

EVOLUÇÃO DAS ANTENAS VIVALDI, VIVALDI PALM TREE E VIVALDI KOCH FRACTAL E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA MELHORIA DE PROCESSOS QUE UTILIZAM MICRO-ONDAS

Ruan Vieira de Melo

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Suzano, SP,
Brasil

Alexandre Maniçoba de Oliveira

Doutor, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Cubatão,
SP, Brasil

Islane Bahiano Menezes dos Santos

Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil

João Francisco Justo

Doutor, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil

Sergio TakeoKofuji

Doutor, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil

Robson Hebraico Cipriano Maniçoba

Doutor, Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB), Jequié, BA, Brasil

Marcelo Bender Perotoni

Doutor, Universidade Federal do ABC (UFABC), Santo André, SP, Brasil

Resumo: O presente estudo faz um apanhado da evolução das antenas antipodais Vivaldi, como estas vem sendo melhoradas e aplicadas em diversas áreas correlatas a micro-ondas. Desde a sua fase de criação até o que há de melhor desenvolvido atualmente, tal como a *Palm Tree*AVA e a Koch *Fractal*AVA.

Palavras-chave: Micro-ondas. Antenas UVW. Antenas Antipodais Vivaldi.

Abstract: The present study gives an overview of the evolution of antipodal Vivaldi antennas and how it has been improved and applied in several areas related to microwave. From its creation phase to what is currently best developed, such as Palm Tree AVA and Koch Fractal AVA.

Keywords: Microwave. UVW Antennas. Vivaldi Antipodal Antennas.

INTRODUÇÃO

Em toda história da evolução humana observa-se inúmeros aspectos que influenciam na velocidade em que melhoramos nossas formas de analisar o mundo. Dessa forma vem se desenvolvendo tanto a necessidade de uma telecomunicação mais efetiva, quanto o uso de tecnologias de diagnóstico por imagem que se tornam cada vez mais relevantes nesse contexto.

No que diz respeito a sistemas de telecomunicações, sobretudo de dispositivos portáteis, um sistema eficiente deve ser concebido através do uso de antenas portáteis, de fácil fabricação e que possuam um bom ganho. Nesse caso, pode-se citar as antenas planares, que possuem todas essas características como visto no trabalho de Oliveira (2015).

Já no tocante a sistema de análise por imagem, pode-se citar o uso de sistemas para a geração de imagens por micro-ondas que, ao contrário dos sistemas de Raio X, e semelhante aos sistemas de ressonância e tomografia, utilizam radiação não ionizante. Segundo Oliveira (2017), no caso de sistemas de imagens por micro-ondas, especificamente o uso de uma antena portátil, altamente diretiva e sobretudo imune a ruídos do ambiente, se faz indispensável o uso de antenas planares.

Antenas planares são particularmente simples de projetar, por serem feitas na própria placa de circuito impresso (PCB) tornando-as um dispositivo de confecção acessível. Podemos, então, citar um tipo específico planar, trabalhado por Oliveira (2015), a Antena Vivaldi Antipodal (AVA), uma antena diretiva e imune a ruídos do ambiente, o que a torna candidata ideal para a aplicação para fins de imagens médicas.

A Antena Vivaldi (AV) foi concebida originalmente por Gibson (1979), com o intuito de proporcionar um diagrama de radiação diretivo e *end-fire*. Tendo sido

desenvolvida há cerca de 30 anos, toda a antena é impressa apenas em uma face da placa, sendo considerada assim coplanar. Oliveira (2015) completa dizendo que seu complexo sistema de alimentação por casamento de impedância propicia uma limitação de largura de banda de apenas dois oitavos.

Em 1988, foi proposta por Gazit na forma antipodal, ou seja, a antena é dividida em duas partes, em que cada uma é impressa em uma face da PCB. Tal procedimento aumentou consideravelmente a largura de banda da AVA. Ainda em sua tese, Oliveira (2015) afirma que isso tornou sua construção ainda mais simples, pois, desse modo, reduziu sua composição a apenas uma micro-linha de transmissão e um radiador de abertura exponencial.

