

2. Circuitos Retificadores e Grampeadores

Os circuitos vistos neste capítulo operam com o AMPOP em duas regiões distintas: região linear e região de saturação. Na região linear valem os conceitos já vistos anteriormente, como o conceito de “terra virtual”, ganho realimentado, etc. Na região de saturação alguns conceitos não são mais válidos pois o AMPOP opera numa condição onde não há mais amplificação linear do sinal de entrada, mas sim uma saturação da tensão de saída devido à limitação imposta pela tensão de alimentação. Uma vez atingida a saturação, a tensão na saída permanece constante independente da tensão de entrada.

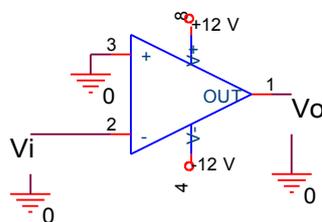
A condição de saturação é atingida quando **não** há realimentação negativa (da saída para a entrada inversora) ou quando há realimentação positiva (da saída para a entrada não-inversora). Desta forma o AMPOP opera em “malha aberta”, resultando em um ganho diferencial elevado ($10^5 - 10^6$), que leva a saída à saturação mesmo para tensões diferenciais de entrada muito baixas ($10^{-4} - 10^{-5}$ V). Nesta condição, não é mais válido o conceito de “terra virtual”, pois não existe a corrente vinda da saída que anula a corrente da entrada inversora.

Continuam sendo válidos os seguintes conceitos:

- i. Resistência de Entrada elevada ($R_i \approx \infty$);
- ii. Resistência de Saída baixa ($R_o \approx 0$);
- iii. Ganho de Tensão Diferencial muito alto;

$$A_d = \frac{v_o}{(v_i^+ - v_i^-)}$$

Exemplo 1: Seja um AMPOP não realimentado com ganho diferencial de $3 \cdot 10^5$ alimentado por uma fonte simétrica de 12 V, tendo a entrada não-inversora “aterrada”, calcule a tensão necessária na entrada inversora para que a saída opere na condição de saturação positiva (considere nula a tensão de “off-set” do AMPOP)



Solução:

Considerando a perda de tensão interna na saída de ± 1 V, v_o satura a:

Positiva: $V_{sat}^+ = 12 - 1 = 11V$ Negativa: $V_{sat}^- = -12 + 1 = -11V$

$$(v_i^+ - v_i^-) = \frac{v_o}{A_d}$$

Temos então:

$$(0 - v_i^-) = \frac{11}{3 \cdot 10^5}$$

$$v_i^- = -3,67 \cdot 10^{-5} V$$

Desta forma conclui-se que a tensão necessária para levar o AMPOP à condição de saturação é muito pequena, podendo ser considerada desprezível na maioria dos casos.

Assim, pode-se escrever:

$$\begin{cases} v_i^+ > v_i^- \Rightarrow v_o = V_{sat}^+ \\ v_i^+ < v_i^- \Rightarrow v_o = V_{sat}^- \end{cases}$$

➤ Análise da Resposta em Freqüência

A resposta em freqüência na condição de saturação é analisada de forma distinta da região linear. As excursões de tensão de saída vão de V_{sat}^- a V_{sat}^+ , sendo definido o parâmetro *slew rate* (taxa de variação da saída), que é a derivada da tensão de saída em relação ao tempo. Este parâmetro é uma constante para cada AMPOP e está ligado indiretamente à banda passante do mesmo, ou seja, quanto maior a banda passante (dada por f_T), maior a *slew rate*. A *slew rate* é dada em V/ μ s (Volts por microsegundo), e possui valores típicos que vão desde 0,1 V/ μ s a 1000 V/ μ s.

