

# Métodos para Validação de Análise de Pequenos Sinais

Ana Paula da S. Pelegrini e Eduardo G. de Lima<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Concepção de Circuitos e Sistemas Integrados  
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil  
anapaulapelegrini2503@gmail.com

**Resumo** — Ao projetar um circuito eletrônico, os métodos de análise são de extrema importância para prever e gerenciar o comportamento e finalidade do circuito. Para análise de pequenos sinais faz-se necessário a validação dos resultados obtidos em simulações/análises em função da amplitude da fonte CA. Neste artigo tal verificação é feita a partir de dois métodos, sendo o primeiro através das curvas dos elementos não lineares e o segundo através das formas de onda obtidas a partir de uma simulação de transitório.

## I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de programas que simulam circuitos elétricos ocasionou em grandes benefícios aos projetistas. Através deles, é possível prever os comportamentos possíveis do circuito em diversas situações de forma otimizada, ou seja, testando diversos valores para os componentes, antes de ser fabricado, economizando recursos e tempo de protótipos não funcionais. Além disso, em situações inesperadas permite-se identificar o problema facilmente relacionando um erro no projeto ou montagem incorreta, abstraindo um componente com defeito ou fora da especificação [1].

Dentre as simulações a principal abordada neste estudo é a análise de pequenos sinais, a qual é aplicada em circuitos onde fontes independentes injetam tensões e correntes cujo andamento é contínuo (CC) e senoidal com frequência única (CA) no tempo. Sua simulação é baseada na superposição das fontes independentes CC e CA sobre circuito linearizado em torno do CC. Nesta análise, o foco é no regime permanente.

O objetivo deste trabalho é validar a análise de pequenos sinais de duas maneiras diferentes, ressaltando que os simuladores não informam se os resultados da análise realizada são precisos e compete ao usuário verificá-los, garantindo que as amplitudes das fontes CA sejam pequenas o suficiente para que todas as tensões e correntes continuem sendo dadas pela soma de uma

componente constante no tempo e uma componente que varia no tempo de forma senoidal com frequência única.

## II. MÉTODOS DE ANÁLISE

A partir das leis fundamentais da teoria de circuitos elétricos os métodos de análise de circuito são desenvolvidos. Esses métodos podem ser divididos entre os circuitos de corrente contínua (CC), corrente alternada (CA) e transitório. A solução completa de uma análise é composta pela resposta em transitório mais a resposta em regime permanente que sempre terá a mesma forma da fonte de excitação e a mesma frequência seja ela de corrente contínua ou alternada [2].

Os métodos de análise base mais recorrentes são a análise de malhas e a análise nodal. Para análise de circuitos CC, despreza-se o transitório e assume-se que todas as tensões e correntes são constantes no tempo [2].

Todavia, para circuitos CA faz-se uma análise fasorial utilizando o fasor das tensões e das correntes e a impedância pelo valor das resistências, capacitâncias e indutâncias. Como a análise fasorial é linear, para elementos não lineares, como o diodo, precisa-se analisar o comportamento CA em torno de um ponto CC de polarização. Devemos substituí-lo por uma resistência equivalente com o valor igual ao inverso da inclinação da tangente à curva característica da corrente pela tensão do diodo no ponto de polarização [3].

Por fim, notamos que ao realizar a linearização de uma curva exponencial (equação 1), a amplitude do sinal (fonte CA) deve ser suficientemente pequena, de modo que a excursão da curva permaneça na zona linear, na região em que o comportamento do diodo é análogo ao do resistor. Portanto, é necessária a validação dos resultados da análise CA em função da amplitude da fonte CA [3].

$$I_d = I_s \cdot e^{\frac{V_d}{nV_T} - 1} \quad [A] \quad (1)$$

Enfim, para a análise em regime transitório o tempo é discretizado e são calculadas tensões e correntes para uma quantidade finita  $n$  de instantes de tempo. O

equacionamento é feito de forma análoga à anterior, porém, as incógnitas do equacionamento apresentam valores de tensão e corrente variando em k e também valores anteriores em (k-1) das mesmas que serão substituídos por números conhecidos antes da resolução do sistema.

### III. MÉTODOS PARA VERIFICAÇÃO DE PEQUENOS SINAIS

Com o objetivo de verificar a validade de pequenos sinais, utiliza-se um circuito com diodos e capacitores não-lineares. Foram aplicados dois métodos distintos no circuito da Figura 1, sendo as correntes de saturação dos diodos  $I_{sdr} = 6,667e-13$  A e  $I_{sdf} = 1,020e-13$  A. Para essa análise, foi usado o modelo Ebers-Moll para representar um transistor BJT e a polarização em CC do circuito foi escolhida de forma que o diodo D1 (VBE) conduza e o diodo D2 (VBC) esteja cortado, para que o circuito funcione como um amplificador emissor comum.