No mesmo formato antipodal, Oliveira (2015) descreve uma nova forma de bordas laterais. A ideia é inserir cavidades para controlar as correntes de superfície ao longo da antena. Tais cavidades são reproduções da abertura exponencial do radiador da própria. Com denominação *exponential slot edge antipodal Vivaldi antenna*(ESE-AVA), a antena foi batizada como *Palm Tree*AVA.

Tal procedimento gera pequenas antenas auxiliares que promovem, nas bordas da antena, um redirecionamento melhor do fluxo das correntes de superfícies (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Com isso a maior parte da energia gerada é concentrada e canalizada para o lóbulo principal, evitando assim que ela irradie lateralmente.

Ainda visando o melhoramento da diretividade de irradiação das AV, foi realizada a aplicação de cavidades nas bordas laterais de forma a reproduzir continuamente a curva *fractal*de Koch, (OLIVEIRA, 2017), denominada, assim, como *fractal slot edge Vivaldi* antena (FSE-AVA). A aplicação da técnica permite a formação de várias antenas auxiliares nas bordas da antena, da mesma maneira da ESE-AVA, que controlam as correntes de superfície. Com esse controle é permitido que haja uma concentração de energia maior no lóbulo principal da antena, da mesma forma que a desenvolvida na *Palm Tree*AVA.

MODELO DE GIBSON

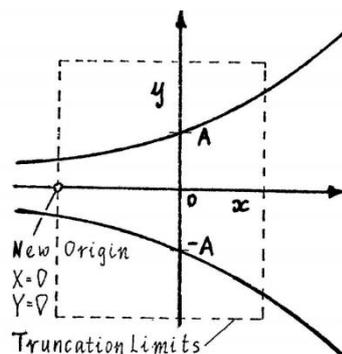
Inicialmente não havia antenas altamente diretivas como na forma em que propunha P.J. Gibson. Com isso, ele mesmo definiu a Antena Vivaldi como um novo membro da classe de aperiódico continuamente estruturada de antena escalonadas e, como tal, tem teoricamente largura de banda de frequência instantânea ilimitada. Gibson descreve também que a antena teria um ganho significativo proveniente de sua polarização linear, sendo seu modelo projetado segundo algumas normalizações para antenas já preestabelecidas na época.

Um requisito para o desenvolvimento das antenas já existia anterior ao projeto feito por Gibson que era determinado pela largura de banda de atuação da antena, entre 2GHz e 20GHz. Além disso, também antes do projeto da primeira antena Vivaldi, Du Hamel e Isbell (1957) descreveram que as antenas possuem características de padrão e impedância que são essencialmente independentes da frequência sobre larguras de banda teoricamente ilimitadas, trazendo mais características para a nova antena a ser desenvolvida.

Outro fator muito importante, segundo Gibson (1979), foi o fato de que se trabalhar com largura de banda constante requer uma antena que tenha uma forma que possa ser completamente especificada em termos de unidades de comprimento de onda, o que culminou na escolha da expansão exponencial da forma:

$$y = \pm Ae^{px}$$

Figura 1 – Lei de Expansão Exponencial Normalizada



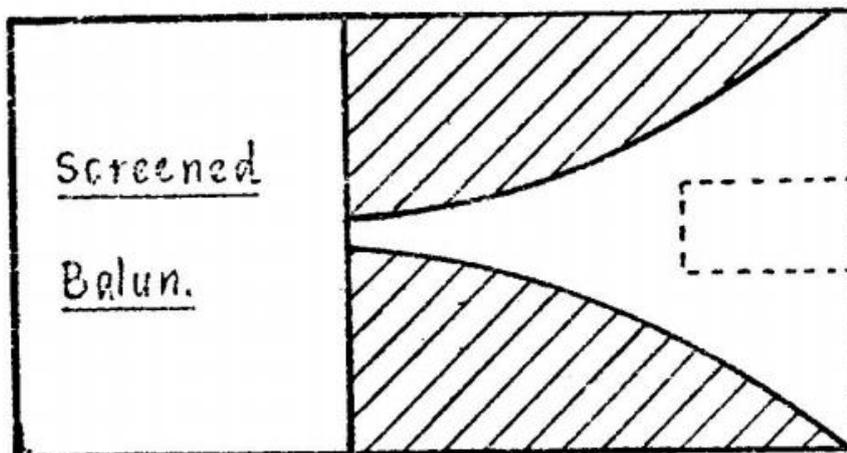
Fonte: Gibson (1979)

