

Modelagem de transformadores para simulações

Erick C. Bento, Antonio C. C. Telles

{ecbento, actelles}@cti.gov.br

Núcleo de Concepção de Sistemas de Hardware
Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer – Campinas/SP

Abstract. This article describes the experimental and simulated results of an astable multivibrator using transformers with ferrite cores and ALD110800 metal-oxide-semiconductor field effect transistors (MOSFETs). Various models for the coils are evaluated and the effect of using transistors in parallel, aiming a model for which the simulation results are similar to those found experimentally. Two different transformers were analyzed, in order to evaluate the impact of the oscillation mode (harmonic or relaxation) over the model fidelity.

Resumo. Este artigo descreve os resultados experimentais e de simulações de um multivibrador astável para coleta de energia utilizando transformadores com núcleos de ferrite e transistores de efeito de campo metal-óxido semicondutor (MOSFETs) ALD110800. São avaliados vários modelos para as bobinas do transformador e o efeito de se utilizar transistores em paralelo, visando encontrar um modelo cujos resultados simulados sejam semelhantes aos obtidos experimentalmente. Dois transformadores diferentes foram analisados, com o objetivo de avaliar o impacto do modo de oscilação (harmônico ou de relaxação) sobre a fidelidade do modelo.

1. Introdução

Coleta de energia (*energy harvesting*) é o processo de captação e da adequação da energia ambiente para alimentar sistemas eletrônicos. Esta área de conhecimento é objeto de intenso estudo, por permitir que sistemas autônomos não necessitem de baterias ou supercapacitores como fonte de alimentação. Dispositivos com a capacidade de retirar energia do próprio ambiente através da luz solar, vibração, calor ou ondas eletromagnéticas estão sendo cada vez mais utilizados. Exemplos de circuitos de coleta de energia são encontrados em [Machado 2015] e [Ferreira 2019].

A captação da energia luminosa é realizada por células fotovoltaicas, normalmente produzidas com material semicondutor. O material mais utilizado no caso de sistemas fotovoltaicos é o silício. As células fotovoltaicas de silício tipicamente fornecem tensão de 0,5 V a 0,6 V, com a potência máxima dependente do seu tamanho [Carneiro 2010].

Em [Telles 2015] é proposto um multivibrador astável para operar com a tensão de uma célula fotovoltaica (Fig. 1). O circuito utiliza um transformador para elevar a tensão que é posteriormente submetida a um retificador de tensão.

Simulações têm sido utilizadas para prever e ajustar o comportamento dos circuitos eletrônicos, diminuindo dessa forma a necessidade de construção de protótipos para a

validação dos projetos. Para se obterem resultados confiáveis, é necessário que os modelos utilizados nas simulações reproduzam o comportamento real dos dispositivos e componentes.

Os transformadores funcionam eletricamente com base na indução eletromagnética, devido a suas características construtivas – constituído de três elementos básicos: duas bobinas interligadas por meio de um material ferromagnético (núcleo com permeabilidade magnética elevada) - é possível realizar a indução de uma bobina a outra sem contato direto entre as mesmas, por intermédio do núcleo, alterando assim os valores da tensão.

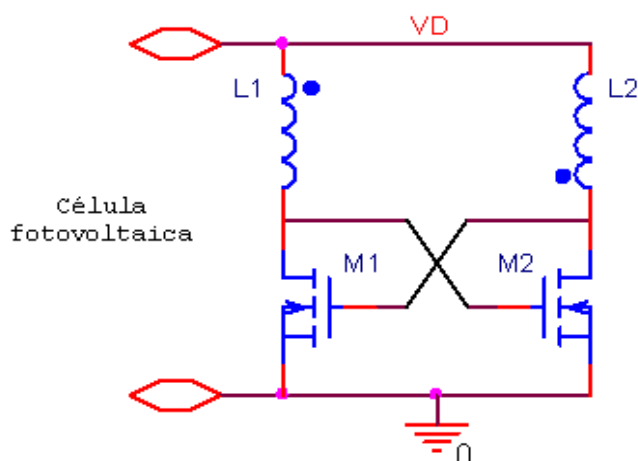


Figura 1. Oscilador em anel utilizando MOSFETs

A natureza construtiva do transformador implica em várias características relativas às bobinas e ao núcleo que tornam sua modelagem bastante complexa. Não há um modelo unificado, encontrando-se apenas alguns que dependem da aplicação e da construção do transformador. [Martinez 2005], por exemplo, faz uma revisão dos modelos de transformadores para transientes.

