



XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

SISTEMA DE REAPROVEITAMENTO DE ENERGIA UTILIZANDO CONJUNTO DE ANTENAS MICROSTRIP

Guilherme Lopes de Figueiredo Brandão

Felipe de Oliveira Silva Zanon

Úrsula do Carmo Resende

glopesbrandao@gmail.com

felipeos.zanon@gmail.com

resendeursula@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. *Uma demanda atual e relevante utilizando antenas é o reaproveitamento de energia eletromagnética. Neste caso, é empregada uma tecnologia denominada rectenna que consiste da combinação de uma antena e um circuito retificador. Nesta tecnologia, antenas microstrip são bastante utilizadas pela facilidade de construção, flexibilidade e custo acessível. Porém, esse tipo de antena apresenta restrições operacionais em termos de eficiência, potência e largura de banda. Entretanto, tais restrições operacionais podem ser minimizadas com o projeto adequado da geometria da antena e utilizando configurações com mais de um elemento radiante organizados na forma de conjuntos. Assim sendo, este trabalho apresenta a aplicação de conjuntos de antenas microstrip retangulares em um sistema de reaproveitamento de energia utilizando a tecnologia de rectennas. Os conjuntos são projetados, simulados e otimizados utilizando o software CST®, aplicando-se o Algoritmo Genético para ajuste dos parâmetros da antena. A topologia escolhida para o circuito retificador é a dobrador de tensão, que é simulada e otimizada utilizando o software ADS®. São apresentados os resultados de simulação e medição do sistema completo de reaproveitamento de energia proposto.*

Palavras-chave: *Rectennas, Reaproveitamento de energia, Algoritmo Genético, Conjunto de antenas*

1 INTRODUÇÃO

Desde o experimento realizado por Heinrich Hertz no final dos anos 1880 com a geração e transmissão de um pulso de alta frequência, intensificou-se o interesse pela transmissão de energia sem fio (TESF) (Zhang, 2013). No início do século vinte, a consolidação do conceito de TESF e as pesquisas a respeito do tema prosseguiram com Nikola Tesla, que em seu experimento denominado Torre de Wardencliff fez ressonar uma bobina na frequência de 150 kHz, alimentada por 300 kW de potência e atingindo um potencial de 100 MV (Pereira, 2015).

O desenvolvimento dos tubos de micro-ondas durante a Segunda Guerra Mundial serviu como base para a pesquisa e a proposição do retificador de sinais de micro-ondas para fornecimento de energia DC através de transmissão sem fio (Zhang, 2013). A era moderna da TESF tem início nos anos 1950 após o desenvolvimento de tubos de alta potência de micro-ondas pela Companhia Raytheon, com aplicações em aeronaves alimentadas por micro-ondas e em satélites de energia solar (Brown, 1984). Diversas pesquisas se iniciaram visando diferentes alternativas para TESF a partir da apresentação da primeira antena retificadora (rectenna) apresentada por W. C. Brown na década de 1960 (Brown, 1984). Essa rectenna foi projetada na Companhia Raytheon, sendo constituída por uma antena dipolo de meio comprimento onda operando na frequência de 2,45 GHz com um plano refletor e um único diodo termiônico, denominada ponte retificadora (Brown, 1984).

Para a aplicação em reaproveitamento de energia RF, as rectennas devem ser capazes de reaproveitar energia RF do ambiente. Dessa forma, são características interessantes para as rectennas: polarização arbitrária, alta eficiência de retificação em relação à largura de banda e bom desempenho com baixas densidades de potência incidente (Zhang, 2013). As pesquisas a respeito do reaproveitamento de energia RF utilizando sistemas rectennas foram intensificadas a partir do início dos anos 2000, tendo em vista a disseminação de equipamentos móveis com aplicações em RF. Em tais pesquisas, a utilização de antenas microstrip é uma opção bastante utilizada pelo fato de essas antenas serem construídas utilizando a tecnologia de circuito impresso, o que lhes garante baixo custo, construção simples, pequenas dimensões, baixo peso, e facilidade de instalação (Balanis, 2009).

