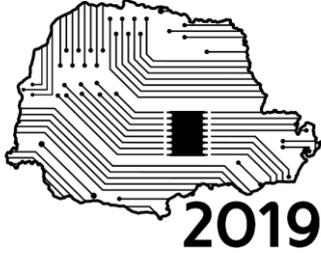


SeMicro-PR



Linearização de Circuitos Eletrônicos em Torno de Regime Permanente a Zero, Um e Dois Tons

Dhessica M. S. de Moura, Caio G. Natalino, Eduardo G. de
Lima

Grupo de Concepção de Circuitos e Sistemas Integrados
Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil
dhessica.moura@ufpr.br

Resumo - Na aplicação da análise de circuitos eletrônicos em sistemas não lineares, as amplitudes de tensões e correntes relacionam-se através de um sistema algébrico não linear. Um dos métodos utilizados para contornar as dificuldades de resolver um sistema algébrico não linear é a linearização do circuito em torno do ponto de operação originado na análise de corrente contínua. Porém, ao empregar essa técnica, as influências das distorções harmônicas são desprezadas, o que não é um problema para circuitos onde as variações nas amplitudes são pequenas. Entretanto, quando tratamos de circuitos nos quais as variações de amplitudes são maiores, as ondulações harmônicas geradas pelo sistema afetam diretamente os valores das amplitudes de tensões e correntes do circuito. Então, partindo de um circuito teste de um amplificador de potência no qual o componente crítico é uma fonte não linear de corrente controlada por tensão, e mirando em obter respostas com maior nível de precisão, este estudo explora outras duas abordagens de linearização. Na primeira abordagem, o circuito é linearizado em torno da resposta em regime permanente a um tom, obtida através do Equilíbrio Harmônico (HB). O método resultante, conhecido na literatura como Análise Periódica em Corrente Alternada (PAC), quando aplicado a dois tons considera as distorções harmônicas provenientes de apenas um tom. Na outra abordagem, o circuito é linearizado em torno da resposta em regime permanente a dois tons, obtida através do HB com Mapeamento Artificial de Frequência (AFM). O método resultante, de uso não comum na literatura, quando aplicado a três tons considera as distorções harmônicas provenientes de apenas dois.

I. INTRODUÇÃO

Harmônicas são ondas com frequência múltipla da frequência fundamental e surgem devido às cargas não lineares existentes num circuito, então uma propriedade de um sistema não linear é a geração de harmônicas. Na análise de circuitos em pequenos sinais, as harmônicas geradas não impactam na precisão das respostas de uma linearização em

torno do valor obtido pela análise de corrente contínua (CC). Entretanto, quando é realizada a linearização em torno da resposta de CC, para grandes sinais, não é possível garantir a coerência do resultado, pois neste caso as harmônicas geradas pelo sistema influenciam nas amplitudes de tensão e corrente do circuito.

Todos os métodos aplicados nesse estudo têm o propósito de obter valores finais de tensão e corrente que respeitam a interferência harmônica no circuito, ou seja, resultados coerentes e com maior nível de precisão.

II. TÉCNICAS DE LINEARIZAÇÃO PARA CIRCUITOS ELETRÔNICOS

A. Linearização de circuitos eletrônicos

A técnica de linearização é algo passível de generalização, a qual pode ser aplicada para diferentes métodos de análise de circuitos eletrônicos. Via de regra, para linearizar um componente não linear é necessário derivar a equação deste componente em relação à trajetória inicial. A equação 1 exemplifica a linearização de uma função não linear de uma incógnita [3].

$$f_{NL}(t) = \left. \frac{df_{NL}(X)}{dX} \right|_{X=X_0} \cdot (X - X_0) \quad (1)$$

Onde $X_0(t)$ é a trajetória inicial.

B. Trajetórias abordadas

Embora o processo de linearização da equação não linear seja generalizado os passos seguintes dependem do método utilizado e da forma como as tensões e correntes do circuito variam no tempo. Esta pesquisa explorou as particularidades da linearização de três trajetórias diferentes.

Para os três casos abaixo $x(t)$ é a função, de tensão ou corrente, a ser utilizada na linearização.

