

Linearização em Torno da Análise em Regime Permanente Quase Periódico

José Eduardo da Silva, Eduardo Gonçalves de Lima
Group of Integrated Circuits and Systems (GICS) – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
joseduardo@ufpr.br

Resumo—O estudo de simulações é de extrema importância pois possibilita a observação do comportamento do circuito sem sua implementação física, além de testá-lo em situações extremas. Para otimizar o tempo de simulação de esquemáticos mais complexos, técnicas como a análise em Regime Permanente Quase Periódico (QPSS) e a Análise Periódica em Corrente Alternada (PAC), que se aplicam em circuitos de 2 tons foram desenvolvidas. No QPSS, pode-se explorar a simulação de circuitos em dois tons em instantes de tempo igualmente espaçados, não necessitando simular o circuito por todos instantes de tempo. No PAC, os valores das incógnitas precisam ser calculados a todo instante, e um dos tons sofre a linearização, e é realizada a superposição de uma simulação linear com uma não linear. Com isso, é possibilitado, através do PAC, uma simulação em 3 tons, onde na parcela não linear é utilizada o QPSS, em 2 tons, e na linearização, terceiro tom. Assim, o presente trabalho explora limitações ao tom adicionado na linearização, e foi possível se observar nos resultados que o tom adicionado deve ser periódico a um dos tons presentes na análise não linear, e também que o conceito de pequenos sinais deve ser obedecido no tom adicionado. Para comparação, foram utilizados os métodos do QPSS normal e o transitório, e confirmou-se que os valores obtidos com o PAC estão próximos aos observados no transitório e que estão próximos aos resultados que seriam obtidos com o QPSS sem linearização.

I. INTRODUÇÃO

Simulações são triviais no projeto de circuitos elétricos, pois permitem que o projetista estude o comportamento de seu projeto. Portanto, possibilita-se a correção de erros durante o projeto do esquemático e testam-se limites de funcionamento sem necessitar de um circuito real. Porém, com o aumento da complexidade do circuito e da magnitude das frequências adicionadas, os custos computacionais para a simulação de circuitos elevam-se. Assim, é necessário o desenvolvimento de métodos alternativos para simulação de circuitos, permitindo ao designer acompanhamento mais rápido do projeto,

realizando-se ajustes e melhorias de maneira mais assertiva [1].

O tom de uma fonte de excitação de um circuito pode ser considerado como uma alimentação senoidal, com amplitude e frequência que caracterizam tal tom. Circuitos podem apresentar fontes com um ou mais tons. Circuitos com dois tons apresentam um esquemático que é excitado por uma fonte de tensão com duas frequências e amplitudes diferentes entre si, similar a circuitos de radiofrequência, onde um sinal de entrada é somado através de um mixer a um sinal de menor amplitude e geralmente, de maior frequência. Essa união de sinais, causam distorções na forma de onda resultante, sendo esta distorção em sua envoltória ou portadora [2].

Assim, surgem técnicas de análise de circuitos de dois tons, a exemplo a análise em regime permanente quase periódico (QPSS) e a análise periódica em corrente alternada (PAC), que serão abordadas nesse trabalho.

O QPSS limita-se a análise não linear em dois tons, portanto trabalha-se com circuitos excitados por duas frequências ω_1 e ω_2 , e a linearização do circuito não é necessária, amostrando-se o sinal em instantes igualmente espaçados na menor das frequências [3]. No PAC, a linearização é necessária no tom de maior amplitude e no tom de menor amplitude não são consideradas harmônicas, e os valores das incógnitas do circuito, correntes e tensões nodais, necessitam ser conhecidas em todos instantes de tempo durante a simulação [4].

