



OTIMIZAÇÃO E INVESTIGAÇÃO COMPORTAMENTAL DE ANTENAS DIPOLO OPERANDO EM UM SISTEMA *RECTENNA*

Fabiano Silveira Bicalho

Úrsula do Carmo Resende

Diego C. Correa

fabiano.bicalho84@gmail.com

resendeursula@gmail.com

diegoccorrea@gmail.com

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG

Avenida Amazonas, nº 7675, bairro Nova Gameleira, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

CEP: 30510-000

Resumo. Atualmente, devido à grande utilização de fontes fósseis de energia, principalmente carvão e derivados do petróleo, está ocorrendo o incremento expressivo da concentração de gases causadores do efeito estufa na atmosfera terrestre. Em contrapartida, também existe uma demanda crescente da comunidade internacional pela utilização de fontes limpas e renováveis de energia. Nesse contexto, diferentes tipos de novas fontes de energia têm sido propostas e investigadas. Uma dessas novas fontes, capaz de alimentar cargas de pequeno porte, é o reaproveitamento da energia eletromagnética disponível no ambiente. O reaproveitamento é obtido por meio da utilização da *rectenna*, que é composta basicamente por uma antena receptora associada a um retificador. Neste trabalho são avaliadas diferentes configurações de *rectenna* para operar no reaproveitamento de energia. São consideradas três antenas receptoras dipolo: duas planares impressas e uma do tipo filamentar. As antenas impressas foram projetadas e otimizadas utilizando a técnica de Algoritmo Genético disponível no software Computer Simulation Technology, enquanto para a antena filamentar foi escolhido um modelo comercial. O circuito retificador foi projetado e otimizado utilizando-se do Algoritmo Genético disponível no software Advanced Design System. São apresentados e discutidos os resultados das simulações e medições das *rectennas* operando sob uma mesma condição.

Palavras-chave: *Rectenna*, Otimização, Algoritmo Genético, Dipolo de meia onda, Retificador.

1 INTRODUÇÃO

A Transmissão de Energia Sem Fios (TESF) é um conceito que vem recebendo cada vez mais atenção de pesquisadores, desenvolvedores e empresários. Recentemente, novos aparelhos eletrônicos, tais como celulares e *tablets*, já possuem carregadores de bateria que operam sem a necessidade de fios através de acoplamento indutivo entre a base carregadora e o aparelho. A possibilidade de realização da TESF foi inicialmente investigada por Michael Faraday em seus ensaios envolvendo indução eletromagnética nos anos 1830. Posteriormente, no final dos anos 1880, o conceito foi formalmente estabelecido através dos experimentos realizados por Heinrich Hertz, onde pulsos de alta frequência foram gerados e transmitidos de forma deliberada entre dois circuitos. Após Hertz, Nikola Tesla estabeleceu os fundamentos da TESF com seus diversos trabalhos envolvendo corrente alternada e fontes operando em altas frequências. Em seu famoso experimento para ampla transmissão de energia sem fio, Torre de Wardenclyffe, Tesla foi capaz de ressonar uma bobina de 150 kHz a partir de uma fonte de 300 kW de potência. Entretanto, por uma combinação de problemas técnicos e financeiros, foi obrigado a abandonar a ideia de ampla distribuição de energia sem fio para a população, como era seu desejo (Zhang J. , 2013).

Após esses trabalhos iniciais, a era moderna da TESF teve início após o término da Segunda Guerra Mundial, nos anos 1950 com o desenvolvimento dos tubos de micro-ondas de alta potência pela Companhia Raytheon. Foi em seus trabalhos nessa companhia que W.C. Brown desenvolveu, na década de 1960, o conceito da *rectenna*, a antena retificadora. A *rectenna* de Brown era constituída por antenas dipolo de meia onda, operando na frequência de ressonância de 2,45 GHz, um plano refletor e um diodo termiônico para realização da retificação da onda de Rádio Frequência (RF) em um sinal de Corrente Contínua (CC) (Brown, 1984).

Recentemente, são vários os trabalhos que têm utilizado a *rectenna* para a conversão da energia RF para CC e alimentação de pequenas cargas, como por exemplo: pequenos motores elétricos (Fujino, 1994), dispositivos móveis da Internet das Coisas (Atzori, 2010), sistemas *stand-by* (Fezai, 2016) etc. A partir dos recentes avanços e pesquisas sobre a tecnologia de *rectenna*, basicamente suas aplicações dividem-se em duas filosofias de operação: sistemas para transmissão de energia e sistemas para reaproveitamento da energia ambiente. No modo transmissão, há a utilização de uma fonte de alta frequência especialmente dedicada para a alimentação da antena receptora da *rectenna*, enquanto no modo reaproveitamento, a *rectenna* capta a energia eletromagnética disponível no ambiente proveniente de fontes RF destinadas primariamente a comunicações, tais como celulares e internet.