Onde y é a metade da distância de separação entre os eixos positivos e negativos da expansão e x o parâmetro de comprimento da tal. Com isso foram definidos os parâmetros constantes “A” e “p” que apresentavam o melhor resultado para a construção deste modelo, os quais, segundo Gibson, resultou na seguinte expressão construída no substrato de alumina:

$$y = \pm 0.125e^{(0.052x)}$$

O projeto apresentado na figura 2 foi feito para trabalhar numa largura de banda entre 2GHz chegando até acima de 40GHz, o que impressionantemente ultrapassou os parâmetros afixados como desafios da época, e com um ganho de aproximadamente 10dBI, além de um nível no lóbulo lateral, do inglês *Side Lobe Level* (SLL), de -20dB, o que permitia que a energia fosse canalizada no lóbulo principal da antena.

Figura 2 – AVA Modelo Gibson



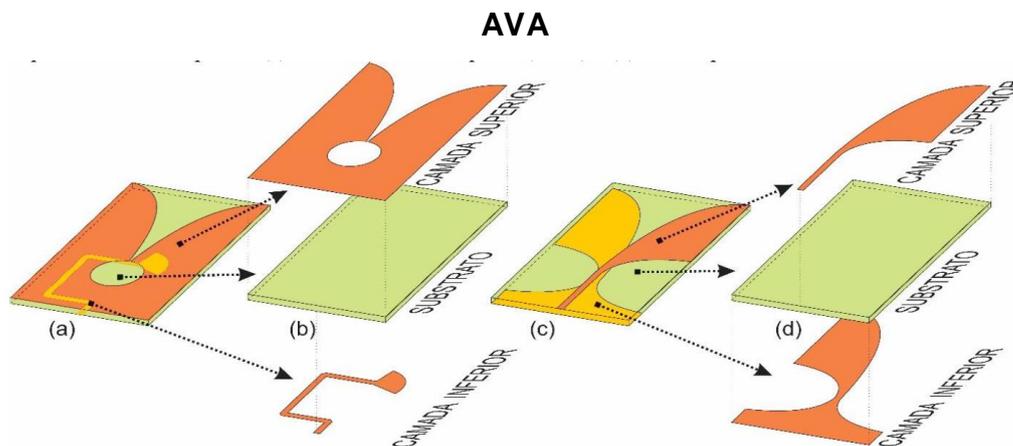
Fonte: Gibson (1979).

MODELO DE GAZIT

Após toda construção e revolução no que diz respeito às tecnologias em antenas proposta por Gibson, Gazit veio sugerir a toda comunidade acadêmica um novo formato de construção da mesma antena. Tal formato teria a condição de melhorar consideravelmente os resultados esperados nas antenas do tipo Vivaldi.

Gazit (1988) propõe então a construção de uma forma antípoda, ou seja, cada parte da antena seria construída numa camada da Placa de Circuito Impresso (PCB) conforme apresentado na figura 3. Com esta nova forma de construção, segundo DE OLIVEIRA (2015), a antena antipodal Vivaldi (AVA) minimiza problemas de perda de radiação elevada.

Figura 3 – Tipos básicos de antenas Vivaldi: (a) AV coplanar (b) Vista explodida da AV coplanar (c) AV antipodal (AVA) e (d) vista explodida da



Fonte: Oliveira *et al* (2015).