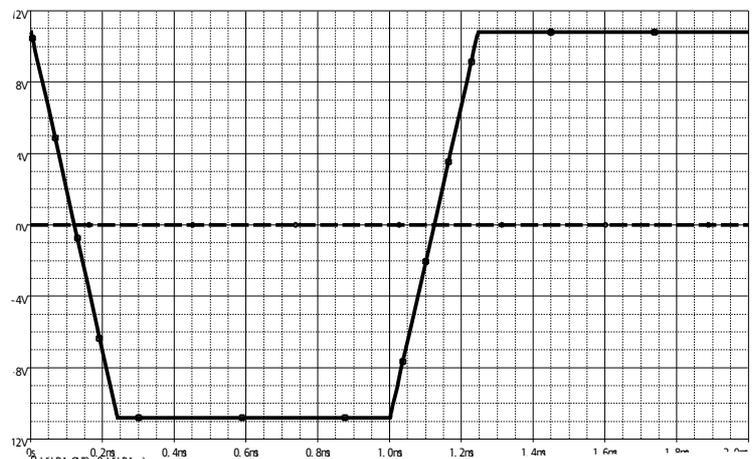
Assim, para analisar as variações no tempo da tensão de saída, toma-se a excursão de saída total $V_{sat}^+ - V_{sat}^-$ e divide-se pela *slew rate* (SR):

$$\Delta t_o = \frac{V_{sat}^+ - V_{sat}^-}{SR}$$

Exemplo 2: Seja o mesmo AMPOP do exemplo 1 com SR=0,1 V/ μ s, calcule o tempo de transição da tensão de saída considerando uma transição abrupta na tensão de entrada.

Solução:

$$\begin{aligned} \Delta t_o &= \frac{V_{sat}^+ - V_{sat}^-}{SR} \\ &= \frac{11 - (-11)}{0,1} = 220 \mu s \end{aligned}$$



2.1 Retificadores de Precisão

São circuitos capazes de retificar um sinal de amplitude qualquer sem as perdas inerentes aos retificadores convencionais a diodo. São usados para retificação de sinais AC de baixa amplitude.

2.1.1 Retificador de meia onda

Este circuito é baseado em um AMPOP, um diodo retificador e um resistor.

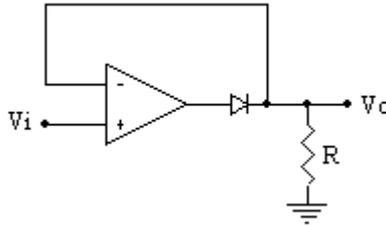


Figura 1: Retificador de meia onda

Aqui o diodo poderá ser analisado como chave, pois o AMPOP fornece a tensão de polarização direta necessária à condução do diodo (quando a entrada é positiva), de modo que na saída tem-se a mesma tensão da entrada sem perdas.

