



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande - Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPE

AMPLIFICADOR *LOCK-IN* DIGITAL UTILIZANDO PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS E MATLAB

José E. O. Reges - jose_edenilson@yahoo.com.br

Laboratório de Dispositivos e Nanoestruturas

Departamento de Eletrônica e Sistemas

Universidade Federal de Pernambuco

Cid. Universitária, 50.670-000 - Recife - PE

Edval J. P. Santos - edval@ee.ufpe.br

Resumo: *O estudo de sinais e ruído envolve um enorme esforço na busca de técnicas eficazes de medição. O amplificador lock-in é uma dessas técnicas, fornecendo um nível CC proporcional à propriedade investigada. Ele pode ser usado para a caracterização de dispositivos. O objetivo deste trabalho é analisar a construção de um amplificador lock-in digital, utilizando uma placa de aquisição de dados e a ferramenta MATLAB. Com o MATLAB são implementados os vários blocos funcionais do amplificador lock-in: detector de fase, deslocamento de fase e um filtro passa-baixa. Isso abre a possibilidade de se utilizar técnicas mais avançadas de processamento digital de sinais, fazendo com que esse seja um excelente veículo para que o estudante de eletrônica possa aplicar diversos conceitos aprendidos no curso.*

Palavras-chave: Amplificador *lock-in*, Aquisição de dados, Processamento digital de sinais.

1. INTRODUÇÃO

A caracterização elétrica de um dispositivo consiste em submetê-lo a uma perturbação e analisar a resposta. Em geral, o sinal obtido em resposta está imerso em ruído e interferência, o que prejudica a análise. Por definição, um ruído é um sinal aleatório descrito de forma probabilística. Uma vez sobreposto ao sinal, o ruído pode modificar informações importantes na caracterização de algumas propriedades, dificultando uma análise mais detalhada e uma correta interpretação do fenômeno observado. O amplificador *lock-in* é um equipamento bastante útil na extração de sinais degradados por ruído e interferência.

Sistemas de aquisição de dados, técnicas de medição e análise de sinais são de fundamental importância no estudo de sistemas de controle e monitoramento, possuindo aplicações em diversas áreas, como por exemplo, na indústria, em biomedicina e pesquisas científicas. Portanto, o avanço científico e tecnológico deve ser acompanhado da busca por melhores soluções em instrumentação, destacando-se, então, o papel da engenharia na implementação de novas técnicas de medição.

O amplificador *lock-in* é utilizado na medição de sinais que estão efetivamente abaixo do nível de ruído. O conceito utilizado é o de estreitar a banda de frequência, de forma que o sinal se sobressaia ao ruído. O sinal de saída do amplificador *lock-in* é um sinal CC proporcional a um sinal CA sob investigação que, por sua vez, possui informações sobre as propriedades desejadas de um dispositivo sob teste.

O princípio fundamental de funcionamento de um amplificador *lock-in* se baseia na técnica da detecção de fase, que retifica apenas o sinal de interesse, suprimindo os efeitos indesejados devidos ao ruído. Um sinal senoidal com amplitude, frequência e fase ajustáveis é aplicado ao dispositivo sob teste. A resposta à excitação é então capturada e demodulada internamente pelo sinal de referência. Em seguida, um filtro passa-baixa separa a componente contínua proporcional à propriedade desejada.

A seguir serão discutidos os blocos que compõem um amplificador *lock-in* e realizada a formulação matemática que torna possível a sua implementação digital.

2. IMPLEMENTAÇÃO DO AMPLIFICADOR LOCK-IN DIGITAL

O diagrama em blocos do amplificador *lock-in* é apresentado na Figura 1.

