



Métodos de Envoltória Aplicados à Simulação de Circuitos com Duas Portadoras

Caio G. Natalino¹, Eduardo G. Lima²

^{1,2} *Group of Integrated Circuits and Systems (GICS)* – Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
caio.natalino@ufpr.br

Resumo — No projeto de sistemas modernos de comunicações móveis, a assistência de CAD ("computer aided-design") para as simulações dos altos valores de frequências envolvidos em circuitos de radiofrequência (RF) é de grande importância para os projetistas. Quando se manipula circuitos estimulados a dois tons, a utilização dos métodos tradicionais se torna ainda mais restrita, como por exemplo o método de simulação de transitório, o qual exige um enorme esforço computacional. Os métodos de envoltória, ao combinarem análises no domínio do tempo e da frequência, superam as severas restrições impostas pelas simulações numéricas envolvidas aos métodos tradicionais de circuitos eletrônicos neste tipo de projeto. Este artigo aborda a aplicação do método de envoltória para duas portadoras distintas, buscando estender o estudo de métodos de análise de circuitos eletrônicos estimulados a dois tons para amplificadores de banda-dupla concorrente. Foram estudados dois métodos de análise dois-tons – Quase-Periodic Steady-State (QPSS) e Mapeamento Artificial de Frequências – a fim de aplicar seu funcionamento para um método de envoltória e validá-lo para transmissões com duas portadoras de sinal.

Palavras Chave: Método de Envoltória, Artificial Frequency Mapping, Quasi-Periodic Steady-State, Simulação RF.

I. INTRODUÇÃO

O estágio de simulação e testes de respostas em projetos de circuitos eletrônicos é uma etapa fundamental para garantir a eficiência e os resultados desejados antes de sua fabricação e implementação. O desenvolvimento de amplificadores de potência de banda dupla concorrente requer simulações numéricas que acabam por restringir os métodos numéricos tradicionais para a análise de circuitos eletrônicos, uma vez que se tornam ineficientes em certos métodos pela coexistência de duas frequências diferentes e pelo fato de que eles podem exigir alto nível de processamento.

O método do equilíbrio harmônico se limita à análise em regime estacionário, tornando-se inadequado a esta aplicação, enquanto o método de transitório satisfaz a necessidade de simulação deste tipo de circuito, porém exige um enorme esforço computacional [1], principalmente dependente das frequências aplicadas ao circuito eletrônico para uma amostragem mais adequada do sinal. Já o método conhecido como "Quasi-Periodic

Steady-State" limita-se à análise com a presença de duas frequências únicas, não sendo possível analisar circuitos considerando bandas de frequência. Dessa forma, outras técnicas numéricas de análise foram propostas para tal aplicação, as quais abordam o circuito considerando bandas de frequência, diminuem a taxa de processamento computacional exigida e são conhecidas por métodos de envoltória.

Esse trabalho, então, contribui na simulação de circuitos amplificadores de potência de banda-dupla concorrente para transmissão com duas portadoras de sinal, comprovando o funcionamento das simulações escolhidas, a partir das análises dos métodos matemáticos associadas às condições de aplicação. A Seção II deste artigo apresenta brevemente uma revisão acerca dos métodos de análise dois-tons estudados, a Seção III discorre sobre os fundamentos principais do método de envoltória, a Seção IV comenta sobre a metodologia utilizada no desenvolvimento do artigo, a Seção V resume os resultados e discussões do trabalho e a Seção VI aborda as conclusões finais do estudo realizado.

II. MÉTODOS DE ANÁLISE DE CIRCUITOS ESTIMULADOS A DOIS TONS

A análise de transitório, comumente usada na simulação de circuitos elétricos em regime não-linear, gera alto consumo computacional para altas frequências, devido à quantidade de cálculos e iterações [1]. Dessa forma, recorre-se a outros métodos de análise válidos quando é necessário trabalhar nestas condições. O método de Mapeamento Artificial de Frequências, em comparação com outros métodos [2], se apresenta mais eficiente, ao convergir resultados em circuitos com estímulos de grandes e pequenos sinais e exigir menor processamento computacional que a simulação de transitório.