- Para semiciclo positivo de v_i : AMPOP na Região linear

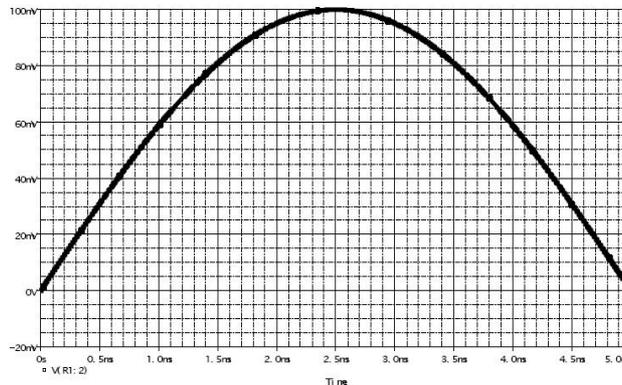


Figura 2: Gráfico de V_i x t no semiciclo positivo do retificador de meia onda

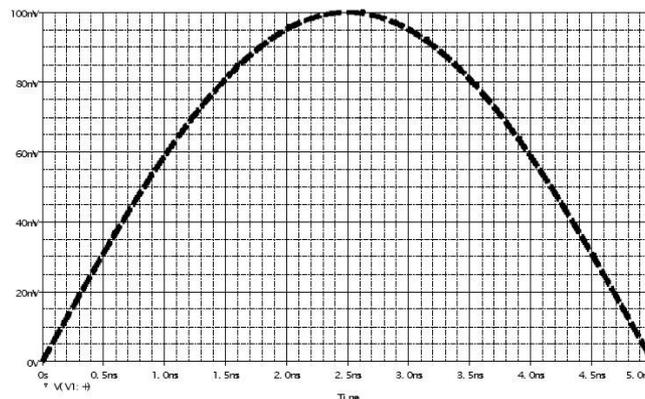


Figura 3: Gráfico de V_o x t no semiciclo positivo do retificador de meia onda

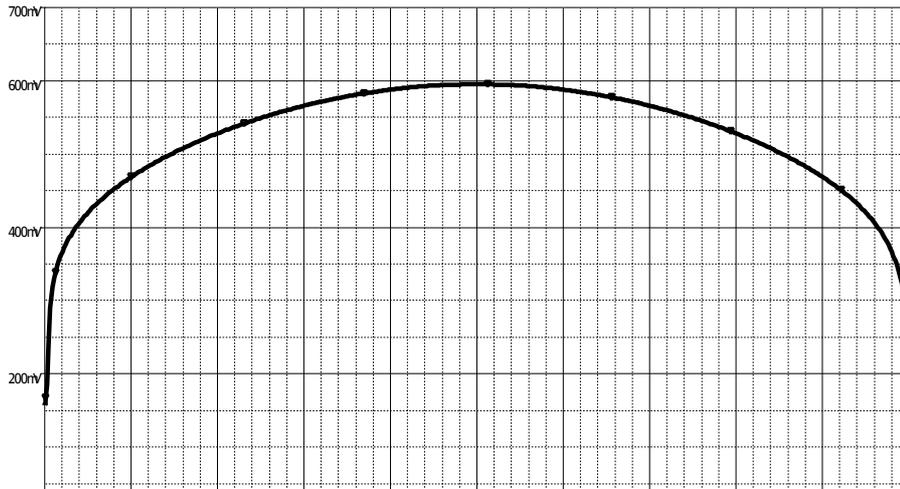


Figura 4: Gráfico de $v_o \times t$ no semiciclo positivo da tensão na saída do AMPOP

Temos que:

$$v_o' = V_d + v_o$$

$$v_i^- = v_i^+ = v_o$$

$$V_d = nV_T \ln\left(\frac{I_d}{I_s}\right)$$

A tensão de polarização direta do diodo é variável e proporcional a $\ln(I_d)$, no entanto ela é fornecida pelo AMPOP, não aparecendo na saída final v_o . Esta tensão possui valores práticos da ordem de 0,5 a 0,7 V, à temperatura ambiente e para pequenas correntes ($I_d < 10\text{mA}$). Desta forma a saída final v_o é idêntica à entrada v_i .

$$v_o = v_i$$

- Para o semiciclo negativo de v_i : AMPOP na Região de Saturação
 - diodo reversamente polarizado $I_d = I_s \approx 0$
 - $v_i^- = v_o = 0$
 - $v_o' = V_{SAT}^-$

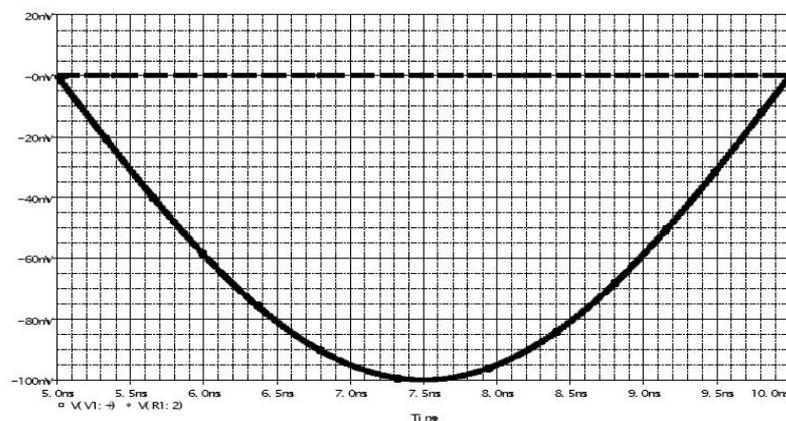


Figura 5: $v_i \times t$ (linha cheia) e $v_o \times t$ (linha tracejada) no semiciclo negativo do retificador de meia onda

