



## Experimento: Retificadores de precisão

### 1 Introdução

O presente relatório visa detalhar o experimento laboratorial realizado na disciplina laboratório de circuitos eletrônicos no dia 22 de outubro de 2019 onde o assunto abordado é sobre retificadores de precisão, que se fazem do uso de amplificadores operacionais (AMPOPS), mais especificamente os do circuito integrado (CI) LM741.

A prática possui o objetivo de identificar as saídas dos retificadores de meia onda e onda completa de precisão, identificando seus benefícios em contraste com retificadores que usam apenas diodos.

Os circuitos a serem montados podem ser identificados nas figuras 1 e 2, respectivamente o retificador de meia onda de precisão e o retificador de onda completa de precisão.

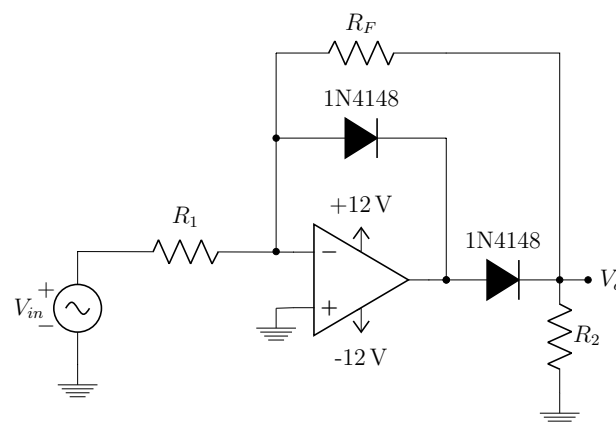


Figura 1: Retificador de meia onda. Onde:  $R_1 = R_F = 1.2k\Omega$  e  $R_2 = 12k\Omega$



## 2 Análise Teórica

## 2.1 Retificador de meia onda de precisão

Para a análise do retificador de precisão de meia onda (circuito da figura 1), conhecendo anteriormente como um amplificador operacional e diodos funcionam, devemos separar duas relações entre a entrada e a saída de interesse:

- Para o caso  $V_{in} > 0$

$$V_{out} = 0 \quad (1)$$

- Para o caso  $V_{in} < 0$

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_1} \times V_{in} \quad (2)$$

É importante notar que o circuito para o caso  $V_{in} < 0$  funciona como um amplificador inversor, pois o diodo que se encontra entre a saída e a entrada inversora está em corte e o diodo da saída está em condução com uma malha negativa no AMPOP.

Como as resistências de entrada e saída são exatamente as mesmas ( $1.2 \times 10^3 \Omega$ ), logo teremos para o caso em que  $V_{in} < 0$ , uma saída de  $V_{out} = -V_{in}$ .

Desenhando a característica de transferência do circuito da figura 1, teremos.

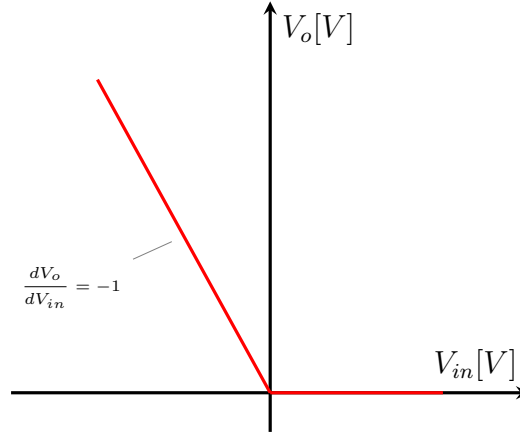


Figura 3: Característica de transferência para o retificador de meia onda de precisão.

Pela CT acima, espera-se que a parte negativa do sinal seja retificada e invertida.

