módulo-02 CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

### OBJETIVOS

- Compreender como realizar a calibração de instrumentos eletrônicos de medição.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

- Ao finalizar esta atividade o aluno deverá ser capaz de:
  - Escrever procedimentos para realizar a calibração de instrumentos de medição.
  - Determinar o resultado completo de uma grandeza (valor e incerteza), obtido por um processo de medição.
  - Manter a organização do ambiente laboratorial visando o bom uso de equipamentos e instalações
  - Comportar-se adequadamente no ambiente do laboratório, não expondo nem a si nem a outros a riscos sobre a sua integridade física.

### ELEMENTOS PARA O RELATÓRIO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

#### – Fundamentação

- Definições dadas no VIM<sup>7</sup> para os seguintes termos:
  - Calibração.
  - Rastreabilidade.
  - Padrão.
- Sobre a norma técnica ABNT NBR-ISO/IEC-17025:2005 - Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração (**resumo disponível no Moodle**)
  - O que esta Norma estabelece?
  - De acordo com ela, quem pode (quais as condições para o laboratório) realizar calibrações?
  - Quais os tipos de requisitos que a Norma estabelece?
  - Quais os requisitos de caracter técnico são exigidos do laboratório para atender a Norma?
  - Descreva, resumidamente, cada um dos requisitos de ordem técnica que a Norma prescreve para o laboratório.
- Definir os termos definição, realização e representação aplicados à unidade de medida.
- Relatar sobre o propósito da (para que serve a) “calibração”.

#### – Procedimento de medição (pré-relatório)

(elaborar o procedimento para calibração do instrumento, de acordo com a atividade experimental):

Ver a instrução DOQ-CGCRE-018 Revisão 00 – SETEMBRO/2006 INMETRO “ORIENTAÇÃO PARA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS ANALÓGICOS E DIGITAIS DE MEDIÇÃO NA ÁREA DE ELETRICIDADE”, **disponível no Moodle**.

Pelo menos, as seguintes componentes de incerteza devem ser consideradas, quando relevantes, na avaliação da incerteza de medição:

- a variabilidade das leituras;
  - Nota:** se o instrumento for suficientemente sensível, indicações sucessivas poderão apresentar diferentes valores para o mensurando;
- a resolução da escala do instrumento sob calibração;
- as condições ambientais (pressão atmosférica, temperatura ambiente, humidade relativa do ar)

<sup>7</sup> Vocabulário Internacional de Termos Gerais e Fundamentais de Metrologia



- a resolução, efetivamente utilizada, de leitura do padrão
- a incerteza de calibração do padrão utilizado, declarada no certificado de calibração.

**ATIVIDADE EXPERIMENTAL**

1. Fazer a calibração do multímetro JDR, na função volt -DC, faixa de 2V, utilizando o método de comparação tomando por base a Norma Brasileira ABNT NBR ISO/IEC-17025 e a instrução DOQ-CGCRE-018 Revisão 00 – SETEMBRO/2006 INMETRO “ORIENTAÇÃO PARA CALIBRAÇÃO DE INSTRUMENTOS ANALÓGICOS E DIGITAIS DE MEDIÇÃO NA ÁREA DE ELETRICIDADE”. Usar a fonte “Variable Power Supply” do NI-Elvis, como fonte do sinal padrão.

**Nota-1:** Sugere-se escrever a função de medição para a calibração

**Nota-2:** Sugere-se preencher as tabelas abaixo.

**Nota-3:** O resultado da calibração, em cada ponto de medição calibrado, é a verificação ou não de “conformidade com as especificações”. Explicitar, no caso do instrumento em questão, os valores constantes no manual do instrumento, os valores que serão comparados.

**Dados de medição:**

<b>SISTEMA DE MEDIÇÃO PADRÃO</b>					
<b>SISTEMA DE MEDIÇÃO A CALIBRAR</b>					

**Planilha para Cálculo da Incerteza de Medição**

Componentes de Incerteza	Tipo de Incerteza	Grandeza de entrada ( $X_i$ )	Distribuição	Divisor	* $C_i$	$v_{eff}$	$u_i(x)$	$u_i^2(x)$	$u_i^4(x)$
u <sub>c</sub> - Incerteza Combinada									
U - incerteza expandida (95%)									



## Módulo-03 FONTES DE INCERTEZA EM SM: efeito de carga

### OBJETIVOS

- Compreender a influência do medidor no resultado de uma medição.
- Investigar estratégias para minimizar o efeito de carga.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

Após realizar esta atividade, o aluno deverá demonstrar que é capaz de:

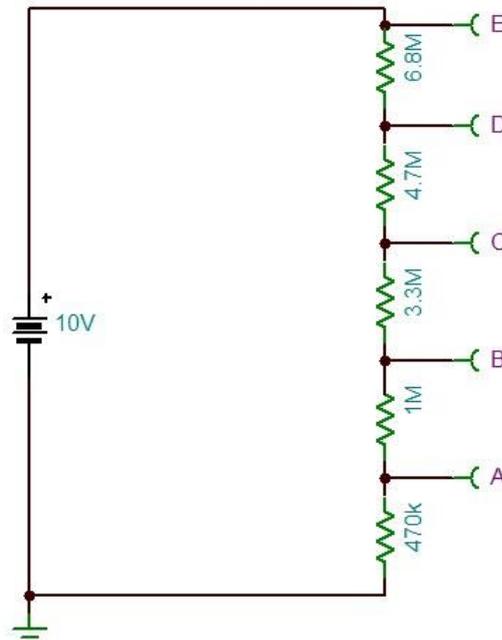
- Reconhecer e explicar o efeito sistemático causado pela resistência de entrada finita dos medidores.
- Propor medidas para minimização desse efeito sobre a incerteza da medição.
- Manter o ambiente laboratorial organizado.
- Utilizar instrumentos de medição sem expor a si e outros a riscos de acidentes.

### ELEMENTOS PARA O PRÉ-RELATÓRIO

- Fundamentação: efeitos sistemáticos e aleatórios que podem influenciar a medição da tensão de Thévenin nos terminais de um resistor. Efeito de carga em circuitos de medição de tensão. Dispositivos e/ou circuitos eletrônicos utilizados para minimizar o efeito de carga.
- Considere um circuito elétrico formado por cinco resistores, com valores nominais de  $6.8\text{M}\Omega$ ,  $4.7\text{M}\Omega$ ,  $3.3\text{M}\Omega$ ,  $1\text{M}\Omega$  e  $470\text{k}\Omega$ , conectados segundo a figura abaixo. O circuito será alimentado por uma fonte de tensão contínua de 10V. O objetivo é obter o valor das tensões nos nós A a E, utilizando o voltímetro digital do NI-Elvis (DMM).
  - i. Escreva o *procedimento de medição*<sup>8</sup>, conforme definição dada no VIM<sup>9</sup>.
  - ii. Forneça uma relação dos equipamentos, componentes e instrumentos a utilizar.
  - iii. Calcule a tensão esperada em cada um dos nós do circuito em relação à referência de terra. Disponha os resultados em uma tabela, partindo do nó A em direção ao E e ocupando a 1ª coluna.
  - iv. Encontre o valor da resistência de entrada do voltímetro digital do NI-Elvis.
  - v. Considerando que as medições serão realizadas com o voltímetro do NI-Elvis, calcule novamente a tensão em cada um dos nós do circuito. Disponha os resultados na 2ª coluna da tabela.
  - vi. Determine os erros, em termos percentuais, causados pela presença do medidor em relação às tensões calculadas no item (iii).
  - vii. Trace um gráfico mostrando a variação do erro percentual, partindo do nó A em direção ao E.

<sup>8</sup> Os procedimentos de medição deverão sempre ser registrados em seus relatórios.

<sup>9</sup> VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.



- Proponha um circuito eletrônico para minimizar o efeito observado anteriormente, utilizando amplificadores operacionais (LM741, TL071, etc.):
  - i. Indique as características mais relevantes destes dispositivos para a aplicação em questão.
  - ii. Faça um diagrama do circuito de medição a ser montado.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Construa o circuito elétrico formado pelos 5 resistores, como especificado no pré-relatório.
- Utilizando o voltímetro do NI-Elvis, faça as medições das tensões de nó em relação à terra, partindo do nó A em direção ao E. Disponha os resultados na 3ª coluna da tabela.
- Repita as medições, utilizando um dos voltímetros portáteis disponíveis no laboratório (ICEL, JDR, outros). Disponha os resultados na 4ª coluna da tabela.
- Construa o circuito eletrônico projetado para minimizar o efeito de carga.
  - i. Utilize inicialmente um amplificador operacional LM741.
  - ii. Conecte os dois circuitos e faça novamente as medições, utilizando o voltímetro do NI-Elvis. Disponha os resultados na 5ª coluna da tabela.
- Repita os procedimentos, utilizando um amplificador operacional TL071. Disponha os resultados na 6ª coluna da tabela

### ELEMENTOS PARA O RELATÓRIO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Elementos já desenvolvidos no pré-relatório.



- Especificações dos equipamentos, componentes e instrumentos utilizados nos experimentos (as mais relevantes para a medição em questão).
- Desenvolvimento:
  - i. Descrição das atividades.
  - ii. Coleta dos dados e preenchimento da tabela.
  - iii. Para cada sequência de medições realizada:
    - a. Determine o erro percentual dos valores medidos em relação aos calculados.
    - b. Trace um gráfico mostrando a variação do erro percentual, partindo do nó A em direção ao E.
- Resultados e discussão.
  - i. Compare os resultados medidos com os calculados no pré-relatório.
  - ii. Compare e discuta eventuais diferenças observadas nas medições utilizando o voltímetro do NI-Elvis e o voltímetro portátil.
  - iii. Compare e discuta eventuais diferenças observadas nas medições considerando o circuito para minimização do efeito de carga construído com o amp. op. LM741 e o TL071.
  - iv. Discuta e justifique eventuais discrepâncias observadas nas medições.
- Conclusões.
- Referências bibliográficas.



## Módulo-04 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DA CORRENTE ELÉTRICA

### OBJETIVOS

- Aprender a projetar e especificar dispositivos para medição da corrente elétrica (CC e CA).
- Aprender a elaborar procedimentos para realizar medições de altas correntes (CC e CA), incluindo o modelo matemático de medição.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

- Ao finalizar esta atividade o aluno deverá ser capaz de:
  - projetar e implementar dispositivos para medição de corrente contínua e alternada.
  - avaliar o efeito dos dispositivos para medição de corrente, CC e CA, no modelo de medição.
  - elaborar procedimentos para medição de corrente (CC e CA), inclusive computando corretamente o efeito dos dispositivos de medição sobre o modelo matemático de medição.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL

#### **Atividade-1** método indireto – derivador de corrente (do inglês current shunt)

- Execute um procedimento para obter, por medição, o valor de correntes em circuitos CA ( $f \geq 50\text{Hz}$ ) que excedam o valor de fundo de escala do medidor disponível, empregando um dispositivo derivador de corrente. O derivador deverá:
  - possibilitar ao amperímetro do NI-Elvis funcionar para correntes de até 1 A.
  - ter resistência menor do que  $1\Omega$ , medida entre seus terminais de entrada.
- A relação de divisão de corrente no circuito de medição deve ser determinada, considerando também a resistência interna do amperímetro do NI-Elvis.
- Escrever a equação da corrente no instrumento em relação à total, incluindo todos os componentes que sejam relevantes para a incerteza da medição.

**Nota:** disponível no laboratório: resistores de precisão  $0,1\Omega$ , resistores de  $11\Omega/5W$  e fonte de alimentação CA, 100V, 5A.

#### **Atividade-2** método indireto - Conversor corrente/tensão

- Execute um procedimento para obter, por medição de tensão com o voltímetro do NI-Elvis, o valor da corrente de até 1A ( $f \geq 50\text{Hz}$ ) em circuitos elétricos, utilizando um conversor corrente/tensão. Esse conversor deverá:
  - ter relação corrente/tensão de 1A/10V, independente da frequência.
  - ter resistência menor ou igual a  $1\Omega$ .
- Testar a qualidade do sinal de saída.
- Escrever a equação da corrente de total em relação à medida com um voltímetro, incluindo todos os componentes que sejam relevantes para a incerteza da medição.



ELEMENTOS PARA O RELATÓRIO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL:

– Fundamentação

- Descreva as características metrológicas dos seguintes dispositivos de medição de correntes:
  1. Derivadores ou shunts.
  2. Conversor corrente/ tensão.
  3. Transformadore de corrente convencional (não serão objeto de estudo nesta aula).
  4. Transformador de corrente com pastilha de efeito-Hall.
  5. Dispositivos óticos para medição de corrente elétrica.

– Procedimento de medição para a atividade experimental (**PRÉ-RELATÓRIO**).

– Equipamentos, componentes e instrumentos utilizados (**PRÉ-RELATÓRIO**).

– Resultados;

– Análise dos resultados:

- Compare e analise os resultados de medições obtidas em cada um dos dois problemas.
- Construa o modelo matemático de medição para os casos tratados na parte experimental.
- Análise o efeito da tolerância dos resistores do AMPLIFICADOR DE INSTRUMENTAÇÃO em seu funcionamento.

– Conclusão;

Referências bibliográficas.



## Módulo-05 MEDIÇÃO DE SINAIS AC – MÉTODO DO VALOR MÉDIO ABSOLUTO

### OBJETIVOS

- Compreender o método do valor médio absoluto para determinação do valor RMS de sinais AC e as suas limitações.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

Após realizar esta atividade, o aluno deverá demonstrar que é capaz de:

- Implementar circuitos eletrônicos para a medição do valor RMS de sinais com forma de onda cuja expressão analítica é conhecida, a partir do valor médio retificado.
- Escrever procedimentos para fazer a medição do valor RMS de sinais com forma de onda com expressão analítica conhecida, a partir do valor médio absoluto.

### INTRODUÇÃO

O valor eficaz de uma função periódica é definido como a raiz quadrada do valor médio da função ao quadrado, ou seja,

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f^2(t) dt}. \quad (1)$$

No caso de circuitos elétricos, o valor eficaz de uma tensão alternada é igual ao valor da correspondente tensão contínua que dissiparia a mesma potência em uma carga resistiva, daí sua importância para análise de circuitos.

Existem várias abordagens para se medir o valor eficaz de sinais, dentre as quais os conversores térmicos, circuitos eletrônicos baseados em fator de ganho, medidores RMS digitais e “RMS-verdadeiros”. Em medidores de baixo custo, a medição é frequentemente realizada de modo indireto, convertendo-se algum parâmetro do sinal para o valor RMS desejado. Por exemplo, o valor RMS de sinais senoidais possui uma relação com o valor de pico dada por

$$V_{RMS\sim} = \frac{V_P}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

Para ondas quadradas e triangulares esta mesma relação é dada, respectivamente, por

$$V_{RMS\Box} = V_P \quad \text{e} \quad V_{RMS\Delta} = \frac{V_P}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Portanto, a medição RMS pode ser realizada indiretamente por meio de um circuito detector de pico seguido de um amplificador com ganho fixo.

Os circuitos para medição indireta possuem a limitação de estarem fixamente associados a um determinado tipo de sinal. Por exemplo, ao utilizar um voltímetro AC por detecção de pico, supõe-se que o sinal a ser medido seja *senoidal*. Caso este aparelho seja utilizado para medir o valor eficaz de uma onda quadrada, triangular ou arbitrária, os resultados apresentarão um erro (efeito sistemático), que poderá ou não ser compensado dependendo da experiência do operador. Portanto,



é importante estar atento a estas restrições ao utilizar tais aparelhos. Os medidores RMS-verdadeiro (“true-RMS”), ao contrário, realizam a medição por meio de um circuito eletrônico que realiza a equação (1). Portanto, eles podem ser utilizados para medir sinais periódicos com qualquer forma de onda, inclusive arbitrárias.

Nesta aula prática você investigará o funcionamento de um circuito eletrônico para medição indireta do valor RMS de ondas senoidais. O medidor é formado por um circuito para extração do valor médio absoluto  $|\bar{V}|$  da tensão de entrada, definido por

$$|\bar{V}| = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt$$

seguido por um amplificador de ganho fixo, como mostrado na figura 1.

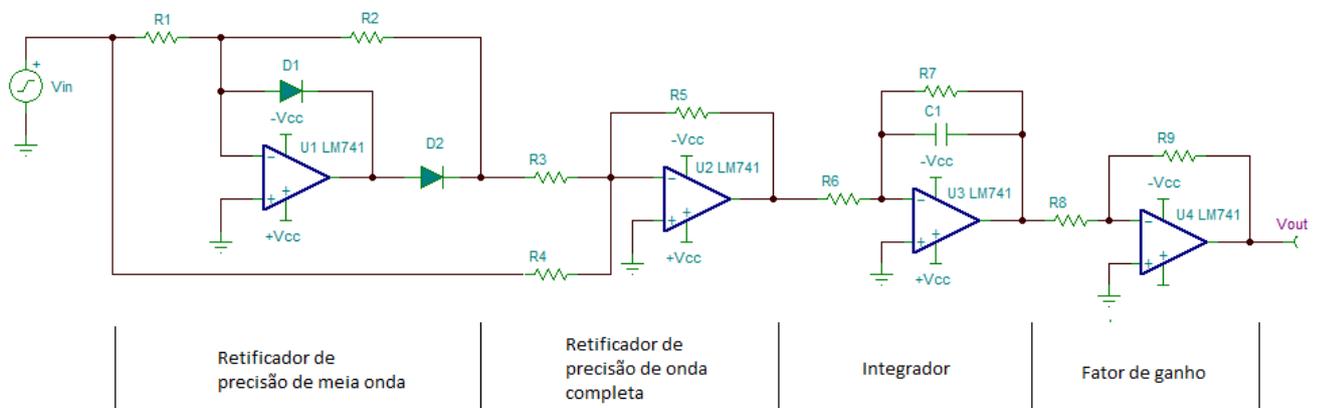


Figura 1: circuito para medição do valor RMS pelo método do valor médio absoluto.

O retificador de precisão de onda completa tem a função de extrair o valor absoluto do sinal. O integrador deve ser projetado de forma a extrair o valor médio da onda retificada. O multiplicador fornece um ganho fixo, determinado pela relação entre o valor RMS e o valor médio absoluto.

Com alguma manipulação, pode-se reduzir o circuito para o formato visto na figura 2, mais simples para implementação.

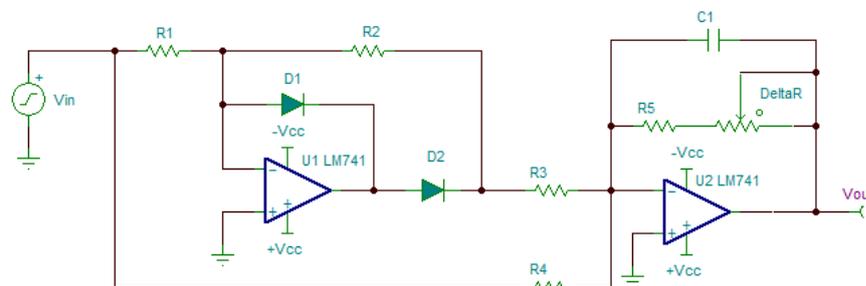


Figura 2: medidor RMS reduzido.

Observa-se que os estágios de integração e ganho foram associados ao estágio de retificação de onda completa. Portanto, o 2º amplificador operacional passa a exercer 3 funções simultaneamente.



## ELEMENTOS PARA O PRÉ-RELATÓRIO

- Fundamentação teórica:
  - Determinar a relação entre o valor médio absoluto ( $|X|$ ) e o valor RMS considerando:
    - sinal senoidal;
    - sinal quadrado;
    - sinal triangular.
  - Descrição do procedimento para obter o valor RMS a partir do valor médio absoluto e sua relação com os circuitos mostrados nas figuras 1 e 2.
- Pesquise na internet e na bibliografia indicada<sup>10</sup> a respeito dos circuitos retificadores de precisão de meia-onda e de onda completa.
- Explique o funcionamento de um desses circuitos.
  - Explique a função no circuito dos componentes mais importantes (diódos, AmpOp, resistores).
- Faça um esboço do circuito retificador de precisão de meia-onda. Complete o esboço de forma a se ter o circuito retificador de precisão de onda-completa. Dê destaque ao bloco “circuito somador”.
  - Qual o critério usado para determinar o valor das resistências do resistores no bloco de saída?
- Teste o retificador de onda completa no simulador Spice, considerando um sinal de entrada senoidal com amplitude de 2 Vp e frequência de 60 Hz. Considere o uso de amplificadores operacionais TL071 (ou da família 741) e diodos de sinal 1N4148. **Insira as figuras em seu pré-relatório e verifique se o comportamento é similar ao previsto.**
- Faça um esboço do circuito integrador. Lembre-se que o objetivo deste circuito é fornecer o valor médio (absoluto) da onda retificada.
  - Qual o critério para determinação do valor da capacitância do capacitor e da resistência do resistor?
  - Você vê necessidade de uso de AmpOps com características especiais para executar essa função (integrador)? Qual a principal diferença entre o TL071 e AmpOps da família do 741?
- Teste o circuito no simulador Spice considerando as especificações do sinal indicado anteriormente e conecte-o à saída do retificador de onda completa. Considere que a amplitude da oscilação (“ripple”) da frequência fundamental na saída deve ser no máximo 1/20 da amplitude do sinal de entrada. Determine o valor médio do sinal retificado. Verifique se a saída realmente fornece o valor médio absoluto do sinal retificado. Insira as figuras em seu pré-relatório e verifique se o comportamento é similar ao previsto.

---

<sup>10</sup> Consulte:

Sedra, A. S.; Smith, K. C. *Microeletrônica*. 4ª ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil. 2000.

Franco, S. *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. 3<sup>rd</sup> ed. New York: The McGraw-Hill Companies. 2002.

Schnell, L. *Technology of electrical measurements*. New York: John Wiley & Sons.

Tumanski, S. *Principles of electrical measurements*. New York: Taylor & Francis. 2006.



- Faça um esboço do circuito de amplificação ganho do sinal com base na relação entre o valor médio absoluto e o valor RMS levantada na fundamentação teórica. Determine os valores dos resistores do circuito.
- Determine o valor RMS do sinal especificado.
- Teste o circuito no simulador Spice e conecte-o à saída do integrador. Verifique se a saída realmente fornece o valor RMS do sinal de entrada. Insira as figuras em seu pré-relatório e verifique se o comportamento é similar ao previsto.
- Com base no que foi observado, reduza o circuito para o formato mostrado na figura 2. Faça a simulação no Spice. Insira as figuras em seu pré-relatório e verifique se o comportamento é similar ao previsto.
- Experimente alterar a amplitude e a frequência do sinal de entrada. Verifique o comportamento do circuito para frequências muito abaixo e muito acima do especificado (60Hz). Insira as figuras em seu pré-relatório e comente o que foi observado.
- Experimente alterar o formato da onda do sinal de entrada. Verifique o comportamento do circuito. Insira as figuras em seu pré-relatório e comente o que foi observado.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL<sup>11</sup>

#### **Atividade-1** – Retificador de precisão.

Construa o circuito retificador de precisão de onda completa, conforme o projeto realizado em seu pré-relatório.

- i. Aplique um sinal senoidal de 2 Vp e frequência de 60 Hz, conforme especificado no pré-relatório.
- ii. Utilizando o osciloscópio do NI-Elvis, verifique a forma de onda nas saídas dos retificadores de meia-onda e de onda completa. Registre os resultados no seu relatório. Comente e justifique eventuais discrepâncias.

#### **Atividade-2** – Circuito medidor do valor médio absoluto.

- i. Adicione o capacitor especificado no pré-relatório ao circuito retificador de onda completa de forma a realizar a integração, conforme mostrado na figura 2.
- ii. Utilizando o osciloscópio, verifique a forma de onda na saída do circuito. Confirme se a saída fornece o valor médio absoluto do sinal. Registre os resultados no seu relatório. Comente e justifique eventuais discrepâncias.
- iii. Varie a frequência do sinal de entrada, considerando valores menores e maiores do que o especificado, e verifique o comportamento da saída. Registre os resultados no seu relatório.
- iv. Verifique a resposta do circuito para ondas quadrada e triangular. Registre os resultados no seu relatório.

#### **Atividade-3** – Circuito medidor do valor RMS.

- i. Insira o resistor variável no ramo de realimentação de forma a ajustar o ganho, convertendo o circuito em um medidor do valor RMS. Considere o resistor projetado no pré-relatório.

---

<sup>11</sup> Faça montagens organizadas com os componentes e condutores rentes à placa de prototipação (proto-board). Esteja atento para as questões de segurança.



- ii. Utilizando o osciloscópio, verifique a forma de onda na saída do circuito. Confirme se a saída fornece o valor RMS do sinal. Registre os resultados no seu relatório. Comente e justifique eventuais discrepâncias.
- iii. Repita os testes realizados na atividade 2, variando a frequência e a forma de onda da entrada. Registre os resultados no seu relatório.

### ELEMENTOS PARA O RELATÓRIO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Elementos já desenvolvidos no pré-relatório.
- Especificações dos equipamentos, componentes e instrumentos utilizados nos experimentos (as mais relevantes para a medição em questão).
- Procedimento<sup>12</sup> de medição:
  - iv. Descrição das atividades.
- Registro dos dados coletados.
- Resultados e discussão.
  - v. Explique por que é necessário utilizar um retificador de precisão no circuito estudado. Uma ponte de diodos seria igualmente viável?
  - vi. Explique a função de cada um dos 2 diodos do retificador de precisão.
  - vii. A tolerância dos resistores do circuito de retificação de onda completa tem importância no resultado da medição? Explique.
  - viii. Descreva se o circuito montado mede corretamente os valores médios absolutos para ondas quadradas e triangulares.
  - ix. Descreva se o circuito mede corretamente os valores RMS para ondas quadradas e triangulares.
  - x. Explique o que é necessário alterar neste circuito para que seja possível realizar a medição do valor RMS de ondas quadradas e triangulares.
  - xi. Compare os resultados medidos com os calculados no pré-relatório. Discuta eventuais diferenças observadas.
- Conclusões.
- Referências bibliográficas.

---

<sup>12</sup> De acordo com o VIM, procedimento é uma “Descrição detalhada de uma medição de acordo com um ou mais princípios de medição e com um dado método de medição, baseada em um modelo de medição e incluindo todo cálculo destinado a obtenção de um resultado de medição.

NOTA 1: Um procedimento de medição e geralmente documentado em detalhes suficientes para permitir que um operador realize uma medição.



## Módulo-06 MEDIÇÃO DE SINAIS AC – MÉTODO DO VALOR VERDADEIRO

### OBJETIVOS

- Compreender os fundamentos para medição do valor RMS de sinais periódicos com forma de onda indeterminada.
- Compreender as diferenças entre os sistemas de medição de valor RMS por meios indiretos e pelo “valor verdadeiro”.
- Compreender o funcionamento dos medidores RMS verdadeiro explícitos e implícitos.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

Após realizar esta atividade, o aluno deverá demonstrar que é capaz de:

- Implementar circuitos eletrônicos para a medição do valor RMS de sinais periódicos com forma de onda arbitrária.
- Escrever procedimentos para fazer a medição do valor RMS verdadeiro de sinais.

### INTRODUÇÃO

**ATENÇÃO:** por motivos não esclarecidos, o modelo Spice fornecido pelo fabricante do circuito integrado AD633 (Analog Devices) NÃO FUNCIONA NO SIMULADOR LTSpice. Sugere-se o uso do TINA-TI, Orcad, MultiSim ou outros simuladores.

Na aula prática anterior foram realizados o desenvolvimento e análise de um circuito para medição do valor RMS de sinais periódicos de forma indireta. Tal circuito calculava o valor médio do sinal retificado e o multiplicava por uma constante cujo valor dependia da forma de onda do sinal (relação  $|\bar{V}|/V_{RMS}$ ). Uma das limitações dessa abordagem é que, uma vez determinado a constante, a medição fica vinculada àquela forma de onda. Assim, se a constante for ajustada, por exemplo, para ondas senoidais, a medição de outras ondas gerará um resultado incorreto.

Nesta aula prática você construirá um circuito eletrônico para a medição do valor de RMS de qualquer onda periódica, independente do seu formato. Por este motivo, o circuito é frequentemente denominado de “medidor RMS verdadeiro”.

O valor eficaz de uma função periódica é definido como a raiz quadrada do valor médio da função ao quadrado, ou seja,

$$f_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f^2(t) dt}. \quad (1)$$

Um medidor de tensão RMS verdadeiro é um circuito (analógico ou digital) capaz de realizar o cálculo definido pela eq. 1. No caso analógico, existem duas abordagens, conhecidas como métodos



“explícito” e “implícito”<sup>13</sup>. No método explícito as operações de elevação ao quadrado, integração e raiz quadrada são realizadas sequencialmente, como mostrado no circuito na figura 1.