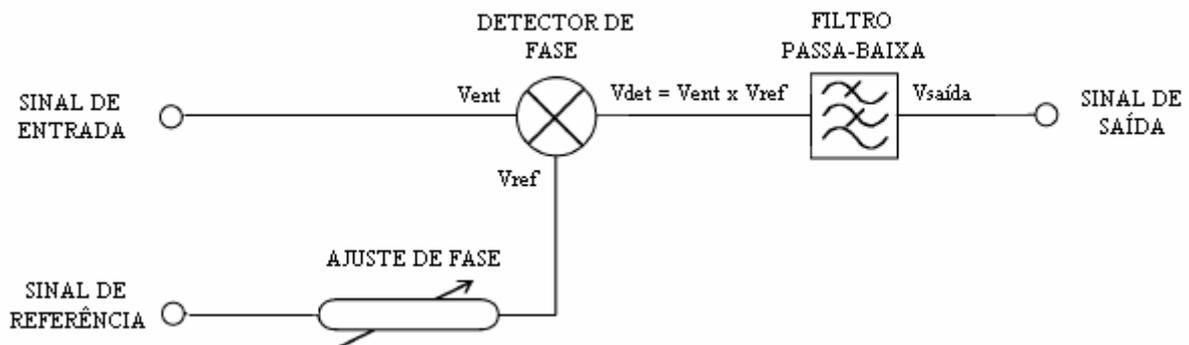


Figura 1 - Diagrama em blocos

2.1. Detecção de Fase

Como visto anteriormente, o detector de fase é a base de funcionamento do amplificador *lock-in*. Ele pode ser entendido como sendo um retificador especial. Retificadores tradicionais não distinguem sinal e ruído, produzindo erros devido às componentes indesejadas que são retificadas junto com o sinal de interesse. Num amplificador *lock-in*, entretanto, essas componentes não são retificadas, aparecendo apenas como uma flutuação CA que é eliminada por meio de um filtro passa-baixa.

As medições utilizando o amplificador *lock-in* são realizadas a uma frequência fixa. Daí a origem do termo "*lock-in*". Um sinal de frequência conhecida é aplicado a um dispositivo sob teste e a resposta à excitação (V_{ent}) é capturada por uma placa de aquisição de dados que faz a conversão do sinal analógico para digital. Um sinal de referência (V_{ref}), de mesma frequência, é gerado internamente, via software, e utilizado para demodular o sinal de entrada.

O detector de fase digital multiplica os dois sinais fornecendo um sinal retificado (V_{det}), cuja frequência é o dobro da frequência de referência, como descrito de forma simplificada abaixo.

$$V_{ent} = A \cos(\omega t) \quad (1)$$

$$V_{ref} = B \cos(\omega t + \theta) \quad (2)$$

$$V_{det} = AB \cos(\omega t) \cos(\omega t + \theta) = \frac{1}{2} AB \cos(\theta) + \frac{1}{2} AB \cos(2\omega t + \theta) \quad (3)$$

onde $\omega = 2 \pi f$ (frequência angular) e θ é a diferença de fase entre V_{ent} e V_{ref} .

Utilizando o MATLAB, dois vetores podem ser definidos de forma a armazenarem os sinais de entrada e de referência. Um terceiro vetor é utilizado para armazenar o sinal demodulado. O detector de fase digital pode ser modelado matematicamente, portanto, como uma operação de multiplicação de vetores. O algoritmo que implementa o detector de fase é apresentado a seguir.

% Função que implementa o detector de fase

```
function [Vdet] = Detector (Lockin);
```

```
% 1.1. Sinal de Referência
```

```
Vref = Lockin(:,2);
```

```
plot (Lockin(:,1),Vref(:,1));
```

```
xlabel ('Tempo (s)'), ylabel ('Vref (V)');
```

```
% 1.2. Sinal de Entrada
```

```
Vent = Lockin(:,3);
```

```
plot (Lockin(:,1),Vent(:,1));
```

```
xlabel ('Tempo (s)'), ylabel ('Vent (V)');
```

```
% 1.3. Multiplicador
```

```
Vdet = Vref .* Vent;
```

```
plot (Lockin(:,1),Vdet (:,1));
```

```
xlabel ('Tempo (s)'), ylabel ('Vdet (V)');
```

Um arquivo de texto “Lockin.txt” é utilizado para armazenar os valores do tempo de amostragem, V_{ref} e V_{ent} obtidos pela placa de aquisição de dados. No MATLAB, esses valores são armazenados em dois vetores que em seguida são multiplicados elemento a elemento. Finalmente, os gráficos de V_{ref} , V_{ent} e V_{det} são obtidos.