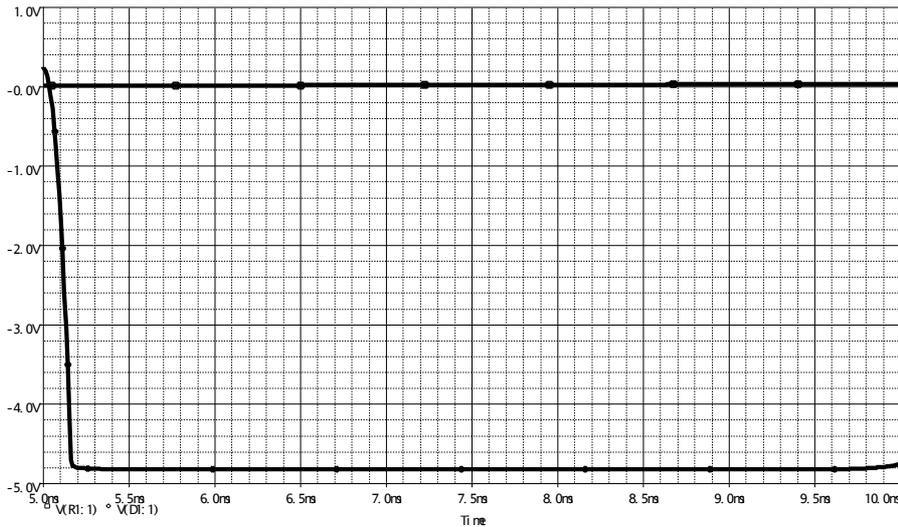


Figura 6: Gráfico de $v_o \times t$ (tensão na saída do AMPOP) e $v_o \times t$ no semiciclo negativo

- Para ambos os semiciclos:

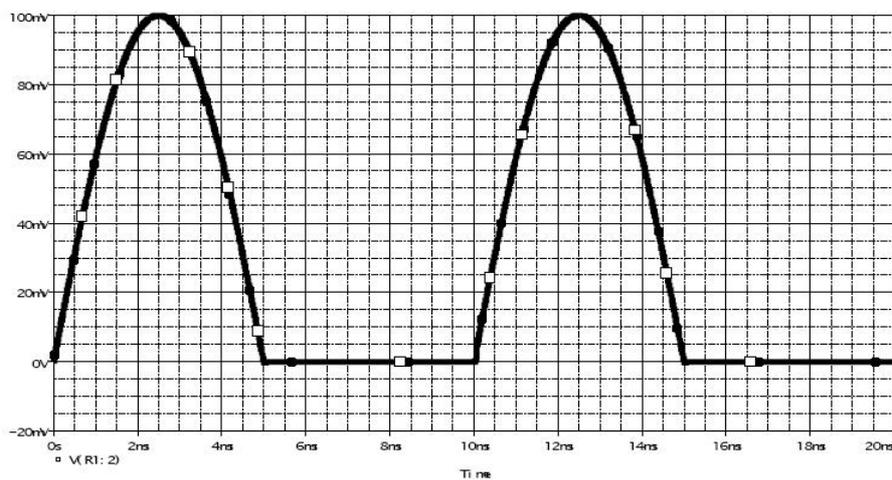


Figura 7: Gráfico de $v_o \times t$ no retificador de meia onda durante 2 ciclos completos.