Tendo em vista que as antenas microstrip normalmente possuem restrições operacionais em termos de eficiência e potência, a escolha do formato mais adequado para determinada aplicação é um dos pontos relevantes no projeto de uma rectenna, além da escolha adequada do circuito retificador. Diversos formatos de plaqueta, de circuitos retificadores e de circuitos de casamento de impedância vêm sendo propostos para a aplicação em reaproveitamento de energia, bem como conjuntos de antenas contendo mais de um elemento radiante. Neste trabalho é desenvolvida uma rectenna composta por um conjunto 1x2 de antenas retangulares com reentrância e um circuito retificador dobrador de tensão.

2 PROJETO DA ANTENA

A geometria do elemento retangular individual e do conjunto de antenas proposto é apresentada na Fig.1 (a) e (b), respectivamente. O conjunto 1x2 de antenas retangulares é composto por dois elementos individuais conectados por uma linha de transmissão microstrip. O elemento retangular individual é projetado considerando-se a frequência de operação $f_r = 2,45$ GHz, uma placa de circuito impresso cujas lâminas de cobre apresentam espessura $h_c =$

0,018 mm e substrato de FR-4 com espessura $h_s = 1,464$ mm, permissividade relativa $\epsilon_r = 4,38$, tangente de perdas $\delta = 0,017$. As dimensões iniciais do elemento retangular individual com reentrância são obtidas utilizando-se a formulação apresentada por (Balanis, 2009).

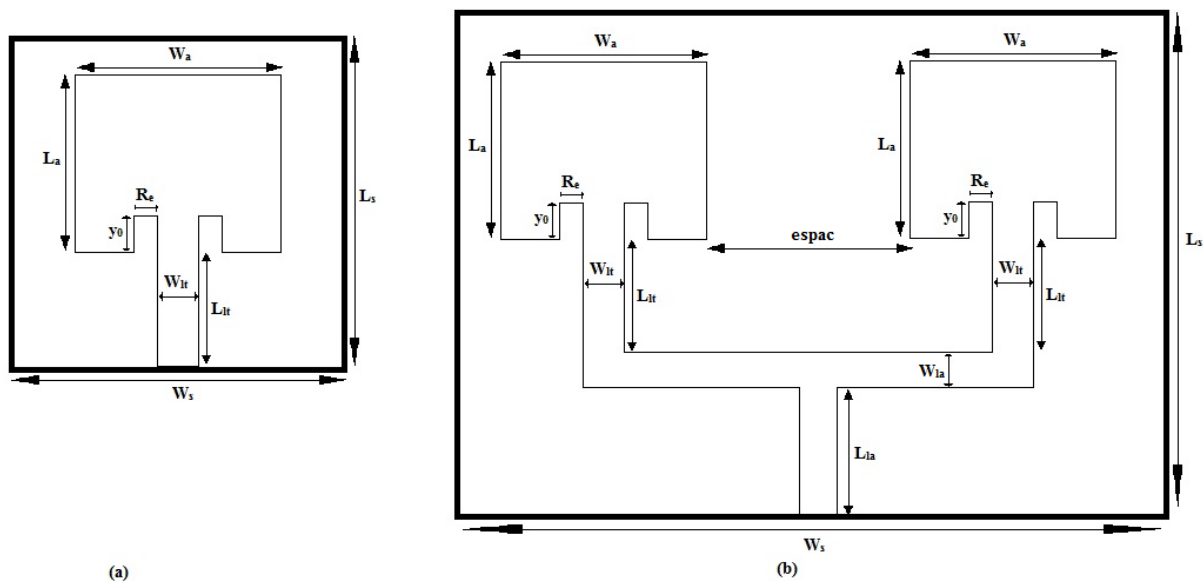


Figura 1. Geometria da antena retangular (a) individual e (b) em conjunto 1x2

Estruturas microstrip necessitam de uma interface para serem conectadas a analisadores de rede, de espectro e a outras estruturas microstrip e, em geral, utiliza-se o conector SMA como tal interface (Antonini, Scogna, & Orlandi, 2004). Na aplicação de rectennas, a caracterização dos efeitos de tais elementos deve ser realizada para conseguir o casamento de impedância entre antena e circuito retificador. Para os protótipos das antenas construídos neste trabalho, utilizou-se um conector SMA 3011 do fabricante KLC (KLC Conectores, 2016) que, em alta frequência, pode ser modelado por uma pequena linha de transmissão em série com um circuito RLC, conforme apresentado na Fig. 2.

