**ESCOLA POLITÉCNICA DA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

ALEXANDRE MANIÇOBA DE OLIVEIRA

**Desenvolvimento e otimização de antenas Vivaldi antipodais
para aplicações a altas frequências**

**SÃO PAULO
2016**

ALEXANDRE MANIÇOBA DE OLIVEIRA

**Desenvolvimento e otimização de antenas Vivaldi antipodais para aplicações a
altas frequências**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração:

Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr.

João Francisco Justo Filho

**SÃO PAULO
2016**

Nome: DE OLIVEIRA, Alexandre Maniçoba.

Título: Desenvolvimento e Otimização de Antenas Vivaldi Antipodais para Aplicações a Altas Frequências.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora

Prof. Dr. João Francisco Justo Filho (EPUSP)

Prof. Dr. Jorge Mieczyslaw Janiszewski (EPUSP)

Prof. Dr. Eduardo Victor dos Santos Pouzada (IMT)

Prof. Dr. José Fernando Diniz Chubaci (IFUSP)

Prof. Dr. Marcos Tadeu D´Azeredo Orlando (UFES)

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

De Oliveira, Alexandre Maniçoba

Desenvolvimento e otimização de antenas Vivaldi antipodais para aplicações a altas frequências / A. M. De Oliveira -- versão corr. -- São Paulo, 2015.

158 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Antenas 2.Micro-ondas 3.Diretividade 4.Fractal 5.Vivaldi I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

*Dedico este trabalho a meu filho, Felipe
Agrela de Oliveira (6), por toda força
transmitida com simples gestos e palavras
de admiração como só uma criança pode
fazer, principalmente quando via as
coloridas formas de diagramas de
radiação em três dimensões.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço sim, mas tomado de grande inspiração ao conhecer o célebre pensamento de Samuel Johnson sobre a gratidão, que diz: a grande cultura adquirida tem por seu maior fruto a atitude de gratidão, penso ser este elemento pré-texto um dos muitos frutos oriundos de tamanha experiência científica em minha caminhada durante o doutoramento. Experiência essa rica de oportunidades, de diálogos com pessoas inspiradoras e maravilhosas, de aulas com os mais notáveis professores da academia latino-americana, experiências que de uma forma ou de outra me promoveram a uma nova condição acadêmico-científica ao qual só me cabe agradecer.

Agradeço, mas penso sempre na máxima shakespeariana que diz ser a gratidão o único tesouro dos humildes, lastreado pela frase, não menos importante e tão inspiradora quanto, de Benjamin Constant, que diz, a gratidão tem memória curta, espero eternizar neste registro toda minha forma de protestos de gratidão a todos e a todas que foram para mim gigantes, ao qual, com pensamento aristotélico, me apoiei para ver mais longe, mas nunca me esquecendo do que diz André Anacoreta: Só pode subir nos ombros dos gigantes, aquele que constrói os degraus com a própria vida.

Agradeço, mas antes, tomado de grande sentimento de gratidão, dou início a meus eternos agradecimentos, que ecoarão pelo infinito temporal, a Deus, pois tenho plena certeza, plena convicção, que pela vida e saúde que me proporcionaste ó Senhor, eu pude superar todos os enfrentamentos hercúleos desta tão enfadonha, cansativa e às vezes sacrificante jornada.

Agradeço, mas na forma de manifesto generoso. Meus agradecimentos a minha amiga, companheira, confidente e amada esposa, Valéria, assim como a meu grande amigo e filho Felipe, pela compreensão e apoio nos momentos em que mais me ausentei para a realização deste trabalho.

Agradeço sim, mas sou impulsionado a lembrar de meu orientador, o professor Doutor João Francisco Justo Filho, por todo apoio e orientação, por tornar-se meu grande Pai Acadêmico e dar-me a honra de ser partícipe de sua nobre genealogia acadêmica, feito esse que tenho plena certeza estar já honrando.

Ao meu co-orientador, o professor Doutor Marcelo Bender Perotoni, ficam registrados os agradecimentos, pelo suporte, atenção e paciente orientação, a este renomado doutor devo todo meu desenvolvimento na área de antenas e propagação, que me faz nutrir um profundo sentimento de respeito fraternal.

A lembrança da figura paterna de um brilhante membro do seletor grupo de pesquisadores da Poli me faz agradecer imensamente a ele, meu *Sensei*, professor Doutor Sérgio

Takeo Kofuji, de quem trago o mais alto grau de profunda admiração, veneração e respeito por me ensinar tudo sobre a vida acadêmica, sobretudo como me relacionar com essa intrincada comunidade de maneira sempre vencedora.

Todo o suporte administrativo que me proporcionaram ascender como Doutor também se deve a toda equipe administrativa da EP-USP, em especial a secretaria de pós graduação de engenharia elétrica, por todo apoio eu humildemente registro meu muito obrigado.

Agradeço a meus pais, Francisco Saldanha e Amélia Ana por todo apoio ao longo das últimas três décadas de estudos, sem vocês eu não teria chego tão alto.

Jamais poderia deixar de agradecer a meus grandes amigos e parceiros de pesquisa, ao Dr. Antonio Cesar Lins Rodrigues que me ensinou o verdadeiro valor de lutar pelo próximo e ao Dr. Jorge R. B. Garay por toda generosidade demonstrada para comigo ao longo do mestrado e do doutorado, a vocês meu agradecimento por toda amizade e parceria.

A elas, minhas irmãs Ingrid Danilla e Ursula Anne, ficam aqui meus agradecimentos por toda atenção, torcida e carinho fraterno.

Thanks to Rogers Co. for materials, generously granted, the technical support and public recognition of my work.

Registro aqui meus agradecimentos a prof.^a Dr^a. Fátima Salete Correra e aos técnicos Jair Pereira de Souza e Wesley Becari por todo o apoio tecnológico durante as os experimentos com todos os protótipos desta Tese.

Por fim, mas não menos importantes, ficam meus agradecimentos a todo corpo docente da EPUSP, por tamanha excelência e profissionalismo em se doar por uma causa tão nobre, a de educar, a de construir um futuro melhor para todos aqueles que têm o privilégio de com eles aprender, a todos vocês, meu muito obrigado.

*Eu não creio que exista algo mais
emocionante para o coração humano do
que a emoção sentida pelo inventor
quando ele vê alguma criação da mente se
tornando algo de sucesso. Essas emoções
fazem o homem esquecer comida, sono,
amigos, amor, tudo.*

Nikola Tesla

RESUMO

Esta Tese propõe a síntese e o estudo de uma nova técnica de cavidades de borda aplicada a antenas Vivaldi, com o intuito de melhorar suas características de diretividade. Embora as antenas do tipo Vivaldi possuam características diretivas, elas produzem radiações laterais indesejáveis, o que se reflete nos elevados índices de lóbulos laterais devido a correntes superficiais que fluem ao longo das bordas metalizadas nas laterais da antena. Estas correntes são a origem das radiações laterais que vêm sendo mitigadas pela aplicação de cavidades ressonantes, triangulares ou retangulares, que aprisionam tais correntes e, conseqüentemente, atenuam os lóbulos laterais, sem o incremento do lóbulo principal, uma vez que toda a energia dos lóbulos laterais é apenas confinada nos ressonadores e por isso literalmente perdida. Ao contrário desses esforços, este trabalho propõe cavidades radiantes tanto na forma de abertura exponencial, como na forma do fractais de Koch, que funcionam como radiadores auxiliares (antenas auxiliares), canalizando as correntes de borda e aproveitando-as para aumentar os níveis do lóbulo principal, mitigando os níveis de lóbulo lateral. A síntese desta nova técnica foi implementada em uma antena Vivaldi antipodal com características de baixa diretividade, como qualquer antena Vivaldi, o que foi corrigido e a aplicação da técnica de cavidades radiantes deu origem a duas novas antenas Vivaldis efetivamente diretivas. Os resultados foram obtidos através de simulações do modelo numérico no CST Microwave Studio e confirmados com medidas de laboratório, o que evidenciou a melhora das características de diretividade da antena pela aplicação da nova técnica de cavidades radiantes.

Palavras-chaves: Antenas, Micro-ondas, Diretividade, Fractal, Vivaldi.

ABSTRACT

This work presents a new Slot Edge technique applied to Vivaldi antennas to improve their characteristics of directivity, resulting in two new Vivaldi antennas: the Palm Tree Vivaldi antenna and the Koch Vivaldi antenna. This new technique proposes to add lateral radiators which reduce the side lobe level, increasing the gain of the main lobe in an unprecedented way. This technique is called radiating slot edges, and acts as parasitic antennas, surface currents draining edges of the antenna, and using them to increase the gain in the main lobe. The development was done systematically, starting with an extensive literature review, design and simulation in CST, as well as prototyping and measurements of several antenna designs. All this effort proved the functionality of this technique.

KEY-WORDS: Antennas, Microwaves, Directivity, Fractal, Vivaldi.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ilustração dos dois tipos básicos de antenas Vivaldi. (a) Antena Vivaldi Coplanar (AV), (b) vista explodida da AV Coplanar, (c) antena Vivaldi Antipodal (AVA) e (d) vista explodida da AVA.	27
Figura 2 - Ilustração das técnicas propostas na literatura para melhorar a diretividade da antena Vivaldi. (a) Lente Dielétrica, (b) Lente com Metamaterial, (c) Diretores Metálicos e (d) Cavidades ressonantes.	28
Figura 3 - Ilustração da Lei de Indução Magnética de Faraday.	34
Figura 4 - Ilustração da densidade de corrente superficial.	35
Figura 5- Efeito da deformação do átomo do dielétrico sobre exposição ao campo elétrico. Deslocamento da eletrosfera para esquerda. (b) Ausência de campo elétrico, vetor deslocamento nulo. (c) Deslocamento da eletrosfera para direita.	36
Figura 6- Linhas de campo magnético atravessando a superfície fechada ∂V	37
Figura 7- Ilustração da discretização de domínio do problema eletromagnético nas malhas ortogonais.	38
Figura 8- Ilustração das etapas de aplicação das equações de Maxwell nas faces do hexaedro.	39
Figura 9- Ilustração da aplicação do método leap-frog para cálculo dos potenciais elétricos e fluxos magnéticos no domínio do tempo (CST, 2011; DE OLIVEIRA, 2012c).	41
Figura 10- Foto do ambiente de medida do parâmetro S11 fora da câmara semianecóica com o detalhe da marca e modelo do analisador de rede utilizado, bem como da AVA-974.	43
Figura 11- Esquema de montagem para medida de todos os parâmetros S. Duas unidades idênticas de cada antena é utilizada para esta medida. Neste caso, duas AVA-974.	44
Figura 12- Câmara semianecóica utilizada para medidas de diagrama de radiação. (a) Suporte fixo transmissor. (b) Suporte rotacional para instalação da antena receptora em teste.	45
Figura 13- Oscilador HP 8350B (a) e RF Plug-in HP 83540A 2.0-8.4 GHz (b).	46
Figura 14- Oscilador HP 8350B (a) e RF Plug-in HP 83595A .01-26.5 GHz (b).	46
Figura 15- Medidor de potência HP 438A.	47

Figura 16- Sensor de potência HP 8740D.	47
Figura 17- Linha de Transmissão em Micro fita onde h e t são as espessuras do substrato e do condutor em fita respectivamente e w é a largura do condutor em fita (a). Representação da análise de um corte transversal de uma MTL com propagação quase-TEM (b).	50
Figura 18- AVA-974 proposta com detalhe da abertura exponencial do irradiador (DE OLIVEIRA, <i>et al.</i> 2012a).....	51
Figura 19- Parâmetros do projeto da AVA-974 referência proposta por De Oliveira <i>et al.</i> (2012a).	51
Figura 20- Fotografia da AVA-974 Referência fabricada, sendo a vista superior à esquerda e a inferior à direita.....	52
Figura 21- Perda por retorno da AVA-974 Referência Medida (linha contínua) e Simulada (linha tracejada).....	53
Figura 22- Diagrama de radiação da AVA-974 Referência Medido (X's) e Simulado (linha tracejada) a 6 e 8,4 GHz.....	54
Figura 23- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície da AVA-974 Referência com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d) e da região que promove a radiação dos lóbulos laterais.	55
Figura 24- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da AVA-974 Referência com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6 GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a) e nas bordas laterais (ponto b).....	56
Figura 25- Detalhe do diagrama de correntes de superfície a 6 GHz do radiador exponencial da AVA-974 Referência com a evidencia das diferentes distribuições de correntes nas duas superfícies do radiador (ponto a) e (ponto b).....	57
Figura 26- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz, da AVA-974 Referência.	58
Figura 27- AVA-974 original (a) e RSE-AVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.	65
Figura 28- Fotografia da RSEAVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior.	65
Figura 29- Perda por retorno simulada da RSEAVA-974 (linha contínua) e da AVA-974 (linha tracejada).	66

Figura 30- Diagrama de radiação da RSEAVA-974 (a) e (b), e da AVA-974 (c) e (d) medido e simulado a 6 e 8,4 GHz.....	67
Figura 31- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície, a 6 GHz, da RESAVA-974 com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d), da região das bordas laterais (ponto e) e dos entalhes (cavidades ressonantes) (ponto f).....	68
Figura 32- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da RSEAVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a), nas bordas laterais (ponto b) e nas cavidades ressonantes (ponto c).....	69
Figura 33- Detalhe do diagrama de correntes de superfície a 6GHz do radiador exponencial da RSEAVA-974 com pequenas diferenças nas distribuições de correntes nas duas superfícies do radiador (ponto a) e (ponto b).....	70
Figura 34- AVA-974 original (a) e TSEAVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.	71
Figura 35- Fotografia da TSEAVA-974 fabricada, onde a esquerda esta a vista superior e a direita a vista inferior.	71
Figura 36- Perda por retorno simulada da TSEAVA-974 (linha contínua) e da AVA-974 (linha tracejada).....	72
Figura 37- Diagrama de radiação da TSEAVA-974 (a) e (b), e da AVA-974 (c) e (d) medido e simulado a 6 e 8,4 GHz.....	73
Figura 38- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície, a 6 GHz, da TESAVA-974 com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d), da região das bordas laterais (ponto e) e dos entalhes (cavidades ressonantes) (ponto f).....	74
Figura 39- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da TSEAVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6 GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a), nas bordas laterais (ponto b) e nas cavidades ressonantes (ponto c).....	75

Figura 40- Detalhe do diagrama de correntes de superfície a 6GHz do radiador exponencial da TSEAVA-974 com pequenas diferenças nas distribuições de correntes nas duas superfícies do radiador (a) e (b).	76
Figura 41- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6GHz. Acima AVA-974 e abaixo RSEAVA-974.	77
Figura 42- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz. Acima AVA-974 e abaixo TSEAVA-974.	78
Figura 43- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz. Acima AVA-974 e abaixo Palm Tree AVA-974.	79
Figura 44- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz. (a) AVA-974, (b) RSE-AVA-974, (c) TSEAVA-974 e (d) ESEAVA-974.	80
Figura 45- AVA-974 original (a) e Palm Tree AVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.	82
Figura 46- Fotografia da Palm Tree AVA-974 fabricada, onde a esquerda esta a vista superior e a direita a vista inferior (DE OLIVEIRA, <i>et al.</i> 2015).	83
Figura 47- Detalhe dos três principais parâmetros (i , α e β) de aplicação da técnica ESE.	84
Figura 48- Diferentes Palm Tree AVA obtidas durante o processo de otimização.	85
Figura 49- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro i da Palm Tree AVA.	86
Figura 50- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro i . ..	86
Figura 51- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro i	86
Figura 52- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro β da Palm Tree AVA.	87
Figura 53- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro β . .	87
Figura 54- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro β	88
Figura 55- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro α da Palm Tree AVA.	88
Figura 56- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro α . .	89
Figura 57- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro α	89
Figura 58- Tela do programa CAD DraftSight utilizado para criar as plantas da antena.	90
Figura 59- Fotografia da segunda remessa de laminados Rogers de cortesia.	91
Figura 60- Conector SMA 50 Ω . À esquerda a foto do conector real e a direita o modelo numérico no CST Microwave Studio (DE OLIVEIRA, 2015).	92

Figura 61- Modelo numérico do conector SMA utilizado com o detalhe das portas 1 e 2 para simulação.	93
Figura 62- Distribuição de campos elétricos (a) e magnéticos (b) na porta 1 durante simulação em Modo 1 (TEM).	93
Figura 63- Perda por retorno do conector SMA modelado.	93
Figura 64- Fotografia microscópica com detalhe da precisão de usinagem do processo de fabricação da MTL.	94
Figura 65- Fotografia microscópica com detalhe da precisão de usinagem do ESE.	95
Figura 66- Perda por retorno simulada e medida da AVA Referência e da Palm Tree AVA-974 (a) e detalhe do LIF (b).	95
Figura 67- Diagrama de radiação da ESEAVA-974 (a) e (b), e da AVA-974 (c) e (d) medido e simulado a 6 e 8,4 GHz.	96
Figura 68- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície, a 6 GHz, da Palm Tree AVA-974 com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d), da região das bordas laterais (ponto e) e dos entalhes (cavidades radiantes) (ponto f).	98
Figura 69- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da Palm Tree AVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a), nas bordas laterais (ponto b) e nas cavidades radiantes (ponto c).	99
Figura 70- Detalhe do diagrama de correntes de superfície a 6GHz do radiador exponencial da Palm Tree AVA-974 com mínimas diferenças nas distribuições de correntes nas duas superfícies do radiador (a) e (b).	100
Figura 71- AVA-974 original (a) e Koch AVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas e (c) detalhes e indicações de medidas da cavidade radiante.	103
Figura 72- Fotografia da Koch AVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior e o detalhe do FSE.	104
Figura 73- Fotografia ampliada do detalhe da cavidade de terceira geração do fractal.	105
Figura 74 - Fotografias de diferentes tipos de antenas fractais baseadas na curva de Koch. (a) Antena Reconfigurável U-Koch de Ramadan, <i>et al.</i> (2009), (b) Monopolo Koch de Ismahayati, <i>et al.</i> (2011), (c) Dipolo Koch de Li e Mao (2012), (d) antena Koch de	

Wu, <i>et al.</i> (2015), (e) Arranjo de antenas Koch de Kim, Lee e Choi (2015) e (f) Koch antena de Reddy e Sarma (2014).	106
Figura 75- Três primeiras iterações do SFI da curva de Koch para a geometria inicial A.....	107
Figura 76- Diferentes FSEs obtidos pela variação do parâmetro número de iterações. (a) AVA- 974, (b) FSE de 1ª iteração, (c) FSE de 2ª iteração, (d) FSE de 3ª iteração utilizado na Koch AVA-974.	107
Figura 77- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro número da iteração Koch AVA.....	108
Figura 78- Resultado do ganho da Koch AVA em função da variação do número de iterações.	108
Figura 79- Resultado do SLL da Koch AVA em função da variação do número da iteração.	109
Figura 80- Perda por retorno simulada e medida da AVA Referência e da Koch AVA-974.	109
Figura 81- Diagrama de radiação da AVA-974 (esquerda) e da FSEAVA-974 (esquerda) com componente co-pol. medido e simulado e a componente cross-pol. apenas simulada. Medidas e simulações a 7 GHz.	110
Figura 82- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície, a 7 GHz, da Koch AVA-974 com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d), da região da borda lateral (ponto e) e dos FSEs (ponto e).	111
Figura 83- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da Palm Tree AVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a), nas bordas laterais (ponto b) e nas cavidades radiantes (ponto c).	112
Figura 84- Distribuição absoluta de campos elétricos no plano <i>xy</i> a 7GHz para (a) AVA-974 e (b) FSEAVA-974.	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões da AVA-974 referência.	51
Tabela 2 - Estudo qualitativo de características de radiação de diferentes propostas do uso de LD em AV.....	59
Tabela 3 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.	60
Tabela 4 - Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de lentes de metamaterial.....	60
Tabela 5 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.	61
Tabela 6-Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de diretores metálicos.	61
Tabela 7 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.	62
Tabela 8-Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de SE em AV.....	62
Tabela 9 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.	63
Tabela 10- Quadro comparativo entre diferentes técnicas para melhoria de diretividade de AV para análise geral e qualitativa e pré-seleção.	63
Tabela 11 - Parâmetros da arquitetura da AVA-974	83
Tabela 12 - Especificações técnicas do laminado Rogers RO3206 (ROGERS, 2015).	92
Tabela 13- Quadro comparativo entre performance da AVA-974 e as modificações RSEAVA-974 e TSEAVA-974, bem como a nova Palm Tree AVA-974.....	97
Tabela 14 - Parâmetros da arquitetura da FSEAVA-974	104
Tabela 15- Tabela comparativa a 7GHz entre as antenas AVA, RSEAVA, TSEAVA, ESEAVA e FSEAVA.	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AV	-	Antena Vivaldi
AVA	-	Antena Vivaldi Antipodal
CAD	-	Computer Aided Design
CAM	-	Computer Aided Manufacturing
CF	-	Centro de Fase
CMOS-	-	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DM	-	Diretor Metálico
DXF	-	Drawing Exchange Format
EGM	-	Equações Gerais de Maxwell
ESE	-	Exponential Slot Edge
ESLR	-	Exponential Slot Line Radiator
FEM	-	Finite Element Method
FIT	-	Finite Integration Technique
FSE	-	Fractal Slot Edge
LD	-	Lente Dielétrica
LIF	-	Limite Inferior de Frequência
LM	-	Lente com Metamaterial
LME	-	Laboratório de Micro Eletrônica
MLF	-	Microlinha em fita
MTL	-	Micro Transition Line
MW	-	Microwave
PCB	-	Printed Circuit Board
RA	-	Radiador de Abertura
RF	-	Radio Frequency ou Rádio Frequência

RSE - Regular Slot Edge

SE - Slot Edge

SFI - Sistema de Função Iterativo

SLL - Side Lobe Level

SMA - Sub Miniature version A

TEM - Transverse Electromagnetic

TSE - Tapered Slot Edge

UWB - Ultra Wideband

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Superfície fechada
α	- Abertura (graus) dos ESEs em relação à reta de seus pontos de origem
$\vec{B}$	- Vetor Indução Magnética
β	- Abertura (graus) da reta dos pontos de origem dos ESEs de cada lado
$\mathbf{b}_j$	- Elemento $\mathbf{j}$ do vetor numérico de Fluxo magnético perpendicular
$\vec{D}$	- Vetor Deslocamento (vetor densidade de fluxo elétrico)
∂A	- Contorno fechado da superfície A
$d\vec{A}$	- Vetor área elementar normal à superfície A
$\partial\vec{B}/\partial t$	- Deriv. temporal do Vetor Campo Magnético elementar
$\partial\vec{D}/\partial t$	- Deriv. temporal do Vetor Deslocamento
$\mathbf{d}_j$	- Elemento $\mathbf{j}$ do vetor numérico de Fluxo elétrico perpendicular
$d\vec{S}$	- Vetor comprimento elementar normal ao contorno fechado ∂A
$\vec{E}$	- Vetor Campo Elétrico
ϵ_r	- Constante dielétrica
$\mathbf{e}_j$	- Elemento $\mathbf{j}$ do vetor numérico de Campo elétrico tangencial
φ	- Fluxo magnético
h	- Espessura do substrato da antena
$\vec{H}$	- Vetor Campo Magnético
$\mathbf{h}_j$	- Elemento $\mathbf{j}$ do vetor numérico de Campo magnético tangencial
i	- Distância entre o ponto de origem de cada ESE
$\vec{J}$	- Vetor Densidade de Corrente
μ	- Permeabilidade magnética
R	- taxa de abertura exponencial do radiador principal da antena
ρ	- Densidade volumétrica de carga líquida Q
σ	- Condutividade elétrica
t	- Espessura da camada de cobre da antena
V	- Volume delimitado pela superfície fechada ∂V
w	- Largura do condutor em fita da antena

- Z** - Impedância
- Z_0** - Impedância Característica
- Z_i** - Componente imaginária da impedância
- Z_{IN}** - Impedância de entrada
- Z_R** - Componente real da impedância

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Breve Histórico da Radiofrequência.....	24
1.2 Motivação	26
1.3 Dimensionamento do Problema.....	27
1.4 Objetivo	29
1.5 Impactos Esperados	30
1.6 Estrutura do Trabalho	30
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLÓGICA.....	31
2.1 Metodologia de projeto de antenas assistido pelo Computador	32
2.1.1 FIT – Técnica de Integração Finita	33
2.1.1.1 As equações de Maxwell na forma integral	33
2.1.1.1.1 Lei de Faraday na 1ª equação de Maxwell	34
2.1.1.1.2 Lei de Ampère na 2ª equação de Maxwell.....	35
2.1.1.1.3 Lei de Gauss na 3ª equação de Maxwell.....	36
2.1.1.1.4 Lei do Magnetismo na 4ª equação de Maxwell	37
2.1.1.2 Discretização volumétrica	38
2.1.2 Solucionador de transiente	40
2.2 Métodos e equipamentos de medidas adotados	41
2.2.1 Obtenção dos parâmetros S	41
2.2.2 Medida do diagrama de radiação.....	45
CAPÍTULO 3 - ESTUDO DE TÉCNICAS EXISTENTES PARA MELHORIA DA DIRETIVIDADE DA ANTENA VIVALDI.....	48
3.1 Identificação da Necessidade.....	49
3.1.1 Antena Vivaldi Antipodal Referência (AVA-974).....	49
3.1.2 Resultados de operação da AVA-974 Referência	52
3.2 Definição do Problema	55
3.3 Definição dos Objetivos.....	58
3.4 Síntese.....	59
3.4.1 Proposta 1 – Uso de lentes dielétricas	59
3.4.2 Proposta 2 – Uso de lentes de metamateriais	60
3.4.3 Proposta 3 – Uso de diretores metálicos.....	61

3.4.4	Proposta 4 – Uso de cavidades ressonantes.....	62
3.4.5	Análise das propostas e pré-seleção	63
3.5	Seleção e otimização.....	64
3.5.1	AVA-974 com RSE (RSEAVA-974)	64
3.5.1.1	Resultados de operação da RSEAVA-974	66
3.5.2	AVA-974 com TSE (TSEAVA-974)	70
3.5.2.1	Resultados de operação da TSEAVA-974	72
3.5.3	Seleção e otimização da técnica de cavidades de borda.....	76
CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO DA PALM TREE AVA (ESEAVA-974)		81
4.1	A Palm Tree AVA	82
4.1.1	Otimização da Palm Tree AVA.....	84
4.1.1.1	Variação do parâmetro i	85
4.1.1.2	Variação do parâmetro β	87
4.1.1.3	Variação do parâmetro α	88
4.1.1.4	Resultado da variação dos parâmetros i , β e α	89
4.2	Prototipação	90
4.2.1	Desenho da antena	90
4.2.2	Escolha dos materiais	90
4.2.2.1	Laminados Rogers RO3206	91
4.2.2.2	Conector SMA 50 Ω	92
4.2.3	Fabricação.....	94
4.3	Resultados de operação da Palm Tree AVA-974	95
CAPÍTULO 5 - DESENVOLVIMENTO DA KOCH AVA (FSEAVA-974).....		102
5.1	A Koch AVA	103
5.1.1	Arquitetura da Cavidade Radiante com a curva de Koch.....	105
5.1.1.1	Propriedade Fractal da curva de Koch	106
5.1.2	Otimização da Koch AVA pela variação do numero de iterações	108
5.2	Resultados de operação da Koch AVA-974	109
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS		114
6.1	Propostas Futuras	116
REFERÊNCIAS		117
APÊNDICES		125

CAPÍTULO 1

- INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo apresenta a motivação e os pontos referenciais que justificam esta pesquisa, precedida por um breve relato histórico dos avanços da radiofrequência, assim como o devido dimensionamento dos atuais trabalhos acadêmicos para melhoria da diretividade das antenas do tipo Vivaldi, os objetivos que a pesquisa proporciona alcançar, os impactos esperados com a realização deste trabalho e a organização do documento.

1.1 Breve Histórico da Radiofrequência

Cambridge, 1863, Inglaterra, um notável físico britânico e professor de física experimental espanta o mundo acadêmico ao demonstrar teoricamente a provável existência das ondas eletromagnéticas. Seu nome? James Clerk Maxwell!

Seus primeiros trabalhos na área de eletricidade e magnetismo, nessa época, utilizavam o formalismo de componentes. Anos mais tarde, toma conhecimento da teoria dos quatérnions e passa a aplicá-la para fundamentar matematicamente seus estudos com base no conceito de espaço euclidiano, uma vez que no tempo de Maxwell, os conceitos de análise vetorial não estavam bem desenvolvidos (SILVA, 2004).

A teoria dos quatérnions foi proposta por William Hamilton em 1843. Maxwell demonstrou grande interesse pela teoria dos quatérnions através do estudo dos trabalhos de Peter Tait, um dos mais proeminentes teóricos quaternionista, que mais tarde, em 1967 publica seu trabalho intitulado *Elementary treatise on quatérnions*. A teoria dos quatérnions de Hamilton tem relação com seus esforços para estudar os números complexos pela representação geométrica vetorial (SILVA, 2004; HAMILTON, 1969).

O próprio Maxwell acreditava que a criação dos quatérnions era tão relevante para o estudo do espaço quanto os trabalhos de Descartes, que deram origem às coordenadas triplas. Com base nestes estudos, anos mais tarde, em 1870, Maxwell publica seu Manuscrito sobre as aplicações dos quatérnions no eletromagnetismo onde, por exemplo, ele aplica o operador ∇ a função escalar F , denominando-a como *slope*, e uma função vetorial σ , cujo resultado se constitui de uma parte escalar, que chamou de convergência e outra parte vetorial, ao qual chamou de rotacional (MAXWELL, 1873).

A divulgação da teoria de quatérnions, que inspirou a discussão sobre esse formalismo por proeminentes físicos e matemáticos da época, se deu graças à obra de Maxwell chamada *Treatise on electricity and magnetism*, publicado na forma de livro em 1873 (MAXWELL, 1873). O uso deste método em seu livro acabou despertando um interesse particular em dois pesquisadores notáveis que, em 1884, apresentam trabalhos independentes que resultaram na representação vetorial moderna das equações de Maxwell que conhecemos hoje. São eles: o matemático inglês Oliver Heaviside e o físico estadunidense Josiah Willard Gibbs.

Três anos mais tarde (1887), um jovem físico alemão e professor de física chamado Heinrich Rudolf Hertz inicia seus estudos relacionados à propagação de ondas eletromagnéticas (ondas de rádio) na Escola Politécnica da Universidade de Karlsruhe, Alemanha, utilizando um

simples *spark-gap transmitter* para lecionar fenômenos eletromagnéticos a seus alunos. Seus estudos conduziram à criação de aparelhos emissores e detectores de ondas de rádio que foram usados para demonstrar a existência de onda eletromagnética previstas nas teorias de Maxwell.

Apenas sete anos depois, um jovem cientista italiano chamado Guglielmo Marconi toma conhecimento dos estudos de Hertz, e tem acesso a dezenove patentes de Nikola Tesla, um notável engenheiro eletricitista croata radicado nos EUA. Marconi, ao estudar o artigo de Hertz, publicado em um jornal científico, e as patentes de Tesla, inicia seus esforços para o desenvolvimento de um sistema de comunicação, mais tarde conhecido como telegrafo sem fio.

Em pouco tempo, o sistema de comunicação de Marconi estava enviando código Morse de seu laboratório que, após aumentar a potência e o ganho da antena, conseguiu transmitir em 1901 a primeira comunicação através do oceano Atlântico. Embora Marconi seja considerado por muitos como pai do rádio, em 1943 o Supremo Tribunal dos Estados Unidos, creditou a Nikola Tesla o mérito como inventor do rádio.

Simultaneamente aos esforços de Marconi e Tesla, o cientista brasileiro Roberto Landell desenvolve estudos de telecomunicação por ondas de rádio, sendo considerado como pioneiro nas transmissões de voz humana através de um enlace de rádio frequência e tendo suas patentes depositadas tanto no Brasil como nos Estados Unidos da América. No Brasil, Landell obteve o depósito da patente 3.279 de março de 1901 e em outubro de 1904 nos Estados Unidos da patente número 771.917 sob o título de Transmissor de Ondas, em novembro de 1904 das patentes 775.337 para o “Telefone sem Fio” e 775.846 para o “Telegrafo sem Fio”. Em 2011, ele recebeu a honra máxima brasileira tendo seu nome inscrito no Livro dos Heróis da Pátria.

Em paralelo, Nikola Tesla, que em 1894 já havia demonstrado a possibilidade de se transmitir sinais de rádio frequência, apresentou em 1917 os fundamentos que estabeleceram os conceitos primitivos para medida a distância por ondas de rádio ao relacionar frequência e o nível energético. Desde o início da aplicação das teorias de Maxwell sobre as ondas eletromagnéticas, duas aplicações se destacaram: a transmissão de informações na forma de ondas de rádio e a medida de uma certa distância por ondas de rádio, que ganha grande atenção e relevância na segunda guerra mundial. Naquela época, muito se pesquisou sobre detecção e medida da distância via rádio ou na língua inglesa, *Radio Detection And Ranging* (Radar), impulsionado sobretudo pela fragilidade britânica a ataques aéreos alemães.

Ao final da segunda grande guerra, tanto o radar como as comunicações por ondas de rádio foram amplamente empregados na corrida espacial durante o período da guerra-fria (1957 a 1985), rivalidade entre as duas superpotências que emergiram daquela guerra.

Após sete décadas do início dos estudos de H. Hertz, Ross (1973), pesquisador da *Sperry Rand Corporation*, retoma com empolgação os estudos de ondas de rádio pulsantes de Hertz e propõem a primeira formulação conceitual sobre pulsos com espectro de frequência de banda ultra larga, ou do inglês *ultra-wideband* (UWB). Como resultado de suas pesquisas, surge o projeto de um sistema de comunicação (transmissão e recepção) através de pulsos de curta duração e livre de portadora a partir de modelos eletromagnéticos no domínio do tempo.

Durante os sete anos seguintes ao trabalho de Ross (1973), estes conceitos eram conhecidos pelo termo “*carrierless*” ou tecnologia de impulso. Só após este período, especificamente na década de oitenta, o termo UWB foi cunhado para aplicações de pulsos de rádio frequência ultracurtos (na ordem de pico segundos) e vem sendo utilizado até os dias de hoje.

Diferente de antenas diretivas de banda estreita, cujas dimensões não são baseadas em um comprimento de onda constante, para sistemas UWB há um tipo de antena que possui um radiador na forma de abertura, muitas vezes exponencial, e que teoricamente promove a radiação de ondas eletromagnéticas de maneira diretiva e com grande largura de banda. Esta notável antena é planar, leve e de simples construção e se chama antena Vivaldi (GIBSON, 1979; GAZIT, 1988).

1.2 Motivação

A antena Vivaldi (AV), originalmente proposta por Gibson (1979), na forma coplanar, como ilustra a Figura 1(a), e posteriormente na forma antipodal por Gazit (1988), como é ilustrado na Figura 1(c), é uma antena planar de abertura exponencial, de ampla largura de banda e de características de radiação direcional. Esta antena é uma ótima candidata para dispositivos pequenos e compactos, na forma de único elemento ou em arranjos, pois pode ser construída diretamente e pelos mesmos processos de fabricação de placas de circuito impresso (PCB), dispensando o uso de conectores e cabos. Adicionalmente, essas antenas possuem baixo peso, pequenas dimensões, além de oferecerem considerável eficiência energética (BAI, *et al.* 2011; HOOD, *et al.* 2008).

Todas essas características vêm gerando grande interesse em pesquisas sobre AV há muitos anos, tanto para fins comerciais como para defesa (HOOD, *et al.* 2008). Dentre muitas, pode-se destacar como principais aplicações em sistemas de Micro-ondas, diagnósticos médicos por imagem (BOURQUI, *et al.* 2010), sistemas de radar (ZHUGE e YAROVY, 2008).

2011; LANGLEY, 1996), rádio telescópio (REID, *et al.* 2012), comunicação veicular (HE, *et al.* 2014) e detecção (visão) através de paredes (YANG, *et al.* 2008).

Embora tenha relevantes características, a AV apresenta alguns problemas que comprometem sua classificação como antena diretiva. Essa é uma das principais motivações deste trabalho, contribuir para o aumento de diretividade de antenas Vivaldi, de forma a torná-las efetivamente diretivas.

1.3 Dimensionamento do Problema

Conforme apresentado na Seção 1.2, a antena Vivaldi é adequada para aplicações em sistemas compactos, seja na forma de elemento único, ou organizada em arranjos, uma vez que possui pequenas dimensões, tem fácil processo de construção e é leve. Ainda na Seção 1.2, a AV é apresentada como uma antena diretiva e, além disso, de banda larga, alta eficiência e alto ganho, e que pode ser integrada diretamente na PCB (HOOD, *et al.* 2008; CHAMAANI, *et al.* 2011; WANG, *et al.* 2013). Embora possua numerosa lista de características favoráveis, a antena Vivaldi possui suas limitações.

O desenho original da antena, proposto por Gibson (1979), tem a largura de banda limitada em duas oitavas, sendo que esta limitação se deve principalmente pela técnica de transição na alimentação. Neste caso, a transição entre a microlinha em fita (MLF) e o radiador de abertura (RA) é feita através de um *balun* de alimentação por toco (*stub*) e cavidade ressoadora, que produz perda de radiação elevada, além de distorcer os padrões de radiação em altas frequências (BAI, *et al.* 2011). Devido a isso, esta Tese não utilizará a AV coplanar, ao contrário, utilizará apenas a AV Antipodal (AVA), pois a mesma minimiza esses problemas.

Figura 1- Ilustração dos dois tipos básicos de antenas Vivaldi. (a) Antena Vivaldi Coplanar (AV), (b) vista explodida da AV Coplanar, (c) antena Vivaldi Antipodal (AVA) e (d) vista explodida da AVA.

Fonte: Autoria própria.

Por outro lado, a AVA adiciona dois novos problemas, a polarização cruzada dos campos elétricos (BAI, *et al.* 2011; LANGLEY, 1996) e o estrabismo (deflexão na ordem de alguns graus) da direção de radiação do lóbulo principal, ou seja promove um pequeno desvio, em graus, da direção da propagação da antena, em relação ao eixo longitudinal (eixo z) (KAZEMI, *et al.* 2012; DE OLIVEIRA, *et al.* 2015).

Outro problema comum e intrínseco do formato do RA da AV, seja na forma coplanar ou na forma antipodal, é o alto nível de lóbulos laterais, ou do inglês *Side Lobe Level* (SLL), devido a correntes de bordas ao longo da borda metalizada do RA, o que compromete totalmente a diretividade da antena (DE OLIVEIRA, *et al.* 2015).

O prejuízo nas características de diretividade é bastante relevante, sendo que há autores que consideram a AV, na sua forma original, uma antena de baixa diretividade (YANG, *et al.* 2008; KAZEMI, *et al.* 2012; DE OLIVEIRA, *et al.* 2015, SINGHA e VAKULA, 2015).

Numa tentativa de mitigar este problema, nos últimos anos, diversas propostas de projetos de AV foram apresentadas, como o uso de diretores (lentes e/ou guias de onda) nas mais variadas formas ou pelo uso de cavidades laterais.

Como exemplo de aplicação de lentes dielétricas (LD), ilustrado na Figura 2(a), é possível citar (BOURQUI, *et al.* 2010; WANG, *et al.* 2012; KAZEMI, *et al.* 2012; JUAN, *et al.* 2013; TENI, *et al.* 2013; FORTUNY, *et al.* 2013; MOOSAZADEH e KHARKOVSKY, 2015), lentes com metamateriais (LM), como ilustrado na Figura 2(b), (ZHOU, *et al.* 2011; ALHAWARI, *et al.* 2012; AVDUSHIN, *et al.* 2014; SINGHA e VAKULA, 2015) e mesmo diretores metálicos (DM), conforme a ilustração da Figura 2(c), (AGAHI, ABIRI e MAHAJERI, 2011; HE, *et al.* 2014), o que comprometem as três mais importantes propriedades físicas da AV, o aumento do tamanho (volume), aumento do peso da antena, e aumento do grau de complexidade do processo de fabricação, como afirma Singha e Vakula (2015).

Figura 2 - Ilustração das técnicas propostas na literatura para melhorar a diretividade da antena Vivaldi. (a) Lente Dielétrica, (b) Lente com Metamaterial, (c) Diretores Metálicos e (d) Cavidades ressonantes.

Fonte: Autoria própria.