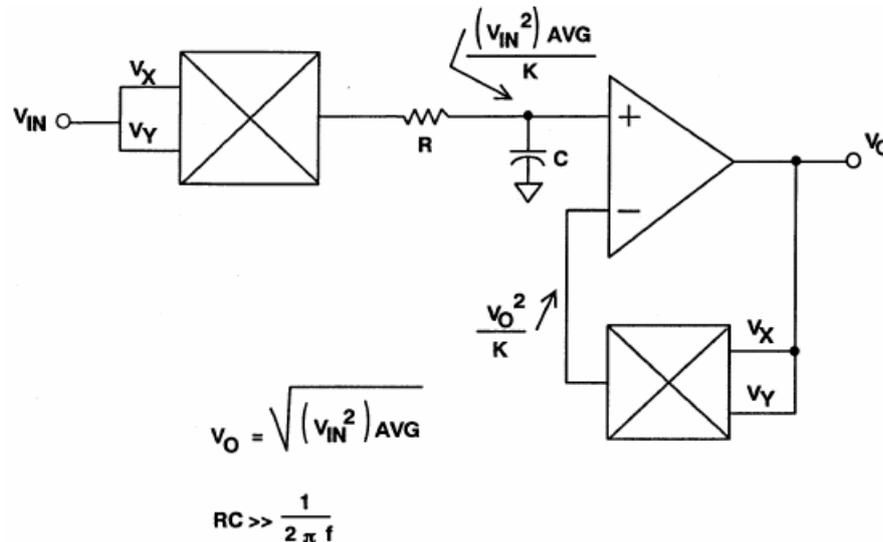


Figura 1: medidor RMS verdadeiro explícito.

Os quadrados na figura representam multiplicadores analógicos e o filtro  $RC$  é responsável por realizar a integração do sinal. A presença de um multiplicador no laço de realimentação do amplificador operacional tem o efeito de gerar a raiz quadrada do sinal de entrada. Desta forma, a entrada  $V_{in}$  é primeiramente elevada ao quadrado, em seguida integrada e depois se calcula a raiz quadrada do resultado.

O medidor RMS explícito funciona adequadamente, entretanto ele possui duas desvantagens. Primeiro, é preciso utilizar dois multiplicadores analógicos, o que eleva o seu custo. Segundo, a saída do 1º multiplicador pode gerar sinais de elevada amplitude, dependendo do valor de pico de  $V_{in}$  (ex.: se  $V_{in_{pico}} = 5V$ , a saída será  $25V!$ ). Consequentemente, a entrada deverá ser limitada a pequenos sinais ou o restante do circuito deverá ser projetado para lidar com uma elevada faixa dinâmica.

O medidor RMS implícito é um circuito que elimina as duas desvantagens. O processamento pode ser obtido a partir de um circuito multiplicador seguido por um integrador de Miller, como mostrado na figura 2.

<sup>13</sup> Para detalhes, consulte:

Analog Devices. “RMS-to-DC converters”. Tutorial MT-081. 2008. Disponível em: <http://www.analog.com/static/imported-files/tutorials/MT-081.pdf>

Analog Devices. “RMS-to-DC conversion application guide”. 2<sup>nd</sup> ed. Disponível em: [ftp://ftp.analog.com/pub/www/library/applicationGuides/amplifiersLinear/downloads/RMStoDC\\_AppGuide\\_2ndEd.zip](ftp://ftp.analog.com/pub/www/library/applicationGuides/amplifiersLinear/downloads/RMStoDC_AppGuide_2ndEd.zip)

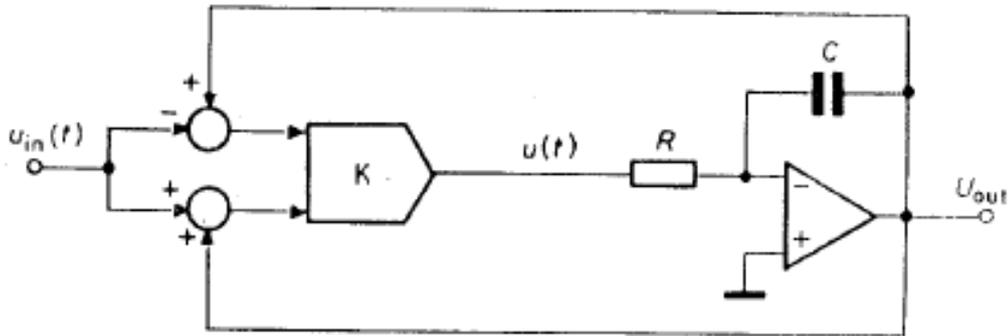


Figura 2: medidor RMS verdadeiro implícito.

A entrada  $U_{in}(t)$  representa o sinal a ser processado. Este é aplicado simultaneamente a um somador e um subtrator e, posteriormente, passa por um multiplicador, gerando  $u(t)$ . O resultado da multiplicação é integrado, gerando a saída  $U_{out}$ . Note que, neste circuito, não é necessário inserir o resistor na malha de realimentação do integrador, uma vez que a realimentação já é realizada através do multiplicador na entrada.

Apesar das vantagens, o medidor implícito oferece menor faixa de passagem e a sua compreensão não é tão imediata quanto no caso do explícito, exigindo alguma manipulação algébrica (ver apêndice).

### ELEMENTOS PARA O PRÉ-RELATÓRIO

- Na figura 3 apresenta-se o diagrama de blocos do multiplicador analógico AD633 da Analog Devices<sup>14</sup>.

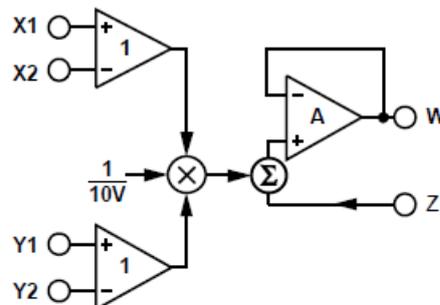


Figura 3: diagrama de blocos do AD633.

Este circuito possui a seguinte função de transferência:

$$W = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10} + Z \quad (2)$$

Com base nessas informações e nas contidas na folha de dados, faça o projeto de um circuito para calcular valor RMS verdadeiro de sinais utilizando a abordagem *implícita*, conforme mostrado na figura 2. Preste atenção aos seguintes detalhes:

<sup>14</sup> Folha de dados disponível em: [http://www.analog.com/static/imported-files/data\\_sheets/AD633.pdf](http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD633.pdf).



- A entrada Z do AD633 é bastante útil em várias situações (por exemplo, para realizar multiplicações em cascata). Entretanto, nesta aplicação ela não será utilizada, devendo ser aterrada.
- As entradas do AD633 são diferenciais e podem ser usadas para realizar a soma e subtração presentes na entrada do circuito. Entretanto, preste atenção aos sinais do somador e do subtrator.
- Faça o projeto do integrador de forma a garantir uma atenuação de -20 dB ( $V_o = V_i/10$ ) na frequência fundamental de 60 Hz.
- Note que não é necessário utilizar o resistor na malha de realimentação do integrador, uma vez que a realimentação já é realizada por meio do multiplicador.
- **ATENÇÃO:** por motivos não esclarecidos, o modelo Spice fornecido pelo fabricante do circuito integrado AD633 (Analog Devices) NÃO FUNCIONA NO SIMULADOR LTSpice. Sugere-se o uso do TINA-TI, Orcad, MultiSim ou outros simuladores.
- Construa o medidor RMS verdadeiro em um simulador Spice. Faça uma simulação de transitório, considerando uma onda senoidal de 2 V<sub>p</sub> e frequência de 60 Hz. Insira as figuras em seu pré-relatório e verifique se o comportamento é similar ao previsto.
- Varie a amplitude do sinal de entrada e verifique o comportamento da saída. Insira as figuras em seu pré-relatório.
- Varie a frequência do sinal entre 0.1 e 10 vezes o valor inicial. Insira as figuras em seu pré-relatório e verifique se o comportamento é similar ao previsto.
- Avalie o comportamento do circuito para ondas quadradas e triangulares de diferentes frequências e amplitudes. Verifique se o cálculo do valor RMS é realmente independente da forma de onda (RMS verdadeiro). Insira as figuras em seu pré-relatório.
- Considerando que o circuito projetado será montado no laboratório:
  - viii. Escreva o *procedimento de medição*<sup>15</sup>, conforme definição dada no VIM<sup>16</sup>.
  - ix. Forneça uma relação dos equipamentos, componentes e instrumentos a utilizar.
  - x. Indique as características mais relevantes que norteiam a escolha dos componentes, visando minimizar os efeitos sistemáticos e melhor adequá-los à aplicação.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Monte o circuito do medidor de RMS verdadeiro projetado no pré-relatório (obs.: procure montar e testar cada parte individualmente, visando antecipar a detecção de erros).
- Alimente o circuito com um sinal senoidal de 2 V<sub>p</sub> e frequência de 60 Hz.
- Utilizando o osciloscópio, verifique as formas de onda na entrada e na saída. Confirme se a medição do valor RMS está correta. Registre os resultados no seu relatório. Comente e justifique eventuais discrepâncias.
- Varie a amplitude e a frequência do sinal de entrada, conforme especificado no pré-relatório. Verifique se a medição do valor RMS está correta. Registre os resultados no seu relatório. Comente e justifique eventuais discrepâncias.

<sup>15</sup> Os procedimentos de medição deverão sempre ser registrados em seus relatórios.

<sup>16</sup> VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.



- Avalie o comportamento do circuito para ondas quadradas e triangulares de diferentes frequências e amplitudes. Verifique se o cálculo do valor RMS é realmente independente da forma de onda (RMS verdadeiro). Registre os resultados no seu relatório. Comente e justifique eventuais discrepâncias.

### ELEMENTOS PARA O RELATÓRIO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Elementos já desenvolvidos no pré-relatório.
- Especificações dos equipamentos, componentes e instrumentos utilizados nos experimentos (as mais relevantes para a medição em questão).
- Desenvolvimento:
  - v. Descrição das atividades.
  - vi. Registro dos dados coletados.
- Resultados e discussão.
  - xii. Calcule o erro percentual do medidor RMS projetado em relação ao valor informado pelo osciloscópio do NI-Elvis. Comente e justifique eventuais discrepâncias.
  - xiii. Descreva se o circuito mede corretamente os valores RMS para ondas quadradas e triangulares.
- Conclusões.
- Referências bibliográficas.

### APÊNDICE

Denominando a tensão na saída do multiplicador de  $v_m(t)$ , tem-se

$$v_m(t) = [v_o(t) - v_i(t)] \cdot [v_o(t) + v_i(t)] = v_o^2(t) - v_i^2(t)$$

Decompondo  $v_i(t)$  em série de Fourier (sinal periódico) e considerando, sem perda de generalização, somente as componentes senoidais (sinal ímpar):

$$v_i(t) = \sum_{k=1}^N V_k \text{sen}(k\omega_0 t)$$

Portanto,

$$v_i^2(t) = \sum_{l=1}^N V_l \text{sen}(l\omega_0 t) \cdot \sum_{m=1}^N V_m \text{sen}(m\omega_0 t) =$$



$$\begin{aligned}
 &= V_1^2 \text{sen}^2(\omega_0 t) + V_1 V_2 \text{sen}(\omega_0 t) \text{sen}(2\omega_0 t) + V_1 V_3 \text{sen}(\omega_0 t) \text{sen}(3\omega_0 t) + \dots \\
 &\quad + V_1 V_N \text{sen}(\omega_0 t) \text{sen}(N\omega_0 t) + \\
 &+ V_2 V_1 \text{sen}(2\omega_0 t) \text{sen}(\omega_0 t) + V_2^2 \text{sen}^2(2\omega_0 t) + V_2 V_3 \text{sen}(2\omega_0 t) \text{sen}(3\omega_0 t) + \dots \\
 &\quad + V_2 V_N \text{sen}(2\omega_0 t) \text{sen}(N\omega_0 t) + \\
 &+ V_3 V_1 \text{sen}(3\omega_0 t) \text{sen}(\omega_0 t) + V_3 V_2 \text{sen}(3\omega_0 t) \text{sen}(2\omega_0 t) + V_3^2 \text{sen}^2(3\omega_0 t) + \dots \\
 &\quad + V_3 V_N \text{sen}(3\omega_0 t) \text{sen}(N\omega_0 t) + \\
 &\quad \vdots \\
 &+ V_N V_1 \text{sen}(N\omega_0 t) \text{sen}(\omega_0 t) + V_N V_2 \text{sen}(N\omega_0 t) \text{sen}(2\omega_0 t) + V_N V_3 \text{sen}(N\omega_0 t) \text{sen}(3\omega_0 t) + \dots \\
 &\quad + V_N^2 \text{sen}^2(N\omega_0 t)
 \end{aligned}$$

Assim,

$$v_i^2(t) = \sum_{l=1}^N V_l^2 \text{sen}^2(l\omega_0 t) + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^N V_m V_n \text{sen}(m\omega_0 t) \text{sen}(n\omega_0 t)$$

Mas

$$V_i = \sqrt{2} V_{RMSi} \quad \text{e} \quad \text{sen}^2(i\omega_0 t) = \frac{1 - \cos(2i\omega_0 t)}{2}$$

Substituindo

$$\begin{aligned}
 v_i^2(t) &= \sum_{l=1}^N \left[ (\sqrt{2} V_{RMSl})^2 \cdot \frac{1 - \cos(2l\omega_0 t)}{2} \right] + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^N V_m V_n \text{sen}(m\omega_0 t) \text{sen}(n\omega_0 t) = \\
 v_i^2(t) &= \sum_{l=1}^N \left[ 2 V_{RMSl}^2 \cdot \frac{1 - \cos(2l\omega_0 t)}{2} \right] + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^N V_m V_n \text{sen}(m\omega_0 t) \text{sen}(n\omega_0 t) = \\
 v_i^2(t) &= \sum_{l=1}^N \{ V_{RMSl}^2 \cdot [1 - \cos(2l\omega_0 t)] \} + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^N V_m V_n \text{sen}(m\omega_0 t) \text{sen}(n\omega_0 t) = \\
 v_i^2(t) &= \sum_{l=1}^N V_{RMSl}^2 - \sum_{l=1}^N V_{RMSl}^2 \cos(2l\omega_0 t) + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^N V_m V_n \text{sen}(m\omega_0 t) \text{sen}(n\omega_0 t)
 \end{aligned}$$

Voltando à equação inicial,

$$v_m(t) = v_o^2(t) - v_i^2(t) \rightarrow$$

$$v_m(t) = v_o^2(t) - \sum_{l=1}^N V_{RMSl}^2 - \sum_{l=1}^N V_{RMSl}^2 \cos(2l\omega_0 t) + \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^N V_m V_n \text{sen}(m\omega_0 t) \text{sen}(n\omega_0 t)$$

A saída do integrador será o valor médio de  $v_m(t)$  (componente contínua).



$$\langle v_m(t) \rangle = \langle v_o^2(t) \rangle - \left\langle \sum_{l=1}^N V_{RMSl}^2 \right\rangle - \left\langle \sum_{l=1}^N V_{RMSl}^2 \cos(2l\omega_0 t) \right\rangle \\ + \left\langle \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}}^N V_m V_n \text{sen}(m\omega_0 t) \text{sen}(n\omega_0 t) \right\rangle$$

A realimentação do circuito força o valor médio de  $v_m(t)$  ser igual a zero (caso contrário, o capacitor se carregaria e o integrador saturaria). Além disso, os valores médios dos termos senoidais e cossenoidais serão iguais a zero (os sinais são ortogonais). Assim,

$$0 = \langle v_o^2(t) \rangle - \left\langle \sum_{l=1}^N V_{RMSl}^2 \right\rangle$$

$$\langle v_o(t) \rangle = \sqrt{\left\langle \sum_{l=1}^N V_{RMSl}^2 \right\rangle}$$

Portanto, o valor médio da tensão de saída é igual ao somatório dos valores RMS das componentes da entrada, ou seja, o valor RMS do sinal.

#### Questões:

- Existem outras opções para medição do RMS-verdadeiro, além dessa estudada? Explique.
- Que tipo de dispositivos poderiam ser usados com a solução desenvolvida acima para se ter um medidor completo?
- Tente fazer uma estimativa do custo aproximado desse medidor. Compare com um voltímetro comercial.
- Em sua opinião, é justificável a diferença de custos entre voltímetros comuns e os de RMS-verdadeiro (true-RMS)?
  - o Páginas na Internet de fabricantes nacionais de instrumentos:
    - Minipa - <http://www.minipa.com.br/>
    - Icel - <http://www.icel-manaus.com.br/>,
    - Politerm - <http://www.politerm.com.br/>,
  - o Páginas na Internet de fabricantes estrangeiros de instrumentos, disponíveis no mercado nacional
    - Fluke - <http://www.fluke.com.br/brpt/home/default.htm>
    - Agilent-<http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?cc=BR>



## Módulo-07 VISUALIZAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DO ALIASING

### OBJETIVOS

- Compreender o funcionamento dos sistemas digitais de medição.
- Compreender as limitações dos sistemas digitais de medição, em particular o problema de falseamento dos componentes de frequência do sinal (aliasing).
- Compreender os procedimentos para evitar o falseamento dos componentes de frequências.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

Após realizar esta atividade, o aluno deverá demonstrar que é capaz de:

- Identificar e descrever o fenômeno do falseamento das componentes de frequência.
- Configurar corretamente o sistema digital de aquisição para evitar o falseamento.

### INTRODUÇÃO

Sistemas digitais de medição são amplamente utilizados devido à grande evolução observada nas últimas décadas dos componentes para digitalização, transferência, armazenamento e processamento. A medição por meios digitais oferece várias vantagens, tais como maior facilidade de implementação e modificação dos algoritmos, maior independência entre o dispositivo de processamento e a aplicação, maior estabilidade frente ao envelhecimento e menor susceptibilidade a ruídos, variações de temperatura, umidade, etc. Entretanto, os medidores digitais também possuem limitações, o que exige do desenvolvedor o conhecimento adequado para realizar o seu projeto.

O uso de um sistema digital para processamento de grandezas analógicas (normalmente encontradas em estado natural) depende das etapas de conversão analógico-digital (AD) e digital-analógico (DA). Este conceito é apresentado na figura 1.

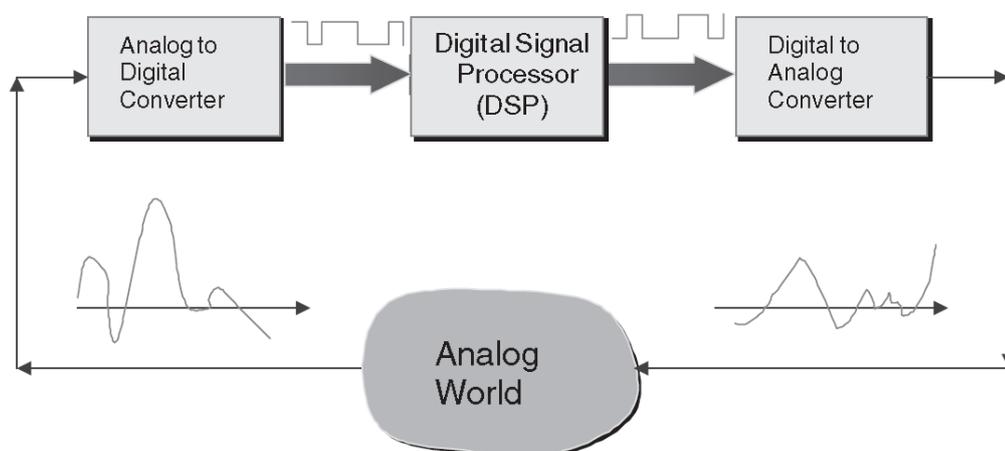


Figura 1: conversões AD e DA.

A figura 2 apresenta um exemplo do conceito, aplicado ao processamento de voz em um telefone celular.

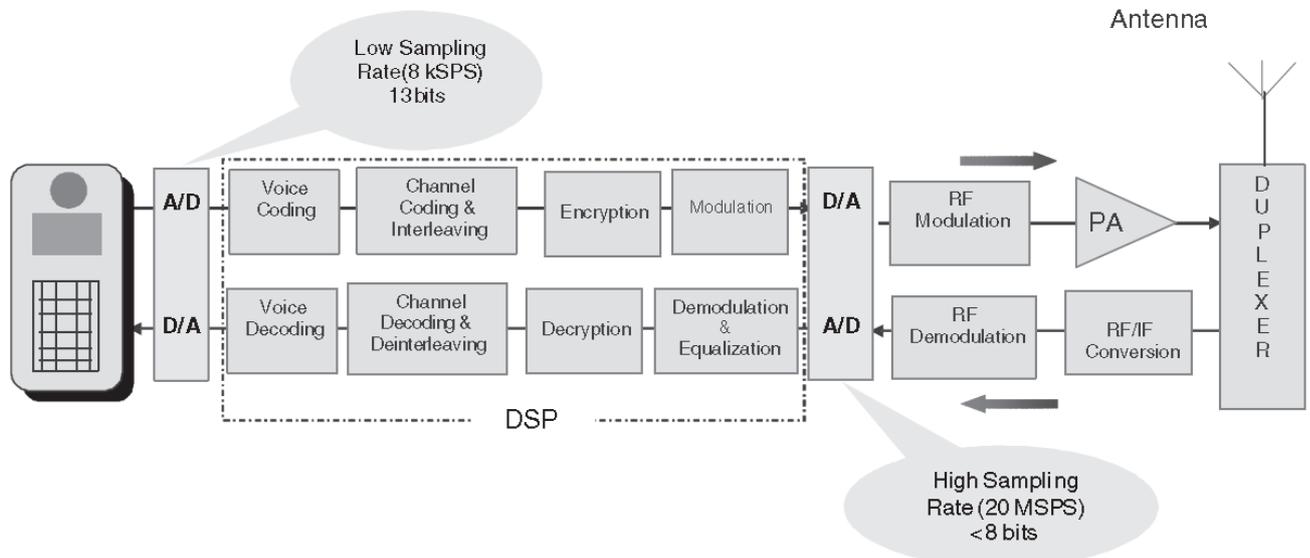


Figura 2: sistema de processamento de voz de um telefone celular.

Nota-se particularmente que, como o processamento é realizado por um algoritmo computacional, a mesma estrutura pode ser utilizada para o processamento de outras grandezas (além da voz), desde que observados certos parâmetros.

Generalizando, um sistema digital de medição envolve as seguintes etapas, mostradas graficamente na figura 3:

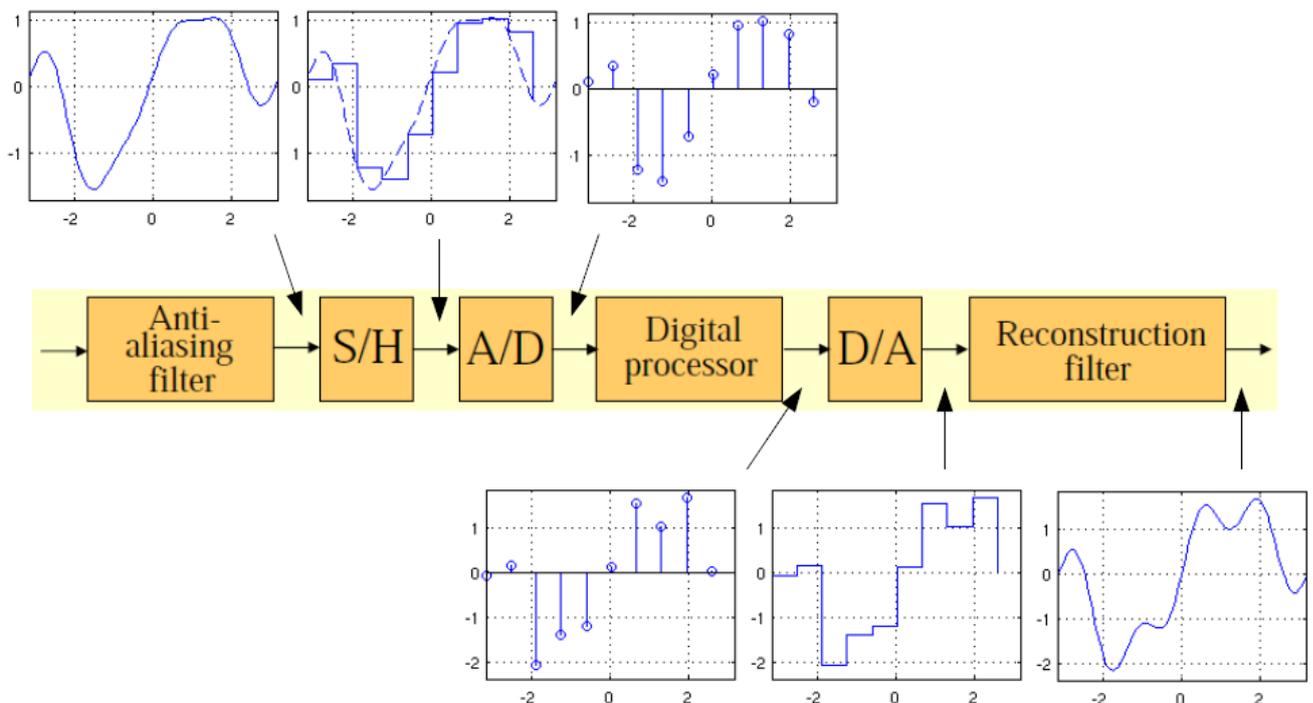


Figura 3: etapas de um sistema digital de medição.

- Conversão do sinal para tempo discreto:



- filtro anti-aliasing;
  - amostrador/retentor (sampler/holder);
  - conversor analógico-digital (ADC);
  - processador digital.
- Conversão do sinal para tempo contínuo (obs.: se necessário):
- Conversor digital-analógico (DAC);
  - filtro de reconstrução (“alisamento”).

Cada uma das etapas introduz incertezas e demanda conhecimento específico para tratamento e definição de componentes. São tais conhecimentos que pretendemos discutir no decorrer das próximas aulas.

Nesta aula prática pretende-se apresentar e discutir o fenômeno do falseamento de frequências (aliasing) e os problemas que ele representa para a medição por meio digital. Posteriormente, vamos avaliar o método tradicionalmente utilizado para evitar a ocorrência do falseamento e os procedimentos para projetar circuitos que realizem este método (filtros anti-aliasing).

### ELEMENTOS PARA O PRÉ-RELATÓRIO

- Fundamentação teórica: pesquise na internet ou na bibliografia indicada<sup>17</sup> e faça uma descrição sucinta sobre o fenômeno do falseamento de frequências (aliasing) e dos problemas que ele causa nos sistemas digitais de medição.
- Considere um sistema de digitalização que trabalhe com uma frequência de amostragem  $f_s = 10$  kHz. Determine qual a maior componente de frequência que pode estar presente no sinal de entrada para que a digitalização ocorra sem falseamento.
- Descreva o procedimento tradicionalmente utilizado para garantir que os requisitos da questão anterior sejam atendidos.
- Considere que um sinal senoidal  $v(t) = A \text{sen}(2\pi f t + \phi)$  com frequência inicial  $f_i = 1$  kHz será digitalizado utilizando o sistema descrito anteriormente (com  $f_s = 10$  kHz). Considere que a frequência  $f$  deste sinal será gradativamente elevada, ocasionando falseamento, até o ponto em que o sistema digital volta a medir (incorretamente) o mesmo sinal  $v(t)$  (inclusive com a mesma frequência  $f_i = 1$  kHz).
  - Deduza uma expressão relacionando  $f$ ,  $f_i$  e  $f_s$  que permita identificar para quais frequências  $f$  do sinal isto ocorre.
- Utilize um simulador tal como o Matlab ou o Scilab para gerar o sinal discutido na questão anterior, com pelo menos 2 períodos completos. Gere um gráfico que apresente o sinal.
  - Eleve gradativamente a frequência do sinal e verifique a ocorrência do aliasing, tal como discutido na questão anterior. Registre as figuras no seu pré-relatório.
  - Comprove se a expressão deduzida está correta, ajustando as frequências de forma a visualizar sempre a mesma onda. Registre as figuras no seu pré-relatório.

---

<sup>17</sup> Consulte:

Oppenheim, A. V.; Willsky, A. S. Sinais e sistemas. 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

Haykin, S.; Veen, B. V. Sinais e sistemas. Porto Alegre: Artmed Ed. Ltda. 2001.

Mitra, S. K. Digital signal processing – a computer-based approach. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw-Hill. 2011.



- Considerando que este experimento será realizado no laboratório:
  - xi. Escreva o *procedimento de medição*<sup>18</sup>, conforme definição dada no VIM<sup>19</sup>.
  - xii. Forneça uma relação dos equipamentos, componentes e instrumentos a utilizar.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Ajuste o osciloscópio do NI-Elvis para utilizar uma taxa de amostragem (sample-rate)  $f_s$  de aproximadamente 10 kS/s (obs.: a taxa de amostragem pode ser identificada no canto superior direito da tela do osciloscópio e varia à medida que se altera a escala horizontal).
- Use o Gerador de Funções do NI-Elvis para produzir um sinal com forma de onda senoidal com  $2 V_p$  e frequência igual a 1/100 da taxa de amostragem ( $f_i = 100$  Hz). Meça o sinal com o osciloscópio e registre em seu relatório.
- Sem alterar o ajuste do osciloscópio, aumente gradativamente a frequência do sinal no Gerador de Funções.
  - Registre as imagens do Osciloscópio. Seja particularmente cuidadoso quando a frequência do sinal estiver próxima da metade do valor da taxa de amostragem.
  - Anote e comente os efeitos que você observar.
- Ajuste a frequência do sinal de entrada de acordo com a expressão deduzida no pré-relatório. Verifique se o osciloscópio volta a apresentar o mesmo sinal original, mesmo elevando-se a sua frequência. Registre as imagens e comente as suas observações.
- Continue aumentando a frequência do sinal ficando atento para valores múltiplos da taxa de amostragem. Registre as imagens e comente as suas observações.

### ELEMENTOS PARA O RELATÓRIO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Elementos já desenvolvidos no pré-relatório.
- Especificações dos equipamentos, componentes e instrumentos utilizados nos experimentos (as mais relevantes para a medição em questão).
- Desenvolvimento:
  - vii. Descrição das atividades.
  - viii. Registro dos dados coletados.
- Resultados e discussão.
- Conclusões.
- Referências bibliográficas.