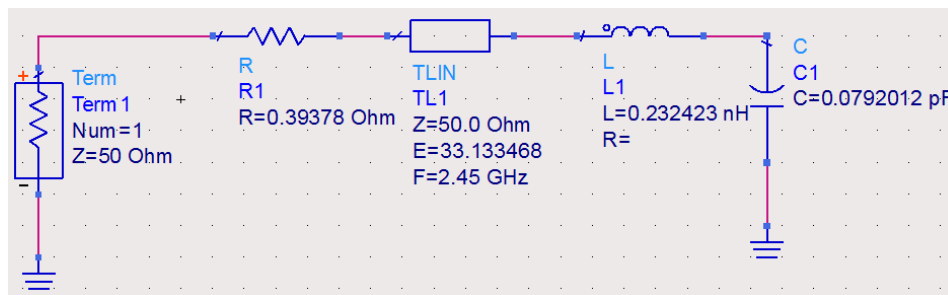


Figura 2. Modelo circuitual do conector SMA 3011

Utilizando-se o software ADS®, acoplou-se uma carga RLC em série na saída do modelo do conector SMA 3011, para determinação da impedância da carga que, conectada ao conector SMA, apresentasse uma impedância de entrada de 50Ω na entrada do conector. Concluiu-se que seria necessário que a antena (carga conectada ao conector) possuísse uma impedância de entrada $Z_{in} = 50,486 - j3,907 \Omega$ na frequência de 2,45 GHz.

2.1 Simulações do elemento retangular individual

Utilizando-se o software CST® e a ferramenta de otimização fornecida por este software, otimizou-se as dimensões iniciais do elemento retangular individual para alcançar uma impedância de entrada da antena $Z_a = Z_{in}$ e uma perda de retorno $S_{11} < -20\text{dB}$ em uma faixa de frequências entre 2,4 GHz e 2,5 GHz. Dentre os diversos algoritmos de otimização apresentados pelo CST®, utilizou-se o Algoritmo Genético com tamanho de população 20 e taxa de mutação de 60%, tendo em vista que o comportamento da função objetivo deste problema é desconhecido e o Algoritmo Genético é o que mais se aproxima do conceito de algoritmo de otimização para problemas genéricos (Takahashi, 2009).

O Algoritmo Genético aplicado pelo software CST® utiliza uma abordagem evolutiva para otimização, gerando diversos pontos no espaço de parâmetros e os refina através de múltiplas gerações, com mutação aleatória de cada parâmetro. A cada iteração, o conjunto de parâmetros que apresenta os melhores resultados é selecionado, fazendo com que o algoritmo convirja para um ótimo global, sendo indicado pelo CST® para aplicações em que o domínio do problema é complexo ou se utilize muitos parâmetros no modelo (Computer Simulation Technology, 2016).

A Tabela 1 apresenta as dimensões iniciais e otimizadas do elemento retangular individual.

Tabela 1. Dimensões iniciais e otimizadas do elemento retangular individual

Dimensão	Valores iniciais (mm)	Valores otimizados (mm)
W_s	65	69,8379
L_s	65	68,8115
W_a	37,3640	34,6525
L_a	28,9759	28,5322
W_{lt}	2,8354	2,5538
L_{lt}	16,8180	18,1040
y_0	9,6131	8,3961
R_e	2	1,8165

A Tabela 2 apresenta os resultados de simulação da impedância de entrada e de S_{11} em 2,45 GHz e da largura de banda, obtidos para as antenas retangulares individuais de dimensões iniciais e otimizadas.

Tabela 2. Simulação de Z_a e de S_{11} em 2,45 GHz e da largura de banda, para as antenas retangulares individuais de dimensões iniciais e otimizadas.

Antena	Z_a (Ω) em 2,45 GHz	S_{11} (dB) em 2,45 GHz	Largura de banda (MHz)
Inicial	24,564 – j43,138	-4,7113	20
Otimizada	50,494 – j3,937	-28,078	55

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 2 que após a otimização das dimensões da antena retangular individual a impedância de entrada, o S_{11} e a largura de banda da antena melhoraram significativamente. Sendo assim, utilizou-se dois elementos retangulares individuais com as dimensões otimizadas, acoplados por uma linha de transmissão microstrip, para formar o conjunto 1x2 de antenas microstrip retangulares apresentado na Fig.1 (b).

