



## OBTENÇÃO DA RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DE CIRCUITOS ELÉTRICOS UTILIZANDO UM VARREDOR DE FREQUÊNCIA

**Resumo:** Nesse trabalho foi montado um varredor de frequência (sweeper) para obtenção da resposta em frequência de diferentes circuitos. Foi utilizado o circuito integrado XR2206 que possui um Oscilador Controlado por Tensão (VCO). Para variar a frequência do sinal gerado pelo XR2206 foi utilizado um Arduino Nano e um conversor D/A de quatro bits. Esse sinal é uma onda senoidal de amplitude ajustável somada a uma componente constante indesejável de aproximadamente 5,6 V. Para remover essa componente foram testados vários circuitos; por fim optou-se por utilizar um filtro passa alta RC na saída do CI. Para obter a amplitude dos sinais de entrada e saída para diferentes frequências foi utilizado um circuito detector de pico. Por fim, foi testada a resposta em frequência para a amplitude em dois diferentes circuitos: Filtro Passa Alta e Filtro Passa Baixa. Os resultados mostram boa concordância entre os valores teóricos e medidos.

**Palavras-chave:** Varredor de frequência, Resposta em frequência, Filtros elétricos, Detector de pico.

### 1. INTRODUÇÃO

Para obter a resposta em frequência de diferentes circuitos foi montado um sweeper que trabalha na faixa de 30 Hz a 45 kHz. Foi utilizado o CI XR2206 que possui um VCO.

O projeto consiste em variar a frequência do sinal senoidal do XR2206 e aplicá-lo num circuito qualquer para obter a resposta em frequência desse circuito. Inicialmente pensou-se em utilizar um microcontrolador Arduino Nano para amostrar os sinais de entrada e saída. Entretanto, essa possibilidade foi descartada devido à baixa frequência de amostragem do Arduino, apenas 9615 Hz. A solução foi utilizar dois circuitos detectores de pico para medir a amplitude dos sinais e salvar esses valores no Arduino.

Outro desafio encontrado foi uma componente DC indesejável de aproximadamente 5,6 V somada ao sinal senoidal do XR2206. A solução encontrada, usando um filtro RC, limita um pouco o número de circuitos que podem ser testados com o sweeper.

### 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O CI XR-2206 foi utilizado para gerar a onda senoidal do sweeper. A Equação (1)

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção





foi simplificada a partir de equação encontrada no datasheet do XR2206 e relaciona a frequência de saída da onda com a tensão de entrada:

$$f = \frac{1}{RC} \cdot \left(2 - \frac{V_C}{3}\right) \quad (1)$$

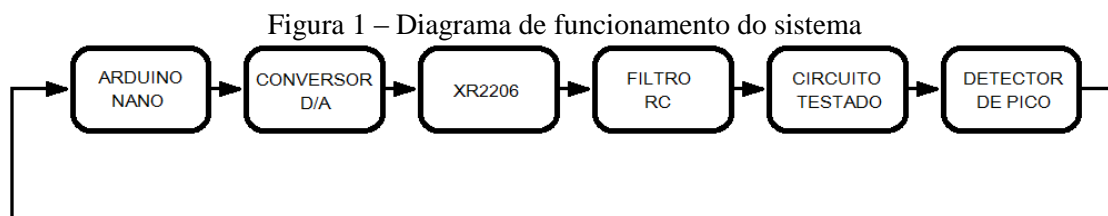
Onde  $f$  é a frequência da onda,  $V_C$  é a tensão que controla a frequência do VCO,  $C$  é um capacitor de temporização e  $R$  é o valor de dois resistores utilizados para controlar a faixa de frequência do sweeper.

Pela Equação (1) tem-se que a frequência de saída será zero quando  $V_C = 6 V$  e tem-se que  $f = 2/RC$  quando  $V_C = 0 V$ . Com o objetivo de trabalhar numa faixa de frequência entre 0 Hz e 51 kHz, os valores escolhidos dos componentes foram  $R = 39 \text{ k}\Omega$  e  $C = 1 \text{ nF}$ .