2.2. Filtro Passa-Baixa

Da equação (3) observa-se que o sinal CC na saída do detector de fase é composto por um nível constante e outro modulado ao dobro da frequência de referência. O nível constante é proporcional à amplitude do sinal de entrada e ao cosseno do ângulo de fase entre V_{ent} e V_{ref} . Utilizando um filtro passa-baixa na saída do demodulador pode-se separar o nível constante, livre de ruído, recuperando assim as propriedades do dispositivo sob investigação.

O nível constante é obtido calculando-se o valor médio de V_{det} . Uma vez que o sinal demodulado é discreto, o filtro passa-baixa consiste de uma simples média aritmética dos valores armazenados no vetor V_{det} , o que é de fácil implementação computacional como ilustrado abaixo.

% Função que implementa o filtro passa-baixa

```
function [Vsaida] = Filtro (Lockin, Vdet);
```

```
Vsaida = mean (Vdet(:,1));
```

```
plot (Lockin (:,1), Vsaida);
```

```
xlabel ('Tempo (s)'), ylabel ('Vsaida (V)');
```

O sinal de saída constante é o valor médio dos elementos do vetor que contém o sinal demodulado.

O nível médio do sinal depende da diferença de fase entre o sinal de entrada e o sinal de referência. Portanto, a fase de referência pode ser ajustada de acordo com a propriedade que se deseja medir.

2.3. Algoritmo em linguagem MATLAB

A seguir encontra-se o algoritmo que implementa um amplificador *lock-in* digital em linguagem MATLAB.

```
% Amplificador Lock-in Digital utilizando Placa de Aquisição de Dados e MATLAB
```

```
load Lockin.txt;
```

```
Vdet = Detector (Lockin);
```

```
Vsaida = Filtro (Lockin, Vdet);
```

3. RESULTADOS E ANÁLISE

Utilizando o algoritmo implementado em linguagem MATLAB e simulando a resposta de entrada foram obtidos os resultados mostrados abaixo.