<sup>18</sup> Os procedimentos de medição deverão sempre ser registrados em seus relatórios.

<sup>19</sup> VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.



## Módulo-08

## FILTROS ANTI-ALIASING

### OBJETIVOS

- Compreender os efeitos sistemáticos associados ao falseamento das componentes de frequências em sistemas digitais de medição (aliasing).
- Compreender os procedimentos para evitar o falseamento dos componentes de frequências.
- Compreender os procedimentos para realizar projetos de filtros anti-aliasing.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

Após realizar esta atividade, o aluno deverá demonstrar que é capaz de:

- Identificar os parâmetros utilizados para projetar filtros anti-aliasing.
- Projetar e implementar filtros anti-aliasing para situações específicas.

### INTRODUÇÃO

O teorema da amostragem estabelece que um sinal  $s(t)$  cuja maior componente de frequência é  $f_{MAX}$  é univocamente representado por sua versão amostrada  $s(n\Delta T)$  se a frequência de amostragem  $f_a = 1/\Delta T$  for igual ou maior que duas vezes  $f_{MAX}$ . Se esta condição não for satisfeita, o sinal original não poderá ser recuperado. Além disso, a falha no atendimento deste requisito causa um efeito conhecido como falseamento de frequências (ou aliasing), no qual os sinais com frequências maiores do que  $f_a/2$  são “rebatidos”, aparecendo como ruídos de baixa frequência no sinal digitalizado. Esta situação causa efeitos sistemáticos na medição e, portanto, deve ser tratada de forma adequada.

Devido à impossibilidade de garantir quais componentes de frequência estarão presentes no sinal original (por exemplo, devido à sua variabilidade ou à imprevisibilidade das interferências), na prática é comum limitar a faixa de passagem do sistema de medição a um valor conhecido  $f'_{MAX}$  e sempre utilizar frequências de amostragem maiores do que  $2f'_{MAX}$ . Para tanto, utiliza-se um filtro passa-baixas anti-aliasing antes da etapa de amostragem.

Portanto, um filtro anti-aliasing é um filtro *analógico* instalado na entrada do conversor A/D e destinado a garantir que não ocorra falseamento de frequências. Idealmente, ele deveria ter uma resposta em frequência passa-baixas do tipo “parede”, definida por

$$|H(j\omega)| = \begin{cases} 1, & |\omega| < \omega_a/2, \\ 0, & |\omega| \geq \omega_a/2, \end{cases}$$

onde  $\omega_a = 2\pi f_a$  é a frequência de amostragem em rad/s. Tal função é apresentada na figura 1. Entretanto, tal resposta não é realizável utilizando-se componentes eletrônicos reais.

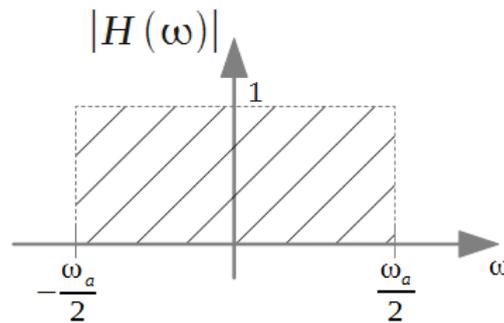


Figura 1: resposta em frequência de um filtro anti-aliasing ideal.

Um filtro anti-aliasing realizável terá uma resposta de magnitude aproximadamente unitária na faixa de passagem, com certa tolerância (ripple), uma atenuação adequada na faixa de rejeição e uma faixa de transição monotônica entre a passagem e a rejeição. Adicionalmente, é desejável ter uma resposta de fase linear na faixa de passagem para evitar distorções nas bordas dos sinais. A figura 2 apresenta um exemplo de uma resposta de magnitude realizável, bem como os parâmetros comumente utilizados para especificar o filtro.

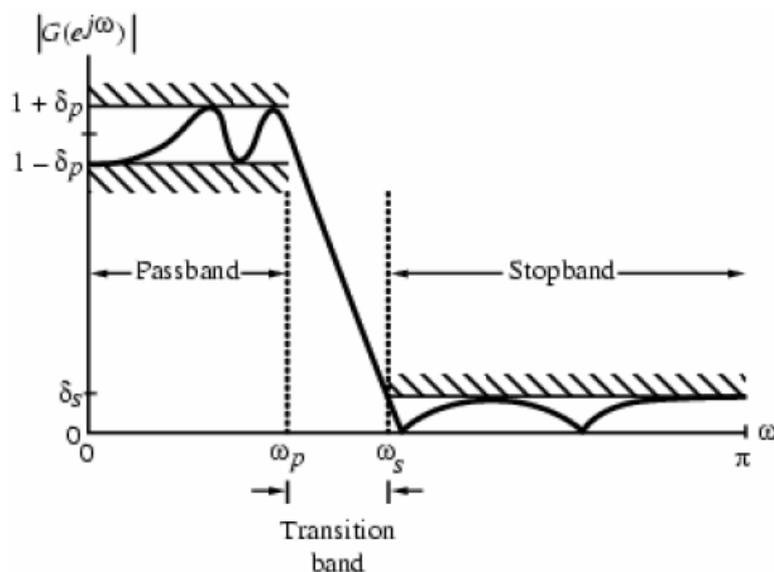


Figura 2: especificação de magnitude típica para um filtro analógico passa-baixas.

Portanto, a especificação de um filtro anti-aliasing real envolve 4 parâmetros:

- $\delta_p$  define o ripple na faixa de passagem (pass-band);
- $\omega_p$  define a frequência de borda da faixa de passagem (conhecida como frequência de corte);
- $\omega_s$  define a frequência de borda da faixa de rejeição (stop-band);
- $\delta_s$  define a atenuação na faixa de rejeição.

As frequências de borda e a frequência de amostragem devem obedecer a relação

$$\omega_p < \omega_s \leq \omega_a/2.$$

A definição dos parâmetros depende das características do sinal a ser digitalizado bem como do conversor A/D, da seguinte forma:



1. A frequência de borda da faixa de passagem  $\omega_p$  é determinada pela máxima frequência do sinal que deve ser preservada.
2. O ripple  $\delta_p$  é definido pelo máximo erro admissível na faixa de passagem. Em particular, se esse erro for menor do que o valor relativo a  $\pm 1/2$  bit do conversor A/D, ele será imperceptível para o sistema de medição.
3. A atenuação na faixa de rejeição  $\delta_s$  é definida pela sensibilidade do conversor A/D. Novamente, se a amplitude do sinal na faixa de rejeição for mantida menor do que o valor relativo a  $\pm 1/2$  bit, ele será imperceptível para o sistema de medição.
4. A frequência de borda na faixa de rejeição  $\omega_s$  dependerá do polinômio de aproximação e da ordem do filtro, considerando os outros parâmetros já determinados. Na prática, para um mesmo polinômio, quanto maior for a ordem, menor será a faixa de transição e, portanto, mais acentuado será o decaimento (aproximando-se da resposta de um filtro ideal). Entretanto, filtros de elevada ordem são difíceis de construir e muito sensíveis às variações dos componentes.

Por fim, uma vez definida a frequência de rejeição  $\omega_s$ , deve-se fazer  $\omega_a \geq 2\omega_s$  para garantir que nenhuma componente de frequência do sinal sofrerá aliasing.

Como exemplo, suponha um determinado sinal  $s(t)$  cuja máxima componente de frequência seja  $f_{MAX}$ . O sinal será digitalizado por um conversor A/D que trabalha com tensões na faixa de  $\pm V_{max}$  e tem resolução de  $N$  bits.

Para preservar todas as componentes de frequência pode-se estabelecer  $\omega_p = 2\pi f_{MAX}$ .

A excursão máxima do sinal na entrada do conversor A/D deverá ser

$$\Delta V_{i_{max}} = 2 V_{max}.$$

A sensibilidade do conversor é dada por

$$q = \frac{\Delta V_{i_{max}}}{2^N} = \frac{2 V_{max}}{2^N} = \frac{V_{max}}{2^{N-1}}$$

Na faixa de passagem deseja-se que o ripple seja menor do que  $q/2$ . Assim,

$$\text{na passagem: } \begin{cases} \text{Na entrada do filtro temos: } \Delta V_{i_{max}} = 2 V_{max} \\ \text{Na saída do filtro: } \Delta V_{o_{max}} = 2V_{max} \mp \frac{V_{max}/2^{N-1}}{2} = 2V_{max} \mp \frac{V_{max}}{2^N} \end{cases}$$

O ripple na faixa de passagem será dado por

$$\delta_p (dB) = 20 \log \left( \frac{\Delta V_{o_{max}}}{\Delta V_{i_{max}}} \right) = 20 \log \left( 1 + \frac{1}{2^{N+1}} \right)$$

Caso esta restrição seja muito severa (gerando um filtro de elevada ordem), deve-se estabelecer uma distorção aceitável com base em outros parâmetros da aplicação.

Na faixa de rejeição deseja-se que a amplitude do sinal seja menor do que a sensibilidade  $q$  para que o conversor A/D não consiga detectá-lo. Assim,



$$\text{na rejeição: } \begin{cases} \text{Na entrada do filtro temos: } \Delta V i_{max} = 2 V_{max} \\ \text{Na saída do filtro: } \Delta V o_{max} < q = \frac{V_{max}}{2^{N-1}} \end{cases}$$

A atenuação na faixa de rejeição será

$$\delta_s(dB) = 20 \log \left( \frac{\Delta V o_{max}}{\Delta V i_{max}} \right) = 20 \log \left( \frac{V_{max}/2^{N-1}}{2 V_{max}} \right) = 20 \log(2^{-N}) = -20 N \log(2)$$

$$\delta_s(dB) = -6,02N \text{ dB}$$

Em aplicações que requerem mínima distorção por aliasing, a frequência de amostragem utilizada é tipicamente 3 a 4 vezes maior do que  $\omega_s$ .

Em situações em que o filtro torna-se muito complexo, é comum utilizar uma abordagem onde relaxa-se as especificações e utiliza-se uma frequência de amostragem bem mais elevada (sobre-amostragem). Posteriormente, faz-se uma filtragem na fase digital e reduz-se a frequência por meio de dizimação (o que é equivalente a realizar um filtro anti-aliasing digital).

### ELEMENTOS PARA O PRÉ-RELATÓRIO

- Em sistemas de telefonia PCM (pulse-code modulation) o espectro do sinal de voz é limitado em 3.6 kHz antes da digitalização. Considerando que será utilizado um conversor A/D de 10 bits, determine:
  - O máximo ripple na faixa de passagem  $\delta_p$  para que não ocorra distorção.
  - A mínima atenuação na faixa de rejeição  $\delta_s$  para que não ocorra aliasing.
  - A frequência de borda na faixa de passagem  $\omega_p$  de forma a preservar todas as componentes do sinal.
- Com base nos parâmetros determinados anteriormente, utilize a ferramenta de projeto FilterPro Desktop<sup>20</sup> para projetar um filtro anti-aliasing para o sistema de digitalização. Considere utilizar um filtro Butterworth de 6ª ordem. Insira as figuras no seu pré-relatório que apresentem:
  - as respostas de magnitude e fase.
  - O atraso de grupo.
  - O diagrama do circuito.
- Utilizando os resultados do projeto, determine:
  - A frequência de borda na faixa de rejeição  $\omega_s$ .
  - A mínima frequência de amostragem  $f_{a_{min}}$  para garantir que não ocorrerá aliasing.
- Ajuste os componentes do circuito para os valores comerciais mais próximos.
- Construa o circuito ajustado em um simulador Spice e verifique sua resposta em frequência (procure realizar esta análise utilizando o modelo de um amplificador operacional TL071).

<sup>20</sup> Disponível em <http://www.ti.com/tool/FilterPro> .



- Avalie o impacto do ajuste dos componentes na resposta do circuito. Verifique se o resultado é similar ao previsto e faça um ajuste fino, caso necessário.
- Insira as figuras da análise em seu pré-relatório.
- Considerando que este experimento será realizado no laboratório:
  - xiii. Escreva o *procedimento de medição*<sup>21</sup>, conforme definição dada no VIM<sup>22</sup>.
  - xiv. Forneça uma relação dos equipamentos, componentes e instrumentos a utilizar.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Construa no proto-board o filtro anti-aliasing projetado no seu pré-relatório.
- Utilize o traçador de Bode do NI-Elvis para verificar a resposta em frequência do filtro. Registre o resultado em seu relatório. Compare com a análise realizada no pré-relatório e discuta sobre eventuais discrepâncias.
- Repita os procedimentos realizados na aula prática anterior para verificar se o sistema de digitalização está isento de aliasing:
  - Fixe a taxa de amostragem do osciloscópio do NI-Elvis no valor mais próximo ao determinado no pré-relatório ( $f_{a_{min}}$ ).
  - Use o Gerador de Funções do NI-Elvis para produzir um sinal com forma de onda senoidal com 2 V<sub>p</sub> e frequência igual a 1/10 da taxa de amostragem obtida anteriormente.
  - Insira o sinal no filtro anti-aliasing e meça o sinal de saída com o osciloscópio. Registre em seu relatório.
  - Sem alterar o ajuste do osciloscópio, aumente gradativamente a frequência do sinal no Gerador de Funções. Seja particularmente cuidadoso quando a frequência do sinal atingir valores críticos discutidos na prática anterior, tais como  $\omega_p$ ,  $\omega_d/2$ ,  $\omega_s$ ,  $n \cdot \omega_s \pm \omega_i$ , etc.
  - Registre os resultados em seu relatório e discuta o que foi observado.

### ELEMENTOS PARA O RELATÓRIO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Elementos já desenvolvidos no pré-relatório.
- Especificações dos equipamentos, componentes e instrumentos utilizados nos experimentos (as mais relevantes para a medição em questão).
- Desenvolvimento:
  - ix. Descrição das atividades.
  - x. Registro dos dados coletados.
- Resultados e discussão.

<sup>21</sup> Os procedimentos de medição deverão sempre ser registrados em seus relatórios.

<sup>22</sup> VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.



- Conclusões.
- Referências bibliográficas.



## Módulo-09 PLATAFORMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS LABVIEW

### OBJETIVOS

- Introduzir o ambiente de desenvolvimento LabView.
- Compreender os procedimentos para desenvolver Instrumentos Virtuais.
- Compreender os procedimentos para comunicação com o NI-Elvis e realizar digitalizações de sinais.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

Ao finalizar esta atividade o aluno deverá ser capaz de:

- compreender a interface e os procedimentos de trabalho do LabView;
- criar painéis frontais com base nas ferramentas do LabView;
- compreender os procedimentos para incorporar funcionalidades nos instrumentos;
- desenvolver instrumentos virtuais básicos;
- realizar os procedimentos para comunicação e digitalização de dados utilizando o LabView e o NI-Elvis.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL

“Programas” do LabView -> Instrumentos Virtuais (VIs).

Compostos por 2 partes:

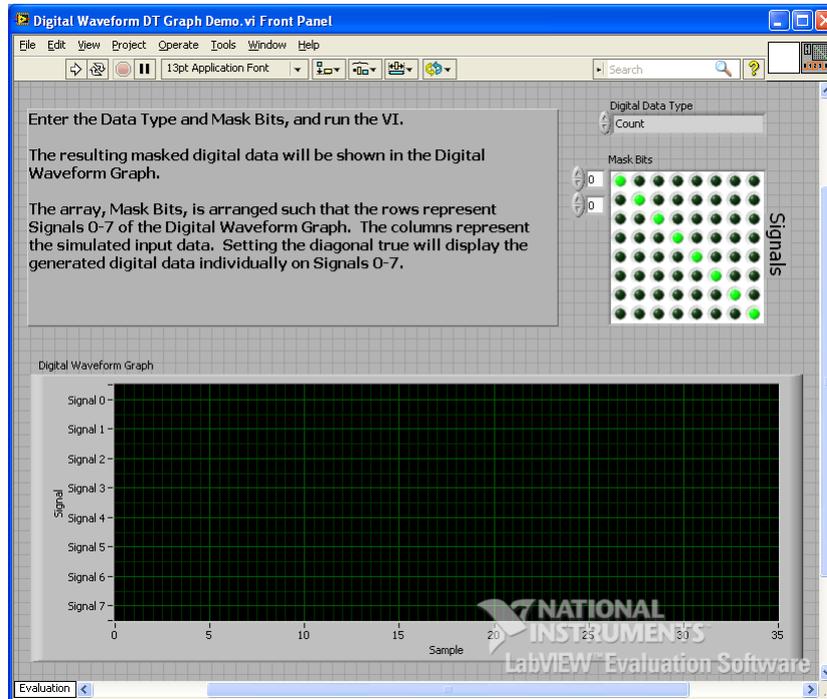
- Painel frontal (interface com usuário) -> contém controles e indicadores. Controles -> botões, chaves liga-desliga, caixas de diálogo, etc. Indicadores -> gráficos, LEDs, caixas numéricas, escalas, etc.
- Diagrama de blocos (fluxo de dados) -> contém blocos funcionais que realizam as tarefas associadas aos controles + tarefas de processamento, interligados entre si por conexões que representam o fluxo dos dados (similar ao código em uma linguagem de programação textual).

A interface principal do LabView é mostrada na figura abaixo.

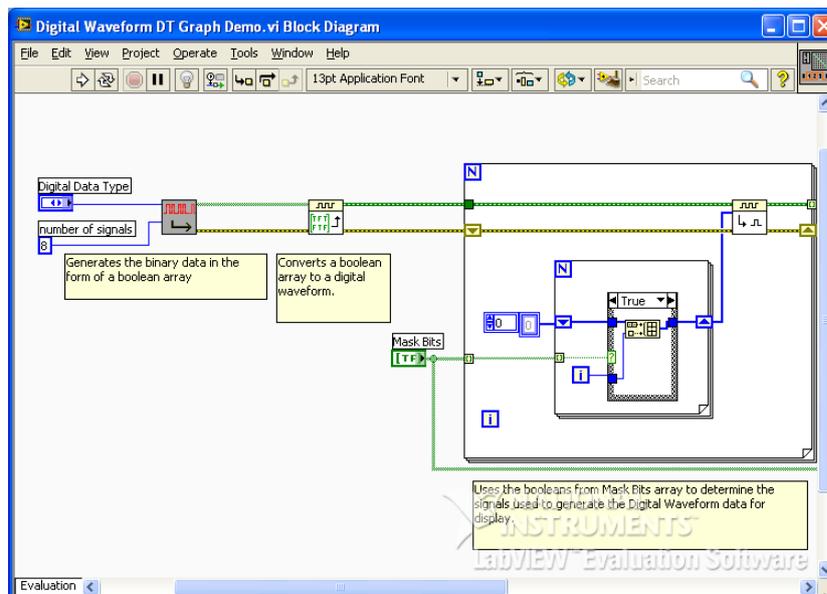




Ao criar um novo projeto, ou ao abrir um existente, a interface principal é escondida e as interfaces de Painel Frontal e Diagrama de Blocos são apresentadas, como mostrado nas figuras abaixo (para trocar entre as interfaces digite ctrl+E ou menu Window -> Show Block Diagram e Window -> Show Front Panel).



Editor do painel frontal



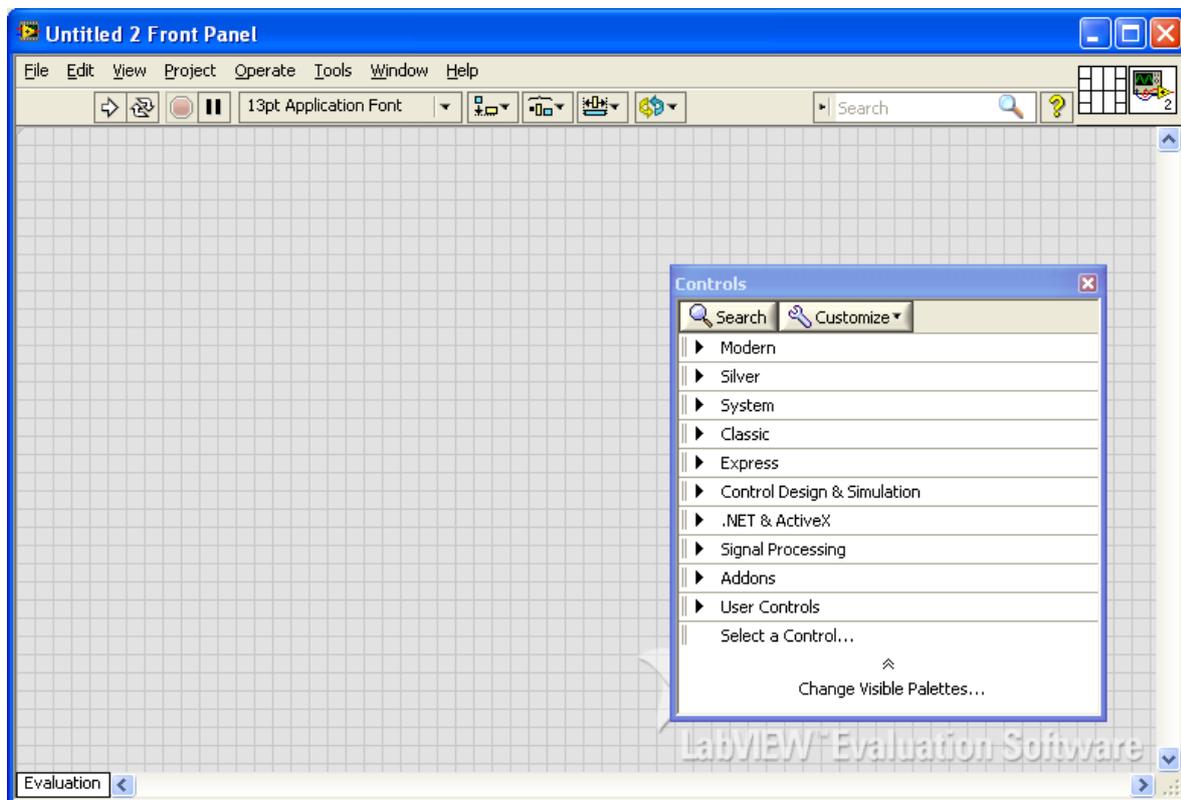
Editor do diagrama de blocos



## 1. Desenvolvendo um projeto básico

Para iniciar, vamos desenvolver um programa que gere sinais com amplitudes variáveis e apresente-os em um gráfico.

Na interface principal do LabView solicite a criação de um projeto em branco (blank VI). A interface de painel frontal deverá abrir, juntamente com a caixa de seleção de controles, conforme mostrado na figura abaixo. (Obs.: se a caixa de controles não estiver visível, selecione-a em menu View -> Controls palette ou clique com o botão direito na área de trabalho do editor).



Observe que a caixa de controle é dividida em várias categorias e que, em cada uma, há vários dispositivos para construir a interface do seu instrumento (clique nas setas pretas à esquerda para expandir cada categoria e verifique os dispositivos).

Note também que há um botão de “Search”, para realizar buscas com base em strings de texto.

## 2. Adicionando controles ao painel frontal

Construa o painel frontal do instrumento adicionando um gráfico e um knob para controlar a amplitude.

Na caixa de controles, selecione Modern -> Graph -> Waveform graph.

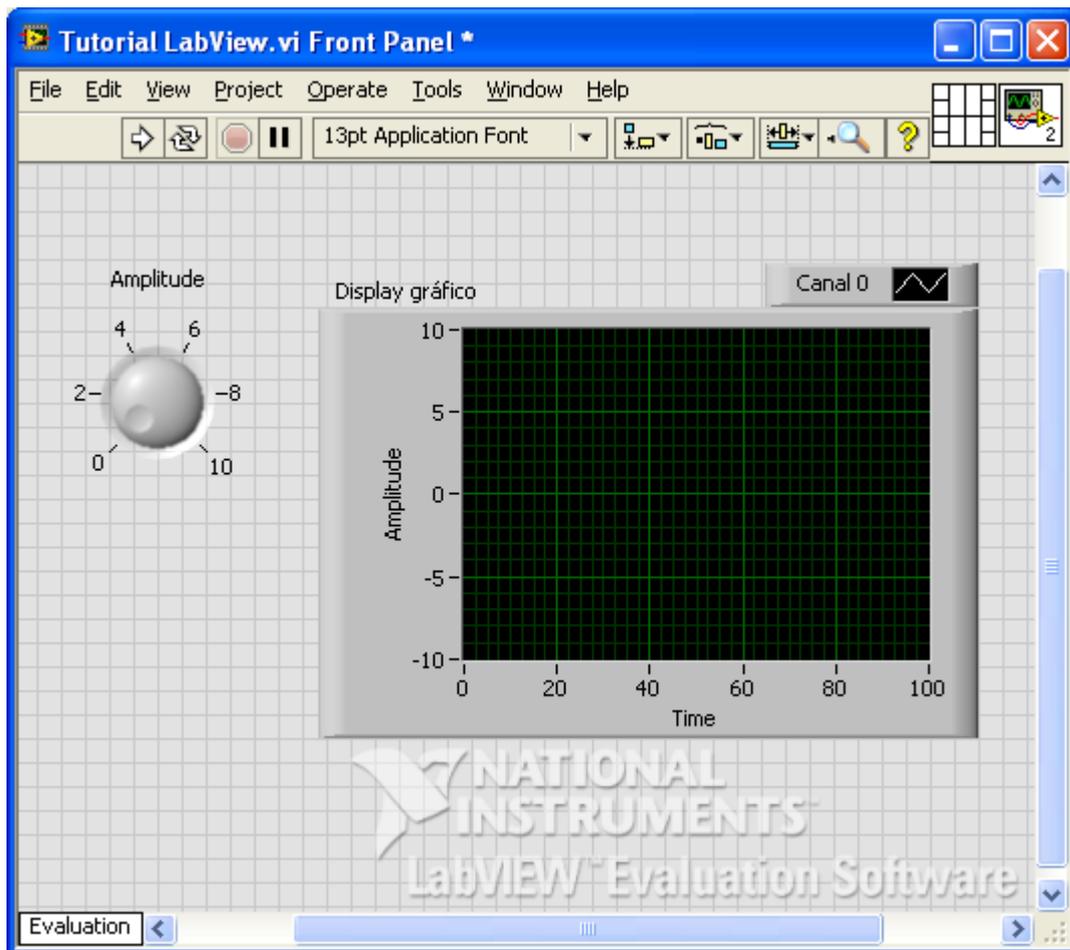


Clique em alguma lugar no painel frontal para colar o gráfico. Clique e arraste para posicioná-lo em um lugar conveniente. Se quiser, clique com o botão direito no gráfico e selecione “Properties” para alterar as suas propriedades (autoajuste, cores, etc...).

Na caixa de controles, selecione Modern -> Numeric -> Knob.

Clique e posicione o knob no painel frontal. Se quiser alterar suas configurações, clique com o botão direito e selecione “Properties”.

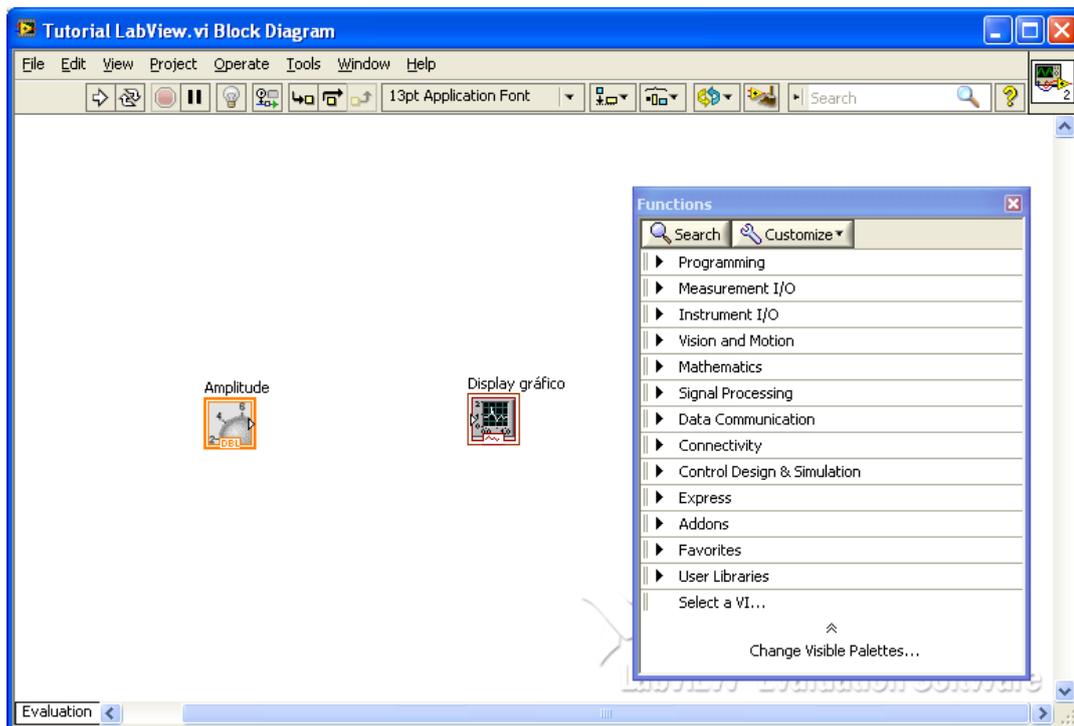
O painel frontal do instrumento deve estar parecido com o mostrado na figura abaixo.



Pressione ctrl+E para abrir o diagrama de blocos. Note que, à medida em que você adiciona novos componentes ao painel frontal, estes se refletem também no diagrama de blocos.