2.2 Simulações do conjunto 1x2 de elementos retangulares

Utilizando-se o software CST® e a ferramenta de otimização fornecida por este software, otimizou-se as dimensões iniciais denominadas W_s , L_s , W_{la} e L_{la} do conjunto 1x2 de antenas microstrip retangulares para alcançar uma impedância de entrada do conjunto de antenas $Z_a = Z_{in}$ e uma perda de retorno $S_{11} < -20\text{dB}$ em uma faixa de frequências entre 2,4 GHz e 2,5 GHz, mantendo-se fixa a geometria do elemento retangular individual.

A Tabela 3 apresenta as dimensões iniciais e otimizadas do conjunto 1x2 de antenas microstrip retangulares.

Tabela 3. Dimensões iniciais e otimizadas do conjunto 1x2 de antenas retangulares

Dimensão	Valores iniciais (mm)	Valores otimizados (mm)
W_s	130	105,7314
L_s	80	85,8095
W_{la}	2,5538	3,7624
L_{la}	18,1040	19,5067
espac	10	20,4462

A Tabela 4 apresenta os resultados de simulação da impedância de entrada e de S_{11} em 2,45 GHz e da largura de banda, obtidos para os conjuntos de antenas retangulares de dimensões iniciais e otimizadas.

Tabela 4. Simulação de Z_a e de S_{11} em 2,45 GHz e da largura de banda, para os conjuntos de antenas retangulares de dimensões iniciais e otimizadas.

Antena	Z_a (Ω) em 2,45 GHz	S_{11} (dB) em 2,45 GHz	Largura de banda (MHz)
Inicial	71,094 – j29,728	-10,682	85
Otimizada	50,451 – j5,951	-24,538	79

Observa-se pelos resultados apresentados na Tabela 4 que após a otimização das dimensões do conjunto de antenas retangulares a impedância de entrada e o S_{11} melhoraram significativamente, apesar da diminuição da largura de banda da antena.

2.3 Resultados experimentais das antenas otimizadas

Após a realização da simulação e otimização da geometria das antenas retangulares individuais e em conjunto, construiu-se dois protótipos de cada geometria, utilizando-se placas de circuito impresso de substrato FR-4, que foram acoplados a conectores SMA 3011. Os protótipos são apresentados na Fig. 3.

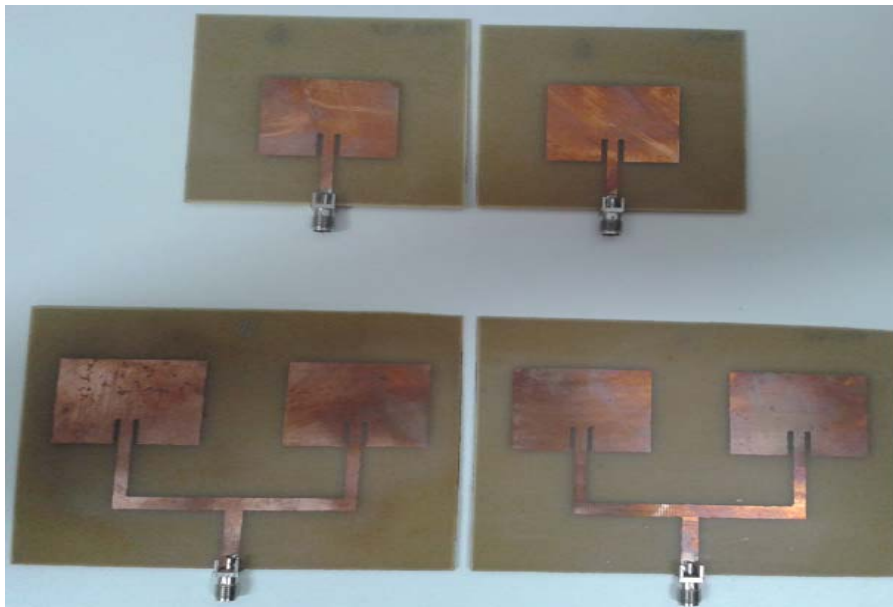


Figura 3. Protótipos da antena retangular individual e em conjunto 1x2

Utilizando-se o analisador de rede E5071C da Keysight (Keysight, 2016), mediu-se a impedância de entrada do sistema conector-antena Z_s , a perda de retorno S_{11} e a largura de banda dos protótipos. A Tabela 5 apresenta a comparação entre os resultados medidos e simulados para cada protótipo.