Portanto, esse trabalho tem como objetivo a exploração do método PAC utilizando-se o QPSS para a realização da porção não linear do método. E assim, é realizada a linearização do resultado proveniente do QPSS. Um tom é adicionado no circuito linearizado com frequência periódica em relação a uma das frequências utilizadas no QPSS para simplificar os cálculos realizando-se apenas uma análise linear com sua adição. Para comprovação, serão realizadas simulações do método do PAC, utilizando-se o QPSS para a parte não linear, que são comparadas com a simulação de transitório e a do QPSS sem linearização, considerando-se como amplitudes as somas dos tons utilizados no PAC.

$$I_{lin} = \begin{bmatrix} g_0 & 0 & \frac{g_2}{2} & \frac{-g_3}{2} & \dots & \frac{-g_{k-3}}{2} \\ 0 & g_0 & \frac{g_1}{2} & \frac{g_4}{2} & \dots & \frac{g_{k-2}}{2} \\ \frac{g_2}{2} & \frac{g_1}{2} & g_0 & \frac{-g_1}{2} & \dots & \frac{-g_{k-5}}{2} \\ \frac{-g_3}{2} & \frac{g_4}{2} & \frac{-g_1}{2} & g_0 & \dots & \frac{g_{k-4}}{2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ \frac{-g_{k-3}}{2} & \frac{g_{k-2}}{2} & \frac{-g_{k-5}}{2} & \frac{g_{k-4}}{2} & 0 & g_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{k-2} \sin[(\omega_2 - K\omega_1)t] \\ v_{k-1} \cos[(\omega_2 - K\omega_1)t] \\ \vdots \\ v_4 \sin[(\omega_2 - 1\omega_1)t] \\ v_5 \cos[(\omega_2 - 1\omega_1)t] \\ v_0 \sin(\omega_2 t) \\ v_1 \cos(\omega_2 t) \\ v_2 \sin[(\omega_2 + 1\omega_1)t] \\ v_3 \cos[(\omega_2 + 1\omega_1)t] \\ \vdots \\ v_{k-4} \sin[(\omega_2 + K\omega_1)t] \\ v_{k-3} \cos[(\omega_2 + K\omega_1)t] \end{bmatrix} \quad (7)$$

Assim, a análise linear é realizada com um método qualquer de análise de circuitos lineares, nesse trabalho utilizando-se o balanço harmônico (HB).

No HB, as incógnitas de elementos dinâmicos como indutores e capacitores são calculadas com o auxílio de uma matriz Jacobiana desses elementos, que multiplicam o vetor de senos e cossenos da análise, conforme:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \omega_1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\omega_1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2\omega_1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2\omega_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & K_1\omega_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_1\omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Portanto, essa matriz também sofre alterações, de acordo com (8), para englobar a maior frequência provinda da análise não linear e chamada de ω_1 na matriz, resultando em:

$$\Omega_{2tons} = \begin{bmatrix} 0 & (\omega_2 - K\omega_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -(\omega_2 - K\omega_1) & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & (\omega_2 - \omega_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & -(\omega_2 - \omega_1) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & \omega_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -\omega_2 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (\omega_2 + \omega_1) & \dots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\omega_2 + \omega_1) & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & (\omega_2 + K\omega_1) & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\omega_2 + K\omega_1) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

IV. RESULTADOS

Para validação do método, utilizou-se o circuito apresentado na Fig. 1, que representa de maneira genérica um amplificador de potência com arquitetura em envelope tracking [7].

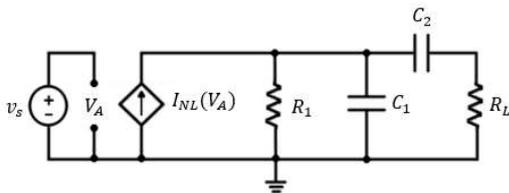


Fig. 1. Circuito de testes.