Após a montagem do circuito foi observado que a frequência da onda não chega a 0 Hz, mas se aproxima de 30 Hz quando  $V_C = 6 V$ . Quando  $V_C = 0 V$  a frequência da onda chega a 45 kHz. Esse erro foi atribuído a tolerância dos componentes: 10% para o capacitor e 5% para os resistores. Apesar dessa diferença, foi observado experimentalmente que a característica linear da Equação (2) é válida.

### 3. CIRCUITOS COMPONENTES DO SISTEMA

A Figura 1 mostra o funcionamento do sistema.



Bloco 1: O Arduino Nano controla os bits do conversor D/A. São quatro bits e o programa inicia com todos os bits em estado ALTO (1111) que corresponde a frequência de 30 Hz decrementando um bit por segundo até que todos os bits estejam em estado BAIXO (0000) que corresponde a frequência de 45 kHz.

Bloco 2: O conversor D/A converte os bits de entrada na tensão  $V_C$ .

Bloco 3: O XR2206 fornece um sinal de saída cuja frequência depende do valor da tensão  $V_C$ . Esse sinal possui uma componente DC indesejável de 5,6 V.

Bloco 4: O filtro RC passa alta remove a componente DC do sinal.

Bloco 5: O sinal é aplicado no circuito cuja resposta em frequência deve ser obtida.

Bloco 6: Dois detectores de pico medem a amplitude dos sinais de entrada e saída do circuito testado. Esses valores são passados para o Arduino que calcula o ganho.

#### 3.1. Conversor D/A de quatro bits

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção



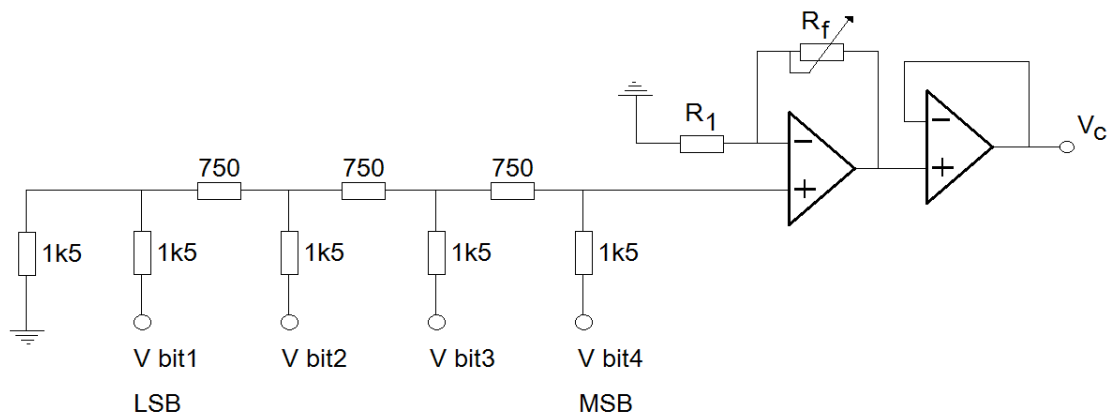


Um conversor Digital-Analógico de 4 bits foi utilizado para gerar a tensão  $V_C$ . A topologia utilizada para a montagem desse conversor foi uma rede R-2R. A Equação (2) (TOCCI, 2000) mostra a tensão de saída para esse conversor:

$$V_C = V_{bit4} \frac{1}{2} + V_{bit3} \frac{1}{4} + V_{bit2} \frac{1}{8} + V_{bit1} \frac{1}{16} \quad (2)$$

Os bits do conversor são saídas digitais do Arduino Nano. Sabendo que a tensão de estado ALTO do Arduino é 5 V, pela Equação (2), tem-se que a tensão  $V_C$  máxima é aproximadamente 4,7 V. Porém, conforme tratado anteriormente, é desejado que  $V_C$  chegue a 6 V. Para aumentar a tensão foi utilizado um circuito amplificador não inversor seguido de um buffer para isolar a tensão. A Figura 2 mostra o conversor D/A com amplificador e buffer:

Figura 2 – Conversor D/A com saída amplificada e buffer.