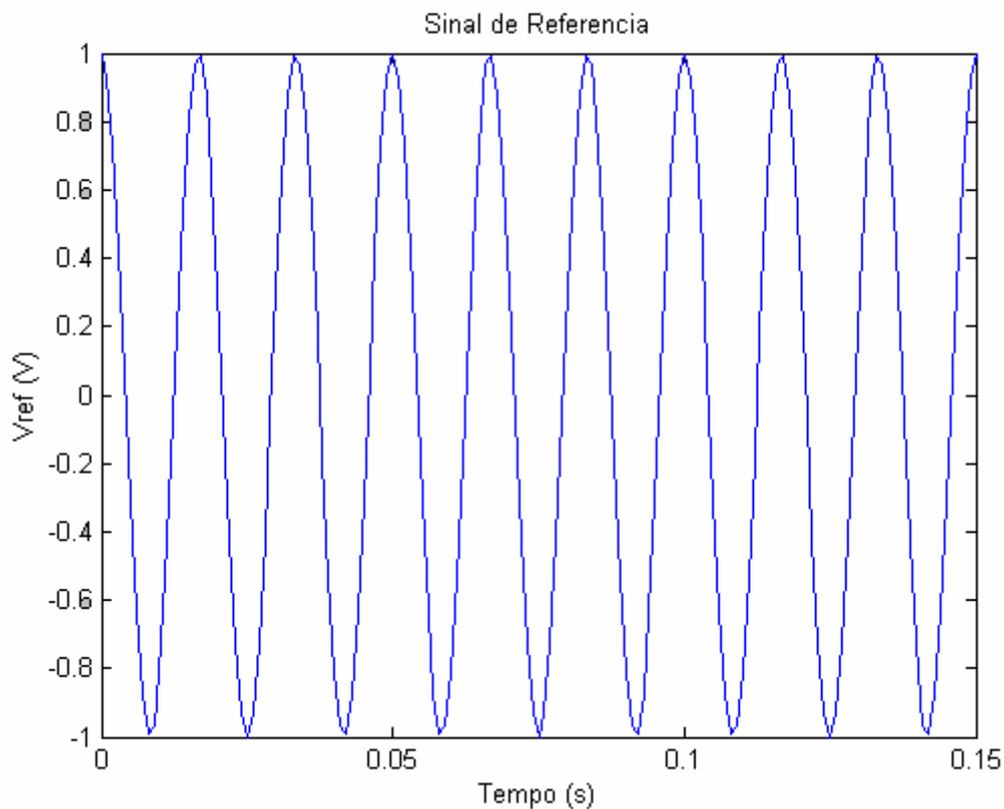


Figura 2 – Sinal de Referência

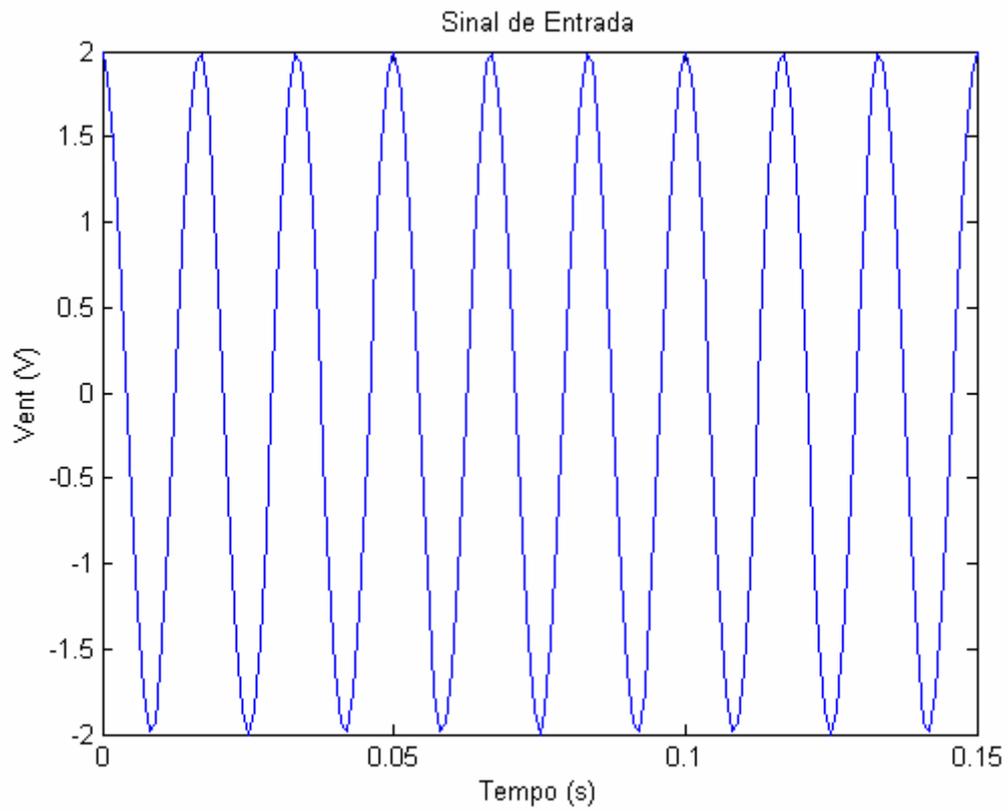


Figura 3 – Sinal de Entrada

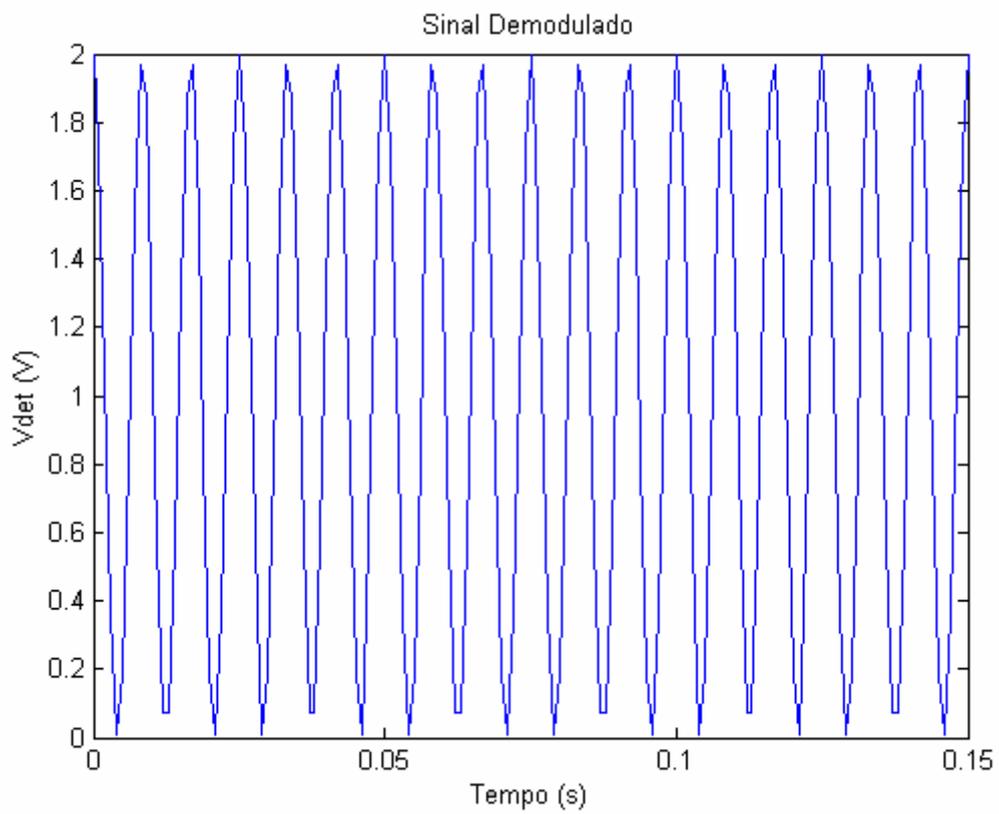


Figura 4 – Sinal Demodulado

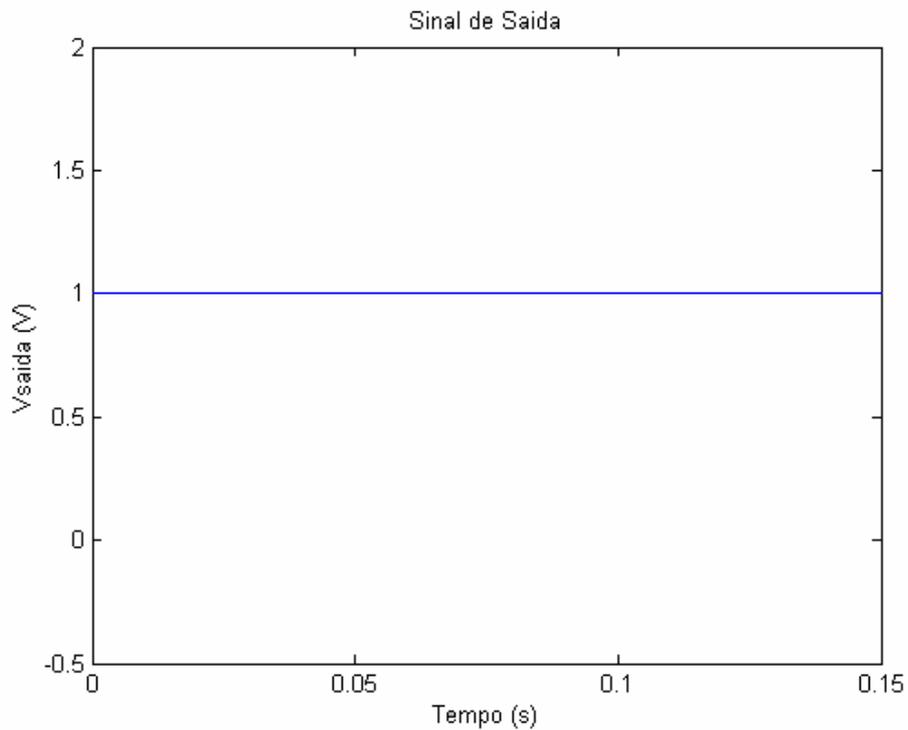


Figura 5 – Sinal de Saída

O sinal de saída é constante e proporcional à propriedade sob investigação. Portanto, através de $V_{saída}$ pode-se determinar algumas características de um dispositivo em experimentação. Por exemplo, supondo que o dispositivo sob teste é uma condutância $G(\omega, V)$, obtém-se uma relação linear entre $V_{saída}$ e $G(\omega, V)$.