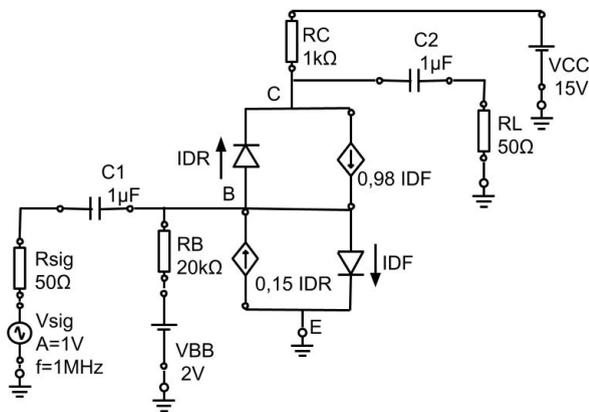


Figura 1 -Circuito amplificador emissor comum

Feito isso, para o primeiro método, o qual verifica a validade de pequenos sinais inicialmente a partir da ferramenta matemática Matlab e em seguida com a ferramenta de simulação QUCS, primeiramente obteve-se a curva característica de cada um dos diodos (equação 1), e assim plotado um gráfico tensão x corrente e marcado o ponto de polarização CC, como visto nas Figuras 2 e 3.

Após isso, obteve-se a curva da capacitância associada ao modelo de cada um dos diodos, a partir da equação 2 [4], cujos parâmetros do diodo usado são  $C_p = 0,5$  nF,  $C_{j0} = 0,4$  nF,  $\text{tal} = 0$ ,  $V_j = 0,350$ ,  $M = 2$  e  $F_c = 0,8$ . Sendo assim, foi plotado um gráfico capacitância x tensão para cada capacitor não-linear de cada diodo, na Figura 4, sendo a curva azul referente ao capacitor referente do diodo D2 em corte e a curva vermelha, ao diodo D1 conduzindo. Além disso, foi identificado em cada curva o ponto CC da tensão sobre cada diodo.

$$C_d = C_p + \tau g d + \begin{cases} C_{j0} \cdot (1 - \frac{V_d}{V_j})^{-M} & \text{para } V_d \leq F_c \cdot V_j \\ \frac{C_{j0}}{(1-F_c)^M} \cdot (1 + \frac{M \cdot (V_d - F_c \cdot V_j)}{V_j \cdot (1-F_c)}) & \text{para } V_d > F_c \cdot V_j \end{cases} \quad [F] \quad (2)$$

Por fim, foram utilizados os valores obtidos na simulação do QUCS do circuito da Figura 1 com os diodos apresentando os mesmos valores dos parâmetros que geraram as curvas do Matlab citadas anteriormente. Foi realizada a simulação CA variando somente a amplitude da fonte senoidal para a frequência de 1 MHz.

