

## SEL0318 - Laboratório de Circuitos Eletrônicos III

### Laboratório 8 – Multiplicador Analógico

Em várias aplicações da eletrônica analógica surge a necessidade de um circuito capaz de calcular o produto entre dois sinais. Exemplos podem ser encontrados em aplicações de áudio para confecções de compressores ou em aplicações de telecomunicações, como a modulação AM sem portadora, a detecção de fase e o deslocamento de frequência ou até mesmo em instrumentação quando há a necessidade se obter um amplificador de tensão controlado por tensão.

Para aplicações em baixa frequência o uso de amplificadores Log e AntiLog pode cumprir muito bem o papel de cálculo de produtos de sinais analógicos. Para frequências mais altas, esses amplificadores são muito lentos e uma solução mais sofisticada deve ser utilizada.

A **célula de Gilbert**, também conhecida como amplificador de transcondutância variável, é um circuito cascode bastante complexo capaz de efetuar a multiplicação analógica com bastante qualidade. Esse circuito exige um fino balanço entre seus quatro ramos diferenciais e as fontes de corrente controladas por tensão, além de níveis de tensão pequenos em suas entradas, o que além de sua complexidade irá tornar complicado o estudo prático desse tipo de circuito. Sendo assim, o circuito será estudado apenas em simulação.

#### 1. Simulação em LTSpice

Simule o circuito da Fig. 1.1, uma **célula de Gilbert implementada com transistores de sinal BC548**. Este circuito possui 4 entradas e 2 saídas. Cada par de **entrada (in0 e in1, in2 e in3)** deverá possuir uma diferença de tensão, correspondente aos dois **sinais de entrada V1 e V2** (Fig, 1.2). Essa diferença poderá ser obtida pela saída de um amplificador diferencial ou com um circuito de polarização de baixa impedância. Para fins desta simulação a Fig. 1.2 ilustra como as entradas do circuito deverão ser montadas no simulador.

O resultado da multiplicação pode ser obtido pela diferença entre os nós out1 e out2, o que na prática é realizado com um amplificador diferencial. Para fins de simulação **o resultado da multiplicação poderá ser obtido pela diferença direta das duas saídas, gerada por uma fonte BV (fonte arbitrária)**, como ilustrada na Fig. 1.3.

O circuito funciona como multiplicador analógico para tensões pequenas, menores ou próximas à tensão térmica do transistor bipolar, aproximadamente 25mV. O resultado dessa multiplicação será multiplicado por uma constante bastante elevada, sendo que com tensões de algumas dezenas de milivolts em cada entrada o amplificador irá excursionar entre seus limites.