Diversos tipos de antenas têm sido empregados nas *rectennas*, entretanto, os tipos mais comumente utilizados são os diversos modelos de antenas planares impressas e antenas filamentosas. Em sistemas para transmissão de energia, normalmente são empregadas antenas bastante diretivas, tais como as do tipo *patch*, corneta ou parabólica. Antenas do tipo dipolo, devido à característica de possuírem operação omnidirecional, podem ser empregadas tanto para transmissão, quanto para o reaproveitamento de energia. Neste trabalho é investigado o comportamento experimental de antenas construídas após implementação de um processo de otimização computacional de suas características construtivas básicas. O desempenho das antenas é certificado através de medições em laboratório e comparados aos parâmetros simulados. Tais antenas também são comparadas a um modelo de antena filamentar

largamente utilizado em roteadores comerciais de internet, DI-524 (D-LINK) com o objetivo de melhor avaliar o desempenho destas em face de um produto comercialmente empregado.

O tipo de circuito retificador utilizado possui importância fundamental na eficiência total da *rectenna*. Várias topologias vêm sendo estudadas e desenvolvidas para esse fim, tais como retificação de meia onda, onda completa e os circuitos multiplicadores de tensão (Marian, 2012). Neste trabalho é projetado, otimizado e testado um circuito retificador dobrador de tensão impresso sobre um substrato de fibra de vidro, FR4. É adicionado ao circuito um bloco para realizar o casamento de impedâncias entre o circuito retificador e a antena.

2 ANTENAS E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

Neste trabalho foram investigadas três antenas diferentes operando como receptoras e uma antena transmissora para compor as *rectennas* estudadas. Para as antenas receptoras foram empregadas duas antenas do tipo dipolo de meia onda, construídas sobre dois substratos dielétricos diferentes, e a antena comercial do tipo dipolo de fio com ganho de 6 dB, disponível no roteador DI-524. A antena transmissora, neste trabalho nomeada Antena 4, é também comercial do tipo dipolo, com ganho máximo de campo elétrico de 8 dB disponível no roteador modelo TL-WR841HP (TP-LINK).

A geometria básica das antenas dipolo de meia onda impressa é apresentada na Fig. 1. A Antena 1 foi impressa sobre um substrato dielétrico tipo Rogers RT/Duroid, com permissividade relativa, $\epsilon_r = 2,2$, tangente de perdas, $\delta = 0,0009$ e espessura, $h = 1,57 \text{ mm}$. Ambos os valores de permissividade e tangente de perdas foram fornecidos pelo fabricante. O substrato possui ambos os lados cobertos com uma camada de cobre com espessura $t = 0,035 \text{ mm}$. A antena 2 foi impressa sobre um substrato dielétrico de fibra de vidro, FR4, com espessura $h = 1,50 \text{ mm}$ e com permissividade dielétrica relativa e tangente de perdas caracterizadas em laboratório, $\epsilon_r = 4,3$ e $\delta = 0,001$. O substrato possui ambos os lados cobertos com uma camada de cobre com espessura $t = 0,030 \text{ mm}$. O projeto inicial das antenas dipolo de meia onda foi realizado conforme (Balanis, 2009).

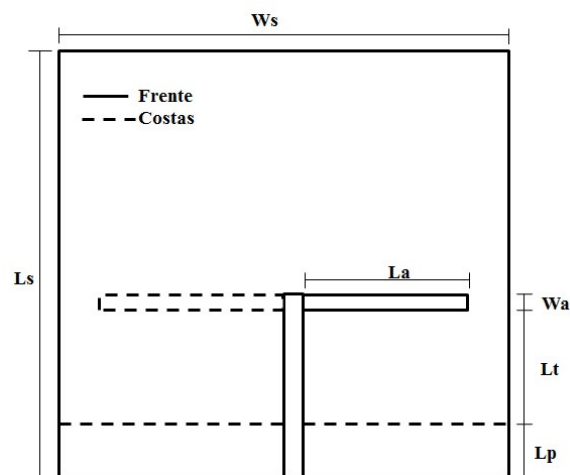


Figura 1. Geometria das antenas dipolo de meio comprimento de onda impressa.

Após o desenho da geometria básica, foi empregado um processo de Inteligência Computacional (IC) para que o desempenho da antena seja o mais eficiente possível. As antenas foram submetidas a um processo de otimização de suas dimensões via Algoritmo Genético (AG) disponível no software *Computer Simulation Technology* (CST). Tal método foi escolhido por não se conhecer exatamente qual é o comportamento local da função objetivo a partir do projeto inicial da antena. Algoritmos Genéticos são caracterizados por uma evolução de um grupo inicial de possíveis soluções para um problema segundo regras aleatórias de recombinação e evolução. É um método que emprega um número elevado de testes para cobrir toda uma gama de possíveis soluções, necessitando, portanto, de um custo computacional maior. Entretanto, mesmo sendo computacionalmente custoso e que variações de mínimos locais possam ocorrer durante toda a otimização, uma população grande e bem distribuída, acrescido do fator de mutação dessa população, tornam a busca pelo mínimo global mais eficiente e confiável (Takahashi, 2009).

