



OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO USANDO ALGORITMO GENÉTICO DE RETIFICADORES NÃO LINEARES COM BAIXÍSSIMA POTÊNCIA DE ENTRADA

Raphaella Luiza Resende da Silva

Sandro Trindade Mordente Gonçalves

Tarcísio Carlos Fonseca

raphaella.lrs@gmail.com

sandro@div.cefetmg.br

tarcisiocf89@gmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Av. Amazonas, 7675 30510-000, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

Christian Vollaire

Christan.vollaire@ec-lyon.fr

École Centrale de Lyon, Laboratoire AMPÈRE, Bât – H9

36, Av. Guy de Collongue, 69134, Écully, France

Resumo. *Este artigo apresenta a otimização multiobjetivo, empregando o Algoritmo Genético, de três topologias de retificadores não lineares: Série, Shunt e Dobrador de Tensão. Estes podem ser utilizados para coleta de energia do ar disponível em potências muito baixas. O objetivo é encontrar o melhor tipo de retificador, diodo e substrato para esta aplicação, sendo as variáveis de otimização os valores dos capacitores, impedância e carga, além das dimensões dos trechos de microfita que formam as trilhas do circuito e os ângulos das quinas de cada retificador. Os circuitos operam na frequência 2,45 GHz e a potência de entrada é de -15 dBm. O processo de otimização para cada topologia foi realizado para dois substratos diferentes: o FR4 e o Rogers 5880, além de três diodos: HSMS 2850, HSMS 2860 e HSMS 286B. Estes foram escolhidos por serem apropriados à níveis extremamente baixos de potência. Ao final da otimização, o circuito ótimo encontrado apresentou uma eficiência de aproximadamente 66% e uma tensão de saída retificada de 455 mV. Este é considerado um bom resultado, uma vez que o circuito é simples e de baixo custo.*

Palavras-chave: *Algoritmo Genético, Captação de Energia, Otimização Multiobjetivo, Retificador de Baixa Potência*

1 INTRODUÇÃO

No projeto de um circuito eletrônico, objetiva-se encontrar os parâmetros que façam com que as especificações iniciais do circuito sejam atingidas. No caso de retificadores não lineares esses parâmetros são a impedância de entrada, capacitores e carga.

Outro fator importante são as dimensões das trilhas de microfita do circuito. Antes restrito a circuitos de microondas, o estudo dessas linhas passou a ser largamente empregado em circuitos impressos operando em alta frequência como em Clayton (2006). Isso porque qualquer trilha, por menor que seja, irá provocar alterações na forma de onda dos sinais que trafegam por ela fazendo com que esta deixe de ser uma conexão entre dois pontos e passe a ser um filtro passa-baixa, uma linha de transmissão, ou uma antena. Dessa forma, para simular um circuito não linear adequadamente é preciso modelar as trilhas que conectam os componentes. Porém, para o retificador não linear operando em altas frequências, isso se torna difícil, pois as dimensões da microfita juntamente com os valores dos capacitores e da carga afetam a impedância e a tensão de saída retificada do circuito. Torna-se essencial, portanto, o processo de otimização das dimensões da trilha, como mostra Silva et. al (2016).

Com o propósito de encontrar valores ótimos para as variáveis em questão, os retificadores do tipo Série, *Shunt* e Dobrador de Tensão, utilizando os substratos FR4 e Rogers 5880, foram otimizados utilizando o Algoritmo Genético. Os alvos a serem atingidos são a tensão de saída DC e eficiência do circuito que opera a 2.45 GHz e tem potência de entrada de $-15dBm$. Foram utilizados três diodos dos tipos HSMS 2850, HSMS 2860 e HSMS 286B, por serem apropriados a níveis extremamente baixos de potência.

O objetivo é encontrar a melhor configuração e valores das variáveis de otimização de um circuito retificador para aplicação de coleta de energia do ar, que está disponível em potências muito baixas.