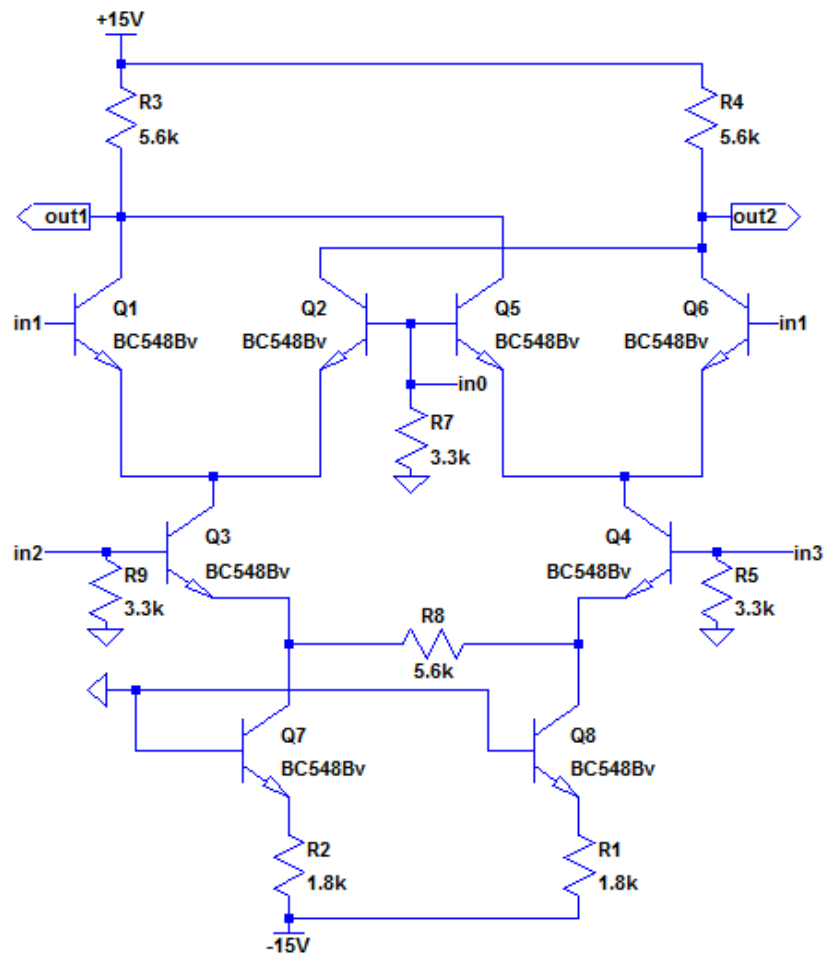


Fig. 1.1 - Multiplicador Analógico

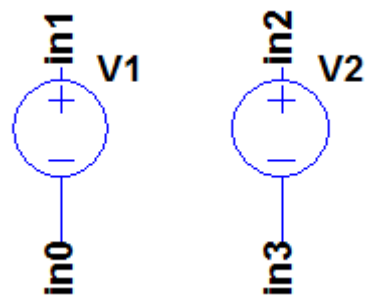


Fig. 1.2 - Entradas do multiplicador analógico

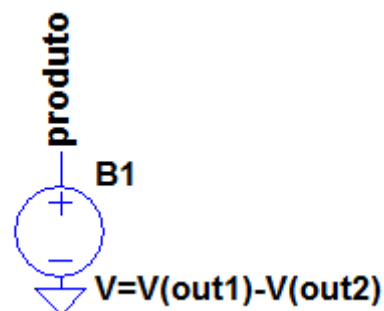


Fig. 1.3 - Saída do multiplicador analógico

## Amplificador de Tensão Controlado por Tensão

### Procedimento 1

- Sinal  $V_1$  entre in0 e in1: fonte DC variando entre 0 e 20mV com passo de 2mV.
  - Sinal  $V_2$  entre in2 e in3: senóide de 1KHz e amplitude de pico 40mV.
- 1) Plote a família de curvas no domínio do tempo na saída  $V_{\text{produto}}$ .
  - 2) Determine a constante K de amplificação considerando que  $V_{\text{produto}} = KV_1.V_2$
  - 3) Gere na saída do multiplicador um sinal de 1V de amplitude e 1KHz. Determine a distorção harmônica total (THD) utilizando o comando .four e plote o espectro de frequências.

### Procedimento 2

- Sinal  $V_1$  entre in0 e in1: rampa linear variando de 0 a 20mV com tempo de subida igual ao tempo de simulação.
  - Sinal  $V_2$  entre in2 e in3: senóide de 1KHz e amplitude 40mV.
- 1) Plote a saída  $V_{\text{produto}}$

## Quadrador de Tensão ou Dobrador de Frequência

O circuito pode operar como um dobrador de frequência ou um quadrador de tensão.

OBS: Lembrar que  $\text{sen}^2(\omega t) = [1 - \cos 2\omega t]/2$

- Nas entradas V1 e V2 aplique sinais senoidais iguais de amplitude 20mV e 1khz e plote a saída  $V_{\text{produto}}$ .
- 1) Trace a FFT da saída.
  - 2) Compare o espectro de frequências após o multiplicador com o espectro do sinal de entrada.

## Modulação em Amplitude com Portadora Suprimida

Algumas das importantes aplicações deste tipo de circuito são a modulação em amplitude com portadora suprimida e o batimento de frequências.

## Procedimento 1

- Sinal  $V_1$  entre in0 e in1 (modulante): senóide de 1kHz e 20mV.
  - Sinal  $V_2$  entre in2 e in3 (portadora): senóide de 100kHz e 20mV.
- 1) Plote a resposta do circuito no tempo e o espectro de frequências do sinal na saída.

## Procedimento 2

- Sinal  $V_1$  entre in0 e in1 (modulante): ondas senoidais, triangulares, rampas e ondas quadradas com amplitudes baixas (sempre menores que 40mV).
  - Sinal  $V_2$  entre in2 e in3 (portadora): senóide de 100kHz e 30mV.
- 1) Visualize a modulação para esses tipos de entrada.

## Misturador de Frequência

- Sinal  $V_1$  entre in0 e in1: senóide de 150kHz e 20mV de amplitude.
- Sinal  $V_2$  entre in2 e in3: senóide de 100kHz e 20mV de amplitude.

OBS: Lembrar que  $\cos(w_1t)\cos(w_2t) = \frac{1}{2} [\cos(w_1-w_2)t + \cos(w_1+w_2)t]$

- 1) Plote a resposta do circuito no tempo e o espectro de frequências do sinal na saída.