A função objetivo empreendida para ambas as antenas foi a obtenção de um valor de $S_{11} < -10$ dB na frequência de ressonância desejada, 2,45 GHz, para uma impedância de referência normalizada de 50Ω . Não se deve empregar muitas funções objetivo ao se utilizar o AG para otimização, sob pena de não se obter as respostas desejadas em um tempo finitamente possível, motivo pelo qual foi escolhido apenas o S_{11} da antena. Uma antena que possua $S_{11} < -10$ dB é considerada em boas condições de operação, embora valores menores melhorem a eficiência total do sistema. A otimização, inicializada com uma população igual a 80, número máximo de iterações igual a 1641 e uma taxa de mutação estabelecida em 60%, obteve sucesso na obtenção da função objetivo para as duas antenas. As dimensões inicialmente calculadas e as finais das antenas após a otimização são apresentadas nas Tabelas 1 e 2, enquanto os ganhos de campo elétrico no padrão IEEE são mostrados nas Fig. 2 e 3. Na Tabela 3 estão resumidos os dados referentes ao processo de otimização e os recursos computacionais empregados.

Tabela 1. Dimensões iniciais e otimizadas da Antena 1

Dimensão	Inicial (mm)	Otimizado (mm)
Ws	80,0	77,42
Ls	60,0	54,12
La	30,0	26,41
Wa	2,0	3,18
Lt	10,0	18,02
Lp	10,0	16,61

Tabela 2. Dimensões iniciais e otimizadas da Antena 2

Dimensão	Inicial (mm)	Otimizado (mm)
W_s	80,0	70,17
L_s	60,0	54,58
L_a	30,0	23,52
W_a	2,0	3,11
L_t	10,0	15,45
L_p	10,0	15,32

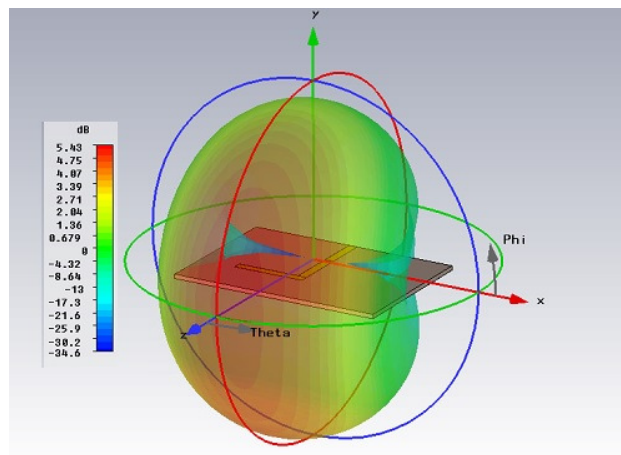


Figura 2. Ganho de campo elétrico no padrão IEEE para Antena 1.

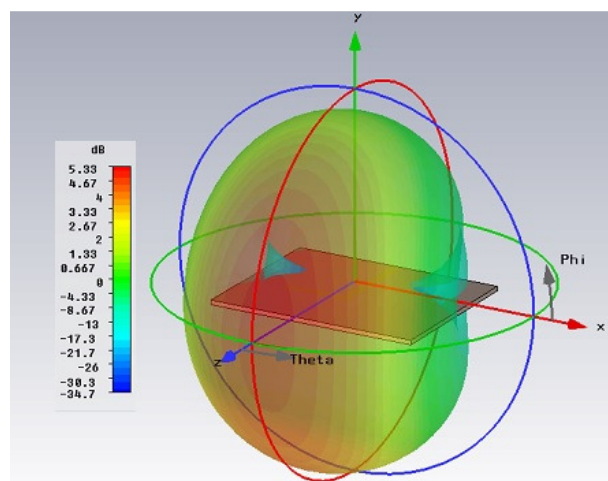


Figura 3. Ganho de campo elétrico no padrão IEEE para Antena 2.