Dentre as várias propostas apresentadas pela comunidade internacional de antenas, para mitigar o problema do alto SLL, é possível destacar também as técnicas de cavidades ressonantes, ilustrado na Figura 2(d) (BAI, *et al.* 2011; WANG, *et al.* 2012; TARINGOU, *et al.* 2013; TENI, *et al.* 2013; HERZI, ZAIRI e GHARSALLAH, 2014; CHANGFEI, *et al.* 2014; CAO, *et al.* 2014; KARAHAN e SAHINKAYA, 2014; HE, *et al.* 2014; SINGHA e VAKULA, 2015; MOOSAZADEH e KHARKOVSKY, 2015; JUAN, *et al.* 2013; FEI, *et al.* 2011; JIA, *et al.* 2013; NATARAJAN, *et al.* 2015; MA, *et al.* 2014; JIA, *et al.* 2013).

Em resumo, observa-se que há de se considerar a AV na sua forma original, como uma antena de baixa diretividade e com alto SLL. Embora uma série de propostas de modificações tenham sido apresentadas à comunidade acadêmica, somente se conseguiu uma melhora na diretividade, com uma maior fidelidade na simplicidade construtiva, através da adição das cavidades ressonadoras laterais (*Slot Edges* - SE). Entretanto, estas não corrigem efetivamente o estrabismo e, embora diminuam significativamente o SLL, desperdiçam parte da energia através do confinamento dos campos elétricos nestes ressonadores, o que não permite um acréscimo nos níveis do lóbulo principal.

Em função disto, esta investigação propõe uma nova, e realmente diretiva, AV onde não haja desperdício da energia na forma de campos confinados em ressonadores. Em contraste, essa energia “extra” será canalizada para o lóbulo principal, respondendo assim aos anseios da comunidade acadêmica por uma AV efetivamente diretiva.

1.4 Objetivo

Na busca pelo reconhecimento da AV como uma antena realmente diretiva, todos os problemas apresentados na Seção 1.3, sendo eles, altos SLL, estrabismo e desperdício de energia em cavidades ressonadoras laterais, serão estudados e propostas de melhorias serão desenvolvidas. As novas técnicas dando origem a novas antenas Vivaldi propostas, em comparação à sua versão original, promoverão baixos índices de SLL, menor estrabismo e não dissiparão energia em ressonadores laterais. Ao contrário, elas canalizarão a energia dos lóbulos laterais para o lóbulo principal, efetivando a diretividade da antena Vivaldi.

1.5 Impactos Esperados

Como a AV vem tendo grande relevância para diversas aplicações civis, médicas e de defesa nos últimos 36 anos, podendo ser considerada a principal fonte dos estudos de antenas planares de banda larga com características diretivas, acredita-se que ao se propor novas antenas Vivaldis, que sejam totalmente diretiva, será possível trazer à comunidade de antenas e propagação um grande impacto que se refletirá a todas as frentes de pesquisas desta antena e suas aplicações.

1.6 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está organizado em seis capítulos. Inicialmente, o Capítulo 1 apresenta a introdução ao projeto que visa contextualizar os reais benefícios do uso de uma AV, realçando as características que favorecem sua escolha como principal antena planar para sistemas compactos e que precisem de uma antena diretiva, por natureza, e que dispense elementos auxiliares, seja na forma de refletores ou diretores. O Capítulo 1 apresenta ainda as limitações dessa antena, desde a sua concepção no final dos anos 70, e que dificultam sua classificação, nos dias atuais, como uma antena diretiva. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e metodológica correlatos ao trabalho. O Capítulo 3 descreve o desenvolvimento do trabalho, desde a definição do problema até o estudo das soluções propostas pela literatura. Os Capítulos 4 e 5 apresentam respectivamente todo o desenvolvimento de duas novas antenas Vivaldi efetivamente diretivas, a Palm Tree AVA e a Koch AVA para validar a nova técnica de cavidades radiantes, como um conceito independente. Finalmente, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e propostas futuras para o projeto. Em anexo, seguem as referências bibliográficas e os dados de medidas de parâmetro S das novas antenas.

CAPÍTULO 2

- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLÓGICA

Este capítulo apresenta as metodologias e conceitos teóricos correlacionados ao desenvolvimento deste projeto.

2.1 Metodologia de projeto de antenas assistido pelo Computador

O projeto de uma antena, consiste basicamente em se idealizar um dispositivo que promova o casamento de impedâncias entre o circuito e o meio (ar, água, tecido biológico, vácuo, ou qualquer material dielétrico) de propagação do sinal.

No passado, antes do advento do projeto de antenas assistido pelo computador, a tarefa de se projetar uma antena era lastreada por dois grandes esforços praticamente artesanais, o estudo fundamentado nas teorias de eletromagnetismo e o desenvolvimento por observação empírica de prototipação iterativa, o que efetivamente tornava a prática um desafio muito grande.

A metodologia empírica de prototipação iterativa, sobretudo orientada a tentativa e erro, era utilizada para determinar os diversos parâmetros que constituem a antena, o que aumenta o risco de insucesso, uma vez que pode ser ineficiente, pois depende exclusivamente de fatores aleatórios aliados à experiência do projetista. Além disso, deve-se levar em conta o custo associado à prototipagem de várias antenas em série até se atingir as especificações desejadas.

Sendo assim, com o advento dos computadores, uma nova possibilidade surgiu, o projeto de antenas assistido por computador, o que cria um ambiente de análise e testes de antenas pautado a simulação com base equações de Maxwell, o que garante grande consistência dos resultados em relação aos fenômenos físicos e diminui significativamente o tempo e os custos do projeto (HAYT, 1974; CST, 2011).

Na área da pesquisa dos fenômenos e efeitos do eletromagnetismo assistido por computador, é possível mencionar a primazia do artigo “*Finite Elements Solution of Saturable Magnetic Fields Problems*” de Silvester e Chari (1970) como um dos principais precursores, mas não o primeiro, do uso do método de elementos finitos (*Finite Element Method* – FEM) para análise e solução de problemas eletromagnéticos, incluindo os de comportamento baseados em equações não lineares (SILVESTER e CHARI, 1970; BASTOS, 1996).

Na atualidade, há um número maior de possibilidades, uma vez que os programas de simulação eletromagnética evoluíram e possuem várias técnicas de análise pautadas em cálculo numérico para resolver os mais variados problemas de eletromagnetismo, incluindo os de projeto de antenas. Como exemplo, é possível citar a suíte de programas CST Microwave Studio, que faz uso, dentre outras, da técnica de integração finita (*Finite Integration Technique* – FIT) (CST, 2011).

A técnica FIT é ideal para o desenvolvimento das antenas desta Tese, pois por ser um

método numérico de análise no domínio do tempo, ao contrário de métodos do domínio da frequência, permite a análise do comportamento da antena em uma larga faixa de altas frequências em uma única simulação, ideal para projeto de antenas UWB (MUNTEANU, TIMM e WEILAND, 2010).

2.1.1 FIT – Técnica de Integração Finita

Inicialmente apresentada por Weiland em 1976, a técnica numérica da integração finita é a base do simulador eletromagnético (*solver transient*) de propósito geral CST *Microwave Studio*, amplamente utilizado neste projeto, durante as etapas iniciais de concepção das antenas.

Nesta fase inicial de projeto, é necessário o acesso a informações essenciais para a otimização das características da antena como, por exemplo, correntes de superfície e distribuição de campos elétricos. Estas informações só estão acessíveis a partir dos resultados das simulações eletromagnéticas, em contraste à total impossibilidade de acesso a tais informações no método empírico, devido aos elevados custos de equipamento e tempo necessários.

Este método computacional promove uma técnica universal de discretização volumétrica, que pode ser aplicada a problemas eletromagnéticos de várias naturezas, desde cálculos de campos estáticos até aplicações em altíssimas frequências, tanto no domínio da frequência como no do tempo (CST, 2011).

De acordo com a literatura (CST, 2011; CLEMENS, WEILAND, 2001; WEILAND, 1996), a técnica FIT discretiza as equações de Maxwell na forma integral, em contraste à diferencial que, por sua vez, resulta no método FDTD (*Finite Difference Time Domain*). Para melhor abordagem da técnica FIT, a próxima seção apresenta uma breve explanação sobre as quatro equações de Maxwell na forma integral.

2.1.1.1 As equações de Maxwell na forma integral

Atualmente, estuda-se o eletromagnetismo com base nos trabalhos de reformulação das equações de Maxwell realizados pelos esforços independentes de Oliver Heaviside e Josiah Willard Gibbs, que se resume em um conjunto de quatro equações. A partir do estudo das equações de Maxwell pode-se descrever todos os fenômenos eletromagnéticos, à nível macroscópico.

A primeira equação de Maxwell se baseia na lei de Faraday, a segunda equação de Maxwell, aqui apresentada, baseia-se na forma generalizada da Lei circuital de Ampère para estudo e compreensão de correntes e campos elétricos variáveis em função do tempo. Já a terceira equação de Maxwell está relacionada à lei de Gauss da Eletrostática e a última trata-se do estudo da lei básica do magnetismo que determina que o fluxo magnético total através de uma superfície fechada é nulo. A seguir são apresentadas as quatro equações de Maxwell na forma integral.

2.1.1.1.1 Lei de Faraday na 1ª equação de Maxwell

A primeira equação de Maxwell (1), de acordo com Cardoso (2011), foi obtida pela observação da lei experimental de Faraday sobre indução magnética, que relaciona a força eletromotriz (*f.e.m.*) induzida (*e*) em um circuito elétrico fechado de comprimento total ∂A sujeito e imerso em um campo de induções magnéticas ($\vec{B}$), com fluxo magnético (ϕ) variável, e com ele concatenado, como ilustra a Figura 3, que representa $e = -d\phi/dt$.

Figura 3 - Ilustração da Lei de Indução Magnética de Faraday.

Fonte: Cardoso (2011).

Esta mesma *f.e.m.* *e* está relacionada, por sua vez, à integral de linha fechada do produto escalar do vetor campo elétrico ($\vec{E}$) e os comprimentos infinitesimais $\partial \vec{s}$ (comprimento elementar) que constituem o circuito elétrico, o que representa o trabalho realizado por este campo para promover o movimento da carga elétrica unitária ao longo do contorno ∂A , sendo assim, a *f.e.m.* induzida também é igual a $\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s}$.

Como o fluxo magnético ϕ é equivalente à integral de área (integral dupla) delimitada pelo contorno ∂A , aqui denominada de área *A*, do produto do campo $\vec{B}$, pela área infinitesimal de $\vec{A}$ (área elementar), ou seja, $\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A}$, obtém-se a primeira equação de Maxwell na forma integral:

$$\oint_{\partial A} \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{A} \quad (1)$$

A primeira equação de Maxwell na forma integral é o modelo matemático da relação dos

campos elétricos com os campos magnéticos e vice-versa. É possível visualizar empiricamente o fenômeno representado por ela como sendo um campo magnético variando no tempo e provocando uma queda de tensão em torno de um circuito. Quanto maior for a taxa de variação deste campo magnético, maior será a queda de tensão (força contra eletromotriz).

2.1.1.1.2 Lei de Ampère na 2ª equação de Maxwell

A segunda equação de Maxwell (2) é formulada com base na lei circuital de Ampère, onde originalmente relaciona o fluxo elétrico total e a circulação do campo magnético induzido $\vec{B}$. As correntes elétricas concatenadas ao longo do comprimento do contorno fechado ∂A induzem o campo $\vec{B}$ em todo circuito ∂A . Este circuito elétrico está imerso em um meio com permeabilidade magnética dada por uma constante de proporcionalidade, aqui designada por μ .

Esta relação é representada matematicamente pela integração fechada no circuito ∂A do campo $\vec{B}$ na totalidade dos comprimentos infinitesimais (comprimentos elementares) $d\vec{s}$ deste contorno, que é equivalente ao produto da permeabilidade μ pela somatória das correntes elétricas (i_t) concatenadas a ∂A , ou seja $\oint_{\partial A} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu \cdot i_t$.

Entretanto, para que seja possível realizar uma análise livre do inconveniente da variação da permeabilidade em função do campo $\vec{B}$, pode-se expressar a lei circuital de Ampère como $\oint_{\partial A} \vec{B}/\mu \cdot d\vec{s} = i_t$. Desta forma pode-se substituir a razão entre o campo $\vec{B}$ e a permeabilidade μ , pelo vetor de intensidade magnética $\vec{H}$, ou seja, $\vec{H} = \vec{B}/\mu$.

Sendo assim, é possível reduzir a lei circuital de Ampère para $\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = i_t$, onde a corrente elétrica total i_t é equivalente a integração superficial (A) da densidade de corrente total $\vec{J}_T$ em cada área elementar ($d\vec{A}$) desta superfície, resultando consequentemente em $\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_A \vec{J}_T \cdot d\vec{A}$, como ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Ilustração da densidade de corrente superficial.

Fonte: Cardoso (2011).

Como a densidade de corrente total $\vec{J}_T$ no meio é equivalente à soma da densidade de

corrente de condução $\vec{J}$ com a densidade de corrente de deslocamento $\vec{J}_D$, ou seja, $\vec{J}_T = \vec{J} + \vec{J}_D$ e sabendo que $\vec{J}_D$ é equivalente a variação em função do tempo do vetor deslocamento $\vec{D}$, chega-se a $\vec{J}_T = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$, o que leva a segunda equação de Maxwell para a lei circuital de Ampère:

$$\oint_{\partial A} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int_A \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{A} \quad (2)$$

Lembrando que a densidade de corrente de deslocamento pode ser bem caracterizada através da clássica análise da operação de um capacitor. A corrente que flui pelo capacitor em regime de corrente alternada não se trata de uma corrente relacionada ao fluxo de elétrons, até porque seria difícil de ocorrer no meio dielétrico, mas sim devido ao deslocamento das eletrosferas dos átomos do dielétrico (este é o motivo do uso do termo vetor deslocamento) entre as placas do capacitor, que, de acordo com Cardoso (2011), acontece devido ao fato de estarem sujeitos a um campo elétrico variável no tempo, como ilustra a Figura 5.

Figura 5- Efeito da deformação do átomo do dielétrico sobre exposição ao campo elétrico. Deslocamento da eletrosfera para esquerda. (b) Ausência de campo elétrico, vetor deslocamento nulo. (c) Deslocamento da eletrosfera para direita.

Fonte: Cardoso (2011).

Essa condição de continuidade experimental foi introduzida por Maxwell nas equações através da variação temporal do vetor deslocamento, o termo derivada do vetor deslocamento ($\partial \vec{D} / \partial t$). No caso de uma corrente constante, o campo elétrico será constante e, consequentemente, a derivada será nula, produzindo uma corrente de deslocamento também nula. Ou seja, um capacitor comporta-se como uma impedância inversamente proporcional a frequência do sinal.

2.1.1.1.3 Lei de Gauss na 3ª equação de Maxwell

A terceira equação de Maxwell na forma integral (3) contempla o estudo da derivada da lei de Gauss da eletrostática, que enuncia que o fluxo do vetor deslocamento de carga sobre uma superfície fechada é equivalente à carga interna a essa superfície, isto é, $\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{A} = Q$ (CARDOSO, 2011).

Esta análise mostra que a integral do primeiro membro da equação representa a totalidade do vetor deslocamento de carga $\vec{D}$ na superfície fechada ∂V , para cada área elementar $d\vec{A}$ desta superfície, conforme a Figura 6(a).

Já a carga total Q , no interior da superfície ∂V , é proveniente de uma densidade volumétrica de carga total que corresponde ao segundo membro da equação de Maxwell na forma integral (3) e é obtida pela integração da densidade volumétrica de carga ρ em todo volume V , conforme Figura 6(c), no interior da superfície ∂V , para cada volume infinitesimal dV (volume elementar), ou seja, $Q = \int_V \rho \cdot dV$, desta forma, tem-se:

$$\oint_{\partial V} \vec{D} \cdot d\vec{A} = \int_V \rho \cdot dV \quad (3)$$

2.1.1.1.4 Lei do Magnetismo na 4ª equação de Maxwell

A quarta equação de Maxwell na forma integral, conforme equação (4), onde experimentalmente observa-se que o fluxo magnético ϕ sobre uma superfície fechada ∂V , Figura 6, é nulo.

Figura 6- Linhas de campo magnético atravessando a superfície fechada ∂V .

Fonte: Autoria própria.

Sendo as linhas de campo magnéticos fechadas, de acordo com Cardoso (2011), observa-se que o total de linhas que entra na superfície fechada ∂V é exatamente igual à quantidade de linhas de campo magnético que saem desta. Devido a isso, pode-se representar esse experimento matematicamente com a quarta equação de Maxwell na forma integral:

$$\oint_{\partial V} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (4)$$

Essa equação deriva do fato de que as linhas de campo magnético não possuem início nem fim (tecnicamente expressos como “fontes” e “sorvedouros”). Ou seja, não existe o chamado monopólo magnético, que teria carga individual Norte ou Sul, diferentemente das cargas elétricas que possuem cargas individuais positivas ou negativas.

2.1.1.2 Discretização volumétrica

A solução do problema através da resolução numérica das equações de Maxwell na forma integral, anteriormente estudadas, é realizada com o programa definindo um domínio finito para cálculo onde o problema a ser solucionado é confinado.

De acordo com Clemens e Weiland (2001), um sistema de malha (*mesh*) tridimensional é criado (campo elétrico) através da subdivisão do domínio do problema em elementos complexos (*grid cells*) $G = \{V_{i,j,k} \in R^3 | V_{i,j,k} = [x_i, x_{i+1}] \times [y_j, y_{j+1}] \times [z_k, z_{k+1}], i = 1, \dots, I-1, j = 1, \dots, J-1, k = 1, \dots, K-1\}$ onde os nós (x_i, y_j, z_k) são determinados pelas coordenadas i, j e k em todo comprimento dos eixos x, y e z , o que resulta em um total de pontos $N_p = I \cdot J \cdot K$, para um total de células de $N_c = (I-1) \cdot (J-1) \cdot (K-1)$.

Outra malha (campo magnético), ortogonal à primeira, é criada. A partir dos dois sistemas de malhas ortogonais discretizam-se tridimensionalmente as equações integrais de Maxwell como ilustra a Figura 7 (CST, 2011; WEILAND, 1996).

Figura 7- Ilustração da discretização de domínio do problema eletromagnético nas malhas ortogonais.

Fonte: CST (2011) e De Oliveira (2012c).

Aloca-se, então, na primeira malha os campos elétricos tangenciais ($\mathbf{e}_i$) e o fluxo magnético perpendicular ($\mathbf{b}_j$), enquanto na segunda malha são alocados os campos magnéticos tangenciais ($\mathbf{h}_i$) e o fluxo elétrico perpendicular ($\mathbf{d}_j$). Posteriormente, para cada superfície do hexaedro formado aplicam-se as equações de Maxwell, como ilustra a Figura 8 (CST, 2011; WEILAND, 1996).

Figura 8- Ilustração das etapas de aplicação das equações de Maxwell nas faces do hexaedro.

Fonte: CST (2011) e De Oliveira (2012c).

Sendo assim, baseado na Lei de Faraday, por exemplo, é possível reescrever a integral de linha como a soma das quatro diferenças de potenciais da malha, não introduzindo erros suplementares além dos erros da discretização. Na sequência, representa-se pela derivada temporal do fluxo magnético, a variação do mesmo, que é definido ortogonalmente na face em questão, sendo o fluxo magnético equivalente à soma das diferenças de potenciais realizada anteriormente. Ao se repetir o procedimento para as demais faces disponíveis, inclusive a segunda malha, é possível obter o conjunto completo de equações de Maxwell na forma matricial (EGM) (CST, 2011; CLEMENS; WEILAND, 2001; WEILAND, 1996):

$$\mathbf{C}\mathbf{e} = -\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{b} \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{C}}\mathbf{h} = \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{d} + \mathbf{j} \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{S}}\mathbf{d} = \mathbf{q} \quad (7)$$

$$\mathbf{S}\mathbf{b} = \mathbf{0} \quad (8)$$

Neste caso, $\mathbf{C}$ é a matriz contendo as informações sobre a topologia e orientação das relações das incidências de bordas das células dentro de G , ou seja, possui apenas os coeficientes $C_{i,j} \in \{-1, 0, 1\}$. Esta matriz representa o operador rotacional aplicado à matriz G . Já a matriz $\mathbf{S}$ corresponde ao operador divergente, sendo que $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{N_p \times 3N_p}$ também depende da topologia da matriz, assim como o rotacional da matriz $\mathbf{C}$ (CLEMENS; WEILAND, 2001).

É necessário observar que a discretização volumétrica, por um algoritmo numérico, pode gerar instabilidade após um elevado número de iterações. Entretanto, a empresa CST (2011) afirma que, baseado nas relações fundamentais demonstradas, é possível assegurar que o método FIT (diferentemente do método FDTD) não compromete a estabilidade, pois o conjunto de EGM mantém a energia e conservação de carga (CST, 2011; WEILAND, 1996).

Por fim, são aplicadas as relações materiais. Estas relações apresentam imprecisão numérica que não pode ser evitada, devido ao processo de discretização volumétrica. Ao definir as relações entre fluxos e tensões, os valores integrais são aproximados no comprimento das bordas da rede e as áreas das células, respectivamente. Consequentemente, os coeficientes resultantes serão dependentes dos parâmetros dos materiais envolvidos, assim como sobre a

resolução volumétrica da malha, resultando nas matrizes correspondentes (BARTSCH *et al.*, 1992):

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} & \mathbf{d} &= \mathbf{M}_\epsilon \mathbf{e} \\ \vec{B} &= \mu \vec{H} & \mathbf{b} &= \mathbf{M}_\mu \mathbf{h} \\ \vec{J} &= \sigma \vec{E} + \vec{J}_s & \mathbf{j} &= \mathbf{M}_\sigma \mathbf{e} + \mathbf{j}_s\end{aligned}\quad \Rightarrow$$

onde $\mathbf{M}_\epsilon$ é a matriz de permissividade, $\mathbf{M}_\mu$ é a matriz de permeabilidade e $\mathbf{M}_\sigma$ é a matriz de condutividade (CLEMENS, WEILAND, 2001).

As equações na forma matricial são utilizadas para resolver problemas eletromagnéticos, em malhas tridimensionais de forma discretizada (CST, 2011; CLEMENS, WEILAND, 2001; WEILAND, 1996; BARTSCH, 1992; DE OLIVEIRA, 2012c).

O CST MW 2011 dispõe de três diferentes solucionadores para frequências altas, sendo eles: o *Transient Solver*, que será usado ao longo deste trabalho; o *Frequency Domain Solver* (baseado no *Finite Element Method*); e o *Eigenmode Solver*.

Optou-se pelo uso do *Transient Solver* devido ao fato de que para o projeto de antenas UWB operando a frequências elevadas, na ordem de GHz, recomenda-se o uso de métodos numéricos no domínio do tempo, para se obter desta forma resultados com maior precisão e com menor consumo de recursos computacionais (MUNTEANU, TIMM e WEILAND, 2010; WEILAND, TIMM e MUNTEANU, 2008).

Na sequência será apresentado o funcionamento do *Transient Solver*.

2.1.2 Solucionador de transiente

De acordo com a CST (2011), o *Transient Solver* proporciona a simulação do comportamento eletromagnético de um problema em uma larga faixa de frequência com apenas uma iteração computacional. Como resultado, o solucionador torna-se rápido para a grande maioria dos problemas dirigidos, especialmente para análise com fronteiras (região de contorno) abertas ou de grandes dimensões.

O *Transient Solver* utiliza os dados discretizados pelo método FIT para solucionar o problema, substituindo as derivadas temporais por diferenças centrais, dando origem à formulação explícita para o caso de perdas:

$$\mathbf{e}^{n+1/2} = \mathbf{e}^{n-1/2} + \Delta t \mathbf{M}_\epsilon^{-1} [\tilde{\mathbf{C}} \mathbf{M}_\mu^{-1} \mathbf{b}^n + \mathbf{j}_s^n] \quad (9)$$

$$\mathbf{b}^{n+1} = \mathbf{b}^n - \Delta t \mathbf{C} \mathbf{e}^{n+1/2} \quad (10)$$

Baseando-se nas relações referidas nas equações (9) e (10), os resultados são obtidos

através dos valores de tensão elétrica e fluxo magnético, que são inicialmente desconhecidos e podendo ser encontrados alternadamente no tempo pelo método *leap-frog* (salto de sapo), como ilustra a Figura 9.

Figura 9- Ilustração da aplicação do método leap-frog para cálculo dos potenciais elétricos e fluxos magnéticos no domínio do tempo (CST, 2011; DE OLIVEIRA, 2012c).

Fonte: CST (2011) e De Oliveira (2012c).

Sabe-se que as técnicas de integração explícitas no domínio do tempo são condicionalmente estáveis, sendo que o limite de estabilidade para o intervalo de tempo Δt pode ser obtido pelo critério *Courant-Friedrichs-Levy* (CFL) como segue $\Delta t \leq$

$$\sqrt{\varepsilon\mu} \left(\sqrt{\left(\frac{1}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta y}\right)^2 + \left(\frac{1}{\Delta z}\right)^2} \right)^{-1} \quad (\text{CST, 2011}).$$

Sendo o critério CFL obedecido, o sistema será estável. Adicionalmente, quanto menor for a célula da malha (expresso nos parâmetros Δx , Δy e Δz) menor será o Δt do esquema *leap-frog*. Em outras palavras, ao se obter uma malha extremamente refinada (densa) o passo de tempo para a simulação será pequeno, resultando numa simulação mais demorada para se atingir o critério de convergência.

2.2 Métodos e equipamentos de medidas adotados

Todas as medidas das antenas deste trabalho foram realizadas nas instalações do Laboratório de Micro Eletrônica (LME) da Escola Politécnica da USP. As medidas se dividem em obtenção dos parâmetros S e medidas do diagrama de radiação em câmara semianecóica, descritos a seguir:

2.2.1 Obtenção dos parâmetros S

Parâmetros S , do inglês *S-parameters*, ou *Scattering Matrix*, foram introduzidos no anos 1960 por Kaneyuke Kurokawa do Bell Labs como uma representação matemática na forma de

uma matriz de dispersão, com uma ou mais portas de transmissão/recepção de sinais de rádio frequência (RF) (KUROKAWA, 1965).

Ao contrário de outros parâmetros, por exemplo X e Y (ideais para projetos de baixa frequência) que operam com terminações na forma de circuito aberto (reflexão em fase) e circuito em curto (reflexão defasada em 180°), os parâmetros S são ideais para projetos de altas frequências em Microondas pois operam com casamento de impedância (reflexão nula), em geral 50Ω , de maneira a determinar os níveis de sinais transmitidos, recebidos e refletidos.

Essa matriz é formada por linhas e colunas cujo número equivale a quantidade de portas, no caso de duas portas, onde S_{11} se refere à parcela do sinal de RF que é refletido a partir da porta de transmissão (incidência do sinal), assim como o S_{22} refere-se a parcela que é refletida na porta de recepção.

Estes parâmetros S_{nn} (S_{11} e S_{22}) representam a diagonal principal da matriz de dispersão e são chamados de coeficientes de reflexão, enquanto os parâmetros S_{nm} (S_{12} ou S_{21}) representam a diagonal oposta da matriz de dispersão e são denominados coeficientes de transmissão e referem-se a parcela do sinal de RF na porta m que gera uma resposta na porta n , sendo o S_{12} chamado de transmissão reversa e o S_{21} de transmissão direta.

Em projetos de antenas, busca-se projetar a antena sob vários parâmetros, e o S_{11} em especial é um importante parâmetro inicial, visto ser a antena uma forma de conector circuito-meio (ar, vácuo, água, tecido biológico, ou qualquer material dielétrico) que garanta a perfeita transição de impedância entre o circuito e o meio.

Antenas de Microondas no estado da arte, operam com valores do $|S_{11}|$ abaixo de -10dB.

As medidas experimentais dos parâmetros S das antenas deste trabalho foram executadas utilizando o analisador de rede HP 8722D. Para efetuar a medida do parâmetro S_{11} , um exemplar da antena foi conectado a uma das portas do analisador de redes (anteriormente calibrado e configurado para a banda de 1 a 16GHz) e, em seguida, foram executadas as medidas, como ilustra a Figura 10.

Figura 10- Foto do ambiente de medida do parâmetro S_{11} fora da câmara semianecóica com o detalhe da marca e modelo do analisador de rede utilizado, bem como da AVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Para as medidas de todos os parâmetros S , realiza-se a montagem em suporte de dois exemplares idênticos da antena, e em seguida aponta-se uma para a outra, com uma distância de 10 cm como ilustra a Figura 11.

Figura 11- Esquema de montagem para medida de todos os parâmetros S . Duas unidades idênticas de cada antena é utilizada para esta medida. Neste caso, duas AVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Os dados de parâmetros S são exportados para uma planilha eletrônica e como originalmente armazenam a impedância (Z) em função da frequência, componente real (Z_R) e imaginária (Z_i), é necessário fazer o cálculo do S_{11} , na forma linear, a partir da razão da diferença da impedância de entrada Z_{IN} pela impedância característica Z_0 , constante em 50Ω , pela soma de ambas como ilustra a equação:

$$S_{11} = \frac{Z_{IN} - Z_0}{Z_{IN} + Z_0} \quad (11)$$

onde Z_{IN} equivale ao módulo de Z ,

$$Z_{IN} = |Z| = \sqrt{ZZ^*} = \sqrt{(Z_R + Z_i)(Z_R - Z_i)} = \sqrt{Z_R^2 + Z_i^2} [\Omega] \quad (12)$$

e para se obter o parâmetro S_{11} em escala Decibel

$$|S_{11}| = 20 \cdot \log_{10} S_{11} [dB] \quad (13)$$

sendo que a partir destes dados, dispostos na forma de gráfico $|S_{11}|$ x frequência, estuda-se o comportamento da impedância da antena em função da frequência e assim, onde os valores são menores que $-10dB$, pode-se afirmar que são as regiões de frequência no gráfico cuja impedância da porta antena-ar está melhor casada com a impedância do circuito-antena.

2.2.2 Medida do diagrama de radiação

Outro parâmetro igualmente importante no projeto de antenas, sobretudo as diretivas, é o diagrama de radiação, do inglês *radiation pattern*, que segundo Balanis (2008), pode ser definido como uma representação gráfica, ou função matemática, das propriedades de radiação em função das coordenadas espaciais.

A região espacial em que se concentram as maiores amplitudes de radiação, no diagrama de radiação de antenas diretivas, é chamado de lóbulo principal. Esta região em geral vai de $-\pi/3$ a $\pi/3$. A região com radiações secundárias ortogonais ao lóbulo principal, em geral de $\pi/3$ a $2\pi/3$ dos dois lados do diagrama, são chamados lóbulos laterais, do inglês *Side Lobe Level*, ou SLL.

Os diagramas de radiação apresentados nesta Tese estão dispostos no plano cartesiano, mas poderiam ser representados na forma de coordenadas polares ou mesmo em três dimensões (3D) e foram determinados por simulações e confirmados por medidas experimentais.

As medidas experimentais do diagrama de radiação das antenas deste trabalho foram realizadas no LME, em câmara semianecóica (Figura 12).

Figura 12- Câmara semianecóica utilizada para medidas de diagrama de radiação. (a) Suporte fixo transmissor. (b) Suporte rotacional para instalação da antena receptora em teste.

Fonte: Autoria própria.

Foram utilizados dois Setups de medidas diferentes.

Primeiro Setup (2 a 8,4 GHz):

Ligado à antena transmissora está um oscilador HP 8350B Sweep Oscillator, ilustrado na Figura 13(a), equipado com um HP8359A RF Plug-in 2 to 8.4 GHz, como mostra a Figura 13(b). Ligado à antena receptora está um medidor de potência HP436A, apresentado na Figura 15, equipado com o sensor de potência HP8470D, como mostra a Figura 16.

Figura 13- Oscilador HP 8350B (a) e RF Plug-in HP 83540A 2.0-8.4 GHz (b).

Fonte: Autoria própria.

Segundo Setup (0,01 a 26,5GHz):

Ligado à antena transmissora está um oscilador HP 8350B Sweep Oscillator equipado com um HP83595A RF Plug-in 0.01 to 26.5 GHz, ilustrado na Figura 14(b). Ligado à antena receptora, está um medidor de potência HP436A equipado com o sensor de potência HP8470D.

Figura 14- Oscilador HP 8350B (a) e RF Plug-in HP 83595A .01-26.5 GHz (b).

Fonte: Autoria própria.

Figura 15- Medidor de potência HP 438A.

Fonte: Autoria própria.

Figura 16- Sensor de potência HP 8740D.

Fonte: Autoria própria.

Coleta dos dados de medida

A antena receptora estava acoplada a uma base rotacional com ajuste de 5° por passo. Os passos da base rotacional eram controlados por computador e acionados manualmente, um a um. A cada passo, aguardava-se perto de cinco segundos para realizar a aferição do valor de potência indicado no medidor de maneira que os dados do mostrador digital estabilizassem antes da leitura. O processo ponto-a-ponto foi realizado de 0 a 355°. Os valores iam sendo anotados em uma planilha eletrônica.

CAPÍTULO 3

- ESTUDO DE TÉCNICAS EXISTENTES PARA MELHORIA DA DIRETIVIDADE DA ANTENA VIVALDI

Este capítulo apresenta as diferentes técnicas, propostas na literatura acadêmica, que visam implementar a melhoria em alguma característica da antena Vivaldi, dentre elas a redução do SLL ou o aumento do ganho do lóbulo principal. Uma observação geral é de que não houve contribuição mútua destas características em nenhuma destas técnicas. As técnicas estudadas foram: lentes dielétricas, lentes de metamateriais, diretores metálicos e cavidades ressonantes.

Tanto as lentes dielétricas como as lentes de metamateriais, embora melhorem o ganho, não reduzem o SLL e comprometem as características construtivas da antena, mesmo sendo técnicas diferentes. Os diretores metálicos promovem a redução da abertura angular do lóbulo principal por colimar o feixe, mas não reduzem efetivamente o SLL e não promovem o aumento no ganho. Finalmente, estudou-se a técnica de cavidades ressonantes, que é aplicada nas bordas metálicas da antena, promovendo a redução do SLL, mas sem aumentar o ganho do lóbulo principal.

Esta última foi escolhida como base para o desenvolvimento das novas técnicas propostas nesta Tese, pois além de eficientes na promoção da diretividade da antena Vivaldi, não compromete as características construtivas da mesma.

3.1 Identificação da Necessidade

Conforme apresentado na Seção 1.3, a AV é classificada como uma antena de baixa diretividade e, com base nesta característica intrínseca de seu desenho, a comunidade da área de antenas e propagação busca melhorar suas características de radiação, para torná-la mais diretiva. Diversos autores tentaram melhorar essas características, podendo-se citar os esforços de Bourqui *et al.* (2010), Agahi *et al.* (2011), Fei, *et al.* (2011), Bai, Shi e Prather (2011), Zhou, *et al.* (2011), Wang *et al.* (2012), Juan *et al.* (2012), Kazemi, Fathy e Sadeghzadeh (2012), Alhawari *et al.* (2012), Wang, Wang e Zong (2013), Teni *et al.* (2013), Hshieh *et al.* (2013), Jia *et al.* (2013), Fortuny *et al.* (2013), Karahan e Sahinkaya (2014), Avdushin *et al.* (2014), He *et al.* (2014), Ma *et al.* (2014), Yu *et al.* (2014), Cao *et al.* (2014), Chanhfei *et al.* (2014), Herzi, Zairi e Gharsallah (2014), Singha e Vakula (2015), Natarajan *et al.* (2015) e por fim Moosazadeh e Kharkovsky (2015).

3.1.1 Antena Vivaldi Antipodal Referência (AVA-974)

A AVA escolhida como referência de estudo e desenvolvimento para este projeto é basicamente formada por um sistema de alimentação por linha de transmissão em micro fita (*Micro Transition Line* - MTL) e um radiador em abertura exponencial (*Exponential Slot Line Radiator* - ESLR), que serão detalhados na sequência. Foi proposta em trabalhos anteriores (De Oliveira, 2012c) e tem o codinome interno de pesquisa AVA-974, pois se trata da AVA versão 9.7.4, onde o nove indica a geração, o sete a sétima revisão da nona geração e o quatro a mudança de tipo de substrato, nesse caso o Rogers RO3206.

A MTL é formada por um condutor em fita e a superfície do plano-terra, sendo ambos formados por um fino filme de material metálico, em geral de cobre, separados por um substrato estrutural, Figura 17(a), usualmente com constante dielétrica maior que dois ($\epsilon_r > 2$) (BAHL e TRIVEDI, 1977; WHEELER, 1977).

Na estrutura da MTL, as linhas de campo elétrico não são totalmente confinadas no interior do substrato, Figura 17(b), tendo como modo de propagação predominante o quase-TEM (BAHL e TRIVEDI, 1977; WHEELER, 1977).

Figura 17- Linha de Transmissão em Micro fita onde h e t são as espessuras do substrato e do condutor em fita respectivamente e w é a largura do condutor em fita (a). Representação da análise de um corte transversal de uma MTL com propagação quase-TEM (b).

Fonte: De Oliveira (2012c).

Segundo Bahl e Trivedi, (1977) e Wheeler (1977), a impedância característica (Z_0) da MTL e sua constante dielétrica efetiva (ϵ_{eff}), com a relação entre w e h maior que 1, são dadas por:

$$Z_0 = \frac{120\pi / \sqrt{\epsilon_{eff}}}{w/h + 1,393 + 0,667 \ln(w/h + 1,444)} \quad (14)$$

e

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 h/w\right)^{-1/2} \quad (15)$$

A partir destes modelos, definiu-se a Z_0 da antena como 50 Ω (impedância padrão de cabos e conectores de Microondas) adotando os seguintes parâmetros: o substrato escolhido foi Rogers RO3206, cuja constante dielétrica vale 6,15. A espessura (h) do substrato é de 0,64 mm.

Para determinar w da MTL foi utilizada a rotina de cálculo de impedância características de linhas em micro fita do CST MW Studio. Finalmente, com base nos modelos propostos por Bahl e Trivedi, (1977) e Wheeler (1977), foi obtido um valor de Z_0 teórico e em ambos os casos, foi adotado w valendo 1mm.

Uma vez obtido Z_0 da MTL, buscou-se idealizar o melhor irradiador entre a MTL e o meio de propagação (ar) de forma a garantir uma, naturalmente suave, transição do sinal. Assim, foi considerado utilizar um radiador de abertura exponencial, uma vez que isso atenderia às necessidades de radiação com uma impedância de largura de banda relativamente grande (GIBSON, 1979; SHIN e SCHAUBERT, 1999; YANG, WANG e FATHY, 2008).

A Figura 18 mostra a função exponencial, assim como seus pontos inicial e final para a

obtenção da abertura exponencial do irradiador proposto.

Figura 18– AVA-974 proposta com detalhe da abertura exponencial do irradiador (DE OLIVEIRA, *et al.* 2012a).

Fonte: De Oliveira, *et al.* (2012a).

Esta função exponencial foi obtida segundo resultados da literatura (SHIN e SCHAUBERT, 1999; YANG, WANG e FATHY, 2008), dada pelas equações (16)-(18), tendo como taxa de abertura $R=0,105$ e pontos inicial e final como $P1_{(x1,y1)}$ e $P2_{(x2,y2)}$,

$$f(x) = c_1 e^{Rx} + c_2 \quad (16)$$

onde

$$c_1 = \frac{y_2 - y_1}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \quad (17)$$

e

$$c_2 = \frac{y_1 e^{Rx_2} - y_2 e^{Rx_1}}{e^{Rx_2} - e^{Rx_1}} \quad (18)$$

A Figura 19 e a Tabela 1 apresentam as dimensões de projeto da AVA.

Figura 19- Parâmetros do projeto da AVA-974 referência proposta por De Oliveira *et al.* (2012a).

Fonte: De Oliveira, *et al.* (2012a).

Tabela 1 - Dimensões da AVA-974 referência.

MTL de 50Ω	W	b	Unidades em mm			
	1,00	23,02				
Dimensões da antena	l	o	s	r	c	a
	59,81	21,59	7,46	13,12	4,03	36,14

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros da antena foram otimizados por variação linear no CST.

A Figura 20 apresenta a fotografia da AVA-974 fabricada em seu lado superior e inferior.

Figura 20- Fotografia da AVA-974 Referência fabricada, sendo a vista superior à esquerda e a inferior à direita.

Fonte: Autoria própria.

A AVA-974 tem as dimensões finais de 36,3 x 59,8 mm², o que corresponde a aproximadamente $0,6 \lambda \times \lambda$, sendo λ o comprimento de onda de 5 GHz. .