Este trabalho analisa modelos para as bobinas dos transformadores utilizados no multivibrador astável proposto por [Telles 2015]. Serão feitas simulações do circuito com os modelos propostos e o transistor de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET) ALD110800. O fato de este transistor ter a tensão de limiar próxima a zero permite que o circuito consiga operar com tensões de alimentação muito baixas. Várias configurações de transistores em paralelo serão experimentadas, devido à baixa capacidade de corrente do dispositivo.

Dois transformadores (TR1 e TR2), com diferentes configurações de bobinas e de valores de indutância serão modelados.

Serão comparados os resultados obtidos experimentalmente com aqueles obtidos através de simulações. Para o experimento foram utilizados a fonte de tensão Agilent E3631A e o osciloscópio Agilent Infiniium MSO8104A. Os circuitos foram simulados utilizando o programa de simulação LTSpice.

2. Modelos para os transformadores

Os dois transformadores são construídos em núcleos de ferrite TDK modelo EFD 25/13/9 N87 com gap de 0,22 mm.

TR1 é apresentado na Fig. 2. O mesmo é formado por dois pares de indutâncias: 9 μH e 500 μH com sua frequência de ressonância em 1,6 MHz para ambas.



Figura 2. Transformador TR1 construído com núcleos de ferrite TDK modelo EFD 25/13/9 N87 com gap de 0,22 mm

TR2 é apresentado na Fig. 3. O mesmo é formado por duas bobinas de 7 μH , duas de 2 mH e uma de 600 μH com sua frequência de ressonância em 314 kHz para todas as indutâncias.



Figura 3. Transformador TR2 construído com núcleos de ferrite TDK modelo EFD 25/13/9 N87 com gap de 0,22 mm

O modelo mais completo das bobinas é ilustrado na Fig. 4. Para se obterem os valores, utiliza-se um RLC meter, que fornece a resistência DC (RDC) e a indutância (L) em uma frequência fixa e muito menor que a de ressonância. É feita então uma varredura em frequência de indutância e resistência que ultrapasse a frequência de ressonância da bobina. A resistência paralela (R_p) é a resistência lida na ressonância. A capacitância (C) é calculada a partir da frequência de ressonância e o valor de L de baixa frequência.

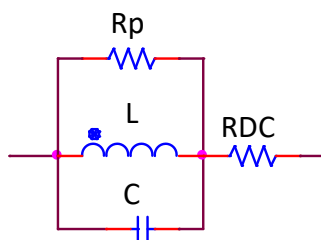


Figura 4. Modelo de indutor representado por um circuito RLC

3. Oscilador com TR1

Foram feitas simulações partindo-se de modelos simples para as bobinas e gradualmente aumentando a sua complexidade. No circuito com bobina modelada como indutância ideal, a frequência foi de 18,7 MHz. Adicionando-se uma capacitância em paralelo de 1 nF, o circuito oscilou em 1,17 MHz. Com a introdução da resistência DC e a resistência em paralelo, a frequência não mudou significativamente. Neste caso foi necessário colocar dois transistores em paralelo para que o circuito funcionasse. Por conta de o transistor ALD110800 possuir o parâmetro W/L muito baixo, foram feitos vários experimentos utilizando transistores em paralelo. A título de comparação, o circuito experimental com dois transistores oscilou em 1,46 MHz.

Com relação à amplitude de oscilação, a introdução da capacitância não modifica significativamente. Porém, com a adição das resistências, a tensão se torna mais semelhante à obtida nos resultados experimentais. Os valores utilizados foram: $R_p = 1,3 \text{ k}\Omega$, $L = 9 \text{ }\mu\text{H}$, $C = 1 \text{ nF}$ e $R_{DC} = 60 \text{ m}\Omega$.