Tabela 3. Recursos e dados utilizados para otimização via AG - CST

Parâmetro	Dado
Processador	Intel Core i5-3570 – 3,4 GHz
Núcleos empregados (CPU)	48 núcleos
Taxa de mutação (Antenas 1 e 2)	60%
População (Antenas 1 e 2)	80
Número de testes (Antena 1)	1641
Número de testes (Antena 2)	382
Tempo total gasto (Antena 1)	15,5 horas
Tempo total gasto (Antena 2)	2,13 horas
Erro final (Antena 1)	0,0229
Erro final (Antena 2)	0,1929

Verificando-se as Fig. 2 e 3 constata-se a característica omnidirecional de ambas as antenas, com um ganho máximo de 5,43 dB para a Antena 1, e 5,33 dB para a Antena 2. Pela Tabela 3 constata-se que, para a Antena 1, o processo de otimização empregado foi mais custoso quando comparado à Antena 2. Embora o erro final face à função objetivo da Antena 1 tenha sido relativamente melhor que o da Antena 2, na prática, dado o processo manual de manufatura das antenas, uma nova otimização para a Antena 2 é injustificada, pois as variações nas dimensões situar-se-iam na faixa dos décimos de milímetros, precisão justificada apenas para uso de sistemas computadorizados de manufatura.

A partir das dimensões otimizadas, as antenas foram manufaturadas e testadas com o uso do Analisador de Rede Keysight E5071C para verificar as condições de impedância de entrada, Z_{in} , e parâmetro S_{11} . Para a Antena 1 os resultados obtidos encontram-se nas Fig. 4 e 5, enquanto para a Antena 2, encontram-se nas Fig. 6 e 7. Na Fig. 8 é apresentado o S_{11} medido da antena comercial também utilizada nesse texto e nomeada Antena 3. Na Tabela 4 encontram-se resumidos todos os resultados obtidos para as antenas receptoras.

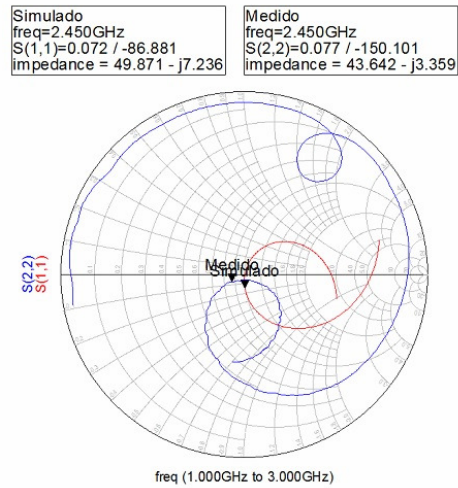


Figura 4. Impedância de entrada simulada e medida para Antena 1.

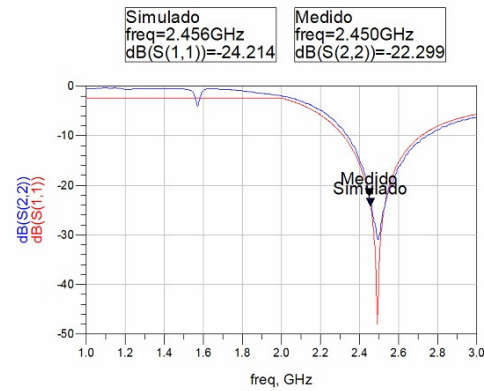


Figura 5. S11 simulado e medido para Antena 1.

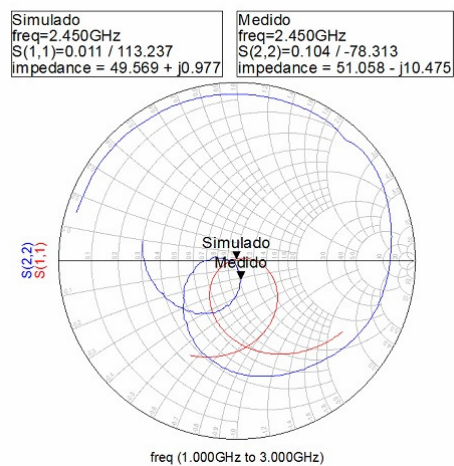


Figura 6. Impedância de entrada simulada e medida para Antena 2.

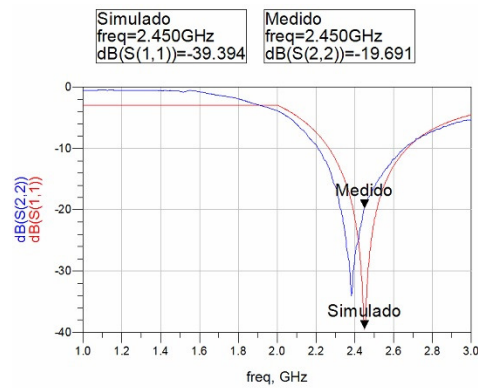


Figura 7. S11 simulado e medido para Antena 2.