- Linearização em torno da trajetória obtida na análise de corrente contínua (CC): A equação 2

exemplifica que para o caso de uma análise em torno da resposta de corrente contínua $x(t)$ retorna um valor constante.

$$x_{CC}(t) = [x_0] \cdot 1 \quad (2)$$

- Linearização em torno da trajetória obtida na aplicação do método do equilíbrio harmônico (HB): A equação 5 exemplifica que para a aplicação do método HB de um tom e com truncamento de 4 harmônicas, $x(t)$ retorna um vetor de amplitudes X_{HB} multiplicando o vetor $Cont_{HB}$ que é composto por 1 na primeira posição e pelas contribuições de seno e cosseno de cada harmônica nas posições subsequentes do vetor. Sendo:

$$\overrightarrow{X_{HB}} = [x_0 \ x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6 \ x_7 \ x_8] \quad (3)$$

$$\overrightarrow{Cont_{HB}} = [1 \ \text{sen}(w_1 \cdot t) \ \text{cos}(w_1 \cdot t) \ \text{sen}(2w_1 \cdot t) \ \text{cos}(2w_1 \cdot t) \ \text{sen}(3w_1 \cdot t) \ \text{cos}(3w_1 \cdot t) \ \text{sen}(4w_1 \cdot t) \ \text{cos}(4w_1 \cdot t)]^T \quad (4)$$

$$\overrightarrow{x_{HB}(t)} = \overrightarrow{X_{HB}} \cdot \overrightarrow{Cont_{HB}} \quad (5)$$

- Linearização em torno da trajetória obtida na aplicação do método do equilíbrio harmônico (HB) utilizando o Mapeamento Artificial de Frequência (AFM): A equação 8 exemplifica que para a aplicação do método HB em conjunto com o método do AFM para dois tons e com truncamento em duas harmônicas, $x_{HBAM}(t)$ retorna a multiplicação de um vetor X_{HBAM} de amplitudes por outro vetor, $Cont_{HBAM}$, que é composto por 1 na primeira posição e pela contribuição de senos e cossenos com coeficientes variando entre $m \cdot w_1 + n \cdot w_2$, sendo que $|m| \leq M$ e $|n| \leq N$, onde $0 < m < M$ e $n = 0 \pm 1, 2 \dots N$ e para o caso específico de $m = 0, n \geq 0$ [3]. Sendo:

$$\overrightarrow{X_{HBAM}} = [x_0 \ x_1 \ x_2 \ \dots \ x_{24}] \quad (6)$$

$$\overrightarrow{Cont_{HB}} = [1 \ \text{sen}(w_2 \cdot t) \ \text{cos}(w_2 \cdot t) \ \text{sen}(2w_2 \cdot t) \ \text{cos}(2w_2 \cdot t) \ \text{sen}(w_1 - 2w_2) \ \text{cos}(w_1 - 2w_2) \ \text{sen}(w_1 - w_2) \ \text{cos}(w_1 - w_2) \ \text{sen}(w_1) \ \text{cos}(w_1) \ \text{sen}(w_1 + w_2) \ \text{cos}(w_1 + w_2) \ \text{sen}(w_1 + 2w_2) \ \text{cos}(w_1 + 2w_2) \ \text{sen}(2w_1 - 2w_2) \ \text{cos}(2w_1 - 2w_2) \ \text{sen}(2w_1 - w_2) \ \text{cos}(2w_1 - w_2) \ \text{sen}(2w_1) \ \text{cos}(2w_1) \ \text{sen}(2w_1 + w_2) \ \text{cos}(2w_1 + w_2) \ \text{sen}(2w_1 + 2w_2) \ \text{cos}(2w_1 + 2w_2)]^T \quad (7)$$

$$\overrightarrow{x_{HBAM}(t)} = \overrightarrow{X_{HBAM}} \cdot \overrightarrow{Cont_{HBAM}} \quad (8)$$

C. Análise de superposição

A resposta total de um circuito linearizado em torno de cada uma das abordagens dessa pesquisa é obtida pelo

método de superposição, conforme exemplificado na equação 9.

$$x_{total} = x(t) + x_{novo}(t) \quad (9)$$

A componente linearizada, $x_{novo}(t)$, é obtida de acordo com a trajetória inicial resultante de $x(t)$. Dado que $x(t)$ é diferente para cada caso, $x_{novo}(t)$ também possui particularidades na aplicação de diferentes métodos.