Resposta em frequência:

A transição da região de saturação do AMPOP para a região linear envolve um certo tempo (dado pela SR) e gera distorções no sinal retificado, limitando a frequência de operação. Analisando para cada semiciclo, tem-se:

- Semiciclo -: AMPOP na região de Saturação, $v_o=0$
- Semiciclo +:
 - Transição da Região de Saturação para Região linear
 - AMPOP limitado pela SR
 - Tempo de transição depende da tensão de alimentação

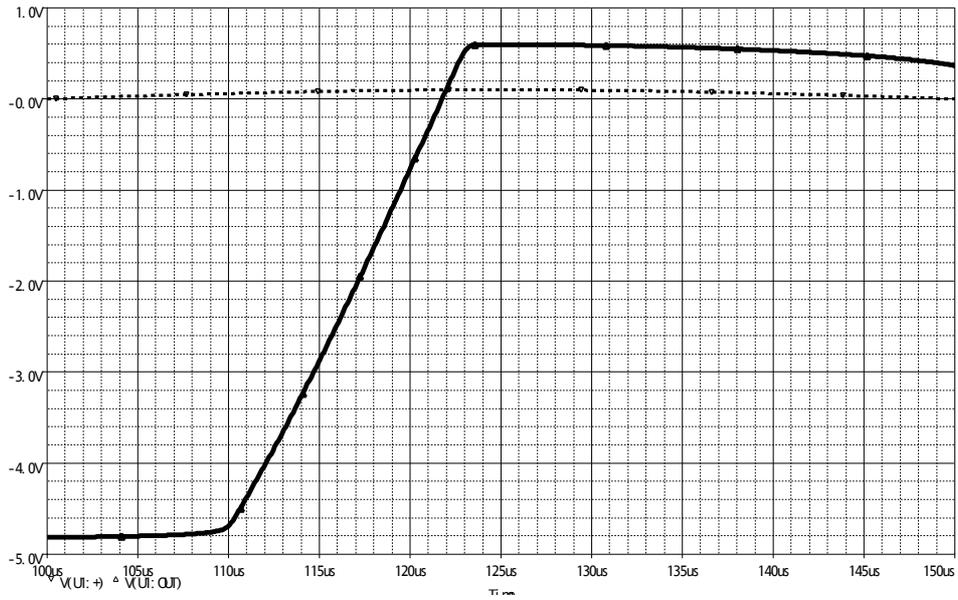


Figura 8: Gráfico da transição de v_o durante a passagem do semiciclo negativo para positivo.



Figura 9: Gráfico de v_o no semiciclo negativo para uma frequência de 5 kHz, SR de 0,5 V/μs e alimentação simétrica de 5 V.

Como pode-se observar pelos gráficos, a tensão de saída fica distorcida levando a um erro no sinal retificado. O erro máximo tolerável pode ser analisado pelo tempo de atraso que a saída leva até atingir o valor correto da entrada. Este erro depende da SR do AMPOP, da amplitude do sinal de entrada, da tensão de polarização direta do diodo e da tensão de alimentação do AMPOP, e pode ser escrito como:

$$t_r = \frac{v_i + V_d - V_{sat}^-}{SR}$$

Como o valor instantâneo de v_i depende do tempo t_r , tem-se uma equação recursiva que não possui solução algébrica direta. Considerando-se que $v_i \ll V_{sat}$, pode-se usar a aproximação:

$$t_r \approx \frac{V_d - V_{sat}^-}{SR}$$

Caso o erro seja dado em função do ângulo, determina-se o tempo t_r a partir do início do semiciclo a ser retificado, considerando-se a frequência do sinal de entrada. Quanto maior a SR, menor o erro e conseqüentemente maior a frequência máxima de operação do retificador.

2.1.2 Retificador de onda completa (ou operador Modulo)

A retificação de sinais em onda completa é mais adequada na maioria das aplicações de retificação pois o sinal de saída está presente em ambos os semiciclos. O princípio básico da retificação em onda completa de precisão é somar ao sinal retificado em meia onda o sinal de entrada invertido. A figura 10 ilustra um dos possíveis circuitos de retificação em onda completa a partir do retificador de meia onda visto anteriormente.