Na Fig. 1, o circuito é alimentado por uma fonte de tensão de três tons, onde V_1 , V_2 e V_3 são variados nas simulações, $f_1=1$ GHz, $f_2=1,01$ GHz, e $f_3=1,01$ GHz, onde f_2 e f_3 são periódicas entre si. $R_1 = 1$ k Ω , $R_L = 50$ Ω , $C_1=10$ pF e $C_2=1$ μ F. A fonte de corrente controlada não linear tem sua equação dada por

$$I_{NL} = \frac{I_{sat}(V_A)}{\left(1 + \frac{V_{sat}}{|V_A|}\right)^s}, \quad (10)$$

onde a corrente de saturação $I_{sat} = 0,1$ A, a tensão de saturação $V_{sat}=1,8$ V e o coeficiente de amortecimento $s = 5$.

Os algoritmos para a simulação do circuito utilizando os métodos descritos no presente trabalho foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação Python, utilizando-se das bibliotecas para computação científica Numpy, Scipy e Matplotlib. As equações não lineares foram solucionadas com a função “fsolve” disponível na biblioteca Scipy, que auxilia a encontrar a raiz das equações a partir de uma estimativa inicial.

Os testes foram realizados de maneira a confirmar a teoria exposta, ou seja, a realização do PAC utilizando-se o QPSS para a parcela não linear com V_1 e V_2 e considerando 10 harmônicas para ambos os tons. Com esse resultado foi realizada a análise do circuito linearizado com o HB considerando-se 1 harmônica e utilizando-se a amplitude V_3 , e finalmente foi realizada a superposição das duas análises.

Para comparação, foram obtidas a tensão sobre o capacitor C_1 de transitório e o QPSS, onde o primeiro tom é o maior tom da análise não linear, e o menor tom é a soma dos tons V_2 e V_3 , em outras palavras, V_2 no QPSS único é a soma das amplitudes V_2 e V_3 do PAC. A análise é feita em comparação ao transitório a fim de comprovar que o ponto encontrado pelo QPSS está próximo do ponto que é calculado utilizando-se o transitório.

Fixou-se $V_1=1$ V, $V_2=0,99$ V e $V_3=0,01$ V. Os resultados obtidos com essa simulação são apresentados na Fig. 2.

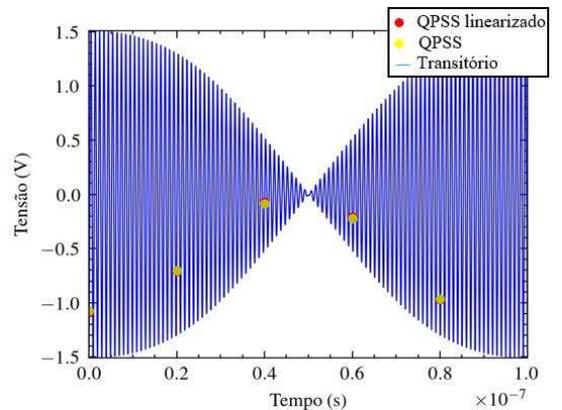


Fig. 2. Simulação com amplitudes $V_1=1$ V, $V_2=0,99$ V e $V_3=0,01$ V

Verifica-se uma acurácia dos resultados do PAC quando comparados com o transitório e o QPSS único.

Na Fig. 3, é apresentada a simulação do circuito considerando um valor maior no tom a sofrer a linearização no HB.

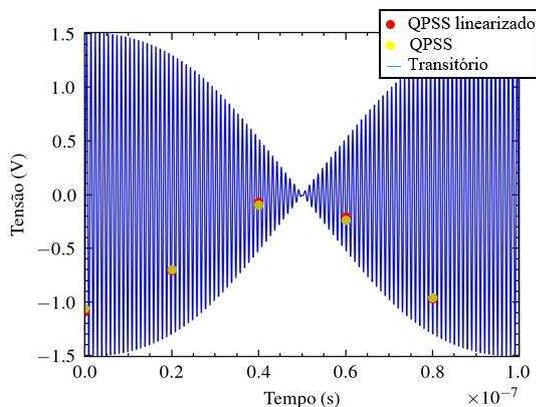


Fig. 3. Simulação com amplitudes $V_1=1 V$, $V_2=0,98 V$ e $V_3=0,02 V$

Também é possível se observar valores próximos aos esperados pelas simulações quando comparadas as referências, portanto também é validado o método. Observa-se um pequeno deslocamento no QPSS linearizado quando comparado com o resultado obtido na Fig. 2, sendo hipoteticamente essa diferença aumentada pelo aumento da amplitude de pequenos sinais do PAC.