### 3. Editando e adicionando funcionalidades ao instrumento

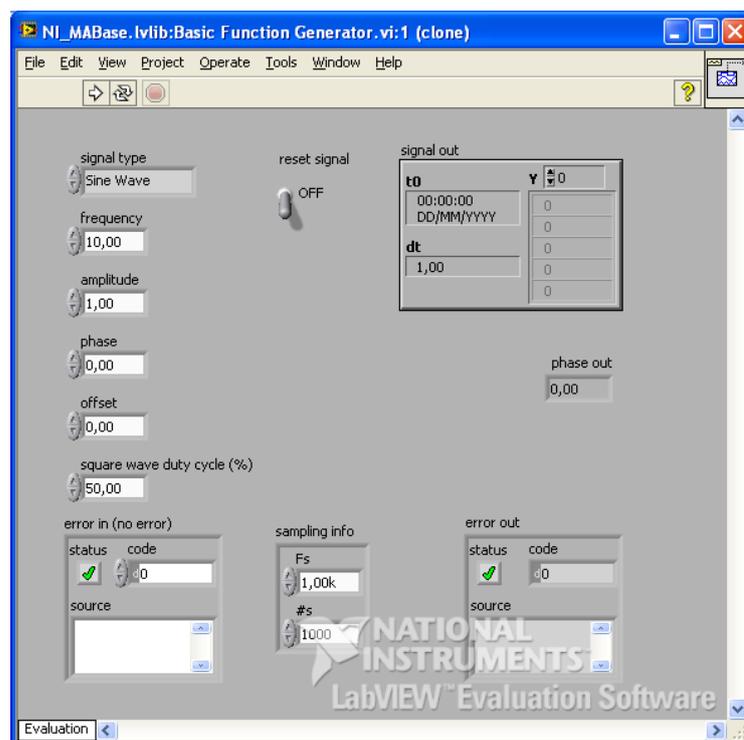
Vamos agora adicionar um gerador de sinais ao instrumento. Abra o editor do diagrama de blocos. O editor deverá mostrar parte do que já foi feito, juntamente com a caixa de funções, como mostrado na figura abaixo (obs.: se a caixa de funções não estiver visível, selecione o menu View -> Functions palette ou clique com o botão direito na área de trabalho do editor).



Na caixa de funções, selecione Signal Processing -> Waveform Generation -> Basic Function Generator.

Cole o gerador de funções entre o knob de amplitude e o display gráfico. Se você clicar duas vezes no gerador de funções, uma tela se abrirá permitindo configurar o tipo de função a gerar, como mostrado na figura abaixo.

Após explorar as possibilidades, feche a caixa de configuração e volte ao diagrama de blocos.

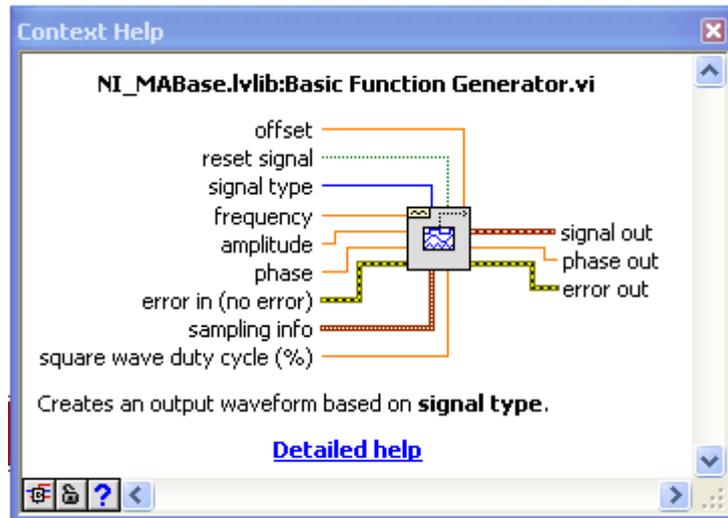




#### 4. Conectando os módulos

Note que, ao passar o mouse sobre o gerador de funções, aparecem várias entradas e saídas, possibilitando conectá-lo a controle externos. Se você apertar o ponto de interrogação na barra de

ferramentas , abrirá uma janela de ajuda com a descrição de cada entrada e saída, como mostrado na figura abaixo



Note também que, ao aproximar o mouse de uma das entradas, o cursor se transforma em um

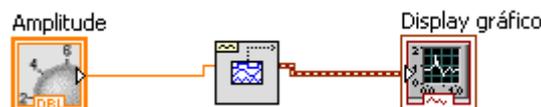
“carretel” de fio . É este carretel que permite conectar os módulos no diagrama de blocos.

No gerador de funções, mova o mouse até identificar a entrada “Amplitude”.

Clique uma vez e mova o cursor até a saída do knob de amplitude. Você verá um fio acompanhando o movimento do mouse.

Clique uma vez na saída do knob para realizar a conexão.

Repita o procedimento com a saída “Signal out” do gerador de funções e a entrada do display gráfico. O seu diagrama deve estar parecido com o mostrado na figura abaixo.



#### Observações.:

Note que os fios possuem cores diferentes. As cores definem o tipo de dados que eles carregam, por exemplo:

laranja = ponto flutuante;

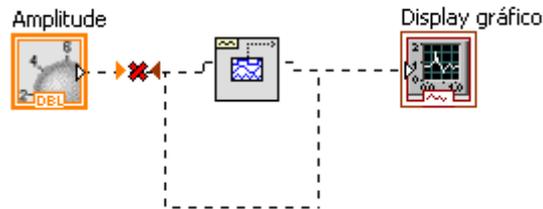


marrom = vetor de pontos flutuantes;

azul = inteiro, etc...

Para mais informações, consulte o help do LabView.

Se ocorrer algum erro nas conexões, o fio aparecerá “quebrado” e com um X vermelho, como mostrado na figura abaixo. O botão de executar aparecerá como uma seta quebrada . Neste caso, não será possível executar o código. Note que, ao clicar no botão, uma lista de erros será apresentada, permitindo localizar onde está o problema.

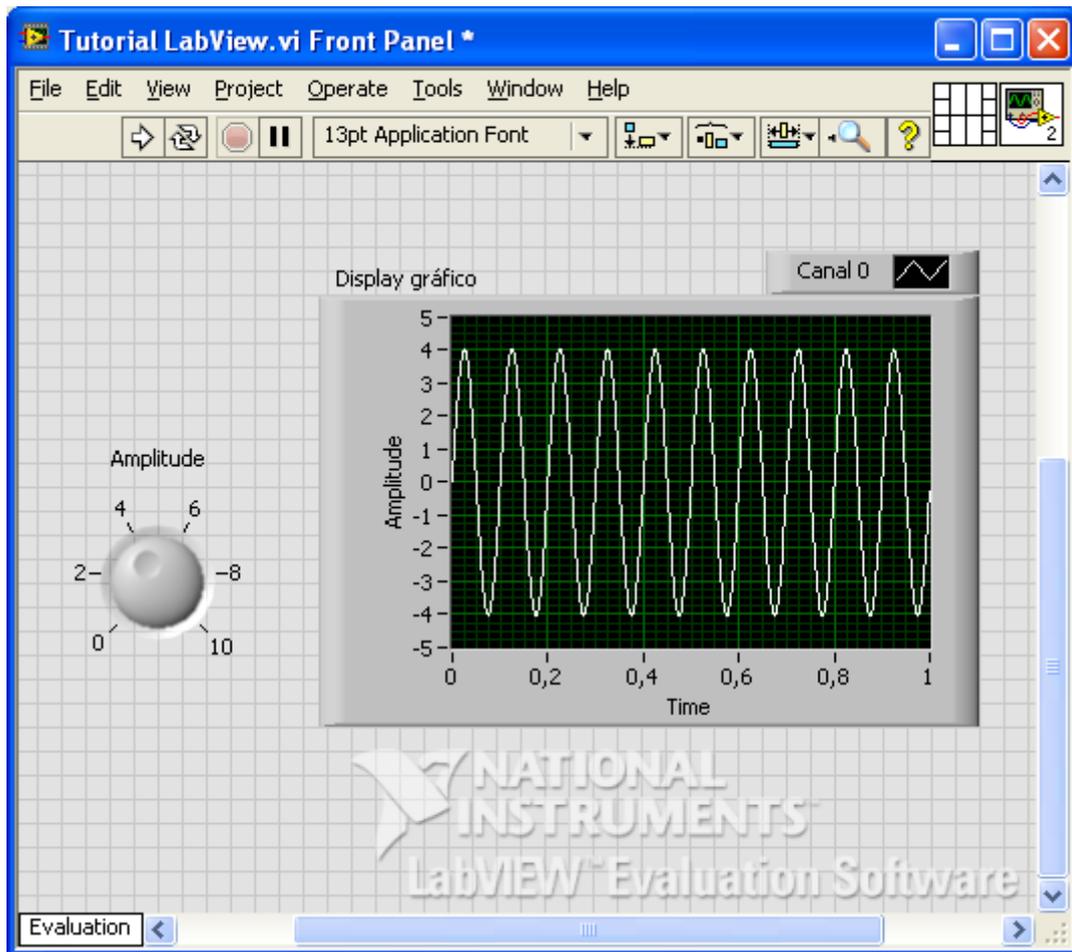


## 5. Ligando o instrumento

Retorne para o editor do painel frontal pressionando ctrl+E.

Localize na barra de ferramentas o botão executar com formato de uma seta branca .

Clique uma vez e verifique se a onda é mostrada no display. O resultado deverá ser similar ao mostrado na figura abaixo.



Mova o knob e execute novamente o programa. Verifique que a amplitude da onda varia de acordo com o valor selecionado.

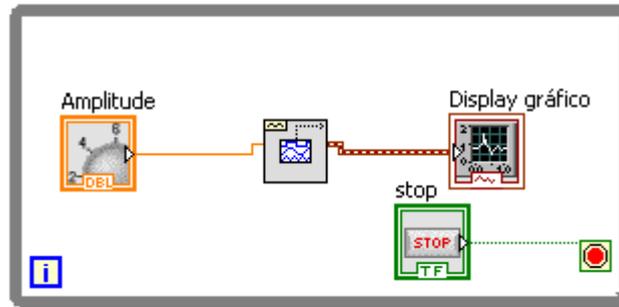
## 6. Tornando a execução automática

Até o momento o programa consegue executar uma vez, gerar uma forma de onda senoidal e variar a amplitude. Entretanto, é preciso executar manualmente a cada iteração.

A execução automática é obtida através da inserção de uma laço. Insira um laço "while" no código da seguinte forma:

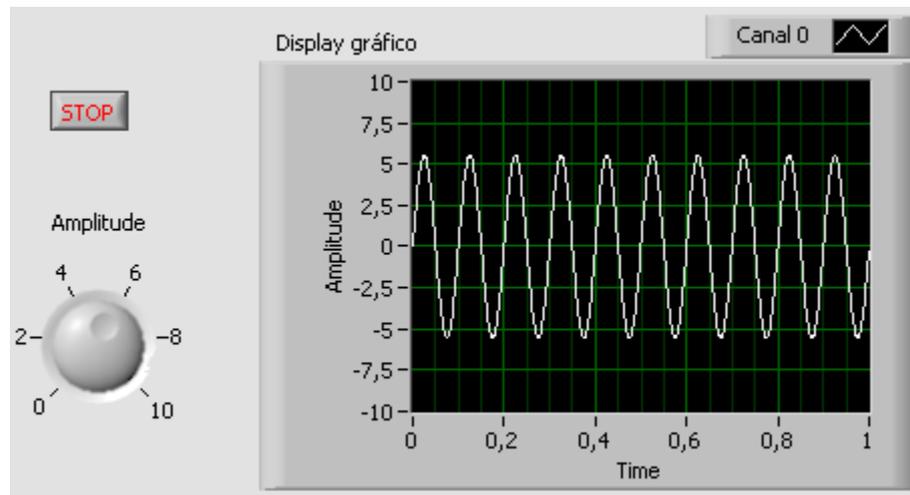
Na caixa de funções, clique em Express -> Execution control -> While loop.

No diagrama de blocos, clique e arraste de forma a cercar todos o componentes que deverão participar do laço (no caso, todos o diagrama). O diagrama deverá ficar parecido com o da figura abaixo:



Note que o LabView inseriu automaticamente um botão e uma função de “Stop”. Isto é importante para que o sistema seja interrompido de forma consistente, principalmente ao lidar com instrumentos externos.

Pressione ctrl+E para mudar para o Painel Frontal. Note que um botão de “Stop” também foi inserido na interface principal, como mostrado na figura abaixo.



Clique novamente no botão “Executar”  e note que o funcionamento agora é contínuo.

Mova o knob de amplitude e verifique se a forma de onda é alterada. Quando desejar encerrar, pressione o botão STOP.

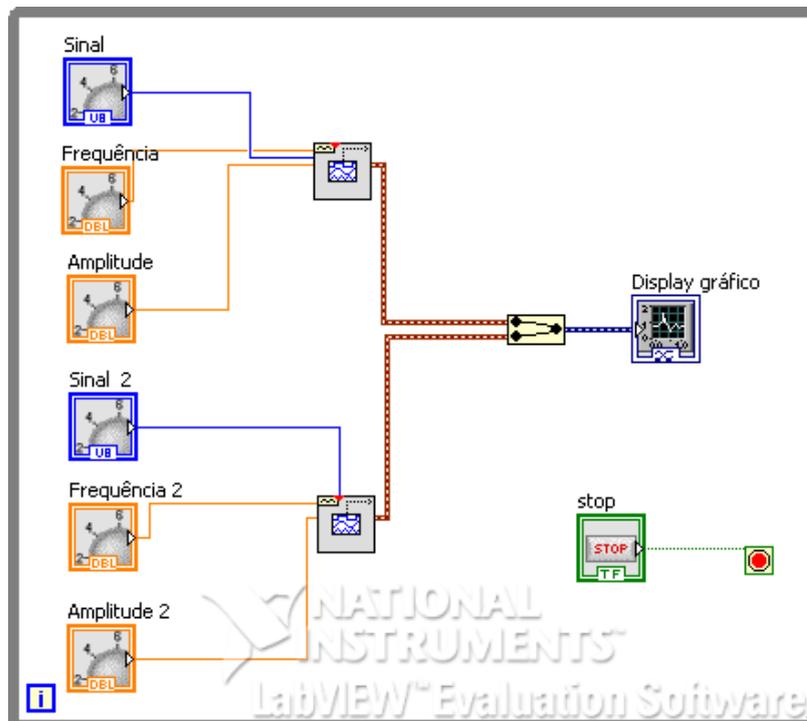
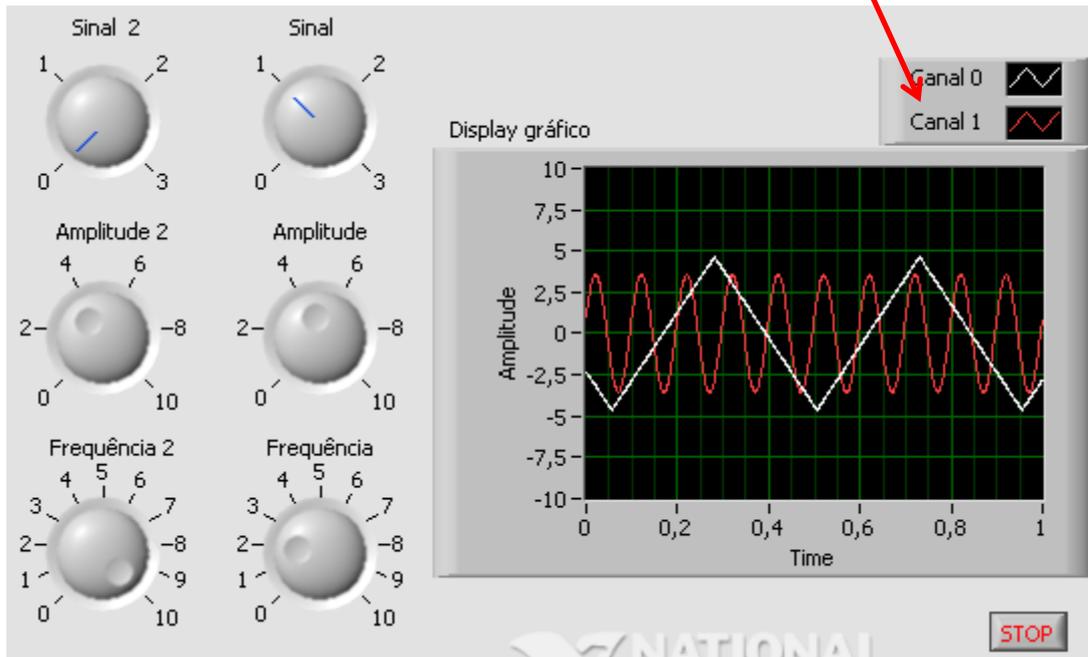
## 7. Desafios

1. Modifique as propriedades do gráfico para fixar a escala VERTICAL entre  $-10$  e  $+10$ .
2. Insira um segundo KNOB e conecte-o de forma a possibilitar alterar a frequência da onda em uma faixa de 0 a 10Hz.
3. Insira um DIAL e conecte-o de forma a permitir selecionar o tipo de onda gerada. Você deverá alterá-lo para gerar números INTEIROS no intervalo de 0 a 3 (note que, por padrão, os knobs geram números em ponto flutuante). O gerador de funções funciona da seguinte forma: 0 = senóide; 1 = triangular; 2 = quadrada; 3 = dente de serra.
4. No painel frontal, copie e cole os knobs e o dial, de forma a inserir um segundo canal no gerador de sinais.



5. Insira outro gerador de sinais no diagrama de blocos e providencie para que ambos os sinais sejam mostrados no mesmo gráfico, utilizando a ferramenta “Merge signals” .
6. Estenda a legenda do gráfico para mostrar ambos os canais.
7. Clique na caixinha da legenda e experimente mudar a cor, tipo e espessura da linha. Veja também que é possível alterar o tipo de gráfico, tais como barras, etc...

Ao final, o seu instrumento deverá estar parecido com o da figura abaixo:





## 8. Digitalizando sinais com o LabView e o NI-Elvis

Neste tutorial você utilizará as bibliotecas do LabView para se comunicar com o NI-Elvis para gerar e digitalizar formas de onda. Para tanto, siga os seguintes passos:

Abra um novo projeto selecionando “Blank VI”.

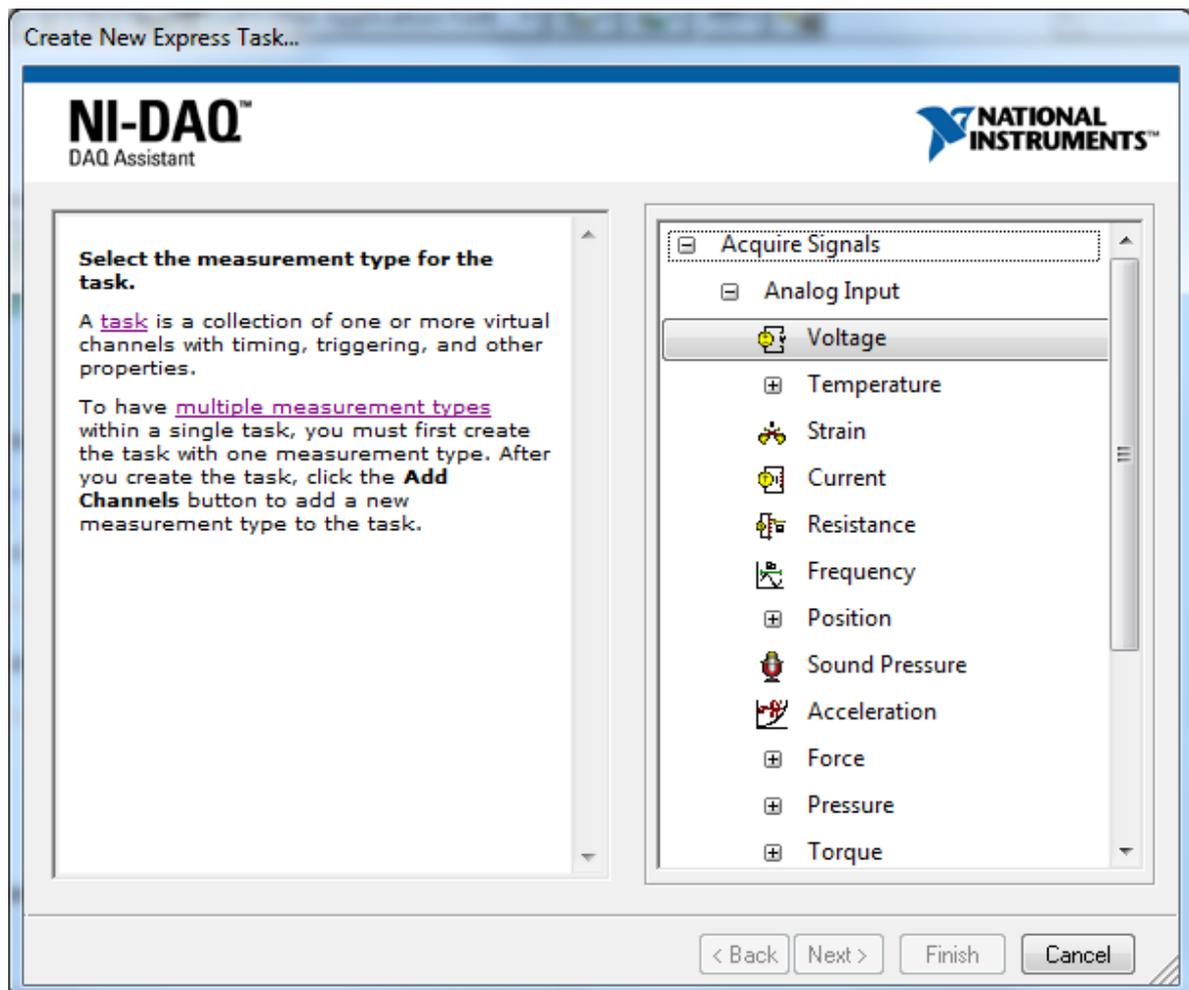
### 1 – Configurando um canal de entrada analógica para aquisição de sinais.

Selecione o editor de diagrama de blocos.



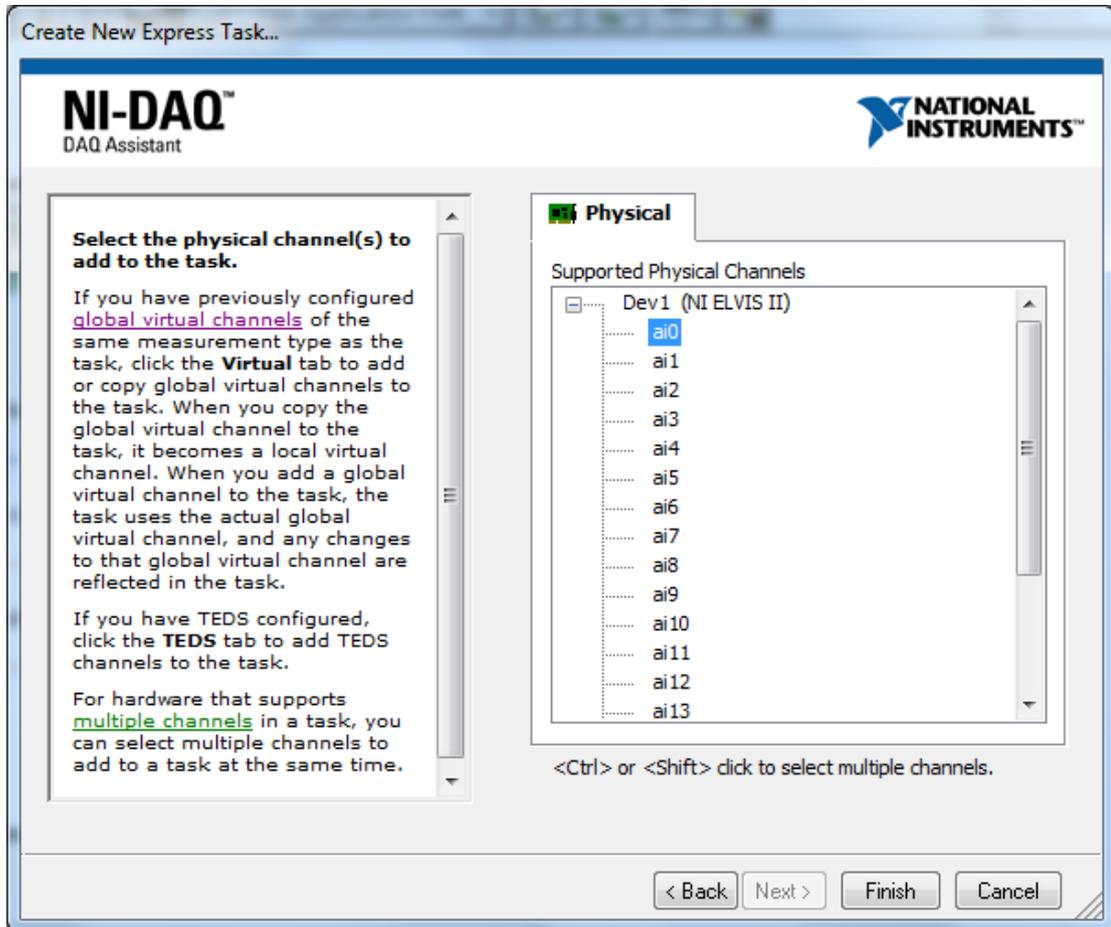
Na janela de funções, selecione Express -> Input -> DAQ Assistant . Isto iniciará um assistente de configuração para aquisição de dados.

Na janela que se abre, selecione Acquire signals -> Analog input -> Voltage, como mostrado na figura abaixo.





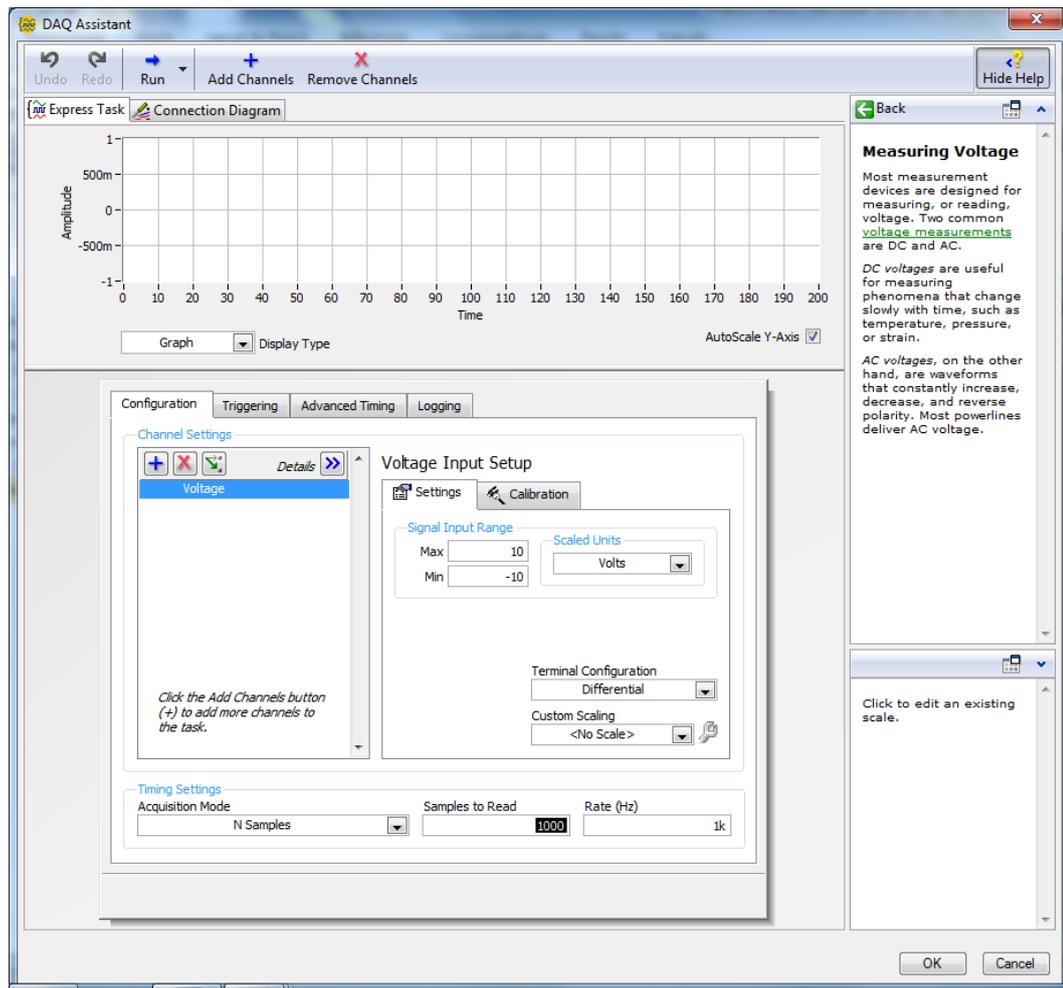
A janela mostrará uma lista de entradas analógicas disponíveis, como mostrado na figura abaixo. Selecione a entrada ai0. Isto fará com que o módulo seja vinculado à entrada ai0 do NI-Elvis. Clique em finish.



O assistente abrirá uma janela de configuração similar à mostrada na figura abaixo.

Configure os limites de tensão para +10V e -10V. Mantenha o campo “Acquisition Mode” como “N samples”.