A. Equilíbrio Harmônico

No método do Equilíbrio Harmônico (HB), a resposta de um circuito não-linear alimentado por um sinal senoidal é formada por uma combinação linear de amplitudes constantes no tempo de componentes senoidais, cossenoidais e em corrente contínua (CC). Ele se baseia na resolução de circuitos em grandes sinais, a partir da transformação de sinais do domínio do tempo em um conjunto de equações independentes entre si no domínio da frequência [3].

Quando o circuito elétrico é excitado por apenas um tom, as tensões e correntes são periódicas e o circuito possui uma componente na frequência fundamental e suas harmônicas em múltiplos dessa fundamental [4]. Já para uma excitação de dois tons, é visto que há o aparecimento de produtos de intermodulação entre as frequências de excitação, portanto a passagem do problema para o domínio da frequência, para posterior resolução, não pode ser feita da mesma forma que a realizada no estímulo a 1 tom, uma vez que esses produtos devem ser considerados. É necessário trabalhar com a frequência de batimento do circuito, que é a frequência mais alta onde os dois tons possuem harmônicas e, a partir de conhecida, a análise é realizada como uma simulação de um tom [2].

Nesta condição, quanto mais harmônicas se deseja considerar na simulação, a transformada do domínio do tempo para o domínio da frequência se torna mais complexa e o problema mais inviável [2]. Assim, o método Mapeamento Artificial de Frequências é utilizado como alternativa, pois procura contornar esse problema mapeando as frequências de excitação.

B. Mapeamento Artificial de Frequências

É possível, para certos tipos de não-linearidades algébricas, solucionar um problema de estímulo a dois tons a partir de um mapeamento das frequências de oscilação em que os produtos de intermodulação são igualmente espaçados [4]. Nesse caso, os procedimentos de resolução do problema são executados similarmente ao caso de um único tom, abrangendo a condição de existência das duas frequências principais de excitação, suas inter-relações e também o número de produtos adotados para a simulação. Uma das vantagens do Mapeamento Artificial de Frequências é sua aplicabilidade para problemas com um grande número de excitações não-comensuráveis [4], uma vez que na análise do circuito é utilizada uma transformação para o domínio da frequência considerando-se apenas uma frequência de excitação que represente as relações entre as outras efetivamente existentes. Já uma desvantagem é a perda de significado físico do resultado na passagem para o domínio da frequência, logo deve ser tomada certa atenção para garantir que as derivadas presentes nas equações de capacitores e indutores sejam realizadas considerando-se as frequências originais [4].

Neste método, as componentes harmônicas dos dois tons de excitação são substituídas por uma frequência artificial de mapeamento ω_k e componentes de tensão, carga e corrente tornam-se funções de ω_k [2]. Assim, é realizada uma transformada alternativa e multidimensional do domínio do tempo para o domínio da frequência, já que a apresentada no método do equilíbrio harmônico é incompatível a essa nova configuração [4]: para um conjunto de frequências conforme expresso na equação (1), em que $0 \leq m \leq M$ e $|n| \leq N$, onde $m \neq 0$ quando $n < 0$, os coeficientes $s_1 = 1$ e s_2 , dado por (2),

$$\omega = m * \omega_1 + n * \omega_2 \quad (1)$$

$$s_2 = \frac{\omega_1}{\omega_2 * (2 * N + 1)} \quad (2)$$

são multiplicados respectivamente por $m\omega_1$ e $n\omega_2$, onde visa-se obter um conjunto uniforme de frequências mapeadas artificialmente.

C. Quasi-Periodic Steady-State

A presença de distorções harmônicas nas simulações afeta a demanda de cálculo em circuitos em que um grande número de ciclos precisa ser executado numa análise de transitório. Ademais, para filtros banda-base, os produtos de intermodulação requerem mais atenção que a distorção harmônica em si, uma vez que se aplica dois tons de entrada, ambos dentro da largura de banda do filtro, de modo que os tons de distorção de intermodulação também acabam dentro da banda [5]. Visando reduzir esse problema de processamento nos simuladores, apresentou-se o método de análise *QPSS*, ou *Quasi-Periodic Steady-State*, para a aplicação de dois tons.