2 PROJETOS DE CIRCUITOS RETIFICADORES NÃO LINEARES

Um dos principais obstáculos que restringem o desenvolvimento de retificadores em altas frequências é a eficiência, uma vez que a potência disponível a certa distância do emissor diminui com o aumento da frequência, como visto no recente trabalho de Chuc e Duong (2015), o que também evidencia a importância de se utilizar ferramentas em busca de soluções precisas que forneçam o resultado desejado.

Silva et al. (2016) mostra a otimização de um retificador do tipo *shunt* com o diodo *Schottky* HSMS 2850 utilizando os substratos Rogers e FR4. Este trabalho, porém, não considera a largura e os ângulos das trilhas, de forma que muitas quinas são geradas durante o processo.

No processo de otimização aqui realizado, esses parâmetros serão considerados variáveis de otimização. Além disso, circuitos do tipo série e dobrador de tensão também serão otimizados, utilizando além do HSMS 2850, os diodos HSMS 2860 e HSMS 286B. Estes foram escolhidos por apresentarem chaveamento rápido devido ao metal semicondutor na junção, permitindo que estes operem muito mais rapidamente, o que é essencial para circuitos de alta frequência. Além disso, eles fornecem uma queda de tensão tão baixa quanto $0.15V$, tornando-os apropriados a níveis extremamente baixos de potência, como visto no recente trabalho de Akter et al. (2014). Essas especificações tornam estes retificadores aptos à coleta de energia do ar. Foram utilizados também dois tipos de substratos: o FR4 e o Rogers 5850.

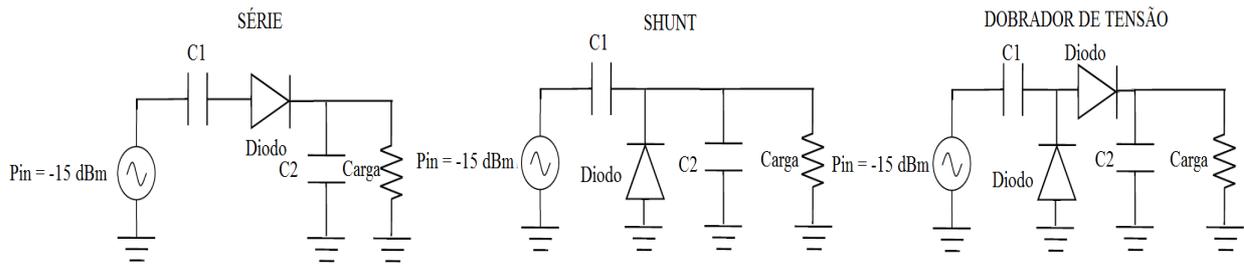


Figura 1. Topologias dos circuitos otimizados

3 ALGORITMO GENÉTICO NA OTIMIZAÇÃO DE UM CIRCUITO NÃO LINEAR

O Algoritmo Genético, inicialmente proposto por Holland (1975), é uma técnica de busca estocástica baseada nos mecanismos da seleção natural e da genética. O primeiro passo para aplicação do Algoritmo Genético em um problema real é a codificação das variáveis do problema em um conjunto de bits. O conjunto de variáveis discretizadas é chamado de cromossomo. Um ou mais cromossomos forma o indivíduo.

Na sequência, como explica Lopes (1999), um conjunto de indivíduos forma uma população. Esta pode ser aleatória ou previamente construída de acordo com a natureza do problema. A existência de uma população de possíveis soluções caracteriza a exploração paralela do espaço de busca. Esta é uma vantagem do Algoritmo Genético em relação aos métodos convencionais.

Cada indivíduo da população é uma possível solução para o problema, dessa forma é necessário algum critério para avaliação da qualidade desses indivíduos e discriminar as melhores soluções das piores, imitando o processo de seleção natural que se guia pela evolução das espécies. Essa medida é conhecida como *fitness*. Este é um ponto crítico para o algoritmo, já que, em última análise, é esta a função que está sendo otimizada.