3.1.2 Resultados de operação da AVA-974 Referência

De acordo com Balanis (2008), um importante parâmetro (mas não o único) a ser observado durante o projeto de uma antena como a Vivaldi é a perda por retorno (*return loss* – S_{11}). Segue a perda por retorno da AVA Referência apresentada na Figura 21. Esse parâmetro foi levado em consideração ao longo da extensa bateria de simulações e modelagem via CST.

Figura 21- Perda por retorno da AVA-974 Referência Medida (linha contínua) e Simulada (linha tracejada).

Fonte: Autoria própria.

A perda por retorno apresentado na Figura 21 mostra que até 5 GHz há perda por retorno a níveis acima de -10dB, o que caracteriza que a antena não opera adequadamente abaixo de 5 GHz ou acima desta frequência quando também estão acima de -10 dB.

Esse limite inferior de -10 dB foi escolhido como objetivo de projeto de forma que as antenas propostas operem em frequências ideais para tecnologias estado da arte.

Observa-se assim, uma faixa de operação adequada ($|S_{11}| < -10\text{dB}$) entre 5 e 11 GHz. Esse comportamento em função da frequência se deve ao fato de que os comprimentos de onda correspondentes até 5 GHz são maiores que as dimensões da antena em proporcionar espaço suficiente para o surgimento de correntes superficiais com polaridades reversas a fim de proporcionar a propagação dos campos elétricos (e os campos magnéticos concatenados a estes) adequadamente, como ocorre a frequências maiores de 5 GHz.

Após a análise da perda por retorno, optou-se por estudar o diagrama de radiação da antena em duas frequências, 6 GHz (limite inferior de projeto) e 8,4 GHz (limite máximo do *Setup* 1 de medidas no início do projeto), como ilustra a Figura 22.

A identificação de lóbulo principal e lóbulos laterais é realizada através da Figura 22, de maneira a reforçar a definição apresentada na Seção 2.2.2 o que auxiliará o leitor na identificação de tais lóbulos ao longo de toda Tese.

Figura 22- Diagrama de radiação da AVA-974 Referência Medido (x's) e Simulado (linha tracejada) a 6 e 8,4 GHz.

Fonte: Autoria própria.

Neste ponto cabe salientar que as medidas de diagrama de radiação foram realizadas em 6 e 8,4 GHz, pois a primeira frequência é a faixa em que a antena inicia sua melhor operação em função da formação do lóbulo principal e sobretudo pela estabilidade do ganho, e a segunda frequência, 8,4 GHz, por ser o limite superior de frequência do *Setup* de medidas número 1.

Ao longo do texto, muitas imagens serão extraídas dos resultados de simulação a 6 GHz, entretanto essa é apenas uma frequência escolhida para ilustração, no entanto, as demais frequências da faixa de operação resultam em diagramas semelhantes. Por fim, cabe ressaltar que as medidas do diagrama de radiação foram executadas em um sistema de medidas de baixa sensibilidade (faixa dinâmica) para medir sinais em nulo, o que acaba impedido excursionar (medir) abaixo do nível de ruído ambiente.

A 6 GHz, é possível observar que a AVA-974 Referência possui um ganho de 5 dB, um pequeno estrabismo de 5 graus e um nível de lóbulo lateral (*Side Lobe Level – SLL*) de -5 dB, o que reforça as afirmações de que a AVA possui baixa diretividade (YANG, *et al.* 2008; KAZEMI, *et al.* 2012; DE OLIVEIRA, *et al.* 2015).

A limitação identificada nessa antena se tornou o foco deste estudo, que visa melhorar as suas características de diretividade. Para que isso seja possível, foi necessário conhecer as causas que tornam a AVA uma antena de baixa diretividade, ou seja, para isso, buscou-se definir o problema, estudo esse que será apresentado na próxima Seção.

3.2 Definição do Problema

Ainda com base nos diagramas de radiação ilustrados na Figura 22, é possível observar que há excessiva radiação lateral, ou seja, os níveis SLL estão elevados, o que compromete a diretividade da antena. Sabe-se que na AVA a radiação de campo distante se dá em função das correntes de superfície e uma primeira forma de se entender o que está ocorrendo com o diagrama de radiação seria através da análise das correntes de superfície.

Figura 23- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície da AVA-974 Referência com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d) e da região que promove a radiação dos lóbulos laterais.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 23 mostra o diagrama de correntes de superfície a 6 GHz nas metalizações da AVA Referência. A alimentação se dá através do conector SMA de 50 Ω , ponto (a), o sinal é transmitido ao longo da MTL, ponto (b), e como tanto na alimentação quanto na MTL o sinal estão confinados, observa-se que praticamente não há correntes de superfície fora destas regiões durante a alimentação (regiões mais escuras do diagrama).

Posteriormente o sinal inicia a transição da MTL para o radiador exponencial, Figura 23, no ponto (c), e não há mais condições para manter os campos elétricos confinados, considerando que se inicia a transição de impedância entre a MTL e o ar, o que promove o escape de linhas de campo para as regiões mais externas do radiador de abertura exponencial, devido às correntes de bordas nestas regiões, Figura 23, ponto (d).

Desta forma, as correntes superficiais presentes ao longo da abertura exponencial do radiador promovem a radiação do sinal. Entretanto, é possível observar que as bordas laterais

propiciam condições ideais para o surgimento destas mesmas correntes de superfície, ao longo das bordas, como ilustra a Figura 23, ponto (e), o que proporciona a propagação lateral.

Figura 24- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da AVA-974 Referência com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6 GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a) e nas bordas laterais (ponto b).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 24, ponto (a), mostra que as correntes nas duas extremidades do radiador de abertura exponencial possuem diferença de fase, representada pelos cones, o que cria a polarização necessária para o surgimento dos campos elétricos e, consequentemente, a radiação posterior. Entretanto, é possível observar que as bordas laterais também dão condições para a manutenção destas correntes superficiais polarizadas o que, consequentemente, promove a radiação lateral. Isto pode explicar os altos níveis de SLL deste tipo de antenas.

Figura 25- Detalhe do diagrama de correntes de superfície a 6 GHz do radiador exponencial da AVA-974 Referência com a evidência das diferentes distribuições de correntes nas duas superfícies do radiador (ponto a) e (ponto b).

Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a distribuição das correntes de superfície nas regiões (a) e (b) do radiador exponencial da AVA Referência, como ilustra a Figura 25, é possível entender que esta característica se deve à polarização elétrica das duas superfícies metálicas, onde uma delas (a) é formada a partir do plano-terra, que possui mais metal e além disso, em antenas do tipo AVA, estas superfícies são em geral assimétricas. Esta diferença de distribuição de correntes gera uma pequena defasagem entre elas, o que gera um pequeno estrabismo em relação a direção e sentido de propagação e o eixo z .

A Figura 26 mostra a influência das correntes de superfícies na distribuição de campos elétricos. De acordo com a figura, a maior parte da propagação dos campos elétricos ocorre na direção do eixo z . Entretanto, há propagação no sentido ortogonal a esse, devido às correntes de superfícies laterais. Outro aspecto importante, que pode ser observado no diagrama de distribuição de campos elétricos ilustrado, é o estrabismo realçado com os vetores de cor preta e branca, onde o vetor de cor preta representa a direção e sentido esperado (correto) e o vetor na cor branca apresenta o real sentido e direção ocorrida (estrábico).

Figura 26- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz, da AVA-974 Referência.

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, é possível identificar como fonte do problema a descontrolada distribuição de correntes de superfícies, característica intrínseca do desenho deste tipo de antena e que a acompanha desde sua proposta inicial, tornando a Vivaldi uma antena de baixa diretividade.

Em relação ao diagrama de distribuição de campos elétricos como, por exemplo, o ilustrado na Figura 26, é importante ressaltar que apenas no ambiente de projeto assistido por computador (ambiente de simulação eletromagnética) é possível ter esse tipo de análise, uma vez que não há como experimentalmente obter tais resultados com tamanha precisão.

3.3 Definição dos Objetivos

Os objetivos gerais deste trabalho foram apresentados na Seção 1.4. Os objetivos específicos a serem alcançados, de forma se atingir os objetivos gerais, são:

- Diminuir o SLL da AVA Referência;
- Diminuir o estrabismo da AVA Referência;
- Aproveitar a energia dos lóbulos laterais e canalizá-la para o lóbulo principal;
- Diminuir o limite inferior de frequência (LIF) de operação da AV;

- Não comprometer características construtivas da AV, que são pequenas dimensões e simplicidade no processo de confecção.

3.4 Síntese

Com base na literatura, quatro propostas são apresentadas, de tal forma a alcançar os objetivos apontados na Seção 3.3. Posteriormente, será feita uma análise qualitativa das propostas, o que resultará na seleção da proposta mais promissora.

3.4.1 Proposta 1 – Uso de lentes dielétricas

Na literatura, foram identificados dois tipos de lentes dielétricas aplicadas em antenas Vivaldi: a primeira (Tipo I) consiste em adicionar a lente de material diferente do substrato da antena após o radiador, como foi proposto nos trabalhos de Bourqui, *et al.* (2010) e Kazemi, *et al.* (2012) e o segundo tipo (Tipo II) são as lentes dielétricas confeccionadas direto no substrato da antena, conforme os trabalhos de Wang, *et al.* (2012), Teni, *et al.* (2013), Juan, *et al.* (2013), Fortuny, *et al.* (2013) e Moosazadeh e Kharkovsky (2015). A Tabela 2 apresenta uma comparação das características de radiação das diferentes propostas, enquanto a Tabela 3 apresenta uma comparação das características físicas entre as diferentes propostas.

Tabela 2 - Estudo qualitativo de características de radiação de diferentes propostas do uso de LD em AV.

<i>Ref.:</i>	<i>Tipo de lente</i>	<i>Melhor diretividade?</i>	<i>Maior ganho?</i>	<i>Menor SLL?</i>	<i>Menor estrabismo?</i>	<i>Menor LIF?</i>	<i>Uso de técnica Adicional?</i>
BOURQUI, <i>et al.</i> 2010	Tipo I	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Não
KAZEMI, <i>et al.</i> 2012	Tipo I	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não
WANG, <i>et al.</i> 2012	Tipo II	Sim	Sim	Sim*	Não	Não	Sim RSE
TENI, <i>et al.</i> 2013	Tipo II	Sim	Sim	Sim*	Não	Sim*	Sim RSE
JUAN, <i>et al.</i> 2013	Tipo II	Sim	Sim	Sim*	Não	Sim*	Sim TSE
FORTUNY, <i>et al.</i> 2013	Tipo II	Sim	Sim	Não	--	Não	Sim RF-MEMS
MOOSAZADEH e KHARKOVSKY, 2014	Tipo II	Sim	Sim	Sim*	Não	Sim*	Sim RSE

*apenas em função do uso da técnica adicional. -- Não se aplica. Fonte: Autoria própria.

O estudo qualitativo preliminar das diferentes propostas, em função das características de radiação, aponta que o uso de lentes dielétricas melhora as características de diretividade da antena, pois promovem o aumento do ganho do lóbulo principal. Entretanto, essas propostas não reduzem o SLL, e somente a proposta de Bourqui, *et al.* (2010) corrige o estrabismo do lóbulo principal. Adicionalmente, é possível observar que o uso desta técnica não promove a diminuição do LIF.

Tabela 3 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.

<i>Ref.:</i>	<i>Tipo de lente</i>	<i>Maior comprimento?</i>	<i>Maior largura?</i>	<i>Maior altura?</i>	<i>Grau de complexidade na construção</i>
BOURQUI, <i>et al.</i> 2010	Tipo I	Sim	Não	Não	Alto
KAZEMI, <i>et al.</i> 2012	Tipo I	Sim	Não	Sim	Alto
WANG, <i>et al.</i> 2012	Tipo II	Sim	Sim	Sim	Médio
TENI, <i>et al.</i> 2013	Tipo II	Sim	Não	Não	Baixo
JUAN, <i>et al.</i> 2013	Tipo II	Sim	Não	Não	Baixo
FORTUNY, <i>et al.</i> 2013	Tipo II	Sim	Não	Não	Alto
MOOSAZADEH e KHARKOVSKY, 2014	Tipo II	Sim	Não	Não	Baixo

Fonte: Autoria própria.

Já em relação às características físicas, todas as técnicas alteram as dimensões finais da antena em relação a sua respectiva antena referência, sendo a proposta de Wang, *et al.* (2012) a que mais eleva tais dimensões, embora as propostas de Bourqui, *et al.* (2010), Kazemi, *et al.* (2012) e Fortuny, *et al.* (2013) apresentem maior grau de complexidade construtiva.

3.4.2 Proposta 2 – Uso de lentes de metamateriais

Com relação à utilização de LM formados por padrões repetidos de ressonadores metálicos que alteram as características da constante dielétrica do substrato, que pode ser utilizado para criar geometrias na forma de lentes de metamateriais, é possível citar as propostas de Zhou, *et al.* (2011), Alhawari, *et al.* (2012), Avdushin, *et al.* (2014) e Singha e Vakula, (2015). A Tabela 4 apresenta uma comparação das características de radiação das diferentes propostas, enquanto a

Tabela 5 apresenta uma comparação das características físicas entre as diferentes propostas.

Tabela 4 - Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de lentes de metamaterial.

<i>Ref.:</i>	<i>Melhor diretividade?</i>	<i>Maior ganho?</i>	<i>Menor SLL?</i>	<i>Menor estrabismo?</i>	<i>Menor LIF?</i>	<i>Uso de técnica Adicional?</i>
ZHOU, <i>et al.</i> 2011	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não
ALHAWARI, <i>et al.</i> 2012	Sim	Sim	Não	Sim	Não	Não
AVDUSHIN, <i>et al.</i> 2014	Sim	Sim	Não	--	Não	Não
SINGHA e VAKULA, 2015	Sim	Sim	Não	Não	Sim*	Sim RSE

*apenas em função do uso da técnica adicional. -- Não se aplica por não ser uma AVA. Fonte: Autoria própria.

O estudo qualitativo preliminar das diferentes propostas, em função das características de radiação, evidencia que o uso de lentes de metamateriais melhoram as características de diretividade da antena, uma vez que promovem a elevação do ganho do lóbulo principal,

entretanto, não reduzem o SLL, com exceção da técnica de Zhou, *et al.* (2011). Adicionalmente, apenas a proposta de Alhawari, *et al.* (2012) apresenta correção do estrabismo do lóbulo principal. Observa-se que o uso desta técnica, assim como a da proposta 1, não promove a diminuição do LIF.

Tabela 5 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.

<i>Ref.:</i>	<i>Maior comprimento?</i>	<i>Maior largura?</i>	<i>Maior altura?</i>	<i>Grau de complexidade na construção</i>
ZHOU, <i>et al.</i> 2011	Não	Não	Sim	Alto
ALHAWARI, <i>et al.</i> 2012	Sim	Sim	Sim	Alto
AVDUSHIN, <i>et al.</i> 2014	Não	Não	Não	Baixo
SINGHA e VAKULA, 2015	Sim	Sim	Sim	Alto

Fonte: Autoria própria.

Com relação às características físicas, quase todas as técnicas propostas alteram as dimensões finais da antena em relação a sua respectiva antena referência, com exceção da proposta de Avdushin, *et al.* (2014). As propostas de Alhawari, *et al.* (2012) e de Singha e Vakula (2015) são as que mais elevam as dimensões (volume) e apenas a proposta de Avdushin, *et al.* (2014) não altera a complexidade construtiva.

3.4.3 Proposta 3 – Uso de diretores metálicos

Em termos do uso de DM, adicionados na frente do radiador para promover melhora na diretividade da antena, é possível citar as propostas de Agahi, Abiri e Mohajeri, (2011) e He, *et al.* (2014). A Tabela 6 apresenta uma comparação das características de radiação das diferentes propostas, enquanto a Tabela 7 apresenta uma comparação das características físicas entre as diferentes propostas.

Tabela 6-Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de diretores metálicos.

<i>Ref.:</i>	<i>Melhor diretividade?</i>	<i>Maior ganho?</i>	<i>Menor SLL?</i>	<i>Menor estrabismo?</i>	<i>Menor LIF?</i>	<i>Uso de técnica Adicional?</i>
AGAHI, ABIRI e MOHAJERI, 2011	Não	Não	Não	Não	Não	Não
HE, <i>et al.</i> 2014	Sim	Não	Sim*	--	Não	Sim RSE

*apenas em função do uso da técnica adicional. -- Não se aplica por não ser uma AVA. Fonte: Autoria própria.

O estudo qualitativo preliminar das diferentes propostas, em função das características de radiação, evidencia que o uso de diretores metálicos melhoram as características de diretividade da antena apenas na proposta de He, *et al.* (2014), uma vez que promovem a elevação do ganho do lóbulo principal, entretanto, não reduzem o SLL e não há correção do estrabismo do lóbulo principal. Observa-se adicionalmente que o uso desta técnica, assim como as das propostas 1 e 2, não promove a diminuição do LIF.

Tabela 7 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.

<i>Ref.:</i>	<i>Maior comprimento?</i>	<i>Maior largura?</i>	<i>Maior altura?</i>	<i>Grau de complexidade na construção</i>
AGAHI, ABIRI e MOHAJERI, 2011	Não	Não	Não	Baixo
HE, <i>et al.</i> 2014	Sim	Não	Não	Médio

Fonte: Autoria própria.

Com relação às características físicas, apenas a proposta de He, *et al.* (2014) eleva o grau de complexidade construtiva e as dimensões da antena.

3.4.4 Proposta 4 – Uso de cavidades ressonantes

Finalmente, a última proposta está relacionada ao uso de cavidades ressonantes (SE) do tipo retangular (RSE), como proposto por Bai, *et al.* (2011), Wang, *et al.* (2012), Teni, *et al.* (2013), He, *et al.* (2014), Karahan e Sahinkaya, (2014), Cao, *et al.* (2014), Changfei, *et al.* (2014), Herzi, Zairi e Gharsallah, (2014), Singha e Vakula, (2015) e Moosazadeh e Kharkovsky, (2015), e triangular (TSE), como proposto por Fei, *et al.* (2011), Juan, *et al.* (2013), Hshieh, *et al.* (2013) e Natarajan, *et al.* (2015). A Tabela 8 apresenta uma comparação das características de radiação das diferentes propostas, enquanto a Tabela 5 apresenta uma comparação das características físicas entre as diferentes propostas.

Tabela 8-Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de SE em AV.

<i>Ref.:</i>	<i>Tipo de cavidade</i>	<i>Melhor diretividade?</i>	<i>Maior ganho?</i>	<i>Menor SLL?</i>	<i>Menor estrabismo?</i>	<i>Menor LIF?</i>	<i>Uso de técnica Adicional?</i>
FEI, <i>et al.</i> 2011	TSE	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
BAI, <i>et al.</i> 2011	RSE	Sim	Não	Sim	--	Não	Não
WANG, <i>et al.</i> 2012	RSE	Sim*	Sim*	Sim	Não	Não	Sim LD
JUAN, <i>et al.</i> 2012	TSE	Sim*	Sim*	Sim	Não	Sim	Sim LD
TENI, <i>et al.</i> 2013	RSE	Sim*	Sim*	Sim	Não	Sim	Sim LD
HSHIEG, <i>et al.</i> 2013	TSE	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
HE, <i>et al.</i> 2014	RSE	Sim	Sim*	Sim	Não	Não	Sim DM
KARAHAN <i>et al.</i> 2014	RSE	Sim	Não	--	Não	--	Sim LD
CAO, <i>et al.</i> 2014	RSE	Sim	Não	Sim	Não	--	Não
CHANGFEI, <i>et al.</i> 2014	RSE	--	--	--	--	--	--
HERZI, <i>et al.</i> 2014	RSE	--	--	--	--	--	--
NATARJAN, <i>et al.</i> 2015	TSE	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não
SINGHA, <i>et al.</i> 2015	RSE	Sim*	Sim*	Sim*	Não	Sim	Sim LM
MOSAZDHI, <i>et al.</i> 2015	RSE	Sim*	Sim*	Sim*	Não	Sim	Sim LD

*apenas em função do uso da técnica adicional. -- Não se aplica. Fonte: Autoria própria.

O estudo qualitativo preliminar das diferentes propostas, em função das características de radiação, evidencia que o uso de SE dos dois tipos, RSE e TSE, melhoram as características de

diretividade da antena, uma vez que reduzem o SLL, entretanto não corrigem o estrabismo e não aumentam o ganho do lóbulo principal. Observa-se adicionalmente que é a única técnica que promove a diminuição do LIF.

Tabela 9 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.

<i>Ref.:</i>	<i>Tipo de cavidade</i>	<i>Maior comprimento?</i>	<i>Maior largura?</i>	<i>Maior altura?</i>	<i>Grau de complexidade na construção</i>
FEI, <i>et al.</i> 2011	TSE	Não	Não	Não	Baixo
BAI, <i>et al.</i> 2011	RSE	Não	Não	Não	Baixo
WANG, <i>et al.</i> 2012	RSE	Sim	Não	Não	Baixo
JUAN, <i>et al.</i> 2012	TSE	Sim	Não	Não	Baixo
TENI, <i>et al.</i> 2013	RSE	Sim	Não	Não	Baixo
HSHIEG, <i>et al.</i> 2013	TSE	Não	Não	Não	Baixo
HE, <i>et al.</i> 2014	RSE	Sim	Não	Não	Médio
KARAHAN <i>et al.</i> 2014	RSE	Sim	Não	Não	Baixo
CAO, <i>et al.</i> 2014	RSE	Não	Não	Não	Baixo
CHANGFEI, <i>et al.</i> 2014	RSE	Não	Não	Não	Baixo
HERZI, <i>et al.</i> 2014	RSE	Não	Não	Não	Baixo
NATARJAN, <i>et al.</i> 2015	TSE	Não	Não	Não	Baixo
SINGHA, <i>et al.</i> 2015	RSE	Sim	Sim	Sim	Alto
MOSAZDH, <i>et al.</i> 2015	RSE	Sim	Não	Não	Baixo

Com relação às características físicas, quase todas as técnicas propostas não alteram as dimensões finais da antena em relação às suas respectivas antenas de referência e além disso não alteram o grau de complexidade construtiva.

3.4.5 Análise das propostas e pré-seleção

Com base na literatura sobre diferentes técnicas de melhoria das características de diretividade da AV, pode-se elencar (Tabela 10) os objetivos deste trabalho na forma de requisitos para pré-seleção, assim como as diferentes técnicas que alcançam ou não tais requisitos, de forma a pautar a pré-seleção tecnológica para o desenvolvimento da nova AV.

Tabela 10- Quadro comparativo entre diferentes técnicas para melhoria de diretividade de AV para análise geral e qualitativa e pré-seleção.

<i>Requisitos / Técnica</i>	<i>LD</i>	<i>LM</i>	<i>DM</i>	<i>SE</i>
Torna a AV mais diretiva?	Sim	Sim	Sim	Sim
Diminui o SLL da AV?	Sim	Não	Não	Sim
Diminui o estrabismo da AV?	Sim	Não	Não	Não
Aproveita a energia dos lóbulos laterais?	Não	Não	Não	Não
Diminui o LIF?	Não	Não	Não	Sim
Simplicidade construtiva, baixo peso e tamanho ?	Não	Não	Não	Sim
Resultado: Técnica Pré-selecionada?	Não	Não	Não	Sim

Ao se observar que todas as técnicas promovem a efetiva melhoria na diretividade da AV, é possível preliminarmente afirmar que todas as técnicas são promissoras. Entretanto, é necessário analisar atentamente os demais requisitos, sobretudo no que diz respeito ao comprometimento das características construtivas, tão atraentes neste tipo de antena. Sob esse ponto de vista, optou-se, neste trabalho, pela técnica de cavidades ressonantes, uma vez que promovem redução do SLL, diminuem o LIF e acima de tudo, não comprometem a simplicidade construtiva, o peso e as dimensões da AV.

Entretanto, é necessário observar que a técnica de cavidades ressonantes não atendem alguns requisitos, sendo eles: o de não aproveitar a energia dos lóbulos laterais, ao contrário, desperdiçam na forma de campos elétricos confinados e não mitigam efetivamente o estrabismo intrínseco da AVA, sem deixar de mencionar que não aumentam o ganho do lóbulo principal.

Com base nestas limitações da técnica de cavidades ressonantes, se buscou sanar essas limitações na próxima etapa de projeto (Seção 3.5), e se possível, mantendo os requisitos alcançados como prioridade.

3.5 Seleção e otimização

Nesta etapa, são consideradas as duas técnicas de cavidades ressonantes na AVA-974, a RSE e a TSE, e uma nova técnica será proposta, de maneira a atender todos os requisitos deste trabalho. Fei, *et al.* (2011) fizeram um estudo comparativo entre uma AVA referência, uma AVA com RSE e a AVA com TSE, proposta por eles. O trabalho apresenta de forma simples o desenho e as medidas de cada tipo de ressonador. Sendo assim, tais estudos serão usados como base para a aplicação das técnicas RSE e TSE na AVA-974 a seguir.

3.5.1 AVA-974 com RSE (RSEAVA-974)

A Figura 27 mostra a evolução da AVA-974 (a) para a RSEAVA-974 (b) após a aplicação da técnica RSE, segundo Fei, *et al.* (2011).

Figura 27- AVA-974 original (a) e RSE-AVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 27(b) mostra as modificações realizadas na AVA-974. São entalhados dois pares simétricos de RSE baseados nos trabalhos de Fei, *et al.* (2011). Os RSE foram originalmente propostos por Rizk e Rebeiz, (2002), para diminuir a largura da AV sem comprometer (degradar) suas características de radiação, o que promove a redução do LIF.

Neste projeto da RSEAVA-974, o comprimento dos entalhes são de $0,16\lambda$ e $0,21\lambda$ a 5 GHz, o que perfaz w_{R1} igual a 9,3 mm e w_{R2} igual a 12,3 mm. A distância entre os entalhes e sua largura são equivalentes a $0,07\lambda$, correspondendo a l_R igual a 4 mm.

A fotografia da RSEAVA-974 fabricada é apresentada na Figura 28. À esquerda está a vista superior, enquanto à direita a inferior.

Figura 28- Fotografia da RSEAVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior.

Fonte: Autoria própria.

3.5.1.1 Resultados de operação da RSEAVA-974

Iniciando a análise da RSEAVA-974, observa-se o impacto dos entalhes laterais no S_{11} . A Figura 29 apresenta a perda por retorno da RSEAVA-974 simulada.

Figura 29- Perda por retorno simulada da RSEAVA-974 (linha contínua) e da AVA-974 (linha tracejada).

Fonte: Autoria própria.

Observando a curva do parâmetro S_{11} , nota-se que a aplicação da técnica RSE reduziu significativamente a perda por retorno entre 8 e 9 GHz e a partir de 5,5 GHz não há outras mudanças significativas. Abaixo de 5,5 GHz, também houve redução da perda por retorno até 3,5 GHz, entretanto não atingindo os -10dB, nível máximo de perda por retorno para operação adequada da antena. Entretanto, todas as antenas pesquisadas na literatura também apresentam redução dos níveis de perda por retorno em frequências menores ao aplicar a técnica de entalhe lateral RSE. Desta forma, os resultados indicam que ao se otimizar os entalhes da RSEAVA-974 seria possível diminuir o LIF.

Outro aspecto que deve ser considerado é o fato de que a aplicação desta técnica proporciona resultados semelhantes aos esperados por uma AVA de maiores dimensões, visto que o LIF, por consequência o comprimento de onda da frequência mínima irradiada, está ligado ao tamanho da antena. Este fato confirma as afirmações de Rizk e Rebeiz (2002), que a aplicação da técnica de entalhes laterais RSE (cavidades ressonantes) reduz o tamanho final da antena sem comprometer (degradar) as características de radiação.

Este experimento também comprovou a afirmação de Sugawara *et al.* (1997), que além de proporcionar desempenho em radiação equivalente a uma antena maior, a aplicação da técnica RSE reduz o SLL. Para confirmar esta melhoria, é preciso observar o diagrama de radiação. A Figura 30 apresenta o diagrama de radiação das antenas AVA-974 e RSEAVA-974 a 6 e 8,4GHz.

A RSEAVA-974 apresenta um ganho de 6 dB e 7 dB do lóbulo principal, para 6 e 8,4 GHz respectivamente, enquanto a AVA-974 possui 5 dB e 7 dB, não havendo alterações significativas do ganho. Em relação ao SLL, observa-se que o nível de -5dB e -8.9 dB da AVA-974, a 6 e 8,4 GHz respectivamente, passou para -17,7 dB e -10,2 dB, o que confirma a melhora da diretividade da antena após a aplicação da técnica RSE.

Quanto ao estrabismo, a 6 GHz a AVA-974 apresenta 5° enquanto a RSEAVA-974 0°, a 8,4 GHz a AVA-974 apresenta 10° enquanto na RSEAVA-974 cai para 5°. Esta correção no estrabismo indica que as características diretivas melhoraram.

Figura 30- Diagrama de radiação da RSEAVA-974 (a) e (b), e da AVA-974 (c) e (d) medido e simulado a 6 e 8, 4 GHz.

Em relação às características físicas, observa-se que não houve alterações significativas nas dimensões e peso da antena, com a aplicação da técnica RSE, assim como não houve mudanças no grau de complexidade no processo de construção.

Voltando a atenção à questão das melhoras nas características de diretividade, é possível observar as correntes de superfícies, para entender como a aplicação da técnica RSE promoveu as melhorias das características de diretividade da RSEAVA-974.

A Figura 31 ilustra o diagrama de correntes de superfície a 6 GHz nas metalizações da RSEAVA-974. Assim como na AVA referência, a alimentação se dá através do conector SMA de 50 Ω , Figura 31(a), o sinal é transmitido no modo quase-TEM ao longo da MTL, Figura 31 (b), sendo que pode ser observado que praticamente não há correntes de superfície fora destas regiões durante a alimentação.

Figura 31- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície, a 6 GHz, da RESAVA-974 com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d), da região das bordas laterais (ponto e) e dos entalhes (cavidades ressonantes) (ponto f).

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, o sinal inicia a transição da MTL para o radiador exponencial, Figura 31, ponto (c), como não há condições de manutenção do confinamento dos campos elétricos, há o escape de linhas de campo para as regiões mais externas do radiador de abertura exponencial, devido às correntes de borda nestas regiões, Figura 31, ponto (d).

Conforme mostrado anteriormente na AVA-974, as longas bordas laterais propiciam condições ideais para o surgimento de correntes de superfície, como ilustra a Figura 23, ponto (e), semelhantes a aquelas que ocorrem nas bordas do radiador exponencial, o que proporciona

a propagação lateral e os elevados SLL. Entretanto, esta é a principal característica dos entalhes na forma de cavidades ressonantes. É possível observar que nas bordas metálicas internas dos RSEs, Figura 31, ponto (f), surgem correntes superficiais, que drenam as correntes das bordas laterais, o que diminui o SLL e confinam essas correntes no entorno dos RSEs. Em relação a esse fenômeno, sob o aspecto de eficiência energética, esses RSEs, ao confinarem tais correntes, consomem energia do sinal e, conseqüentemente, não promovem o aumento das correntes de superfície nas bordas do radiador de abertura exponencial. Assim, não há aumento do lóbulo principal.

Figura 32- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da RSEAVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a), nas bordas laterais (ponto b) e nas cavidades ressonantes (ponto c).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 32, ponto (a), mostra que as correntes nas extremidades do radiador exponencial possuem diferença de fase, o que cria a polarização necessária para o surgimento dos campos elétricos e, por conta disso, a radiação posterior.

Entretanto, é possível observar que ao contrário das bordas laterais da AVA-974, Figura 24, ponto (b), que dão condições para a manutenção destas correntes superficiais polarizadas e assim promovem a radiação lateral.

Na RSEAVA-974 as cavidades ressonantes não permitem o surgimento de tais correntes, Figura 32, ponto (c), aprisionando estas correntes nas bordas internas da cavidade, confinando os campos elétricos, reduzindo assim o SLL. Talvez essa técnica tenha sido inspirada na técnica de laminação de núcleos ferromagnéticos para evitar as correntes de Foucault.

No que diz respeito à eficiência energética, não há o aproveitamento destas correntes para aumentar as correntes do radiador principal, o que permitiria o aumento do lóbulo principal.

Figura 33- Detalhe do diagrama de correntes de superfície a 6GHz do radiador exponencial da RSEAVA-974 com pequenas diferenças nas distribuições de correntes nas duas superfícies do radiador (ponto a) e (ponto b).

Fonte: Autoria própria.

Quando se compara a distribuição das correntes de superfície nas regiões (a) e (b) do radiador exponencial da AVA Referência, como ilustra a Figura 25, com o da RSEAVA-974, Figura 33, observa-se que a referida diferença diminuiu na antenna modificada em relação à original. Por este motivo, os resultados de estrabismo do lóbulo principal são menores na antenna modificada, como pode ser observado no diagrama da Figura 30.

3.5.2 AVA-974 com TSE (TSEAVA-974)

A Figura 34 mostra a evolução da AVA-974 (a) para a TSEAVA-974 (b) após a aplicação da técnica TSE proposta nos trabalhos de Fei, *et al.* (2011). A Figura 34(b) apresenta as modificações realizadas na AVA-974. São entalhados dois pares simétricos de TSE baseados nos trabalhos de Fei, *et al.* (2011). Os TSE foram propostos para diminuir a largura da AV sem degradar suas características de radiação, o que promove a redução do LIF. As medidas dos

comprimentos dos entalhes da TSEAVA-974 são de $0,16 \lambda$ e $0,21 \lambda$ a 5 GHz, o que significa w_{R1} igual a 9,3 mm e w_{R2} igual a 12,3 mm.

Figura 34- AVA-974 original (a) e TSEAVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.

Fonte: Autoria própria.

A fotografia da TSEAVA-974 fabricada é apresentada na Figura 35. À esquerda está a vista superior, enquanto à direita a inferior.

Figura 35- Fotografia da TSEAVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior.

Fonte: Autoria própria.

3.5.2.1 Resultados de operação da TSEAVA-974

Para iniciar a análise da TSEAVA-974, observa-se o impacto dos entalhes laterais no S_{11} . A Figura 36 apresenta a perda por retorno da TSEAVA-974 simulada.

Figura 36- Perda por retorno simulada da TSEAVA-974 (linha contínua) e da AVA-974 (linha tracejada).

Fonte: Autoria própria.

Observando a curva do parâmetro S_{11} , é possível notar que a aplicação da técnica TSE reduziu o LIF em 40 MHz. A Figura 37 apresenta o diagrama de radiação das antenas AVA-974 e TSEAVA-974 a 6 e 8,4 GHz. A TSEAVA-974 apresenta um ganho de 5.4 dB e 7.2 dB do lóbulo principal, para 6 e 8,4 GHz respectivamente, enquanto a AVA-974 possui 5 dB e 7 dB, não havendo alterações significativas do ganho. Em relação ao SLL, o nível de -5 dB e -8.9 dB da AVA-974, a 6 e 8,4 GHz respectivamente, passou para -5,5 dB e -8,6 dB. Embora menos significativo que no caso da RSEAVA-974, é possível observar uma melhoria da diretividade da antenna apenas em 6 GHz após a aplicação da técnica TSE.

Em relação ao estrabismo, a 6 GHz a AVA-974 apresenta 5° enquanto a TSEAVA-974 0°, a 8,4 GHz a AVA-974 apresenta 10° enquanto na RSEAVA-974 cai para 5°. Esta correção no estrabismo indica que as características diretivas melhoraram.

Figura 37- Diagrama de radiação da TSEAVA-974 (a) e (b), e da AVA-974 (c) e (d) medido e simulado a 6 e 8,4 GHz.

Fonte: Autoria própria.

Em relação às características físicas, não houve alteração nas dimensões e peso da antena com a aplicação da técnica TSE, assim como não houve mudanças no grau de complexidade no processo de construção.

Voltando a atenção a questão das características de diretividade, ao se observar as correntes de superfícies é possível entender como a aplicação da técnica TSE promoveu as alterações das características de diretividade da TSEAVA-974.

A Figura 38 mostra o diagrama de correntes de superfície a 6 GHz nas metalizações da TSEAVA-974. Assim como na AVA referência, a alimentação se dá através do conector SMA de 50 Ω , Figura 38 ponto (a), o sinal é transmitido no modo quase-TEM ao longo da MTL, Figura 38 ponto (b), sendo que pode ser observado que praticamente não há correntes de superfície fora destas regiões durante a alimentação.

Figura 38- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície, a 6 GHz, da TSEAVA-974 com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d), da região das bordas laterais (ponto e) e dos entalhes (cavidades ressonantes) (ponto f).

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, o sinal inicia a transição da MTL para o radiador exponencial, Figura 38 ponto (c), como não há condições de manutenção do confinamento dos campos elétricos, há o escape de linhas de campo para as regiões mais externas do radiador de abertura exponencial, devido às correntes de bordas nestas regiões, Figura 38 ponto (d).

Como mostrado anteriormente na AVA-974, as longas bordas laterais propiciam condições ideais para o surgimento de correntes de superfície, como ilustra a Figura 23, ponto (e), semelhantes àquelas que ocorrem nas bordas do radiador exponencial, o que proporciona a propagação lateral e os elevados SLL.

Já na TSEAVA-974 a principal característica dos entalhes na forma de cavidades ressonantes, Figura 38 ponto (f), é o de confinar as correntes superficiais, nas bordas internas dos TSEs, que drenam as correntes das bordas laterais da antena, o que diminui o SLL.

Em relação a esse fenômeno, sob o aspecto de eficiência energética, esses TSEs, ao confinarem tais correntes, consomem energia do sinal e, conseqüentemente, não promovem o aumento das correntes de superfície nas bordas do radiador de abertura exponencial. Assim, não há aumento do lóbulo principal.

Figura 39- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da TSEAVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6 GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a), nas bordas laterais (ponto b) e nas cavidades ressonantes (ponto c).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 39, ponto (a) mostra que as correntes nas extremidades do radiador exponencial possuem diferença de fase, o que cria a polarização necessária para o surgimento dos campos elétricos e, conseqüentemente, a radiação posterior.

Em contraste às bordas laterais da AVA-974, Figura 24, ponto (b), que dão condições para a manutenção destas correntes superficiais polarizadas e assim promovem a radiação lateral, na TSEAVA-974 as cavidades ressonantes não permitem o surgimento de tais correntes, Figura 39 ponto (b), aprisionando parte destas correntes nas bordas internas da cavidade, confinando os campos elétricos, e reduzindo assim o SLL.

Esta análise reforça que, no que diz respeito à eficiência energética, não há o aproveitamento dessas correntes para aumentar as correntes do radiador principal, o que permitiria o aumento do lóbulo principal.

Figura 40- Detalhe do diagrama de correntes de superfície a 6GHz do radiador exponencial da TSEAVA-974 com pequenas diferenças nas distribuições de correntes nas duas superfícies do radiador (a) e (b).

Fonte: Autoria própria.

Quando se compara a distribuição das correntes de superfície nas regiões (a) e (b) do radiador exponencial da AVA Referência, como ilustra a Figura 25, com o da TSEAVA-974, Figura 40, observa-se que essa diferença entre as duas regiões diminuiu na antenna modificada em relação a original, o que explica o móvito dos resultados de estrabismo do lóbulo principal serem menores na antenna modificada, conforme o diagrama da Figura 37.

3.5.3 Seleção e otimização da técnica de cavidades de borda

Um estudo comparativo das distribuições de campos elétricos de cada antenna permite entender, de forma complementar ao estudo realizado até agora, a funcionalidade efetiva da aplicação das cavidades. A Figura 41 apresenta a comparação das distribuições de campos elétricos das antenas AVA-974 e modificada RSEAVA-974. A AVA (acima) promove a distribuição de campos elétricos predominantemente na direção do eixo z . Entretanto, há distribuições laterais e posteriores, o que reforça a tese de que a antenna Vivaldi tem baixa diretividade (YANG, *et al.* 2008; KAZEMI, *et al.* 2012; DE OLIVEIRA, *et al.* 2015, SINGHA

e VAKULA, 2015). A partir da distribuição de campos elétricos da RSEAVA-974, é possível observar que as manifestações laterais e posteriores foram mitigadas. A mesma evidência pode ser observada na comparação entre a AVA-974 e a TSEAVA-974, ilustrada pelas distribuições de campo elétrico da Figura 42.

Figura 41- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6GHz. Acima AVA-974 e abaixo RSEAVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Mesmo após a aplicação das técnicas RSE e TSE, observa-se que não houve uma manutenção efetiva nos níveis de potência dos campos propagados na direção do eixo-z. Para

que isso seja possível, um estudo das cavidades ressonantes, aplicadas às bordas laterais da antena Vivaldi, foi realizado de forma a promover a canalização da energia, necessária para gerar a distribuição de campos elétricos laterais, para promover o aumento das distribuições de campo na direção do eixo-z de forma colimada.