Tabela 5. Simulação e medição de Z_s e de S_{11} em 2,45 GHz e da largura de banda, para os protótipos construídos.

Antena	Z_s (Ω) em 2,45 GHz	S_{11} (dB) em 2,45 GHz	Largura de banda (MHz)
Individual simulado	$50,188 + j0,794$	-41,788	72
Individual medido A	$51,852 + j5,734$	-24,573	70
Individual medido B	$50,983 + j7,137$	-22,955	70
Conjunto simulado	$48,275 - j0,345$	-34,944	71
Conjunto medido 1	$45,135 + j7,476$	-20,587	78
Conjunto medido 2	$43,221 + 2,713$	-22,126	77

Pelos dados apresentados na Tabela 5 observa-se que os protótipos de elementos individuais apresentaram uma impedância Z_s mais próxima de 50Ω do que os protótipos de elementos em conjunto, apesar de apresentarem largura de banda menor.

Para teste dos protótipos construídos, conectou-se um deles (denominado transmissor) ao gerador de sinais Keysight N5181A (Keysight, 2016) configurado na frequência de 2,45 GHz e 30 dBm de potência de saída e outro (denominado receptor) ao analisador de espectro Keysight N9912A (Keysight, 2016), para medir a potência recebida. Testou-se as combinações Individual transmissor – Individual receptor, Conjunto transmissor – Individual receptor, Individual transmissor – Conjunto receptor e Conjunto transmissor – Conjunto receptora, variando-se a distância entre os elementos. A Fig. 4 apresenta o comportamento da potência recebida com a variação da distância entre os elementos.

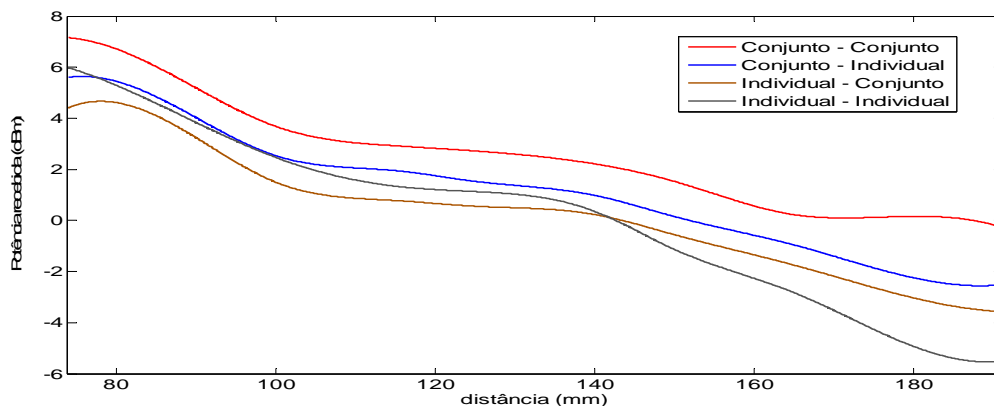


Figura 4. Potência recebida em função da distância para diversas configurações

Percebe-se pela Fig. 4 que a potência do sinal recebido pela antena receptora e que será entregue ao circuito retificador diminui com o aumento da distância entre os elementos e que,

mesmo para pequenas distâncias, a potência fornecida pelo gerador de sinais não é totalmente recebida pelo elemento receptor, uma vez que existem perdas por descasamento de impedâncias e atenuação da onda no ar. Além disso, percebe-se que a configuração Conjunto – Conjunto apresenta o maior nível de potência recebida, justificável pelo fato de a associação em conjunto elevar o ganho da antena.