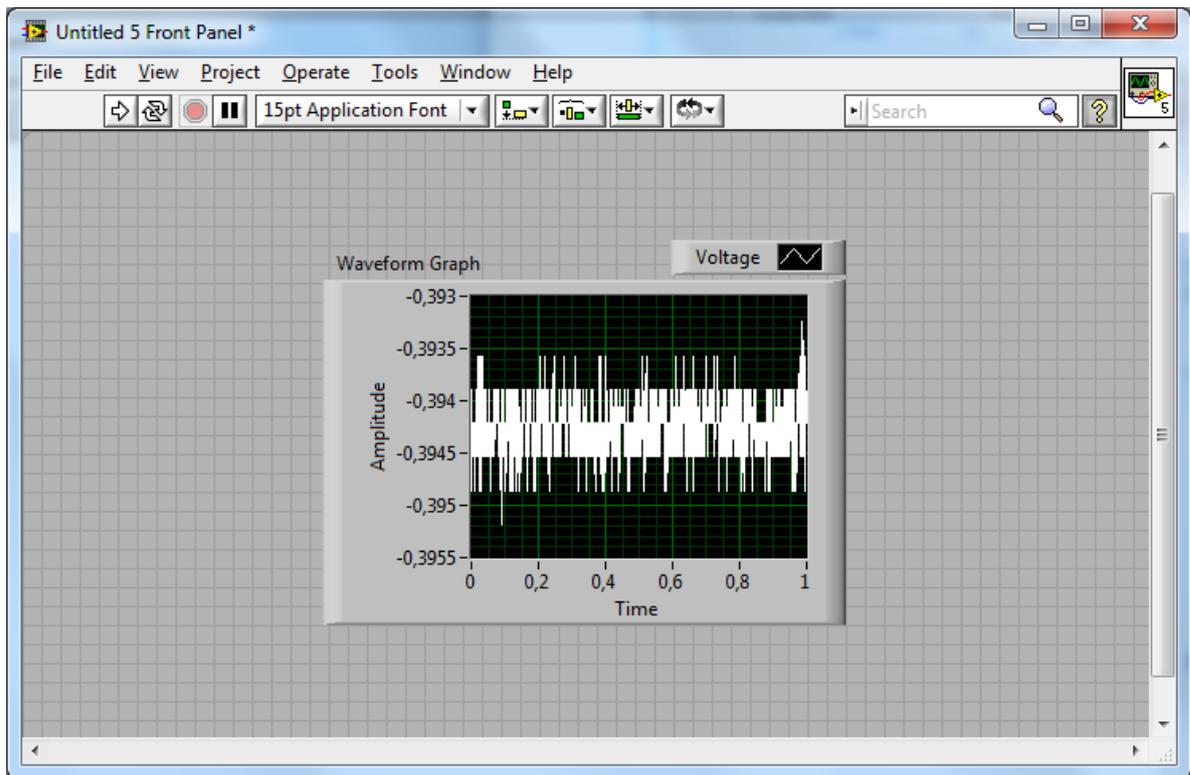
Modifique o campo “samples to read” para 1000. Isto fará com que o sistema crie um buffer e transfira 1000 amostras a cada iteração. Deixe o campo “Rate (Hz)” também em 1000, para que a taxa de amostragem seja de 1000 Hz. Assim, será realizada 1 transferência por segundo. Mantenha os outros controles como estão.



Deixe os outros campos como estão e clique em ok.

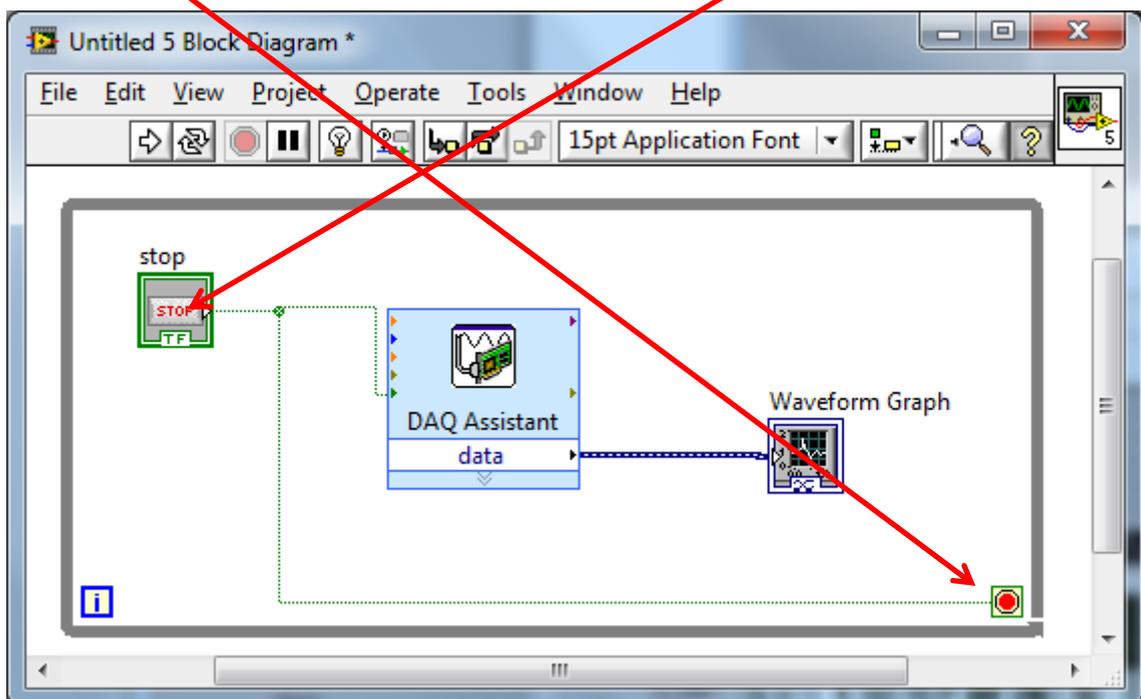
Utilizando os conceitos vistos no exercício anterior, insira um gráfico no painel frontal para mostrar o sinal adquirido. Conecte a saída do DAQ Assistant à entrada do gráfico no diagrama de blocos.

Clique no botão “Run” e verifique se o sistema realizou a aquisição. Você deverá ver um ruído parecido com o mostrado na figura abaixo, uma vez que ainda não há nenhum sinal conectado à entrada ai0 do NI-Elvis.



Você deve ter percebido que o sistema é executado apenas uma vez e depois para. Para tornar a aquisição contínua, insira um laço while e um botão de parada, conforme mostrado na figura abaixo.

**IMPORTANTE:** note que o botão de parar deve ser conectado à entrada “Stop” do DAQ-Assistant e ao controle do laço while. Isto é importante para que o botão interrompa o hardware do NI-Elvis também.

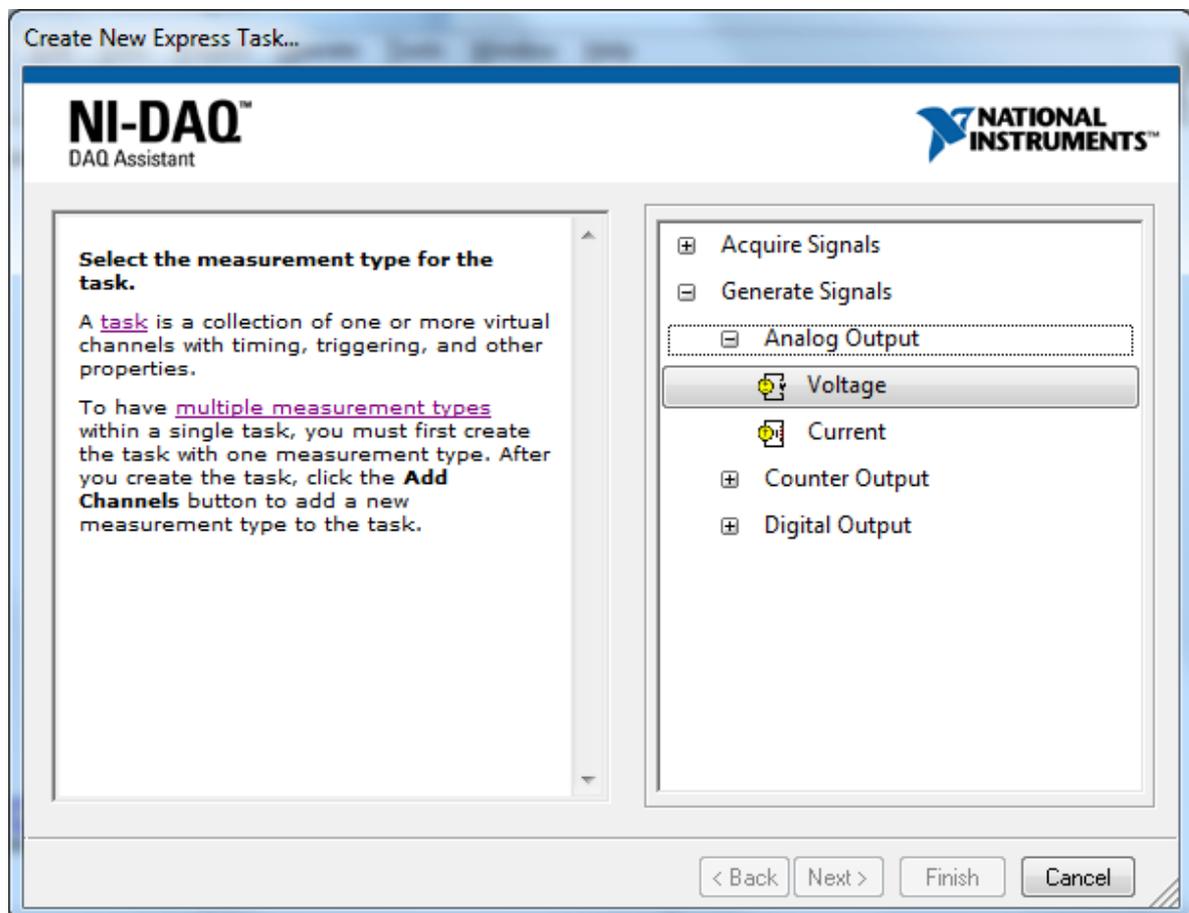




## 2 – Configurando um canal de saída analógica para geração de sinais

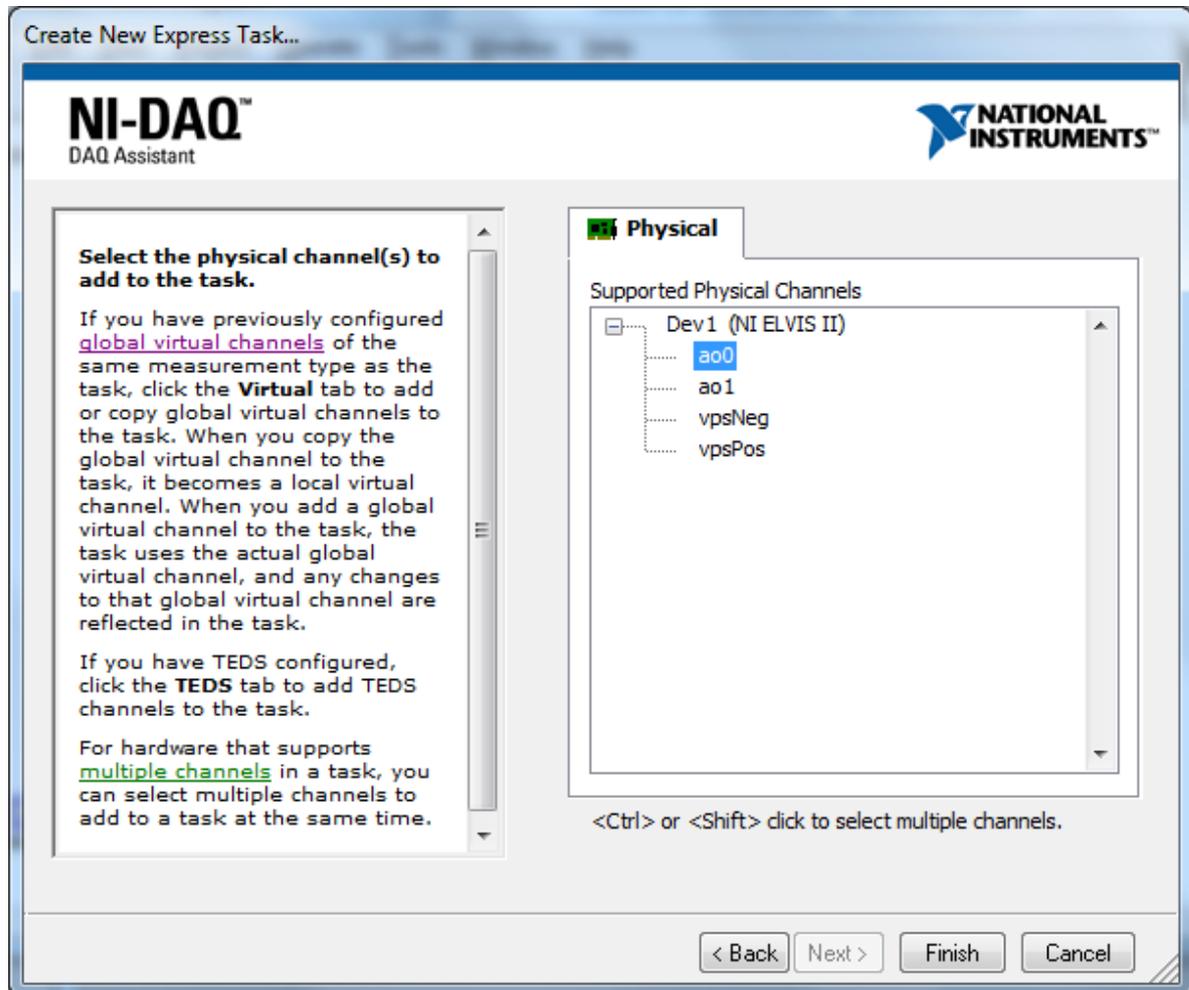
Vamos, agora, gerar um sinal pela saída analógica de NI-Elvis para podermos visualizá-lo com o sistema construído anteriormente.

No diagrama de blocos, cole um novo DAQ Assistant dentro do laço while. Mas, desta vez, selecione Generate Signals -> Analog Output -> Voltage, como mostrado na figura abaixo. Clique “next”.





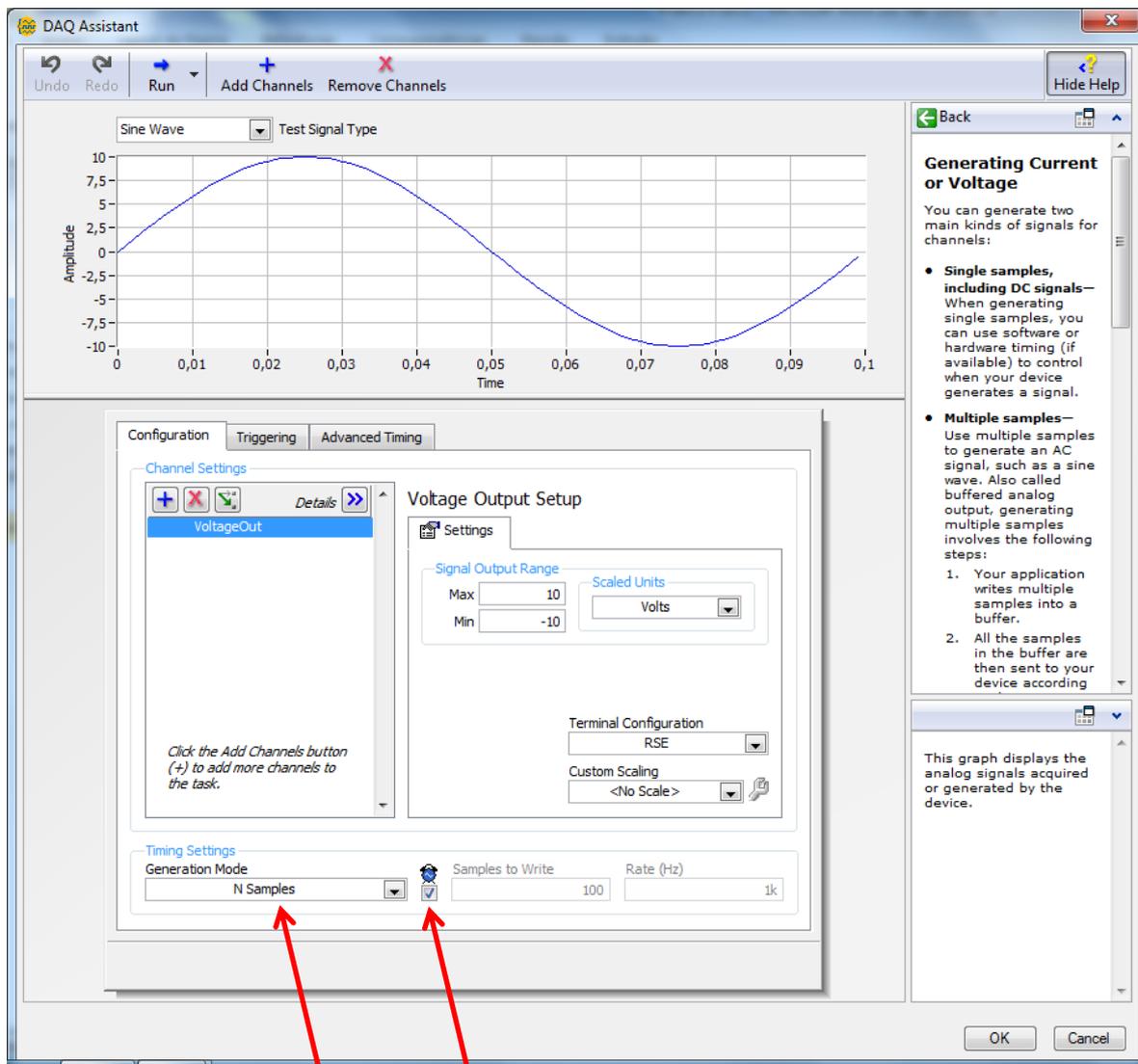
Na janela que se segue, selecione a saída analógica ao0 do NI-Elvis, como mostrado na figura. Clique em “Finish”.





O LabView mostrará a janela de configuração vista na figura abaixo. Deixe todos os parâmetros como estão e clique em OK.

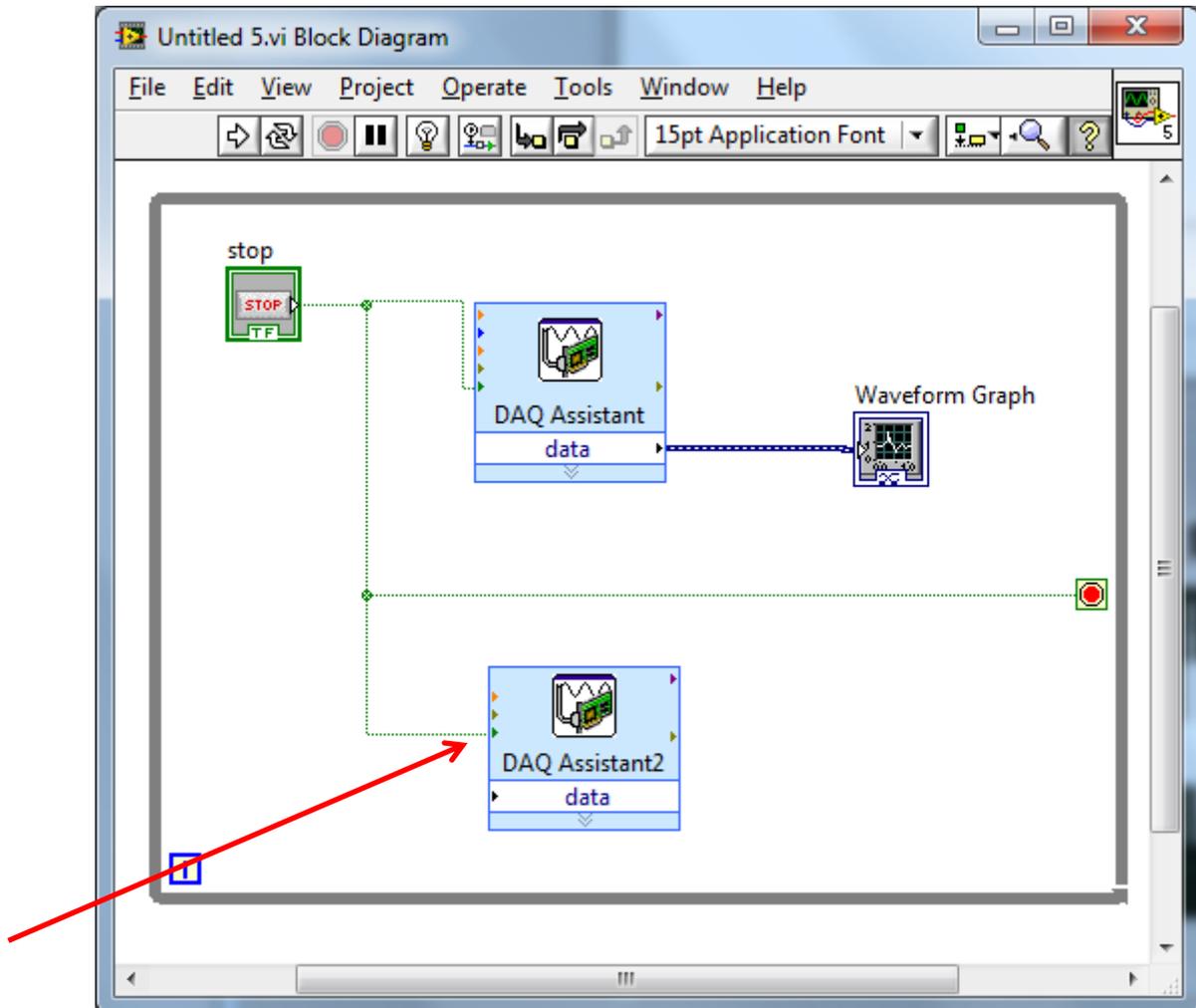
**IMPORTANTE:** em particular, certifique-se de que “Generation mode” está como “N samples” e que o símbolo do relógio azul está selecionado.



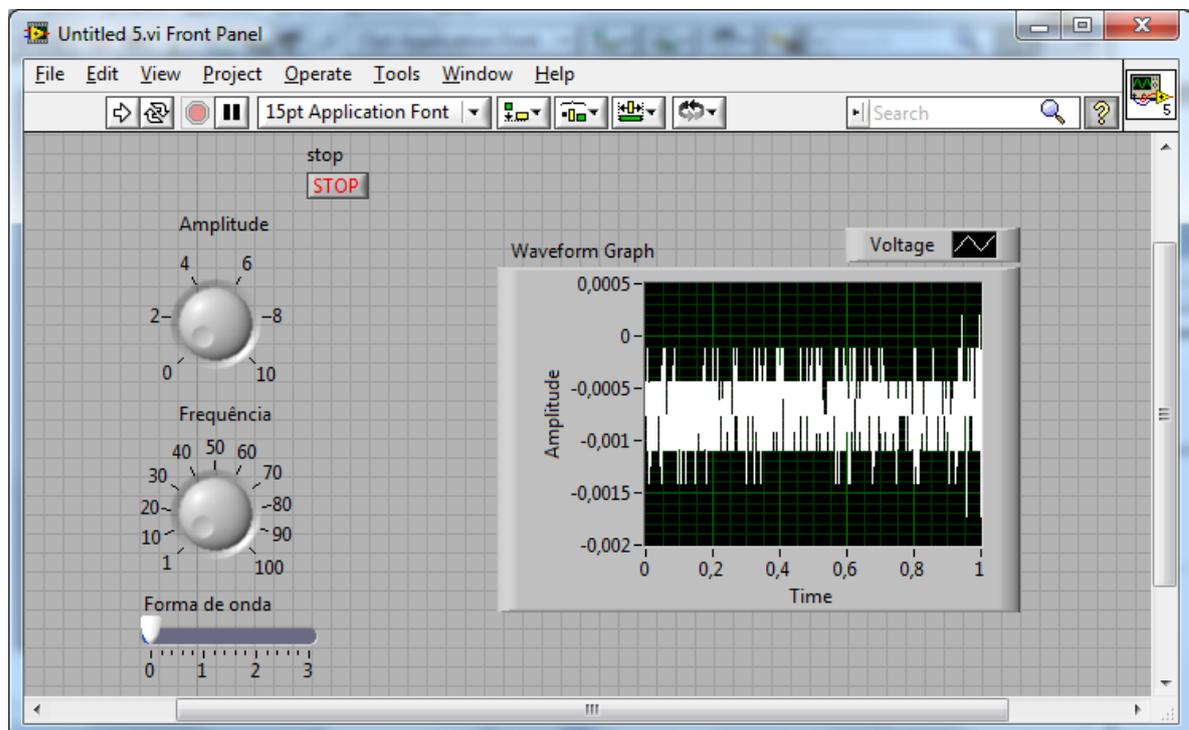
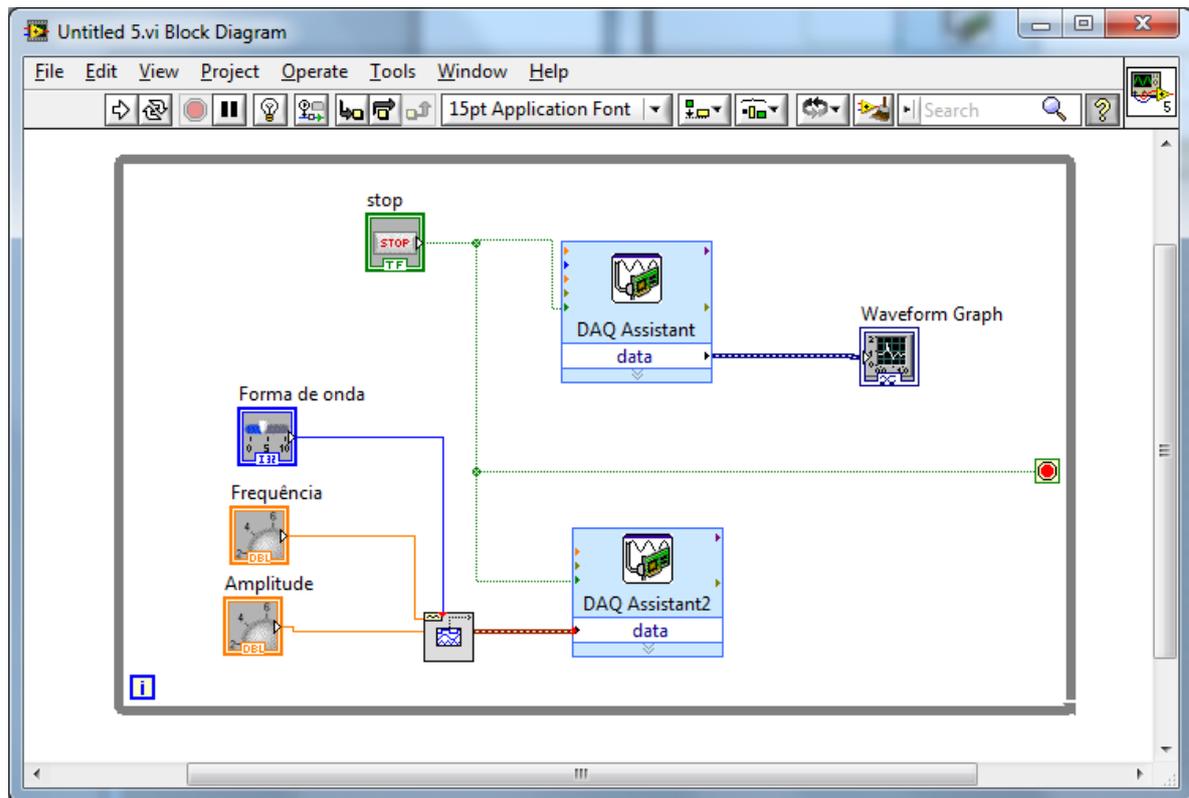


O seu sistema terá, agora, 2 DAQ Assistants, um para controlar a entrada de dados (medição) e outro para a saída (geração). Isto pode ser visto na figura abaixo.

**IMPORTANTE:** lembre-se de conectar o botão Stop à entrada “Stop” do 2º DAQ Assistant para assegurar que o gerador de sinais também será interrompido.