Figura 42- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz. Acima AVA-974 e abaixo TSEAVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Este objetivo foi alcançado ao se substituir as cavidades ressonantes por cavidades radianes, uma vez que se deseja aproveitar a energia que promove os lóbulos laterais, ao invés

de aprisioná-la em ressonadores. Foi exatamente esse o princípio que guiou este projeto, de criar cavidades ridentes semelhantes ao radiador exponencial, ou seja, ao invés de ter cavidades ressonantes, deve-se inserir várias antenas auxiliares ao longo das bordas da antena. A Figura 43 ilustra a comparação entre a AVA-974 e a antena proposta, a ESE AVA-974.

Figura 43- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz. Acima AVA-974 e abaixo Palm Tree AVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Nesta comparação, é possível observar que ao substituir cavidades ressonantes nas bordas laterais por cavidades ridentes, aqui chamadas de cavidade exponencial de borda, ou do inglês,

exponential slot edge (ESE), obteve-se um melhor controle dos campos elétricos laterais de forma a direcioná-los e aproveitá-los para a formação dos campos no sentido de propagação da antena (eixo-z), como se as bordas laterais da AVA-974, ficassem invisíveis aos campos elétricos com a aplicação dos ESEs, o que pode-se chamar de bordas discretas ou *stealth*.

A comparação das distribuições de campo elétrico, em detalhe, pode ser observada na Figura 44, entre as quatro antenas, a referência (AVA-974), as duas modificadas com cavidades ressonantes conforme a literatura (RSEAVA-974 e TSEAVA-974) e a nova antena proposta (ESEAVA-974 ou Palm Tree AVA), com a adição de três pares de cavidades radiantes, como que fossem pequenas antenas auxiliares, consolidando o conceito de bordas *stealth*.

Figura 44- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz. (a) AVA-974, (b) RSE-AVA-974, (c) TSEAVA-974 e (d) ESEAVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, a técnica de entalhar as bordas laterais da AV foi selecionada, porém com base na necessidade de se otimizar esta técnica de maneira a originar uma nova forma de entalhe que, ao invés de promover o confinamento (aprisionar) dos campos elétricos laterais que dariam origem ao lóbulos laterais, pudesse direcioná-los de forma a somá-los aos campos frontais, que darão origem ao lóbulo principal, desenvolveu-se a técnica de cavidades radiantes que até o momento deu origem a duas diferentes AVAs: a Palm Tree e a Koch AVA.

Os CAPÍTULO 4 e CAPÍTULO 5 apresentam o detalhamento de todo o projeto e desenvolvimento das novas antenas, Palm Tree AVA (ESEAVA-974) e Koch AVA (FSEAVA-974) respectivamente, como resposta ao problema de baixa diretividade da AV.

CAPÍTULO 4

- DESENVOLVIMENTO DA PALM TREE AVA (ESEAVA-974)

Este capítulo apresenta todo o desenvolvimento de uma nova Palm Tree AVA efetivamente diretiva com a aplicação da nova técnica de cavidades de borda radiante. Serão apresentados os processos, desde a concepção e otimização, até a prototipação, teste e validação do modelo.

4.1 A Palm Tree AVA

A Figura 45 apresenta a evolução da AVA-974 (a) para a Palm Tree AVA-974 (b) após a aplicação da técnica ESE proposta. A técnica ESE consiste basicamente em reproduzir o formato da abertura exponencial do radiador principal nas laterais da antena (quase-fractal), de forma a gerar pequenas antenas auxiliares que irão promover o controle das correntes de superfície nas bordas da antena, de maneira a canalizar essa energia para a promoção da energia necessária para gerar o lóbulo principal (DE OLIVEIRA, *et al.* 2015).

Figura 45- AVA-974 original (a) e Palm Tree AVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.

Fonte: De Oliveira, *et al.* (2015).

A Figura 45(b) apresenta as indicações de medidas das modificações realizadas na AVA-974 para se obter a Palm Tree AVA-974. A Tabela 11 apresenta as medidas utilizadas. São entalhados quatro pares simétricos de ESEs proporcionando uma inédita antena, batizada como Palm Tree AVA, por ter um desenho que se assemelha às folhas desse tipo de árvore. A técnica ESE está sendo proposta para diminuir o SLL, o LIF, o estrabismo e de forma inédita aumentar simultaneamente o nível do lóbulo principal.

Tabela 11 - Parâmetros da arquitetura da AVA-974 e da Palm Tree AVA (DE OLIVEIRA, *et al.* 2015).

Dimensão dos parâmetros						Ângulos	
a	4.03	e	59.81	i	6.87	α	55°
b	11.17	f	5.91	r	13.12	β	20°
c	18.15	g	9.97	w ₁	36.30	γ	100°
d	23.02	h	21.59	w ₂	21.35	δ	25°

Dimensões em mm. Fonte: Autoria própria.

A fotografia da Palm Tree AVA-974 fabricada é apresentada na Figura 46. À esquerda está o plano superior, enquanto à direita o inferior.

Figura 46- Fotografia da Palm Tree AVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior (DE OLIVEIRA, *et al.* 2015).

Fonte: De Oliveira, *et al.* (2015).

A Figura 47 apresenta os três principais parâmetros de otimização da técnica ESE, o parâmetro i , que representa a distância entre o ponto de origem de cada ESE em z , α (alfa), que representa a abertura, em graus, entre a reta formada pelos pontos de origem de cada ESE e a direção destes e, finalmente β (beta), que representa a abertura em graus da reta formada pelos pontos de origem dos ESEs de cada lado.

Figura 47- Detalhe dos três principais parâmetros (i , α e β) de aplicação da técnica ESE.

Fonte: Autoria própria.

A seguir, são apresentados os resultados de simulação da variação destes parâmetros de maneira a apresentar o processo de otimização utilizado para determinar as medidas utilizadas na Palm Tree AVA-974.

4.1.1 Otimização da Palm Tree AVA

A Figura 48 ilustra as diferentes antenas obtidas durante o processo de otimização por simulação no ambiente de projetos de antenas assistido por computador oferecido pelo CST Microwave Studio.

Figura 48- Diferentes Palm Tree AVA obtidas durante o processo de otimização.

medidas em mm.

Fonte: Autoria própria.

4.1.1.1 Variação do parâmetro i

Inicialmente, varia-se o parâmetro i de 4,12 mm a 9,62 mm em cinco passos, como ilustra a primeira linha da Figura 48. Os parâmetros α e β são mantidos em 55° e 20°, respectivamente. A perda por retorno em função da variação do parâmetro i mostra que para $i=6,87$ mm se obtém a melhor resposta, pois neste caso há o menor LIF, como ilustra a Figura 49.

Figura 49- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro i da Palm Tree AVA.

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao ganho, antenas para aplicação UWB devem possuir ganho aproximadamente constante em uma ampla faixa de frequências (DE OLIVEIRA *et al.* 2015). Sendo assim, optou-se mais uma vez por $i=6,87$ mm, pois nesse caso se obtém o melhor ganho a 6 e a 7 GHz respectivamente, assim como o mais favorável entre 6 e 12 GHz.

Figura 50- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro i .

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao nível dos lóbulos laterais, quando o parâmetro i é igual a 6,87 mm se obtém o melhor SLL a 6 GHz, um dos melhores em 7 GHz e na média nas demais frequências de 8 a 12 GHz, como ilustra a Figura 51.

Figura 51- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro i .

Fonte: Autoria própria.

Em relação à variação do parâmetro i , optou-se por escolher a dimensão de 6,87 mm, pois para esse valor, observa-se o melhor conjunto de características obtidas com base nas curvas de perda por retorno, ganho e SLL.

4.1.1.2 Variação do parâmetro β

Neste ponto, i se torna uma constante fixa em 6,87 mm e α é mantido 55° . Varia-se o parâmetro β de 15° a 25° em cinco passos, como ilustra a segunda linha da Figura 48. A perda por retorno em função da variação do parâmetro β mostra que $\beta = 20^\circ$ propicia a melhor resposta, pois neste caso se obtém a melhor curva do S_{11} de 5 a 16 GHz e o segundo menor LIF, como ilustra a Figura 52.

Figura 52- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro β da Palm Tree AVA.

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao ganho, optou-se novamente por $\beta = 20^\circ$, pois nesse caso se obtém o melhor ganho a 6 GHz, assim como o mais próximo de uma constante entre 6 e 12 GHz, como ilustra a Figura 53.

Figura 53- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro β .

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao SLL, quando o parâmetro $\beta = 20^\circ$ se obtém o segundo melhor SLL a 6 GHz, o melhor a 7 GHz e na média nas demais frequências de 7 a 11 GHz, como ilustra a Figura 54.

Figura 54- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro β .

Fonte: Autoria própria.

Em relação à variação do parâmetro β , uma das melhores escolhas, baseando-se nas curvas perda por retorno, ganho e SLL, é quando $\beta = 20^\circ$, pois para esse caso, atende-se os pré-requisitos iniciais ao processo iterativo de otimização por simulação que são: menor LIF, melhor curva de perda por retorno, ganho elevado e constante e menor SLL.

4.1.1.3 Variação do parâmetro α

Neste ponto, i e β foram mantidos constantes em 6,87mm e 20° , respectivamente. Varia-se o parâmetro α de 35° a 75° em cinco passos, como ilustra a terceira linha da Figura 48. A perda por retorno em função da variação do parâmetro α mostra que para $\alpha = 55^\circ$ se obtém a melhor resposta, pois neste caso se obtém a melhor curva do S_{11} de 5 a 16 GHz e o um dos menores LIF, como ilustra a Figura 55.

Figura 55- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro α da Palm Tree AVA.

Fonte: Autoria própria.

Já com relação ao ganho, optou-se novamente por $\alpha = 55^\circ$, pois nesse caso se obtém o melhor ganho a 6 GHz, bem como o mais constante entre 6 e 12 GHz, como ilustra a Figura 56.

Figura 56- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro α .

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao SLL, é possível observar que quando o parâmetro $\alpha = 55^\circ$ se obtém o melhor SLL a 6 GHz, um dos melhores a 7 GHz e na média nas demais frequências de 7 a 11 GHz, como ilustra a Figura 57.

Figura 57- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro α .

Fonte: Autoria própria.

Em relação à variação do parâmetro α , uma das melhores escolhas, baseando-se nas curvas perda por retorno, ganho e SLL, é quando $\alpha = 55^\circ$, pois assim como durante a variação dos parâmetros anteriores, este é o caso particular que atende os pré-requisitos do processo de otimização por simulação que são: menor LIF, melhor curva de perda por retorno, ganho elevado e constante e menor SLL.

4.1.1.4 Resultado da variação dos parâmetros i , β e α

Com base nos resultados de variação dos parâmetros i , β e α , optou-se por aqueles que combinados proporcionaram uma boa resposta de operação UWB entre 6 e 11 GHz, que corresponde a $i = 6,87$ mm, $\beta = 20^\circ$ e $\alpha = 55^\circ$.

4.2 Prototipação

Esta etapa descreve todo o processo de prototipação, que basicamente se divide em três conjuntos de esforços separados, sendo eles: desenho da antena, escolha dos materiais e fabricação. Maiores detalhes da fabricação podem ser vistos no Apêndice O, ao final desta Tese.

4.2.1 Desenho da antena

O desenho da antena foi feito utilizando-se o programa de desenho assistido por computador DraftSight da Dassault Systems (Figura 58) com base nas medidas e funções de curvas obtidas na etapa de projeto assistido por computador com o CST Microwave Studio.

Figura 58- Tela do programa CAD DraftSight utilizado para criar as plantas da antena.

Fonte: Autoria própria.

Depois de feitos os desenhos, um arquivo com extensão .DXF é gerado e enviado ao fabricante (Apêndice D) junto com a matéria prima.

4.2.2 Escolha dos materiais

Para a fabricação das antenas propostas neste trabalho, foram utilizados como materiais os laminados e os conectores SMA detalhados a seguir:

4.2.2.1 Laminados Rogers RO3206

Para este projeto, foram escolhidos os laminados de alta performance para circuitos de Microondas da Rogers Corporation. Os laminados foram fornecidos como cortesia da empresa, através do Programa de Pedidos de Amostras para Universidades da Rogers. Este programa está disponível à comunidade acadêmica desde 1983 e estabelece o auxílio para estudantes e escolas que queiram realizar seus projetos com os produtos Rogers para altas frequências. Devido aos custos de aquisição de materiais de alta performance, a Rogers fornece sem nenhum custo aos universitários que não possuam apoio financeiro oficial (ROGERS, 2015).

Figura 59- Fotografia da segunda remessa de laminados Rogers de cortesia.

Fonte: Autoria própria.

O acesso ao programa pode ser feito pelo próprio site da empresa. O material escolhido foi o Laminado de duas faces metalizadas em cobre, código RO3206, como ilustra a Figura 59, e suas especificações são apresentadas na Tabela 12.

Tabela 12 - Especificações técnicas do laminado Rogers RO3206 (ROGERS, 2015).

Propriedade	Valor típico	Direção	Unid.	Condição
Constante dielétrica	6,15 +/-0,15	Z	-	10GHz 23°C
Tangente de perda	0,0027	Z	-	8 – 40GHz
Coeficiente térmico	-212	Z	-	10GHz 23°C
Estabilidade dimensional	0,8	Z	ppm/°C	-
Resistividade	10 ⁷		Ωm	
Absorção de água	<0,1	-	%	D24/23
Densidade	2,1		gm/cm ³	
Espessura do cobre	35	y	μm	
Tamanho da placa	228,6 x 0,64 x 304,8	x,y,z	mm	

Fonte: Autoria própria.

4.2.2.2 Conector SMA 50Ω

O conector escolhido foi o SMA 50 Ω e para aumentar a fidelidade dos modelos matemáticos e resultados de simulação das antenas projetadas neste trabalho, o conector foi modelado (modelo 3D) no CST, como ilustra a Figura 60. Embora a alimentação da antena possa ser feita, no CST, por porta do tipo *waveguide* (guia de onda) diretamente na microlinha, optou-se por usar o modelo do conector, uma vez que a alimentação por *waveguide* não contemplaria adequadamente a representação da transição entre a guia coaxial e a microlinha, que ocorre no conector SMA.

Figura 60- Conector SMA 50Ω. À esquerda a foto do conector real e a direita o modelo numérico no CST Microwave Studio (DE OLIVEIRA, 2015).

Fonte: Autoria própria.

Para a execução das simulações, as portas 1 e 2 foram inseridas na entrada e saída do conector, conforme a Figura 61.

Figura 61- Modelo numérico do conector SMA utilizado com o detalhe das portas 1 e 2 para simulação.

Fonte: Autoria própria.

Como resultado das simulações, de DC a 20 GHz, é possível observar a distribuição de campos elétricos, Figura 62(a), e campos magnéticos, Figura 62 (b), da porta 1, no Modo 1 (TEM).

Figura 62- Distribuição de campos elétricos (a) e magnéticos (b) na porta 1 durante simulação em Modo 1 (TEM).

Fonte: Autoria própria.

O gráfico da perda por retorno do conector SMA é ilustrado na Figura 63.

Figura 63- Perda por retorno do conector SMA modelado.

Fonte: Autoria própria.

4.2.3 Fabricação

Depois da criação do arquivo extensão .DXF contendo os desenhos da antena, o mesmo é encaminhado para a indústria Griffus, juntamente com as amostras da placa de RO3206. A empresa para fornecer os serviços de manufatura da antena foi escolhida usando como critério de maior precisão do processo de fabricação, de maneira a garantir a fidelidade das medidas e dimensões da antena fabricada em relação à antena simulada. Maiores detalhes do processo de fabricação podem ser obtidos no Apêndice O, ao final desta Tese.

Quanto à fabricação dos protótipos, pode-se observar que a alta resolução do processo de produção permitiu a confecção adequada das antenas para operar na faixa de 5 a 16 GHz, como ilustram as Figura 64 e Figura 65.

Figura 64- Fotografia microscópica com detalhe da precisão de usinagem do processo de fabricação da MTL.

Fonte: Autoria própria.

Figura 65- Fotografia microscópica com detalhe da precisão de usinagem do ESE.

Fonte: Autoria própria.

4.3 Resultados de operação da Palm Tree AVA-974

Para iniciar a análise de operação da ESEAVA-974, observa-se o impacto dos entalhes laterais no S_{11} . A Figura 66 apresenta a perda por retorno da Palm Tree (ESEAVA-974) em comparação com a AVA Referência.

Figura 66- Perda por retorno simulada e medida da AVA Referência e da Palm Tree AVA-974 (a) e detalhe do LIF (b).

Fonte: Autoria própria.

De acordo com a curva do parâmetro S_{11} , observa-se que a aplicação da técnica ESE reduziu o LIF em 350 MHz e proporcionou o melhor desempenho entre 6 e 11 GHz. A Figura 67 apresenta o diagrama de radiação das antenas AVA-974 e Palm Tree AVA-974 a 6 e 8,4 GHz.

Figura 67- Diagrama de radiação da ESEAVA-974 (a) e (b), e da AVA-974 (c) e (d) medido e simulado a 6 e 8,4 GHz.

Fonte: Autoria própria.

A Palm Tree AVA-974 apresenta um ganho de 8,3 dB e 7,9 dB do lóbulo principal, para 6 e 8,4 GHz respectivamente, enquanto a AVA-974 possui 5 dB e 7 dB, o que constata alterações significativas do ganho. Em relação ao SLL, observa-se que o nível de -5 dB e -8,9

dB da AVA-974, a 6 e 8,4 GHz respectivamente, passou para -20,5 dB e -12,9 dB, o que evidencia mais uma boa performance da Palm Tree AVA em relação à AVA Referência, sobretudo a 6 GHz.

Com relação ao estrabismo, a 6 GHz a AVA-974 apresenta 5° enquanto a ESEAVA-974 0°, a 8,4 GHz a AVA-974 apresenta 11°, enquanto a ESEAVA-974 tem 0°. Esta correção no estrabismo indica que as características diretivas melhoraram.

Em relação à coordenada em z do centro de fase (CF), aqui simplificado apenas como CF, a Palm Tree AVA promove a redução do mesmo, de acordo com a afirmação de Rizk e Rebeiz, (2002) de que a aplicação de entalhes laterais reduz o tamanho final da antena sem comprometer as suas características de radiação, uma vez que a redução do CF em antenas Vivaldi pode ser obtida ao se mudar o tamanho da antena.

A Tabela 13 apresenta uma comparação a 6, 8,4 e 11 GHz entre as antenas AVA-974, RSEAVA-974, TSEAVA-974 e Palm Tree AVA-974, em relação ao ganho, SLL, estrabismo, CF, absoluto e médio (6, 8,4 e 11 GHz) e LIF. Os resultados apontam que a Palm Tree AVA-974 apresenta melhores características de diretividade que a AVA-974.

Tabela 13- Quadro comparativo entre performance da AVA-974 e as modificações RSEAVA-974 e TSEAVA-974, bem como a nova Palm Tree AVA-974.

974, bem como a nova Palm Tree AVA-974.													
		AVA			RSE-AVA			TSE-AVA			Palm Tree AVA		
Frequência (GHz)		6	8,4	11	6	8,4	11	6	8,4	11	6	8,4	11
Ganho (dB)		5,1	7,0	7,6	6,4	7,2	7,7	5,5	7,3	9,7	8,3	7,9	8.1
SLL (dB)		-5.1	-8,9	-7.6	-17,5	-10,2	-7,6	-5,5	-8,7	-10,6	-20,5	-12,9	-8.2
Estrabismo (°)		-5	-11	-2	0	-5	-5	0	-5	0	0	-5	0
CF (mm)	Abs.	51,66	48,23	49,6	45,11	45,3	45,71	49,52	49,83	41,51	45,85	47,37	46.1
	Méd.		49,83			45,37			46,95		46,61		
LIF		5.27 GHz			5.42 GHz			5.24 GHz			5.08 GHz		

Fonte: Autoria própria.

Em relação às características físicas, observa-se que não houve alteração nas dimensões e peso da antena, com a aplicação da técnica ESE, assim como não houve mudanças no grau de complexidade no processo de construção. Voltando a atenção à questão das características de diretividade, é possível observar que as correntes de superfícies sofreram alterações em função da aplicação da técnica ESE, o que promoveu as alterações das características de diretividade da Palm Tree AVA-974.

A Figura 68 ilustra o diagrama de correntes de superfície a 6GHz nas metalizações da Palm Tree AVA-974. Assim como na AVA-974, a alimentação se dá através do conector SMA de 50 Ω , Figura 68 ponto (a), o sinal é transmitido no modo quase-TEM ao longo da MTL, Figura

68 ponto (b), sendo que pode ser observado que praticamente não há correntes de superfície fora destas regiões durante a alimentação.

Figura 68- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície, a 6 GHz, da Palm Tree AVA-974 com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d), da região das bordas laterais (ponto e) e dos entalhes (cavidades radiantes) (ponto f).

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, o sinal inicia a transição da MTL para o radiador exponencial, Figura 68 ponto (c), como não há condições de manutenção do confinamento dos campos elétricos, há o escape de linhas de campo para as regiões mais externas do radiador de abertura exponencial, Figura 68 ponto (d).

Como mostrado anteriormente na AVA-974, as longas bordas laterais propiciam condições ideais para o surgimento de correntes de superfície, como ilustra a Figura 23(e), semelhantes a aquelas que ocorrem nas bordas do radiador exponencial, o que proporciona a propagação lateral e os elevados SLL. Entretanto, esta é a principal característica dos entalhes na forma de cavidades radiantes, controlar as correntes de superfície fora do radiador principal.

É possível observar que nas bordas metálicas internas dos ESEs, Figura 68 ponto (f), surgem correntes superficiais, que drenam as correntes das bordas laterais, o que mitiga o SLL e atraem essas correntes para o entorno dos ESEs, que por sua vez operam como pequenos radiadores auxiliares (antenas auxiliares), aumentando o ganho do lóbulo principal, por canalizar a radiação em seu benefício.

Em relação a esse fenômeno, deve-se salientar que, sobre o aspecto de eficiência energética, esses ESEs ao não confinarem tais correntes, como fazem as demais técnicas SE, canalizam a energia do sinal toda para o lóbulo principal e, conseqüentemente promovem seu aumento, o que, em termos de eficiência energética, supera as demais técnicas SE.

Figura 69- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da Palm Tree AVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a), nas bordas laterais (ponto b) e nas cavidades radiantes (ponto c).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 69 ponto (a) mostra que as correntes nas extremidades do radiador exponencial possuem diferença de fase, o que cria a polarização necessária para o surgimento dos campos elétricos e, conseqüentemente, a radiação posterior. Entretanto, é possível observar que, ao contrário das bordas laterais da AVA-974, Figura 24 ponto (b), que dão condições para a manutenção destas correntes superficiais polarizadas e assim promovem a radiação lateral, na Palm Tree AVA-974 as cavidades radiantes antes, aqui chamadas de ESEs, estão semelhantemente polarizadas como o radiador principal, Figura 69 pontos (b) e (c), canalizando os campos elétricos para a manutenção e aumento do lóbulo principal e reduzindo assim o SLL.

No que diz respeito à eficiência energética, há o aproveitamento destas correntes laterais para aumentar as correntes do radiador principal, o que permite o aumento do lóbulo principal.

Figura 70- Detalhe do diagrama de correntes de superfície a 6GHz do radiador exponencial da Palm Tree AVA-974 com mínimas diferenças nas distribuições de correntes nas duas superfícies do radiador (a) e (b).

Fonte: Autoria própria.

Com relação ao estrabismo, é possível observar que quando se compara a distribuição das correntes de superfície nas regiões (a) e (b) do radiador exponencial da AVA Referência, como ilustra a Figura 25, com o da Palm Tree AVA-974, Figura 70, observa-se que a diferença entre as distribuições de correntes superficiais das duas regiões, (a) e (b), diminuiu na Palm Tree.

Isto explica por que os resultados de estrabismo do lóbulo principal são menores na Palm Tree, como pode ser observado no diagrama da Figura 67.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que a nova técnica de cavidades radiantes, aplicadas às bordas da AVA na forma de aberturas exponenciais semelhantes ao radiador principal, proporcionou que estas cavidades funcionassem como antenas auxiliares e não como ressonadores (a exemplo das soluções homônimas apresentadas até hoje na literatura). Essas cavidades canalizam a energia dos lóbulos laterais para o lóbulo principal, melhorando simultaneamente, de forma inédita, três características da AVA: menores SLL, maior ganho e menor estrabismo.

A partir desta ideia inicial, foi realizada uma exploração sistemática, baseada em simulações, com o intuito de se reproduzir esta técnica com uma abertura de forma diferente da exponencial. Pensando nisso, foi possível notar que ao usar a cavidade lateral com a forma da

abertura principal, resultando em cavidades menores replicadas, foi obtido sistema quase-fractal.

Esta exploração motivou o desenvolvimento da cavidade radiante fractal, uma vez que no projeto de antenas busca-se sempre uma transição suave entre a impedância do circuito e a do meio (ar, vácuo, tecido biológico, ou qualquer meio dielétrico), que pode ser obtida, além do uso da abertura exponencial, por aberturas na forma de fractais como apontam os trabalhos de Werner e Ganguly (2003), Vinoy (2002), Sundaram, *et al.* (2007), Nyikos e Pajkossy (1985), Wang (1988) e finalmente Keddam e Takenoutti (1988).

Nesses trabalhos, a forma de fractal em comum e amplamente utilizada, foi o fractal da curva de Koch. Esta forma obteve ótimos resultados no casamento de impedância entre o circuito e o meio, sendo assim no próximo Capítulo será apresentado o desenvolvimento da Koch AVA-974, uma AVA com cavidades radiantes de borda na forma do fractal da curva de Koch.

CAPÍTULO 5

- DESENVOLVIMENTO DA KOCH AVA (FSEAVA-974)

Este capítulo apresenta o estudo e desenvolvimento de uma nova antena chamada Koch AVA (FSEAVA-974) que, assim como a Palm Tree AVA, foi melhorada com a adição de cavidades radiantes de borda, só que agora na forma da curva de Koch. Serão apresentados os processos que vão desde a concepção e otimização até a prototipação, teste e validação do modelo.

5.1 A Koch AVA

A Figura 71 apresenta a mais nova evolução da AVA-974 (a) originando a Koch AVA-974 (b), ou *Fractal Slot Edge* (FSE) AVA-974, codinome FSEAVA-974, após a aplicação da técnica FSE proposta neste trabalho como evolução da técnica ESE. A técnica FSE consiste basicamente em reproduzir o formato da curva de Koch nas laterais da antena, como ilustra a Figura 71(c), de forma a gerar pequenas antenas auxiliares que irão promover, assim como na técnica ESE, o controle das correntes de superfície nas bordas da antena, de maneira a canalizar essa energia para a promoção da energia necessária para gerar o lóbulo principal (DE OLIVEIRA, *et al.* 2015).

Figura 71- AVA-974 original (a) e Koch AVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas e (c) detalhes e indicações de medidas da cavidade radiante.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 71(b) apresenta as indicações de medidas das alterações promovidas na AVA-974 para se obter a Koch AVA-974. A nova técnica FSE está sendo proposta para, assim como a ESE, diminuir o SLL, o LIF, o estrabismo e aumentar o nível do lóbulo principal, contrariando a afirmação de Hao *et al.* (2015) de que não é comum promover a correção do SLL e aumentar o ganho simultaneamente usando uma única técnica, o que constitui o ineditismo deste trabalho.

Tabela 14 - Parâmetros da arquitetura da FSEAVA-974

Dimensão dos parâmetros						Ângulos
a	4.03	e	59.81	i	1.00	60°
b	11.17	f	7.00	r	13.12	
c	18.15	g	9.97	w ₁	36.30	
d	23.02	h	1.00	w ₂	21.35	

Dimensões em mm. Fonte: Autoria própria.

A fotografia da Koch AVA-974 fabricada é apresentada na Figura 72. À esquerda está o plano superior, enquanto à direita o inferior e o detalhe do FSE.

Figura 72- Fotografia da Koch AVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior e o detalhe do FSE.

Fonte: Autoria própria.

A Figura 73 mostra em detalhe a resolução de fabricação da antena ao apresentar a diminuta cavidade obtida pela terceira iteração do algoritmo fractal.

Figura 73- Fotografia ampliada do detalhe da cavidade de terceira geração do fractal.

Fonte: Autoria própria.

5.1.1 Arquitetura da Cavidade Radiante com a curva de Koch

É possível definir um fractal como a composição de múltiplas autocópias de uma dada geometria mesmo quando em diferentes escalas, desta forma seu tamanho não é pré-definido (KEDDAM e TAKENOUTTI, 1988).

O fractal obtido pela curva de Koch possui grande destaque entre os pesquisadores da área de antenas, pois este fractal apresenta melhores resultados quando aplicados na forma de garantir melhor transição de impedância entre a antena e o meio de propagação, podendo-se citar os trabalhos de Sudaram *et al.* (2007), Puente *et al.* (1998), Baliarda, Romeu e Cardama (2000), Werner, Werner e Church (2001), Werner e Gangly (2003), Krishna, *et al.* (2008 e 2009), Ramadan, *et al.* (2009), Xu, *et al.* (2010), Ismahayati, *et al.* (2011), Li e Mao (2012), Singh, *et al.* (2013), Reddy e Sarma (2014), Wu, *et al.* (2015) e Kim, Lee e Choi (2015), onde algumas destas propostas são apresentadas na Figura 74.

Figura 74 - Fotografias de diferentes tipos de antenas fractais baseadas na curva de Koch. (a) Antena Reconfigurável U-Koch de Ramadan, *et al.* (2009), (b) Monopolo Koch de Ismahayati, *et al.* (2011), (c) Dipolo Koch de Li e Mao (2012), (d) antena Koch de Wu, *et al.* (2015), (e) Arranjo de antenas Koch de Kim, Lee e Choi (2015) e (f) Koch antena de Reddy e Sarma (2014).

Fonte: Ramadan, *et al.* (2009); Ismahayati, *et al.* (2011); Koch de Li e Mao (2012); Wu, *et al.* (2015); Kim, Lee e Choi (2015) e Reddy e Sarma (2014).

Ainda que seja amplamente estudado o uso de formas fractais em antenas, não foi encontrada na literatura nenhum estudo do uso de formas fractais em antenas Vivaldi. Desta forma, esta investigação é inédita em introduzir o conceito de fractal em antenas Vivaldi.

Na sequência, são apresentadas as características de concepção do fractal da curva de Koch utilizada nesta pesquisa.

5.1.1.1 Propriedade Fractal da curva de Koch

Originalmente concebida pelo matemático suíço Helge von Koch (1904), a geometria fractal chamada curva de Koch é facilmente obtida pelo uso de um sistema de função iterativo (SFI) que consiste em um conjunto de transformações de uma geometria inicial A que é dado por:

$$W(A) = \bigcup_{n=1}^4 w_n(A) \quad (19)$$

onde w_1 , w_2 , w_3 e w_4 formam o conjunto de transformações lineares afins, cujas séries são definidas por:

$$w_1 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$w_2 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 60^\circ/3 & -\sin 60^\circ/3 \\ -\sin 60^\circ/3 & \cos 60^\circ/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$w_3 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos 60^\circ/3 & -\sin 60^\circ/3 \\ -\sin 60^\circ/3 & \cos 60^\circ/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1/2 \\ \sin 60^\circ/2 \end{pmatrix} \quad (22)$$

$$w_4 \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/3 & 0 \\ 0 & 1/3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2/3 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (23)$$

sendo W o operador Hutchinson da SFI que, após a terceira iteração, gera a geometria adotada para construir o FSE da Koch AVA-974, como ilustra a Figura 75.

Figura 75- Três primeiras iterações do SFI da curva de Koch para a geometria inicial A.

Fonte: Autoria própria.

Para realizar o estudo da influência do fractal de Koch, foi definido o número de iterações como parâmetro de otimização, que variou de zero (para AVA referência) até três (FSEAVA-974) para a Koch AVA-974 proposta, como ilustra a Figura 76.

Figura 76- Diferentes FSEs obtidos pela variação do parâmetro número de iterações. (a) AVA-974, (b) FSE de 1ª iteração, (c) FSE de 2ª iteração, (d) FSE de 3ª iteração utilizado na Koch AVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, serão discutidos os resultados de simulação da variação destes parâmetros de maneira a apresentar o processo de otimização utilizado para determinar as medidas utilizadas na Koch AVA-974.

5.1.2 Otimização da Koch AVA pela variação do número de iterações

Inicialmente, é possível observar a perda por retorno em função da variação do número da iterações, em que a zeroésima iteração corresponde à própria AVA-974, enquanto que a terceira iteração corresponde à Koch AVA-974 proposta, que mostra que com a terceira iteração se obtém a melhor resposta, pois neste caso há o menor LIF, como ilustra a Figura 77.

Figura 77- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro número da iteração Koch AVA.

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao ganho, como já citado anteriormente, antenas para aplicação UWB devem possuir ganho aproximadamente constante (DE OLIVEIRA *et al.* 2015). Sendo assim, optou-se mais uma vez pela terceira ordem do fractal, pois nesse caso se obtém o melhor ganho em 7 GHz, assim como o mais constante entre 7 e 11 GHz, como ilustra a Figura 78.

Figura 78- Resultado do ganho da Koch AVA em função da variação do número de iterações.

Fonte: Autoria própria.

Em relação ao nível dos lóbulos laterais, é possível observar que quando o parâmetro número da iteração é igual a três, ou seja, terceira iteração, se obtém o menor SLL entre 5 e 8 GHz, destacando a 7 GHz, como ilustra a Figura 79.

Figura 79- Resultado do SLL da Koch AVA em função da variação do número da iteração.

Fonte: Autoria própria.

Desta forma, optou-se por escolher a terceira iteração do SFI da curva de Koch para se obter a geometria dos FSEs, pois, para esse caso, observa-se o melhor conjunto de características obtidas com base nas curvas de perda por retorno, ganho e SLL.

5.2 Resultados de operação da Koch AVA-974

Para iniciar a análise de operação da FEAVA-974, observa-se o impacto dos entalhes laterais no S_{11} . A Figura 80 apresenta a perda por retorno da Koch AVA (FSEAVA) em comparação com a AVA Referência.

Figura 80- Perda por retorno simulada e medida da AVA Referência e da Koch AVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Considerando a curva do parâmetro S_{11} , observa-se que a aplicação da técnica FSE reduziu o LIF em 210 MHz e proporcionou o melhor desempenho entre 5 e 11 GHz. A Figura 81 apresenta o diagrama de radiação das antenas AVA-974 e Koch AVA-974 a 7 GHz.

Figura 81- Diagrama de radiação da AVA-974 (esquerda) e da FSEAVA-974 (esquerda) com componente co-pol. medido e simulado e a componente cross-pol. apenas simulada. Medidas e simulações a 7 GHz.

Fonte: Autoria própria.

A Koch AVA-974 apresenta um ganho de 8,5 dB do lóbulo principal a 7 GHz, enquanto a AVA-974 possui 6,6 dB, o que constata o aumento do ganho. Em relação ao SLL, observa-se que o nível de -7,4 dB da AVA-974, a 7 GHz, passou para -14,2 dB, o que evidencia mais uma boa performance da Koch AVA em relação à AVA Referência. Com relação ao estrabismo, não houve correção significativa a 7 GHz, mas ocorre a frequências mais altas.

Em relação à componente z do centro de fase (CF), aqui simplificado apenas como CF, a Koch AVA promove a menor redução em comparação as demais técnicas.

Tabela 15- Tabela comparativa a 7GHz entre as antenas AVA, RSEAVA, TSEAVA, ESEAVA e FSEAVA.

	AVA	RSEAVA	TSEAVA	ESEAVA	FSEAVA
Ganho em dB	6.6	6.8	6.3	7.9	8.5
SLL em dB	-7.4	-6.7	-5.2	-11.1	-14.2
Estrabismo em graus	-5	0	-5	0	5
PC em mm	47.9	44.2	50.7	46.6	49.2
Alteração PC em mm	0	3.7	2.8	1.4	1.3
LIF em GHz	5.27	5.42	5.24	5.00	5.11

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 15 apresenta um quadro comparativo a 7 GHz entre as antenas AVA-974, RSEAVA-974, TSEAVA-974, Palm Tree AVA-974 e Koch AVA-974, em relação ao ganho,

ao SLL, ao estrabismo, ao CF e ao LIF. Os resultados apontam que tanto a Palm Tree AVA-974, quanto a Koch AVA-974 são as únicas AVAs que apresentam melhores características de diretividade que a AVA-974.

Em relação às características físicas, observa-se que não houve alteração nas dimensões e peso da antena, com a aplicação da técnica FSE.

Voltando a atenção à questão das características de diretividade, é possível observar que as correntes de superfícies sofreram alterações em função da aplicação da técnica FSE, o que promoveu as alterações das características de diretividade da Koch AVA-974.

A Figura 82 ilustra o diagrama de correntes de superfície a 7GHz nas metalizações da Koch AVA-974. Assim como na AVA-974, a alimentação se dá através do conector SMA de 50 Ω , Figura 82 ponto (a), o sinal é transmitido no modo quase-TEM ao longo da MTL, Figura 82 ponto (b), sendo que pode ser observado que praticamente não há correntes de superfície fora destas regiões durante a alimentação.

Figura 82- Diagrama Absoluto de Correntes de Superfície, a 7 GHz, da Koch AVA-974 com detalhe da alimentação (ponto a), da MTL (ponto b), da transição da MTL para o radiador exponencial (ponto c), da região de radiação do lóbulo principal (ponto d), da região da borda lateral (ponto e) e dos FSEs (ponto e).

Fonte: Autoria própria.

Na sequência, o sinal inicia a transição da MTL para o radiador exponencial, Figura 82 ponto (c), como não há condições de manutenção do confinamento dos campos elétricos, há o escape de linhas de campo para as regiões mais externas do radiador de abertura exponencial, Figura 82 ponto (d).

Como mostrado anteriormente na AVA-974, as longas bordas laterais propiciam condições ideais para o surgimento de correntes de superfície, como ilustra a Figura 23(e), semelhantes a

aquelas que ocorrem nas bordas do radiador exponencial, o que proporciona a propagação lateral e os elevados SLL.

É possível observar que nas bordas metálicas internas dos FSEs, Figura 82 ponto (f), surgem correntes superficiais, que drenam as correntes das bordas laterais, o que mitiga o SLL e atraem essas correntes para o entorno dos FSEs, que por sua vez operam como pequenos radiadores auxiliares (antenas auxiliares).

Este comportamento de antenas auxiliares promove o aumento do ganho do lóbulo principal, por canalizar a radiação em seu benefício.

Em relação a esse fenômeno, deve-se salientar que sob o aspecto de eficiência energética, esses FSEs, a exemplo dos ESEs, não confinam tais correntes, como fazem as técnicas SE convencionais, canalizam a energia do sinal toda para o lóbulo principal e, conseqüentemente promovem seu aumento, o que, em termos de eficiência energética, supera as demais técnicas SE convencionais e reforça o conceito de cavidades radiantes.

Figura 83- Diagrama de distribuição de correntes de superfície da Palm Tree AVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas a 6GHz. Detalhe das correntes no radiador principal (ponto a), nas bordas laterais (ponto b) e nas cavidades radiantes (ponto c).

Fonte: Autoria própria.

A Figura 83 ponto (a) mostra que as correntes nas extremidades do radiador exponencial possuem diferença de fase, o que cria a polarização necessária para o surgimento dos campos elétricos e, conseqüentemente, a radiação posterior. Entretanto, é possível observar que, ao contrário das bordas laterais da AVA-974, Figura 24 ponto (b), que dão condições para a

manutenção destas correntes superficiais polarizadas e assim promovem a radiação lateral, na Koch AVA-974 as cavidades radiantes antes, aqui chamadas de FSEs, estão semelhantemente polarizadas como o radiador principal, Figura 83 pontos (b) e (c), canalizando os campos elétricos para a manutenção e aumento do lóbulo principal e reduzindo assim o SLL.

No que diz respeito à eficiência energética, há o aproveitamento destas correntes laterais para aumentar as correntes do radiador principal, o que permite o aumento do lóbulo principal.

A Figura 84 apresenta a comparação da distribuição absoluta de campos elétricos entre a AVA (à esquerda) e a Koch AVA (à direita). É possível observar a redução do SLL promovido pelos FSEs, o que evidencia uma melhora considerável na diretividade.

Figura 84- Distribuição absoluta de campos elétricos no plano xy a 7GHz para (a) AVA-974 e (b) FSEAVA-974.

Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que, assim como a técnica ESE, a nova técnica de cavidades radiantes FSE, aplicadas as bordas da AVA na forma de abertura fractais, proporcionou cavidades funcionando como antenas auxiliares e não como ressonadores (a exemplo das soluções de cavidades ressonantes apresentadas na literatura), canalizando a energia dos lóbulos laterais para o lóbulo principal. Assim, essa solução melhorar simultaneamente, de forma inédita, diversas características da AVA: menores SLL e maior ganho, melhorias essas consideradas mutuamente excludentes na literatura (HAO, 2015).

CAPÍTULO 6

- CONCLUSÕES E PROPOSTAS FUTURAS

Este trabalho discutiu as limitações de diretividade de antenas Vivaldi e após estudos de seu funcionamento, foi possível observar as causas de tais limitações. Uma ampla revisão bibliográfica, sobre trabalhos recentemente publicados na área de antenas e propagação, fundamentou o estudo comparativo entre as diversas técnicas para melhorar a sua diretividade.

Este estudo permitiu concluir que a técnica mais promissora é a de cavidades de borda (*Slot Edge*) pois, ao contrário das demais técnicas de melhoria de diretividade, as cavidades de borda não comprometem as dimensões e peso da antena Vivaldi, assim como não modificam a complexidade do processo de construção.

Uma vez escolhida a técnica, foi executado um estudo da aplicação das duas mais comuns variações da técnica de cavidades de borda, a RSE e a TSE, de maneira a compreender seu mecanismo de operação. É possível concluir que tais cavidades confinam as correntes superficiais e, conseqüentemente, os campos elétricos, impedindo a radiação de lóbulos laterais, o que reduz consideravelmente o SLL. Entretanto, elas não melhoram o ganho do lóbulo principal significativamente, pois parte da energia do sinal de entrada se perde na forma de campos confinados nestas que se comportam como cavidades ressonantes.

O estudo da técnica TSE mostrou que a orientação das correntes de superfície lembravam tenuemente as correntes de superfície ao longo das bordas do radiador de abertura exponencial. Tal observação inspirou o desenvolvimento de cavidades exponenciais com a mesma forma do

radiador principal, que ao ser aplicada na antena Vivaldi deu origem a uma nova antena ESE, chamada de Palm Tree Vivaldi.

A nova antena proposta neste trabalho apresenta um ganho maior que a antena referência através da aplicação das técnicas ESE. O estudo das correntes de superfície e da distribuição de campos elétricos no entorno da antena comprovam que a nova técnica não se comporta como cavidade ressonante, como nas técnicas RSE e TSE, mas sim como cavidade radiante.

Ao realizar uma exploração sistemática da aplicação da técnica ESE, observou-se que a antena continha uma geometria quase-fractal de primeira ordem, ao replicar nas bordas laterais a forma exponencial do irradiador principal. Isto inspirou o estudo da aplicação dos fractais de mais altas ordens em antenas Vivaldi, uma área completamente inexplorada na literatura.

A partir do levantamento bibliográfico, a respeito da aplicação de geometrias fractais em antenas, concluiu-se que o fractal da curva de Koch era o mais apropriado para a aplicação de antenas. Desta forma, foi realizado um estudo sobre a aplicação das três primeiras iterações do SIF da curva de Koch como forma de concepção dos FSE aplicados a AVA referência, o que levou à escolha da terceira iteração, o que deu origem aos FSEs utilizados para criar a nova antena Koch AVA-974.

Esta antena também apresenta um ganho maior que a antena referência, aumento este constatado apenas com a aplicação da técnica FSE, o que evidencia o funcionamento como cavidade radiante, em contraste à operação de cavidade ressonante das técnicas SE anteriores a essa Tese.

O fato de que tanto a técnica ESE quanto a FSE se comportarem como cavidade radiante faz dessa técnica inédita na literatura, dando origem a uma nova categoria de antena Vivaldi totalmente diretiva, pois ao contrário das demais técnicas de cavidade ressonadora, a técnica de cavidade radiante, seja na forma exponencial (ESE) ou na forma fractal (FSE), promove a recuperação da energia dos lóbulos laterais para o aumento do lóbulo principal.

O SLL da Palm Tree AVA caiu em contraste ao SLL da antena referência. Já no caso da Koch AVA caiu também em contraste a antena referência. Esta redução em ambas as formas de cavidades indica que a nova técnica de cavidade radiante, além de aumentar o ganho do lóbulo principal, mitiga consideravelmente o SLL, o que contraria a tradicional forma de pensar, de que não é possível aumentar o ganho e reduzir o SLL simultaneamente com a mesma técnica aplicada a AV.

Outro aspecto positivo da aplicação desta técnica de cavidade radiante foi a correção total do estrabismo e a diminuição do LIF em ambas as formas da cavidade radiante em comparação a Vivaldi referência.

Em resumo, a aplicação da nova técnica proposta, de cavidades riantes, proporcionou que as duas novas antenas, a Palm Tree Vivaldi e a Koch Vivaldi sejam classificadas como antenas totalmente diretivas, dando origem a uma nova linha de pesquisa acadêmica e possibilidades de desdobramentos futuros.

6.1 Propostas Futuras

Como desdobramentos deste trabalho, é possível propor novas formas de cavidades riantes e ressonantes de maneira a controlar adequadamente as correntes de superfície, melhorando assim a formação do lóbulo principal.

Outras oportunidades de investigação abertas por esta pesquisa são:

- Estudo da aplicação tanto da antena Palm Tree Vivaldi como da antena Koch Vivaldi na formação de arranjos;
- Desenvolvimento de antenas Vivaldi com cavidades riantes com circuitos ativos;
- Estudo da aplicação de cavidades riantes em outros tipos de antenas.

Com todo esse esforço, espera-se proporcionar a comunidade de antenas e propagação novas possibilidades de pesquisas e mesmo melhorar as aplicações que já usam as antenas do tipo Vivaldi como elemento radiador.

Na sequência são apresentadas as referências bibliográficas que lastreiam esta Tese, bem como os apêndices e anexos.

REFERÊNCIAS

- AVDUSHIN, A. S. *et al.* Vivaldi antenna with printed lens in aperture. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 56, n. 2, p. 369-371, 2014.
- BAHL, I. J., TRIVEDI, D. K. A Designer's Guide To Microstrip Line. **Microwaves**. n. 16, p.174-182. 1977.
- BALIARDA, C. P.; ROMEU, J.; CARDAMA, A. The Koch monopole: A small fractal antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation** , v. 48, n. 11, p. 1773-1781, 2000.
- BALANIS, C. A. **Modern Antenna Handbook**. Chichester: Ed. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. ISBN 978-0-470-03634-1.
- BAI, J., *et. al.* Modified Compact Antipodal Vivaldi Antenna for 4-50 GHz UWB Application. **IEEE Trans. Microw. Theo. and Tech**, v. 59, n. 4, Abr. 2011.
- BARTSCH, M. *et al.* Solution of Maxwell's equations. **Computer Physics Communications**. v. 72, p. 22-39, 1992.

BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo e Cálculo de Campos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1996.

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

CAO, Y. *et al.* A compact BAVA design with corrugated edge. In: **Antennas and Propagation (APCAP), 2014 3rd Asia-Pacific Conference on. IEEE**, 2014. p. 259-262.

CARDOSO, J. R. **Engenharia Eletromagnética**. São Paulo: Elsevier Editora Ltda, 2011. ISBN 978-85-352-3525-8.

CHAMAANI, S., *et. al.* Improvement of time and frequency domain performance of antipodal Vivaldi antenna using multi-objective particle swarm optimization. **IEEE Trans. Atenn. Propag.**, v. 59, n. 5, p. 1738-1742, Mai. 2011

CHANGFEI, Z. *et al.* A miniaturized wideband Vivaldi antenna and phased array. In: **Antennas and Propagation (APCAP), 2014 3rd Asia-Pacific Conference on. IEEE**, 2014. p. 569-572.

CLEMENS, M.; WEILAND, T. Discrete electromagnetism with finite integration technique. **Progress In Electromagnetics Research, PIER**, v. 32, p. 65-87, 2001.

COHEN, N. Fractal antenna applications in wireless telecommunications. In: **Electronics Industries Forum of New England**, 1997. Professional Program Proceedings. IEEE, 1997. p. 43-49.

CST - Computer Simulation Technology (CST) Microwave Studio (MWS) v.2011, **CST of America, Inc.**, Wellesley MA. 2011.

DE OLIVEIRA, A. M. *et. al.* A CMOS UWB Pulse Beamforming Transmitter with Vivaldi Array Antenna for Vital Signals Monitoring Applications. In: **2012 IEEE Third Latin American Symposium on Circuits and Systems (LASCAS)**, Conference Publications. Playa de Carmen: 2012a. P. 1- 4. doi: 10.1109/LASCAS.2012.6180337.

DE OLIVEIRA, A. M. et. al. A CMOS UWB Timed-Array Transmitter with a Vivaldi Antenna Array for I-Radar Applications. In: **15º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e**

Optoeletrônica (SBMO) e 10º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo (MOMAG 2012), Publicação do Simpósio. João Pessoa: 2012b.

DE OLIVEIRA, A. M. et. al. A Palm Tree Antipodal Vivaldi Antenna with Exponential Slot Edge for Improved Radiation Pattern. **IEEE Anten. Wirl. Propag. Lett.** v. 14, p. 1334-1337, Fev, 2015.

DE OLIVEIRA, A. M. **Sistema transmissor CMOS de Radar UWB por varredura eletrônica com arranjo de antenas Vivaldi**. 2012. 171 f. Dissertação (M.Sc.) - Escola Politécnica da Universidade de são Paulo, São Paulo, 2012c.

FEI, P., et. al. A Miniaturized Antipodal Vivaldi Antenna With Improved Radiation Characteristics. **IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.** v. 10, 127-130. Mar. 2011.

FORTUNY, C. B. *et al.* High-gain triple-band reconfigurable Vivaldi antenna. In: **Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC), 2014 IEEE-APS Topical Conference on. IEEE**, 2014. p. 199-201.

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

GIBSON, P.J. The Vivaldi Arial. In: **IEEE 9th European Microwave Conference, Conference Publication**. p. 101-105. 1979.

GRIFFUS PCB Ind. Com. Ltda. RES: **Dúvidas técnicas//ALEXANDRE-USP**. [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <amanicoba@gmail.com> 28 jul. 2015.

HALLIDAY, D. e RESNICK, R. **Física 3**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1980. ISBN 85-216-0078-X.

HAMILTON, W. R. **Elements of quaternions**. New York: Chelsea Publishing Company, 1969.

HAO, Y. *et al.* **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters - Decision on Manuscript ID AWPL-05-15-0938** [Mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <a.m.deoliveira@ieee.org> 1 set. 2015.

HAYT, W. H. Jr. **Engineering Electromagnetics**, 3 Edition. McGraw-Hill, inc., 1974. ISBN 0-07-027390-1.

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.

HERZI, R., ZAIRI, H.; GHARSALLAH, A. Antipodal Vivaldi antenna array with reduced mutual coupling for UWB radar applications. In: **Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)**, 2014 15th International Conference on. IEEE, 2014. p. 1024-1027.

HOOD, A. Z., et. al. A Small Antipodal Vivaldi Antenna for Ultrawide-Band **Applications**. **IEEE Anten. and Wir. Propag. Letters**, v. 7, p. 656-660. 2008.

HSHIEH, Y. *et al.* Improvement of far field patterns of antipodal Vivaldi antennas with step impedance resonator. In: **Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2013 IEEE**. IEEE, 2013. p. 884-885.

ISMAHAYATI, A. *et al.* Design and analysis of a multiband Koch fractal monopole antenna. In: **IEEE RF and Microwave Conference (RFM)**, 2011 IEEE International. 2011. p. 58-62.

JIA, Y. et. al. Printed UWB End-Fire Vivaldi Antenna With Low RCS. **Prog. Electromag. Resea.** v. 37, p. 11-20. Jan. 2013.

JUAN, L., et. al. A Modified Balanced Antipodal Vivaldi Antenna with Improved Radiation Characteristics. **Microw. Optic. Techn. Lett.** v. 55, n. 6, p. 1321-1325, Jun. 2013.

KARAHAN, M., SAHINKAYA, D. S. A. A reduced size antipodal Vivaldi antenna design for wideband applications. In: **Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2014 IEEE**. IEEE, 2014. p. 1588-1589.

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

KEDDAM, M.; TAKENOUTI, H. Impedance of fractal interfaces: new data on the Von Koch model. **Electrochimica Acta**, v. 33, n. 3, p. 445-448, 1988.

KIM, Kyu-Bo; LEE, Seung-Hwan; CHOI, Hak-Keun. The characteristics of a wideband ESPAR antenna using Koch fractal shaped elements. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 57, n. 9, p. 2108-2112, 2015.

KRISHNA, D. D. *et al.* CPW-fed Koch fractal slot antenna for WLAN/WiMAX applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 7, p. 389-392, 2008.

KUROKAWA, K. Power waves and the scattering matrix. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 13, n. 2, p. 194-202, 1965.

LANGLEY, J. D. S., *et. al.* Balanced antipodal Vivaldi antenna for wide bandwidth phased arrays. **IEE Proc. Microw. Anten. Propag.**, v. 143, n.2, p. 97-102, Abr. 1996.

LI, Daotie; MAO, Jun-fa. A Koch-like sided fractal bow-tie dipole antenna. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 60, n. 5, p. 2242-2251, 2012.

MA, K. *et al.* A printed vivaldi antenna with improved radiation patterns by using two pairs of eye-shaped slots for UWB applications. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 148, p. 63-71, 2014.

MAXWELL, J. C. **Treatise on Electricity and Magnetism**. v. II Oxford: Clarendon Press, 1873.

MOOSAZADEH, M., KHARKOVSKY, S. Development of the antipodal Vivaldi antenna for detection of cracks inside concrete members. **Microwave and Optical Technology Letters**, v. 57, n. 7, p. 1573-1578, 2015.

MUNTEANU, I., TIMM, M., WEILAND, T. It's About Time. **IEEE Microwave Magazine**, , v. 11, n. 2, p. 60-69, 2010.

NATARAJAN, R. *et. al.* A Compact Antipodal Vivaldi Antenna for UWB Applications. **IEEE Anten. Wirl. Propag. Lett.** v. 99, p. 5-8, Fev, 2015.

NYIKOS, L.; PAJKOSSY, T. Fractal dimension and fractional power frequency-dependent impedance of blocking electrodes. **Electrochimica Acta**, v. 30, n. 11, p. 1533-1540, 1985.

PMBOK, GUIA. Um guia do conjunto de conhecimentos em gerenciamento de projetos. 3ª Edição, 2004.

PUENTE, C. *et al.* Small but long Koch fractal monopole. **Electronics letters**, v. 34, n. 1, p. 9-10, 1998.

RAMADAN, A. H. *et al.* A reconfigurable U-Koch microstrip antenna for wireless applications. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 93, p. 355-367, 2009.

REDDY, V. V.; SARMA, N. V. S. N. Triband circularly polarized Koch fractal boundary microstrip antenna. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 13, p. 1057-1060, 2014.

REID, E. W., *et. al.* A 324-element Vivaldi antenna arrays for radio astronomy instrumentation. **IEEE Trans. Instrum. Meas.** v. 61, n. 1, p. 241-250. Jan. 2012.

RIZK, J. B.; REBEIZ, G. M. Millimeter-wave Fermi tapered slot antennas on micromachined silicon substrates., **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 50, n. 3, p. 379-383, 2002.

ROGERS. Rogers Corporation. Disponível em: <https://www.rogerscorp.com/index.aspx>. Acesso em: 27/07/2015.

SILVA, C. C. A escolha de uma ferramenta matemática para física: O debate entre os quatérnions e a álgebra vetorial de Gibbs e Heavside. In: **Filosofia e história da ciência no Cone Sul: 3º Encontro**. 2004. P. 115-126. ISBN 85-904198-1-9.

SILVESTER, P. and CHARI, M. VK. Finite Element Solution of Saturable Magnetic Field Problems. **IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems**. v. PAS-89, n. 7. p. 1642-1651. 1970.

SINGH, Ashutosh K. *et al.* Performance analysis of first iteration koch curve fractal log periodic antenna of varying flare angles. **Central European Journal of Engineering**, v. 3, n. 1, p. 51-57, 2013.

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

SHIN, J.; SCHAUBERT, D. H. A Parameter Study of Stripline-Fed Vivaldi Notch-Antenna Arrays, **IEEE Trans. On Antennas and Propagation**, v. 47, n. 5, 1999.

SUGAWARA, S. *et al.* A mm-wave tapered slot antenna with improved radiation pattern. In: **Microwave Symposium Digest, 1997., IEEE MTT-S International. IEEE**, 1997. p. 959-962.

SUNDARAM, A.; MADDELA, M.; RAMADOSS, R. Koch-fractal folded-slot antenna characteristics. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 6, p. 219-222, 2007.

TARINGOU, F., *et. al.* Broadband CPW Feed for Millimeter-Wave SIW-Based Antipodal Linearly Tapered Slot Antennas. **IEEE Trans. Antenn. Propag.** V. 61, n. 4, p. 1756-1762. Abr. 2013.

TENI, G., *et. al.* Research on a Novel Miniaturized Antipodal Vivaldi Antenna With Improved Radiation. **IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.** v. 12, p. 417-420. Abr. 2013.

VINOY, K. J. **Fractal shaped antenna elements for wide-and multi-band wireless applications**. 2002. Tese de Doutorado. The Pennsylvania State University.

VON KOCH, H. Sur une courbe continue sans tangente, obtenue par une construction géométrique élémentaire. **Arkiv för Matematik**, v. 1, p. 681-704, 1904.

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

WANG, J. C. Impedance of a fractal electrolyte—electrode interface. **Electrochimica acta**, v. 33, n. 5, p. 707-711, 1988.

WANG, Y. W., *et. al.* Directivity Improvement of Vivaldi Antenna Using Double-Slot Structure. **IEEE Anten. Wirel. Propag. Lett.**, v. 12, p. 1380-1383. Out. 2013.

WEILAND, T. Time domain electromagnetic field computation with finite difference methods. **International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields**. v. 9, n. 4, p. 295-319, 1996. Doi: 10.1002/(SICI)1099-1204(199607)9:4<295::AID-JNM240>3.0.CO;2-8.

WEILAND, T. TIMM, M. e MUNTEANU, I. A Practical Guide to 3-D Simulation, **IEEE Microwave Magazine**, v. 6, n. 9, p. 62-75, 2008.

WERNER, D. H.; GANGULY, S. An overview of fractal antenna engineering research. **IEEE Antennas and Propagation Magazine**, v. 45, n. 1, p. 38-57, 2003.

WERNER, D. H.; WERNER, P. L.; CHURCH, K. H. Genetically engineered multiband fractal antennas. **Electronics Letters**, v. 37, n. 19, p. 1150-1151, 2001.

WHEELER, H. A. Transmission-Line Properties of a Strip on a Dielectric Sheet on a Plane, **IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques**, v. MTT-25, n. 8, p.631-647. 1977.

WU, Chun-Te *et al.* Bandwidth Enhancement of Microstrip Fed Koch Snowflake Fractal Slot Antenna. In: **Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)**, 2015. IEEE, 2015. p. 212-214.

XU, H.-Y. *et al.* Ultra-wideband Koch fractal antenna with low backscattering cross section. **Journal of Electromagnetic Waves and Applications**, v. 24, n. 17-18, p. 2615-2623, 2010.

YANG, Y., WANG, Y.; FATHY, A. E. Design Of Compact Vivaldi Antenna Arrays For UWB See Through Wall Applications. **Progress in Electromagnetics Research, PIER** n. 82, p.401-418, 2008.

YU, S. *et al.* A novel stealth Vivaldi antenna with low radar cross section. **International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering**, v. 25, n. 3, p. 255-261, 2015.

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

ZHUGE, X. e YAROVY, A. G. A sparse aperture MIMO-SAR-based UWB imaging system for concealed weapon detection. **IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.**, v. 49, n. 1, p. 509-518. Jan. 2011.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Relação de artigos produzidos, publicados ou submetidos área de Microondas.	126
APÊNDICE B - Relação de artigos produzidos, publicados ou submetidos área de educação em engenharia.	128
APÊNDICE C - Artigo da Palm Tree AVA publicado na IEEE Antennas Wireless Propag. Letters (página 1).	130
APÊNDICE D - Artigo da Koch AVA submetido na IEEE Antennas Wireless Propag. Letters (página 1).	131
APÊNDICE E - Artigo publicado no Journal of Microwaves, Optoelec. And Eletromag. App. (página 1).	132
APÊNDICE F – Artigo publicado no Journal of Recent Patents on Engineering (página 1).	133
APÊNDICE G - Artigo publicado nos anais do congresso IEEE IMOC 2013 (página 1).	134
APÊNDICE H - Artigo publicado nos anais do congresso CONCISTEC 2013 (página 1)... ..	135
APÊNDICE I - Artigo publicado nos anais do XVI SIGE (página 1).	136
APÊNDICE J - Artigo publicado na revista SINERGIA (página 1).	137
APÊNDICE K – Artigo publicado no Intern. Journal of Comp. Archit. Education (página 1).	138
APÊNDICE L - Artigo publicado nos anais do COBENGE 2013 (página 1).	139
APÊNDICE M - Artigo publicado nos anais do congresso CONCISTEC 2014 (página 1). ..	140
APÊNDICE N - Artigo publicado nos anais do COBENGE 2015 (página 1).	141
APÊNDICE O - Detalhes sobre o processo de fabricação das antenas.	142

APÊNDICE A - Relação de artigos produzidos, publicados ou submetidos área de Microondas.

- 1- **A Palm Tree Antipodal Vivaldi Antenna with Exponential Slot Edge for Improved Radiation Pattern** (4 páginas). Publicado no IEEE Antennas Wireless and Propagation Letters (**Qualis A1**), Vol. 99, Fevereiro de 2015. DOI: 10.1109/LAWP.2015.2404875. O artigo apresenta uma nova AV realmente diretiva. A técnica consiste em inserir cavidades de abertura exponencial nas bordas laterais que ao invés de confinar os campos elétricos que promovem o aumento do SLL, canaliza tais campos para o lóbulo principal, mitigando o SLL, corrigindo o estrabismo e dobrando o ganho do lóbulo principal a 6GHz.
- 2- **An Antipodal Vivaldi Antenna Design with Koch Fractal Slot Edge** (4 páginas). Submetido no IEEE Antennas Wireless and Propagation Letters (**Qualis A1**) em 20 de maio de 2015. O artigo delineia um conceito inovador de AV absolutamente diretiva, usando o fractal da curva de Koch para criar uma nova cavidade lateral e assim reforçar a nova técnica de cavidade radiante.
- 3- **A CMOS UWB Transmitter with Vivaldi Array for Ultra-fast Beam steering Microwave Radar** (13 páginas). Publicado no Journal of Microwaves, Optoelectronics and Eletromagnetc Applications (**Qualis B1**), Vol. 12, No. 2, Dezembro de 2013. DOI: 10.1590/S2179-10742013000200014. Este artigo foi à versão estendida de um MOMAG 2012 Best Paper e propões o uso de um arranjo de duas AV em sistema Timed Array de dois canais.
- 4- **A Complete Ultra Wide Band Transmitter System for Impulse Radar** (7 páginas). Publicado no Journal of Recent Patents on Engineering (**Qualis B2**), Vol. 7, No. 2, Abril de 2013. DOI: 10.2174/1872212111307020006. Este artigo apresenta um Sistema transmissor de radar equipado com uma AV.
- 5- **A Complete CMOS UWB Timed-Array Transmitter with a 3D Vivaldi Antenna Array for Electronic High-resolution Beam Spatial Scanning** (6 páginas). Publicado nos anais e apresentado no SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference, IMOC 2013, realizado na cidade do Rio de Janeiro, Agosto, 2013. DOI: 10.1109/IMOC.2013.6646408. O artigo apresenta um sistema transmissor 3D para varredura espacial de alta resolução pelo uso de um arranjo formado por quatro canais e cujo elemento radiador de cada canal é uma AV.
- 6- **Benefícios Da Escolha Do Pulso Eletromagnético Gaussiano Derivado Em Quinta Ordem Para Aplicações De Radar Ultra-Wideband** (12 páginas). Publicado nos

anais e apresentado no 4º Congresso Científico da Semana Tecnológica do ISFP na cidade de Bragança Paulista, Outubro, 2013. DOI: 10.13140/2.1.3051.5201. O artigo apresenta um estudo dos principais tipos de pulsos eletromagnéticos UWB.

- 7- **A CMOS 0.18 μ m 4bits PROGRAMMABLE DELAY CONTROL FOR UWB TIMED ARRAY BEAMFORMING RADAR APPLICATION** (6 Páginas). Publicado nos anais e apresentado no XVI Symposium on operational applications in the defense areas (SIGE) na cidade de São José dos Campos. Outubro, 2014. DOI: 10.13140/2.1.5023.7442. O artigo apresenta um Controlador de Atrasos Programável de 4 bits na tecnologia CMOS para uso em sistema de Radar Timed Array.

APÊNDICE B - Relação de artigos produzidos, publicados ou submetidos área de educação em engenharia.

- 1- **Unidade Lógico-Aritmética Com Arquitetura Risc De 8 Bits Projetada Na Tecnologia Cmos 350nm Para Aplicação Na Educação Na Engenharia E Na Ciências Da Computação** (11 páginas). Publicado na revista Sinergia (**Qualis B3**), São Paulo, Vol. 14, N. 1, p. 28-38, abril, 2013. O artigo apresenta uma metodologia de ensino de arquitetura de computadores para cursos de engenharia elétrica e ciências da computação pautado no projeto de uma ULA de 8 bit em tecnologia VSLI CMOS Full custom.
- 2- **A Teaching Methodology Based On ALU 8 bit RISC Design VLSI Full Custom for Classes on Computer Architecture and Digital Electronic** (4 Páginas). Publicado no International Journal of Computer Architecture Education, Vol. 2, N. 1, p. 25-28, dezembro, 2013. O artigo estende o estudo de arquiteturas de computadores através da proposta de mapas mentais o que proporciona aos alunos criarem um modelo de funcionamento abstrato de uma ULA e a partir deste modelo possa compreender as demais arquiteturas da literatura.
- 3- **Ultra-Low-Cost Power Uwb Pulse Study Environment For Electrical Engineering Course Using Spreadsheets By Cloud Computing** (12 páginas). Publicado nos anais do XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, na cidade de Gramado, Setembro, 2013. DOI: 10.13140/2.1.5148.6724. O artigo apresenta uma nova técnica de estudo das características temporais, energéticas e de potência de pulsos eletromagnéticos ultracurtos para aplicações UWB pelo uso de planilha eletrônica.
- 4- **Algoritmos E Técnicas De Programação Com Uma Abordagem De Aprendizagem Baseada Em Problemas Para Cursos De Engenharia** (8 páginas). Publicado nos anais do 5º Congresso Científico da Semana Tecnológica – IFSP – CONCISTEC 2014, Bragança Paulista, Outubro, 2014. DOI: 10.13140/2.1.3578.1120. O artigo apresentada a aplicação da metodologia educação baseada em problemas (PBL) nas aulas da disciplina de Algoritmos e Técnicas de Programação dos cursos de Engenharia da Unimonte de maneira a mitigar a evasão e estimular a participação dos alunos através de um ambiente de abstração de problemas reais da engenharia que são gradualmente solucionados com o uso de modelos matemáticos computacionais.
- 5- **Metodologia De Ensino De Campo Elétrico Por Uma Abordagem Experimental E Simulada Com Superfície Eletrolítica E Scilab Com Pbl** (10 páginas). Aceito para

apresentação oral e publicação nos anais da conferência do XLIII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia – COBENGE 2015, Santo André, setembro, 2015. O artigo apresenta uma nova metodologia de estudo experimental de campos elétricos utilizando uma superfície de material eletrolítico e de espessura infinitesimal em relação a sua largura e comprimento e contraste da utilização de uma cuba eletrolítica. Aliado ao experimento, a metodologia propõe a comparação dos valores experimentais com os resultados de simulação pelo uso do modelo matemático da superfície de duas dimensões através dos métodos de iteração e diferenças finitas em ambiente Scilab. Toda a aplicação da metodologia em questão foi testada em uma população de 131 alunos de duas instituições de ensino superior, dos cursos de engenharia nas disciplinas de Algoritmos e Técnicas de Programação e Eletromagnetismo com êxito, o que evidencia a interface disciplinar desta metodologia garantindo a interdisciplinaridade entre Cálculo Diferencial e Integral, Física Eletricidade, Eletromagnetismo e Algoritmos, em pontos comuns suscitados pela metodologia.

A Palm Tree Antipodal Vivaldi Antenna with Exponential Slot Edge for Improved Radiation Pattern

Alexandre M. De Oliveira, *Student Member, IEEE*, Marcelo B. Perotoni, Sergio T. Kofuji, and João F. Justo

Abstract— This letter presents an Exponential Slot Edge Antipodal Vivaldi Antenna (ESE-AVA), with improved radiative features as compared to the conventional Antipodal Vivaldi Antenna (AVA) design. It extends the low-end bandwidth limitation, mitigates the side and back lobe levels, corrects squint effect, and increases its main lobe gain. In order to confirm those features, a comparative study among the ESE-AVA, the low directivity conventional AVA and two popular modifications, regular slot edge (RSE) and the tapered slot edge (TSE) AVA is performed. A comparison between AVA and the proposed ESE-AVA at 6 GHz shows an improved gain of 8.3 dB, -15.5 dB of Side Lobe Level (SLL), and 0 degrees of main lobe squint (MLS), in contrast with 5 dB of gain, -5 dB of SLL, and 5 degrees of MLS in the conventional AVA. By comparing the ESE-AVA with RSE-AVA and TSE-AVA, it was observed that its notches in exponential shape, similar to open the main radiator, besides mitigating the SLL also directs the E-fields distributions towards the main lobe. It reflects into a main lobe gain improvement.

Index Terms—ultra-wideband, Antipodal Vivaldi Antenna, Directivity Improvement.

I. INTRODUCTION

THE Vivaldi antenna was originally designed more than 30 years ago in a coplanar shape [1], and was later developed in an antipodal shape [2]. It is an ultra-wideband device which has drawn great attention from researchers, and has been considered for applications in essentially all microwave systems, such as in imaging medicine [3], radar systems [4, 5], astronomy [6], vehicular communication [7], and through-wall localization [8].

The AVA is suitable for applications in compact systems, either in single form or in an array, due to its lightweight and small dimensions. It is a directive wideband antenna with high efficiency and gain, which can be integrated directly into a circuit board [8-11]. Despite such features, the Vivaldi antenna still has its shortcomings. The original design, especially its side edges, increases the SLL coming from edge currents, which compromises antenna directivity, in addition

to a squint on its radiation pattern, which compromises the directional control of the main lobe (ML). Over the last few years, several antenna designs have been proposed, in order to mitigate this problem, using directors in many forms, such as dielectrics [3, 12, 13] and metamaterials [14], which compromises its main constructive qualities, increasing the final antenna dimensions and making its design complex.

In order to reduce the SLL of an AVA, a tapered slot edge (TSE) has been recently used [12, 15, 16], which also improves directivity, without increasing the volume of the antenna, but no additional gain for the antenna was reported. The TSE design inhibited edge currents, which would promote the emergence of side lobes, acting as a resonator. Therefore, by removing edge currents, there is a relevant attenuation on the SLL of the AVA [7, 12, 15-17].

Here, it is presented a new design for the Vivaldi Antenna, featuring a slot edge with exponential opening similar to the opening of the main radiator, called Exponential Slot Edge (ESE). Comparing with a conventional AVA, the new antenna simultaneously reduces the SLL, corrects squint effect and increases the gain of the ML. As a result, it provides improvements on the radiation characteristics, in terms of directivity and gain, with a simple design and without increasing the antenna dimension.

This letter is organized as follows: Section II presents the antenna design, Section III presents the numerical analysis, experiments and results. Finally, Section IV presents concluding remarks.

II. ANTENNA DESIGN

Fig. 1(a) presents a traditional AVA, while Fig. 1(b) presents the proposed ESE-AVA (in metal layers only), here named Palm Tree antenna. This new design tries to decrease (in controlled manner) surface current intensities on the antenna edges, consequently decreasing the AVA SLL, expanding the low frequency limit, and increasing the ML gain.

The improvements do not change the antenna dimensions, when comparing AVA and ESE-AVA, which corresponds to an occupied area of 36.3 x 59.81 mm², with the same 0.64 mm substrate thickness. This antenna is considerably smaller than in other investigations [7, 11, 14, 15]. Additional miniaturization is possible by using substrates with high dielectric constant, such as LTCC or Alumina.

Manuscript received November 18, 2014; revised January 16, 2015; accepted February 14, 2015. First published Mmm dd, yyyy; current version published Mmm dd, yyyy.

A. M. De Oliveira, S. T. Kofuji, and J. F. Justo are with the Department of Electronic Systems Engineering in the Polytechnic School of the University of São Paulo, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brazil. (a.m.deoliveira@iee.org).

M. B. Perotoni is with ABC Federal University, CEP 09210-180, Santo André, SP, Brazil. (marcelo.perotoni@ufabc.edu.br)

Color version of one or more of the figures in this letter are available online at <http://ieeexplore.ieee.org>.

Digital Object Identifier 10.1109/LAWP.2014.XXXXXX

An Antipodal Vivaldi Antenna Design with Koch Fractal Slot Edge

Alexandre M. de Oliveira, *Student Member, IEEE*, João F. Justo, Marcelo B. Perotoni, and Sérgio T. Kofuji

Abstract— We present a new design of an Antipodal Vivaldi Antenna (AVA), implemented with a Fractal Slot Edge (FSE), which presents an unprecedented radiation pattern. When compared to a conventional AVA, it simultaneously extends the low-end bandwidth limitation, mitigates the side and back lobe levels, and increases the main lobe gain. In order to confirm those features, we compared the FSE-AVA with AVA with different edges: regular slot edge (RSE), tapered slot edge (TSE), and exponential slot edge (ESE). Simulations and experimental results at 7 GHz show that the FSE-AVA presents an improved gain of 8.5 dB, while AVA, 6.6 dB. Regarding the Side Lobe Level (SLL), it presents an improvement to -14.2 dB, corresponding to a reduction of 6.8 dB with respect to AVA. In contrast to the RSE, TSE and ESE, the FSE promotes minor change to the phase center (PC). The lower limit frequency (LLF) is reduced from 5.08 to 4.87 GHz. By comparing the FSE-AVA with RSE-AVA and TSE-AVA, it was observed that its notches in Koch fractal shape, in addition to mitigate the SLL, also direct the E-fields distributions towards the main lobe, providing a main lobe gain improvement.

Index Terms—ultra-wideband, antipodal Vivaldi antenna, directivity improvement, fractal antenna, Koch fractal.

I. INTRODUCTION

The Vivaldi antenna (VA), originally proposed in coplanar shape [1] and later in antipodal shape [2], is a wideband antenna which has drawn great attention over the last decade, and has been used in a number of applications, such as radar systems [3], medical imaging [4], astronomy [5], vehicular communication [6, 7], and see-through-wall imaging [8, 9].

The coplanar VA shape provides a fairly symmetrical main lobe (ML) with low cross-polarization levels, but the antenna feed has a complex design, requiring a balun. As a result, its bandwidth is usually limited to two octaves [2, 10, 11, 12]. On the other hand, the antipodal shape presents a simple feed design, with a more frequency-independent performance, resulting in a larger bandwidth than that of the VA in coplanar shape [2, 9, 10]. By having low profile, easy construction directly on a printed circuit board [2, 3, 5, 6, 9-11, 13, 14], the AVA is suitable for wideband applications. Despite those features, the VA has severe weaknesses regarding its directivity. The straight long sides create lateral surface currents, which promote a considerable increase in SLL, reducing its directivity [15, 16].

There has been an intensive effort to improve directivity,

using either directors on the main lobe or in the form of slot edges in the metallic side of the antenna. The directors have various shapes, such as dielectrics [17, 18] and metamaterials [19], which impairs their most important and attractive design qualities, increasing the final antenna dimensions and making manufacturing more complex.

In order to overcome such limitations, several designs have been proposed over the last few years, such as modifications in the antenna radiator. The AVA's have been developed with several edge designs, such as regular slot edge (RSE) [7, 10, 20, 21], tapered slot edge (TSE) [19, 21], and exponential slot edge (ESE) [16]. The ESE improves the directivity over the RSE and TSE without increasing the antenna dimensions. The RSE and TSE designs inhibited edge currents, which would promote the emergence of side lobes, acting as resonators. In the ESE antenna, surface currents on the side of the antenna are used to excite the slots, which operate similarly to parasitic antennas, thereby increasing the gain in the ML.

This investigation presents a new AVA design, based on a fractal edge, which provides superior properties for ultra-wideband applications, promotes an increased directivity of an AVA without increasing its dimensions, and keeping the easy fabrication. While the RSE and TSE designs trap and damp the lateral E-fields, thus dissipating energy, the fractal slot edge (FSE) design benefits from those fields. Although this solution is implemented on the AVA, it could be extrapolated to a generic VA, since the modifications are in the radiator region, therefore independent on the feeding type. The fractal slots follow the Von Koch algorithm curve [22-24], operating as parasitic antennas, directing the E-Fields towards the main radiator and, consequently, increasing the ML field level and, simultaneously, decreasing the SLL, improving the overall Fairfield characteristics of the antenna, at the expense of a more complex structural (Von Koch fractal shape). Although fractals have been used in several antenna systems [24], this is the first known implementation in Vivaldi antennas.

This work is organized as follows: Section II presents the antenna design while Section III the numerical and experimental results. Finally, Section IV presents conclusions.

II. ANTENNA DESIGN

A. AVA Design

Figs. 1(a) and (b) show the AVA, Figs. 1(c) and (d) show FSE-AVA, and Fig. 1(e) shows a zoomed view of the geometry of the third fractal generation. Fig. 2(a) presents a reference AVA and Fig. 2(b) the proposed FSE-AVA (in metallic layers only). Unlike the RSE and TSE-AVA, which trap the lateral current surfaces, and similarly to what was

A. M. De Oliveira, J. F. Justo, and S. T. Kofuji are with the Department of Electronic Systems Engineering in the Polytechnic School of the University of São Paulo, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brazil. (a.m.deoliveira@ieee.org)

M. B. Perotoni is with ABC Federal University, CEP 09210-180, Santo André, SP, Brazil. (marcelo.perotoni@ufabc.edu.br)

APÊNDICE E - Artigo publicado no Journal of Microwaves, Optoelec. And Eletromag. App.
(página 1).

Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vo 12, No. 2, Dec 2013

1

A CMOS UWB Transmitter with Vivaldi Array for Ultra-fast Beam steering Microwave Radar

Alexandre M. De Oliveira^a, Héctor D. O. Ascama^a, Roberto K. Hiramatsu^a, Sérgio T. Kofuji^a,

^a*Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Av.*

Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, 158, CEP 05424-970, São Paulo, SP, Brasil.

e-mail: {amanicoba, hector, kenji, kofuji}@pad.lsi.usp.br;

Marcelo B. Perotoni^b,

^b*Universidade Federal do ABC, Avenida dos Estados, 5001, CEP 09210-170, Santo André, SP, Brasil.*

e-mail: marcelo.perotoni@ufabc.edu.br

João F. Justo^a

e-mail: jjusto@lme.usp.br

Abstract— This work presents a new Ultra Wide Band (UWB) beamforming fifth-order derivative Gaussian pulse transmitter with dual small Vivaldi antennas for remote acquisition of vital signals in impulse radar applications. The system consists of a programmable delay circuit (PDC or τ), a UWB pulse generator (PG) circuit and an array of two Vivaldi planar antennas. The circuits is designed using the 0.18 μ m CMOS IBM process. Spice simulations show the pulse generation with 90mVpp amplitude and 300ps width. The average power consumption is 120 μ W per pulse, using a 2V power supply at a pulse repetition rate (PRR) of 100MHz. Full tridimensional electromagnetic simulations, using CST MWS, show the main lobe radiation with a gain of 5.5dB, and a beam steering between 20° and -17.5° for azimuthal (θ) angles at the center frequency of 7.5GHz.

Index Terms— Health monitoring; respiration rate; beamforming; phased array; vital signals; heartbeat signals.

I. INTRODUCTION

Considerable effort has been focused on the generation and transmission of UWB pulses, which can be used in a wide range of applications, such as in the remote acquisition of heartbeat signals of workers in an industrial plant, the measurement of respiration rate of soldiers in a military vehicle, or to track victims in landslide rubble [1-3]. This system consists of a transmitter, described in this work, and a receiver to perform telemetry for estimating the vital signs through detection of heart and lungs.