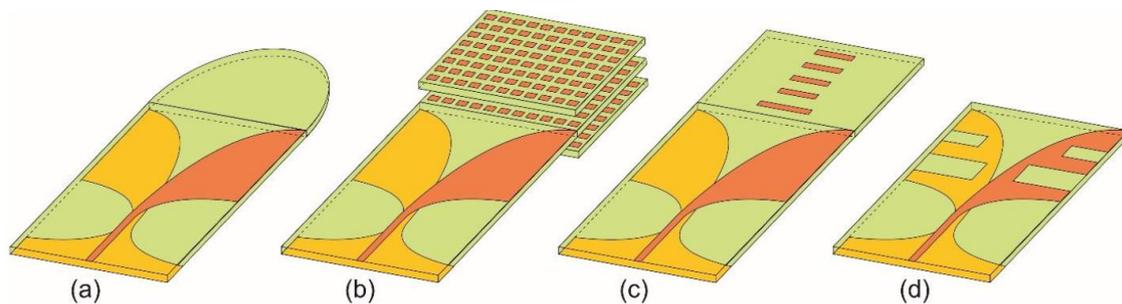
TÉCNICAS UTILIZADAS PARA MELHORA DA AVA

Após terem sido desenvolvidas alguns modelos de AVA, Oliveira realizou um aprofundamento que tratava da melhoria da diretividade das antenas Vivaldi. Com isso foram descritas várias maneiras, as quais podemos listar:

- Uso de lentes dielétricas (LD) – segundo visto em Kazemi *et al.* (2012) e Bourqui *et al.* (2010), aplica-se uma lente de um material diferente do substrato ou até mesmo como proposto em Wang *et al.* (2012) que constrói a lente de material dielétrico diretamente no substrato da antena conforme visto na figura 4(a). Segundo o levantamento feito por Oliveira (2015), com a utilização de LD é possível ver que a técnica permite a melhora da diretividade da AVA, o que se pode concluir devido à elevação do ganho no lóbulo principal, entretanto não diminui a radiação no SLL e apenas a proposta de Bourqui *et al.* (2010) consegue corrigir o estrabismo da AVA;

- Uso de lentes de metamateriais (LM) – alguns trabalhos propõem essa técnica que nada mais é que a aplicação de padrões repetidos de ressonadores metálicos diretamente no substrato, conforme ilustrado na figura 4(b), o que permite criar formas geométricas na forma de lentes de metamateriais, tais como visto em Zhou, *et al.* (2011) e Singha e Vakula (2015). Nesses casos de utilização de LM atestou-se que a técnica permite a melhora da diretividade da AVA, o que se pode concluir pela elevação do ganho no lóbulo principal; entretanto não diminui a radiação no SLL.
- Uso de diretores metálicos (DM) – a este ponto podemos definir como uma técnica que utiliza, a frente do radiador da antena, alguns diretores metálicos, conforme ilustrado na figura 4(c) e facilmente encontrados de forma mais detalhada nos trabalhos propostos por Agahi, Abiri e Mohajeri (2011) e He *et al.*(2014). A inserção de DM às antenas permite que as características de diretividade melhorem, o que se pode observar devido ao aumento do ganho no lóbulo principal apenas no trabalho proposto por He *et al.* (2014), segundo Oliveira (2015), porém não reduz o SLL e não propicia a correção do estrabismo da AVA;
- Uso de cavidades ressoantes (CR) – consiste na técnica de realizar entalhes nas bordas laterais da AVA de forma geométrica e bem definida, o que permite, segundo Oliveira (2015), uma grande melhora na diretividade da AVA, uma vez que reduz também o SLL, porém não aumenta o ganho e nem corrige o estrabismo no lóbulo principal.

Figura 4 – Ilustração das técnicas propostas para melhoria das AVAs: (a) Lente Dielétrica (b) Lente com Metamaterial (c) Diretores Metálicos e (d) Cavidades Ressonantes



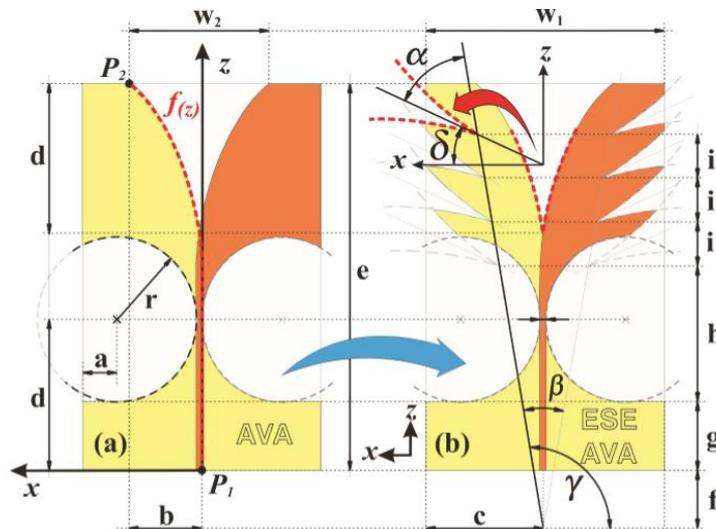
Fonte: Oliveira *et al* (2015).