No método em questão, considera-se que o sinal é composto por uma somatória de senos e cossenos que variam com a menor das duas frequências de excitação e as amplitudes desses senos e cossenos também variam no tempo e são periódicas na maior frequência, como apresentado na equação (3). Dessa forma, aborda-se o problema considerando as duas frequências de oscilação distintas e seus efeitos separadamente, onde H é o número de harmônicas consideradas no problema.

$$x(t) = X_0(t) + \sum_{k=1}^H [X_{k\text{sen}}(t) * \text{sen}(k * \omega_2 * t) + X_{k\text{cos}}(t) * \text{cos}(k * \omega_2 * t)] \quad (3)$$

Considerando que o problema seja amostrado $2H + 1$ vezes igualmente espaçado no tempo, no período da maior frequência, estas amplitudes passam a ser vistas como constantes, e assim, pode-se fazer uma análise similar a de equilíbrio harmônico com estímulo a um tom. Porém, como não sabe-se os valores destas amplitudes desde o primeiro momento, após manipulações algébricas, temos que a solução da análise é encontrada a partir da equação (4), onde a matriz A é a matriz transformada tempo-frequência do problema, considerando a menor das duas frequências de oscilação (a qual varia os senos e cossenos da somatória que representa o sinal) e a matriz B é a mesma transformada, porém um ciclo no período da maior das duas frequências à frente ao considerado na matriz A .

$$\begin{bmatrix} x(T_1) \\ x(T_2) \\ x(T_3) \\ \dots \\ x(T_{2*H+1}) \end{bmatrix} = [A] * [B] * \begin{bmatrix} x(0) \\ x(T_1) \\ x(T_2) \\ \dots \\ x(T_{2*H}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para garantir e verificar que o sistema esteja operando em regime permanente, obtendo assim os valores das amplitudes de senos e cossenos do problema, que definem a resposta do circuito, o resultado da equação (4) deve ser igual aos resultados obtidos a partir da resolução de transitórios de um ciclo no período da maior das duas

frequências para cada uma das amplitudes da somatória, partindo-se dos valores anteriores.

O *QPSS* é uma generalização da análise "*Periodic Steady-State*", o qual afirma que existe apenas uma frequência fundamental e todas as frequências presentes no circuito são múltiplas inteiras desta frequência fundamental, enquanto no *QPSS*, podem ser incluídas várias frequências fundamentais. O benefício da análise *QPSS* é que o tempo necessário depende apenas do tamanho do circuito e o número de componentes de frequência que devem ser calculados, e não mais dos valores de frequências escolhidos para as fundamentais [5].

III. MÉTODO DE ENVOLTÓRIA

Com a necessidade de se trabalhar com uma ou mais bandas de frequência, apresentou-se análises conhecidas por métodos de envoltória, em que as amplitudes de senos e cossenos também variam no tempo, como mostrado em (5). Quando a frequência da portadora é muito maior que a largura de banda da envoltória, grande parte do espectro é zero, portanto se faz possível a realização de uma amostragem do sinal a ser analisado pela frequência da envoltória, executando uma análise de equilíbrio harmônico em cada ponto amostrado, processo que se mostra mais eficiente que o método de transitório [4], uma vez que uma das dimensões do problema é substituída por uma sequência de análises.

$$x(t) = A(t) * \cos[(\omega_1 * t) + \phi(t)] \quad (5)$$

O método consiste em uma sequência de simulações igualmente espaçadas no tempo com uma variação temporal maior do que as utilizadas nos métodos como o de transitório, sendo que em cada uma dessas simulações, é realizada uma análise de equilíbrio harmônico, com alterações no comportamento dos elementos dinâmicos. Assim, a cada instante, obtém-se uma amplitude de seno e cosseno de modo que ao final da simulação, a resposta seja obtida, que é um conjunto de amplitudes de senos e cossenos que variam no tempo. Na presença de capacitores no circuito, a sua equação de corrente deve ser modificada de modo que inclua a sua dependência com valores anteriores havendo a variação temporal das amplitudes de senos e cossenos, ou seja, a derivada de sua equação característica que representa a dinâmica do componente também envolverá as amplitudes, o que não acontecia no Equilíbrio Harmônico com Mapeamento Artificial de Frequências, ou no *Quasi-Periodic Steady-State*. A equação da corrente dos capacitores a ser considerada nas análises é apresentada na equação (6).

$$i_c(t) = C \frac{dV_0(t)}{dt} + \left[C \frac{dV_{1sen}(t)}{dt} - C\omega_0 V_{1cos}(t) \right] * \sin(\omega_0 t) + \left[C \frac{dV_{1cos}(t)}{dt} - C\omega_0 V_{1s}(t) \right] * \cos(\omega_0 t) \quad (6)$$

Na presença de dois tons de excitação no circuito, com o fenômeno dos produtos de intermodulação, sabe-se que o equilíbrio harmônico deixa de fornecer resultados precisos, necessitando que o usuário recorra a métodos de apoio, como o Mapeamento Artificial de Frequências para a

transformação tempo-frequência considerando ambas as frequências e suas inter-relações de forma que a simulação seja igualmente espaçada no tempo. Assim, é necessária uma aplicação deste método em cada simulação na sequência de simulações envolvida no método de envoltória apresentado, sabendo-se que as amplitudes de senos e cossenos variam no tempo.