Na Fig. 5 se encontra a tabela com os resultados obtidos utilizando o transformador TR1.

Na Fig. 6 se encontra a tabela com os resultados obtidos utilizando o transformador TR2.

Nas Figs. 7 e 8 temos as formas de onda da tensão no dreno experimental e de simulação utilizando oito transistores em paralelo.

Transformador TR1 (9 μ H)			
Frequência em função do número de transistores empilhados			
Número de transistores	Utilizando dois transistores	Utilizando quatro transistores	Utilizando oito transistores
Simulado	1,17 MHz	1,17 MHz	1,16 MHz
Experimental	1,51 MHz	1,48 MHz	1,43 MHz
Tensão em função do número de transistores empilhados			
Número de transistores	Utilizando dois transistores	Utilizando quatro transistores	Utilizando oito transistores
Simulado	0,42 V	0,91 V	1,12 V
Experimental	0,53 V	0,94 V	1,01 V

Figura 5. Tabela com os resultados obtidos (oscilador com TR1).

Transformador TR2 (2 mH)				
Frequência em função do número de transistores empilhados				
Número de transistores	Utilizando um transistor	Utilizando dois transistores	Utilizando quatro transistores	Utilizando oito transistores
Simulado	196,92 kHz	158,11 kHz	105,76 kHz	61,79 kHz
Experimental	192,58 kHz	147,66 kHz	101,27 kHz	61,65 kHz
Tensão em função do número de transistores empilhados				
Número de transistores	Utilizando um transistor	Utilizando dois transistores	Utilizando quatro transistores	Utilizando oito transistores
Simulado	1,40 V	1,42 V	1,45 V	1,45 V
Experimental	1,41 V	1,45V	1,48 V	1,58 V

Figura 6. Tabela com os resultados obtidos (oscilador com TR2).

Nas Figs. 9 e 10 têm-se os gráficos com os resultados experimentais e simulados obtidos. Neste caso o modelo utilizado na simulação é o completo, com indutância em paralelo com uma capacitância, a resistência DC em série e a resistência em paralelo.

4. Oscilador com TR2

Utilizaram-se as indutâncias maiores de TR2 para avaliar o efeito do valor da indutância no modelo. Os valores utilizados foram: $R_p = 214 \text{ k}\Omega$, $L = 2,0 \text{ mH}$, $C = 127 \text{ pF}$ e $R_{DC} = 1,27 \text{ }\Omega$).

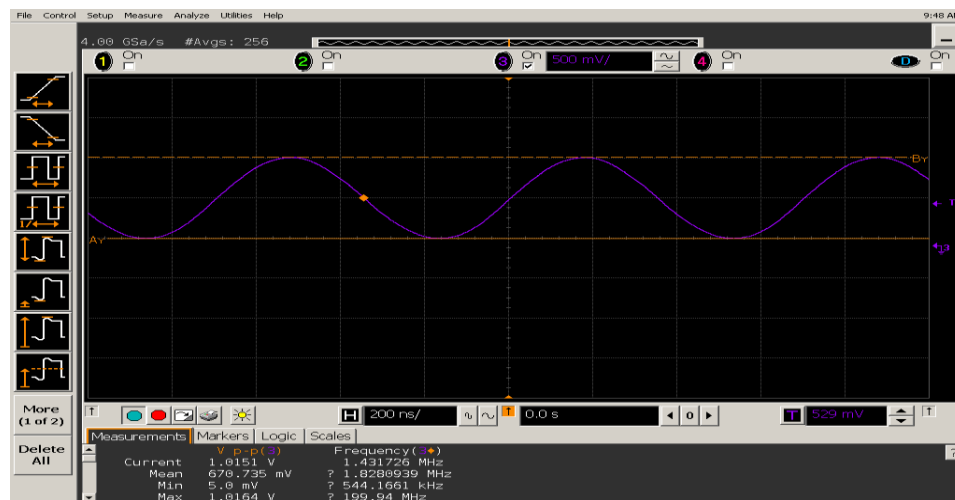


Figura 7. Forma de onda de tensão no dreno experimental com o circuito utilizando oito transistores em paralelo (oscilador com TR1).