3 PROJETO DO RETIFICADOR

O projeto do circuito retificador é outra etapa importante na construção de um sistema rectenna, tendo em vista que suas características influenciam diretamente na potência de saída. Devido à baixa potência de operação da rectenna, é interessante empregar um tipo de circuito retificador que proporcione um aumento do nível de tensão contínua na carga ligada ao sistema. Portanto, a configuração denominada dobrador de tensão é utilizada.

O primeiro passo para se realizar o projeto do circuito retificador é a escolha do diodo. Como o circuito retificador é projetado para operar na frequência de $f_r = 2,45$ GHz, os chamados diodos Schottky são escolhidos para fazerem parte do circuito, pois são dispositivos que trabalham em alta frequência. O modelo escolhido do diodo Schottky foi o HSMS2852, por apresentar baixa resistência série ($R_s = 25 \Omega$), baixa barreira de potencial ($V_s = 0,25$ V com $I_F = 1$ mA) e baixa capacitância de junção ($C_j = 0,18$ pF). O capacitor escolhido que compõe o circuito é um SMD 0805 com valor de 22 pF e a carga, por sua vez, um resistor SMD 1206 com valor de 221 Ω .

Após os componentes do circuito retificador serem definidos, o mesmo foi simulado no software ADS®, considerando seu substrato de FR4 com as mesmas características físicas e eletromagnéticas daquele utilizado na construção das antenas. Para alcançar a eficiência máxima do sistema rectenna, a impedância do retificador é casada com a impedância das antenas projetadas e construídas. Dessa forma, um circuito de casamento de impedância é necessário e a técnica de casamento escolhida para este projeto é a utilização de linhas de transmissão em conjunto com stubs, devido à sua facilidade de construção. A ferramenta *Smith Chart Utility* do software ADS® foi utilizada para determinar as dimensões iniciais da linha de transmissão e do stub. Em seguida, as dimensões do circuito de casamento foram otimizadas (Baylis, 2007) utilizando como ferramenta o Algoritmo Genético fornecido pelo próprio software ADS®.

O Algoritmo Genético do ADS® utiliza cinco passos para otimização, denominados Representação, Avaliação, Reprodução, Cross-over e Mutação. Na Representação, os parâmetros de entrada são convertidos em strings de dígitos, mapeando cada parâmetro em um intervalo de 0 a 1, sendo a string individual de cada parâmetro denominada elemento e o conjunto de todas as strings dos parâmetros denominado população. Na Avaliação, o desempenho $G(P)$ de cada string da população é avaliado e classificado a partir da função de erro (*function fitness*). Na Reprodução, os elementos de melhor performance são copiados e adicionados à população da próxima geração (recebendo o nome de descendentes). O Cross-over aplica o cruzamento nas strings, combinando elementos de melhor performance com os novos elementos da população, gerando uma nova string para a próxima geração. Por fim, a Mutação realiza uma alteração aleatória nos parâmetros, levando-se em consideração a população sobrevivente (Advanced Design System, 2011).

Aplicando-se o Algoritmo Genético no circuito retificador, foram necessárias 67 iterações para realizar o casamento do circuito, obtendo-se um valor de impedância de entrada

de $Z_s = 50,100 - j0,079 \Omega$. O circuito simulado em conjunto com o circuito de casamento de impedância é mostrado na Fig.5.