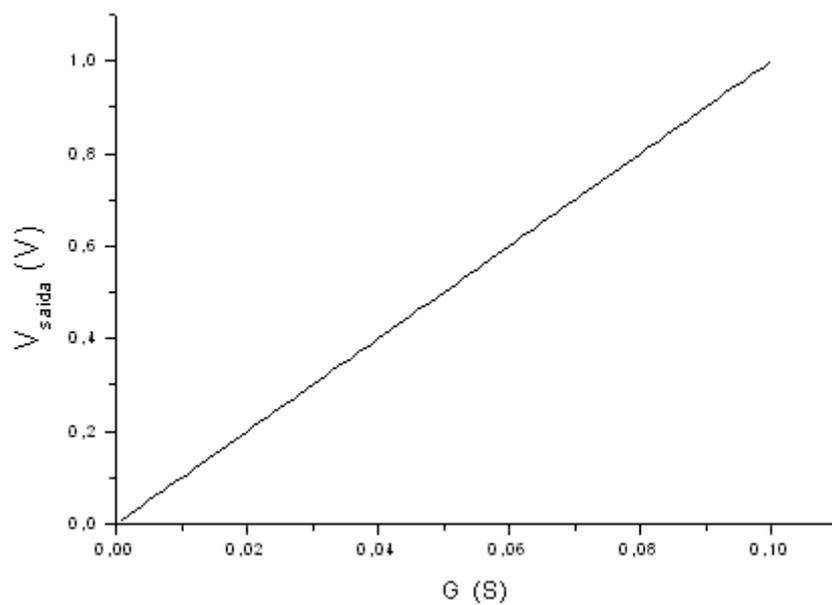


Figura 6 - $V_{saída}$ (V) x G (S).

4. APLICAÇÕES

4.1. Medição de Capacitância

A caracterização das propriedades de alguns materiais é de grande importância em diversos processos. Por exemplo, pode ser necessário determinar-se a capacitância de um dispositivo sob investigação. Um amplificador *lock-in* digital pode então ser utilizado, conforme discutido a seguir.

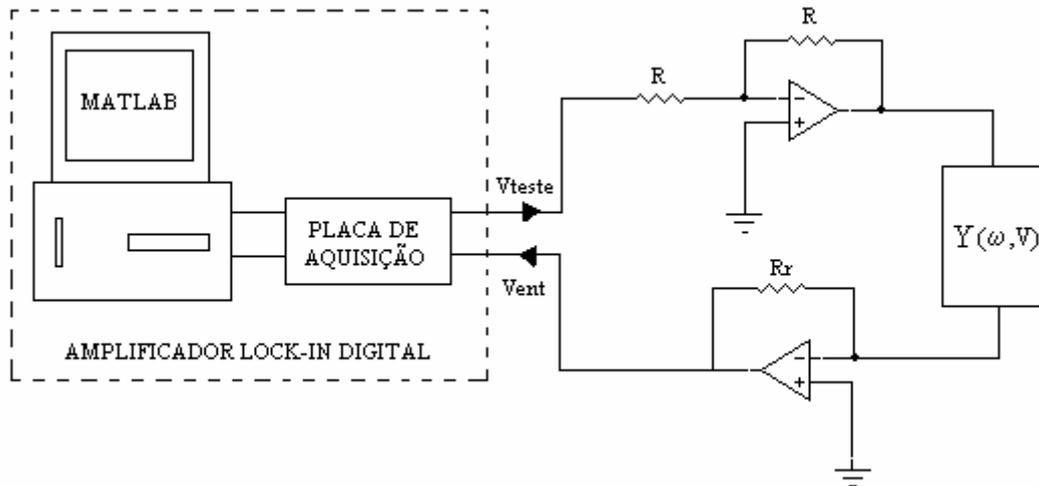


Figura 7 – Circuito utilizado para medição de capacitância

Considerando-se que o dispositivo sob teste (DST) da Figura 7 é uma admitância $Y(\omega, V)$ e aplicando-se um sinal V_{teste} cuja amplitude, frequência e fase são ajustadas pelo experimentador, obtém-se um sinal V_{ent} , conforme ilustrado a seguir:

$$Y(\omega, V) = G(\omega, V) + j\omega C(\omega, V) \quad (4)$$

$$V_{teste} = V_g e^{j(\omega t + \phi)} \quad (5)$$

$$V_{ent} = R_r Y(\omega, V) (V_g e^{j(\omega t - \theta)}) \quad (6)$$

onde θ é a fase do sinal após passar pelo circuito externo.