- Obtenção da componente linearizada em torno da análise CC: A equação linearizada resultante após inserir f_{NL} do componente não linear do sistema na equação 1, é apresentada na equação 10.

$$x_{novoCC} = \overrightarrow{G_{CC}} \cdot \overrightarrow{x_{CC0tons}(t)} \quad (10)$$

Neste caso é considerado zero tons e zero harmônicas. Onde G_{CC} é uma constante e $x_{CC0tons}(t)$ é igual a uma matriz 2x1 arranjada conforme equação 11.

$$\begin{bmatrix} \text{sen}(w_0 \cdot t) \\ \text{cos}(w_0 \cdot t) \end{bmatrix} \quad (11)$$

Durante o estudo sobre a linearização em torno de um tom utilizando o HB e em torno de dois tons utilizando o método HB integrado com o método AFM foi constatado que quando o objetivo é considerar a influência de h harmônicas no final da superposição é necessário que a análise não linear abranja $h_1 = 2 \cdot h$ harmônicas. Isto porque, para fins de aumentar a precisão da resposta final das análises, a matriz utilizada para linearizar deve estar completa, o que não acontece quando a análise de grandes sinais engloba apenas h harmônicas.

- Obtenção da componente linearizada em torno da aplicação do método HB em um tom: Ao derivar f_{NL} em função da trajetória inicial é retornada uma matriz de amplitudes de $(2 \cdot h_1 + 1)$ linhas e uma coluna. Os valores dessas amplitudes foram realocados em uma matriz quadrada de dimensão $2 \cdot (2 \cdot h + 1)$. A equação linearizada resultante após a realocação é apresentada na equação 12, [3].

$$x_{novoHB} = \overrightarrow{G_{HB}} \cdot \overrightarrow{x_{HB1tom}(t)} \quad (12)$$

Neste caso, como foi escolhido $h_1 = 4$ na análise não linear, a dimensão da matriz quadrada de ganho, G_{HB} , é igual a 10, apresentada na equação 13.

$$\begin{bmatrix} g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g3}{2} & \frac{g6}{2} & -\frac{g5}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g7}{2} \\ 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & \frac{g5}{2} & \frac{g6}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} \\ \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g3}{2} & \frac{g6}{2} & -\frac{g5}{2} \\ -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & \frac{g5}{2} & \frac{g6}{2} \\ \frac{g4}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g3}{2} \\ -\frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} \\ \frac{g6}{2} & \frac{g5}{2} & \frac{g4}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} \\ -\frac{g5}{2} & \frac{g6}{2} & -\frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} \\ \frac{g8}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g6}{2} & \frac{g5}{2} & \frac{g4}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 \\ -\frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g5}{2} & \frac{g6}{2} & -\frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

E $x_{HB_{1tom}}(t)$ é uma matriz 10x1 arranjada conforme a equação 14.

$$\begin{pmatrix} v8 \cdot \text{sen}[(\omega_2 - 2\omega_1) \cdot t] \\ v9 \cdot \text{cos}[(\omega_2 - 2\omega_1) \cdot t] \\ v4 \cdot \text{sen}[(\omega_2 - \omega_1) \cdot t] \\ v5 \cdot \text{cos}[(\omega_2 - \omega_1) \cdot t] \\ v0 \cdot \text{sen}(\omega_2 \cdot t) \\ v1 \cdot \text{cos}(\omega_2 \cdot t) \\ v2 \cdot \text{sen}[(\omega_2 + \omega_1) \cdot t] \\ v3 \cdot \text{cos}[(\omega_2 + \omega_1) \cdot t] \\ v6 \cdot \text{sen}[(\omega_2 + 2\omega_1) \cdot t] \\ v7 \cdot \text{cos}[(\omega_2 + 2\omega_1) \cdot t] \end{pmatrix} \quad (14)$$

Portanto, na conclusão da análise de superposição serão consideradas as distorções de duas harmônicas.