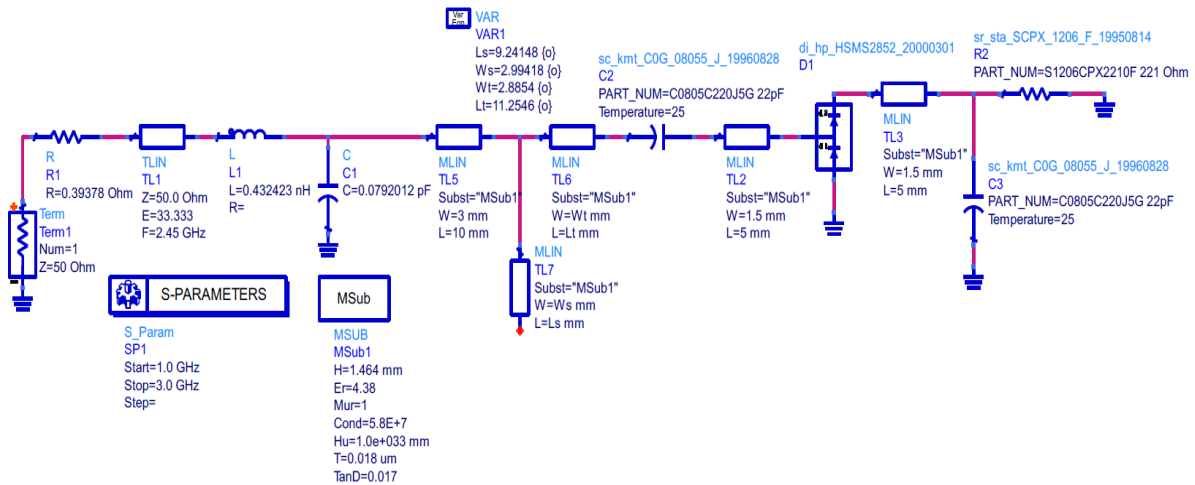


Figura 5. Circuito otimizado do retificador em conjunto com o circuito de casamento de impedância.

Após o projeto do circuito retificador ser concluído, um protótipo foi construído, como mostra a Fig. 6, e sua impedância de entrada foi medida através do analisador de rede E5071C da Keysight (Keysight, 2016), obtendo-se um valor de $43,894 + j15,626 \Omega$. Observa-se que o valor medido diferiu do valor obtido a partir da simulação, fato justificado pela inserção de erros devido a construção física do circuito, pontos de solda e tolerância dos componentes.



Figura 6. Circuito otimizado do retificador em conjunto com o circuito de casamento de impedância.

Para verificar a eficácia do protótipo, o mesmo foi conectado no gerador de sinais Keysight N5181A (Keysight, 2016) configurado na frequência de 2,45 GHz e 30 dBm de potência de saída, medindo-se uma tensão DC de saída de 4,132 V.

4 SISTEMA RECTENNA COMPLETO

Após o projeto, simulação, construção e testes individuais dos elementos componentes da rectenna, realizou-se o teste de tensão de saída das rectennas propostas. Para realização deste teste, conectou-se uma das antenas (denominada transmissora) no gerador de sinais Keysight N5181A (Keysight, 2016) configurado na frequência de 2,45 GHz e 30 dBm de potência de saída e outra (denominada receptora) no protótipo do circuito retificador, conforme apresentado na Fig. 7, para medição da tensão V_L sobre a carga de 221 Ω .

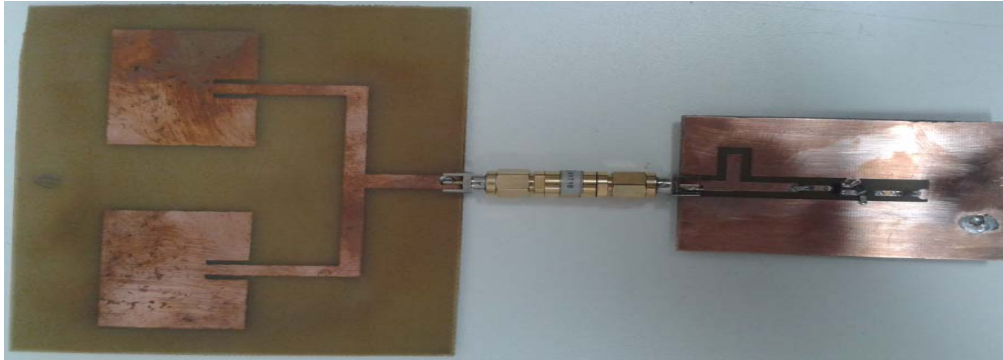


Figura 7. Protótipo do sistema rectenna utilizando o conjunto 1x2 de antenas retangulares.

Testou-se as combinações Individual transmissora – Individual receptora, Conjunto transmissora – Individual receptora, Individual transmissora – Conjunto receptora e Conjunto transmissora – Conjunto receptora, variando-se a distância entre os elementos. A Fig. 8 apresenta o comportamento da tensão V_L do sistema rectenna com a variação da distância entre os elementos.