PALM TREE ANTIPODAL VIVALDI ANTENA (ESE-AVA)

A ESE-AVA é uma antena desenvolvida com uma técnica de reprodução da abertura exponencial do radiador principal nas laterais da antena chamada *exponential slot edge* (ESE), conhecido também por quase *fractal*. Tal procedimento gera pequenas antenas auxiliares que promovem o controle de correntes de superfícies nas bordas desse tipo de antena. Com isso a maioria da energia gerada é concentrada e canalizada para o lóbulo principal da antena, evitando assim que ela irradie lateralmente (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

Para o desenvolvimento do projeto dessa antena, como descrito em Oliveira *et al.* (2015), variavam-se todos os parâmetros ilustrados na figura 3 para que se pudesse, por meio de simulação computacional, definir quais os parâmetros que resultariam melhores no aumento de ganho e diminuição do estrabismo no lóbulo principal, além da redução do SLL. Com isso, após todos os testes, os parâmetros i , β e α foram definidos tais como **6,87mm**, **20°** e **55°** respectivamente e com tais parâmetros simulados é que se permitiu a realização dos testes físicos da ESSE-AVA.

Figura 5 – AVA 974 original (a) e Palm Tree AVA 974 (b) com as respectivas indicações de medidas.



Fonte: Oliveira *et al* (2015).

Em relação ao desempenho da ESE-AVA, nota-se que a inserção das cavidades propiciou uma mudança nas correntes de superfície da AVA, o que, por sua vez, se concentrou em sua maioria na borda do lóbulo principal da antena, o que aumenta o seu poder de radiação direcional e diminui o SLL.

Oliveira *et al.* (2015) ainda concluíram dizendo que com base nos resultados obtidos, é possível afirmar que a nova técnica de cavidades radiantes, aplicadas às bordas da AVA na forma de aberturas exponenciais semelhantes ao radiador principal, propiciou que tais cavidades funcionassem como antenas auxiliares e não como ressonadores. Tais cavidades foram responsáveis por canalizar a energia, que antes se concentrava lateralmente, para o lóbulo principal, otimizando três características importantes já citadas no parágrafo anterior a este.

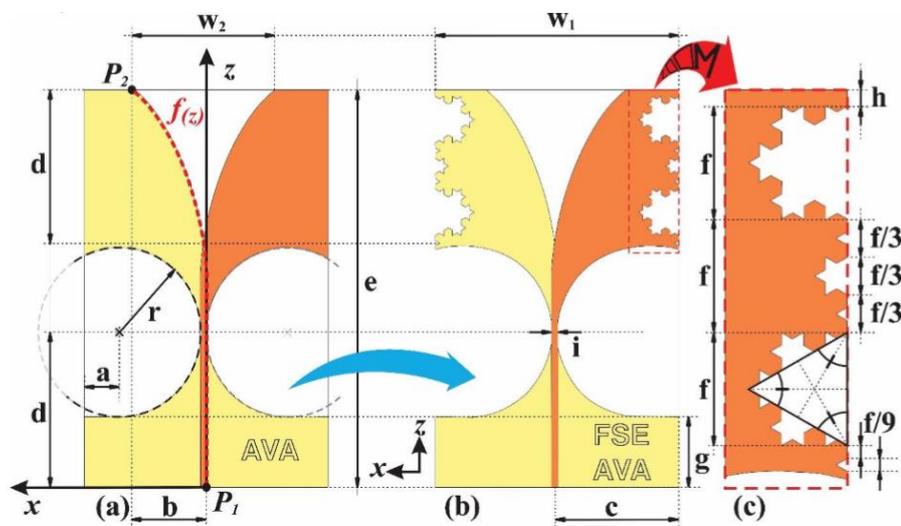
KOCH FRACTAL ANTIPODAL VIVALDI ANTENNA (FSE-AVA)

Com o sucesso nos resultados obtidos na ESE-AVA, foi possível pensar que se um “quase *fractal*” melhora o desempenho da antena, então um *fractal* bem definido pode ser bem mais eficiente para a aplicação em forma de entalhe das bordas da

AVA. Com isso, de uma maneira mais refinada foi pensado em inserir tais fractais para a nova antena.