Os indivíduos são selecionados por métodos probabilísticos ou mesmo determinísticos, de modo a gerarem descendentes, implementando o mecanismo de sobrevivência do mais apto. Operadores genéticos são responsáveis pelo processo de *crossover* e mutação. O primeiro se refere a recombinação de partes de dois indivíduos para formar novos descendentes (busca local). A mutação, por outro lado, atua apenas em um indivíduo, mudando um bit de sua composição (busca global). Assim, uma nova população é criada e substitui a anterior.

A nova população é submetida ao mesmo processo e este se repete iterativamente, esperando-se que a cada geração a qualidade dos indivíduos aumente. Ao longo de um determinado número de iterações, espera-se que a solução ótima seja encontrada.

É importante destacar, porém, que os Algoritmos Genéticos são meta heurística-estocásticas e dessa forma nem sempre alcançam a mesma solução em diferentes execuções independentes e podem não obter a resposta ótima para o problema de otimização, apesar de frequentemente encontrarem boas respostas.

Dentre as vantagens de se utilizar o Algoritmo Genético está o fato de que ele não necessita de muitos requisitos matemáticos sobre o problema, pois devido à sua natureza evolutiva, ele procura por soluções sem considerar o funcionamento interno específico do problema. Além disso, os operadores de evolução fazem o Algoritmo Genético eficaz na busca local por um processo gradual de convergência.

No caso de circuitos não lineares, algoritmos iterativos que controlem as alterações das variáveis de estado dos elementos não lineares de uma iteração para outra podem ser utilizados, como o Algoritmo de Limitação, mas em alguns casos, a fim de encontrar uma resposta ótima envolvendo múltiplos objetivos, é necessária a resolução das equações não lineares através de algoritmos de otimização. Os métodos mais convencionais são sujeitos a se prender em mínimos locais, e assim, apresentam desempenho ruim e até mesmo falham quando a natureza do problema envolve multimodalidade, descontinuidade, espaços de busca proibitivamente grandes, ou como no caso do circuito retificador a não linearidade. São nestas situações que o Algoritmo Genético demonstra sua aplicabilidade e robustez, se mostrando um meio eficaz para encontrar soluções próximas do ótimo global. Assim, o Algoritmo Genético geralmente trata de problemas não lineares, o que normalmente significa que não é possível tratar cada parâmetro como uma variável independente. Existem interações, chamadas *epistasis*, que devem ser consideradas.

4 OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DOS RETIFICADORES NÃO LINEARES

A maior parte dos problemas reais na área de otimização, envolvem a obtenção de diversos objetivos que devem ser atingidos simultaneamente, como relata Ticona (2003). Esses objetivos geralmente são conflitantes e, dessa forma, não há uma única solução que otimize todas ao mesmo tempo. Para tal, deve-se buscar um conjunto de soluções eficientes.

Problemas dessa natureza são chamados de problemas de otimização multiobjetivo, por envolverem maximização/minimização simultânea de um conjunto de objetivos, satisfazendo a um conjunto de restrições. A tomada de decisão deve ser feita ponderando-se os objetivos globais do problema e escolhendo uma entre as soluções do conjunto de soluções eficientes.

Na solução de problemas multiobjetivos, dois problemas são identificados: a busca de soluções e a tomada de decisões. O primeiro é o processo de otimização no qual o conjunto de possíveis soluções é guiado para o conjunto de soluções ótimas. O segundo problema, de tomada de decisões, consiste na escolha de um critério apropriado para a seleção dessa solução ótima. O método aqui utilizado foi o método a-posteriori, ou seja, a tomada de decisão foi realizada após a busca.

A otimização destes retificadores não lineares trata-se de processos multiobjetivos, cujos alvos são a tensão de saída retificada (V_{outDC}) e a eficiência do circuito (η). Além disso, a potência de saída foi monitorada para garantir que esta seja suficiente para alimentar a carga. Os alvos foram limitados de forma diferente em cada processo de otimização, a fim de atingir a maior eficiência e tensão de saída retificada.

O processo de otimização foi realizado para quatro cargas distintas: 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω e 1 M Ω . Finalizado o processo, foi realizada a comparação dos resultados e escolhida a melhor topologia para a aplicação de coleta de energia do ar.