Como foi colocado uma onda com  $0.5V_{pico}$ , espera que os resultados práticos sejam os mesmos com amplitude máxima do sinal de saída de aproximadamente  $0.5V_{pico}$  quando a entrada se encontra em  $-0.5V_{pico}$  após a retificação. Como pode ser visto abaixo na simulação do LTSpice.

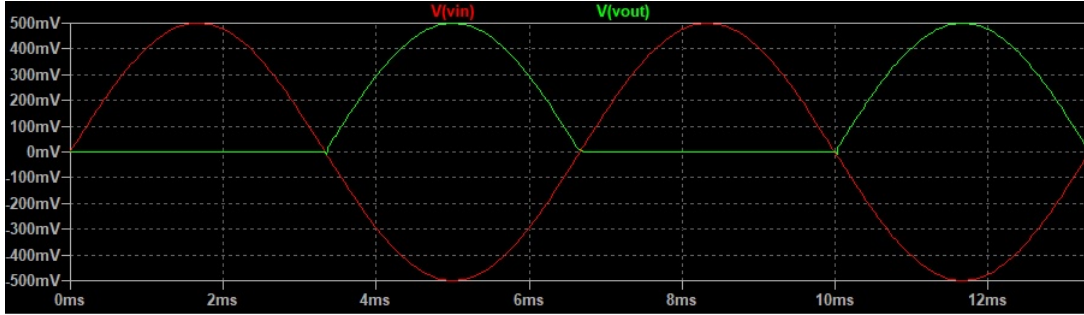


Figura 4: Simulação da entrada e saída do retificador de meia onda.

## 2.2 Retificador de onda completa de precisão

Semelhantemente para o circuito da figura 2, teremos que analisar a relação da entrada com a saída para dois casos diferentes.

- Para o caso  $V_{in} > 0$

$$V_{out} = \frac{R_2 \times R_5}{R_1 \times R_4} \times V_{in} = \alpha \times V_{in} \quad (3)$$

- Para o caso  $V_{in} < 0$

$$V_{out} = -\frac{R_3}{R_1} \times \frac{R_2 + R_4 + R_5}{R_2 + R_3 + R_4} \times V_{in} = -\beta \times V_{in} \quad (4)$$

Temos para o primeiro caso em que  $V_{in} > 0$ , um circuito equivalente de dois inversores, pois não temos o ramo da resistor  $R_3$ , já que o mesmo não possui corrente, além que o diodo que vai para esse ramo está em corte. Com isso obtemos a expressão mostrada. Já para o segundo caso ( $V_{in} < 0$ ), teremos um circuito equivalente a um inversor em cascata com um não-inversor, já que o primeiro diodo se encontra em corte, obtendo a expressão mostrada anteriormente.

Chamando  $\alpha$  o ganho relativo ao primeiro caso, e  $\beta$  o ganho relativo ao segundo caso.

Onde:

$$\alpha = \frac{R_f}{R_1} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{R_3}{R_1} \times \frac{R_2 + R_4 + R_5}{R_2 + R_3 + R_4} \quad (6)$$

Como  $R_2 = R_3 = R_4 = R_5 = R$ , portanto teremos

$$\alpha = \beta = \frac{R}{R_1} = \frac{12 \times 10^3}{6.8 \times 10^3} = 1.7647 \quad (7)$$

A CT do cicuito da figura 2 é mostrado abaixo

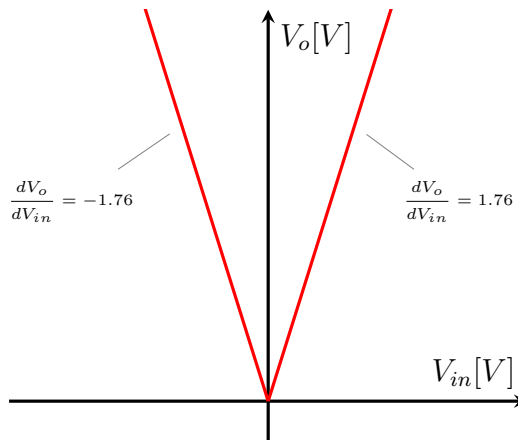


Figura 5: Característica de transferência para o retificador de onda completa de precisão.