Fonte: (AUTOR, 2017).

### 3.2. Filtro passa baixa para eliminação da componente DC

Foi obtida, na saída do XR-2206, uma onda senoidal de amplitude ajustável com valor médio de 5,6 V. A Figura 3 mostra o sinal num osciloscópio:

Organização

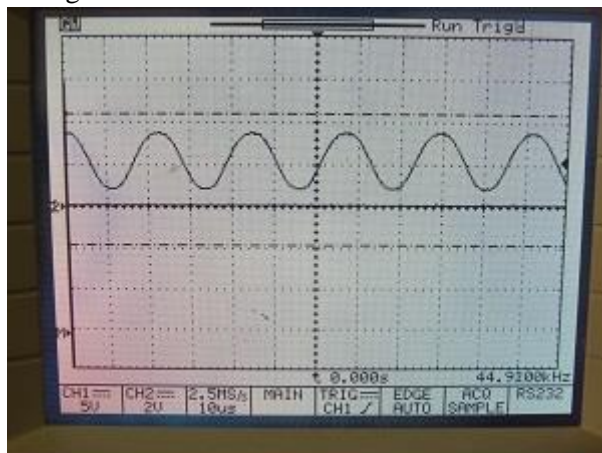


Promoção





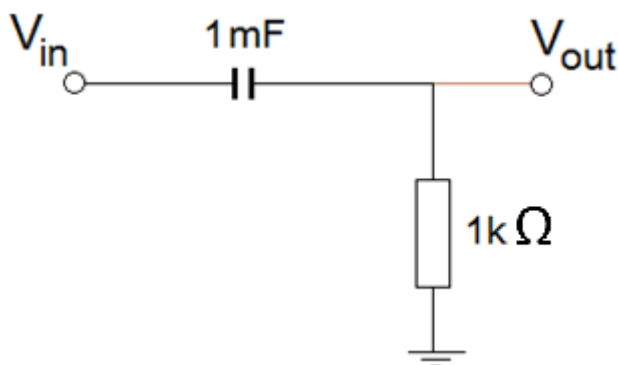
Figura 3 – Sinal obtido na saída do XR-2206.



Fonte: (AUTOR, 2017).

A componente constante de 5,6 V é inconveniente pois insere uma tensão DC no circuito a ser testado. Para solucionar esse problema foi utilizado um circuito RC (filtro passa alta), mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Filtro PA utilizado para retirar a componente constante do sinal de saída do XR-2206.



Fonte: (AUTOR, 2017).

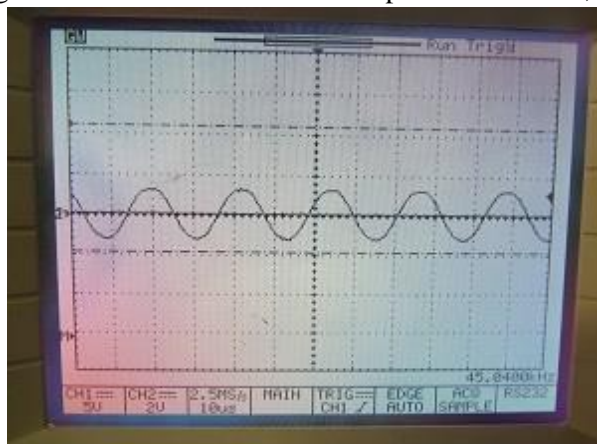
A função de transferência desse circuito é dada na Equação (3):

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{s}{s + 1} \quad (3)$$

A frequência de corte desse filtro é de 0,16 Hz e foi considerada satisfatória para a aplicação uma vez que a frequência mínima gerada será de 30 Hz. A Figura 5 mostra a onda já filtrada.