A aplicação da técnica *fractal slot edge* (FSE) consiste em desenvolver nas laterais da AVA a reprodução continuada da curva de Koch, como mostrado na figura 6, de forma a obter várias antenas auxiliares, da mesma maneira da ESE-AVA, que controlarão as correntes de superfície da antena. Com esse controle é permitido que haja uma concentração maior de energia no lóbulo principal da antena da mesma forma desenvolvido na *Palm Tree*AVA.

Figura 6 – AVA 974 original (a) e Koch AVA 974 (b) com suas respectivas indicações de medidas e (c) detalhes e indicações de medidas da cavidade radiante.



Fonte: Oliveira, et al (2015).

A escolha da curva de Koch como base para os entalhes laterais se deve ao fato de que, na literatura, esta já é bem consolidada e nunca se fez uma aplicação em AV. Com isso Oliveira (2015) define um novo conceito de *fractal* em antenas Vivadi. Ainda assim, o desempenho apresentado mostra que no conceito de diretividade, as correntes de superfície sofrem alterações em função da aplicação da técnica FSE, o que promove uma melhor diretividade e um menor estrabismo no lóbulo principal da antena, além de diminuir o SLL.

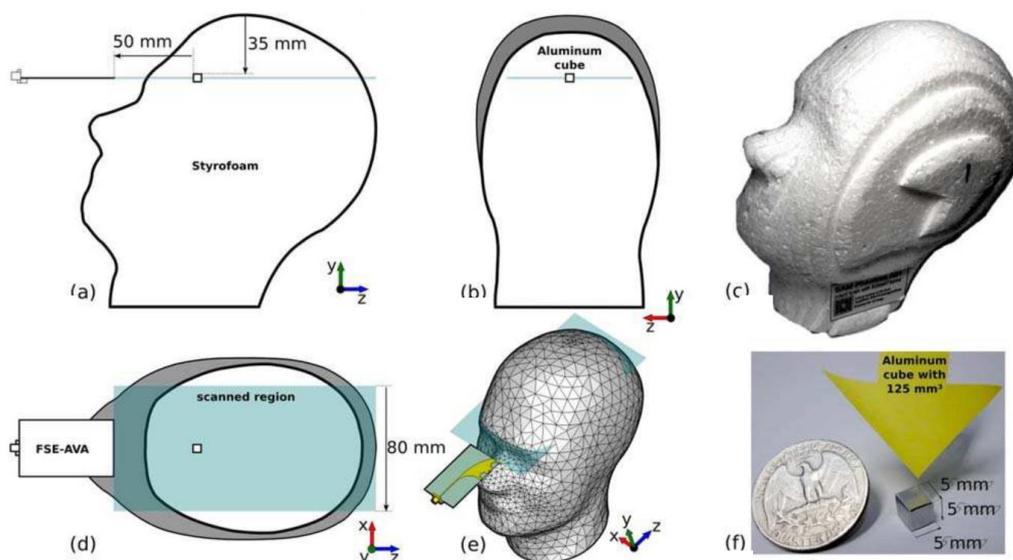
A FSE-AVA apresenta resultados muito superiores às demais AVAs, permitindo sua aplicação em sistemas refinados e sofisticados de micro-ondas, como é o caso de diagnósticos médicos e radares ligados a buscas arqueológicas, além de outros mais.

APLICAÇÕES

Quando falamos em aplicações das novas gerações de antenas Vivaldi podemos observar várias áreas de atuação das quais podemos destacar a área médica e a fabricação de radares de micro-ondas.

No tocante a área médica podemos destacar o trabalho de Oliveira *et al.* (2017), o qual aborda a técnica de aquisição de imagens por um campo de micro-ondas próximo, do inglês *near-field microwave imaging*. Para esta aplicação foi de extrema necessidade uma antena que permitisse total diretividade para que pudesse apresentar resultados palpáveis. Com isso foi utilizada a FSE-AVA, pois, dentre todas, era a mais eficiente.