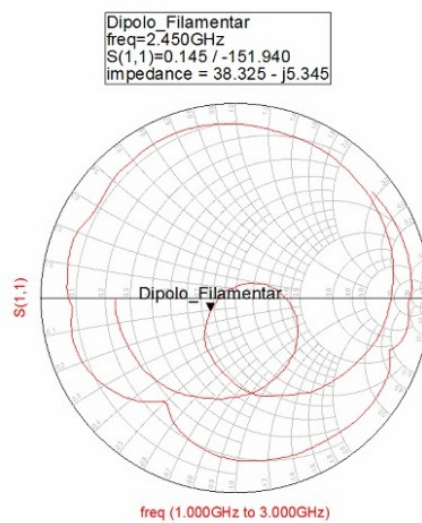


Figura 8. Impedância de entrada medida para Antena 3.

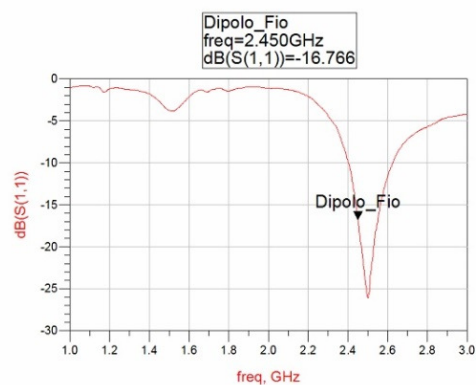


Figura 9. S11 medido para antenna 3.

Tabela 4. Resultados de Z_{in} e S_{11} das antenas

Antena	$Z_{in \text{ sim. }} (\Omega)$	$Z_{in \text{ med. }} (\Omega)$	$S_{11 \text{ sim. }} (\text{dB})$	$S_{11 \text{ med }} (\text{dB})$
Antena 1	49.87-j7.24	43.64-j3.36	-24.21	-22.30
Antena 2	49.57+j0.98	51.06-j10.48	-39.39	-19.69
Antena 3	-	32.33-j5.35	-	-16.77

A partir da análise dos resultados simulados e medidos para as Antenas 1 e 2, verifica-se que o processo manual de manufatura das antenas conduziu à obtenção de protótipos de antenas com boas condições de operação, ambas com valores de parâmetro S_{11} bem inferiores a -10 dB. A Antena 1, por possuir valores de permissividade e tangente de perdas certificados pelo fornecedor, possibilitou a modelagem mais precisa, conforme pode ser verificado por meio da proximidade entre os resultados medido e simulado. Verifica-se também que as antenas projetadas obtiveram inclusive um comportamento de S_{11} melhor que a Antena 3. Um melhor S_{11} é um parâmetro fundamental em todas as aplicações em RF e, portanto, foi o escolhido para ser otimizado. Nota-se que quanto menor é o valor de S_{11} , mais próximo de 50 Ω encontra-se o valor de Z_{in} , garantindo assim, um bom casamento de impedâncias e menores perdas.

3 RETIFICADOR E INTELIGÊNCIA COMPUTACIONAL

De formal geral, a alimentação de pequenas cargas eletroeletrônicas é realizada utilizando sinais elétricos de baixa frequência ou em CC. Assim, para que a *rectenna* possa de fato aproveitar a energia RF disponível no ambiente para alimentação dessas cargas, é necessário um processo eficiente de conversão RF-CC. A eficiência da conversão é um fator fundamental para a operação adequada de uma *rectenna*, uma vez os níveis de densidade de potência RF disponíveis no ambiente a serem reaproveitados são bastante pequenos, da ordem de grandeza de $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Outro aspecto fundamental para garantia da funcionalidade e eficiência do circuito retificador em sistemas *rectenna* é o tipo de diodo utilizado. Como o sinal de entrada nesse circuito situa-se na faixa de frequência de alguns GHz, os diodos devem ser do tipo ultrarrápido e com baixíssimo valor de barreira de potencial. Os diodos comerciais que possuem tais características são os diodos do tipo Schottky, especificamente aptos para o trabalho em altas frequências.

A maioria dos retificadores desenvolvidos para compor sistemas *rectenna* são construídos empregando-se alguma técnica para realizar o casamento de impedâncias entre a antena receptora e o circuito retificador (Zhang, 2013). O casamento de impedâncias é uma característica fundamental para garantir o aumento da eficiência na conversão da energia RF-CC, pois minimiza a ocorrência de ondas estacionárias entre a antena receptora e o circuito retificador. Diferentes técnicas para casamento de impedância vêm sendo empregadas em sistemas *rectennas*, e dentre essas as mais usuais são: o emprego de linhas de transmissão,

stubs (tocos de linha), indutores, capacitores ou mesmo antenas possuindo impedância de entrada com valor complexo conjugado da impedância de entrada do circuito retificador mais carga. Neste trabalho, o retificador investigado, comum a todas as antenas receptoras, foi projetado e construído utilizando as técnicas de linha de transmissão e *stub* do tipo aberto para realizar o casamento de impedâncias.