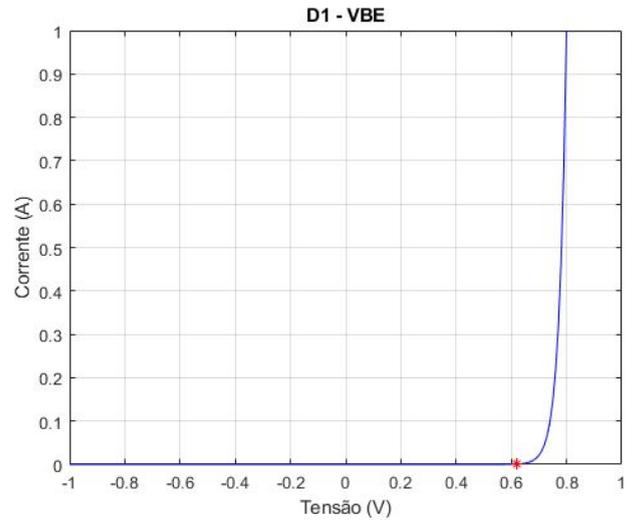


Figura 2 - Curva característica D1

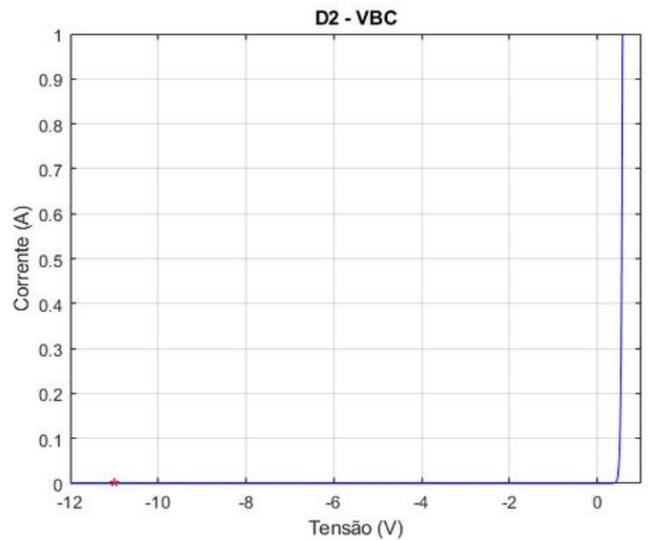


Figura 3 - Curva característica D2

Os resultados de tensões e correntes obtidos no QUCS são dados pela soma de um valor constante, que é o resultado da análise CC, e uma senoide, cuja amplitude é o módulo fornecido pelo resultado da análise CA. Com esses resultados, foram calculados os valores mínimos e máximos da tensão sobre cada diodo, conforme as equações 3 e 4. Também foram utilizados dois valores arbitrários de amplitude de fonte senoidal: um valor pequeno de 1mV e um valor grande de 1V. Esses valores de tensão máximo e mínimo foram usados nos gráficos plotados inicialmente e para que pequenos sinais sejam válidos, no intervalo entre os valores mínimos e máximos da tensão sobre cada diodo, os gráficos dos diodos devem ser aproximados de forma precisa por retas tangentes ao

ponto de polarização e as capacitâncias no ponto de polarização devem permanecer aproximadamente inalteradas.

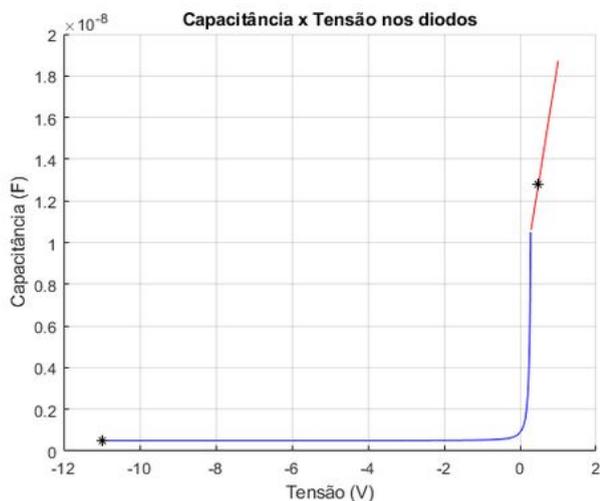


Figura 4 - Gráfico capacitância x tensão no diodo

$$V_{\min} = V_{cc} - |\text{Módulo da amplitude CA}| \quad (3)$$

$$V_{\max} = V_{cc} + |\text{Módulo da amplitude CA}| \quad (4)$$

O segundo método verifica a validade de pequenos sinais a partir da ferramenta de simulação QUCS, usando de base que a análise de transitório não assume pequenos sinais e é precisa para qualquer amplitude das fontes senoidais. No circuito da Figura 1, com os mesmos parâmetros, foi realizada uma análise de transitório para cada uma das duas amplitudes da fonte senoidal escolhidas anteriormente. Por fim, foram plotados gráficos para as tensões sobre os diodos. Se a forma de onda para os diodos forem senoidais, vale a análise de pequenos sinais. Se alguma das curvas estiver distorcida, não vale pequenos sinais.

#### IV. RESULTADOS

Para o primeiro método, analisaram-se as curvas dos diodos e capacitâncias que foram linearizadas. Isso foi verificado observando onde os valores mínimos e máximos da tensão sobre cada diodo que foram obtidos na análise no QUCS se situam nas curvas. Para que pequenos sinais sejam válidos, no intervalo entre os valores mínimos e máximos da tensão sobre cada diodo, as curvas devem ser bem aproximadas pelas retas. Em vista disso, foi verificado, nas Figuras 5 e 6 que apresentam a curva da corrente no diodo x tensão (cor azul) e a curva da capacitância no diodo x tensão (cor vermelha) para D1, não vale pequenos sinais quando a amplitude da fonte senoidal é 1 V (Figura 5), porém vale pequenos sinais quando a amplitude da fonte senoidal é 1 mV (Figura 6), pois as curvas se aproximaram de retas em relação ao máximo e mínimo das tensões para a corrente do diodo como também para capacitância. Utilizando o mesmo raciocínio para o diodo D2 que está

em corte e capacitor não-linear associado a ele, a amplitude de fonte senoidal não influencia na sua curva, ou seja, não interferiu na validade de pequenos sinais, como mostrado nas Figuras 7 e 8.