Figura 7 – Aplicação de FSE-AVA para aquisição de imagens.



Fonte: Oliveira *et al.* (2017).

Já quando o assunto é radar de micro-ondas, podemos ter inúmeras aplicações as quais, dentre todas, podemos listar:

- Detecção de artefatos históricos por radar de micro-ondas;
- Esterilização por micro-ondas;
- Radares UWB para área de defesa.

CONCLUSÕES

As antenas Vivaldi *Palm Tree* e Vivaldi Koch *Fractal*, ambas dotadas de uma nova técnica de cavidade radiante de bordas laterais, se colocam em contraste com a tradicional técnica de cavidade ressonante de bordas laterais.

A inserção de *fractais* e cavidades em antenas do tipo Vivaldi, melhora substancialmente a diretividade destas, como mostrado claramente em todos os resultados obtidos por Oliveira em todos os seus estudos. Deve-se observar também que, quanto mais sofisticada a técnica de obtenção de fractais, podemos obter mais ainda a redução do *SLL*. Podemos perceber claramente na comparação com os diagramas de distribuição de campos elétricos e os diagramas de distribuição de correntes de superfície da Vivaldi *Palm Tree*, que possuem uma técnica menos sofisticada, com a VivaldiKoch *Fractal*, que já foi desenvolvida com uma técnica mais refinada.

Quando comparamos a AVA com cada tipo de antena desenvolvida por Oliveira podem claramente notar a canalização da energia do lóbulo lateral para o lóbulo principal. Desta forma, obtém-se uma antena Vivaldi com uma diretividade mais precisa.

A precisão de cada antena desenvolvida e a evolução delas permite que, ao longo da história tecnológica da AVA, possamos ter uma aplicabilidade cada vez mais importante e com um custo reduzido.

REFERÊNCIAS

BOURQUI, J, et al. Balanced antipodal Vivaldi antenna with dielectric director for near-field microwave imaging. **Trans. Anten. Propag.** v.58, n. 7, p.2318-2326. Jul. 2010.

DU HAMEL, R.H. & ISBELL, D.E., Broadband Logarithmically Periodic Antenna Structures, **I.R.E. Natl. Conv. Record**, Pt.I, p119 1957

GIBSON, P. J. The Vivaldi Aerial. IN: EUROPEAN MICROWAVE CONFERENCE. 9. **Proceedings...** Brighton, pp. 101-105, 1979.

HE, S. H., *et al.* An Improved Vivaldi antenna for vehicular wireless communication systems. **IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.**, v. 13, p. 1505-1508, Ago. 2014

GAZIT, E., Improved design of the Vivaldi antenna. **IEE Proceedings**, v. 135, n. 2, p. 89-92, 1988.

KAZEMI, R., *et al.* Dielectric Rod Antenna Array With substrate Integrated Waveguide Planar Feed Network for Wideband Applications. **IEE Trans. Anten. Propag.** v.60, n.3. p 1312-1319, Mar. 2012.

OLIVEIRA, Alexandre M. de **Desenvolvimento e otimização de antenas Vivaldi antipodais para aplicações em altas frequências**. 158f. Tese (Doutorado em Microeletrônica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

OLIVEIRA, Alexandre M. de *et al.* A high directive Koch fractal Vivaldi antenna design for medical near-field microwave imaging applications. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 59, n. 2, p. 337-346, 2017.

OLIVEIRA, Alexandre M. de *et al.* A palm tree antipodal Vivaldi antenna with exponential slot edge for improved radiation pattern. **Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 14, p. 1334-1337, 2015.

SINGHA, R., VAKULA, D. Corrugated antipodal Vivaldi antenna using spiral shape negative index metamaterial for ultra-wideband applications. **Signal Processing And Communication Engineering Systems (SPACES), 2015 International Conference on. IEEE.** 2015, p. 179-183.

WANG, P. *et al.* Design Of Modified 6-18GHz Balanced Antipodal Vivaldi Antenna. **Prog. Eletromag. Resea.** v.25, p. 271-285. 2012.

ZHOU, B. *et al.* Broadband and high-gain planar Vivaldi antennas based on inhomogeneous anisotropic zero-index metamaterials. **Prog. Eletromag. Resea.** v. 120, p. 235-247, 2011.