Figura 5 – Onda filtrada sem a componente DC de 5,6 V.

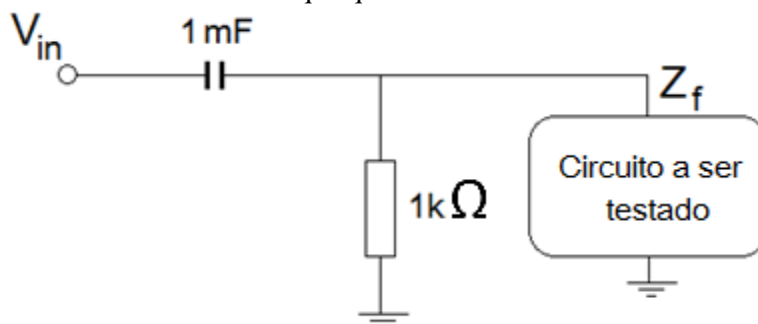


Fonte: (AUTOR, 2017).

### ***Interferência do circuito a ser testado na frequência de corte***

A utilização desse filtro passa alta traz um problema: a tensão de saída mostrada na Figura 5 deve ser aplicada no circuito a ser testado pelo sweeper que possui uma impedância de entrada  $Z_f$  em paralelo com o resistor de  $1\text{ k}\Omega$ , conforme mostra a Figura 6:

Figura 6 – Sinal de saída do filtro PA conectado num circuito qualquer a ser testado.



Fonte: (AUTOR, 2017).

Nesse caso a impedância em série com o capacitor não é apenas o resistor de  $1\text{ k}\Omega$ , mas sim uma impedância  $Z_{eq}$  equivalente ao resistor em paralelo com a impedância  $Z_f$ :

$$Z_{eq} = \frac{1 \cdot 10^3 \cdot Z_f}{1 \cdot 10^3 + Z_f}$$

Analisando a equação acima, observa-se que quanto maior o valor de  $Z_f$ , mais próxima a impedância equivalente  $Z_{eq}$  estará de  $1\text{ k}\Omega$ . Pode-se escrever que no limite, para  $Z_f \rightarrow \infty$ ;  $Z_{eq} \rightarrow 1\text{ k}\Omega$ .

Isso quer dizer que quanto maior for a impedância de entrada do circuito a ser

Organização

Promoção



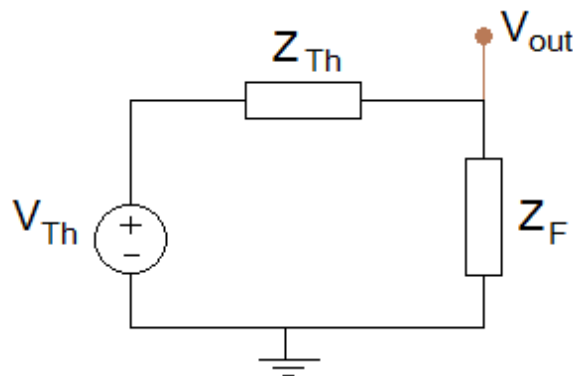
testado, menor será a interferência causada por esse filtro na frequência de corte. A análise a seguir estabelece algumas limitações para o circuito a ser testado. Aplicando o Teorema de Thévenin no circuito da Figura 6, pode-se obter um circuito equivalente onde:

$$Z_{Th} = \frac{R \cdot \frac{1}{sC}}{R + \frac{1}{sC}} = \frac{\frac{R}{sC}}{\frac{sRC + 1}{sC}} = \frac{R}{sRC + 1} = \frac{1}{sC + \frac{1}{R}} = \left(\frac{1}{C}\right) \frac{1}{s + \frac{1}{RC}}$$

$$V_{Th} = V_{in} \cdot \left(\frac{R}{R + \frac{1}{sC}}\right) = V_{in} \cdot \left(\frac{s}{s + \frac{1}{RC}}\right)$$

A Figura 7 mostra o circuito equivalente:

Figura 7 – Circuito Thévenin equivalente.