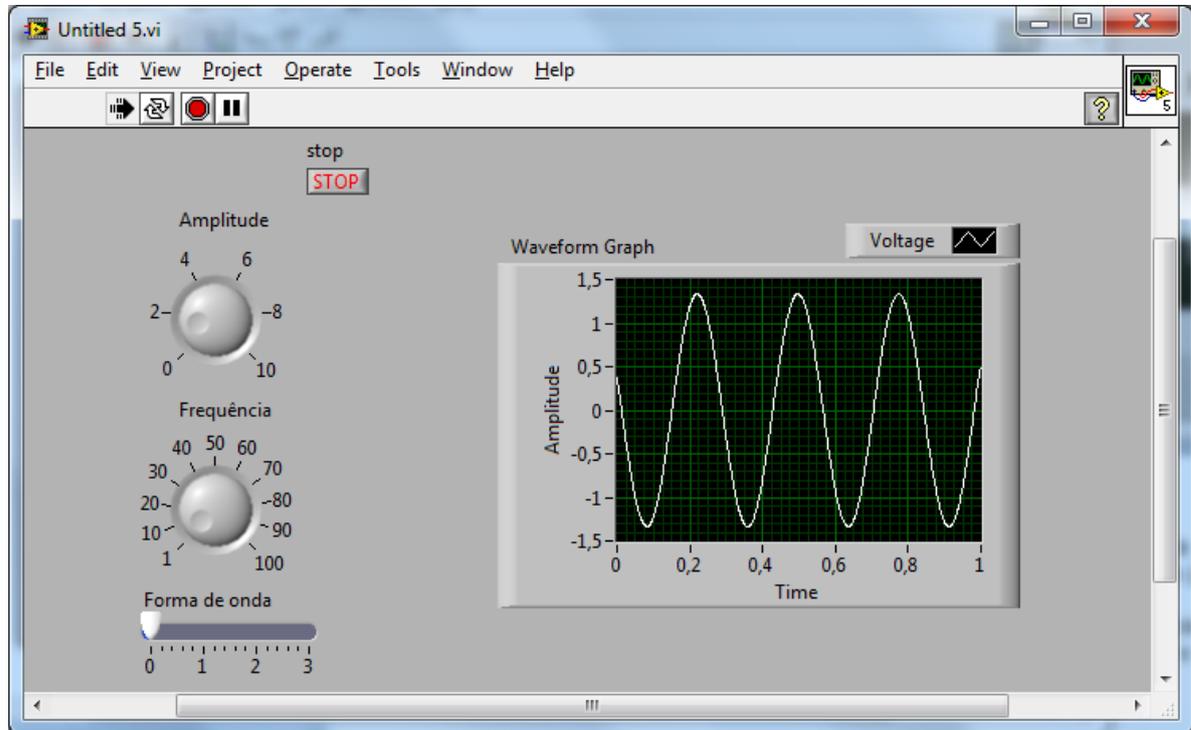
Utilize os conceitos vistos no 1º exercício para inserir um gerador de funções no laço while. Conecte a saída deste gerador à entrada de dados do 2º DAQ Assistant. Insira também botões para controlar a amplitude, frequência e forma de onda. O seu sistema deverá ficar parecido com o mostrado nas figuras a seguir.



Agora, conecte, utilizando fios no proto-board do NI-Elvis, a saída analógica ao0 à entrada analógica ai0<sup>+</sup> (lembre-se de aterrar a entrada ai0<sup>-</sup> para que a medição seja referida à terra).



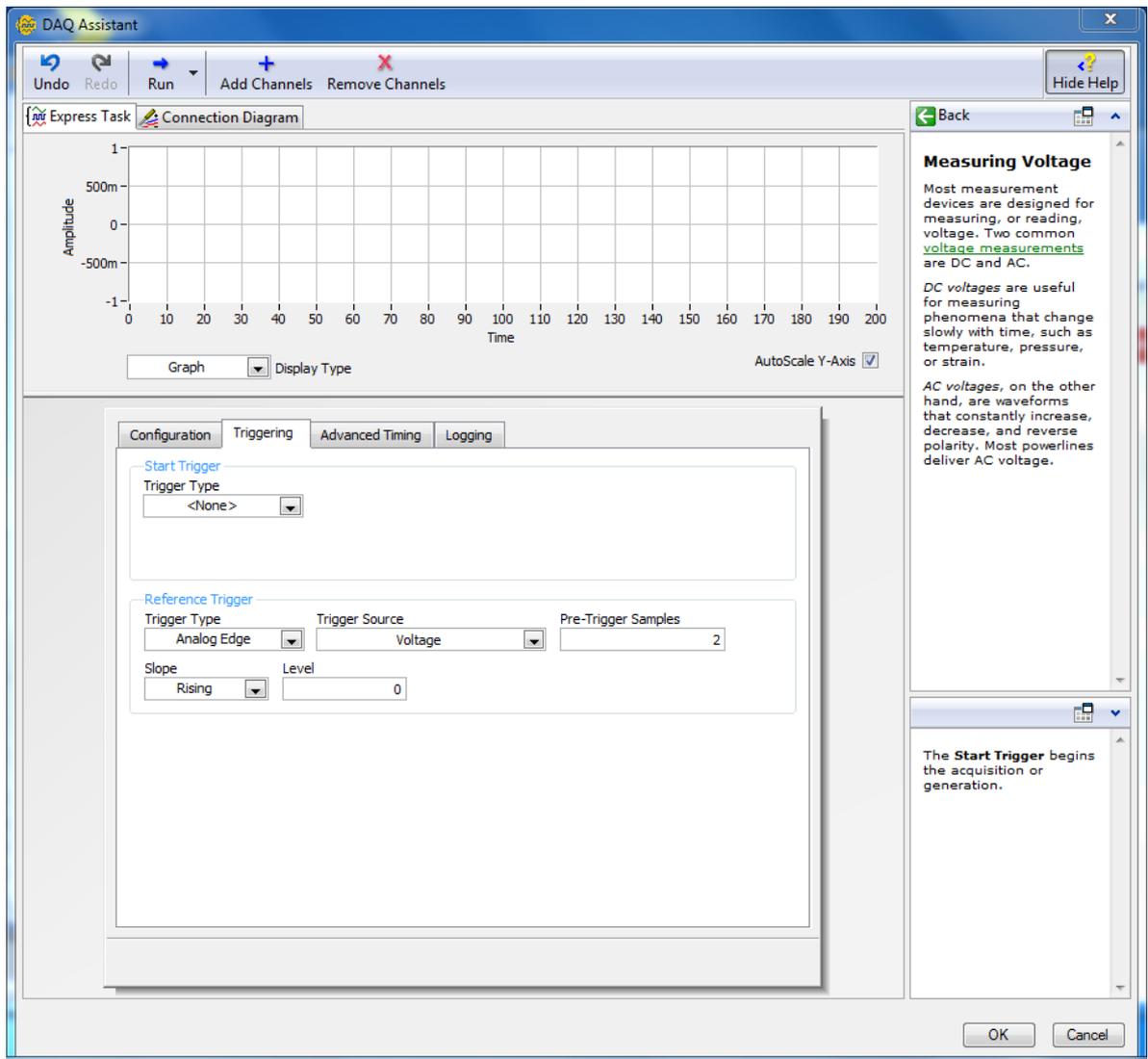
Clique em “Run” e verifique se o sistema gera e adquire os sinais corretamente. Varie os valores de frequência, amplitude e forma de onda e verifique se o gráfico é atualizado, como mostrado na figura abaixo.





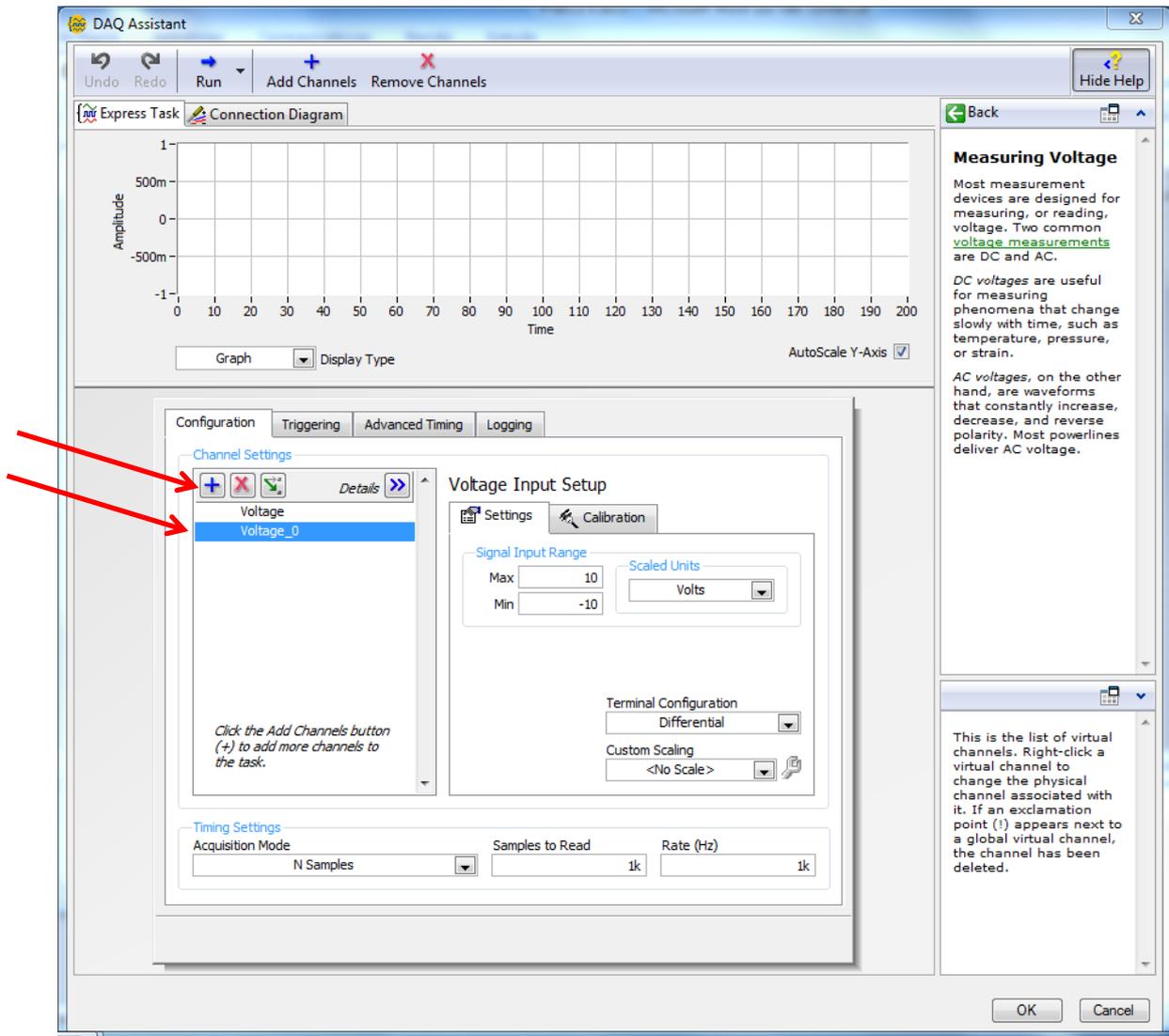
Desafios:

1. Configure o DAQ Assistant que controla a entrada de dados ai0 para ativar o trigger na borda de subida da onda. Ajuste o nível de trigger para 0V, como mostrado na figura abaixo. Rode novamente o programa e verifique se o sistema está funcionando.





2. Configure o DAQ Assistant para monitorar também a entrada analógica ai1. Isso pode ser feito adicionando-se um novo canal na aba “Configurations”, como visto na figura abaixo.



3. Ajuste o 2º DAQ Assistant que controla as saídas analógicas para acionar também a saída ao1. Isso também é feito na aba “configurations”, como mostrado abaixo.

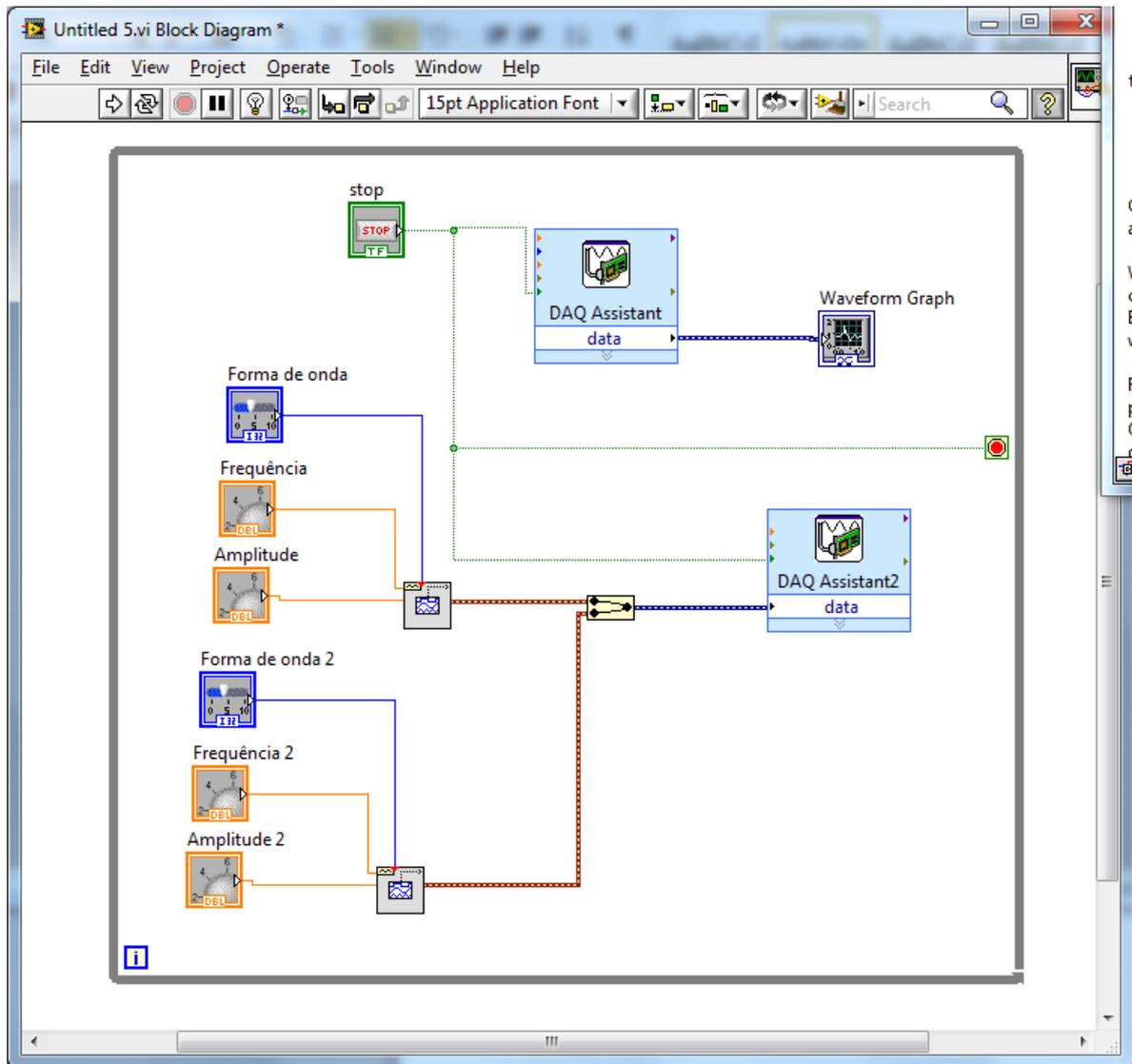


The screenshot shows the DAQ Assistant software interface. At the top, there is a menu bar with 'Undo', 'Redo', 'Run', 'Add Channels', and 'Remove Channels'. Below this is a plot area showing a sine wave with 'Amplitude' on the y-axis (ranging from -10 to 10) and 'Time' on the x-axis (ranging from 0 to 0,1). The plot is labeled 'Sine Wave' and 'Test Signal Type'. Below the plot are three tabs: 'Configuration', 'Triggering', and 'Advanced Timing'. The 'Configuration' tab is active and contains a 'Channel Settings' panel with a list of channels: 'VoltageOut' and 'VoltageOut\_0'. A red arrow points to the '+' button in the 'Channel Settings' panel, and another red arrow points to the 'VoltageOut\_0' channel. To the right of the 'Channel Settings' panel is the 'Voltage Output Setup' panel, which includes 'Signal Output Range' (Max: 10, Min: -10), 'Scaled Units' (Volts), 'Terminal Configuration' (RSE), and 'Custom Scaling' (<No Scale>). Below these panels are 'Timing Settings' with 'Generation Mode' (N Samples), 'Samples to Write' (100), and 'Rate (Hz)' (1k). On the right side of the interface, there is a help panel titled 'Generating Current or Voltage' with a 'Back' button. The help text states: 'You can generate two main kinds of signals for channels:'. It lists two bullet points: 'Single samples, including DC signals' and 'Multiple samples'. The 'Multiple samples' section includes a numbered list: '1. Your application writes multiple samples into a buffer.' and '2. All the samples in the buffer are then sent to your device according'. Below the help text is a section titled 'This is the list of virtual channels. Right-click a virtual channel to change the physical channel associated with it. If an exclamation point (!) appears next to a global virtual channel, the channel has been deleted.'



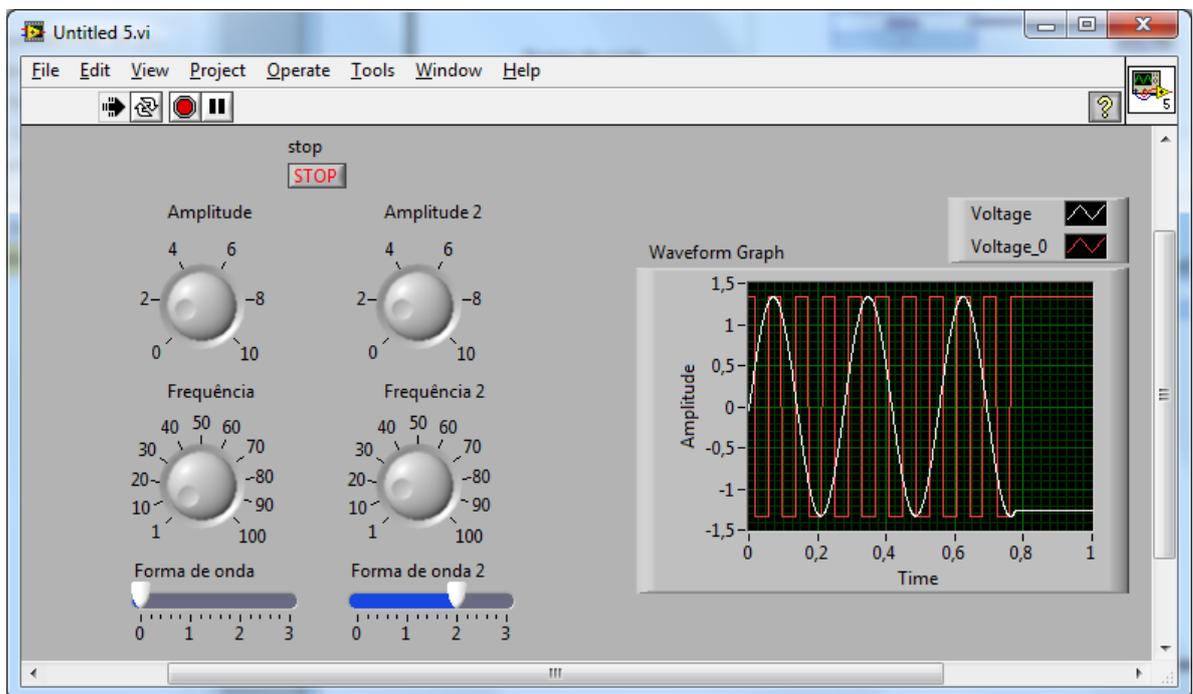
4. Insira outro gerador de sinais no seu sistema, com controles de amplitude, frequência e forma de onda.

Conecte as saídas dos dois geradores à entrada do 2º DAQ-Assistant utilizando a ferramenta “merge signals”. O seu sistema deverá ficar parecido com o mostrado na figura abaixo.

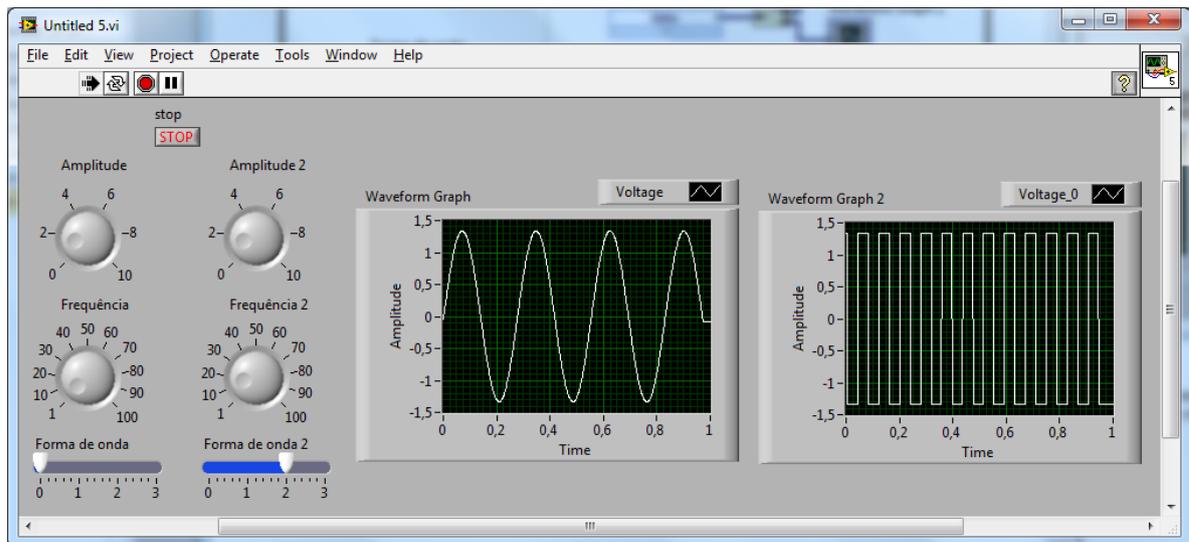


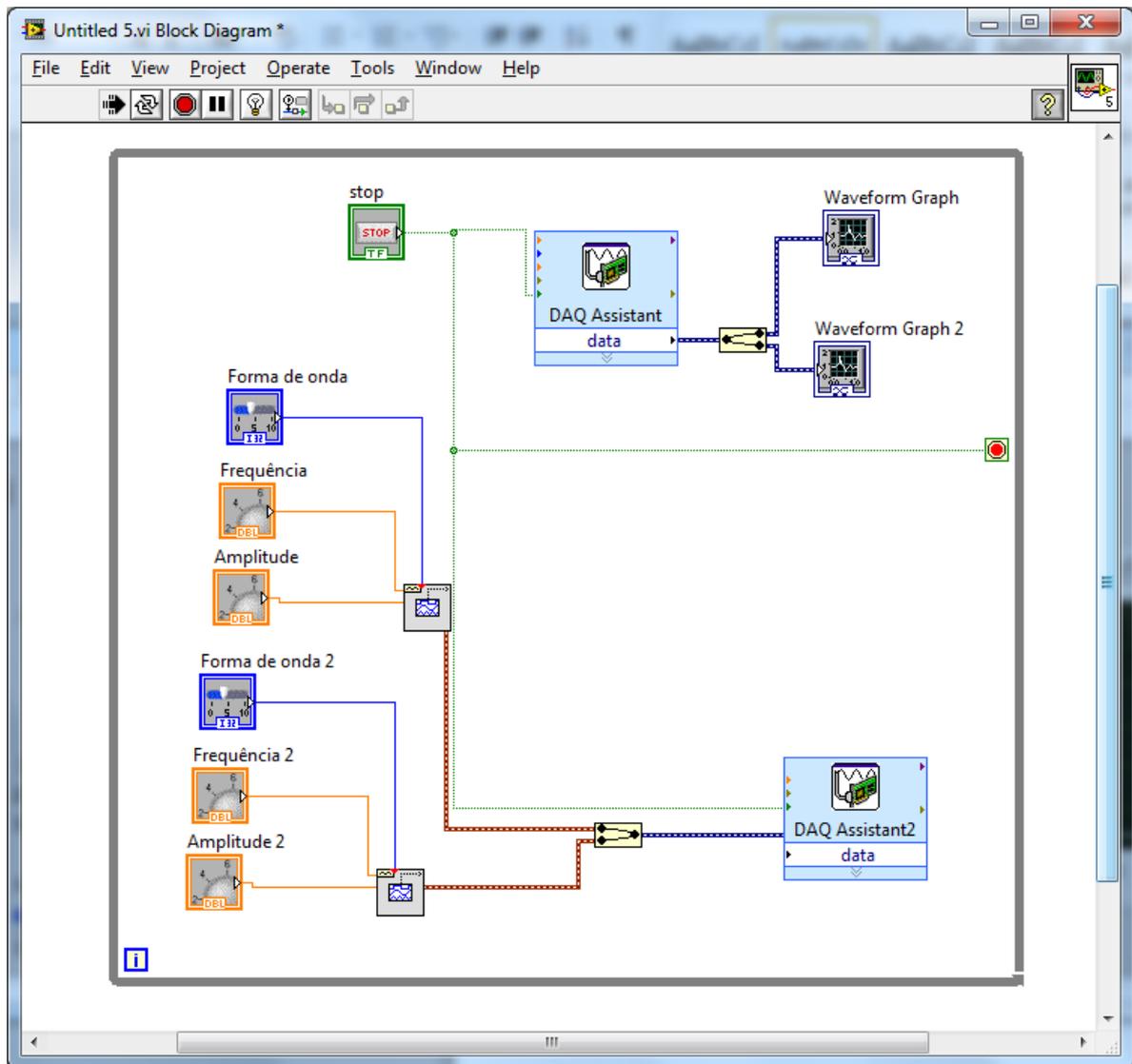


5. Utilize fios para conectar a saída analógica ao1 à entrada analógica ai1 no proto-board do NI-Elvis.
6. Rode o programa e verifique o seu funcionamento. Note que as duas formas de onda são apresentadas no mesmo gráfico e é possível alterar seus parâmetros de forma independente, como pode ser visto na figura abaixo.



7. Por fim utilize a ferramenta "Split signals" para mostrar as formas de onda em dois gráficos independentes. O sistema final deverá ficar como o mostrado nas figuras abaixo.







## Módulo-10 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA E ENERGIA ELÉTRICA

### OBJETIVOS

- Capacitar o aluno a obter o resultado completo de medições da potência em circuitos elétricos.
- Desenvolver a percepção da importância de circuitos de condicionamento de sinais em qualquer sistema de medição.
- Capacitar o aluno a desenvolver sistemas de processamento digital utilizando o NI-Elvis associado ao LabView.

### RESULTADOS DO APRENDIZADO

Após realizar esta atividade, o aluno deverá demonstrar que é capaz de:

- Escrever procedimentos para realizar medição da potência em circuitos elétrico-eletrônicos.
- Implementar sistemas para digitalização e processamento de sinais.
- Implementar um sistema digital para medição da potência elétrica.

### INTRODUÇÃO

A potência instantânea em um elemento de circuito elétrico é dada pela multiplicação entre a tensão e a corrente instantâneas.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t). \quad (1)$$

A potência ativa é determinada pelo valor médio da potência instantânea. Para o caso de sinais senoidais em regime permanente, o cálculo resultará em

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) \cdot i(t) dt = \frac{V_M I_M}{2} \cos(\varnothing) = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varnothing), \quad (2)$$

onde  $\varnothing$  representa o ângulo entre a tensão e a corrente.

A potência reativa pode ser determinada pelo valor médio da multiplicação entre a tensão e a corrente quando uma destas é deslocada de 90°:

$$Q = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} \left[ v(t) e^{-j\frac{\pi}{2}} \right] i(t) dt = \frac{V_M I_M}{2} \sin(\varnothing) = V_{RMS} I_{RMS} \sin(\varnothing). \quad (3)$$



A potência aparente pode ser obtida por meio do triângulo de potências.

$$|\vec{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (4)$$

Portanto, as medições de potência ativa, reativa e aparente em um circuito elétrico podem ser feitas por meio da digitalização dos sinais de tensão e corrente seguida de um processamento na fase digital.

Nesta aula prática você implementará um sistema digital para medição de potências ativa, reativa e aparente em um circuito RC, utilizando o NI-Elvis e os conceitos de LabView estudados nas aulas anteriores.

### ELEMENTOS PARA O PRÉ-RELATÓRIO

Considere o circuito abaixo, formado por um capacitor de 270 nF em série com um potenciômetro de 10 kΩ. O circuito será alimentado por um gerador de onda senoidal com amplitude de 2,5 V<sub>p</sub> e frequência de 3 kHz.

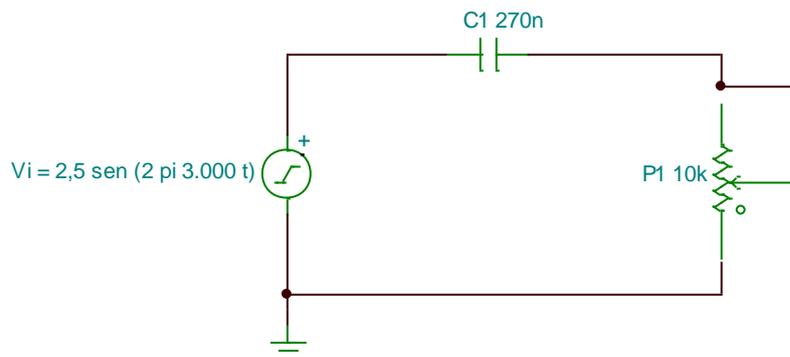


Figura 1: circuito para geração dos sinais e medição das grandezas.

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema digital para a medição da potência fornecida pela fonte ao circuito RC. Para tanto, considere os seguintes passos.

- Determine analiticamente as correntes RMS máxima e mínima que circularão no circuito.
- Determine o valor do potenciômetro para que ocorra a máxima extração de potência ativa da fonte de alimentação.
- Determine analiticamente as potências ATIVA, REATIVA e APARENTE máxima e mínima.
- Faça o projeto de circuitos condicionadores de sinais para medir a tensão e a corrente FORNECIDAS PELA FONTE DE ALIMENTAÇÃO. Projete de tal forma que a excursão *máxima* dos sinais seja tal que otimize o uso dos conversores A/D do NI-Elvis (veja o valor da excursão máxima das entradas analógicas no NI-Elvis na sua folha de especificações). Lembre-se também da importância de minimizar o efeito de carga e de eventuais tensões de modo comum.
- Construa os circuitos de teste e condicionamento em um simulador Spice<sup>23</sup> e verifique o seu funcionamento, considerando os limites extremos de tensão, corrente e potência. Insira as figuras da análise no seu pré-relatório.