Outro aspecto fundamental em um circuito retificador é a topologia adotada. Em sistemas *rectenna*, normalmente são adotadas as topologias retificador de meia onda, onda completa e multiplicadores de tensão (Marian, 2012). Dado que os níveis de tensão de entrada no circuito retificador são extremamente baixos, com o objetivo de aumentar os valores de tensão na carga, a topologia adotada nesse trabalho é a dobradora de tensão, conforme Fig.10. Os diodos D1 e D2 escolhidos nesse trabalho foram do tipo Schottky HSMS-2852, um modelo reconhecido por possuir boas características de chaveamento em alta frequência e baixa queda de tensão, entre 150 e 250 mV (Broadcom, 2017). Para C1 e C2, foram escolhidos capacitores tipo SMD (Surface-Mounted Device) com capacitância de 100 μ F, enquanto para a carga R_L foi escolhido um resistor SMD de 1000 Ω . O circuito foi impresso sobre um substrato de FR4, com permissividade dielétrica relativa e tangente de perdas caracterizadas em laboratório, $\epsilon_r = 4.3$ e $\delta = 0.001$.

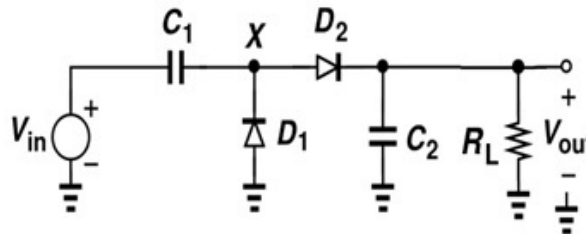


Figura 10. Esquemático dobrador de tensão para o circuito retificador

O retificador, junto ao bloco para casamento de impedâncias, foi simulado e otimizado no software *Advanced Design System* (ADS) para obtenção, a partir de uma potência de entrada de -10 dBm, frequência 2,45GHz e uma carga de 1000 Ω , um valor de $Z_{in} = 50 \Omega$. A técnica Algoritmo Genético disponível no ADS foi empregada para otimização dos comprimentos das linhas de transmissão L_1 , L_2 , L_{stub} e a largura W_{stub} , com um máximo de iterações determinado em 500 e erro máximo de 0.0001. Novamente, foi escolhida apenas uma função objetivo, $Z_{in} = 50 \Omega$, conforme anteriormente abordado na Seção 2. Na Fig. 11 é apresentada a topologia completa do circuito retificador proposta, enquanto na Tabela 5 são apresentadas suas dimensões finais e na Tabela 6 são apresentados os dados relativos ao processo de otimização. Os valores de Z_{in} e S_{11} , simulados e medidos, são mostrados nas Figs. 12 e 13. Os parâmetros foram medidos utilizando-se o Analisador de Rede Keysight E5071C.

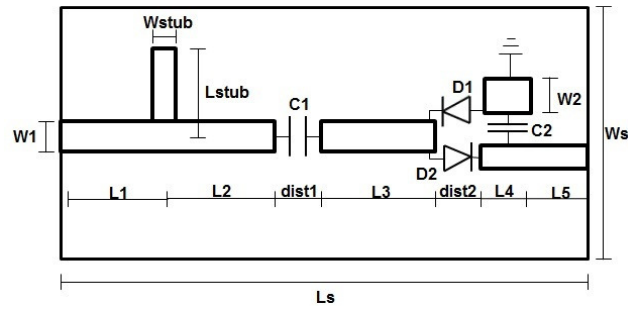


Figura 11. Topologia dobradora de tensão para o circuito retificador.

Tabela 5. Dimensões otimizadas para o retificador

Dimensão	Valor (mm)	Dimensão	Valor (mm)
L1	5,6	Dist 1	3,0
L2	9,2	Dist 2	1,5
L3	5,0	W1/W2	2,0
L4	3,0	Wstub	2,0
L5	4,0	L _s	2,92
L _{stub}	10,8	W _s	2,05

Tabela 6. Recursos e dados utilizados para otimização via AG - ADS

Parâmetro	Dado
Processador	Intel Core i5-3570 – 3,4 GHz
Tempo total gasto	0,1 hora
Número de testes	500
Erro final	0,0

Enquanto o software CST trabalha com métodos eletromagnéticos mais sofisticados (FDTD, FEM, MoM) para obtenção dos parâmetros desejados, o ADS trabalha com sistema de tensões e correntes elétricas. Portanto, o processo de otimização no CST foi bem mais computacionalmente custoso comparado ao ADS, não podendo assim, ser comparados entre si. O ADS também fornece ao usuário uma gama menor de opções para escolha, possuindo, portanto, um número maior de funções intrínsecas não disponíveis ao usuário.