5 RESULTADOS

Na otimização de cada um dos retificadores foram utilizadas 3000 gerações, sendo o tempo médio de cada processo aproximadamente 7 minutos. Os alvos, já apresentados na seção anterior, foram limitados de acordo com a Tab. 1 e o procedimento foi realizado utilizando-se o *software Advanced Design System* da Agilent®. O modo de simulação escolhido para análise foi o Harmonic Balance.

Tabela 1. Limitação dos alvos

Alvo	Limitação
V_{outDC}	$\geq 400\text{mV}$
η	≥ 0.5

A Tab. 2 apresenta a limitação das variáveis de otimização, de forma a garantir que o circuito seja fisicamente realizável.

Tabela 1. Limitação dos alvos

Variável de otimização
$0.1 \text{ pF} \geq C_1 - C_2 \geq 100\text{pF}$
$1 \text{ mm} \geq T_{L1-6} \geq 50 \text{ mm}$
$1\text{mm} \geq L \geq 8\text{mm}$
$45^\circ \geq \hat{\text{Ang}} \geq 90^\circ$
$0\Omega \geq Z_{\text{source}} \geq 100\Omega$

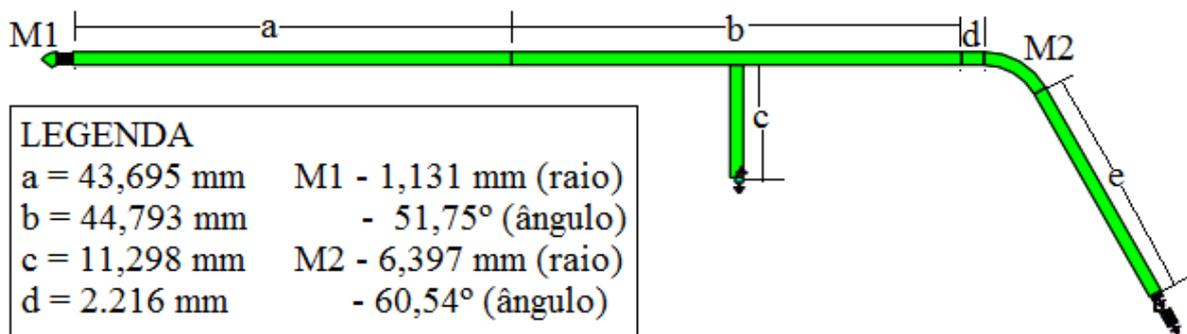
Onde C_1 e C_2 são os capacitores, T_{L1-6} são os trechos de microfita de largura L , Z_{source} é a impedância interna da fonte utilizada na simulação e $\hat{\text{Ang}}$ são os ângulos das quinas das trilhas do circuito.

A Tab. 2 apresenta a comparação entre os melhores resultados obtidos para cada topologia de circuito retificador otimizada. A potência na carga não foi tratada como um alvo, porém seu valor foi observado a fim de garantir que esta seria suficiente para alimentar a carga do circuito retificador.

Tabela 2. Comparação entre resultados ótimos para cada topologia de circuito retificador

Topologia	Série	<i>Shunt</i>	Dobrador de Tensão
Diodo	HSMS 286B	HSMS 286B	HSMS 2860
Carga	10 k Ω	10 k Ω	10 k Ω
V _{out}	366 mV	455 mV	364 mV
η	0,428	0,663	0,435
P _{out}	13,43 μ W	20,73 μ W	13,26 μ W
Substrato	Rogers 5850	Rogers 5850	Rogers 5850

Através da Tab. 2 nota-se que o Circuito Retificador *Shunt* apresenta melhores resultados para ambos os objetivos da otimização: tensão de saída retificada e eficiência. Nota-se também que a potência de saída deste tipo de retificador é a maior dentre os três tipos otimizados. Assim, este é considerado o circuito ótimo para a aplicação de coleta de energia do ar e seu *desing* é mostrado na Fig. 2. A largura para todos os trechos é de 1.31mm.