In order to acquire those signals, it is required to have a high precision system that can dynamically capture the signals of each individual on its fixed position, since this analysis in motion can cause significant changes in the shape of the UWB waveform [4].

If the spectral power of the UWB pulses is spread along an ultra-wide frequency range, the interference with other communication systems, such as phones, GPS systems, Bluetooth, and W-LAN IEEE 802.11, could be minimized [5]. A critical point is that reflections from the environment need to be minimized, in order to preserve the pulse shape and facilitate the detection process. Therefore, it is essential to use a radar system equipped with high-gain directional antennas [4]. The proposed arrangement, based on the model discussed in ref. [1], contains a timed-array transmitter system which is equipped with an antenna array that allows beam steering (Fig. 1). In the figures 1(c) and 1(d), two polar gain plots are shown, where each one corresponds to a determined delay set configured according the 1-byte word sent to the PDC circuit, shown in Fig. 1(a).

A Complete Ultra Wide Band Transmitter System for Impulse Radar

Alexandre M. de Oliveira, Jorge R.B. Garay*, João F. Justo and Sérgio T. Kofuji

Department of Electronic Systems Engineering, Polytechnic School, University of São Paulo, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brazil

Received: February 08, 2013 Revised: March 17, 2013 Accepted: April 18, 2013

Abstract: We modeled an ultra wide band (UWB) transmitter system composed of a seventh derivative Gaussian pulse generator and a Vivaldi antenna through the study of recent patents correlated to this system. The system consists of a fifth derivative Gaussian pulse generator (PG) combined with a RLC circuit to generate a seventh derivative Gaussian pulse. The circuit is designed using 180nm CMOS Mosis-IBM process. Spice simulations illustrate the pulse with 145mVpp amplitude and 380ps width. The planar antenna is designed with copper film and RO3206 substrate. The simulated pulse spectrum complies partly with the Federal Communications Commission (FCC) spectrum mask, in the 6-10GHz frequency range. The dynamic energy consumption is 0.4pJ and average power consumption of 1.1mW/pulse at 1.8V power supply with a pulse repetition rate (PRR) of 100MHz. The electromagnetic simulations show the main lobe with an average gain of 5.1dBi at 6GHz, and a beam angular width of the $138^\circ \times 62^\circ$. This circuit can be applied in the UWB impulse radar for human monitoring in hospitals and others health facilities.

Keywords: UWB, RFIC, Radar, CMOS, Microwave.

1. INTRODUCTION

The release of a wide-band spectral mask (i.e. 3.1-10.6 GHz) by the FCC fomented several researches on the UWB technology [1-3]. This technology consists of a system that uses short wavelets of electromagnetic energy to transmit signals through objects such as wall, skin, coat or earth. It is ideal for medical applications, such as for monitoring the sudden infant death syndrome, biomedical imaging, or even for localization of victims in the rubble of a landslide or snow [4-7]. This technique consists of a transmitter, which is the subject of this work, and a receiver to UWB pulses that meet the FCC mask with high accuracy [3, 8] and considerable resistance to interference waves [9]. This paper proposes a transmitter circuit consisting of a seventh derivative PG formed by combining a fifth derivative Gaussian PG [10] and a RLC circuit [11] equipped with a Vivaldi antenna to perform the directive beam formation with high gain.

The paper is structured as follows: Sec. II presents the CMOS transmitter architecture and design; the integrated system simulation results with MicroWind 3 combined with LTSpice 4 for layout and schematics, which considered effects of vertical and horizontal crosstalk coupling, input noise and parameter variations (geometric, supply voltage, temperature, and input noise) by Monte-Carlo simulations. Sec. III presents post-layout parameter variations within Spice simulations and the results of electromagnetic propagation simulation (3DEM) in CST

MW 2011. Sec. IV presents the Vivaldi antenna design, while Sec. V the conclusions.

2. 7TH DERIVATIVE GAUSSIAN PULSE GENERATOR

The Gaussian pulse is given by [11, 12]:

$$g(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad (1)$$

where σ is the standard deviation and A is the pulse amplitude. The Gaussian pulse is a good candidate for UWB transmitting since it has a wide bandwidth and no side lobes in its spectrum.

The pulse (seventh derivative Gaussian) is one of the best choices since it fully complies the FCC mask for outdoor applications and has no DC component, as recently shown in Ref. [11]. Therefore, the 7th derivative Gaussian was chosen for the design of the PG presented here. We propose system comprising a PG in the fifth-derivative Gaussian pulse,

$$g^{(5)}(t) = A \left(-\frac{t^5}{\sqrt{2\pi}\sigma^{11}} + \frac{10t^3}{\sqrt{2\pi}\sigma^9} - \frac{15t}{\sqrt{2\pi}\sigma^7} \right) e^{\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (2)$$

and a circuit RLC derivative of second-derivative,

$$f^{(2)}(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t+h) - 2f(t) + f(t-h)}{h^2} \quad (3)$$

which leads to the 7th-derivative of Gaussian pulse

$$g^{(7)}(t) = A \left(-\frac{t^7}{\sqrt{2\pi}\sigma^{15}} + \frac{21t^5}{\sqrt{2\pi}\sigma^{13}} - \frac{105t^3}{\sqrt{2\pi}\sigma^{11}} + \frac{105t}{\sqrt{2\pi}\sigma^9} \right) e^{\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (4)$$

*Address correspondence to this author at the Department of Electronic Systems Engineering, Polytechnic School, University of São Paulo, CEP 05508-900, São Paulo, SP, Brazil; Tel: +55 11 30919741; E-mail: Jorge@pad.lsi.usp.br

APÊNDICE G - Artigo publicado nos anais do congresso IEEE IMOC 2013 (página 1).

A Complete CMOS UWB Timed-Array Transmitter with a 3D Vivaldi Antenna Array for Electronic High-resolution Beam Spatial Scanning

Alexandre M. De Oliveira^a, Marcelo B. Perotoni^b, Jorge R. B. Garay^a, Stelvio H. I. Barboza^a, João F. Justo^a, and Sérgio T. Kofuji^a

^a University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil.

^b Federal University of ABC, Santo André, SP, Brazil.

e-mail: {amanicoba, jorge, stelvio, kofuji}@pad.lsi.usp.br; jjusto@lme.usp.br; marcelo.perotoni@ufabc.edu.br

Abstract— We present a new Ultra Wide Band (UWB) Timed-Array Transmitter System with Beamforming capability for high-resolution remote acquisition of vital signals. The system consists of four identical channels, where each is formed of a serial topology with three modules: programmable delay circuit (PDC or τ), a novel UWB 5th Gaussian Derivative order pulse generator circuit (PG), and a planar Vivaldi antenna. The circuit was designed using 0.18 μ m CMOS standard process and the planar antenna array was designed with film-conductor on Rogers RO3206 substrate. Spice simulations results showed the pulse generation with 104 mVpp amplitude and 500 ps width. The power consumption is 543 μ W, and energy consumption 0.27 pJ per pulse using a 2V power supply at a pulse repetition rate (PRR) of 100 MHz. Electromagnetic simulations results, using CST Microwave (MW) Studio 2011, showed the main lobe radiation with a gain maximum of 13.2 dB, 35.5° x 36.7° angular width, and a beam steering between 17° and -11° for azimuthal (θ) angles and 17° and -18° for elevation (ϕ) angles at the center frequency of 6 GHz.

Health monitoring; respiration rate; beamforming; timed array; UWB; heartbeat signals;

I. INTRODUCTION

Currently, there is considerable research being conducted on UWB radars, mainly (but not only) for application in the remote acquisition of heartbeat signals or the measurement of respiration rate (e.g. a group of soldiers in a military vehicle or workers in a nuclear power plant). Moreover, UWB radars promise good performance for other of military or civil applications (e.g. as ground and wall penetrating, victim localizations in the rubble of a landslide or snow, in pediatric clinics for alerting and monitoring of the Sudden Infant Death Syndrome (SIDS), or biomedical imaging) [1-6]. This technique is formed for a transmitter (this work) and a receiver to perform telemetry and estimating the vital signs through detection of the motion of lung and heart walls.

The case of vital signs acquisition requires a high precision system that can capture the signals of each individual dynamically, as this type of analysis in motion can cause significant changes in waveform on the radiated UWB pulse [1, 6, 7]. With this objective, it is essential to use a radar system equipped with high-gain directional antennas to minimize reflections from the environment [7], justifying the choice of a beamforming system.

Another important point is to ensure the coexistence with other systems, and for this, being spread in an ultra-

wide frequency range the spectral power of the pulses, minimizing the likelihood of interference with other communication systems, such as cell phones (e.g. GSM900, and UMTS/WCDMA), GPS, Bluetooth, and W-LAN IEEE 802.11 [8, 9].

Figure 1 shows the proposed timed-array transmitter system, formed by four identical channels, each one composed by a PDC, a PG, and a Vivaldi antenna, mounted in a dual cross antenna array (2+2), proposed by [5], so as to permit spatial (3D) beam steering.

Figure 1. UWB Beamforming Transmitter. (a) A general structure of beamforming; (b) bidirectional array gain pattern at 00FF_h PDC word control.

The work is organized as follows: in Sec II, the transmitter circuit and antenna array architecture and design are presented. Also the results of electromagnetic simulation in CST MW 2011[12], along with the results of Spice simulations, are presented in Sec III, and the conclusions are covered in Sec IV. The integrated system simulations with MicroWind 3.5[10] combined with LTSpice 4[11] for layout and schematic, where effects of crosstalk coupling vertical and horizontal, input noise of 10 mVpp and parameters variation (voltage, temperature, geometrical dimensions w and l) of the $\pm 20\%$ were considered by Monte-Carlo MOS level 3, with unknowns values are randomly selected according with their statistical distribution.

II. SYSTEM BEAMFORMING ARCHITECTURE OVERVIEW

A radar system based on timed-array, as well as phased-array, avoids the use of complicated mechanical systems, (mechanical scanning radar). In contrast to phased-array system that only operates with carrier signal, the timed-array system operates with discrete pulses (carrier free) and may have a pattern of different spacing between the antennas [1, 5, 13, 14]. e.g. when the antennas are excited with a delay time of 0 ps for channels 1 and 2, and of 63 ps for channels

APÊNDICE H - Artigo publicado nos anais do congresso CONCISTEC 2013 (página 1).

Anais do CONCISTEC'13
© 2013, copyright by IFSP

4º Congresso Científico da Semana Tecnológica – IFSP
22-25 de outubro de 2013, Bragança Paulista, SP, Brasil

BENEFÍCIOS DA ESCOLHA DO PULSO ELETROMAGNÉTICO GAUSSIANO DERIVADO EM QUINTA ORDEM PARA APLICAÇÕES DE RADAR ULTRA-WIDEBAND

Alexandre Manicoba de Oliveira^{1,2}, amanicoba@gmail.com

Jorge R. B. Garay¹, jorge@pad.lsi.usp.br

¹Universidade de São Paulo, Escola Politécnica,
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos - PSI.
Av. Prof. Luciano Gualberto, 158, trav. 3, São Paulo, SP, Brasil, CEP 05508-900
office: +55 11 30919741 - mobile: +55 13 8822-2124

Sérgio Takeo Kofuji¹, kofuji@pad.lsi.usp.br

João Francisco Justo¹, jjusto@lme.usp.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia,
Rua Maria Cristina, 50, Jardim Casqueiro, Cubatão, SP, Brasil, CEP 11533-160
office: +55 13 40095100

RESUMO. Este artigo apresenta o estudo de alguns pulsos Ultra-wideband (UWB) para aplicação em transmissões eletromagnéticas aplicadas a radar de impulso, discutindo os benefícios na utilização do pulso Gaussiano de quinta ordem de derivação em contraste ao uso de outros pulsos eletromagnéticos, sendo eles: Sinc, Quadrado, Gaussiano e as suas sete primeiras ordens de derivação. Este estudo levou em consideração o formato do pulso no domínio do tempo, a assinatura espectral do pulso e o grau de complexidade do circuito necessário para sintetizar o pulso. O pulso Gaussiano de quinta ordem de derivação foi escolhido pois apresenta uma ótima relação de eficiência espectral versus a complexidade moderada do circuito necessário para sua síntese, além de não possuir a componente DC (corrente contínua ou frequência zero), que em termos de radiação, é menos eficiente que a componente AC (corrente alternada).

Palavras chaves: UWB, pulso Sinc, pulso Gaussiano, Radar.

1. INTRODUÇÃO

Em 1887, Heinrich Rudolf Hertz realizou estudos relacionados a ondas de rádio. Duas décadas depois, Christian Hülsmeyer propôs o uso de ondas de rádio para detectar a existência de embarcações metálicas a grandes distâncias. Seu invento foi batizado de Telemobiloskop. Nikola Tesla em 1917 apresentou os fundamentos que estabeleceram os conceitos primitivos da telemetria por ondas de rádio ao relacionar frequência e o nível energético.

Precedendo a segunda guerra mundial, impulsionado, sobretudo pela fragilidade britânica a ataques aéreos alemães, muito se pesquisou sobre detecção e telemetria via rádio ou Radio Detection And Ranging (Radar).

Atualmente os sistemas de radar são utilizados tanto para aplicações militares quanto civis, por exemplo, no controle de tráfego aéreo, detecção de colisão em automóveis, monitoramento de velocidade de trânsito e monitoramento de condições atmosféricas (DEVINE, 2000).

Figura 1 - Ilustração de possíveis cenários de aplicações de radar UWB. (a) Monitoramento de motoristas e pilotos. (b) Monitoramento de pacientes em hospitais. (c) Monitoramento de berços infantis. (ZITO et al. 2011).

APÊNDICE I - Artigo publicado nos anais do XVI SIGE (página 1).

ISSN:1983 7402

ITA, 23 a 25 de setembro de 2014

A CMOS 0.18 μ m 4bits PROGRAMMABLE DELAY CONTROL FOR UWB TIMED ARRAY BEAMFORMING RADAR APPLICATION

Alexandre M. de Oliveira¹, Jorge R. B. Garay¹, Henri Baudrand², Leandro T. Manera³, Sergio T. Kofuji¹ and João F. Justo¹.

amanicoba@pad.lsi.usp.br, jorge@pad.lsi.usp.br, henri.baudrand@laplace.univ-tlse.fr, manera@dsif.fee.unicamp.br, kofuji@usp.br, and jjusto@lme.usp.br.

¹ Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, Brazil.

² Laplace laboratory, National Polytechnic Institute of Toulouse, Toulouse, France.

³ School of Electrical and Computer Engineering, State University of Campinas, Campinas, Brazil.

ABSTRACT. We present a Programmable Delay Control (PDC) for UWB Timed Array Radar Application, working with pulses in the GHz region, which requires a precise control of delays in the order of picoseconds. The major component of the PDC consists of a channel formed by two static inverters connected in series. Between the internal transition line (V_{intra}) and the ground line (V_{ss}), a digital variable capacitor is used to control the time of transitions (low-to-high and high-to-low) through their different times of charging and discharging. The circuits are designed using the integrated Spice environment with MicroWind 3 and LTSpice 4 VLSI Full custom project tools with the IBM SiGe 0.18 μ m process foundry. The Spice simulations showed a controllable delay time between 0 and 97ps, which, in the EM tests with CST Microwave Studio 2011, resulted in a controlled beam with center frequency of 4GHz, angular width of 27° and variable deflection between 12° and -13°, with a 8.3dB directivity and sidelobe of -11dB.

Keywords: Delay Control, UWB Radar, Timed Array.

I. INTRODUCTION

Programmable delay controllers (PDC) are usually characterized to modify the rise and fall times of digital signals or other transition signals in integrated circuits (IC). In a PDC, the delay between input and output can be controlled digitally or analogically. In the analogic form, delay can be regulated by varying an analog control voltage, which allows a continuous adjustment of delay time [1]. In the digital form, delay can be regulated by discrete voltage levels [2] or discrete variation of a capacitance [3].

There are various applications for PDC circuits, e.g. in digitally controlled oscillator circuits [2], Phase-Locked Loops (PLL) circuits [4], Delay-locked Loops circuits [5], and high performance CMOS VLSI circuits, such as microprocessors and dynamic memories [6]. In all those applications, the PDC is an essential component and its accuracy directly affects the circuit performance [7].

De Oliveira *et. al* [8] has proposed the use of PDC to manage delay signals of stimulation, in the configuration of radar-Timed Array Transmitter. This allows controlling the beam direction without mechanical movement in an antenna. Figure 1 shows a schematic representation that illustrates the applicability of the proposed PDC.

Fig. 1. Radiation diagram of the UWB transmitter, created using a PDC array to illustrate a possible application. (a) Polar Fairfield, and (b) 3D Fairfield obtained with adjustment parameter PDC = 0000_B, 0000_B, 0000_B, and 0000_B.

This paper is organized as follows: Section II presents the PDC circuit architecture and design; Section III presents the antenna used in Electromagnetic (EM) simulations, Sections IV and V present the Spice and EM simulation results, while Section VI presents the conclusions.

II. MODELING AND DESIGN

All circuit and layout design of the proposed PDC were designed through the techniques of VLSI full custom using a Spice simulation environment and integrated with the LTSpice 4 and MicroWind 3 design tools. The design rules were those provided by IBM (7WL_4LM_ML_HK) foundry processes in 0.18 μ m SiGe technology. For schematic and post-layout simulations, we considered effects of vertical and horizontal crosstalk coupling input noise variation with 10% of Vdd amplitude, and parameters processes variation by Monte Carlo.

According to Rabaey, Chandrakasan and Nikolic [9], it is possible to model the basic delay element as a first-order RC network, shown in Figure 2. The delay that the transient experiences in this RC network can be observed when applying a transition from logic low-to-high (V_{in} from 0 to Vdd). The transient response behavior of this circuit is exponential, given by equation (1) [9],

$$v_{out}(t) = \left(1 - e^{-t/RC}\right) \quad (1)$$

where R is the resistance and C is the capacitance of the output node, both of delay element.

UNIDADE LÓGICO-ARITMÉTICA COM ARQUITETURA RISC DE 8 BITS PROJETADA NA TECNOLOGIA CMOS 350NM PARA APLICAÇÃO NA EDUCAÇÃO NA ENGENHARIA E NA CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO

Alexandre Manicoba de Oliveira ¹

Héctor Dave Orrillo Ascama ²

Sérgio Takeo Kofuji ³

Neste trabalho é apresentado o projeto e simulação de uma Unidade Lógico Aritmética (ULA) de 8 bits implementada no processo 0.35 μ m da tecnologia CMOS. Esta unidade realiza operações aritméticas de soma, subtração, comparação entre os operandos e funções lógicas AND e OR bit-a-bit. O circuito completo da ULA foi simulado em unidades com o simulador elétrico LTSpice e o layout com editor de layout Microwind. As simulações apresentaram um tempo máximo de atraso na ordem de 1ns e evidenciaram o perfeito funcionamento da ULA nas operações para o qual foi projetada.

Palavras- chave: Unidade lógico-aritmética. CMOS. VLSI. Circuito integrado.

This paper presents the design and simulation of an ALU Arithmetic Logic Unit-8 bits implemented in 0.35 μ m CMOS technology process. This unit performs arithmetic operations of addition, subtraction, comparison between the operators and functions AND and OR logical bit-by-bit. The complete circuit was simulated in the ALU units with electric LTSpice simulation and layout layout editor MicroWind. The simulations showed a maximum time delay in the order of 1ns and showed the perfect operation of the ALU operations for which it was designed.

Keywords: Arithmetic-Logic Unit. CMOS. VLSI. integrated circuits.

1 INTRODUÇÃO

A Unidade Lógico-Aritmética (ULA) é um dos principais blocos funcionais de um processador. Nela são executadas operações lógicas e aritméticas, sendo as operações lógicas realizadas bit-a-bit (FREGNI & SARAIVA, 1995; TOCCI, WIDMER & MOSS, 2007) e seu desempenho influencia diretamente o desempenho do processador. Logo, uma ULA com bom desempenho é a chave para um processador de boa performance (SUZUKI et al., 1993; PATTERSON & HENNESSY, 2005), em especial a unidade aritmética (LANGDON & FREGNI, 1987).

Em função do fato de que a performance de um processador estar diretamente ligada

ao desempenho da ULA, percebe-se a grande importância do estudo do desenvolvimento das ULAs.

Toda a operação aritmética realizada na ULA é baseada na operação de adição (GÜNTZEL, 2003). A proposta neste trabalho tem sua unidade aritmética formada pela combinação de oito blocos somadores completos (*full adder*) interligados pelo sinal de vai-um (*carry*), sendo capaz de realizar operações de soma e subtração de números binários de até 8 bits (SRINIVASAN, 2003).

As operações lógicas são realizadas por uma unidade lógica formada pela combinação de oito blocos lógicos capazes de realizar as operações AND e OR com palavras de 8 bits na forma paralela, bit-a-bit.

¹ Mestrando de Engenharia Elétrica pela USP, professor da Universidade Católica de Santos e da Unimonte. E-mail: <amanicoba@ieee.org>.

² Doutor em Engenharia Elétrica pela USP, pós doutorando da Universidade de São Paulo. E-mail: <hector@pad.lsi.usp.br>.

³ Doutor e professor da Universidade de São Paulo. E-mail: <kofuji@pad.lsi.usp.br>.

Data de entrega dos originais à redação em 29/01/2012 e aceito para diagramação em 09/04/2013.

A Teaching Methodology Based On The ALU 8bit RISC Design VLSI Full Custom for Classes on Computer Architecture and Digital Electronic

Alexandre M. De Oliveira^a, Jorge R. B. Garay^a, A.C. Lins Rodrigues^b, João F. Justo^a, e Sergio T. Kofuji^a.

University of São Paulo, São Paulo, SP, Brazil.

^aDepartamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da EPUSP.

^bFaculdade de Educação da USP.

e-mail: {amanicoba, jorge, kofuji}@pad.lsi.usp.br; cesarlrodrigues@usp.br; jjusto@lme.usp.br

Resumo— Este trabalho apresenta uma metodologia de ensino de projeto e simulação de circuitos digitais com foco em uma Unidade Lógico Aritmética – ULA, de 8bits, com a tecnologia de processo de fabricação IBM 7VL SiGe BiCMOS 180nm Very-large-scale integration-VLSI Full-Custom utilizando como ambiente de desenvolvimento Spice a ferramenta, de licença GNU, LTSpice 4. A ULA foi concebida para realizar operações aritméticas de soma, subtração e comparação de maior, menor e de igualdade, bem como realizar operações lógicas AND e OR na forma bit-a-bit. Os resultados de simulações evidenciaram o funcionamento da arquitetura proposta, com atraso máximo de resposta da ordem de 1ns. A metodologia foi experimentada, com êxito em disciplinas como Arquitetura de Computadores e Organização de Computadores para o curso de Ciências da Computação, Circuitos Digitais, Microprocessadores e Microcontroladores II e Eletrônica Digital e Ao Projeto VLSI II para o curso de Engenharia Elétrica, onde foi evidenciada uma rica experiência dos alunos no que tange o contato com o estudo e desenvolvimento deste elemento central (ULA) a arquitetura de computadores.

Palavras- chave: *Interstícios-pedagógicos. Unidade Lógico-Aritmética. VLSI. Circuito integrado. Ensino-aprendizagem.*

I. INTRODUÇÃO

Arquitetura de computadores é a disciplina central da matriz curricular dos cursos de ciências da computação e engenharia da computação [1]. Já a ULA pode ser considerada o coração da arquitetura computacional dos microprocessadores, uma vez que nela as operações são realizadas bit-a-bit e seu desempenho influencia diretamente no andamento do sistema como um todo, sobretudo no que concerne à unidade aritmética. Admite-se, desta forma, que a pesquisa suscite possibilidades de engendramento de novas ferramentas pedagógicas dentro das especificidades da área, contribuindo para o desenvolvimento educacional dos cursos de Ciências da Computação e Engenharia da Computação [2-8], mesmo sendo incipiente dentro do legado didático dos cursos de Ciências da Computação e Engenharia da Computação.

Assim como mencionado por Linn [9], Platão, filósofo e estudioso ateniense já dizia “a necessidade... é a mãe das invenções”. Esta máxima ateniense representa a ideia central da metodologia proposta neste trabalho, uma vez

que um dos autores percebeu a dificuldade dos alunos na elaboração de mapas mentais do funcionamento interno de um processador, apenas com os diagramas propostos por Patterson [6], desta forma o desenvolvimento da disciplina ficou muito restrito ao estudo das arquiteturas existentes, sem que os alunos apresentassem habilidade para propor melhorias ou até novas arquiteturas computacionais.

Não obstante ao fato das disciplinas dos cursos de Ciência da Computação e Engenharia Elétrica estarem em iminência com as questões da contemporaneidade, há muito se percebe estabelecida uma dicotomia entre as abordagens tradicionais de ensino [10] – entendendo-as como aquelas que atribuem ao sujeito um papel insignificante na elaboração e aquisição do conhecimento cabendo ao mesmo a memorização de enunciados, definições, leis, resumos e sínteses oferecidos a partir de um esquema atomístico – que povoam o ideário docente dos professores dessa área e as representações pós-modernas que permeiam toda *tecnologia identitária* relativa à prática utilitária dos computadores.

Admite-se que não se possa criar uma cisão entre a cultura com toda a sua centralidade – levando em consideração a enorme expansão de tudo que está associado a ela (a cultura) e o seu papel constitutivo, hoje, em todos os aspectos da vida social [11] – e quaisquer configurações de existência em sociedade, as quais também são comportadas, segundo o entendimento que por ora se sugere, todas as formas de ensinar e aprender.

Outrossim, na busca por um pensamento fundante ao por ora proposto em nível de procedimento didático, utiliza-se os escritos de Paulo Freire [12] quando diz que “ninguém educa ninguém, ninguém se educa a si mesmo, os homens se educam entre si, mediatizados pelo mundo”, para dar sentido ao desejo de apreensão de novas formas de aquisição de conhecimentos dentro da área tecnológica. Ou seja, essa mediação que o mundo exerce sobre as questões educacionais ganha uma proporção mais abrangente, quando se pensa nas infinitas conexões possíveis e passíveis de serem estabelecidas no *Cyberworld*, sendo utilizadas e facilitadas por alunas e alunos de ambos os cursos, no sentido de cumprirem o seu papel social, na luta pela ruptura dos sem número de paradigmas excludentes hierarquizantes inerentes às ciências exatas.

Tais formas de interpretação fomentaram a necessidade de estimular os estudantes desses cursos ao

APÊNDICE L - Artigo publicado nos anais do COBENGE 2013 (página 1).

ULTRA-LOW-COST POWER UWB PULSE STUDY ENVIRONMENT FOR ELECTRICAL ENGINEERING COURSE USING SPREADSHEETS BY CLOUD COMPUTING

Alexandre Manicoba de Oliveira^{1,2} – amanicoba@usp.br

Jorge R. B. Garay¹ – jorge@pad.lsi.usp.br

Sérgio Takeo Kofuji¹ – kofuji@pad.lsi.usp.br

João Francisco Justo¹ – jjusto@lme.usp.br

¹Universidade de São Paulo, Escola Politécnica,

Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos - PSI.

Av. Prof. Luciano Gualberto, 158, trav. 3, São Paulo, SP, Brasil, CEP 05508-900

office: +55 11 30919741 - mobile: +55 13 8822-2124

Antonio Malynowskyj² – antonio.malynowskyj@unimonte.br

²Centro Universitário Monte Serrat, Centro de ciências Exatas e da Terra

Av. Rangel Pestana, 99 - Vila Mathias Santos, 11013-551 - office: +55 13 32282100

Abstract: *This work presents an ultra-low-cost UWB dynamic Power study and calculation environment for undergraduate and graduate classes on telecommunications of the electrical engineering course which is based on spreadsheet method. This method exploits the familiarity of modern and common spreadsheets programs to a variety of computer users and provides them a friendly and fast environment to study and obtain the power parameters of several classes of radio frequency (RF) ultra wide-band (UWB) pulses. This method is also useful for research and educational purposes, since it does not require the creation of computer programs for processing the UWB pulses extracted from Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis (Spice) environments. It is briefly described, and an example is presented illustrating its use to obtain the power parameters of a RF UWB pulse, e.g. seventh order derivative Gaussian pulse, with temporal width of hundreds of picoseconds. In summary, this methodology allows validation of the method and also allows almost explicit analysis of the data throughout the process, in contrast with the black box model system created from programming languages, which in most cases receives data, processes them and displays only the results of the process, which is not always pedagogical, regarding its study as a whole. All this, enjoying the benefits of cloud computing.*

Keywords: *UWB, Power, Dynamic Energy, Gaussian Pulse, Spreadsheets.*

1 INTRODUCTION

Plato (427-347 BC), the great Athenian philosopher always said: “necessity is the mother of invention” (MONBODDO, 1779). The spirit of this quote involves this work, since the proposed method comes from the need to study, teach and research the power parameters of UWB pulses resulting from the Spice simulations of CMOS pulse generators circuits through a quick and friendly method for processing of these data,

APÊNDICE M - Artigo publicado nos anais do congresso CONCISTEC 2014 (página 1).

Anais do CONCISTEC'14
© 2014, copyright by IFSP

5º Congresso Científico da Semana Tecnológica – IFSP
20-24 de outubro de 2014, Bragança Paulista, SP, Brasil

ALGORITMOS E TÉCNICAS DE PROGRAMAÇÃO COM UMA ABORDAGEM DE APRENDIZAGEM BASEADA EM PROBLEMAS PARA CURSOS DE ENGENHARIA

Alexandre Manicoba de Oliveira^{1,2}, amanicoba@usp.br

Jorge R. B. Garay¹, jorge@lsi.usp.br

João F. Justo¹, jjusto@lme.usp.br

¹Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Jean Pierre B. Neves², jpb.neves@hotmail.com

Edson Florentino², edson.florentino@unimonte.br

Marcelo Gonçalves Pita², marcelo.pita@unimonte.edu.br

²Centro Universitário Monte Serrat – Unimonte, São Paulo, Brasil.

RESUMO. Neste trabalho é apresentada a aplicação da metodologia educação baseada em problemas (PBL) nas aulas da disciplina de Algoritmos e Técnicas de Programação dos cursos de Engenharia da Unimonte, universidade privada do grupo Anima Educação, localizada em Santos, litoral de São Paulo, com intuito de comprometer os alunos com a resolução de um problema real da área da engenharia através do uso da PBL de tal forma que os mesmos sintam-se inspirados a participar das aulas e desta forma, possam ter um aproveitamento melhor em contraste aos métodos tradicionais de ensino, aprendizagem baseada na criação de programas de propósito geral em linguagem de programação, por exemplo C++, utilizados nesta disciplina. Como a evasão na engenharia atinge elevados níveis, por exemplo, segundo o Mapa do Ensino Superior no Estado de São Paulo 2013, no Brasil cerca de 92,3% dos alunos de engenharia civil evadem-se e isso se deve principalmente ao contraste pedagógico entre o ensino médio e superior, no que concerne sobretudo às exigências pedagógicas, desta forma a PBL contribui para diminuição do índice de evasão, visto que inspira um alto nível de envolvimento dos alunos nos estudos, o que instiga nos alunos o pensamento crítico, o surgimento de habilidades profissionais e aquisição estruturada de conhecimento, sem falar que a PBL é uma potencial fonte de retenção de alunos, visto que os mesmos acabam se comprometendo com um grupo e criam expectativas competitivas para ver o projeto finalizado e bem sucedido. Como resultado da aplicação da PBL durante um período de três anos (2012, 13 e 14) nas turmas de engenharia da Unimonte observou-se um aumento médio de 10,12% na nota final em relação à nota dos alunos que aprenderam a disciplina de Algoritmos de maneira tradicional, ou seja, desenvolvida em um ambiente estritamente orientado a programação em ambiente C++.

Palavras-chave: PBL. Evasão. Algoritmo. Engenharia. Educação.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o Brasil foi impulsionado por um crescimento acelerado, sobretudo no que diz respeito ao número de estudantes matriculados no ensino superior, que segundo o Mapa do Ensino Superior no Estado de São Paulo, edição 2013, algo em torno de 5,8 milhões em 2011, o que aponta um crescimento de 5,4% no total de matrículas em contraste ao ano de 2010, taxa de crescimento superior a países como EUA, com 2,8%, Japão, com 1,2% e França, com 0,6%. Um detalhe interessante se deve ao fato que destes 5,8 milhões de estudantes, cerca de 72,4% corresponde a matriculados em Instituição de Ensino Superior (IES) privadas (SEMESP, 2013).

O impacto das atividades de ensino das IES é notado, sobretudo em sua participação na economia brasileira, o que representa algo em torno de 1% do Produto Interno Bruto (PIB), ou seja, R\$ 41,4 bilhões em 2011, sendo assim, vale salientar que o setor de educação superior empregou neste mesmo período um número superior a 751 mil profissionais, destes 378 mil docentes e 372 mil técnico-administrativos, sem falar na relevante importância na formação de 871 mil alunos, tendo mais de 70% atendidos pelas IES do setor privado (SEMESP, 2013).

Na área de engenharia pode-se citar, por exemplo, que o número de matrículas em cursos de engenharia civil em 2011 nas IES privadas, foi de 110.371 alunos. Já em engenharia de produção houve um total de 87.683 alunos matriculados com um montante de ingressantes de 58.986 e 33.816 alunos em cada curso respectivamente. Entretanto, há um quadro não tão animador quanto ao citado até então, o que trata da evasão. Em um contexto geral, a taxa de evasão em cursos superiores presenciais em IES privadas atingiu o índice de 35,9%. Para uma análise específica nos cursos de engenharia civil e de produção, a evasão também é considerada elevada e bem acima do índice geral, por exemplo, para cada 5 alunos ingressantes no curso de engenharia de produção, apenas 1 concluiu o curso no mesmo período, já para o curso de engenharia civil, os números são ainda piores, ou seja, para cada 13 alunos ingressantes, apenas 1 concluiu o curso (SEMESP, 2013).

Para melhor entendimento sobre esses números, pode-se definir a evasão como o desligamento da IES, por iniciativa do aluno sem a ciência por parte da instituição, sendo esta (a evasão) um dos grandes desafios das IES. Para o

APÊNDICE N - Artigo publicado nos anais do COBENGE 2015 (página 1).

COBENGE 2015
XLIII CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA
 "Aprendizagem Ativa: Engenheiros colaborativos para um mundo competitivo"
CUFSA – MAUÁ – FEI – UFABC – UESP / ABENGE
08 a 11 de setembro de 2015

Metodologia De Ensino De Campo Elétrico Por Uma Abordagem Experimental E Simulada Com Superfície Eletrolítica E Scilab Com Pbl

Alexandre Manicoba de Oliveira¹ – amanicoba@usp.br

A. C. Lins Rodrigues² – cesarlrodrigues@usp.br

Jorge R. B. Garay¹ – jorge@pad.lsi.usp.br

João Francisco Justo¹ – jjusto@lme.usp.br

Universidade de São Paulo,

¹Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos e ²Faculdade de Educação

Av. Prof. Luciano Gualberto, 158, trav. 3, São Paulo, SP, Brasil, CEP 05508-900

Marcelo Bender Perotoni – marcelo.perotoni@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC

Av. dos Estados, 5001. Bairro Bangu. Santo André - SP - Brasil . CEP 09210-580

Resumo: Segue uma alternativa a cuba eletrolítica que aumente a mobilidade do experimento em cursos de engenharia a “Superfície Eletrolítica”. Entende-se que o mesmo engendre uma interface entre os cursos de Cálculo Diferencial e Integral, Geometria Analítica e Vetores, Física Eletricidade e Eletromagnetismo, transitando também entre Algoritmos e Técnicas de Programação. Ou seja, propiciando a possibilidade interdisciplinar às referidas disciplinas. Este ambiente de aprendizado é eficiente, tem baixíssimo custo e simples montagem, em contraste ao moderado custo e alta complexidade de operação do experimento homônimo da cuba eletrolítica. Todo o desenvolvimento e estudo se deu com uma população amostral de 131 alunos de engenharia de duas instituições de ensino superior (IES), a ESAMC (Eletromagnetismo) e a UNIMONTE (Algoritmos), ambas em Santos - SP. O experimento foi realizado com uma folha de papel levemente embebida por uma solução eletrolítica (2l de água com 1g de Sal de cozinha), que representa a superfície de espessura infinitesimal e cujas bordas, aproximadamente 10mm de largura de todo o perímetro, são revestidas de papel alumínio, representando a região de fronteira da superfície e nela é afixado o eletrodo de menor potencial elétrico, posicionado sobre a superfície, o eletrodo de maior potencial. O estudo das distribuições de campo é realizado a partir de uma metodologia experimental de medidas utilizando um voltímetro e comparando os valores ao resultado de simulações no ambiente Scilab. A partir dos resultados obtidos, percebeu-se que tal experimento proporciona aos alunos um rico ambiente de apreensão do conhecimento do que venham a ser os campos elétricos. Outrossim, observou-se que, mesmo fora da IES os alunos têm todas as possibilidades de replicação do experimento, integrando de um modo *sui generis* todo o conhecimento adquirido durante a realização do mesmo às questões relacionadas ao avanço dos saberes construídos para além dos muros escolares.

Palavras-chave: Cuba Eletrolítica, Superfície Eletrolítica, Campos Elétricos, Diferenças Finitas.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente as disciplinas dos primeiros semestre do curso de Engenharia, são consideradas um dos grandes desafios para as alunas e alunos que iniciam suas vidas acadêmicas. Sobretudo na Física Eletricidade e Eletromagnetismo que, obrigatoriamente lançam mão de ferramentas das disciplinas de Cálculo Diferencial e Integral e da Geometria Analítica e Vetores, por conta da grande necessidade de abstrair campos elétricos, têm-se um

APÊNDICE O - Detalhes sobre o processo de fabricação das antenas.

Na indústria Griffus, todo o processo de produção das antenas é feito em ambiente de Manufatura Assistida por Computador (*Computer Aided Manufacturing – CAM*) de forma a garantir total qualidade do processo. Quando o arquivo extensão DXF é recebido, o mesmo é manipulado no programa CAM350, como ilustra a Figura a seguir, que irá preparar os dados de programação dos equipamentos de manufatura, sobretudo as fresadoras automáticas de Comando Numérico Computadorizado (CNC).

Tela do programa CAM350 utilizado para prepara a programação da Fresa CNC (GRIFFUS, 2015).

Depois de feito isso um arquivo extensão CAM é criado e enviado para a primeira etapa do processo, o equipamento que irá fazer os furos pilotos, a SCROLL MASCHINEN LM Séries AMX2/160S, como ilustra a próxima Figura, para o alinhamento durante as etapas de aplicação de máscaras para corrosão e fresagem.

Etapa de criação dos furos pilotos na SCMOLL MASCHINEN LM Série AMX2/160S (GRIFFUS, 2015).

Depois de realizados os furos pilotos para alinhamento, as máscaras são aplicadas nos dois lados da placa de laminado Rogers, através de processo de revelação fotográfico (Figura seguinte). Neste, o foto-resiste é uma substância que é aplicada na superfície e em seguida o foto-processo expõe à placa a luz ultravioleta com controle de intensidade e tempo de forma a gravar a máscara na superfície de cobre do laminado.

Equipamento do Foto-processo de gravação de máscara (GRIFFUS, 2015).

As variáveis do processo de aplicação das máscaras são temperatura, pressão, pH, tempo e alcalinidade. Após a realização desta etapa, uma inspeção visual é realizada para controle de qualidade.

Na etapa seguinte a revelação das máscaras, inicia-se o processo de corrosão do cobre (próxima Figura) não protegido pelas máscaras aplicadas na etapa anterior. Os parâmetros de controle do processo de corrosão são velocidade de transporte, temperatura, pH e pressão.

Etapa de corrosão do cobre na Etchmaster IS (GRIFFUS, 2015).

Finalmente, é realizada a etapa de fresagem de acabamento e corte das antenas como ilustra a Figura a seguir.

Equipamento de acabamento e corte das antenas POSALUX – US6000 (GRIFFUS, 2015).

Por motivo de proteção industrial, não se pode revelar maiores detalhes do processo, tão pouco os parâmetros e configurações exatas de cada etapa de fabricação da antena.