Portanto, elevou-se a amplitude $V_3=0,03 V$, e o resultado é apresentado na Fig. 4.

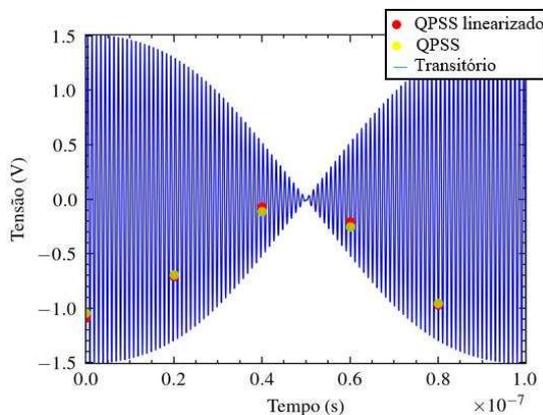


Fig. 4. Simulação com amplitudes $V_1=1 V$, $V_2=0,97 V$ e $V_3=0,03 V$

Observa-se que a diferença para o QPSS único aumentou. Portanto, pode-se observar que com a elevação do tom considerado como pequenos sinais, aumenta-se o erro no circuito linearizado.

V. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos, nota-se que é possível obter uma resposta significativamente satisfatória do método com a linearização da resposta provinda do

QPSS, onde se considera dois tons, e adicionando-se mais um tom através do PAC.

Isso abre possibilidades para a exploração de simulação de circuitos com 3 tons com duas frequências periódicas entre si e com os tons da análise do QPSS sendo de amplitudes maiores que da parcela linearizada e tida como pequenos sinais, sem necessariamente realizar os cálculos das incógnitas do circuito em cada momento da simulação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e a Fundação Araucária de Apoio e Desenvolvimento Técnico Científico e Tecnológico do Estado do Paraná sobre o Programa PIBIS UFPR 2021.

REFERÊNCIAS

- [1] G. D. Vendelin, A. M. Pavio, M. Rudolph, U. L. Rohde, Microwave Circuit Design Using Linear and Non-linear Techniques. Wiley, 2021.
- [2] MASS, S., Non-linear Microwave and RF Circuits, Second Edition ed. www.artechhouse.com, 2003.Referência 4.
- [3] Chen, J.; Feng, D.; Philips, J.; Kundert, K. Simulation and Modeling of Intermodulation Distortion in Communication Circuits. Cadence Design Systems, San Jose, California, USA, 1999.
- [4] MOURA, D. M. S.; NATALINO, C. G. ; LIMA, E. G. Linearização de Circuitos Eletrônicos em Torno de Regime Permanente a Zero, Um e Dois Tons. In: Seminários de Microeletrônica do Paraná, 2019, Curitiba. Anais do SeMicro-PR, 2019.
- [5] Kundert, K. S.; White, J.; S-Vicentelli, A. A Mixed Frequency-Time Approach for Distortion Analysis of Switching Filter Circuits. IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 24, No. 2. April, 1989, pp. 443–451.
- [6] SCHUARTZ, L., SANTOS, E. L., LEITE, B., MARIANO, A. A., LIMA, E. G. Envelope methods Applied to simulation of Power Amplifiers with Efficiency Enhancement Techniques. EMICROSIM, 2018. Proceedings of EMICROSIM 2018.
- [7] SILVA, J. E., LIMA, E. G. Quasi-Periodic Steady-State and Periodic AC Applied for One Large and One Small Signal Tone. In: XXII Microelectronics Students Forum, 2022