## Detecção de Fase entre Dois Sinais

Uma outra aplicação importante deste circuito é a realização da detecção de fase entre dois sinais com amplitude muito maior que 25mV. Para dois sinais de mesma frequência será gerado na saída um sinal com nível médio proporcional à diferença de fase de ambos. Com isto podem-se construir circuitos sincronizadores PLL (phase locked loop) usados em uma infinidade de aplicações essenciais à eletrônica moderna.

- Sinal  $V_2$  entre in2 e in3: senoidal de 2V de amplitude, 1kHz e fase 0.
- Sinal  $V_1$  entre in0 e in1: senoidal de 2V de amplitude, 1kHz e fase determinada por um parâmetro a variado entre 0 e 180° com passo de 30°.

- 1) Plote a família de curvas na saída.
- 2) Mostre como a diferença de fase entre os sinais da entrada é detectada na saída do multiplicador.

## 2. Questionário

O uso de multiplicadores de tensão no ramo de realimentação de amplificadores operacionais permite a concepção de circuitos divisores analógicos e de cálculo da raiz quadrada. As Fig. 1.4 e 1.5 ilustram esses circuitos utilizando fontes de tensão arbitrária (BV) para simular os multiplicadores e simplificar a análise. Os circuitos irão funcionar adequadamente dentro da faixa de operação dos amplificadores e para valores distantes de 0V.

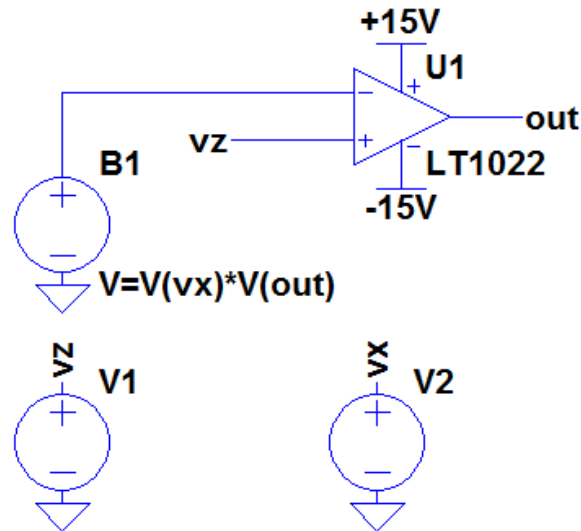


Fig. 1.4 - Divisor Analógico

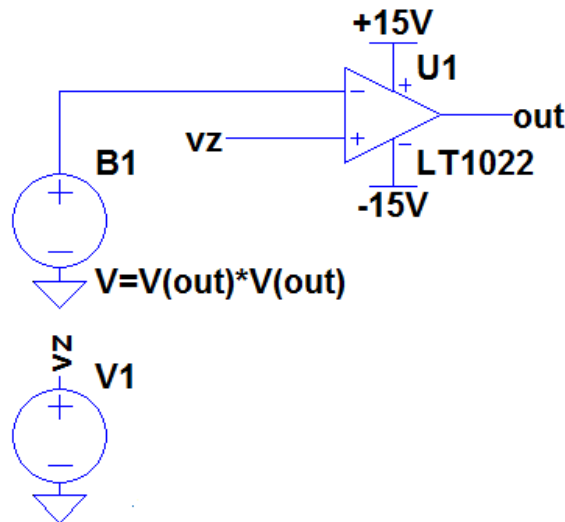


Fig. 1.5 - Circuito analógico para cálculo de Raiz Quadrada

O divisor tem duas entradas,  $V_x$  e  $V_z$ , sendo que sua saída irá indicar a razão entre  $V_x$  e  $V_z$ .

O circuito para cálculo de raiz quadrada tem como entrada somente  $V_z$  e sua saída indicará a raiz quadrada deste valor.

a) Utilizando o circuito da Fig. 1.4 calcule com 4 casas decimais as seguintes divisões utilizando o multiplicador analógico e uma calculadora:  $34/89$ ,  $231/24$ ,  $47/120$ ,  $1300/560$ ,  $1800/360$  e  $17/7$ . Edite uma tabela para descrever os resultados obtidos contendo uma coluna sobre o erro percentual.

b) Utilizando o circuito da Fig. 1.5 calcule com 4 casas decimais as seguintes raízes quadradas utilizando o multiplicador analógico e uma calculadora:  $\sqrt{132}$ ,  $\sqrt{81}$ ,  $\sqrt{256}$ ,  $\sqrt{23}$ ,  $\sqrt{47}$  e  $\sqrt{120}$ . Edite uma tabela para descrever os resultados obtidos contendo uma coluna sobre o erro percentual.