Anexo 1 – Conteúdo do arquivo DATA01.D1 contendo dados da medida experimental do parâmetro S11 da AVA-974.

```

CITIFILE A.01.00
#NA VERSION HP8722D.06.14
NAME DATA
VAR FREQ MAG 401
DATA S[1,1] RI
SEG_LIST_BEGIN
SEG 1000000000 16000000000 401
SEG_LIST_END
BEGIN
-2.94128E-1,9.36157E-1
-1.36352E-1,9.78149E-1
0.36377E-1,9.80712E-1
2.07885E-1,9.68139E-1
3.76373E-1,9.12597E-1
5.48584E-1,8.22631E-1
6.763E-1,7.07580E-1
8.05358E-1,5.53558E-1
8.86779E-1,3.92150E-1
9.40673E-1,1.97570E-1
9.55841E-1,0.11810E-1
9.21814E-1,-1.89575E-1
8.53027E-1,-3.66088E-1
7.43042E-1,-5.31799E-1
6.07788E-1,-6.58264E-1
4.44702E-1,-7.58178E-1
2.81616E-1,-8.17932E-1
0.98602E-1,-8.39294E-1
-5.99060E-2,-8.29528E-1
-2.27203E-1,-7.80548E-1
-3.68194E-1,-7.11792E-1
-4.83276E-1,-6.10565E-1
-5.83831E-1,-5.01403E-1
-6.50939E-1,-3.77594E-1
-7.04345E-1,-2.42675E-1
-7.26837E-1,-1.08825E-1
-7.15820E-1,0.34484E-1
-6.90094E-1,1.61407E-1
-6.26251E-1,2.92785E-1
-5.35522E-1,3.98071E-1
-4.26116E-1,4.75250E-1
-3.03802E-1,5.27465E-1
-1.66137E-1,5.45410E-1
-4.26635E-2,5.25238E-1
0.80581E-1,4.72656E-1
1.69158E-1,3.92517E-1
2.43103E-1,2.80273E-1
2.56149E-1,1.55578E-1
2.35839E-1,0.49194E-1
1.95106E-1,-5.24597E-2
1.09001E-1,-1.37405E-1
-4.4555E-3,-1.84906E-1
-1.29028E-1,-1.74278E-1
-2.25006E-1,-1.25274E-1
-2.99621E-1,-5.31768E-2
-3.52813E-1,0.31799E-1
-3.75518E-1,1.33819E-1
-3.69598E-1,2.33123E-1
-3.38836E-1,3.27148E-1
-2.88208E-1,4.13085E-1
-2.10327E-1,4.86267E-1
-1.28356E-1,5.32409E-1
-3.33557E-2,5.6427E-1
0.61401E-1,5.77758E-1
1.61224E-1,5.68603E-1
2.49633E-1,5.45166E-1
3.37127E-1,4.99359E-1
4.19677E-1,4.45983E-1
4.83947E-1,3.75E-1
5.42541E-1,2.97058E-1
5.79711E-1,2.12036E-1
6.09649E-1,1.13403E-1
6.23718E-1,0.21423E-1
6.19171E-1,-8.31909E-2
5.99334E-1,-1.80938E-1
5.61187E-1,-2.77130E-1
5.12420E-1,-3.69995E-1
4.37835E-1,-4.50439E-1
1.92886E-1,-5.46035E-2
1.83204E-1,-8.69674E-2
1.61224E-1,-1.13616E-1
1.38504E-1,-1.29837E-1
1.11282E-1,-1.53167E-1
0.74516E-1,-1.62979E-1
0.43746E-1,-1.67785E-1
0.09994E-1,-1.65542E-1
-1.91574E-2,-1.56417E-1
-4.93850E-2,-1.43104E-1
-7.63855E-2,-1.16905E-1
-9.34219E-2,-8.78601E-2
-1.08726E-1,-5.68542E-2
-1.17935E-1,-2.47039E-2
-1.22680E-1,0.67596E-2
-1.16470E-1,3.73306E-2
-1.07406E-1,5.96923E-2
-9.65728E-2,8.73794E-2
-7.34939E-2,1.08558E-1
-5.23223E-2,1.23020E-1
-2.28042E-2,1.33163E-1
0.02235E-1,1.35643E-1
0.24826E-1,1.41120E-1
0.48683E-1,1.37527E-1
0.66864E-1,1.34567E-1
0.86898E-1,1.25320E-1
9.87396E-2,1.12411E-1
1.11892E-1,1.00433E-1
1.18949E-1,8.20770E-2
1.21742E-1,7.39669E-2
1.28265E-1,0.60386E-1
1.27090E-1,0.50186E-1
1.25877E-1,0.40336E-1
1.21749E-1,3.27606E-2
1.21048E-1,3.03497E-2
1.20819E-1,2.33230E-2
1.16729E-1,2.44903E-2
1.17469E-1,2.18353E-2
1.13731E-1,2.26059E-2
1.18103E-1,2.35595E-2
1.22764E-1,2.13241E-2
1.29318E-1,0.24780E-1
1.3797E-1,0.22079E-1
1.42601E-1,0.20675E-1
1.52526E-1,0.14442E-1
1.59606E-1,0.07377E-1
1.70318E-1,0.01907E-1
1.76818E-1,-7.31658E-3
1.84104E-1,-1.56173E-2
1.91482E-1,-3.11965E-2
1.95617E-1,-4.83551E-2
2.00119E-1,-6.38275E-2
2.00027E-1,-7.94982E-2
1.99005E-1,-9.44976E-2
1.95770E-1,-1.12625E-1
1.87759E-1,-1.30279E-1
1.83883E-1,-1.47804E-1
1.73515E-1,-1.64657E-1
1.60148E-1,-1.79367E-1
1.45851E-1,-1.91986E-1
1.29318E-1,-2.04124E-1
1.12701E-1,-2.15423E-1
0.94512E-1,-2.25219E-1
0.76232E-1,-2.28271E-1
0.55961E-1,-2.31163E-1
0.38337E-1,-2.32917E-1
0.16815E-1,-2.35763E-1
-5.75256E-3,-2.31674E-1
-2.21481E-2,-2.25036E-1
-4.02450E-2,-2.18811E-1
-5.69610E-2,-2.07099E-1
-7.10601E-2,-1.9767E-1
-8.43429E-2,-1.85829E-1
-9.49401E-2,-1.72012E-1
-1.05972E-1,-1.59805E-1
-1.13082E-1,-1.42105E-1
-1.19796E-1,-1.25122E-1
-1.42494E-1,-1.44218E-1
-1.68685E-1,-1.40914E-1
-1.90650E-1,-1.38450E-1
-2.17895E-1,-1.31332E-1
-2.3703E-1,-1.17187E-1
-2.61291E-1,-1.02096E-1
-2.82699E-1,-7.60498E-2
-3.02078E-1,-5.38482E-2
-3.16528E-1,-2.38037E-2
-3.22250E-1,0.05722E-1
-3.29299E-1,0.38055E-1
-3.27102E-1,0.73593E-1
-3.22052E-1,1.06292E-1
-3.10485E-1,1.38259E-1
-2.91473E-1,1.65481E-1
-2.71667E-1,1.93267E-1
-2.44781E-1,2.19169E-1
-2.16728E-1,2.37533E-1
-1.85234E-1,2.48756E-1
-1.51794E-1,2.52761E-1
-1.17279E-1,2.55493E-1
-8.33435E-2,2.47741E-1
-5.55725E-2,2.37854E-1
-2.82135E-2,2.21092E-1
-7.94982E-3,1.98875E-1
0.09597E-1,1.75178E-1
0.18714E-1,1.47018E-1
2.17399E-2,1.21719E-1
1.78031E-2,9.47914E-2
0.72708E-2,7.18002E-2
-4.20570E-3,5.23433E-2
-2.27928E-2,3.49311E-2
-4.17251E-2,2.63404E-2
-6.31065E-2,2.15225E-2
-8.38851E-2,2.51121E-2
-1.00364E-1,3.05099E-2
-1.18080E-1,3.93219E-2
-1.30317E-1,0.53337E-1
-1.38824E-1,0.68550E-1
-1.42120E-1,0.86532E-1
-1.41136E-1,1.03340E-1
-1.36894E-1,1.19155E-1
-1.26693E-1,1.31698E-1
-1.17172E-1,1.39663E-1
-1.02172E-1,1.48071E-1
-8.87908E-2,1.50589E-1
-7.63549E-2,1.50436E-1
-6.42547E-2,1.42875E-1
-5.62667E-2,1.30592E-1
-4.82711E-2,1.17622E-1
-4.83970E-2,1.05491E-1
-5.30357E-2,9.35707E-2
-6.32591E-2,7.81440E-2
-7.98950E-2,6.87637E-2
-9.57183E-2,5.90362E-2
-1.18904E-1,5.86319E-2
-1.39770E-1,0.63385E-1
-1.63742E-1,0.72174E-1
-1.85211E-1,0.86715E-1
-2.03643E-1,1.06704E-1
-2.18444E-1,1.34399E-1
-2.27066E-1,1.64764E-1
-2.34954E-1,1.97250E-1
-2.32338E-1,2.30560E-1
-2.24090E-1,2.61901E-1
-2.08740E-1,2.95379E-1
-1.88690E-1,3.24707E-1
-1.67480E-1,3.51715E-1
-1.37420E-1,3.72619E-1
-1.07391E-1,3.88351E-1
-6.94580E-2,4.01031E-1
-3.41949E-2,4.03839E-1
0.01129E-1,4.03961E-1
0.36895E-1,3.98529E-1
0.66391E-1,3.85833E-1
0.98281E-1,3.68087E-1
1.22650E-1,3.47122E-1

```

```

3.59283E-1,-5.1828E-1
2.63305E-1,-5.71289E-1
1.68884E-1,-6.11022E-1
0.57983E-1,-6.33728E-1
-4.93774E-2,-6.39282E-1
-1.60400E-1,-6.23291E-1
-2.65380E-1,-5.94177E-1
-3.62487E-1,-5.39215E-1
-4.55383E-1,-4.77294E-1
-5.27404E-1,-3.98681E-1
-5.93566E-1,-3.02581E-1
-6.36840E-1,-2.10723E-1
-6.69006E-1,-1.01470E-1
-6.84875E-1,-3.11279E-3
-6.74591E-1,1.09191E-1
-6.61071E-1,2.05871E-1
-6.19934E-1,3.09936E-1
-5.72448E-1,3.99047E-1
-5.07354E-1,4.76959E-1
-4.35333E-1,5.47210E-1
-3.51257E-1,6.02966E-1
-2.60711E-1,6.47186E-1
-1.67297E-1,6.77093E-1
-7.21130E-2,6.87164E-1
0.22338E-1,6.82647E-1
1.14685E-1,6.67907E-1
2.04589E-1,6.35070E-1
2.89917E-1,5.91125E-1
3.57971E-1,5.35522E-1
4.25720E-1,4.66552E-1
4.69772E-1,3.95584E-1
5.06713E-1,3.10882E-1
5.28015E-1,2.26257E-1
5.27252E-1,1.40655E-1
5.18646E-1,0.59143E-1
4.90478E-1,-1.84326E-2
4.51385E-1,-9.04541E-2
3.95965E-1,-1.50116E-1
3.33435E-1,-1.92413E-1
2.73407E-1,-2.18536E-1
2.02026E-1,-2.37731E-1
1.29959E-1,-2.30773E-1
0.73127E-1,-2.09182E-1
0.26397E-1,-1.78573E-1
-1.07421E-2,-1.41822E-1
-3.89061E-2,-9.48371E-2
-4.79736E-2,-4.99687E-2
-5.16929E-2,-4.66537E-3
-3.57017E-2,3.64494E-2
-1.29776E-2,6.47735E-2
1.39770E-2,8.89511E-2
4.88891E-2,1.01768E-1
7.93151E-2,1.04362E-1
1.10023E-1,1.0075E-1
1.41891E-1,0.87783E-1
1.67343E-1,0.65467E-1
1.82861E-1,0.36582E-1
1.91207E-1,0.10604E-1
1.97608E-1,-2.13012E-2
-1.23695E-1,-1.08470E-1
-1.25251E-1,-9.37194E-2
-1.25541E-1,-7.98645E-2
-1.22970E-1,-6.63070E-2
-1.22360E-1,-5.30242E-2
-1.16859E-1,-3.75976E-2
-1.12079E-1,-2.52571E-2
-1.04408E-1,-1.22451E-2
-9.41696E-2,-2.85339E-3
-8.60137E-2,0.65612E-2
-7.42721E-2,1.67770E-2
-6.29997E-2,2.10113E-2
-5.13649E-2,2.70500E-2
-3.70903E-2,2.79312E-2
-2.23636E-2,3.11737E-2
-4.88567E-3,2.95667E-2
0.76980E-2,2.30617E-2
2.12144E-2,1.51166E-2
3.22628E-2,0.35629E-2
4.43420E-2,-5.93757E-3
5.34286E-2,-2.13012E-2
5.70945E-2,-3.43360E-2
6.02874E-2,-5.15556E-2
5.83572E-2,-6.84280E-2
5.76591E-2,-8.29315E-2
5.09834E-2,-9.81216E-2
4.14085E-2,-1.08467E-1
3.11584E-2,-1.22299E-1
0.16174E-1,-1.32377E-1
0.05241E-1,-1.40220E-1
-1.05514E-2,-1.44538E-1
-2.23693E-2,-1.46026E-1
-3.95813E-2,-1.47811E-1
-5.14373E-2,-1.44943E-1
-6.56280E-2,-1.45080E-1
-7.87887E-2,-1.37855E-1
-8.68377E-2,-1.31126E-1
-9.99336E-2,-1.23558E-1
-1.07917E-1,-1.11091E-1
-1.15081E-1,-1.02592E-1
-1.19514E-1,-8.92334E-2
-1.19995E-1,-8.13980E-2
-1.23710E-1,-6.97708E-2
-1.18469E-1,-5.74646E-2
-1.14555E-1,-4.95376E-2
-1.07177E-1,-3.98864E-2
-1.01104E-1,-3.56292E-2
-9.20257E-2,-2.86331E-2
-8.04405E-2,-3.11355E-2
-7.30018E-2,-3.25317E-2
-6.34918E-2,-3.81126E-2
-6.01005E-2,-4.65812E-2
-5.62019E-2,-5.58090E-2
-5.49583E-2,-7.04879E-2
-5.84945E-2,-8.27026E-2
-6.23168E-2,-9.58557E-2
-7.31201E-2,-1.09207E-1
-8.35647E-2,-1.21238E-1
-1.01608E-1,-1.34170E-1
-1.20605E-1,-1.38549E-1
1.43631E-1,3.22998E-1
1.57135E-1,2.92297E-1
1.65374E-1,2.63458E-1
1.67587E-1,2.31552E-1
1.61018E-1,2.01583E-1
1.51039E-1,1.76162E-1
1.35719E-1,1.51962E-1
1.16798E-1,1.36108E-1
0.94650E-1,1.25770E-1
6.72531E-2,1.23870E-1
0.41503E-1,1.27464E-1
0.17738E-1,1.33758E-1
-1.52587E-5,1.50421E-1
-1.29241E-2,1.70471E-1
-2.19421E-2,1.93801E-1
-2.49023E-2,2.18109E-1
-2.14538E-2,2.43118E-1
-1.02081E-2,2.66693E-1
0.05447E-1,2.89154E-1
0.23757E-1,3.08990E-1
0.43365E-1,3.21380E-1
0.66055E-1,3.30673E-1
0.94528E-1,3.31939E-1
1.21704E-1,3.30322E-1
1.48223E-1,3.26019E-1
1.72637E-1,3.16955E-1
1.92688E-1,3.02520E-1
2.12188E-1,2.83081E-1
2.28942E-1,2.62542E-1
2.43385E-1,2.41676E-1
2.47390E-1,2.19299E-1
2.45956E-1,1.93679E-1
2.40142E-1,1.68945E-1
2.29843E-1,1.45431E-1
2.16583E-1,1.28723E-1
1.96716E-1,1.17095E-1
1.72332E-1,1.11709E-1
1.48071E-1,1.13037E-1
1.26800E-1,1.21475E-1
1.07955E-1,1.37741E-1
0.96923E-1,1.59675E-1
0.91552E-1,1.83631E-1
0.96138E-1,2.09381E-1
1.04896E-1,2.32330E-1
1.23413E-1,2.53646E-1
1.43600E-1,2.69577E-1
1.67388E-1,2.80914E-1
1.97204E-1,2.88482E-1
2.25280E-1,2.87536E-1
2.52960E-1,2.83477E-1
2.77069E-1,2.73284E-1
2.99911E-1,2.56362E-1
3.21319E-1,2.36618E-1
3.38470E-1,2.17971E-1
3.48648E-1,1.94931E-1
3.56613E-1,1.67358E-1
3.57772E-1,1.40747E-1
3.56933E-1,1.14807E-1
3.51516E-1,0.92895E-1
3.39691E-1,0.73761E-1
END

```

Anexo 2 – Conteúdo do arquivo DATA06.D1 contendo dados da medida experimental dos parâmetros S da AVA-974.

```

! Network Analyzer HP8722D.06.14 Serial No. US36140452
! Hewlett-Packard
! 3 Nov 2013 10:57:57
! Frequency S11 S21 S12 S22
# HZ S DB R 50
1000000000 -.2119 111.3 -47.593 -164.78 -48.143 -153.45 -.2388 111.59
1037500000 -.1728 102.09 -47.565 173.43 -47.394 -176.9 -.0373 102.79
1075000000 -.1836 92.33 -47.103 165.46 -47.088 171.45 -.2390 92.455
1112500000 -.1189 82.527 -45.663 154.68 -45.208 165.78 .0197 82.583
1150000000 -.1585 72.287 -43.605 138.75 -43.328 145.64 -.2367 72.893
1187500000 -.1230 61.153 -42.665 119.79 -41.692 127.86 -.0221 61.613
1225000000 -.1929 51.154 -41.814 103.75 -40.199 108.65 -.2820 52.406
1262500000 -.1915 39.688 -40.978 92.953 -39.613 88.066 -.2534 39.407
1300000000 -.2261 29.144 -39.259 75.711 -38.656 73.862 -.2909 30.299
1337500000 -.2966 17.124 -38.403 57.637 -37.74 53.483 -.4156 17.163
1375000000 -.3172 5.8173 -36.904 38.78 -37.287 32.757 -.4452 6.6989
1412500000 -.4708 -6.7154 -36.87 19.598 -37.536 20.139 -.6555 -5.7527
1450000000 -.6145 -18.446 -36.684 5.029 -36.163 9.4867 -.7590 -16.81
1487500000 -.7978 -30.693 -35.819 -6.2141 -35.033 -9.5581 -.8745 -28.825
1525000000 -.9914 -42.175 -34.555 -26.281 -34.47 -29.248 -1.1147 -40.257
1562500000 -1.1466 -54.182 -34.855 -40.329 -34.777 -44.231 -1.1629 -52.913
1600000000 -1.2534 -65.584 -33.439 -48.528 -33.956 -48.819 -1.446 -63.143
1637500000 -1.4451 -78.297 -32.14 -65.392 -32.159 -63.853 -1.5019 -76.613
1675000000 -1.6628 -89.543 -30.813 -81.762 -30.149 -77.002 -1.6225 -86.63
1712500000 -2.0167 -101.56 -29.683 -100.28 -28.588 -105.66 -1.9257 -100.64
1750000000 -2.2493 -111.59 -28.444 -121.51 -28.313 -123.82 -1.9565 -110.15
1787500000 -2.4104 -121.79 -28.121 -141.62 -27.424 -147.4 -2.508 -123.25
1825000000 -2.4832 -132.44 -26.997 -159.91 -27.042 -167.91 -2.6748 -133.31
1862500000 -2.7044 -142.91 -26.508 176.15 -27.288 169.97 -3.3877 -142.05
1900000000 -2.8513 -153.17 -26.852 157.02 -27.545 156.36 -3.1206 -150.16
1937500000 -2.8857 -162.68 -26.594 143.46 -26.997 142.22 -3.2242 -159.7
1975000000 -2.9226 -174 -25.493 122.07 -26.052 123.97 -3.1905 -172.39
2012500000 -3.0354 175.49 -25.804 95.14 -25.662 97.966 -3.7005 177.61
2050000000 -3.274 164.16 -27.936 77.62 -27.445 78.946 -3.8893 168.8
2087500000 -3.437 153.37 -28.696 76.782 -27.813 75.233 -3.8443 159.29
2125000000 -3.709 141.31 -27.575 73.548 -26.943 68.916 -3.8509 148.21
2162500000 -4.0367 129.5 -25.911 63.976 -25.097 55.524 -4.09 135.58
2200000000 -4.3932 116.16 -23.838 49.833 -23.838 38.098 -4.3359 123.08
2237500000 -5.05 102.01 -21.949 28.808 -22.421 19.436 -5.1246 109.22
2275000000 -6.0065 86.429 -20.271 6.2471 -21.051 -4.4536 -5.8327 95.442
2312500000 -7.4339 70.561 -19.199 -21.772 -20.614 -27.874 -7.0126 83.009
2350000000 -9.4309 60.057 -19.663 -48.366 -20.944 -53.363 -8.0019 67.979
2387500000 -9.9967 46.57 -20.064 -65.961 -21.53 -68.28 -9.2699 52.902
2425000000 -11.351 22.279 -20.079 -84.044 -21.39 -85.338 -10.823 32.748
2462500000 -13.196 -5.6264 -19.685 -100.37 -20.995 -99.054 -12.409 9.5512
2500000000 -14.153 -42.635 -18.926 -117.74 -20.027 -117.7 -13.776 -24.472
2537500000 -14.022 -86.346 -18.115 -139 -19.574 -139.51 -14.163 -66.936
2575000000 -13.742 -124.78 -17.568 -165.86 -19.329 -160.31 -13.159 -104.25
2612500000 -13.642 -142.82 -18.641 169.49 -19.59 177.7 -11.558 -134.59
2650000000 -11.376 -153.88 -19.157 155.26 -19.652 160.72 -10.01 -157.86
2687500000 -9.401 -169.19 -18.966 137.69 -19.272 140.49 -8.9916 -175.66
2725000000 -7.9685 174.26 -18.748 116.95 -19.864 119.3 -8.0414 168.94
2762500000 -7.3515 159.43 -19.536 93.962 -20.234 101.72 -7.5226 156.33
2800000000 -6.8512 148.47 -20.002 80.615 -20.812 87.043 -7.0111 146.77
2837500000 -6.2567 138.83 -19.668 62.367 -19.969 71.693 -6.2504 136.59
2875000000 -5.6563 128.3 -19.545 45.183 -19.783 50.423 -5.7313 126.47
2912500000 -5.1769 118.43 -19.532 20.912 -20.001 29.176 -5.3675 116.55
2950000000 -4.8511 108.16 -20.71 .0755 -20.615 8.6943 -4.7702 107.65
2987500000 -4.4931 99.029 -21.775 -17.275 -21.471 -7.24 -4.5036 97.537
3025000000 -4.2095 88.669 -22.251 -29.014 -21.503 -23.195 -4.0674 86.401
3062500000 -3.9915 79.308 -22.335 -48.295 -21.602 -39.467 -4.1726 77.577
3100000000 -3.8484 69.255 -23.323 -63.009 -22.249 -60.705 -3.9847 66.09
3137500000 -3.7338 59.216 -24.003 -78.499 -22.772 -71.373 -4.0912 58.972
3175000000 -3.7454 49.042 -24.209 -86.322 -23.133 -91.314 -4.1575 48.238
3212500000 -3.8392 39.309 -23.531 -106.87 -23.352 -100.39 -3.998 41.851
3250000000 -3.9641 30.734 -24.322 -119.75 -22.946 -120.18 -4.0963 31.689
3287500000 -4.0395 21.621 -23.761 -136.55 -23.077 -135.44 -3.8403 23.59
3325000000 -4.0512 13.818 -24.207 -154.88 -23.211 -157.36 -4.089 14.098
3362500000 -4.0161 4.4412 -24.507 -172.26 -23.962 -173.7 -3.8349 4.8669
3400000000 -4.0037 -4.3877 -24.488 171.4 -23.839 168.13 -4.1051 -4.3396
3437500000 -4.0191 -13.887 -24.443 147.03 -24.948 147.97 -4.0371 -14.122
3475000000 -3.9778 -23.373 -26.413 124.73 -25.556 130.73 -4.1948 -23.235
3512500000 -4.0328 -32.938 -27.838 112.28 -27.093 112.92 -4.2449 -32.316
3550000000 -4.0092 -42.516 -30.073 95.647 -28.535 95.381 -4.2297 -41.262
3587500000 -3.9973 -52.954 -31.886 96.1 -31.663 93.215 -4.2066 -50.331
3625000000 -4.1499 -62.619 -31.935 92.237 -30.2 94.758 -4.2302 -60.125
3662500000 -4.2516 -71.834 -31.667 90.871 -30.427 79.935 -4.1186 -69.7
3700000000 -4.2463 -80.318 -30.722 76.595 -30.026 75.914 -4.3269 -79.14
3737500000 -4.1877 -89.669 -30.555 69.311 -29.009 56.523 -4.1523 -88.224
3775000000 -4.0641 -98.665 -29.32 54.23 -29.793 43.84 -4.2156 -96.317
3812500000 -3.9837 -107.9 -28.668 35.793 -29.217 28.748 -3.9268 -107.29
3850000000 -3.8409 -117.41 -29.462 15.804 -29.542 16.769 -3.9414 -115.35

```

3887500000	-3.7637	-126.41	-29.484	3.3028	-29.775	-4.2476	-3.8787	-127.21
3925000000	-3.584	-136.29	-31.169	-18.081	-31.163	-9.6433	-3.7171	-134.14
3962500000	-3.4967	-145.28	-32.391	-12.925	-30.631	-18.986	-3.799	-144.9
4000000000	-3.4128	-155.47	-31.42	-25.457	-30.606	-29.237	-3.5103	-152.24
4037500000	-3.4467	-164.36	-31.362	-26.8	-30.295	-39.978	-3.7295	-162.02
4075000000	-3.5598	-172.81	-29.689	-40.526	-29.676	-49.704	-3.3226	-169.98
4112500000	-3.4629	180	-29.037	-53.994	-28.717	-67.876	-3.4727	-179
4150000000	-3.3781	171.61	-28.059	-74.593	-29.685	-83.125	-3.2671	172.36
4187500000	-3.1735	163.23	-29.593	-89.821	-28.91	-92.311	-3.3418	164.68
4225000000	-3.1025	154.81	-28.551	-92.267	-29.598	-109.51	-3.2306	155.84
4262500000	-3.0314	146.15	-27.507	-111.43	-28.988	-113.28	-3.1738	148.23
4300000000	-3.0576	137.92	-27.486	-126.45	-28.058	-131.93	-3.1442	139.27
4337500000	-3.0651	129.68	-27.505	-139.54	-28.409	-146.86	-3.2058	131.59
4375000000	-3.0587	121.28	-26.519	-152.75	-28.669	-156.68	-3.238	123.72
4412500000	-3.1453	113.18	-26.77	-170.45	-27.595	-165.61	-3.3473	116.15
4450000000	-3.3049	105.3	-26.123	178.24	-26.99	174.33	-3.3415	108.67
4487500000	-3.3883	97.792	-26.42	159.52	-27.493	163.06	-3.4573	101.43
4525000000	-3.5144	90.043	-26.267	151.64	-27.017	149.5	-3.411	93.078
4562500000	-3.7173	82.205	-26.011	136.24	-26.688	142.46	-3.5796	86.011
4600000000	-3.8965	75.299	-25.15	129.21	-25.438	124.85	-3.6123	76.595
4637500000	-3.9919	67.253	-23.988	107.59	-25.154	115.51	-3.8218	69.961
4675000000	-4.1016	59.709	-24.138	95.264	-23.694	92.21	-4.1046	59.815
4712500000	-4.3997	50.496	-23.144	77.651	-24.964	79.161	-4.3495	53.183
4750000000	-4.7407	42.193	-23.285	61.53	-23.539	69.221	-4.8792	44.048
4787500000	-5.2434	33.94	-22.595	48.278	-22.67	51.126	-5.0147	36.413
4825000000	-5.6394	26.283	-21.831	30.254	-21.955	32.893	-5.7151	27.566
4862500000	-6.1182	17.92	-21.572	7.5325	-21.858	12.428	-6.09	19.184
4900000000	-6.6008	9.4785	-22.87	-7.663	-22.126	-2.8207	-6.9059	11.011
4937500000	-7.1511	0	-22.305	-15.145	-22.282	-16.981	-7.4715	1.49
4975000000	-7.9525	-10.511	-21.696	-31.481	-21.38	-28.157	-8.3721	-6.8527
5012500000	-8.8367	-20.121	-21.297	-46.528	-21.039	-47.681	-9.3861	-17.548
5050000000	-9.9741	-31.001	-21.11	-60.756	-20.712	-60.551	-10.701	-26.553
5087500000	-11.224	-41.567	-20.096	-75.071	-19.985	-77.384	-12.215	-36.049
5125000000	-12.923	-52.791	-19.548	-93.307	-19.226	-94.048	-13.892	-43.672
5162500000	-14.734	-63.923	-18.791	-111.32	-18.903	-115.5	-15.627	-52.528
5200000000	-17.016	-79.459	-18.561	-131.55	-18.854	-132.24	-17.837	-62.957
5237500000	-19.877	-95.988	-18.218	-149.89	-18.459	-150.97	-20.486	-78.198
5275000000	-23.265	-124.75	-18.189	-171.69	-18.334	-170.81	-24.341	-99.441
5312500000	-26.493	-171.66	-18.432	168.24	-18.369	168.69	-27.944	-139.49
5350000000	-25.766	135.99	-19.076	150.06	-18.888	149.21	-27.166	161.59
5387500000	-23.147	106.2	-19.595	133.91	-19.65	132.69	-23.38	122.26
5425000000	-20.811	89.471	-20.005	121.1	-19.988	119.26	-20.828	100.69
5462500000	-19.255	74.465	-19.79	105.72	-20.103	105.22	-19.242	87.091
5500000000	-18.599	63.578	-20.039	88.863	-19.952	90.258	-17.844	78.913
5537500000	-18.12	56.705	-20.286	73.949	-20.142	72.874	-16.482	69.417
5575000000	-17.444	52.619	-20.617	60.116	-20.577	59.271	-15.71	60.811
5612500000	-16.556	48.877	-20.526	46.975	-20.469	45.336	-14.592	53.027
5650000000	-15.388	41.799	-20.486	32.646	-20.398	31.834	-13.887	44.003
5687500000	-14.532	33.573	-20.165	18.825	-20.205	15.058	-13.322	33.639
5725000000	-13.697	22.876	-19.969	3.6516	-20.445	2.1217	-13.14	23.719
5762500000	-13.346	10.849	-19.533	-12.995	-19.936	-13.749	-13.175	12.877
5800000000	-13.398	-.2513	-19.722	-30.62	-19.894	-28.614	-13.282	4.0718
5837500000	-13.644	-10.268	-19.606	-45.802	-19.615	-46.191	-13.479	-4.8409
5875000000	-13.995	-18.77	-19.934	-63.467	-19.857	-62.685	-13.4	-14.273
5912500000	-14.031	-27.337	-20.046	-76.494	-19.956	-77.721	-13.715	-25.527
5950000000	-13.949	-38.485	-20.099	-92.825	-20.124	-92.368	-14.214	-36.263
5987500000	-14.014	-51.888	-20.292	-105.45	-19.818	-106.62	-14.835	-46.044
6025000000	-14.441	-66.403	-20.095	-120.21	-20.042	-122.11	-15.491	-56.464
6062500000	-15.173	-80.579	-20.137	-133.15	-19.817	-136.33	-16.203	-67.012
6100000000	-16.187	-94.447	-19.679	-147.41	-19.893	-151.13	-16.637	-77.713
6137500000	-17.221	-106.86	-19.462	-162.14	-19.57	-164.69	-17.202	-92.135
6175000000	-18.057	-119.9	-18.954	-177	-19.238	-179.64	-18.226	-107.91
6212500000	-18.847	-135.26	-18.449	166.43	-18.619	163.71	-19.433	-120.78
6250000000	-19.74	-149.94	-18.093	146.61	-18.4	143.73	-19.662	-131.2
6287500000	-20.545	-162.44	-18.387	128.28	-18.588	125.68	-19.177	-145.81
6325000000	-21.03	-168.3	-18.472	111.66	-18.919	108.34	-18.901	-163.27
6362500000	-20.172	-174.31	-18.743	95.574	-19.285	93.341	-19.242	-178.21
6400000000	-18.743	174.74	-18.778	79.36	-19.66	77.62	-19.175	168.77
6437500000	-17.643	159.81	-19.18	65.097	-19.887	66.351	-18.974	153.89
6475000000	-16.863	145.15	-19.022	51.538	-19.623	52.636	-18.819	140.3
6512500000	-16.336	130.74	-18.888	36.53	-19.238	39.008	-18.451	130.98
6550000000	-15.97	116.53	-18.724	19.902	-18.938	20.722	-17.83	122.06
6587500000	-15.995	102.78	-18.813	4.4783	-19.239	5.8379	-17.485	113.34
6625000000	-16.393	91.2	-18.549	-10.697	-18.946	-8.5913	-17.149	106.35
6662500000	-17.074	83.692	-18.585	-26.709	-18.723	-23.709	-16.744	98.895
6700000000	-17.306	80.432	-18.296	-42.442	-18.304	-41.2	-16.282	89.864
6737500000	-17.091	77.053	-18.311	-60.955	-18.456	-59.021	-16.227	79.509
6775000000	-16.659	72.764	-18.489	-77.293	-18.481	-75.55	-16.45	71.351
6812500000	-16.089	64.841	-18.804	-93.285	-18.788	-92.449	-16.85	65.076
6850000000	-16.251	53.48	-18.901	-106.72	-19.028	-106.05	-17.182	61.081
6887500000	-17.258	45.681	-18.796	-122.26	-18.982	-120.1	-17.422	57.339
6925000000	-18.301	43.873	-18.885	-136.54	-18.815	-134.81	-17.706	54.702
6962500000	-18.836	45.188	-18.584	-152.01	-18.621	-150.41	-17.791	53.115
7000000000	-18.866	46.235	-18.624	-168.89	-18.446	-166.16	-18.049	50.088
7037500000	-18.916	47.135	-18.595	175.88	-18.329	176.76	-17.938	48.032
7075000000	-18.627	48.837	-18.526	159.94	-18.331	161.59	-18.216	44.301
7112500000	-17.872	49.213	-18.402	143.71	-18.123	144.07	-18.899	44.294

7150000000	-17.155	44.783	-18.577	127.15	-18.384	127.95	-18.934	48.047
7187500000	-16.898	38.911	-18.6	112.84	-18.28	112.35	-18.278	49.39
7225000000	-17.1	32.399	-18.474	96.559	-18.37	96.505	-17.787	46.28
7262500000	-17.814	29.585	-18.536	80.439	-18.294	80.57	-17.789	43.592
7300000000	-18.209	31.583	-18.592	63.968	-18.244	64.432	-17.573	43.506
7337500000	-18.234	33.753	-18.695	49.349	-18.267	48.124	-17.31	42.575
7375000000	-17.777	37.613	-18.486	33.422	-18.158	31.812	-16.861	42.63
7412500000	-16.814	37.756	-18.547	16.463	-18.284	14.924	-16.527	40.868
7450000000	-15.882	34.739	-18.689	-.0494	-18.371	-1.7001	-16.071	40.181
7487500000	-15.46	29.482	-18.891	-15.211	-18.524	-16.839	-15.526	37.457
7525000000	-15.536	26.463	-18.831	-30.138	-18.489	-33.891	-15.102	33.585
7562500000	-15.268	27.256	-18.819	-45.54	-18.787	-49.22	-14.661	30.814
7600000000	-14.428	25.302	-18.64	-61.613	-18.638	-65.955	-14.364	25.977
7637500000	-13.652	21.353	-18.691	-79.904	-18.917	-82.967	-14.066	23.692
7675000000	-12.933	14.479	-19.03	-97.05	-19.188	-99.22	-13.825	19.648
7712500000	-12.829	6.7085	-19.452	-113.02	-19.614	-114.79	-13.371	16.555
7750000000	-13.058	1.1934	-19.917	-126.65	-20.045	-127.7	-12.984	11.996
7787500000	-13.215	-1.8855	-19.991	-139.47	-20.003	-141.29	-12.572	5.842
7825000000	-13.124	-4.5978	-20.064	-152.08	-20.105	-153.77	-12.669	-.7745
7862500000	-12.843	-7.5229	-19.66	-165.91	-19.567	-167.78	-12.781	-6.4586
7900000000	-12.609	-12.17	-19.302	178.53	-19.314	175.57	-13.111	-9.819
7937500000	-12.529	-16.846	-19.079	161.17	-19.219	157.61	-13.188	-13.758
7975000000	-12.528	-20.045	-19.127	144.12	-19.499	141.46	-13.065	-15.907
8012500000	-12.248	-23.706	-19.209	127.35	-19.548	125.97	-12.972	-20.893
8050000000	-11.918	-28.954	-19.487	111.16	-19.659	110.51	-12.705	-25.293
8087500000	-11.785	-35.548	-19.726	95.977	-19.655	94.182	-12.807	-31.119
8125000000	-11.87	-41.828	-19.772	81.708	-19.991	78.933	-12.996	-35.77
8162500000	-12.175	-47.65	-19.802	67.618	-20.01	65.231	-13.202	-39.846
8200000000	-12.502	-52.007	-19.651	52.274	-19.996	49.978	-13.137	-44.806
8237500000	-12.724	-55.912	-19.75	37.597	-19.904	35.2	-13.376	-49.263
8275000000	-12.768	-60.135	-19.307	21.982	-19.866	18.975	-13.431	-53.932
8312500000	-13.063	-64.769	-19.248	5.6635	-19.862	2.9237	-13.688	-59.256
8350000000	-13.314	-69.223	-19.265	-10.782	-19.989	-13.318	-13.983	-64.778
8387500000	-13.541	-73.169	-19.246	-27.371	-20.241	-28.391	-14.423	-69.203
8425000000	-13.781	-77.612	-19.32	-44.033	-20.31	-42.34	-14.798	-73.235
8462500000	-14.143	-81.221	-19.399	-60.286	-20.092	-57.356	-15.085	-77.605
8500000000	-14.29	-83.779	-19.642	-75.973	-20.123	-73.244	-15.774	-80.651
8537500000	-14.149	-88.271	-19.708	-91.858	-20.219	-88.959	-15.851	-81.852
8575000000	-14.285	-95.657	-19.936	-106.93	-20.229	-103.11	-15.569	-86.684
8612500000	-14.907	-102.41	-19.832	-121.94	-20.134	-119	-15.732	-93.012
8650000000	-15.634	-106.97	-20.048	-139.11	-20.238	-135.64	-15.859	-99.373
8687500000	-16.344	-109.81	-20.343	-154.08	-20.478	-150.24	-16.154	-107.75
8725000000	-16.636	-111.28	-20.564	-168.43	-20.52	-164.69	-16.928	-116.65
8762500000	-16.53	-115.68	-20.714	177.96	-20.66	-178.51	-17.862	-123.89
8800000000	-16.644	-124.84	-20.696	163.68	-20.424	168.31	-18.931	-131.45
8837500000	-17.689	-134.01	-20.529	149.42	-20.005	153.05	-20.485	-135.85
8875000000	-18.89	-138.63	-20.433	133.37	-19.782	136.22	-21.756	-135.53
8912500000	-19.945	-143.29	-20.597	118.9	-19.85	119.02	-22.174	-134.23
8950000000	-21.047	-145.92	-20.546	104.76	-19.942	104.56	-22.156	-138.28
8987500000	-21.728	-150.15	-20.39	90.235	-19.694	89.206	-22.345	-147.21
9025000000	-22.504	-159.45	-20.091	75.414	-19.566	72.716	-23.069	-158.17
9062500000	-24.461	-167.87	-19.851	59.604	-19.505	56.154	-23.951	-169.68
9100000000	-26.825	-170.02	-19.664	42.87	-19.412	40.031	-25.077	177.78
9137500000	-27.742	-167.28	-19.514	24.824	-19.314	22.74	-26.178	161.5
9175000000	-27.716	-176.69	-19.661	7.494	-19.386	5.3394	-26.875	139.3
9212500000	-28.002	160.48	-19.867	-9.3425	-19.588	-12.605	-27.756	112.7
9250000000	-28.593	130.85	-20.118	-25.395	-20.027	-28.699	-28.047	87.439
9287500000	-27.9	94.065	-20.407	-41.082	-20.261	-43.62	-27.918	65.196
9325000000	-26.328	59.35	-20.603	-54.954	-20.485	-59.001	-27.407	48.746
9362500000	-24.681	33.353	-20.614	-69.105	-20.611	-73.525	-26.463	35.696
9400000000	-23.79	15.259	-20.505	-84.283	-20.577	-88.131	-25.604	25.416
9437500000	-22.949	6.3638	-20.437	-100.57	-20.495	-104.67	-24.629	19.422
9475000000	-21.723	-3.1407	-20.546	-117.16	-20.785	-121.52	-23.204	12.07
9512500000	-20.758	-12.925	-20.979	-132.49	-21.274	-136.45	-22.223	2.8207
9550000000	-19.805	-22.131	-21.02	-144.65	-21.44	-149.26	-21.352	-1.8361
9587500000	-19.344	-31.55	-20.761	-160.66	-21.397	-163.47	-20.125	-6.427
9625000000	-19.225	-38.699	-20.838	-175.49	-21.361	-177.6	-18.838	-14.064
9662500000	-19.161	-42.863	-20.728	169.41	-21.287	167.42	-18.052	-25.024
9700000000	-18.912	-43.941	-20.668	154.15	-21.294	152.18	-17.515	-35.262
9737500000	-18.09	-45.099	-20.611	137.86	-21.283	137.95	-17.384	-44.832
9775000000	-17.117	-49.853	-20.701	122.69	-21.122	122.43	-17.321	-53.398
9812500000	-16.519	-57.031	-20.532	107.16	-21.023	107.36	-17.47	-60.172
9850000000	-16.279	-64.054	-20.598	91.203	-20.918	91.02	-17.681	-66.298
9887500000	-16.158	-69.156	-20.542	74.777	-20.87	75.149	-17.988	-69.67
9925000000	-15.927	-73.692	-20.62	59.087	-21.018	58.41	-18.025	-71.009
9962500000	-15.599	-79.346	-20.517	42.837	-21.044	43.752	-17.402	-73.61
10000000000	-15.507	-86.315	-20.763	26.72	-21.01	27.578	-17.036	-80.413
10037500000	-15.808	-93.896	-20.722	11.137	-21.155	11.32	-16.973	-86.46
10075000000	-16.391	-98.88	-21.023	-5.3242	-21.392	-4.525	-16.945	-91.978
10112500000	-16.743	-101.05	-21.176	-19.579	-21.668	-18.268	-16.961	-99.441
10150000000	-16.696	-104.03	-21.263	-34.32	-21.565	-31.696	-17.376	-106.77
10187500000	-16.847	-108.56	-21.25	-49.051	-21.501	-46.052	-18.049	-112.22
10225000000	-17.24	-112.4	-21.326	-64.943	-21.233	-61.942	-18.669	-115.43
10262500000	-17.703	-116.12	-21.491	-78.576	-21.38	-76.829	-19.158	-117.9
10300000000	-18.391	-119.55	-21.384	-92.964	-21.178	-91.582	-19.592	-120.48
10337500000	-19.362	-120.95	-21.311	-107.34	-21.107	-107.25	-20.12	-124.12
10375000000	-20.019	-118.2	-21.089	-122.38	-20.913	-121.97	-21.095	-126.41