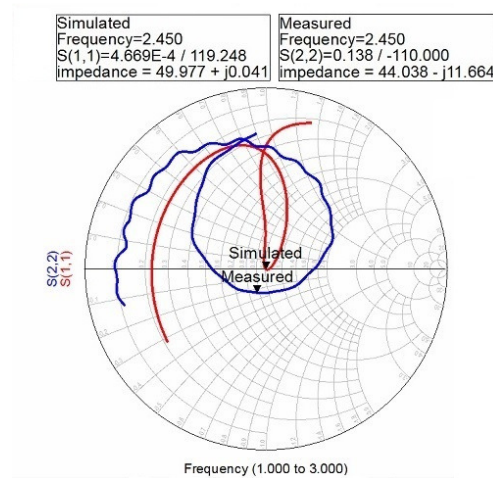


Figura 12. Impedância de entrada simulada e medida para o circuito retificador.

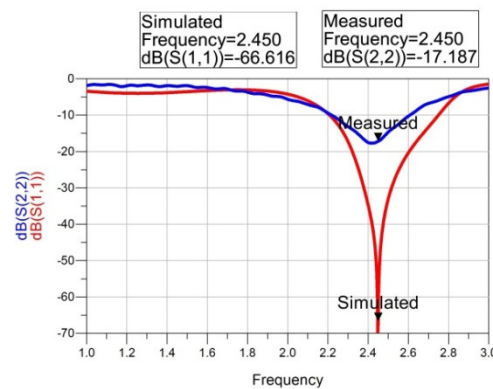


Figura 13. S11 simulado e medido para o circuito retificador.

Na Fig. 12 verifica-se que a impedância de entrada simulada, $49,98 + j0,042 \Omega$, e medida, $44,038 - j11,664$ possuem parte real bastante próximas, porém, com uma parte imaginária divergentes entre si. Tal fato pode ser creditado às imperfeições durante o processo manual de manufatura do retificador. Entretanto, verificando a Fig. 13, nota-se que o valor de S_{11} medido, $-17,19$ dB, está bem abaixo do valor operacional mínimo de -10 dB, aprovando assim, o retificador construído para compor a *rectenna* sob investigação. O processo de otimização utilizando-se do Algoritmo Genético mostrou-se, portanto, mais uma vez capaz de prover uma solução adequada ao projeto da *rectenna*.

4 SISTEMA RECTENNA

Empregando-se das antenas e o retificador construídos, foram realizados os testes operacionais das *rectennas*. A Antena 4, do tipo dipolo de fio de alto ganho, 8dB, foi utilizada como antena transmissora para geração do sinal RF disponível no ambiente. Essa antena foi conectada a um gerador de alta frequência, ajustado para fornecer uma potência constante de 26 dBm em 2,45 GHz. Inicialmente, foi verificada a potência captada, P_{in} , por cada uma das antenas receptoras a uma distância fixa de 50 cm da antena transmissora. Essa potência foi medida utilizando o Analisador de Espectro FieldFox Keysight N9912A e os valores obtidos são apresentados na Tabela 7. Tal medida foi realizada para avaliar se os níveis de potência de entrada nas antenas estariam próximos da região na qual o retificador foi otimizado para operar. Assim, com valores de P_{in} na antena próximos de -3 dBm em todas as medidas efetuadas, considerando-se as perdas por descasamento e imperfeições entre antena e retificador, o bloco retificador operará na região de potência próxima ao qual foi anteriormente otimizado, -10 dBm. Tal parâmetro possui importância fundamental em circuitos envolvendo retificadores operando em altas frequências, pois a resposta desse circuito operando nessas condições é dependente tanto do valor da frequência, quanto da potência de entrada.

Tabela 7. Potências de entrada nas antenas receptoras

Antena	P_{in} (dBm)
Antena 1	-2,91
Antena 2	-3,4
Antena 3	-3,1

As *rectennas* completas investigadas são apresentadas na Fig. 14, as tensões e as potências medidas são mostradas na Tabela 8. As potências de saída na carga, P_{carga} , foram calculadas conforme equações (1) e (2).

$$P_{carga} [W] = \frac{V_{carga}^2}{R_L} (W) \quad (1)$$

$$P_{carga} [dBm] = 10 \times \log_{10} \left(1000 \times \frac{P_{carga}[W]}{1W} \right) \quad (2)$$

Tabela 8. Tensão na carga e potência de saída das *rectennas*

<i>Rectenna</i>	V_{carga} (V)	P_{carga} (dBm)
<i>Rectenna</i> com Antena 1	0.43	-7.33
<i>Rectenna</i> com Antena 2	0.19	-14.42
<i>Rectenna</i> com Antena 3	0.39	-8.18