Fonte: (AUTOR, 2017).

Com a análise desse circuito foi obtida a seguinte função de transferência:

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \left(\frac{s}{s + 1 + \frac{1000}{Z_f}}\right) \quad (4)$$

Como as medições são iniciadas na frequência de 30 Hz, tem-se que essa deve ser a frequência de corte máxima para que a resposta em frequência do filtro seja obtida satisfatoriamente. Portanto, na frequência de 30 Hz deve ser satisfeita a condição:

$$\left| \frac{2\pi \cdot 30 \cdot j}{2\pi \cdot 30 \cdot j + 1 + \frac{1000}{Z_f(30)}} \right| \geq 0,707$$





Em que  $0,707$  é o ganho para a frequência de corte e  $Z_f(30)$  é a impedância de entrada do filtro na frequência de 30 Hz. Simplificando, tem-se:

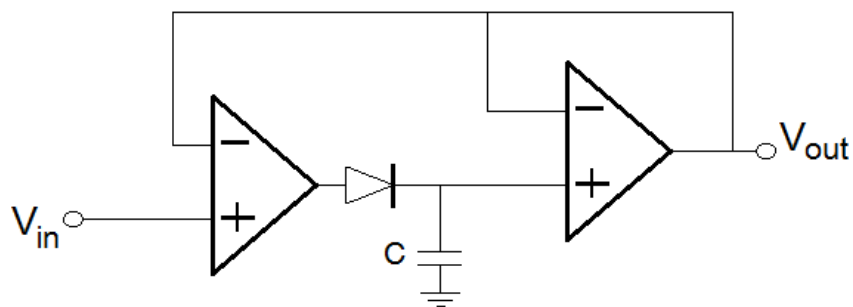
$$\left| 188,5j + 1 + \frac{1000}{Z_f(30)} \right| \geq 266,573 \quad (5)$$

Se o filtro não satisfizer a Equação (5) ele não deve ser testado com esse equipamento pois a amplitude do sinal de entrada será atenuada.

### 3.3. Detector de pico

O circuito detector de pico mostrado na Figura 8 foi utilizado para reter as tensões de entrada e saída nas diferentes frequências.

Figura 8 – Circuito detector de pico.



Fonte: (AUTOR, 2017).

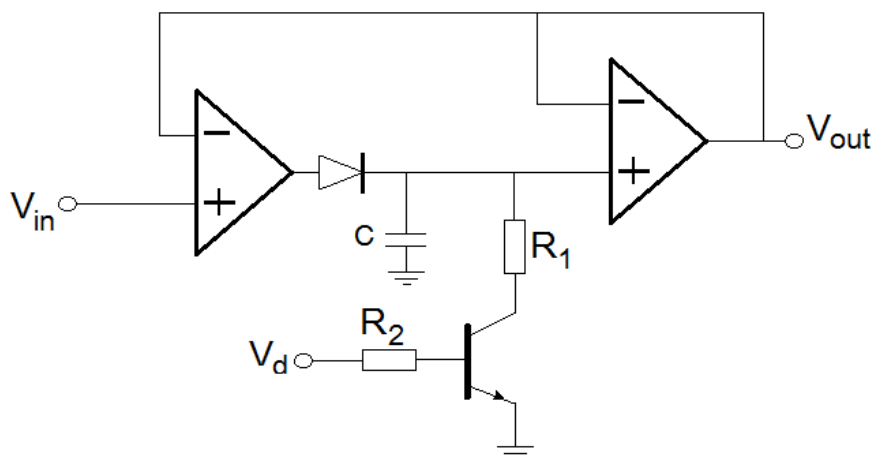
Esse circuito funciona da seguinte maneira: o sinal de entrada carrega o capacitor e o diodo impede que o capacitor seja descarregado; à medida que a tensão de entrada aumenta o capacitor é carregado até chegar naquela tensão, se a tensão de entrada diminuir, a tensão no capacitor não diminui devido ao diodo que impede a sua descarga (SCHWEBER, 2013).