<sup>23</sup> Simuladores gratuitos disponíveis em



- Os sinais gerados pelos circuitos de condicionamento serão digitalizados utilizando o NI-Elvis e o LabView. Considerando que este experimento será realizado no laboratório:
  - xv. Escreva o *procedimento de medição*<sup>24</sup>, conforme definição dada no VIM<sup>25</sup>.
  - xvi. Forneça uma relação dos equipamentos, componentes e instrumentos a utilizar.

### ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Construa no proto-board o circuito para medição de potência e os condicionadores de sinais projetados no seu pré-relatório.
- Verifique o funcionamento do circuito e a adequação do sinais, utilizando o osciloscópio e variando o potenciômetro entre os valores máximo e mínimo. Certifique-se, particularmente, de que as tensões nas saídas dos condicionadores não excedam os valores máximos suportáveis pelas entradas analógicas do NI-Elvis.
- Conecte as saídas dos condicionadores às entradas analógicas AI0 e AI1.
- Utilize o *DAQ Assistant* para digitalizar os sinais nos dois canais. Utilize uma frequência de amostragem adequada, considerando as frequências dos sinais a digitalizar, e ajuste o tamanho do vetor de dados de forma a visualizar 10 períodos dos sinais.
- Insira elementos de processamento para compensar os ganhos dos circuitos de condicionamento e ajustar o cálculo da tensão e corrente. Para tanto, verifique os módulos disponíveis na seção “Mathematics”, tais como os somadores, multiplicadores, divisores e constantes numéricas mostrados na figura abaixo.

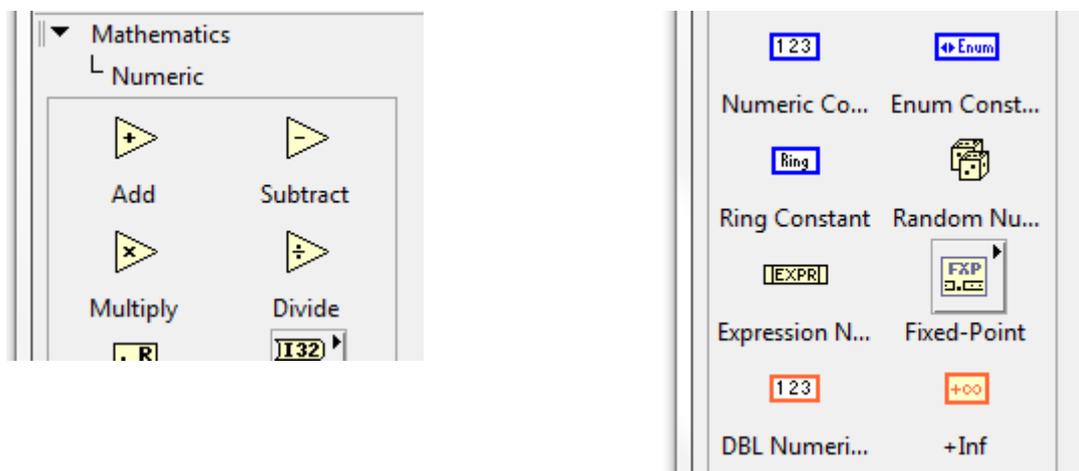


Figura 2: alguns módulos de processamento da seção “Mathematics”.

- Desenvolva uma interface gráfica que permita apresentar os sinais de tensão, corrente e potência instantânea.

<http://www.ti.com/tool/tina-ti>

<http://www.linear.com/designtools/software/#LTspice>

<http://www.cadence.com/products/orcad/pages/downloads.aspx>

<sup>24</sup> Os procedimentos de medição deverão sempre ser registrados em seus relatórios.

<sup>25</sup> VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.



- Após obter os valores corretos de tensão e corrente, conclua o projeto da seguinte forma:
  - Apresente os gráficos de tensão e corrente.
  - Faça o processamento para o cálculo da potência instantânea e apresente o resultado no gráfico correspondente.
  - Faça o processamento para o cálculo da potência ativa, tal como definido pela equação 2. Para o cálculo da média, considere usar o módulo mostrado na figura 3, disponível em “Mathematics” -> “Probability & Statistics”.



Figura 3: módulo que calcula a média aritmética.

- Apresente o resultado do cálculo em um display numérico inserido na interface do instrumento. Um exemplo deste dispositivo é mostrado na figura 4.



Figura 4: display para apresentar resultados numéricos.

- Realize os cálculos das potências reativa e aparente, tal como definido nas equações 3 e 4. Apresente o resultado em outro display numérico.
- Verifique o funcionamento do seu sistema de medição, variando o potenciômetro e medindo os resultados. Confirme os valores das potências ativa e reativa calculados no pré-relatório. Insira as figuras em seu relatório para comprovar os resultados. Discuta e justifique eventuais discrepâncias.

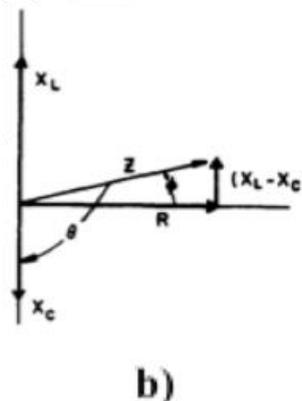
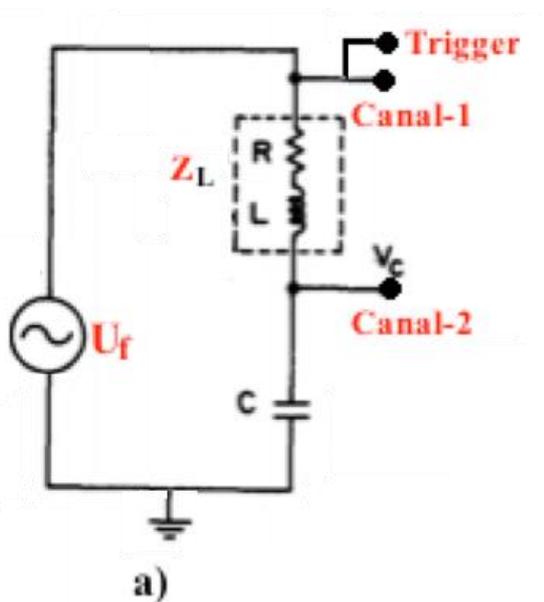
### ELEMENTOS PARA O RELATÓRIO DA ATIVIDADE EXPERIMENTAL

- Elementos já desenvolvidos no pré-relatório.
- Especificações dos equipamentos, componentes e instrumentos utilizados nos experimentos (as mais relevantes para a medição em questão).
- Desenvolvimento:
  - xi. Descrição das atividades.
  - xii. Registro dos dados coletados.
- Resultados e discussão.
  - xiii. Apresentação dos resultados solicitados.
  - xiv. Uma vez que o sistema desenvolvido nesta prática é digital, ele deveria conter pelos menos mais um componente em sua cadeia de digitalização. Você saberia dizer o que falta?
  - xv. Neste caso, a falta do componente causou algum impacto perceptível na medição? Reflita e discuta.
- Conclusões.
- Referências bibliográficas

## Módulo-11 MEDIÇÃO DE IMPEDÂNCIA EM CIRCUITOS ELÉTRICOS

### OBJETIVO:

Neste trabalho deverá ser implementado um sistema digital para medir os parâmetros de um circuito “caixa preta”. O circuito de medição é composto por uma impedância  $Z_L$ , por um capacitor  $C$  de capacitância **conhecida** conectado em série com  $Z_L$  e pela fonte de tensão senoidal de frequência  $\omega$  e amplitude  $U_f$  ajustáveis. A impedância é formada por uma resistência  $R$  e uma indutância  $L$ . Os diagramas são mostrados na figura.



$$\tan\phi = \frac{(X_L - X_C)}{R},$$

$$\text{mas, } \phi = -\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \therefore \cotan\theta = \frac{(X_L - X_C)}{R}$$

$$\cotan\theta = [(L/R)\omega - (1/RC)\omega^{-1}]$$

Fazendo

$q_a = \omega_0 L/R$ ;  $q_b = 1/\omega_0 RC$ ;  $X = \omega/\omega_0$   
e  $Y = \cotan \theta$  resulta:

$$\boxed{Y = q_a X - q_b/X}$$

**Figura** – a) Diagrama esquemático para o circuito usado para medir o defasamento entre  $V_c$  e  $V$  e b) diagrama fasorial que mostra o ângulo de fase  $\theta$  medido em a).

A técnica de medição a ser usada, neste caso, é determinada pelo modelo matemático que relaciona o ângulo  $\theta$  de defasagem entre  $U_f$  (tensão da fonte) e  $U_c$  (queda de tensão no capacitor) com a frequência  $\omega$  da tensão ( $U_f$  e  $U_c$ ). Escrevendo a equação dos parâmetros na forma  $Y=f(X)=q_a X - q_b/X$  relaciona a variável de saída  $Y$  (ângulo de defasagem  $\theta$ ) com a variável de entrada  $X$  (frequência  $\omega$ ).

Para encontrar os valores de  $L$  e  $R$  é necessário resolver o sistema e determinar  $q_a$  e  $q_b$ . Para tanto, em tese, bastariam tomar a média das medições de cada um dos parâmetros em dois pontos diferentes de  $\theta$ ,  $\omega$  (ou  $X$  e  $Y$ ). Porém, é provável que se os valores médios forem, respectivamente,  $\theta_1, \omega_1$  (ou  $Y_1, X_1$ ) e  $\theta_2, \omega_2$  (ou  $Y_2, X_2$ ) ao substituí-los na equação acima serão encontrados os correspondentes valores  $q_{a1}$  e  $q_{b1}$ . Se, por outro lado, os valores forem agora  $\theta_3, \omega_3$  (ou  $Y_3, X_3$ ) e  $\theta_4, \omega_4$  (ou  $Y_4, X_4$ ) os valores encontrados serão  $q_{a2}$  e  $q_{b2}$ , diferentes dos anteriores. E para cada novo grupo medido, diferentes valores dos parâmetros  $q_a$  e  $q_b$  serão gerados.



O número de parâmetros  $q_j$  a serem determinados é  $m=2$ . Deve-se realizar medições dos parâmetros  $\theta, \omega$  (ou X e Y) em n pontos diferentes (recomenda-se  $n \geq 5$ ) e encontrar a solução que será aquela que minimiza a expressão  $S = \sum_{i=1}^n \{ [y_i - f(x_i)] / u_i \}^2$ . Recomenda-se também que para cada grupo de parâmetros  $\theta, \omega$  (ou X e Y) sejam feitas também, pelo menos, 5 medições e sejam usados os valores médios.  $u_i$  representa a incerteza em X e Y cuja expressão será dada abaixo.

Na expressão acima, a função  $f(x)$  é dada por  $f(x) = \sum_{j=1}^m q_j f_j(x_i) = q_1 f_1(x_i) + q_2 f_2(x_i) = q_1 x_i - q_2 / x_i$ . No caso,  $f_1(x_i) = x_i$  (ou  $f_1(\omega_i) = \omega_i$ ) e  $f_2(x_i) = -1/x_i$  (ou  $f_2(\omega_i) = -1/\omega_i$ ).

Os valores  $q_i^*$  que são solução para minimizar a soma S acima, podem ser encontrados através da conhecida técnica de minimização de funções denominada "mínimos quadrados". Neste caso, tem-se:

$$q_i^* = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n \left[ \frac{y_j f_k(x_j)}{u_j} \right]^2 * [H^{-1}]_{ki}$$

onde

a matriz  $H_{ij}$  é dada por:  $H_{ij} = \sum_{k=1}^n \frac{f_i(x_k) \cdot f_j(x_k)}{(u_k)^2}$

A incerteza  $u$ , nas expressões acima depende das incertezas-padrão  $u_y$  de  $y$  ( $\theta$ ), e  $u_x$  de  $x$  ( $\omega$ ), de acordo com:

$$u_j = \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial x} u_{x_i} \right)_j^2 + (u_{y_i})^2}$$

### Especificações

- O sistema deverá indicar na tela:
  - O valor (impedância / indutância e resistência da bobina) e a incerteza.
  - Forma de onda e amplitude (RMS) da tensão aplicada  $U_f$ .
  - Forma de onda e amplitude (RMS) da queda de tensão no capacitor  $V_C$ .
  - Frequência do sinal de tensão aplicada.
  - Angulo de defasagem entre as tensões  $U_C$  e  $U_f$ .
- O sistema deverá ser implementado utilizando a plataforma de digitalização e processamento LabView associada ao NI-Elvis.
- Você deverá projetar e construir elementos para condicionamento dos sinais de tensão e corrente de forma a:
  - o Maximizar o uso da resolução dos conversores A/D.
  - o Evitar eventuais problemas associados a efeitos de carga e tensão de modo comum.
  - o Evitar a ocorrência de aliasing.



## Apêndice-A

## Modelo de Relatório

A elaboração de relatório de atividades de laboratório é muito importante para que o aluno desenvolva a sua habilidade de comunicar informações técnicas de maneira clara e objetiva. O texto deve ser manuscrito e é importante também ter cuidado com a caligrafia, para que as informações sejam compreendidas pelos possíveis leitores. As seções devem ser organizadas em uma sequência que reflita a ordem em que as atividades ocorreram.

Sugere-se que o relatório contenha pelo menos as seguintes seções:

### 1. Cabeçalho

O relatório deve conter o título do tópico e identificação do relatório, os nomes dos participantes autores do relatório e por fim a data.

### 2. Objetivos

Nesta seção devem ser descritas, de forma objetiva, as atividades a serem desenvolvidas e os resultados pedagógicos esperados.

### 3. Atividade Experimental

#### I. Componentes, dispositivos e equipamentos utilizados

Nesta seção devem ser relacionados os equipamentos e materiais utilizados (de maneira discriminada) bem como suas principais características (tensão, corrente, resistência, tolerância, exatidão, etc.) fabricante, modelo, etc. **Compõe também o pré-relatório.**

#### II. Procedimento de medição

É uma descrição detalhada da medição de acordo com um ou mais princípios de medição e com um dado método de medição, baseada em um modelo de medição e inclui todo cálculo destinados à obtenção de um resultado de medição. Deve incluir diagramas ilustrativos do circuito de medição com destaque para o posicionamento dos instrumentos utilizados. É geralmente documentado em detalhes suficientes para permitir que um operador realize uma medição.

**Compõe o pré-relatório.**

#### III. Resultados das medições

Os resultados obtidos através de medição devem ser relatados aqui nesta seção. É importante que sejam apresentados de forma compreensível e, se for necessário, fazendo uso de tabelas, gráficos ou figuras cuidadosamente construídos para possibilitar um fácil entendimento dos resultados.

### 4. Análise e discussão dos Resultados

Comparação dos resultados obtidos nas medições com aqueles estabelecidos por padrões ou valores esperados. Procure elaborar comentários embasados para explicar esses resultados.

### 5. Conclusão

O relatório termina com comentários – feitos com coerência e conhecimento – sobre os resultados obtidos, inclusive com a explicação para eventuais desvios que tenham acontecido.



## Apêndice-B

## Procedimento de Medição

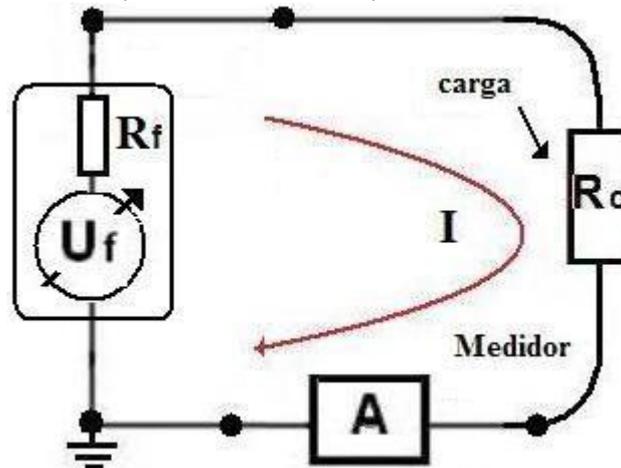
### 1. Instrumentos, equipamentos e componentes utilizados:

1. fonte de tensão, referenciada à terra, +15V, da plataforma NI-Elvis.
2. amperímetro digital, resolução 4 dígitos, limites máximos de erro (exatidão)  $\pm(0,5\% \cdot \text{indicado} + 3\text{mA})$  da plataforma NI-Elvis
3. 1 x Resistor de 10 k $\Omega$ , 500V compõe a carga de 80 $\Omega$ ;
4. 2 x Resistor de 160  $\Omega$ , tolerância  $\leq 1\%$ , 1/4W;
5. etc.

### 2. Procedimento de medição

Medição direta da corrente em um circuito elétrico constituído por uma carga de 10k $\Omega$  alimentado por fonte CC de 15V, usando um amperímetro digital.

#### a. Diagrama esquemático (modelo conceitual) do circuito de medição



#### b. Estimativa do valor da corrente no circuito, a ser medida:

$$I = \frac{V_f}{R_f + R_c} = \frac{15}{R_f + 10 \times 10^3} \leq 15\text{mA}$$

#### c. Descrição das Operações para realizar a medição:

- (observe sempre as regras de segurança e organização para o laboratório de eletricidade);
- ligar a plataforma NI-Elvis na tomada da bancada (com tempo para estabilização térmica de acordo com o manual do fabricante);
- ativar o programa aplicativo do NI-Elvis (SO: VISTA, WIN7.0, etc.)
  - Todos programas (All Programs);
  - National Instruments;
  - NI-Elvis (NI-Elvis tradicional ou NI-Elvismx).
- inserir os componentes no proto-board do NI-Elvis (preferencialmente usando alicate de bico ou pinça), tomando por base o diagrama esquemático;
- ativar o software aplicativo DMM do NI-Elvis;



- escolher a função A=, para medir corrente CC;
  - colocar em curto-circuito os terminais (current Hi e current Lo) do amperímetro do NI-Elvis no protoboard;
  - com a fonte de alimentação do circuito ainda desligada, ligar o instrumento, ajustar o instrumento para o menor valor de corrente de fundo de escala imediatamente superior a  $(15V/10k\Omega =)1,5mA$ .
  - ligar a fonte de tensão da plataforma NI-Elvis, mantendo o curto-circuito entre os terminais do amperímetro.
  - verificar se ocorreu a estabilização da fonte de alimentação e do instrumento.
  - retirar o curto-circuito entre os terminais do amperímetro.
  - registrar a indicação do amperímetro.
  - repetir a ação anterior por mais 4 vezes, aguardando cerca de 30 (?) segundos entre cada medição sucessiva ou alterando a posição dos cabos de ligação e do instrumento de medição;
  - para finalizar, reinsertar o curto-circuito entre os terminais do amperímetro;
  - desligar o NI-Elvis;
  - remover as conexões da fonte de tensão e do instrumento de medição;
  - anotar as condições ambientais (temperatura ambiente, humidade relativa do ar).
4. Usando os dados obtidos no passo anterior, determine o valor médio (e o desvio-padrão da média) para a corrente no circuito.



## Apêndice-C Principais Componentes Eletrônicos

### Resistores

código IEC E-96 (tolerância 1%):

5X (1Ω, 10Ω, 100Ω; 1kΩ; 10kΩ; 100kΩ; 1MΩ)

### Capacitores

código IEC E24 (tolerância 5%) – material : policarbonato, poliéster, poliestireno, etc.

5x (1μF; 0,5 μF)

### Diodos

10X tipo: 1N4148

### Amplificadores Operacionais

10x TL-071C – tipo J-FET, fabricante Texas Instruments ou similar.

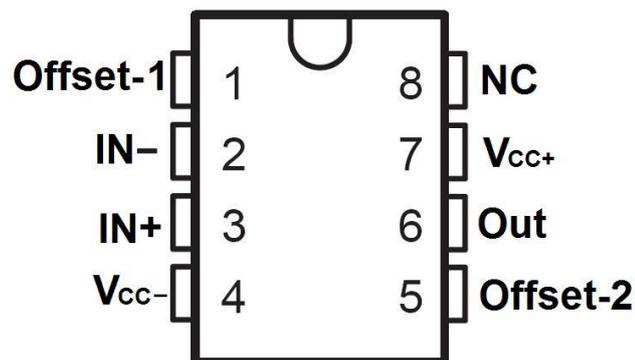


Figura - Pinagem do AmpOP TL-071. Esta pinagem é a mesma do LM-741.

### Amplificadores de Instrumentação:

2x INA-114 (General purpose Instrumentation Amplifier) fabricante Texas Inst. (Burr-Brown)

### Multiplicador Analógico

AD-633 – (low cost analog multiplier) fabricante Analog-Devices

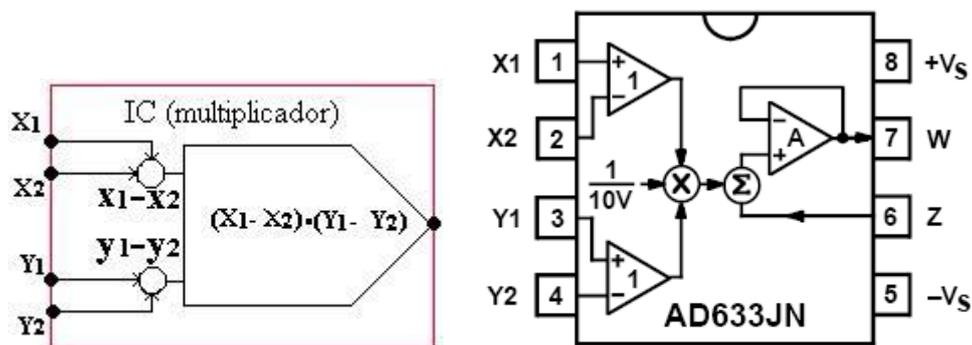


Figura – Pinagem do multiplicador analógico AD-633JN.



**Filtro Ativo de 2ª ordem**

3X **UAF-42** (UNIVERSAL ACTIVE FILTER) (fabricante Texas Instruments)

Top View

Plastic DIP, P

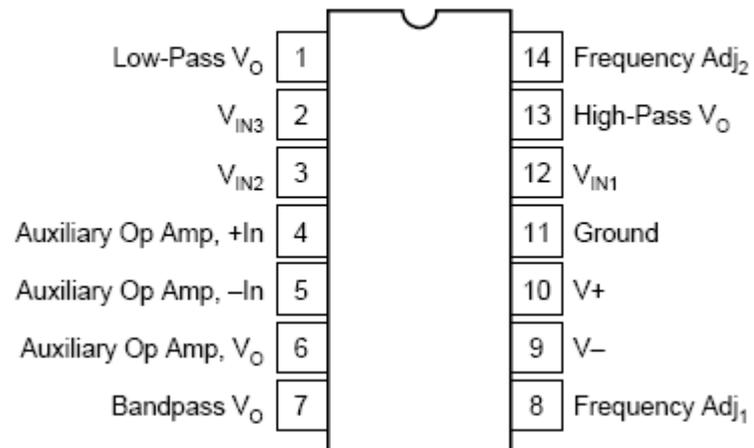
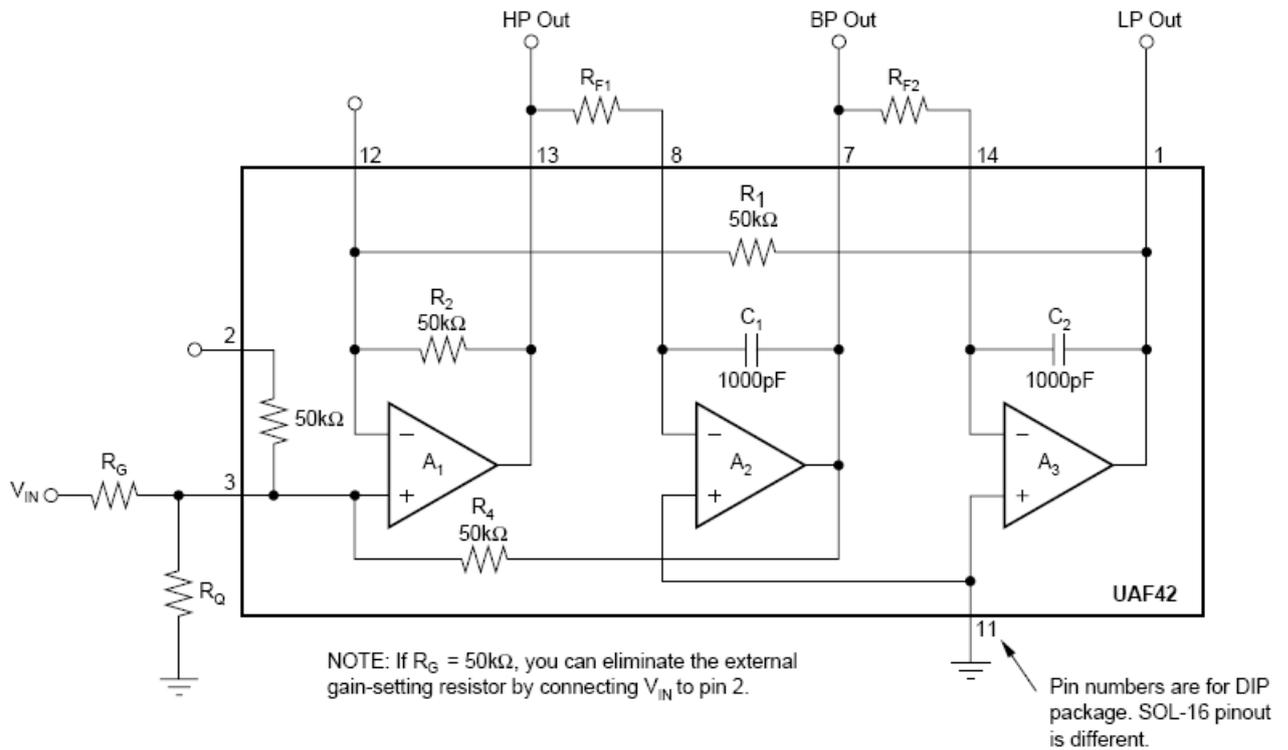


Figura - pinagem do UAF-42, filtro universal.