- Obtenção da componente linearizada em torno da aplicação do método HB integrado com o AFM em dois tons: Ao derivar f_{NL} em função da trajetória

$$x_{\text{novosHBAM}} = \begin{pmatrix} g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g3}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g12}{2} & -\frac{g11}{2} & \frac{g14}{2} & -\frac{g13}{2} & \frac{g20}{2} & -\frac{g19}{2} & \frac{g22}{2} & -\frac{g21}{2} & \frac{g24}{2} & -\frac{g23}{2} \\ 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g11}{2} & \frac{g12}{2} & \frac{g13}{2} & \frac{g14}{2} & \frac{g19}{2} & \frac{g20}{2} & \frac{g21}{2} & \frac{g22}{2} & \frac{g23}{2} & \frac{g24}{2} \\ \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g12}{2} & -\frac{g11}{2} & \frac{g18}{2} & -\frac{g17}{2} & \frac{g20}{2} & -\frac{g19}{2} & \frac{g22}{2} & -\frac{g21}{2} \\ -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g11}{2} & \frac{g12}{2} & \frac{g17}{2} & \frac{g18}{2} & \frac{g19}{2} & \frac{g20}{2} & \frac{g21}{2} & \frac{g22}{2} \\ \frac{g4}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 & \frac{g6}{2} & -\frac{g5}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g16}{2} & -\frac{g15}{2} & \frac{g18}{2} & -\frac{g17}{2} & \frac{g20}{2} & -\frac{g19}{2} \\ -\frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 & \frac{g5}{2} & \frac{g6}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g15}{2} & \frac{g16}{2} & \frac{g17}{2} & \frac{g18}{2} & \frac{g19}{2} & \frac{g20}{2} \\ \frac{g10}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g8}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g6}{2} & \frac{g5}{2} & g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g3}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g12}{2} & -\frac{g11}{2} & \frac{g14}{2} & -\frac{g13}{2} \\ -\frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g5}{2} & \frac{g6}{2} & 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g11}{2} & \frac{g12}{2} & \frac{g13}{2} & \frac{g14}{2} \\ \frac{g12}{2} & \frac{g11}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g8}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g12}{2} & -\frac{g11}{2} \\ -\frac{g11}{2} & \frac{g12}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g11}{2} & \frac{g12}{2} \\ \frac{g14}{2} & \frac{g13}{2} & \frac{g12}{2} & \frac{g11}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g4}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 & \frac{g6}{2} & -\frac{g5}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g9}{2} \\ -\frac{g13}{2} & \frac{g14}{2} & -\frac{g11}{2} & \frac{g12}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 & \frac{g5}{2} & \frac{g6}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} \\ \frac{g20}{2} & \frac{g19}{2} & \frac{g18}{2} & \frac{g17}{2} & \frac{g16}{2} & \frac{g15}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g8}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g6}{2} & \frac{g5}{2} & g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g3}{2} \\ -\frac{g19}{2} & \frac{g20}{2} & -\frac{g17}{2} & \frac{g18}{2} & -\frac{g15}{2} & \frac{g16}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g5}{2} & \frac{g6}{2} & 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} \\ \frac{g22}{2} & \frac{g21}{2} & \frac{g20}{2} & \frac{g19}{2} & \frac{g18}{2} & \frac{g17}{2} & \frac{g12}{2} & \frac{g11}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g8}{2} & \frac{g7}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 & \frac{g2}{2} & -\frac{g1}{2} \\ -\frac{g21}{2} & \frac{g22}{2} & -\frac{g19}{2} & \frac{g20}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g18}{2} & -\frac{g11}{2} & \frac{g12}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g7}{2} & \frac{g8}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 & \frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} \\ \frac{g24}{2} & \frac{g23}{2} & \frac{g22}{2} & \frac{g21}{2} & \frac{g20}{2} & \frac{g19}{2} & \frac{g14}{2} & \frac{g13}{2} & \frac{g12}{2} & \frac{g11}{2} & \frac{g10}{2} & \frac{g9}{2} & \frac{g4}{2} & \frac{g3}{2} & \frac{g2}{2} & \frac{g1}{2} & g0 & 0 \\ -\frac{g23}{2} & \frac{g24}{2} & -\frac{g21}{2} & \frac{g22}{2} & -\frac{g19}{2} & \frac{g20}{2} & -\frac{g13}{2} & \frac{g14}{2} & -\frac{g11}{2} & \frac{g12}{2} & -\frac{g9}{2} & \frac{g10}{2} & -\frac{g3}{2} & \frac{g4}{2} & -\frac{g1}{2} & \frac{g2}{2} & 0 & g0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{17} \cdot \text{sen}[(\omega_3 - (\omega_1 + \omega_2)) \cdot t] \\ x_{18} \cdot \text{cos}[(\omega_3 - (\omega_1 + \omega_2)) \cdot t] \\ x_{12} \cdot \text{sen}[(\omega_3 - \omega_1) \cdot t] \\ x_{13} \cdot \text{cos}[(\omega_3 - \omega_1) \cdot t] \\ x_8 \cdot \text{sen}[(\omega_3 - (\omega_1 - \omega_2)) \cdot t] \\ x_9 \cdot \text{cos}[(\omega_3 - (\omega_1 - \omega_2)) \cdot t] \\ x_4 \cdot \text{sen}[(\omega_3 - \omega_2) \cdot t] \\ x_5 \cdot \text{cos}[(\omega_3 - \omega_2) \cdot t] \\ x_0 \cdot \text{sen}[(\omega_3) \cdot t] \\ x_1 \cdot \text{cos}[(\omega_3) \cdot t] \\ x_2 \cdot \text{sen}[(\omega_3 + \omega_2) \cdot t] \\ x_3 \cdot \text{cos}[(\omega_3 + \omega_2) \cdot t] \\ x_6 \cdot \text{sen}[(\omega_3 + (\omega_1 - \omega_2)) \cdot t] \\ x_7 \cdot \text{cos}[(\omega_3 + (\omega_1 - \omega_2)) \cdot t] \\ x_{10} \cdot \text{sen}[(\omega_3 + \omega_1) \cdot t] \\ x_{11} \cdot \text{cos}[(\omega_3 + \omega_1) \cdot t] \\ x_{14} \cdot \text{sen}[(\omega_3 + (\omega_1 + \omega_2)) \cdot t] \\ x_{15} \cdot \text{cos}[(\omega_3 + (\omega_1 + \omega_2)) \cdot t] \end{pmatrix} \quad (16)$$