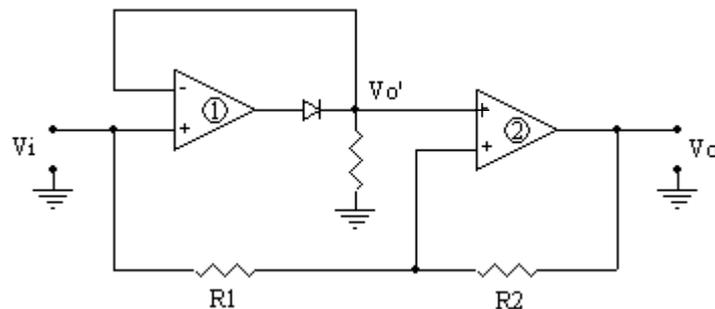


Figura 10: Retificador de onda completa

O primeiro estágio é idêntico ao retificador de $\frac{1}{2}$ onda, cuja saída é identificada no circuito como v_o' . O segundo estágio consiste num amplificador subtrator realimentado operando na região linear, cuja saída pode ser analisada da seguinte forma:

Análise por superposição:

Duas tensões de entrada:

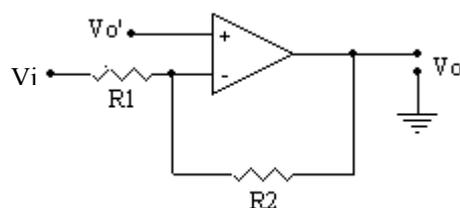


Figura 11: Circuito subtrator com entradas V_i e V_o'

$$v_i = 0$$

$$R_2 = R_1$$

$$1) \quad v_o = v_o' \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 2 \cdot v_o'$$

$$2) \quad v_o' = 0$$

$$v_o = -v_i \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

$$v_o = -v_i$$

-Contribuição de v_i e v_o'

$$v_o = 2 \cdot v_o' - v_i$$

- Para o semiciclo positivo:

$$v_o' = v_i$$

$$v_o = 2v_i - v_i$$

$$v_o = v_i$$

- Para o semiciclo negativo:

$$v_o' = 0$$

$$v_o = 2 \cdot 0 - v_i$$

$$v_o = -v_i$$

Em resumo, a saída v_o é igual a v_i no semiciclo positivo e igual a $-v_i$ no semiciclo negativo. Caso o retificador de meia onda seja negativo, a saída final será sempre negativa. Isto equivale a efetuar a operação módulo sobre o sinal de entrada.

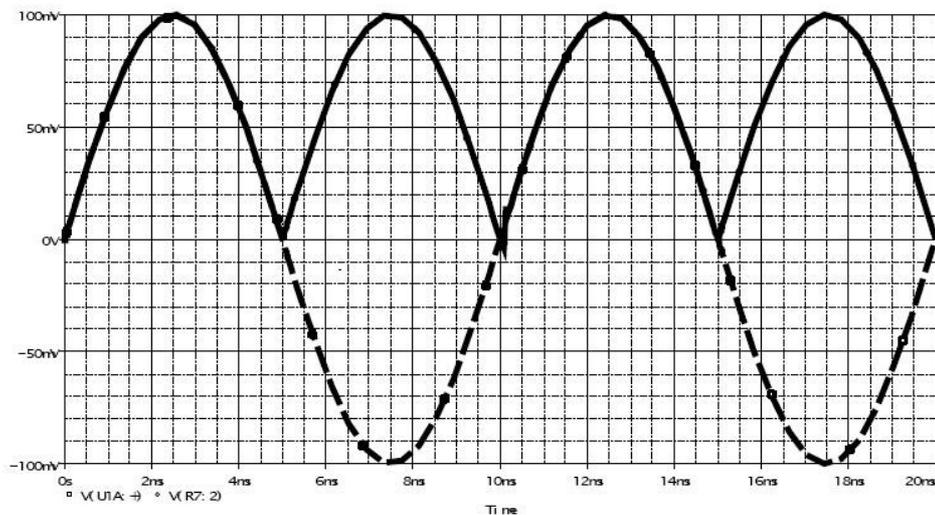


Figura 12: V_i x t (linha tracejada) e V_o x t (linha contínua) no retificador de onda completa