Figura 2. Design do Circuito Retificador *Shunt* otimizado

Terminado o processo de otimização foi realizado um ensaio com a finalidade de obter a resistência de saída do circuito. Este foi feito variando a carga de 10 Ω a 1 M Ω e traçando a curva Tensão x Corrente. Na Fig. 3 é mostrado o gráfico para o ensaio realizado com o circuito determinado ideal pelo processo de otimização.

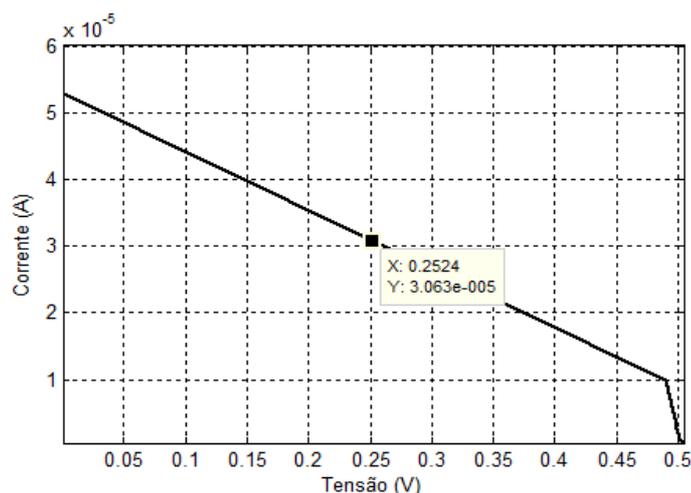


Figura 3. Ensaio Tensão x Corrente para Circuito Retificador *Shunt* Otimizado

Através do gráfico encontra-se a tensão de circuito aberto equivalente a 504 mV . A tensão de saída do circuito pode ser encontrada dividindo-se a metade da tensão de circuito aberto pela corrente naquele ponto, dessa forma tem-se que esta corresponde a $8,2358\text{ k}\Omega$.

É importante ressaltar que outros Algoritmos de Otimização não foram aqui testados para este problema, pois os resultados foram satisfatórios. Uma comparação dos parâmetros antes e após a otimização é apresentado em Silva (2016), evidenciando a importância deste processo em circuitos retificadores com a finalidade de coleta de energia do ar.

6 CONCLUSÃO

Sem o processo de otimização seria impossível alcançar a todos os objetivos desejados devido à interdependência das variáveis, no entanto, através deste processo foi possível encontrar o circuito retificador adequado para a aplicação de captação de energia do ar. Para trabalhos futuros, pretende-se otimizar outras topologias de retificadores com outros diodos e substratos, a fim de se esgotar todas as possibilidades e encontrar de fato o retificador ideal para a aplicação desejada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPEMIG, CAPES, CNPq, CEFET-MG e Laboratoire AMPÈRE – UMR 5005.

REFERENCES

- Akter, N., Hossain, B., Kabir, H., Bhuiyan, A.H., Yeasmin, M., & Sultana, S., *Design and performance analysis of 10-stage voltage doublers RF energy harvesting circuit for wireless sensor network*, Journal of communications Engineering and Networks, vol. 2, pp 84-91, April 2014
- Chuc, D.H. & Duong, B.G., *Investigation of rectifier circuit configurations for microwave power transmission system operating at S Band*, International Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 5, pp. 967-974, October 2015
- Clayton, P.R, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, Segunda Edição, John Willey and Sons, 2006
- Holland, J. H., *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor:University of Michigan Press, 1975
- Lopes, S.L., *Algoritmos Genéticos em Projetos de Engenharia: aplicações e perspectivas futuras*, 4º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 1999
- Silva, R.L.R, Gonçalves, S.T.M, Vollaire, C., *Otimização Multiobjetivo usando Algoritmo Genético das trilhas de microfitas de um retificador não-linear com baixíssima potência de entrada para aplicação de captação de energia do ar*, 12º CBMag – Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo – Momag (2016)