III. CIRCUITO TESTE

Para os fins de explorar as abordagens citadas nos itens anteriores fez-se uso do circuito teste presente na figura 1, [1].

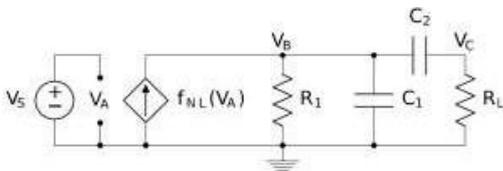


Figura 1 – Circuito teste

Na figura 1, V_s é uma fonte de tensão senoidal de dois ou três tons, com amplitudes e frequências fundamentais diferentes. Os parâmetros aplicados para esse circuito são $C_1 = 10 \text{ pF}$, $C_2 = 1 \text{ } \mu\text{F}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_L = 50 \text{ } \Omega$.

O elemento crítico do sistema é a fonte não linear de corrente controlada por tensão, f_{NL} , a equação que descreve o comportamento deste componente está presente na equação 17.

$$f_{NL}[\text{VA}] = \frac{i_{sat} \text{sign}(VA)}{\left(1 + \left(\frac{V_{sat}}{|VA|}\right)^s\right)^{\frac{1}{s}}} \quad (17)$$

Na qual I_{sat} e V_{sat} correspondem à máxima saturação de corrente e tensão de f_{NL} , VA é a tensão variável que

inicial é retornada uma matriz de amplitudes de $(1 + (2 \cdot (N_1 + M_1 \cdot (2 \cdot N_1 + 1))))$ linhas e uma coluna. Os valores dessas amplitudes foram realocados em uma matriz quadrada com dimensão $2 \cdot (1 + (2 \cdot (N + M \cdot (2 \cdot N + 1))))$. A equação linearizada resultante após a realocação é apresentada na equação 15.

$$x_{\text{novosHBAM}} = \overrightarrow{G_{HBAM}} \cdot \overrightarrow{x_{HBAM_{2tons}}}(t) \quad (15)$$

Neste caso, como foi escolhido $N_1 = M_1 = 2$, então $N = M = 1$. A dimensão da matriz quadrada de ganho, G_{HBAM} , é igual a 18 e a matriz de contribuições de senos e cossenos tem dimensão 18x1, conforme mostra a equação 16. Portanto, na conclusão da análise de superposição serão consideradas as distorções de apenas uma harmônica.

controla a fonte controlada, $\text{sign}(VA)$ é a função de sinal e s indica o fator de amortecimento da curva, quanto menor o s mais suave é a resposta do sinal.

Os parâmetros de saturação definidos para f_{NL} foram $I_{sat} = 0,1 \text{ A}$, $V_{sat} = 1,8 \text{ V}$ e $s = 5$ para a topologia Envelope Tracking (ET) [1].

A figura 2 exibe o comportamento da corrente não linear descrito pela equação 17, a qual, devido aos parâmetros de saturação escolhidos, satura em 0,1 A.

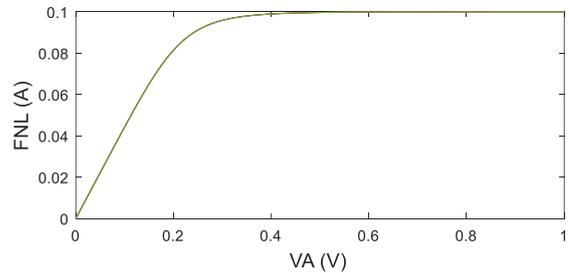


Figura 2 – Curva não linear de FNL

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma simulação precisa para os casos a seguir seria uma forma de onda que satura em 0,1 V.

A. Linearização em torno da Análise Periódica de Corrente alternada - PAC

Neste caso, o objetivo foi linearizar o circuito em torno da resposta obtida após a aplicação do método do equilíbrio harmônico em um tom. Portanto V_s para esta análise é uma fonte de tensão senoidal de dois tons, com amplitudes e frequências fundamentais diferentes.

Para observar os limites de validade do método, todos os parâmetros configurados na seção III foram mantidos, a tensão e frequência do primeiro tom foram fixadas em 1,8 V e 1 GHz respectivamente. A quantidade de harmônicas consideradas foi igual a 2 e a frequência do segundo tom foi definida em 1,1 GHz. Com estes parâmetros fixados apenas a amplitude do segundo tom da fonte senoidal de tensão foi variada. Desta forma foi possível observar até que ponto a teoria dos pequenos sinais é válida neste contexto.

Na figura 3, configurando a amplitude do segundo tom de V_s igual a 0,5 V, a simulação da linearização retorna uma curva similar a esperada e com pico inferior a corrente de saturação. Na qual a envoltória se deve ao fato de que nesse método as harmônicas geradas pelo segundo tom da fonte não foram consideradas.

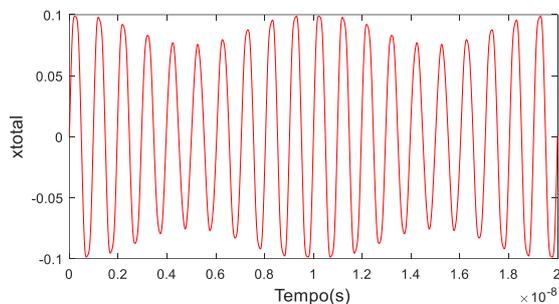


Figura 3 – PAC 0,5 V

Na figura 4, com a amplitude do segundo tom configurada em 1,7 V, a simulação da linearização retorna uma curva distorcida e com o pico acima da corrente de saturação. Isso acontece em razão da não consideração das harmônicas geradas pelo segundo tom e em função da linearização de FNL em torno do primeiro tom.