IV. METODOLOGIA

Para a investigação dos métodos de análise com estímulos a dois tons, bem como o método de envoltória para circuitos com duas portadoras distintas, utilizou-se o circuito apresentado na Figura 1, ao qual insere-se a não linearidade pela fonte de corrente controlada por tensão descrita pela equação (7).

$$f_{NL}[VA] = \frac{I_{sat} * \text{sign}(VA)}{\left(1 + \left(\frac{V_{sat}}{|VA|}\right)^s\right)^{1/s}} \quad (7)$$

Os parâmetros utilizados foram $I_{sat} = 0,1$ A, $V_{sat} = 1,8$ V, $s = 5$, $C_1 = 10$ pF, $C_2 = 1$ μ F, $R_1 = 1$ k Ω , $R_L = 50$ Ω , e V_s é a fonte de tensão senoidal com estímulos a dois tons. Utilizou-se 1 GHz e 2,5 GHz e as amplitudes de cossenos iguais a $A_1 = 1,8$ V e $A_2 = 0,9$ V, respectivamente. A metodologia utilizada resumiu-se em detalhar a resolução do circuito, apresentando e confrontando os resultados numéricos obtidos a partir do *software* Matlab® para cada método estudado.

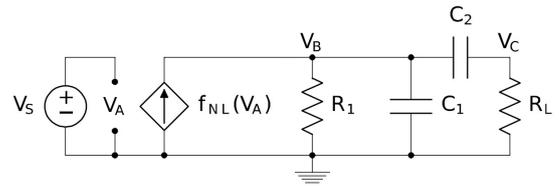


Figura 1. Circuito teste utilizado nas simulações.

V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando que as altas frequências adotadas em projetos de circuitos de radiofrequência impõem desafios para os simuladores analógicos tradicionais, os métodos de envoltória e ambientes de simulação dedicados para portadoras RF se mostram importantes para a etapa de análise e simulação destes circuitos.

Porém, ao entrarmos no campo de duas portadoras de sinal, isto é, a presença de duas bandas de frequência distintas na análise, o método de envoltória também necessita sofrer adaptações para que seus resultados continuem precisos e a análise seja feita de forma eficiente.

Ao desenvolver o estudo, percebeu-se que o fato das amplitudes do sinal variarem no tempo, nos métodos de envoltória, o método QPSS, que já possui amplitudes periódicas no tempo nas equações de resposta do circuito, não se mostra uma opção adequada para a aplicação proposta.

Assim, o método do Mapeamento Artificial de Frequências revela-se um bom método de análise a ser

implementado nas iterações da simulação de um circuito com duas portadoras, uma vez que ele atende às condições de bandas distintas e é mais eficiente computacionalmente que aplicar-se uma análise de transitório a cada simulação igualmente espaçada no tempo, a qual, em determinadas situações, torna-se inviável para o projeto.

Na Figura 2, apresenta-se a convergência de valores entre a simulação de transitório e a realizada utilizando o Mapeamento Artificial de Frequências, na presença de estímulos a dois tons. Ambas as análises forneceram os mesmos resultados, diferenciando-se no consumo computacional exigido: em três vezes isoladas, processou-se, a partir de um computador portátil pessoal comum com sistema operacional Microsoft Windows 10 Home® (2019) com processador com base em x64 Intel® Core™ i5-5200U CPU 2.20GHz, 30000 amostras do sinal no tempo e os tempos médios da simulação para cada uma das simulações foram de 46,46277 segundos para implementação da análise de transitório e 0,94407 segundos para implementação da análise com Mapeamento Artificial de Frequências, ambas no *software* Matlab®, comprovando a eficiência do segundo método em relação à simulação transitiente.