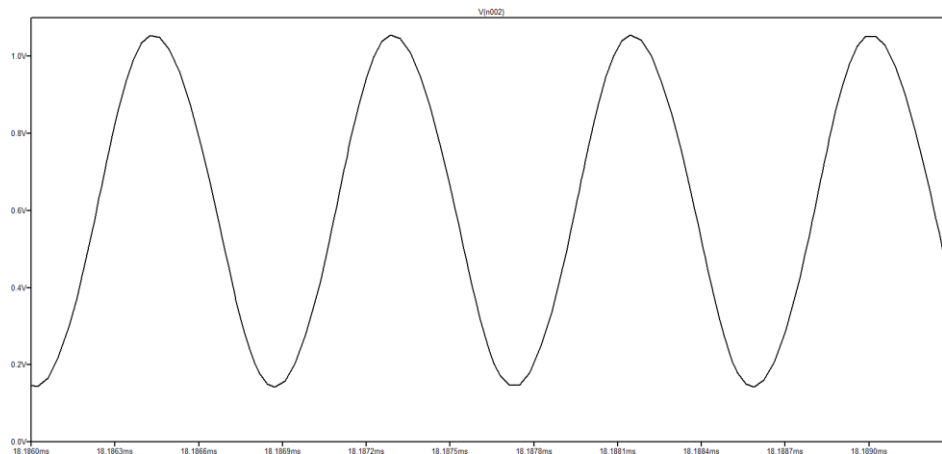


Figura 8. Forma de onda de tensão no dreno simulada com o circuito utilizando oito transistores em paralelo (oscilador com TR1).

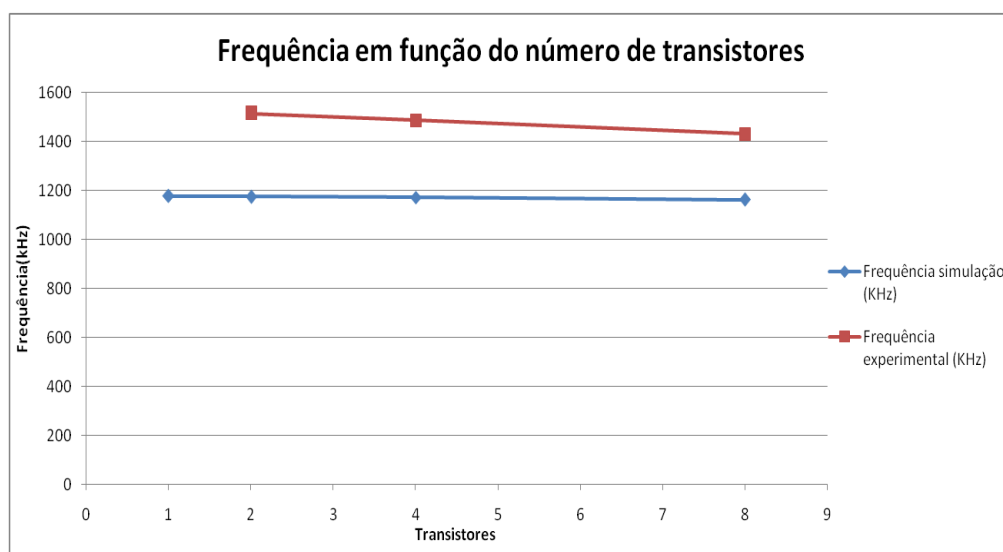


Figura 9. Gráfico de frequência em função do número de transistores em paralelo (oscilador com TR1).