$$V_{ent} = R_r V_g [G(\omega, V) \cos(\omega t - \theta) - \omega C(\omega, V) \text{sen}(\omega t - \theta)] \quad (7)$$

Multiplicando-se V_{ent} e V_{teste} :

$$V_{det} = R_r V_g^2 [G(\omega, V) \cos(\omega t - \theta) - \omega C(\omega, V) \text{sen}(\omega t - \theta)] \cos(\omega t + \phi) \quad (8)$$

Utilizando algumas relações trigonométricas obtém-se:

$$\cos(\omega t - \theta) \cos(\omega t + \phi) = \frac{1}{2} [\cos(\theta + \phi)] + \frac{1}{2} \cos 2\omega t [\cos(\theta - \phi)] + \frac{1}{2} \text{sen} 2\omega t [\text{sen}(\theta - \phi)] \quad (9)$$

$$\text{sen}(\omega t - \theta) \cos(\omega t + \phi) = -\frac{1}{2} [\text{sen}(\theta + \phi)] + \frac{1}{2} \text{sen} 2\omega t [\cos(\theta - \phi)] + \frac{1}{2} \cos 2\omega t [\text{sen}(\phi - \theta)] \quad (10)$$

Após passar pelo filtro passa-baixa (cálculo do valor médio) as componentes moduladas ao dobro da frequência de referência são eliminadas e o sinal de saída é:

$$V_{saída} = \frac{1}{2} R_r V_g^2 [G(\omega, V) \cos(\phi + \theta) + \omega C \text{sen}(\phi + \theta)] \quad (11)$$

A fase do sinal de teste pode então ser ajustada de modo a selecionar condutância ou capacitância.

4.2. Tomografia por impedância elétrica

Tomografia por impedância elétrica é uma técnica de reconstrução de imagens com aplicações na medicina, na indústria petroquímica, em mineralogia e fluxometria em dutos, entre outros. Esta técnica se baseia no princípio de que materiais diferentes possuem propriedades elétricas diferentes. Através da determinação dessas propriedades pode-se reconstruir a imagem da seção em estudo sem a necessidade de contato direto com o material analisado.

A técnica de medição consiste em aplicar uma pequena corrente CA em um par de eletrodos e medir o potencial gerado em cada par de eletrodos adjacentes. Os potenciais medidos são utilizados para obter a condutividade em cada área em estudo. Partindo do conhecimento da condutividade de diversos materiais, pode-se então reconstruir a imagem do sistema.

O amplificador *lock-in* digital pode ser utilizado para medir os potenciais obtidos, imunizando as informações da presença de ruído e em seguida fornecer esses dados a algum software que implemente o algoritmo de reconstrução de imagens.