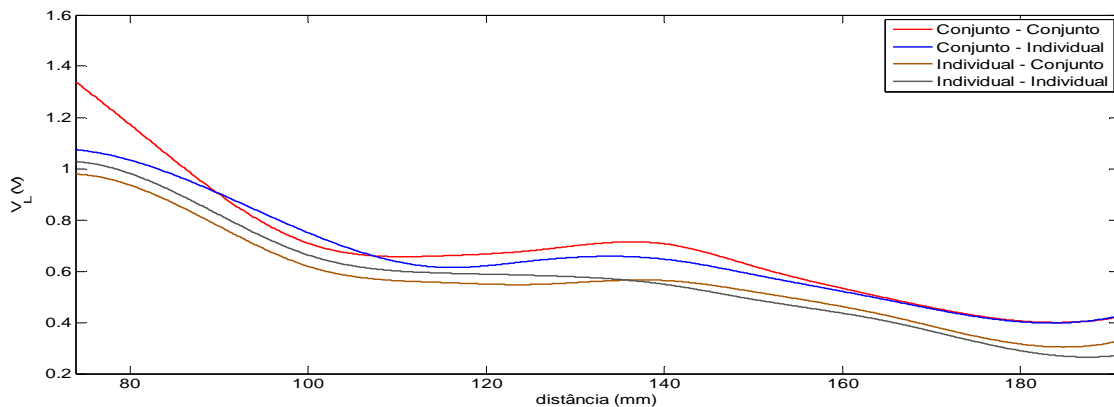


Figura 8. Tensão sobre a carga em função da distância para diversas configurações

É possível perceber, analisando-se os resultados apresentados na Fig. 8, que a utilização de conjuntos de antenas implica em uma maior tensão de saída do sistema rectenna devido ao aumento do ganho da antena. Além disso, com o aumento da distância entre a fonte de sinal e o sistema de reaproveitamento o nível de tensão entregue a carga diminui para todas as configurações. Percebe-se, também, que em uma faixa de distância entre 120 mm e 140 mm ocorre uma pequena elevação na tensão de saída do circuito. Acredita-se que esse comportamento se deve pela transição entre as regiões de campo próximo e campo distante, apresentando uma descontinuidade nessa faixa de distâncias, retornando ao decaimento após a transição.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas configurações de rectenna utilizando antenas retangulares com reentrância, em elementos individuais e formando conjuntos 1x2, conectadas a um circuito retificador dobrador de tensão, sendo estudadas as características destas antenas e realizando-se otimização de suas geometrias a partir da análise da perda de

retorno S_{11} , da impedância de entrada e da largura de banda, visando alcançar o melhor desempenho de cada configuração.

A otimização das geometrias das antenas, bem como do circuito retificador, utilizando-se o Algoritmo Genético apresentado pelos softwares de simulação CST® e ADS®, respectivamente, implicaram em uma melhora significativa dos parâmetros analisados, minimizando-se, assim, as perdas por descasamento de impedâncias. O processo manual de construção dos protótipos é responsável por parte das divergências apresentadas entre os resultados simulados e os resultados medidos.

Por fim, a aplicação das configurações das antenas propostas em um sistema de reaproveitamento de energia mostrou-se eficaz e corroborou com a ideia de que a utilização de conjuntos de antenas microstrip apresenta resultados melhores que os apresentados por um elemento individual.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS

- Advanced Design System, 2011: <http://www.agilent.com/find/eesof-docs>
- Antonini, G., Scogna, A. C., & Orlandi, A., 2004. Equivalent circuit extraction for an SMA connector. *Progress in Electromagnetic Research Symposium*, pp. 61-64.
- Balanis, C. A., 2009. *Teoria das Antenas, Análise e Síntese*. 3ª Edição, Ed. LTC.
- Baylis, C., 2007. *Circuit Optimization using ADS*. University of South Florida: <http://web.ecs.baylor.edu/faculty/baylis/EEL4421/Procedure10.pdf>
- Brown, W. C., 1984. The history of power transmission by radio waves. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp. 1230–1242.
- Computer Simulation Technology, 2016: <https://www.cst.com/Products/CSTS2/Optimization>
- Keysight Technologies, 2016: <http://www.agilent.com/home>
- KLC Conectores, 2016: <http://www.klc.ind.br/2013/>
- Pereira, P. M., 2015. *Estudo teórico e experimental de um sistema para transmissão de energia sem fio utilizando rectenna*. Master thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG.
- 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.