Resposta em frequência:

O retificador de onda completa sofre as mesmas limitações em frequência do retificador de meia onda, limitado principalmente pela *slew rate* do AMPOP. O segundo estágio de amplificador subtrator opera sempre na região linear e a resposta em frequência é função da f_T e do ganho, que neste caso vale 2 para v_o' . Na prática a frequência de corte do segundo estágio é muito superior à máxima frequência do primeiro estágio (quando usados AMPOP's idênticos). Dessa forma a *slew rate* é a principal limitante do retificador de onda completa. A figura 13 mostra as tensões de entrada e de saída de uma retificador de onda completa operando numa frequência tal que o ângulo de condução do semiciclo positivo é aproximadamente 90° . Observa-se que o semiciclo negativo retificado quase não apresenta distorções.

Dessa forma, a análise da frequência máxima de operação é idêntica à do retificador de meia onda.

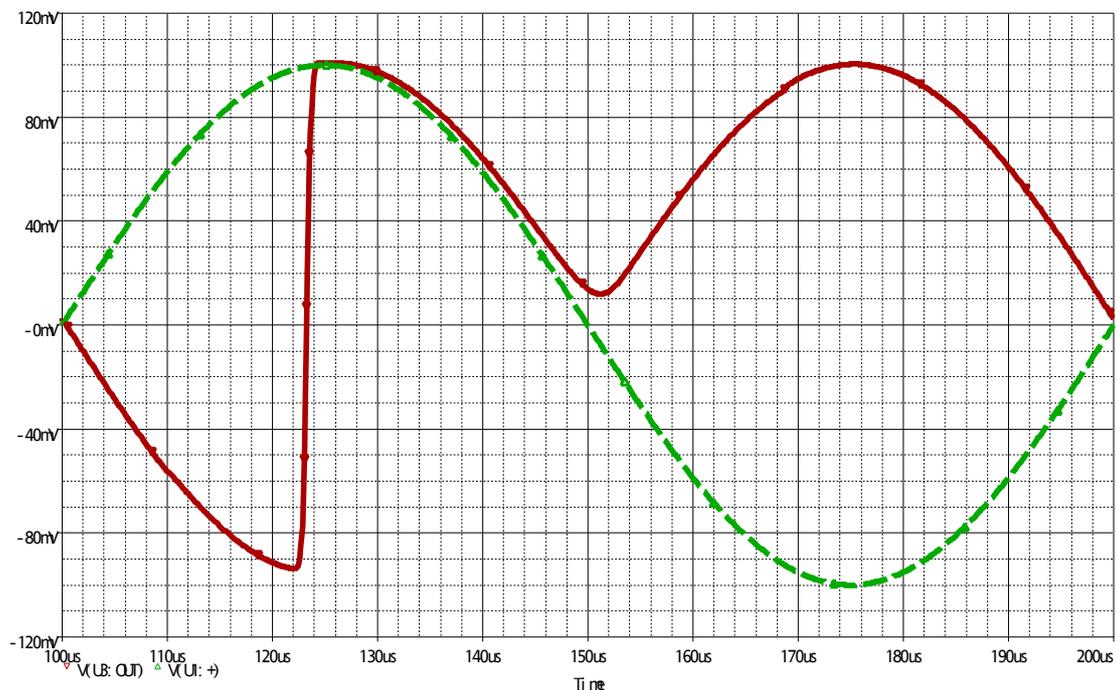


Figura 13: V_i x t (linha tracejada) e V_o x t (linha contínua) no retificador de onda completa operando numa frequência elevada. Observa-se a grande distorção no semiciclo positivo devido à limitação pela SR do AMPOP.