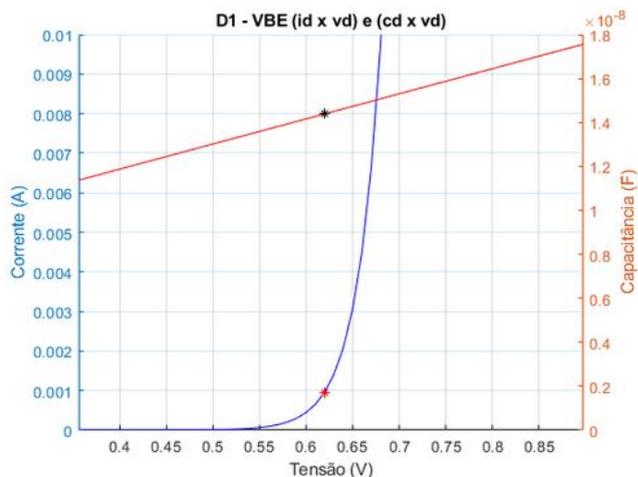


Figura 5 - Curva  $i_d \times v_d$  e  $c_d \times v_d$ . Os extremos do eixo horizontal coincidem com os limites mínimo e máximo para a amplitude da fonte senoidal de 1 V

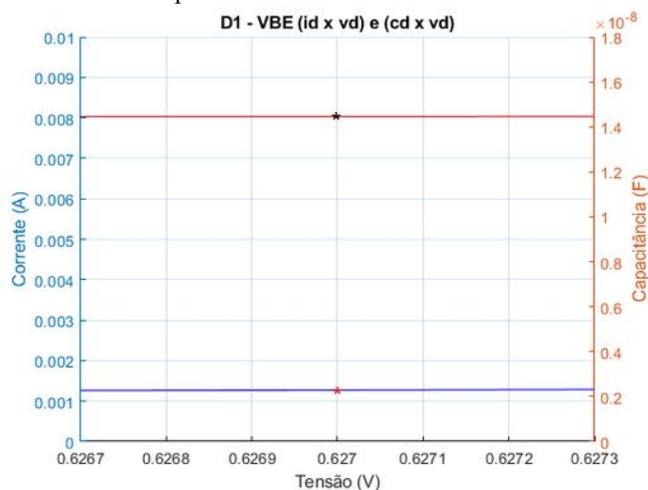


Figura 6 - Curva  $i_d \times v_d$  e  $c_d \times v_d$ . Os extremos do eixo horizontal coincidem com os limites mínimo e máximo para a amplitude da fonte senoidal de 1 mV

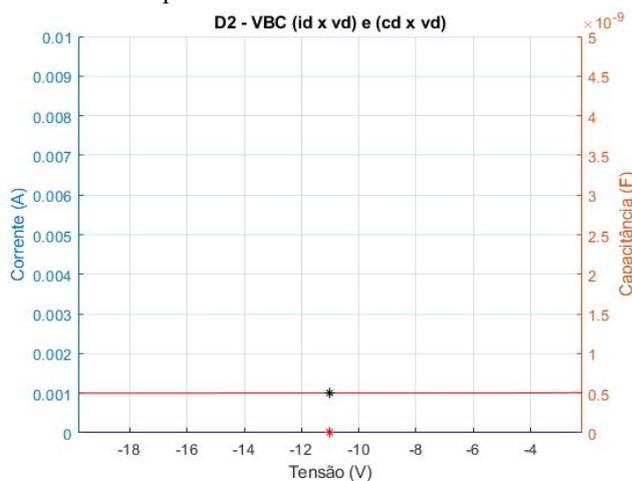


Figura 7 - Curva  $i_d \times v_d$  e  $c_d \times v_d$ . Os extremos do eixo

horizontal coincidem com os limites mínimo e máximo para a amplitude da fonte senoidal de 1 V