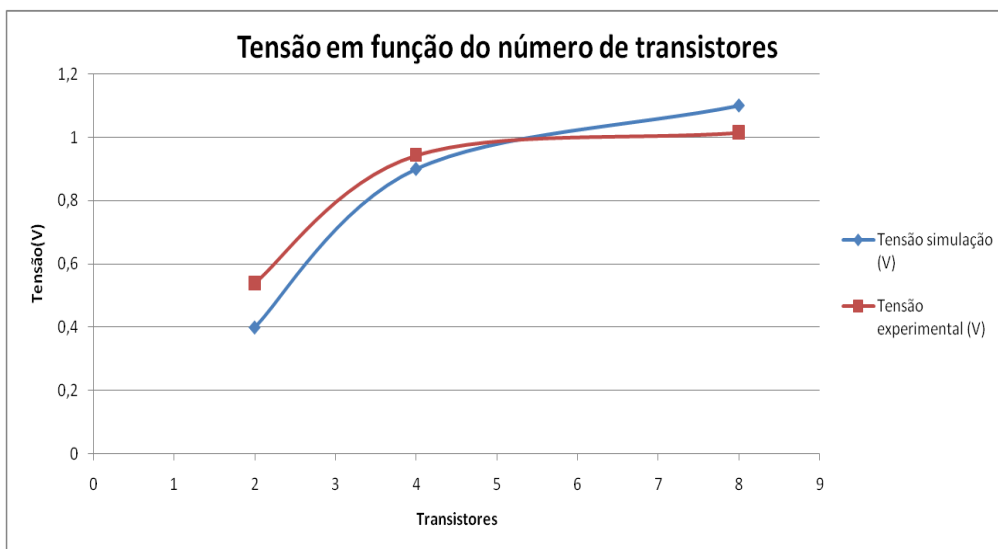


Figura 10. Gráfico de tensão em função do número de transistores em paralelo (oscilador com TR1).

No circuito com bobina modelada com indutância ideal, a frequência foi de 475 kHz. Adicionando uma capacitância em paralelo de 127 pF, o circuito oscilou em 198 kHz. Com a introdução da resistência DC e a resistência em paralelo a frequência não mudou significativamente. Neste caso não foi necessário colocar transistores adicionais em paralelo para que o circuito funcionasse. A título de comparação, o circuito experimental com um transistor oscilou em 193 kHz.

Na Fig. 11 e 12 temos as formas de onda da tensão no dreno experimental e de simulação utilizando oito transistores em paralelo.

Nas Figs. 13 e 14 têm-se os gráficos com os resultados experimentais e simulados obtidos. Neste caso o modelo utilizado na simulação é o completo, com indutância em paralelo com uma capacitância, a resistência DC em série e a resistência em paralelo.

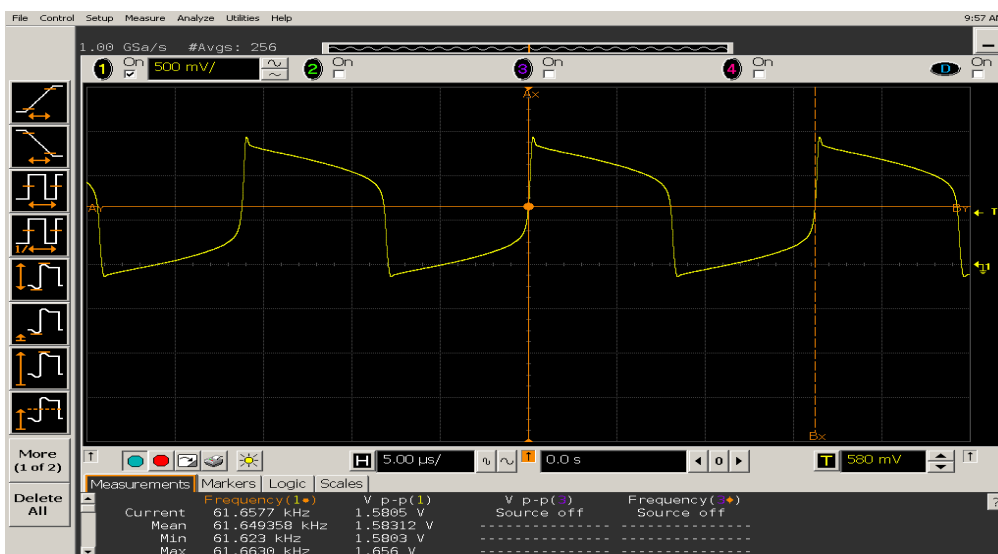


Figura 11. Forma de onda da tensão no dreno experimental com o circuito utilizando oito transistores em paralelo (oscilador com TR2).