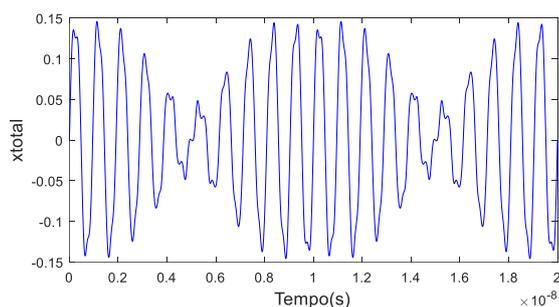


Figura 4 – PAC 1,7 V

B. Linearização em torno do método HB integrado com o Mapeamento Artificial de Frequência (AFM)

Aqui, o objetivo foi linearizar o circuito em torno da resposta obtida após a aplicação do método do HB integrado com o AFM, a qual possibilita a varredura inicial de dois tons e suas distorções harmônicas mais a contribuição da frequência fundamental do terceiro tom. Portanto V_s para esta análise é uma fonte de tensão senoidal de três tons, com amplitudes e frequências fundamentais diferentes.

Para as simulações dessa integração os parâmetros configurados na seção IV.A foram mantidos e foram escolhidos os seguintes truncamentos de harmônicas $N=1$ e $M=1$.

Na figura 5, configurando a amplitude do segundo tom de V_s em 0,5 V e do terceiro tom em 1,7 V, a simulação retorna um sinal com pico superior a corrente de saturação. Isso acontece em razão da não consideração das harmônicas geradas pelo segundo tom e em função da linearização do componente não linear em torno dos dois primeiros tons.

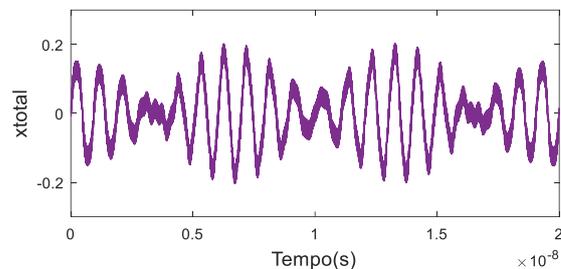


Figura 5 – Linearização (HB + AFM) 1,7 V

No caso específico da figura 5 é importante salientar que o comportamento da curva seria melhor para um truncamento de harmônicas maior. Porém como o objetivo era apenas ilustrar que é possível realizar esse tipo de linearização, escolhemos por não estender o método devido ao grau de esforço necessário para isso.

V. CONCLUSÃO

Na aplicação da PAC, o circuito é linearizado em torno do primeiro tom da fonte V_s e é possível visualizar que esse método pode receber grandes sinais no primeiro tom, mas suporta apenas pequenos sinais no segundo tom.

Na linearização em torno do método HB integrado com o AFM, é possível reproduzir as contribuições harmônicas em $m \cdot w_1 + n \cdot w_2$ mais a componente fundamental do terceiro tom. O resultado obtido na conclusão da análise é válido para grandes sinais nos primeiros dois tons e para pequenos sinais no terceiro tom.

Em específico, os resultados de aplicação deste método PAC foram comparados com os resultados de outros métodos em [3].

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- [1] L. Schuartz, E. L. Santos, B. R. B. A. Leite, A. A. Mariano and E. G. Lima, L. “Envelope Methods Applied to Simulation of Power Amplifiers with Efficiency Enhancement Techniques.” In: 33rd South Microelectronics Symposium, 2018.
- [2] S. Maas, “Nonlinear Microwave and RF Circuits”, Second Edition ed. www.artechhouse.com, 2003.
- [3] C. G. Natalino, D. M.S. Moura and E. G. Lima, “Two-tone Analysis Methods Applied to RF Circuits Simulation”, Microelectronics Students Forum, 2019.