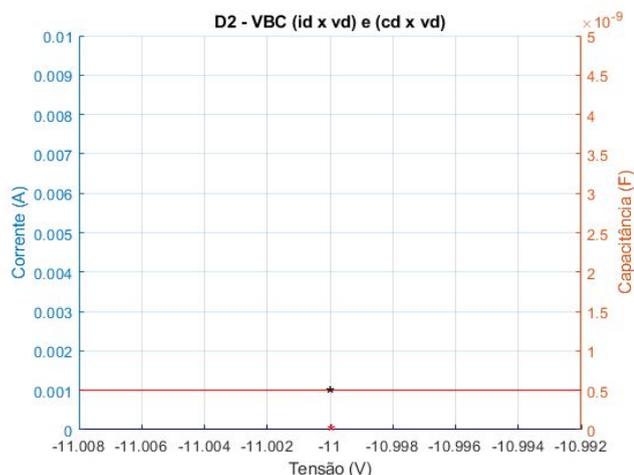


Figura 8 -Curva id x vd e cd x vd. Os extremos do eixo horizontal coincidem com os limites mínimo e máximo para a amplitude da fonte senoidal de 1 mV

Para verificação pelo segundo método, utilizam-se os gráficos da simulação em transitório da tensão sobre cada diodo. Se a forma de onda para os diodos forem senoidais, vale a análise de pequenos sinais. Se alguma das curvas estiver distorcida, não vale pequenos sinais. Podemos verificar pelo gráfico da Figura 9, que para o primeiro caso, cuja amplitude da fonte CA é 1mV, temos duas senoides validando pequenos sinais. Entretanto para o segundo caso, cuja amplitude da fonte CA é de 1V, temos uma das curvas senoidais distorcida, a qual não vale pequenos sinais.

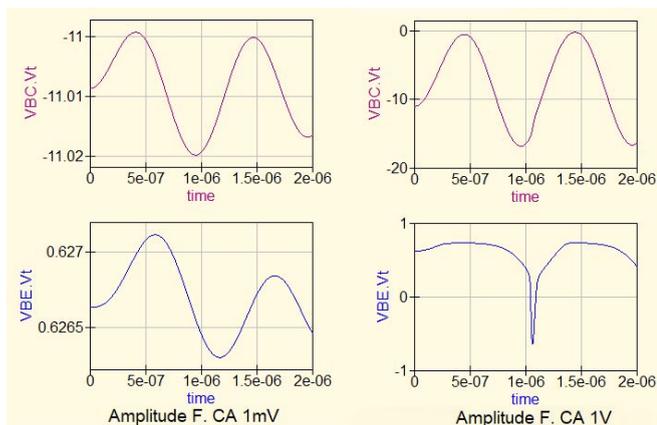


Figura 9 - Resultados de simulação de transitório

## V. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta dois métodos de verificação de pequenos sinais em um circuito amplificador emissor comum. Duas ferramentas distintas foram utilizadas. O primeiro método, utilizando o Matlab e o QUCS, baseou-se na análise das curvas dos elementos não lineares e o segundo através da ferramenta

QUCS baseando-se nas formas de ondas obtidas nos diodos a partir de uma simulação de transitório.

Concluimos que para ambos os métodos distintos de validação de pequenos sinais estudados, obtivemos resultados equivalentes para as mesmas situações impostas. Nota-se que para grandes amplitudes da fonte senoidal, valor de teste 1 V, não vale pequenos sinais devido à excursão do sinal extrapolar a região linear dos elementos não lineares. Todavia, para pequenos valores de amplitude da fonte CA, valor de teste 1 mV, vale pequenos sinais pois o sinal permanece na região linear. Por fim, comprovando a efetividade dos dois métodos apresentados.

Ambos métodos podem ser aplicados para circuitos contendo quaisquer elementos, sejam eles não lineares ou com memória. O primeiro método exige uma sequência de passos menos automatizada. Já o segundo método, apesar de apresentar uma execução mais automática, tem complexidade computacional maior por exigir o uso da análise de transitório, que demanda muito mais recursos computacionais que as análises CC e CA.

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação (FNDE).

## REFERÊNCIAS

- [1] MEHL, Ewaldo Luiz de Mattos. Simulação de circuitos eletrônicos em computadores. Engenharia elétrica UFPR, 2020. Disponível em: <<http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te236/apostilaPSpice.pdf>>. Acesso em: 06 de ago. de 2020.
- [2] ALEXANDER, Charles; SADIKU, Matthew. Fundamentos De Circuitos Elétricos. 5. ed. [S. L.]: McGraw Hill, 2013.
- [3] SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth Carless. Microeletrônica. 5. ed. [S. L.]: Prentice Hall Brasil, 2007.
- [4] JAHN Stefan. et al. Technical Papers. Qucs sourceforge, 2020. Disponível em: <<http://qucs.sourceforge.net/docs/technical/technical.pdf>>. Acesso em: 06 de ago. de 2020.