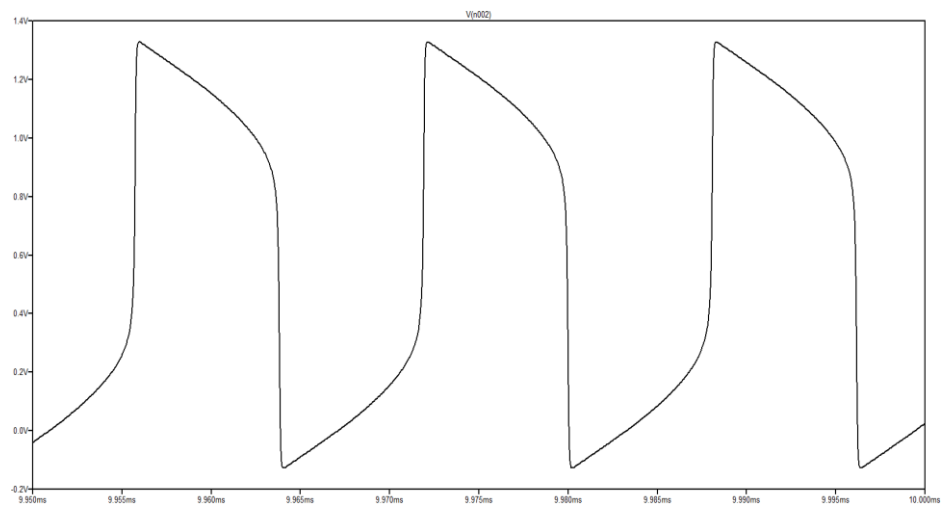


Figura 12. Forma de onda da tensão no dreno simulada com o circuito utilizando oito transistores em paralelo (oscilador com TR2).

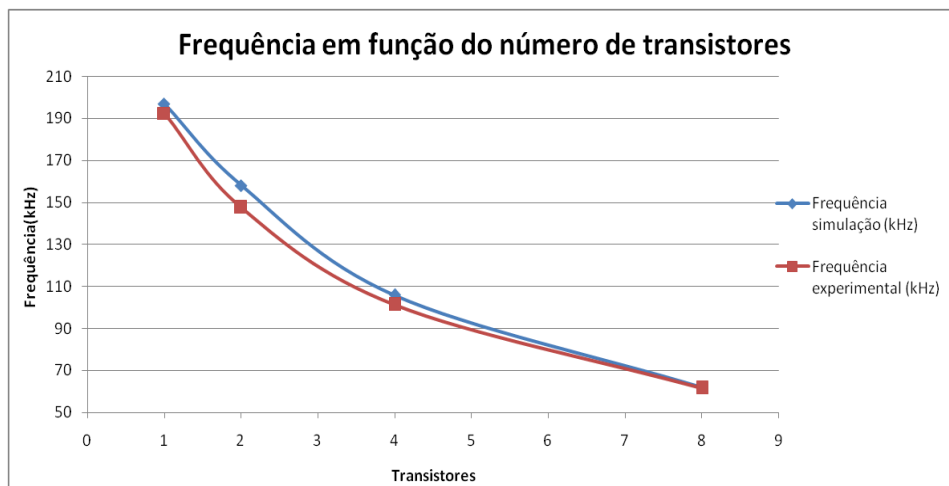


Figura 13. Gráfico de frequência em função do número de transistores em paralelo (oscilador com TR2).