Uma limitação encontrada na utilização desse circuito é o fato de que o capacitor não se descarrega. No caso da aplicação para o sweeper, é necessário descarregá-lo a cada alteração de frequência.

Para realizar a descarga do capacitor a cada incremento de frequência foi utilizado um transistor conforme mostra a Figura 9:



Figura 9 – Detector de pico com transistor para descarregar o capacitor.



Fonte: (AUTOR, 2017).

Sempre que for necessário descarregar o capacitor basta ativar o transistor aplicando uma tensão de 5 V em  $V_d$ .

Foi utilizada uma saída digital do Arduino como tensão  $V_d$ , que é colocada em nível ALTO após cada alteração de frequência de modo a resetar o circuito detector de pico.

#### 4. TESTES REALIZADOS

Para testar o sweeper foram usados dois circuitos básicos: um filtro passa baixa RC e um filtro passa alta RC. Os testes foram realizados da seguinte maneira:

- 1- Conectou-se o sinal senoidal variando a frequência de 30 Hz até 45 kHz.
- 2- Executou-se o programa no Arduino Nano que incrementa à frequência inicial 3 kHz a cada segundo.
- 3- Para cada frequência foi medida a amplitude do sinal de entrada e do sinal de saída através de duas portas analógicas do Arduino Nano.
- 4- O programa calculou o ganho do circuito para cada frequência.

#### 5. RESULTADOS

Os gráficos apresentados a seguir foram montados no MATLAB e apresentam a comparação entre os valores de ganho medidos nos testes e os valores teóricos desse ganho. O ganho é apresentado em decibéis e a frequência em hertz. O eixo x dos gráficos está em escala logarítmica. O traçado em azul representa o ganho teórico e os pontos laranjas são os valores de ganho medidos.

Organização



Promoção







Figura 11 – Ganho teórico e ganho medido do filtro passa alta.

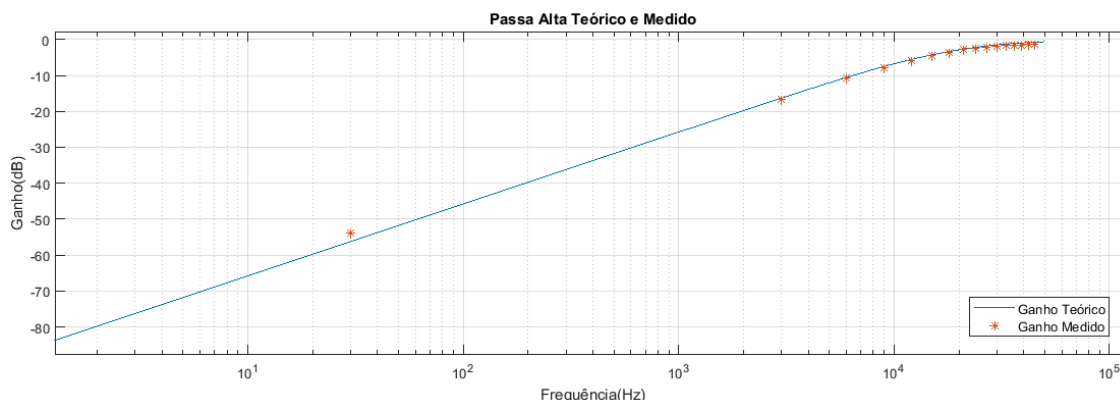
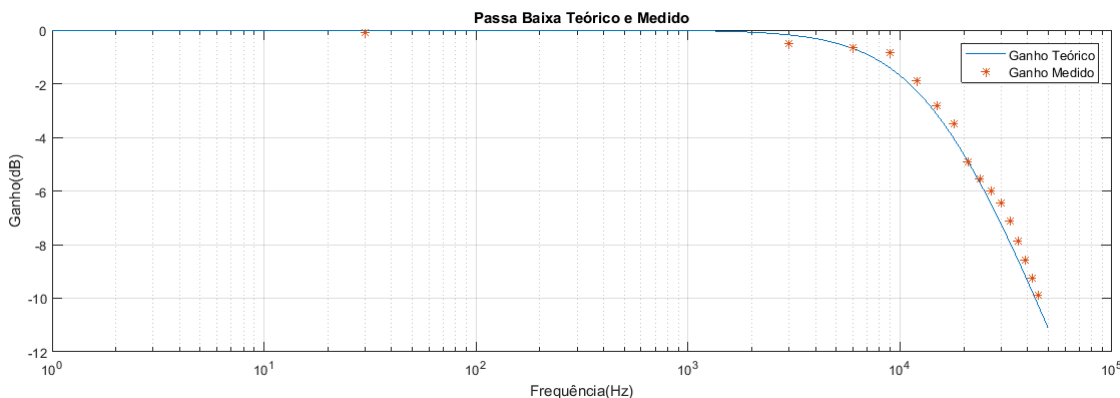