Para uma entrada de  $0.5V_{pico}$ , teremos uma saída ( $V_{out}$ ) de aproximadamente  $0.8824V_{pico}$ , onde o circuito é retificado e invertido para valores de entrada negativo, e apenas amplificado para valores de entrada positivo.

Em relação a  $V_{o1}$ , pela a análise do circuito temos:

- Para o caso  $V_{in} > 0$

$$V_{o1} = 0 \quad (8)$$

- Para o caso  $V_{in} < 0$

$$V_{o1} = -\frac{R_3 || (R_2 + R_4)}{R_1} \times V_{in} = -\frac{R_3 \times (R_2 + R_4)}{R_1 \times (R_2 + R_3 + R_4)} \times V_{in} \quad (9)$$

No primeiro caso, como o AMPOP da saída está configurado como amplificador inversor, logo teremos pela realimentação negativa e sabendo que  $V^- = 0$ , devido não percorrer corrente em  $R_3$ , por essa conclusão obtemos  $V_{o1} = V^+ = V^- = 0$ .

Para o segundo caso, como o primeiro AMPOP trabalha como amplificador inversor, a sua saída é  $V_{o1}$ , pelo o circuito equivalente fornecido.

Para uma entrada de  $0.5V_{pico}$  teremos um  $V_{o1}$  de:

$$V_{o1} = -\frac{12 \times 10^3 (24 \times 10^3)}{6.8 \times 10^3 (36 \times 10^3)} \times 0.5 = 0.5882V_{pico} \quad (10)$$

Fazendo as simulações no LTSpice obtemos os sinais de  $V_{out}$  e  $V_{o1}$ .

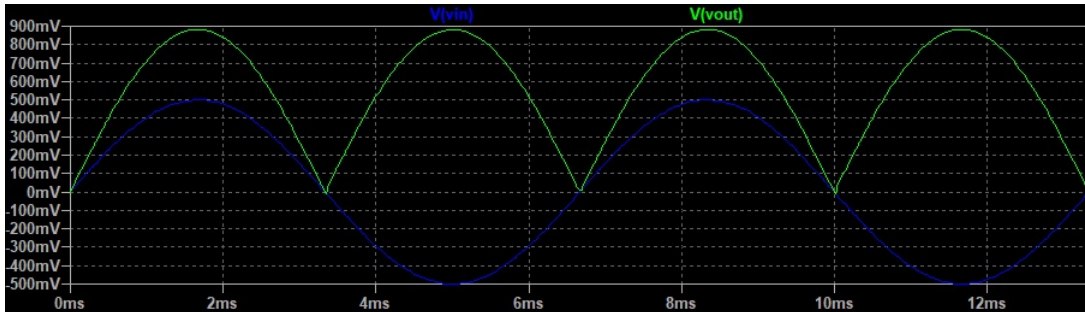


Figura 6: Simulação da entrada e saída ( $V_{out}$ ) do retificador de onda completa.

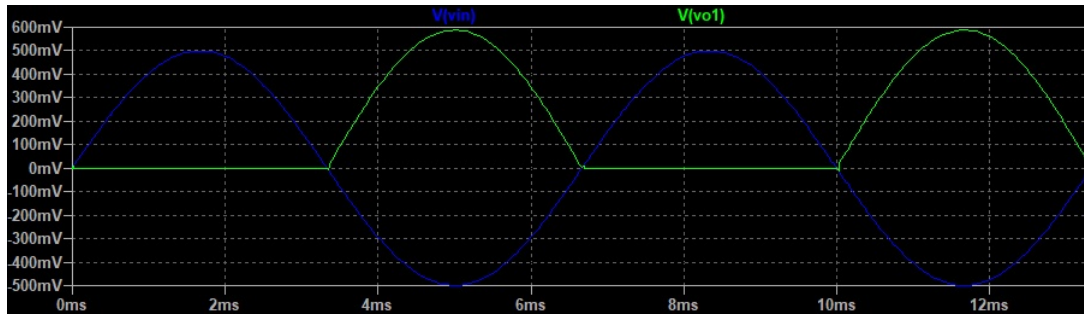


Figura 7: Simulação da entrada e saída ( $V_{o1}$ ) do retificador de onda completa.