## Apêndice-D Equipamentos e Ferramentas de Laboratório

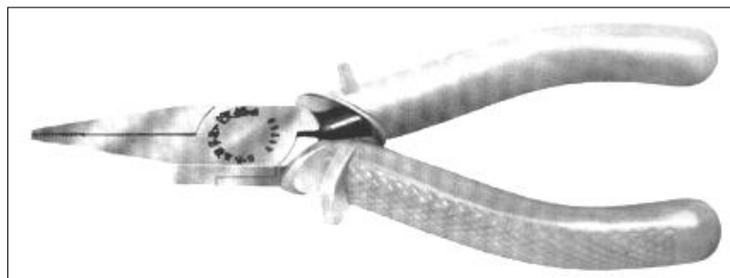
- Óculos de proteção



- Desencapador de fios

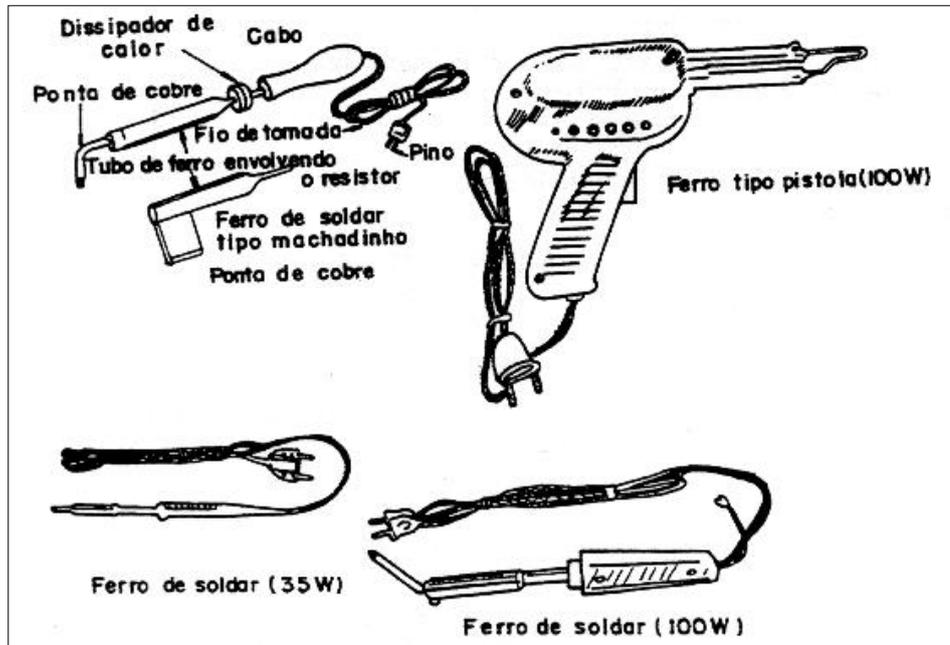


- Alicates de bico chato





- Ferro de soldar





Apêndice-E Tabela de Resistores e Capacitores

**3 Faixas**

**4 Faixas**

**5 Faixas**

**EXEMPLOS**

- \* --- 4,7KΩ ±20% (4K7)
- \*\* --- 4,7KΩ ±5% (4K7)
- \*\*\* --- 47,9KΩ ±1% (47K9)

**tolerância**

**multiplicador**

prata	X0,01	±10%
ouro	X0,1	±5%
preto	X1	1%
marrom	X10	2%
vermelho	X100	
laranja	X1000	
amarelo	X10000	±0,5%
verde	X100000	±0,25%
azul	X1000000	±0,1%
violeta	X10000000	±0,05%
cinza	X100000000	
branco		

*Fábio Maurício Timi*

0,003 M 400 V	0,003 = Valor numérico, em µF 3 nF M = Tolerância, em % ± 20% 400 V = Tensão de trabalho 400 V Valor lido: 3mF 20% - 400 V	X = Temperatura Mínima -55 °C 7 = Temperatura Máxima +125 °C R = Variação da Capacitância ±15% 10 = Três primeiros algarismos em pF (10 - 10 <sup>9</sup> ) pF K = Tolerância, em % ± 10% 1 KV = Tensão de Trabalho 1 KV Valor lido: 10 pF ± 10% - 1 KV, com variação de 15% dentro da faixa de operação de -55 °C até +125 °C
0,22µ FK 250 V	0,22 = Valor numérico, em µF 220 nF K = Tolerância, em % ± 10% 250 V = Tensão de trabalho 250 V Valor lido: 220nF 10% - 250 V	C = Temperatura Mínima +25 °C O = Temperatura Máxima +85 °C H = Variação da Capacitância +80ppm/ °C 7 = Único algarismo em pF (7 10 <sup>7</sup> ) 7pF D = Tolerância, em % ± 0,5 pF 1 KV = Tensão de Trabalho 1 KV Valor lido: 7 pF 0,5 pF, com variação de +60 ppm/ °C dentro da faixa de operação de +25 °C até +85 °C
102 K 50	102 = Três primeiros algarismos, em pF (10 10 <sup>2</sup> ) 1000 pF = 1 nF K = Tolerância, em % ± 10% 50 = Tensão de trabalho 50 V Valor lido: 1 nF 10% - 50 V	Z = Temperatura Mínima +10 °C 5 = Temperatura Máxima +85 °C U = Variação da Capacitância -56% a +22% .0033 = Valor numérico em F 3,3nF 20% = Tolerância, em % ±20% Valor lido: 3,3 nF ± 20%, com variação de -56% a +22% dentro da faixa de operação de +10 °C até +85 °C
4n7 400	4n7 = Valor numérico, em nF 4,7 nF 400 = Tensão de trabalho 400 V Valor lido: 4,7 nF - 400 V	Z = Temperatura Mínima +10 °C 5 = Temperatura Máxima +85 °C P = Variação da Capacitância ±10% 2200 = Valor numérico em pF 2200 pF - 2,2 nF K = Tolerância, em % ±20% Valor lido: 2,2 nF ± 20%, com variação de 10% dentro da faixa de operação de +10 °C até +85 °C
150 n 250	150n = Valor numérico, em nF 150 nF 250 = Tensão de trabalho 250 V Valor lido: 150 nF - 250 V	Z = Temperatura Mínima +10 °C 5 = Temperatura Máxima +85 °C N2200 = Coeficiente de variação de capacitância de -2200 a +500 ppm / °C 47 pF = Valor numérico em pF 47pF 20% = Tolerância, em % ±20% Valor lido: 47 pF ± 20%, com variação de -2200 a +500 ppm / °C
223 K 03	223 = Três primeiros algarismos, em pF (22 10 <sup>3</sup> ) 22000 pF = 22 nF K = Tolerância, em % ± 10% 63 = Tensão de trabalho 63 V Valor lido: 22 nF ± 10% - 63 V	20 = Valor numérico em pF 20pF 20% = Tolerância, em % ±20% 50 VAC = Tensão de trabalho AC 50 VAC 400 VDC = Tensão de trabalho DC 400 VDC Valor lido: 20 pF ± 20% 50 VAC 400 VDC
68 n 100	68n = Valor numérico, em nF 68 nF 100 = Tensão de trabalho 100 V Valor lido: 68 nF - 100 V	200 nZ 12 V
µ47 100	47 = Valor numérico, em µF 470 nF 100 = Tensão de trabalho 100 V Valor lido: 470 nF - 100 V	200 nZ 12 V
154 M 100	154 = Três primeiros algarismos, em pF (15 10 <sup>4</sup> ) 150000 pF = 150 nF M = Tolerância, em % ± 20% 100 = Tensão de trabalho 100 V Valor lido: 150 nF ± 20% - 100 V	MARROM = 1º Dígito 1 PRETO = 2º Dígito 0 LARANJA = 3º Dígito 10 <sup>1</sup> BRANCO = 4º Dígito ± 10% VERMELHO = 5º Dígito 250 V Valor lido: 10 10 <sup>1</sup> pF 10% 250 V
22 M 1 KV	22 = Dois primeiros algarismos, em pF (15 10 <sup>3</sup> ) 22 pF M = Tolerância, em % ± 20% 1 KV = Tensão de trabalho 1 KV Valor lido: 22 nF ± 20% - 1 KV	LARANJA = 1º Dígito 3 LARANJA = 2º Dígito 3 LARANJA = 3º Dígito 10 <sup>3</sup> BRANCO = 4º Dígito ± 10% VERMELHO = 5º Dígito 250 V Valor lido: 33 10 <sup>3</sup> pF ±10% 250 V
22 M 1 KV	470000 pF = 470 nF M = Tolerância, em % ± 20% Valor lido: 470 nF ± 20%, com variação de -56% a +22% dentro da faixa de operação de +25 °C até +85 °C	



## Apêndice-F

## Leitura do Valor de Capacitores

Diferentemente dos resistores de filme carbono, que sempre utilizam códigos de cores em anéis, os valores nominais dos capacitores são expressos geralmente por outro tipo de marcação. O que são todas aquelas letras e números encontrados em grande parte dos capacitores disponíveis comercialmente e que sempre geram dúvidas de leitura. Como saber se o valor utilizado é o desejado sem ter um instrumento que possa medi-lo? É o que será visto neste texto.

### Marcações básicas

Diversamente do que acontece com resistores, cada fabricante de capacitor adota uma marcação específica para indicar seu valor nominal, de acordo com suas características. Isto acaba gerando uma grande confusão, principalmente no estudante de Eletrônica e/ou hobbista, que não está acostumado com a codificação utilizada. A única exceção é a grande maioria dos capacitores eletrolíticos (polarizados), cuja marcação geralmente apresenta todo o valor nominal e é mostrada de maneira clara e de fácil leitura. Alguns capacitores de poliéster, mais antigos, ainda usam a marcação de valor nominal através do código de cores, com anéis. Mas isso é cada vez mais raro. A unidade de medida de capacitância (farads) por vezes é mostrada em submúltiplos diferentes em cada capacitor, sendo apresentada em  $\mu\text{F}$ , nF, k $\mu\text{F}$  ou pF. O problema é que não está escrito no corpo do capacitor qual é o submúltiplo utilizado! A simples troca de um capacitor queimado por outro equivalente poderá gerar transtornos, se o valor da capacitância não for observado. Para fazer a leitura de capacitores, primeiramente precisamos saber quais são as informações mais comuns que são apresentadas em seu invólucro:

### Capacitância:

É a capacidade de armazenamento de cargas que o capacitor possui. Sua unidade de medida é o farad, mas o fabricante pode expressar essa unidade em diversos submúltiplos:  $\mu\text{F}$ , nF, k $\mu\text{F}$  ou pF. Por exemplo: os capacitores cerâmicos quando trazem números inteiros (150; 220; etc.), têm a unidade de medida em pF. Quando usam números decimais (0,47; 0,1; etc.), a unidade de medida é em  $\mu\text{F}$ .

### Tensão de trabalho:

Valor máximo de tensão que pode ser aplicada às placas do capacitor sem provocar o rompimento do dielétrico. Geralmente expresso em volts ou quilovolts.

### Tolerância:

Devido ao processo de fabricação, o valor nominal pode variar dentro de um limite negativo e positivo, geralmente expresso em porcentagem. Assim, um capacitor de 10  $\mu\text{F}$  com  $\pm 10\%$  de tolerância pode apresentar valores reais de 11  $\mu\text{F}$  ou 9  $\mu\text{F}$ . Como não é comum o uso de código de cores em capacitores (somente em modelos mais antigos) estas informações são apresentadas como letras e números. Outro motivo para isto é que a área de um invólucro é pequena, então não é possível escrever toda a informação (10  $\mu\text{F} \pm 10\%$  250 V), utilizando-se apenas letras que informam este valor (101KB), muito mais compacto. As **tabelas 1 e 2** mostram uma codificação usada por diversos fabricantes. Note que elas têm equivalência com a que se usa no código de cores de resistores. Só que, no lugar de cores, utilizam-se números para indicar cada caractere. Esta tabela serve para capacitores com 5 caracteres, onde os três primeiros são referentes ao valor da capacitância, o quarto refere-se à tolerância e o quinto à tensão de trabalho.



1º caractere Algarísimo significativo	2º caractere Algarísimo significativo	3º caractere Multiplicador	4º Caractere		
			Tolerância do Capacitor		
			até 10pF	código	acima de 10pF
-----	0	0=10 <sup>0</sup>	0,1pF	B	
1	1	1=10 <sup>1</sup>	0,25pF	C	
2	2	2=10 <sup>2</sup>	0,5pF	D	
3	3	3=10 <sup>3</sup>	0,75pF	E	
4	4	4=10 <sup>4</sup>	1,0pF	F	1%
5	5	5=10 <sup>5</sup>		G	2%
6	6	não utilizado		H	3%
7	7	não utilizado		J	5%
8	8	8=10 <sup>8</sup>		K	10%
9	9	9=10 <sup>9</sup>		M	20%
				N	0,05%
				S	50% / - 20%
				Z	+80% / - 20%
				P	+100% / - 0%

Tabela 1 - 4 primeiros caracteres em capacitores

5º Caractere / Tensão de trabalho		
A = 100V	J = 2.000V	S = 12.000V
B = 250V	K = 2.500V	T = 15.000V
C = 300V	L = 3.000V	U = 20.000V
D = 500V	M = 4.000	V = 25.000V
E = 600V	N = 5.000V	W = 30.000V
F = 1.000V	P = 6.000V	X = 35.000V
G = 1.200V	Q = 8.000V	
H = 1.500V	R = 10.000V	

Tabela 2 - 5º caractere / Tensão de trabalho

### Outras informações

Além das informações básicas (capacitância, tolerância, tensão de trabalho), uma outra que costuma ser fornecida é a variação do valor da capacitância em função da temperatura de trabalho do capacitor, conhecida como coeficiente de temperatura. Isto é importante para diversas aplicações comerciais, onde o ambiente em que o capacitor ficará montado passe por grandes variações de temperatura, e por conseqüência, sofra grandes alterações de capacitância.

O código de cores para alguns capacitores de poliéster metalizado é similar ao usado para os resistores (tabela-3).



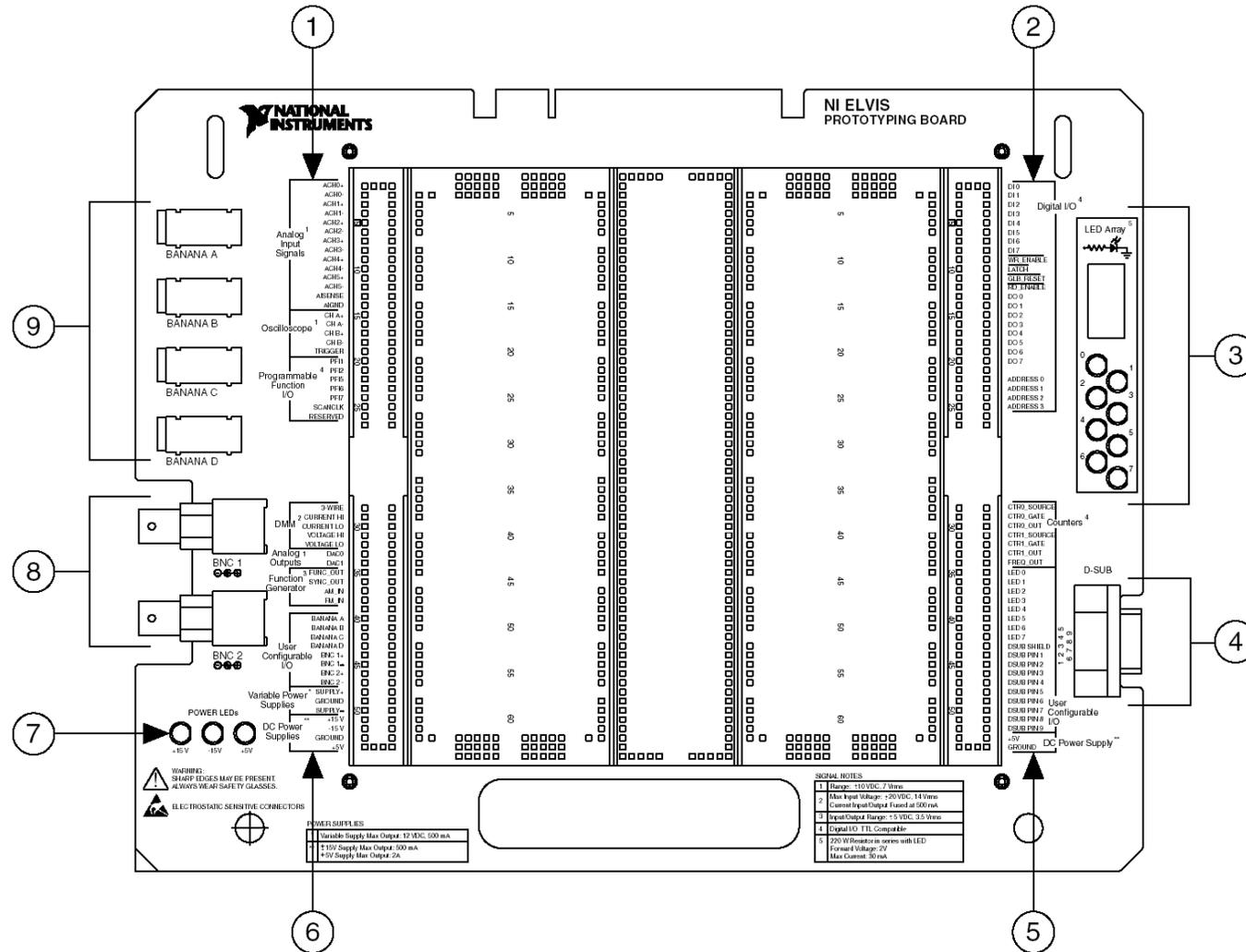
Laboratório

Cores	1ª Anel	2ª Anel	3ª Anel	4ª Anel	5ª Anel
	1ª Sig.	2ª Sig.	Múltiplo	Tolerância	Tensão
Preto		0		20%	
Marron	1	1	0	±1%	
Vermelho	2	2	00	±2%	250V
Laranja	3	3	000		
Amarelo	4	4	0000		400V
Verde	5	5	00000		
Azul	6	6			630V
Violeta	7	7			
Cinza	8	8			
Branco	9	9		10%	



Apêndice-G

Protoboard do NI-Elvis





## Sistemas de Medição

### Laboratório

1	AI, Oscilloscope, and Programmable Function I/O Signal Rows	6	DMM, AO, Function Generator, User-Configurable I/O, Variable Power Supplies, and DC Power Supplies Signal Rows
2	DIO Signal Rows	7	Power LEDs
3	LED Array	8	BNC Connectors
4	D-Sub Connector	9	Banana Jack Connectors
5	Counter/Timer, User-Configurable I/O, and DC Power Supply Signal Rows		

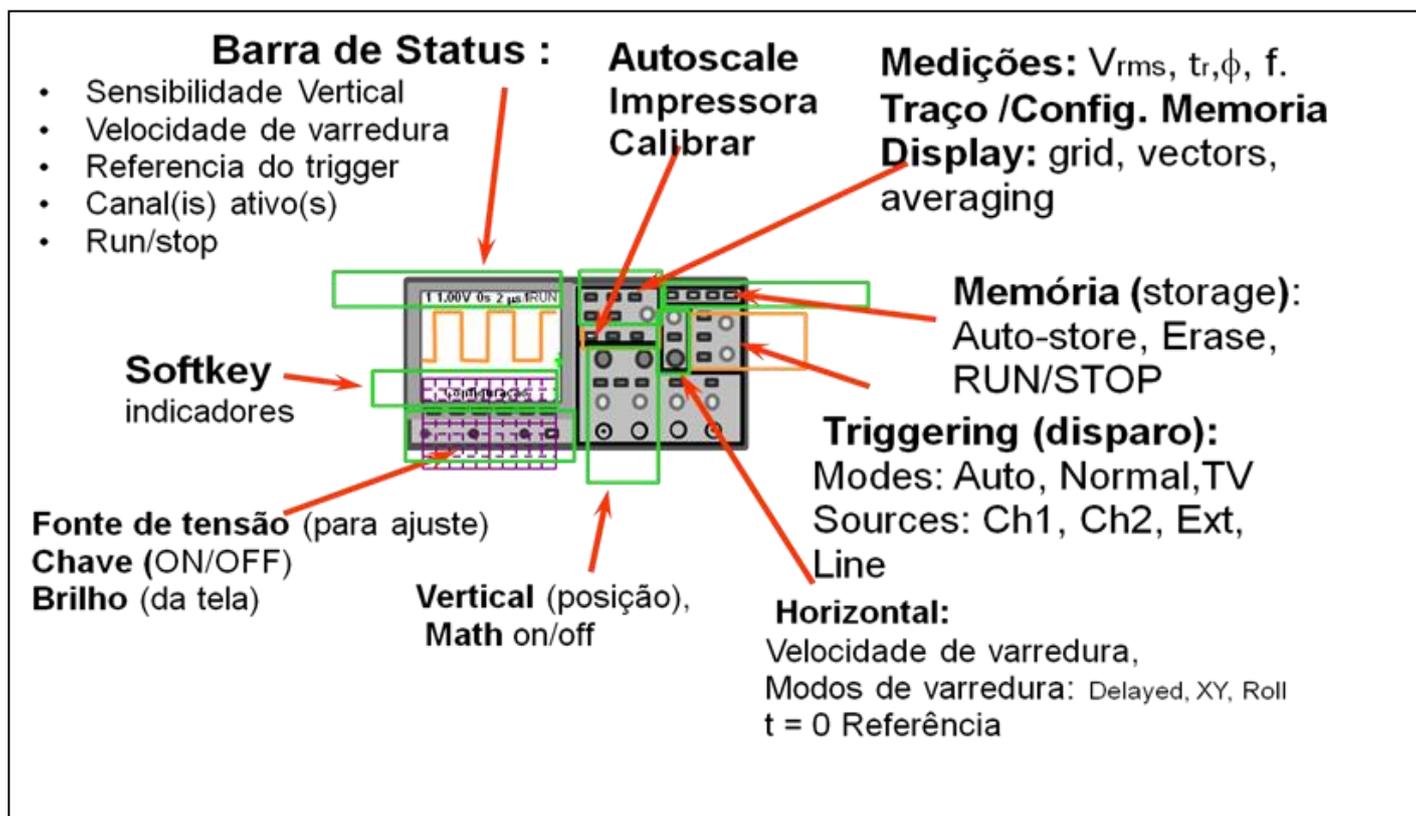
## Apêndice-H **COMO USAR OSCILOSCÓPIOS DIGITAIS**

Os osciloscópios atuais são digitais. Convertem o sinal analógico a ser medido para o formato digital e o apresenta na tela.

O osciloscópio comum tem 2 canais que permite a visualização de 2 sinais diferentes. É dotado dos seguintes controles:

- controle da amplitude vertical. Existem 2 controles independentes, sendo um para cada canal;
- controle horizontal (velocidade de varredura). É comum e afeta ambos canais simultaneamente;
- trigger ou controle do disparo da varredura.

Os principais controles e indicações que aparecem na tela do osciloscópio são mostrados na figura.



**Figura-1** – Principais controles do osciloscópio

### Aquisição de Sinais

Um problema comum que se observa quando estudantes utilizam o osciloscópio é o uso excessivo e inadequado da função “AUTOSET”. Essa função só deve ser usada quando, tendo conectado a fonte de sinal em um dos canais do osciloscópio, o sinal não aparecer na tela. AUTOSET não mostra, necessariamente, o sinal adequadamente na tela. Ele tenta encontrar a escala apropriada. Para tanto, tentará modificar o ajuste pré-existente. Portanto, pode acontecer dele levar a uma configuração inadequada.

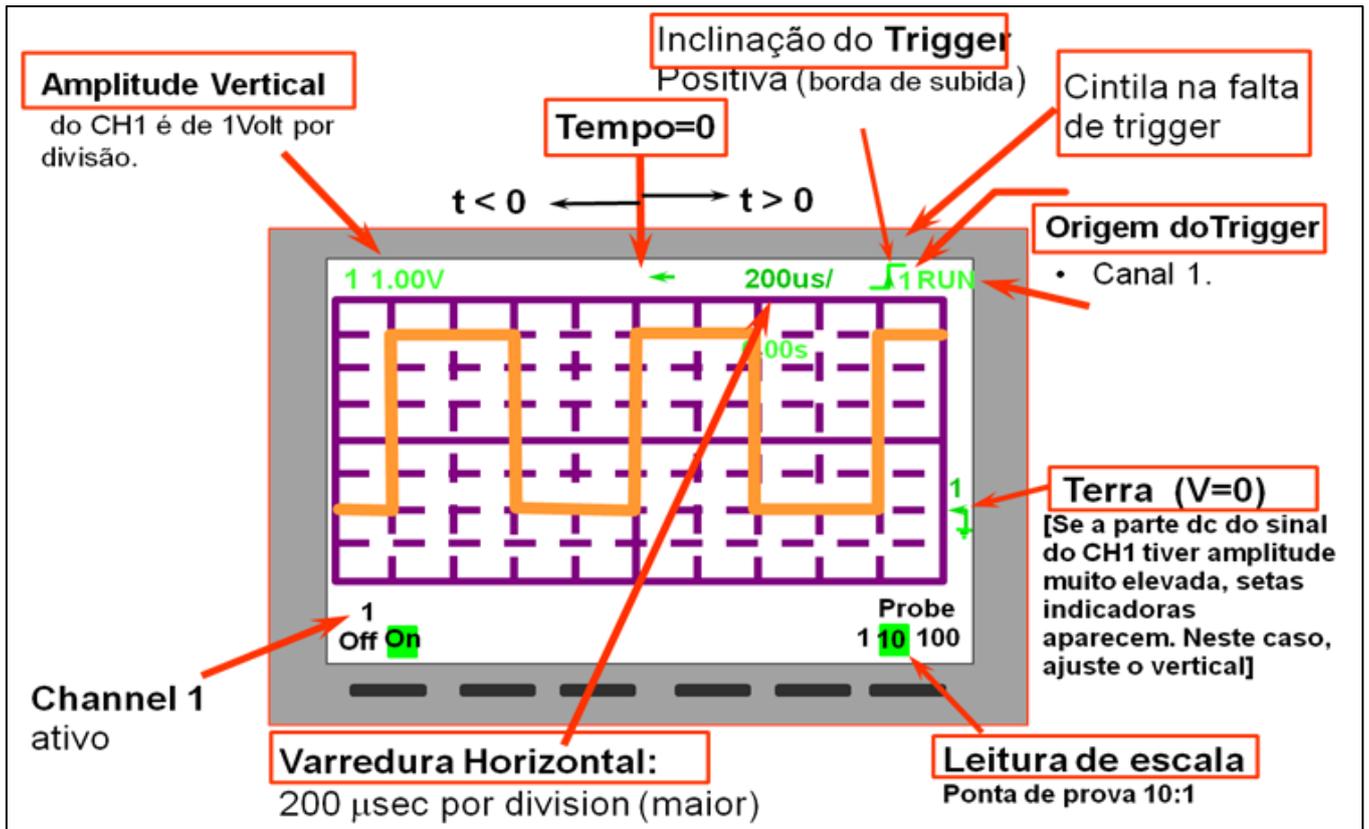


Figura- 2 Ajustes do osciloscópio

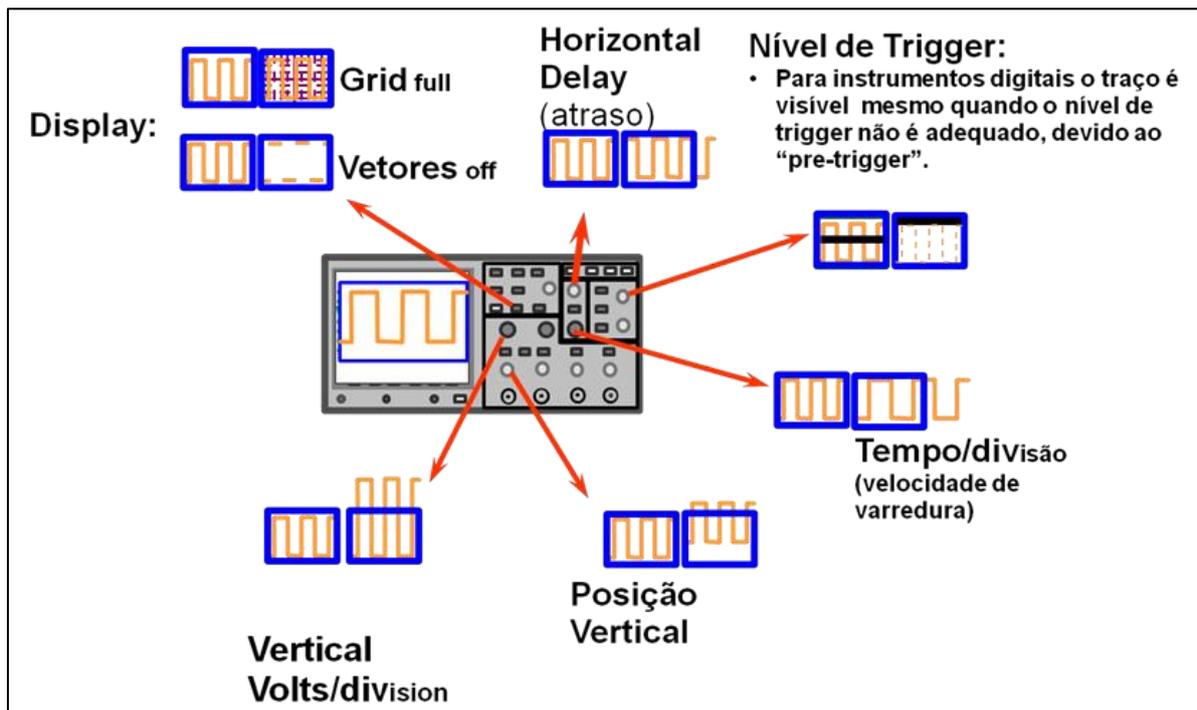


Figura- 3 Ajustes horizontal e vertical do osciloscópio

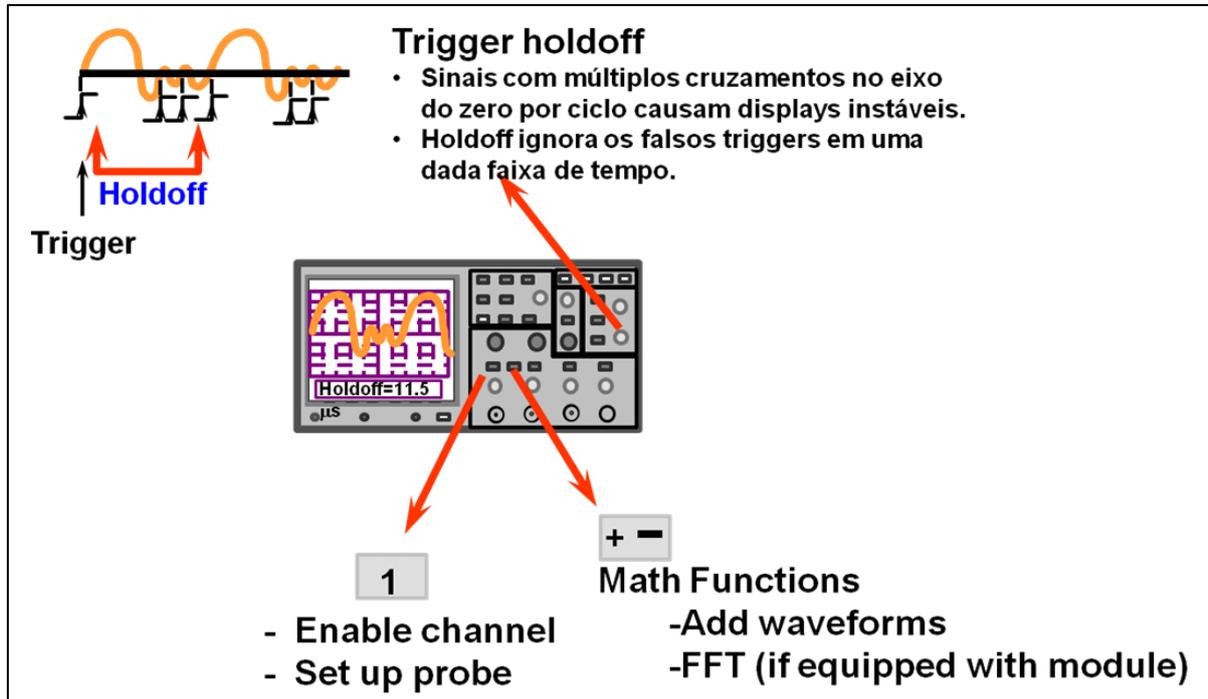


Figura – 4 Controle do trigger (disparo)