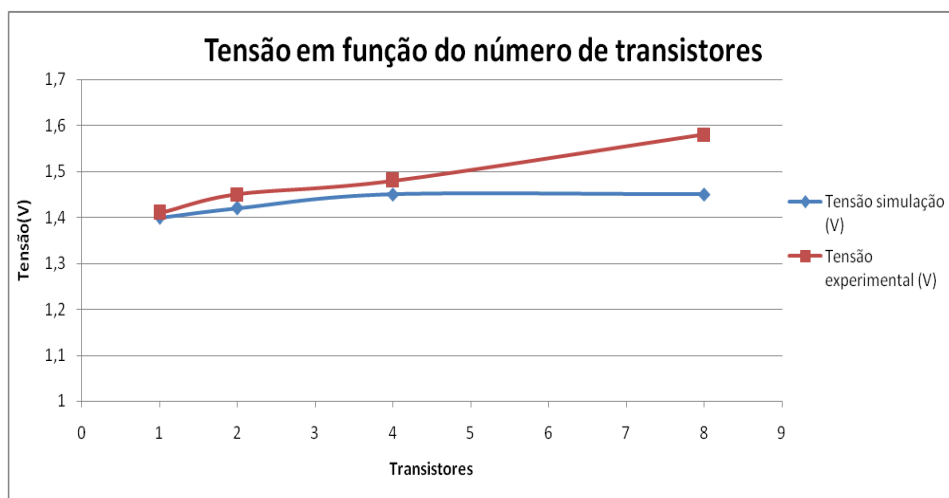


Figura 14. Gráfico de tensão em função do numero de transistores em paralelo (oscilador com TR2).

4. Conclusões

O modelo mais completo da bobina do transformador é aquele que apresenta os resultados simulados mais próximos dos experimentais.

Após os resultados obtidos em simulações e testes de bancada observa-se que, para indutâncias menores, o circuito apresenta uma oscilação semelhante a uma senoide trabalhando na frequência de ressonância do transformador. A frequência não apresenta variações significativas quando empilhamos outros transistores em paralelo (em torno de 10%), porém a tensão aumenta significativamente (em torno de 80%).

Para indutâncias maiores o circuito apresenta uma oscilação de relaxação. A frequência de oscilação é menor que aquela utilizando indutâncias menores e está sujeita a variações conforme empilhamos transistores (em torno de 60%). A tensão aumenta significativamente neste caso (em torno de 50%).

Resultados simulados e experimentais para o circuito utilizando as bobinas maiores são muito próximos. O fato de se observarem formas de onda de relaxação leva à conclusão de que o circuito com estas bobinas é relativamente independente da ressonância do transformador.

Percebe-se que em geral o efeito de empilhamento de transistores é importante para a amplitude de oscilação. Porém, os circuitos com bobinas pequenas não tiveram variação significativa de frequência com o número de transistores. Acredita-se que isso se deva ao fato do circuito oscilar próximo à frequência de ressonância do transformador. O efeito de empilhamento no circuito com as bobinas grandes é significativo, observando-se que as transições nas formas de onda são mais agudas com o aumento do número de transistores.

É importante ainda ressaltar que, utilizando indutâncias menores, o circuito simulado e o de teste em bancada não partiram com apenas um transistor (exceto nas simulações com bobinas ideais).

Referências

- Carneiro, J. (2010) “Semicondutores – Modelo Matemático de Célula Fotovoltaica”, Universidade do Minho, Portugal.
- Ferreira, J. V. T. (2019) “Analysis, Design and Test of Ultra-low-voltage CMOS Ring Oscillators” Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 12 de Fevereiro 2019.
- Machado, M. B.; Schneider, M. C.; Novack, D. L. e Galup-Montoro, C. (2015) “Analysis and Design of a Fully-Integrated Colpitts Oscillator Operating at Ultra-Low-Voltages”, Analog Integrated Circuits and Signal Processing, vol.85, no.1, pp. 27-36, June 2015.
- Martinez, J. A. e Mork, B. A. (2005) “Transformer Modeling for Low- and Mid-Frequency Transients - a Review”, IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 20, Issue: 2, April 2005).

Telles, A. C. C., Finco, S. e Emeri Jr., J. L. (2015) “Demonstration of a Low Voltage Power Converter with Application to Photovoltaic Cells”, In: Proceedings of X Workshop on Semiconductors and Micro & Nano Technology (SEMINATEC 2015).