### 3 Resultados e discussão

Para encontrar todos os resultados necessários para comprovar a teoria, a prática foi dividida em algumas etapas, sendo elas:

- Aplicar uma senoide de 0.5 V de amplitude e 150 hz de frequência na entrada do circuito da figura 1 e comparar as formas de onda obtidas no nó  $V_o$  com os resultados teóricos;
- Aplicar a mesma senoide do experimento anterior no circuito da figura 2 e comparar as formas de onda obtidas no nó  $V_o$  e  $V_{o1}$  com os resultados teóricos.

Antes dos circuitos serem montados, os diodos foram testados separadamente para garantir que não estejam funcionando na região de ruptura. Só assim foram montados os circuitos da figura 1 e 2.

Ao obter as medições, para conferir se os resultados corroboram com a prática, foi adotado um erro de 5% como uma boa figura de mérito para avaliar o desempenho dos circuitos. Caso contrário o circuito deveria ser revisado em busca de reduzir o ruído ou qualquer resistor com resistência fora da faixa de tolerância.

No que confere a saída  $V_o$  do circuito da figura 1, foram obtidas as formas de onda da figura 8.

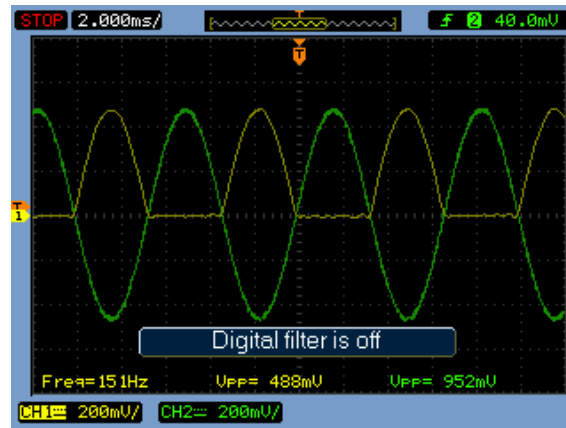


Figura 8: Comparação entre entrada (CH2) e saída (CH1) do retificador de meia onda.

Observa-se que a relação teórica entre o valor de entrada e saída foi obedecida na prática, com um erro de apenas 2.4%, visto que no semi-ciclo negativo da entrada esperava-se um valor de 500mV de amplitude para o sinal de saída, mas só obteve-se 488mV.

Outro fato importante é que a frequência do sinal de saída permaneceu a mesma do sinal de entrada (150Hz), pois no semi-ciclo positivo da entrada, a saída permaneceu nula.

Na segunda parte foi conferida a saída  $V_o$  do circuito da figura 2, obtendo-se as formas de onda da figura 9

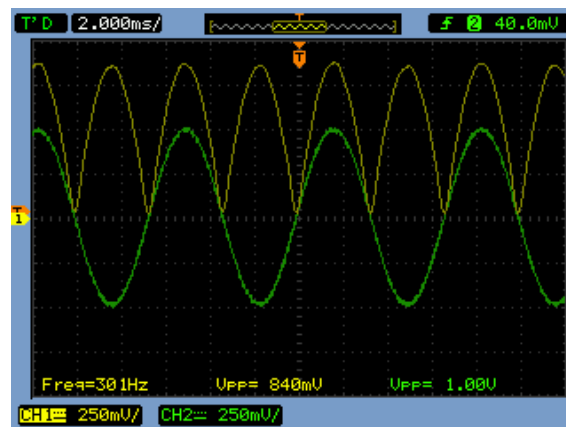


Figura 9: Comparação entre entrada (CH2) e saída (CH1) do retificador de onda completa.