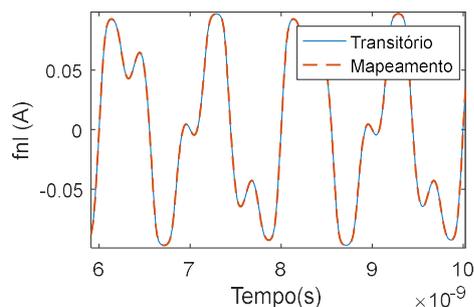


Figura 2. Comparação de respostas dos métodos Transitório e Equilíbrio Harmônico com Mapeamento Artificial de Frequências.

Dessa forma, implementa-se o Mapeamento Artificial de Frequências para as análises de equilíbrio harmônico envolvidas no Método de Envoltória, a fim de compatibilizar o problema para a consideração de duas bandas de frequências distintas. O resultado da simulação do método é apresentado na Figura 3.

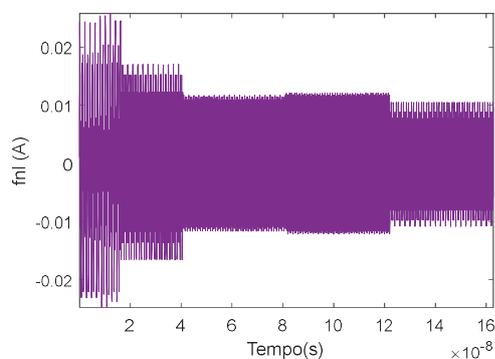


Figura 3. Resposta do Método de Envoltória para um Amplificador de Potência de Banda Dupla Concorrente.

Na Figura 4, mostra-se um detalhe da curva apresentada, visando a exposição mais clara das duas portadoras variando lentamente no tempo, nas amplitudes dos senos e cossenos.

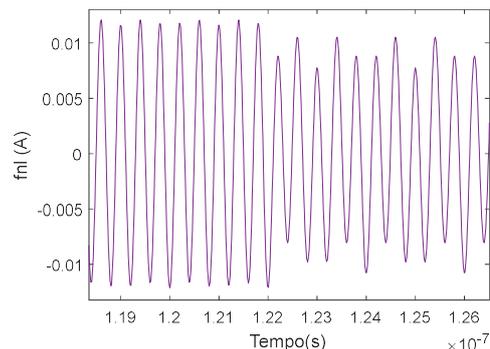


Figura 4. Resposta do Método de Envoltória para um Amplificador de Potência de Banda Dupla Concorrente (Detalhe).

VI. CONCLUSÃO

O estudo em questão contribuiu para uma melhor compreensão dos dois métodos de análise de circuitos estimulados a dois tons e suas aplicações e funcionalidades, bem como os princípios dos métodos de envoltória. A partir deste artigo, foi possível identificar quais destes métodos de simulação de circuitos RF podem ser utilizados para a aplicação escolhida e, desta forma, realizar simulações mais eficientes, o que com certeza fornece insumos para projetistas de eletrônica analógica, mais especificamente que trabalham com transmissão de banda dupla.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

- [1] SCHUARTZ, L.; SANTOS, E. L.; LEITE, B. R. B. A.; MARIANO, A. A.; LIMA, E. G.. **Envelope Methods Applied to Simulation of Power Amplifiers with Efficiency Enhancement Techniques**. In: 33rd South Symposium on Microelectronics, 2018, Curitiba. Proceedings of the 33rd South Symposium on Microelectronics, 2018.
- [2] NATALINO, C.; MOURA, D., LIMA, E.. **Two-tone Analysis Methods Applied to RF Circuits Simulation**. In: 19th Microelectronics Students Forum, 2019, São Paulo.
- [3] NATALINO, C. G.; LIMA, E. G.. **Ambientes de simulação para a análise de circuitos com estímulos a dois tons**. In: 10ª SIEPE – Semana Integrada de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2018, Curitiba. Anais do EINTI-EVINCI – 2018, 2018. p. 401-401.Referência 4.
- [4] MAAS, S.. **Nonlinear Microwave and RF Circuits**, Artech House, 2003.
- [5] KUNDERT, K.. **Simulating Switched-Capacitor Filters with SpectreRF**. *The Designer's Guide Community*. Disponível em: <https://designers-guide.org/analysis/sc-filters.pdf>. Último acesso: 09/08/2019.