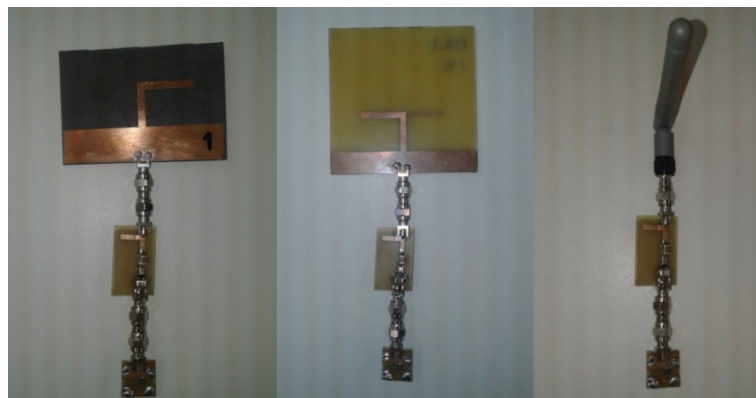


Figura 14. *Rectennas* empregadas nesse trabalho: Antena 1 (esquerda), Antena 2 (centro), Antena 3 (direita).

Comparando-se os resultados obtidos para as três *rectennas* construídas, verifica-se que a *rectenna* montada com a Antena 1 obteve o melhor resultado, seguida pela *rectenna* utilizando a Antena 3 e, por último, a *rectenna* com a Antena 2. O bom desempenho medido da Antena 1, apresentando o melhor S_{11} dentre as três antenas, contribuiu diretamente para a maior quantidade de potência entregue à carga. Por sua vez, a Antena 3, mesmo não possuindo um valor de S_{11} melhor que a Antena 2, foi capaz de entregar, aproximadamente, quatro vezes mais potência à carga. Tal comportamento pode ser justificado pelo maior ganho nominal da Antena Filamentar, 6 dB e pelas maiores perdas associadas ao substrato utilizado na Antena 2.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foram projetadas e construídas *rectennas* empregando-se três antenas diferentes e um único circuito retificador. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que antenas que apresentem baixo valor do parâmetro S_{11} e ganho elevado conduzem a sistemas capazes de captar e reaproveitar mais energia do ambiente. Outro aspecto de grande importância é a utilização de um processo de otimização na busca de projetos ótimos para as antenas e os circuitos retificadores, pois os níveis de energia que estão envolvidos em todo o sistema são muito pequenos, requerendo assim a maior eficiência possível em todas as partes componentes da *rectenna*. Circuitos retificadores empregados em *rectennas* por serem

bastante sensíveis às mudanças de frequência, carga e potência de entrada, necessitam fundamentalmente de um projeto cuidadoso aliado a um processo de IC para obtenção de um sistema eficiente e operacional. Foram empregadas técnicas para otimização disponíveis nos softwares CST e ADS para obtenção com sucesso de objetivos tais como menor S_{11} possível e $Z_{in} = 50 \Omega$. Optou-se pelo Algoritmo Genético por esse possuir características amplas de operação, garantindo assim, possibilidades maiores de se obter a função objetivo desejada com o menor erro possível. Métodos locais também podem ser empregados, entretanto, podem requerer um custo computacional maior, pois não se conhece o comportamento inicial da função objetivo. Verificou-se que o processo de otimização, aliado à manufatura cuidadosa das antenas e retificador, possibilitou a obtenção de resultados que comprovam a funcionalidade e viabilidade da tecnologia *rectenna*.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPEMIG, CAPES, CNPq e CEFET-MG.

REFERÊNCIAS

- Atzori, L., Iera, A., Morabito, G., 2010. The Internet of things: A survey. *Computer Networks*, vol 54, pp. 2787-2805
- Broadcom, 2017. <http://www.broadcom.com/products/wireless/diodes/schottky/hsms-2852>
- Brown, W. C., 1984. The history of power transmission by radio waves. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 1230-1242.
- Fezai, F., Menudier, C., Thevenot, M., Vollaie, C., Chevalier, N., Monediere, T., 2016. Reducing Electronic Device Standby Power Using a Remote Wake-Up System. *IEEE Antennas & Propagation Magazine*, pp. 66-73.
- Fujino, Y., Ito, T., Kaya, N., Matsumoto, H., Kawabata, K., Sawada, H., Onodera, T., 1994; A driving Test of a Small DC Motor with a *Rectenna* Array. *IEICE Transactions on Communications* vol. E77-B, pp. 526-528.
- Marian, V., Allard, B., Vollaie, C., Verdier, J., Strategy for Microwave Energy Harvesting From Ambient or a Feeding Source, 2012. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27
- Takahashi, R. H. C., 2009: <http://www.mat.ufmg.br/~taka/>
- Zhang, J., 2013. *Rectennas for RF Wireless Energy Harvesting*. PhD thesis, University of Liverpool.