Observa-se que a relação teórica entre o valor de entrada e saída foi obedecida na prática, com um erro de apenas 4.76%. Isso, pois a amplitude do sinal de saída é 840mV para um valor esperado de 882mV.

Diferente do amplificador de meia onda, o amplificador de onda completa possui sinal na saída para ambos os ciclos (positivo e negativo) do sinal de entrada. Porém, a ele está

associado um ganho de 1.68, cujo valor teórico é 1.76, permitindo que sua amplitude seja diferente da amplitude do sinal de entrada.

Como a saída possui resposta não nula para ambos os ciclos do sinal de entrada, implica que a frequência do sinal na saída dobrou de valor.

Também foi conferida a forma de onda no nó de tensão  $V_{o1}$  do circuito da figura 2, gerando a figura 10.

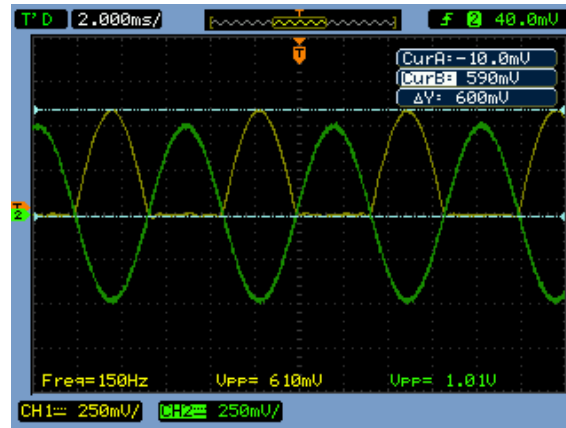


Figura 10: Comparação entre entrada (CH2) e o ponto  $V_{o1}$  (CH1) do retificador de onda completa.

Observa-se que nessa parte do circuito, a forma de onda obtida é nada mais que o resultado de uma amplificação de meia onda, ou seja, a saída será a contribuição desse nó do catodo desse diodo com o nó do anodo do outro diodo. E o valor nesse ponto corrobora com seu valor teórico obtido anteriormente, possuindo um erro de apenas 1%. Isso, pois a amplitude do sinal no nó  $V_{o1}$  é 590mV para um valor esperado de 588mV.

Vale destacar que em ambos circuitos a amplitude do sinal de entrada foi menor do que a tensão de polarização usual de um diodo (0.7 V). Isso implica que em retificadores normais que não se valem do uso do conjunto AMPOP/diodo, esse sinal não teria amplitude suficiente para ser retificado, logo implicando em uma saída nula para o caso de um retificador de meia onda e onda completa com o uso de diodos. Porém no caso dos retificadores de precisão essas dificuldades foram superadas devido ao uso do "super-diodo".



## 4 Conclusões

A prática permitiu compreender e distinguir os circuitos retificadores de precisão, um categoria de circuitos retificadores utilizando amplificadores operacionais, bem como ajudou a compreender o funcionamento na prática desses circuitos, permitindo entender as limitações impostas.

Podemos notar que os retificadores de precisão conseguem superar o problema imposto pelos circuitos retificadores normais (resistor-diodo), que são problemáticos com sinais de grandeza menores graças à queda de tensão dos diodos (0.7V para o silício). Também, pode-se perceber que os resultados obtidos na prática estão de acordo com o que foi previsto na análise teórica.

Dessa forma, mesmo com as dificuldades encontradas, permitiu-se encontrar uma ótima correspondência entre os valores teóricos com os práticos, implicando que os circuitos propostos de fato possuem um valor prático de aplicação.