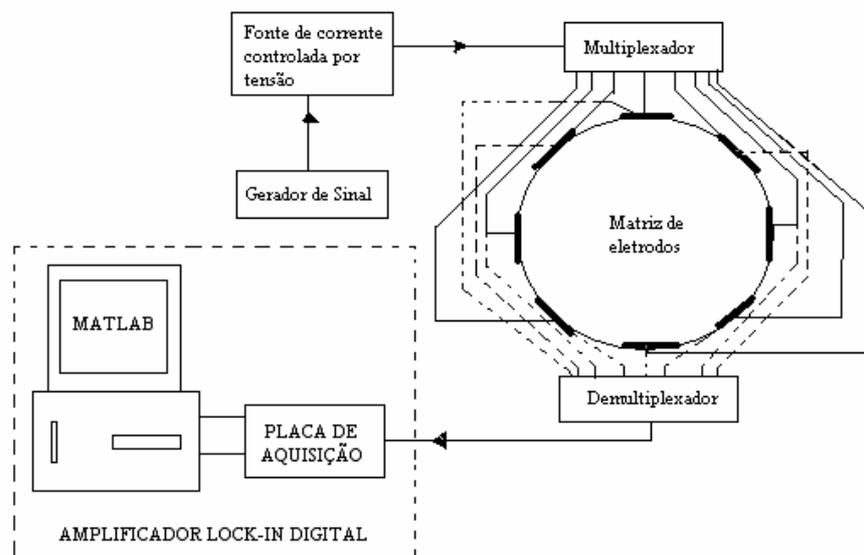


Figura 8 - Diagrama de um equipamento de tomografia por impedância elétrica

4.3. Análise de Espectro

Utilizando o amplificador *lock-in* digital, os conhecimentos em processamento digital de sinais podem ser aplicados para realizar diversas análises num sinal sob investigação, entre elas a análise espectral. É necessário, porém, converter-se o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Isto é obtido através da transformada de Fourier:

$$F(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (12)$$

Uma vez realizada a análise pode-se converter o sinal do domínio da frequência para o domínio do tempo usando a transformada inversa de Fourier:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(j\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (13)$$

Como o processo de aquisição de dados fornece um sinal digitalizado, deve-se utilizar a transformada discreta de Fourier. Diversos algoritmos realizam a transformada discreta de Fourier de forma rápida e são encontrados em ambientes computacionais como o MATLAB. Entre esses algoritmos está a FFT (Fast Fourier Transform).

Após aplicar a transformada de Fourier, pode-se obter um espectro de frequências e a partir dele processar digitalmente o sinal. Um filtro digital pode então ser implementado, por exemplo, eliminando componentes de frequências indesejadas e, conseqüentemente, reduzindo o ruído. Uma vez que o sinal é tratado digitalmente, pode-se aplicar a transformada rápida inversa de Fourier (IFFT), recuperando o sinal no domínio do tempo, livre de ruído.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da simples formulação matemática, o amplificador *lock-in* apresenta resultados satisfatórios na medição de sinais. Implementado digitalmente, o amplificador *lock-in* consiste numa ferramenta muito útil na recuperação de sinais imersos em ruído e no processamento de sinais relativamente limpos. A técnica de detecção de fase, modelada como uma operação de multiplicação de vetores e o filtro passa-baixa, consistindo no cálculo do valor médio são de fácil implementação e utilizados para estreitar a banda de frequência até que o sinal se sobressaia ao ruído. O sinal médio livre de ruído é utilizado para recuperar as propriedades do dispositivo sob teste. O sistema sob investigação pode ser supervisionado por computador, o que facilita a caracterização de suas propriedades devido aos recursos numéricos utilizados no processamento digital de sinais.

O estudo realizado durante a implementação do amplificador *lock-in* digital utilizando placa de aquisição de dados e MATLAB mostrou-se importante e motivador em virtude da possibilidade de aplicação dos conceitos teóricos obtidos no curso de engenharia eletrônica. Uma vez que estes conceitos são empregados na prática, abre-se a perspectiva de extensão do conhecimento, em especial nas áreas de interface analógico-digital, projeto de sistemas digitais e processamento digital de sinais, contribuindo, portanto, para um melhor aprendizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHEN, C. H. **Signal Processing Handbook**. New York: Marcel Dekker, 1988.
- DAVIES, E. R. **Electronics Noise and Signal Recovery**. Academic Press, 1993.
- IFEACHOR, E. C. ; JERVIS, B. W. **Digital Signal Processing – A Practical Approach**. Addison-Wesley, 1993.
- MCCLELLAN, J. H. ; BURRUS, J. C ; et all. **Computer-Based Exercises for Signal Processing using MATLAB 5**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

DIGITAL LOCK-IN AMPLIFIER USING A DATA ACQUISITION BOARD AND MATLAB

***Abstract:** The study of signals and noise requires a huge effort in searching efficient measurement techniques. The lock-in amplifier is one such technique. The output signal is a DC level proportional to the investigated quantity. It may be used in device characterization. The goal of this work is to analyze and build a digital lock-in amplifier, using a data acquisition board and the MATLAB software tool. With MATLAB, the various functional blocks of the lock-in amplifier are implemented, such as: phase detector, phase shifter and low-pass filter. This opens the possibility of using more advanced digital signal processing techniques. This makes such project an excellent venue for the electronics student to apply many concepts he has studied.*

Keywords: Lock-in amplifier, Data acquisition, Digital signal processing.