Figura 12 – Ganho teórico e ganho medido do filtro passa baixa.



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados mostram boa concordância entre os valores teóricos e medidos de modo que o erro da maioria das amostras fica em torno de 5%. Na Figura 11 o ganho medido em 30 Hz apresenta um erro maior do que nas outras frequências, isso pode ser explicado devido ao fato do sinal medido nessa frequência ter amplitude muito pequena de modo que o ruído presente no circuito causa grande interferência.

Os valores teóricos de ganho foram calculados considerando os valores nominais dos capacitores e dos resistores. Sabendo-se que esses componentes, principalmente os capacitores, possuem grandes desvios em relação ao valor nominal, essa diferença pode ser considerada como outra fonte de erros.

Foi constatado que o sweeper apresenta bom desempenho para a obtenção da resposta em frequência do ganho em circuitos passivos. Pode ser aplicado em uma grande variedade de circuitos, contanto que a Equação (5) seja satisfeita.

Organização



**UDESC**  
UNIVERSIDADE  
DO ESTADO DE  
SANTA CATARINA



Promoção





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

TOCCI, R.J; WIDMER, N.S. Sistemas Digitais: Princípios e Aplicações. 7ª ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2000, p. 396.

SCHWEBER, B. **Peak Detector: A Classic Analog Circuit Still in Wide Use.**

Disponível em:

<[http://www.planetanalog.com/author.asp?section\\_id=396&doc\\_id=562072](http://www.planetanalog.com/author.asp?section_id=396&doc_id=562072)> Acesso em: 19 mai. 2017

EXAR. Datasheet: XR-2206. Publicação Eletrônica, 2008.

## OBTAINING THE FREQUENCY RESPONSE OF ELECTRIC CIRCUITS USING A FREQUENCY SWEEPER

**Abstract:** *A Frequency Sweeper was made for obtaining the amplitude frequency response of different circuits. The integrated circuit XR2206 was used since it has a Voltage Controlled Oscillator (VCO). An Arduino Nano microcontroller and a four bit D/A converter were used to vary the output signal frequency. The output signal of the IC is a sine wave of adjustable amplitude plus an unwanted DC component of approximately 5,6 V. To remove this DC component some circuits were tested; a low pass RC filter was chosen. To obtain the amplitude of the input and output signals at different frequencies a peak detector circuit was used. With the system ready, two different circuits were tested: a high pass filter and a low pass filter. The result shows that the measured and calculated values are very close.*

**Key-words:** *Frequency sweeper, Frequency response, Electric filters, Peak Detector.*

Organização



Promoção