10412500000	-20.02	-115.8	-21.009	-137	-20.74	-138.62	-21.97	-124.95	
10450000000	-19.99	-118.11	-20.758	-152.94	-20.751	-153.77	-22.602	-122.66	
10487500000	-20.908	-121.48	-20.837	-168.04	-20.668	-170.36	-23.424	-119.2	
10525000000	-22.274	-118.54	-20.522	177.89	-20.681	175.1	-23.576	-113.08	
10562500000	-23.015	-107.96	-20.201	161.57	-20.459	159.52	-23.746	-110.61	
10600000000	-22.581	-98.179	-19.943	144.96	-20.278	144.84	-24.192	-105.84	
10637500000	-21.965	-91.178	-19.736	128.23	-19.834	127.75	-24.353	-99.261	
10675000000	-21.279	-84.615	-19.426	111	-19.758	109.5	-24.081	-86.747	
10712500000	-20.004	-76.56	-19.383	92.152	-19.736	93.067	-21.912	-75.343	
10750000000	-18.105	-73.681	-19.692	74.855	-19.701	75.88	-19.626	-75.767	
10787500000	-16.274	-76.36	-19.761	59.042	-19.843	59.771	-17.942	-79.78	
10825000000	-14.847	-82.267	-19.589	42.59	-19.542	43.797	-16.729	-84.014	
10862500000	-13.963	-89.37	-19.593	25.24	-19.511	25.643	-15.569	-89.541	
10900000000	-13.394	-95.423	-19.872	8.1038	-19.409	7.3869	-14.778	-96.049	
10937500000	-12.996	-100.59	-19.775	-7.001	-19.792	-10.732	-14.271	-102.19	
10975000000	-12.518	-104.46	-19.881	-26.281	-19.748	-26.82	-13.845	-106.57	
11012500000	-12.09	-109.02	-20.129	-41.094	-20.119	-45.52	-13.457	-110	
11050000000	-11.659	-113.36	-20.083	-58.902	-20.377	-60.206	-12.86	-113.45	
11087500000	-11.35	-118.1	-20.337	-73.983	-20.558	-77.75	-12.233	-118.19	
11125000000	-11.006	-122.72	-20.26	-92.464	-20.85	-92.072	-11.639	-123.39	
11162500000	-10.721	-127.12	-20.885	-108.16	-21.032	-110.27	-11.262	-128.68	
11200000000	-10.493	-131.59	-20.86	-124.47	-21.405	-122.92	-10.799	-134.27	
11237500000	-10.156	-135.84	-21.283	-140.07	-20.978	-140.5	-10.498	-139.75	
11275000000	-9.738	-140.87	-21.338	-155.2	-21.677	-156.29	-10.219	-145.92	
11312500000	-9.3806	-146.83	-21.675	-170.92	-21.482	-172.35	-10.038	-152.48	
11350000000	-9.1771	-153.32	-21.622	172.66	-22.148	171.14	-9.9049	-158.42	
11387500000	-9.0582	-160.07	-22.471	157.74	-22.182	158.04	-9.831	-164.86	
11425000000	-9.1113	-167.1	-22.024	147	-22.362	142.47	-9.8818	-170.76	
11462500000	-9.2467	-174.17	-22.013	128.78	-22.166	127.72	-9.9662	-176.35	
11500000000	-9.5441	178.86	-21.893	114.45	-22.72	109.67	-9.92	177.97	
11537500000	-9.9316	172.61	-22.281	94.452	-22.955	99.175	-10.091	171.84	
11575000000	-10.463	166.6	-22.79	84.265	-22.762	82.202	-10.335	165.89	
11612500000	-11.127	160.96	-22.333	67.739	-22.765	70.108	-10.62	160.52	
11650000000	-11.885	156.71	-22.514	52.723	-22.447	51.029	-10.951	154.08	
11687500000	-12.402	153.41	-22.435	35.229	-22.862	36.851	-11.379	148	
11725000000	-12.943	148.86	-22.908	20.229	-22.841	19.418	-12.022	141.97	
11762500000	-13.705	144.02	-23.021	6.5959	-23.345	7.5311	-12.771	136.99	
11800000000	-14.665	141.18	-23.044	-5.7967	-22.738	-5.864	-13.659	132.84	
11837500000	-15.484	138.57	-22.353	-22.217	-22.663	-23.74	-14.251	128.41	
11875000000	-16.234	135.81	-22.772	-40.221	-22.664	-39.566	-15.26	123.04	
11912500000	-17.234	131.71	-22.826	-53.107	-22.735	-54.903	-16.576	119.31	
11950000000	-18.592	126.97	-22.698	-66.61	-22.424	-70.072	-18.047	118	
11987500000	-20.542	122.06	-22.039	-82.363	-22.383	-87.567	-19.629	116.41	
12025000000	-23.808	117.88	-22.052	-102.36	-22.337	-104.25	-21.865	116.43	
12062500000	-29.586	128.59	-22.201	-117.48	-22.414	-121.6	-24.812	124.33	
12100000000	-32.504	-166.73	-22.098	-133.4	-22.602	-137.73	-27.377	143.91	
12137500000	-26.292	-138.51	-22.009	-150.06	-22.646	-153.82	-26.886	179.43	
12175000000	-22.213	-134.95	-21.876	-166.54	-22.81	-170.64	-23.662	-166.71	
12212500000	-19.313	-139.18	-21.909	176.39	-22.871	174.55	-21.375	-162.97	
12250000000	-17.411	-145.21	-21.812	160	-22.938	156.6	-19.321	-162.36	
12287500000	-16.14	-151.98	-21.939	141.08	-23.425	141.74	-17.716	-167.25	
12325000000	-15.326	-159.47	-22.26	125.56	-23.28	126.8	-16.804	-172.95	
12362500000	-14.99	-167.38	-22.187	108.54	-23.522	111.22	-16.127	-177.22	
12400000000	-15.012	-173.61	-22.371	93.089	-23.402	95.915	-15.618	178.33	
12437500000	-15.233	-178.97	-22.269	75.21	-23.54	80.04	-15.361	174.5	
12475000000	-15.397	178.12	-22.508	58.659	-23.256	63.843	-15.043	171.38	
12512500000	-15.455	176	-22.513	40.559	-23.625	47.002	-14.639	167.79	
12550000000	-15.443	173.01	-23.279	24.167	-23.722	33.367	-14.412	163.67	
12587500000	-15.684	170.01	-23.111	11.023	-23.654	16.425	-14.403	159.34	
12625000000	-16.032	167.67	-23.388	-6.6852	-23.868	2.531	-14.437	154.8	
12662500000	-16.426	165.79	-23.499	-21.933	-23.68	-13.685	-14.723	149.26	
12700000000	-16.935	164.83	-23.89	-37.248	-23.656	-27.951	-15.338	144.96	
12737500000	-17.532	164.41	-23.711	-51.205	-23.437	-45.854	-15.923	141	
12775000000	-18.103	166.52	-24.009	-70.54	-23.734	-60.094	-16.813	138.48	
12812500000	-18.639	169.49	-24.486	-81.716	-23.318	-76.038	-18.083	139.91	
12850000000	-19.151	174.7	-24.175	-96.439	-23.574	-93.27	-19.18	145.4	
12887500000	-19.521	-178.7	-24.333	-110.93	-23.676	-107.51	-20.017	152.63	
12925000000	-19.362	-170.15	-23.982	-125.24	-23.43	-122.46	-20.231	163.08	
12962500000	-18.618	-161.23	-23.915	-141.81	-23.211	-138.29	-19.565	173.75	
13000000000	-17.337	-154.16	-23.633	-156.97	-22.871	-156.36	-18.298	-178.92	
13037500000	-15.615	-151.08	-23.746	-175.83	-23.138	-173.04	-16.867	-175.1	
13075000000	-14.015	-151.31	-23.768	171.33	-22.631	170.65	-15.615	-174.35	
13112500000	-12.641	-154.72	-23.279	152.98	-22.807	150.73	-14.657	-175.39	
13150000000	-11.584	-159.38	-23.509	135.42	-22.85	133.89	-13.717	-175.56	
13187500000	-10.715	-164.64	-23.583	116.05	-23.292	115.04	-12.698	-177.08	
13225000000	-10.089	-170.11	-24.441	102.68	-23.46	99.746	-11.747	179.96	
13262500000	-9.5652	-175.47	-23.739	88.04	-24.068	80.91	-10.939	176.71	
13300000000	-9.1978	178.98	-24.522	68.938	-24.296	71.487	-10.193	172.78	
13337500000	-8.9307	174.36	-24.227	58.598	-23.679	51.908	-9.5022	167.87	
13375000000	-8.6864	169.69	-24.125	39.004	-24.583	36.138	-8.9925	162.8	
13412500000	-8.4195	165.25	-23.941	22.955	-24.26	20.631	-8.5096	157.58	
13450000000	-8.2872	160.22	-24.83	3.3151	-24.852	4.8477	-8.2782	152.37	
13487500000	-8.1894	155.73	-24.713	-5.511	-24.662	-10.298	-8.0733	146.58	
13525000000	-8.136	150.91	-24.509	-27.521	-25.093	-25.047	-7.9351	142.08	
13562500000	-8.0591	145.36	-25.255	-39.191	-24.352	-40.343	-7.932	136.75	
13600000000	-8.06	140.23	-25.209	-58.505	-24.922	-59.84	-7.9042	133.16	
13637500000	-8.2398	135.06	-25.794	-69.192	-25.127	-72.739	-8.0212	127.84	

13675000000	-8.5433	131.04	-24.908	-88.209	-25.261	-91.706	-7.9895	123.87
13712500000	-8.8983	127.12	-26.202	-104.25	-25.533	-106.16	-8.1319	119.72
13750000000	-9.2001	123.66	-25.559	-118.53	-25.922	-126	-8.2755	115.24
13787500000	-9.4735	120.33	-26.699	-137.07	-26.584	-137	-8.4336	111.88
13825000000	-9.807	116.37	-26.582	-147.14	-26.731	-155.38	-8.6486	107.31
13862500000	-10.28	112.61	-26.895	-161.8	-27.752	-163.89	-8.9625	103.45
13900000000	-10.841	108.56	-26.385	-173.86	-26.813	-175.38	-9.4152	98.88
13937500000	-11.562	105.19	-26.613	168.08	-26.658	167.16	-9.9319	95.946
13975000000	-12.437	102.13	-26.254	154.94	-26.674	149.71	-10.617	93.056
14012500000	-13.619	100.1	-26.38	134.39	-27.14	132.68	-11.322	91.192
14050000000	-14.999	100.49	-26.958	121.92	-27.481	117.51	-12.119	89.841
14087500000	-16.397	104.48	-26.827	104.54	-28.047	102.98	-12.971	89.688
14125000000	-17.679	113.3	-27.522	92.328	-28.327	92.899	-13.823	92.179
14162500000	-18.161	126.4	-26.928	78.76	-28.013	78.839	-14.538	94.353
14200000000	-17.693	138.56	-26.939	61.657	-28.277	64.74	-15.245	100.2
14237500000	-16.428	147.04	-26.779	47.082	-28.216	51.678	-15.487	107.06
14275000000	-15.111	150.15	-26.972	29.883	-28.194	39.058	-15.207	113.79
14312500000	-13.944	150.42	-27.019	15.544	-27.652	26.711	-14.737	119.59
14350000000	-13.068	149.38	-26.939	-1.3582	-27.153	10.456	-13.928	123.61
14387500000	-12.248	148.11	-27.132	-16.074	-26.615	-4.7214	-12.982	125.19
14425000000	-11.504	146.23	-26.962	-33.919	-26.188	-25.477	-12.08	125.38
14462500000	-10.869	142.97	-27.617	-48.458	-26.712	-41.556	-11.342	124.22
14500000000	-10.469	139.32	-27.155	-63.273	-26.338	-58.118	-10.579	121.63
14537500000	-10.143	136.18	-27.553	-78.883	-26.457	-74.295	-10.045	119
14575000000	-9.8079	133.37	-27.061	-93.594	-25.975	-92.944	-9.5028	115.41
14612500000	-9.4799	130.11	-27.503	-113.26	-26.691	-110.4	-9.2599	111.89
14650000000	-9.1835	126.15	-27.707	-124.11	-26.368	-124.27	-8.9751	108.63
14687500000	-9.0355	121.74	-27.699	-141.48	-26.832	-142.45	-8.7722	105.05
14725000000	-9.0681	117.67	-27.641	-152.57	-26.588	-154.71	-8.645	101.39
14762500000	-9.0689	113.95	-27.127	-169.19	-26.229	-173.52	-8.4965	98.462
14800000000	-9.154	109.71	-26.925	174.65	-26.326	170.42	-8.4605	94.918
14837500000	-9.2806	105.87	-26.708	156.38	-26.195	152.6	-8.3737	91.445
14875000000	-9.4996	102.09	-26.842	142.99	-26.241	138.72	-8.4819	88.325
14912500000	-9.8238	98.84	-25.967	124.69	-25.632	118.99	-8.4982	84.195
14950000000	-10.255	95.764	-26.293	106.84	-25.908	102.15	-8.7129	80.302
14987500000	-10.701	92.719	-25.534	88.763	-25.428	82.347	-8.9756	76.216
15025000000	-11.392	90.014	-26.173	67.379	-25.884	63.62	-9.3506	73.632
15062500000	-12.132	88.594	-26.075	53.027	-25.757	45.894	-9.8219	70.808
15100000000	-12.972	89.065	-26.21	34.625	-26.069	27.659	-10.296	69.14
15137500000	-13.822	90.786	-26.102	18.07	-26.032	9.4441	-10.947	67.964
15175000000	-14.639	95.078	-26.334	-3.6076	-26.53	-10.992	-11.522	68.421
15212500000	-15.135	102.42	-27.059	-18.406	-27.325	-26.282	-12.071	69.8
15250000000	-15.126	110.16	-26.976	-32.366	-27.371	-41.973	-12.486	72.727
15287500000	-14.608	116.68	-26.906	-47.704	-27.907	-57.928	-12.755	76.454
15325000000	-13.848	121.23	-26.684	-65.602	-27.941	-72.618	-12.623	79.501
15362500000	-12.918	123.88	-26.88	-83.513	-28.044	-88.425	-12.346	81.742
15400000000	-12.009	123.73	-26.908	-100.99	-27.999	-105.69	-12.039	82.712
15437500000	-11.203	122.54	-27.292	-117.76	-28.437	-123.12	-11.576	83.584
15475000000	-10.483	119.99	-27.342	-132.49	-28.697	-138.54	-11.217	83.213
15512500000	-9.8748	117.47	-27.332	-151.14	-29.006	-155.53	-10.838	83.22
15550000000	-9.3794	114.02	-27.558	-166.97	-29.491	-168.69	-10.454	81.542
15587500000	-9.0016	111.2	-27.539	174.64	-29.423	175.69	-10.167	79.908
15625000000	-8.6449	107.98	-28.057	159.11	-29.818	160.44	-9.9738	78.099
15662500000	-8.4302	104.32	-28.04	140.8	-29.919	143.59	-9.712	76.016
15700000000	-8.2721	100.28	-28.716	123.82	-30.813	129.96	-9.4964	73.695
15737500000	-8.1564	96.426	-28.866	108.88	-30.509	118.24	-9.3301	70.87
15775000000	-8.1402	92.572	-29.188	92.597	-30.728	102.37	-9.2784	68.573
15812500000	-8.2342	89.431	-29.361	75.833	-30.719	89.315	-9.2874	65.356
15850000000	-8.4004	85.765	-30.219	58.078	-31.037	73.011	-9.3178	62.68
15887500000	-8.5613	82.798	-30.895	44.474	-31.52	62.099	-9.4241	59.538
15925000000	-8.737	79.437	-31.886	31.461	-31.451	49.301	-9.5117	56.876
15962500000	-9.0643	76.282	-32.347	22.927	-31.069	39.731	-9.8251	54.032
16000000000	-9.4874	73.891	-32.144	10.508	-30.359	23.207	-10.028	52.285

Anexo 3 – Conteúdo do arquivo DATA02.D1 contendo dados da medida experimental do parâmetro S11 da ESEAVA-974.

```

CITIFILE A.01.00
#NA VERSION HP8722D.06.14
NAME DATA
VAR FREQ MAG 401
DATA S[1,1] RI
SEG_LIST BEGIN
SEG_1000000000 16000000000 401
SEG_LIST_END
BEGIN
-2.71667E-1,9.42688E-1
-1.20361E-1,9.80346E-1
0.51269E-1,9.82299E-1
2.20703E-1,9.63867E-1
3.84429E-1,9.06921E-1
5.51483E-1,8.20953E-1
6.81610E-1,7.08587E-1
8.09997E-1,5.59082E-1
8.91967E-1,4.00634E-1
9.46044E-1,2.06054E-1
9.62493E-1,0.23498E-1
9.33105E-1,-1.74987E-1
8.71643E-1,-3.54492E-1
7.67272E-1,-5.23559E-1
6.36291E-1,-6.54907E-1
4.75341E-1,-7.64404E-1
3.10394E-1,-8.29711E-1
1.26007E-1,-8.58642E-1
-3.53698E-2,-8.56994E-1
-2.09716E-1,-8.16162E-1
-3.61724E-1,-7.54638E-1
-4.95208E-1,-6.53930E-1
-6.14532E-1,-5.36895E-1
-6.88934E-1,-3.97766E-1
-7.43774E-1,-2.5E-1
-7.64923E-1,-1.04339E-1
-7.54089E-1,0.51574E-1
-7.16705E-1,1.88568E-1
-6.4505E-1,3.24707E-1
-5.42999E-1,4.40185E-1
-4.13391E-1,5.16113E-1
-2.81921E-1,5.57312E-1
-1.42547E-1,5.65307E-1
-1.29089E-2,5.40802E-1
1.18560E-1,4.81353E-1
2.10632E-1,3.82202E-1
2.66235E-1,2.55188E-1
2.79922E-1,1.24755E-1
2.40692E-1,-1.52587E-3
1.68800E-1,-8.84933E-2
0.77926E-1,-1.50863E-1
-2.94418E-2,-1.88331E-1
-1.48994E-1,-1.79512E-1
-2.53936E-1,-1.36871E-1
-3.50463E-1,-5.05981E-2
-4.00100E-1,0.59555E-1
-4.13482E-1,1.73767E-1
-4.03717E-1,2.79205E-1
-3.62976E-1,3.92211E-1
-2.96569E-1,4.89074E-1
-2.05688E-1,5.64697E-1
-1.04675E-1,6.16272E-1
0.12634E-1,6.44683E-1
1.21063E-1,6.52435E-1
2.42828E-1,6.33606E-1
3.45275E-1,5.98663E-1
4.48516E-1,5.28808E-1
5.34668E-1,4.54101E-1
6.03088E-1,3.63098E-1
6.60400E-1,2.59887E-1
6.89880E-1,1.56982E-1
7.11425E-1,0.36193E-1
7.09899E-1,-7.31201E-2
6.85363E-1,-1.93695E-1
6.49047E-1,-3.00445E-1
5.88348E-1,-4.03930E-1
5.20935E-1,-4.97528E-1
4.28985E-1,-5.83587E-1
3.28430E-1,-6.51184E-1
2.05078E-1,-7.07153E-1
-3.09677E-2,-1.27059E-1
-3.83148E-2,-1.03576E-1
-3.78341E-2,-8.03909E-2
-3.58734E-2,-6.15081E-2
-2.63252E-2,-4.41398E-2
-9.11903E-3,-4.26120E-2
0.81958E-2,-5.42621E-2
1.49231E-2,-1.00597E-1
-6.90536E-2,-1.49978E-1
-1.66496E-1,-7.14263E-2
-1.61048E-1,0.45349E-1
-8.97178E-2,1.08394E-1
-2.73742E-2,1.16558E-1
0.96893E-2,1.05171E-1
3.60565E-2,9.19952E-2
5.48400E-2,7.12509E-2
6.54296E-2,5.35278E-2
7.47871E-2,3.22418E-2
7.32078E-2,1.15470E-2
7.27691E-2,-4.70733E-3
6.59065E-2,-2.29492E-2
5.59692E-2,-3.26461E-2
4.56562E-2,-4.14104E-2
2.87628E-2,-4.48875E-2
1.39846E-2,-4.16832E-2
-4.04739E-3,-3.87344E-2
-1.95961E-2,-2.73513E-2
-3.13243E-2,-1.80492E-2
-4.45289E-2,-9.76562E-4
-4.68902E-2,1.93443E-2
-4.95452E-2,3.78379E-2
-4.63676E-2,6.28166E-2
-3.74336E-2,8.29658E-2
-2.67334E-2,1.04442E-1
-6.71386E-3,1.21639E-1
0.13938E-1,1.35604E-1
0.40756E-1,1.48681E-1
0.67794E-1,1.52511E-1
0.94741E-1,1.54464E-1
1.26052E-1,1.48284E-1
1.52359E-1,1.38153E-1
1.82647E-1,1.24343E-1
2.05032E-1,1.01966E-1
2.24556E-1,0.81886E-1
2.41394E-1,0.51483E-1
2.52227E-1,0.22705E-1
2.62451E-1,-6.86645E-3
2.62268E-1,-4.03442E-2
2.57156E-1,-6.75201E-2
2.49557E-1,-1.0112E-1
2.37182E-1,-1.28494E-1
2.24090E-1,-1.54907E-1
2.03384E-1,-1.77902E-1
1.80282E-1,-1.92672E-1
1.57028E-1,-2.08679E-1
1.29379E-1,-2.19879E-1
1.06048E-1,-2.26745E-1
0.80047E-1,-2.29240E-1
0.55351E-1,-2.26615E-1
0.31936E-1,-2.23144E-1
0.09719E-1,-2.13836E-1
-5.96618E-3,-2.04605E-1
-2.25067E-2,-1.93771E-1
-3.28826E-2,-1.78619E-1
-4.28237E-2,-1.67541E-1
-5.12542E-2,-1.53083E-1
-5.37033E-2,-1.41685E-1
-5.60531E-2,-1.31187E-1
-5.48782E-2,-1.23676E-1
-5.71022E-2,-1.17179E-1
-5.62858E-2,-1.09958E-1
-5.36804E-2,-1.08467E-1
-5.53436E-2,-1.07368E-1
-5.49774E-2,-1.06353E-1
-5.81665E-2,-1.07666E-1
-6.27441E-2,-1.06483E-1
-6.85882E-2,-1.04972E-1
-7.58018E-2,-1.04541E-1
-8.62579E-2,-1.03298E-1
-1.43547E-1,-1.88972E-1
-1.82556E-1,-1.79031E-1
-2.19177E-1,-1.70593E-1
-2.58285E-1,-1.50939E-1
-2.88192E-1,-1.22634E-1
-3.14392E-1,-8.81652E-2
-3.34045E-1,-4.75463E-2
-3.51715E-1,-1.02996E-2
-3.57894E-1,0.34881E-1
-3.55224E-1,0.75714E-1
-3.46298E-1,1.21994E-1
-3.29376E-1,1.61666E-1
-3.10470E-1,1.99462E-1
-2.82241E-1,2.33184E-1
-2.45529E-1,2.56698E-1
-2.08725E-1,2.77755E-1
-1.67633E-1,2.90802E-1
-1.30020E-1,2.96142E-1
-8.97064E-2,2.94982E-1
-4.92858E-2,2.82012E-1
-1.23901E-2,2.65625E-1
0.18188E-1,2.40509E-1
0.41534E-1,2.14012E-1
0.59684E-1,1.81694E-1
0.67459E-1,1.44714E-1
6.81457E-2,1.09439E-1
6.06994E-2,7.76977E-2
4.56008E-2,5.02853E-2
2.38952E-2,2.53295E-2
-2.44069E-3,7.74526E-3
-2.99835E-2,-3.95774E-3
-6.08596E-2,-6.48498E-3
-8.75167E-2,0.10719E-2
-1.09863E-1,1.32751E-2
-1.31439E-1,0.29556E-1
-1.47758E-1,0.52940E-1
-1.55250E-1,0.76736E-1
-1.56044E-1,1.00936E-1
-1.51039E-1,1.26442E-1
-1.40434E-1,1.48544E-1
-1.28013E-1,1.68441E-1
-1.06956E-1,1.83151E-1
-8.45642E-2,1.89346E-1
-5.88226E-2,1.90750E-1
-3.38592E-2,1.86355E-1
-1.10778E-2,1.78146E-1
0.06935E-1,1.62498E-1
0.17959E-1,1.37237E-1
2.28157E-2,1.09703E-1
2.34184E-2,7.90634E-2
1.17588E-2,5.41591E-2
-8.53729E-3,3.21865E-2
-3.75156E-2,1.46732E-2
-6.94351E-2,0.38070E-2
-1.04972E-1,0.03204E-2
-1.39465E-1,0.08506E-1
-1.73263E-1,0.24292E-1
-2.04513E-1,0.49896E-1
-2.27050E-1,0.79742E-1
-2.44979E-1,1.14166E-1
-2.55035E-1,1.55212E-1
-2.58132E-1,1.98669E-1
-2.54531E-1,2.40310E-1
-2.42187E-1,2.79235E-1
-2.23342E-1,3.18069E-1
-1.95922E-1,3.53210E-1
-1.63330E-1,3.85162E-1
-1.28906E-1,4.10095E-1
-8.92334E-2,4.26971E-1
-4.51965E-2,4.39346E-1
0.02166E-1,4.41909E-1
0.46569E-1,4.37423E-1
0.93490E-1,4.25094E-1
1.34307E-1,4.07974E-1
1.71310E-1,3.80935E-1
2.04574E-1,3.46160E-1
2.29919E-1,3.08548E-1
2.46521E-1,2.58758E-1
2.49298E-1,2.11059E-1

```

```

0.87890E-1,-7.34069E-1
-4.83398E-2,-7.48291E-1
-1.81091E-1,-7.37915E-1
-3.18847E-1,-6.94030E-1
-4.42718E-1,-6.37542E-1
-5.54412E-1,-5.41595E-1
-6.50604E-1,-4.35028E-1
-7.16827E-1,-3.11737E-1
-7.67272E-1,-1.70684E-1
-7.82989E-1,-3.42407E-2
-7.71423E-1,1.12579E-1
-7.40722E-1,2.37670E-1
-6.72180E-1,3.63586E-1
-6.01013E-1,4.63684E-1
-4.96948E-1,5.52246E-1
-3.95019E-1,6.14563E-1
-2.77679E-1,6.53808E-1
-1.64459E-1,6.69525E-1
-5.05065E-2,6.62780E-1
0.48461E-1,6.36718E-1
1.41235E-1,5.95733E-1
2.12371E-1,5.38360E-1
2.69470E-1,4.70275E-1
3.12377E-1,4.02893E-1
3.35388E-1,3.30749E-1
3.48724E-1,2.64709E-1
3.42651E-1,2.01019E-1
3.29132E-1,1.47430E-1
3.07693E-1,1.04339E-1
2.79892E-1,0.71929E-1
2.54806E-1,0.49514E-1
2.25799E-1,0.33035E-1
2.03048E-1,0.30075E-1
1.84196E-1,0.24856E-1
1.66412E-1,0.27267E-1
1.58035E-1,0.32531E-1
1.53121E-1,0.36499E-1
1.51466E-1,0.41954E-1
1.52282E-1,0.43808E-1
1.54243E-1,0.46218E-1
1.60347E-1,0.4422E-1
1.64405E-1,0.42831E-1
1.73751E-1,0.40870E-1
1.79191E-1,0.33546E-1
1.84288E-1,0.29747E-1
1.90307E-1,0.21408E-1
1.97296E-1,0.19424E-1
2.14263E-1,0.17334E-1
2.48855E-1,0.15777E-1
3.237E-1,-2.27050E-2
3.53363E-1,-1.72699E-1
2.27676E-1,-2.82226E-1
1.17202E-1,-2.70813E-1
0.55648E-1,-2.36160E-1
0.21858E-1,-2.00904E-1
-1.64794E-3,-1.78428E-1
-2.17285E-2,-1.50619E-1
-9.67407E-2,-9.71450E-2
-1.04423E-1,-9.01031E-2
-1.12701E-1,-8.35571E-2
-1.22978E-1,-7.01446E-2
-1.29905E-1,-5.71136E-2
-1.35826E-1,-4.03213E-2
-1.38214E-1,-2.32391E-2
-1.37741E-1,-4.24194E-3
-1.33155E-1,0.14617E-1
-1.26243E-1,0.33645E-1
-1.15318E-1,5.05523E-2
-9.89761E-2,6.68487E-2
-7.87048E-2,7.96546E-2
-5.92651E-2,9.09385E-2
-3.57093E-2,9.65461E-2
-1.13716E-2,9.55047E-2
1.36184E-2,9.06982E-2
3.66745E-2,8.24508E-2
6.23397E-2,6.98547E-2
7.97882E-2,4.88662E-2
9.37957E-2,2.89115E-2
1.09443E-1,0.24070E-2
1.16218E-1,-2.71186E-2
1.16096E-1,-5.31387E-2
1.10321E-1,-8.01086E-2
9.66529E-2,-1.07261E-1
0.81672E-1,-1.33293E-1
0.62118E-1,-1.56265E-1
0.39970E-1,-1.73019E-1
0.11261E-1,-1.85409E-1
-1.76391E-2,-1.89819E-1
-4.46167E-2,-1.93298E-1
-7.66296E-2,-1.90017E-1
-1.04019E-1,-1.79199E-1
-1.27739E-1,-1.63284E-1
-1.47567E-1,-1.43402E-1
-1.65924E-1,-1.21658E-1
-1.80221E-1,-9.35821E-2
-1.83387E-1,-6.71463E-2
-1.87027E-1,-4.13284E-2
-1.78642E-1,-1.26113E-2
-1.66595E-1,0.08041E-1
-1.50459E-1,0.31501E-1
-1.27838E-1,0.48172E-1
-1.05648E-1,5.97267E-2
-7.74841E-2,6.29043E-2
-5.46531E-2,5.78727E-2
-2.78167E-2,5.15251E-2
-4.91333E-3,3.26595E-2
8.69321E-3,1.25250E-2
1.99813E-2,-1.4431E-2
2.18009E-2,-4.42295E-2
2.13851E-2,-7.48100E-2
0.78582E-2,-1.07284E-1
-1.13830E-2,-1.30874E-1
-3.52783E-2,-1.56158E-1
-6.98394E-2,-1.73294E-1
-1.01326E-1,-1.8367E-1
2.42324E-1,1.60720E-1
2.19589E-1,1.13082E-1
1.86889E-1,0.76713E-1
1.46469E-1,0.4673E-1
9.80491E-2,3.22647E-2
5.17482E-2,3.33404E-2
0.51803E-2,5.04646E-2
-3.34777E-2,8.02002E-2
-6.37664E-2,1.15230E-1
-7.91778E-2,1.56883E-1
-8.03375E-2,1.99996E-1
-7.30896E-2,2.43713E-1
-5.27648E-2,2.83203E-1
-2.91442E-2,3.13476E-1
0.04028E-1,3.37616E-1
0.4039E-1,3.50967E-1
0.78018E-1,3.61969E-1
1.16027E-1,3.64517E-1
1.48803E-1,3.55697E-1
1.81243E-1,3.42773E-1
2.10693E-1,3.18801E-1
2.35839E-1,2.95623E-1
2.55645E-1,2.68890E-1
2.66174E-1,2.38464E-1
2.70813E-1,2.06787E-1
2.67364E-1,1.74072E-1
2.63443E-1,1.43600E-1
2.49733E-1,1.19117E-1
2.26478E-1,1.01104E-1
2.02560E-1,0.85739E-1
1.75712E-1,0.77873E-1
1.50016E-1,0.77819E-1
1.24046E-1,8.84017E-2
1.02935E-1,1.03927E-1
8.43505E-2,1.24969E-1
0.74432E-1,1.51107E-1
0.72525E-1,1.78863E-1
0.78186E-1,2.07489E-1
0.91705E-1,2.33932E-1
1.09375E-1,2.56774E-1
1.35803E-1,2.77298E-1
1.65695E-1,2.88085E-1
1.98715E-1,2.94815E-1
2.28973E-1,2.93212E-1
2.58880E-1,2.86560E-1
2.92877E-1,2.71484E-1
3.18267E-1,2.52777E-1
3.41400E-1,2.30224E-1
3.55560E-1,2.03552E-1
3.68026E-1,1.71981E-1
3.72177E-1,1.40213E-1
3.74267E-1,1.11114E-1
3.65188E-1,0.81085E-1
3.50097E-1,0.56579E-1
3.33145E-1,0.36453E-1
3.12088E-1,0.18325E-1
2.88696E-1,0.11718E-1
2.63977E-1,0.08270E-1
END

```

Anexo 4 – Conteúdo do arquivo DATA04.D1 contendo dados da medida experimental dos parâmetros S da ESEAVA-974.

```

CITIFILE A.01.00
#NA VERSION HP8722D.06.14
NAME DATA
VAR FREQ MAG 401
DATA S[1,1] RI          DATA S[2,1] RI          DATA S[1,2] RI          DATA S[2,2] RI
SEG_LIST_BEGIN
SEG 1000000000 16000000000 401
SEG_LIST_END
BEGIN
-3.53942E-1,9.11560E-1  -3.35860E-3,-1.83105E-3  -3.77416E-3,-1.34730E-3  -3.47106E-1,9.13177E-1
-2.05993E-1,9.63012E-1  -3.82328E-3,-8.13007E-4  -3.87072E-3,-1.42335E-4  -2.12036E-1,9.77417E-1
-4.02832E-2,9.79858E-1  -4.25815E-3,0.22268E-3  -3.61299E-3,0.50640E-3  -3.17688E-2,9.77569E-1
1.29028E-1,9.80957E-1  -4.61721E-3,1.19781E-3  -4.46462E-3,0.95510E-3  1.37817E-1,9.97192E-1
2.98645E-1,9.38659E-1  -4.98676E-3,2.73323E-3  -5.01394E-3,2.75182E-3  2.94433E-1,9.33898E-1
4.74975E-1,8.68896E-1  -4.97865E-3,5.03921E-3  -4.80318E-3,5.00059E-3  4.82177E-1,8.77624E-1
6.10717E-1,7.67089E-1  -3.27658E-3,7.23576E-3  -3.43442E-3,7.32708E-3  5.95214E-1,7.66052E-1
7.50610E-1,6.30432E-1  -1.90687E-3,8.81195E-3  -1.12581E-3,9.06181E-3  7.56958E-1,6.17187E-1
8.49426E-1,4.82849E-1  1.45626E-3,1.10101E-2  1.57642E-3,1.10082E-2  8.40637E-1,4.88586E-1
9.23645E-1,2.96203E-1  5.23805E-3,1.02663E-2  6.38485E-3,1.04589E-2  9.16931E-1,2.81677E-1
9.61059E-1,1.14685E-1  9.22870E-3,9.79232E-3  1.06802E-2,8.44383E-3  9.50988E-1,1.12548E-1
9.50256E-1,-8.90502E-2  1.32780E-2,6.37245E-3  1.29108E-2,4.87995E-3  9.31762E-1,-9.12475E-2
9.01062E-1,-2.75939E-1  1.59349E-2,0.21762E-2  1.61123E-2,0.06704E-2  8.82995E-1,-2.68798E-1
8.03588E-1,-4.47296E-1  1.67408E-2,-3.23486E-3  1.49059E-2,-6.38914E-3  7.94324E-1,-4.33136E-1
6.90612E-1,-5.82428E-1  1.49855E-2,-1.03573E-2  1.09739E-2,-9.35220E-3  6.83227E-1,-5.62255E-1
5.44036E-1,-7.00683E-1  8.61215E-3,-1.10726E-2  7.30276E-3,-9.65118E-3  5.49682E-1,-6.96319E-1
3.96637E-1,-7.77679E-1  1.11136E-2,-9.86242E-3  9.8629E-3,-7.93266E-3  4.05487E-1,-7.68920E-1
2.22137E-1,-8.32397E-1  1.22757E-2,-1.91879E-2  1.19323E-2,-1.69086E-2  2.09869E-1,-8.39080E-1
0.58044E-1,-8.45642E-1  0.31652E-2,-2.68068E-2  0.62303E-2,-2.46954E-2  0.58105E-1,-8.50036E-1
-1.11908E-1,-8.14849E-1  -4.94766E-3,-2.69165E-2  -6.33621E-3,-2.73952E-2  -1.44928E-1,-8.16406E-1
-2.55065E-1,-7.69226E-1  -1.62982E-2,-2.86045E-2  -1.34124E-2,-2.60562E-2  -2.82043E-1,-7.84668E-1
-3.83728E-1,-6.90490E-1  -2.68688E-2,-1.94263E-2  -2.57587E-2,-2.08263E-2  -4.29443E-1,-6.49536E-1
-4.95361E-1,-6.02172E-1  -3.09944E-2,-1.17416E-2  -3.04908E-2,-1.18026E-2  -5.26001E-1,-5.57739E-1
-5.81787E-1,-4.99328E-1  -3.39641E-2,-3.68499E-3  -3.32126E-2,-3.91960E-3  -5.63842E-1,-4.33166E-1
-6.63085E-1,-3.78967E-1  -3.79467E-2,0.50220E-2  -3.81469E-2,0.41484E-2  -6.38793E-1,-3.49884E-1
-7.14355E-1,-2.51777E-1  -4.07295E-2,1.83563E-2  -3.92379E-2,2.09674E-2  -6.72912E-1,-2.34100E-1
-7.36938E-1,-1.04522E-1  -3.53050E-2,3.91521E-2  -3.09791E-2,3.68766E-2  -7.12432E-1,-8.66394E-2
-7.36633E-1,0.30700E-1  -1.51901E-2,5.36537E-2  -1.26457E-2,5.17730E-2  -6.77856E-1,0.42480E-1
-6.94152E-1,1.76086E-1  0.89454E-2,5.09758E-2  1.25961E-2,4.39682E-2  -6.44165E-1,1.36535E-1
-6.26495E-1,2.95196E-1  2.18143E-2,4.06551E-2  1.95465E-2,2.94456E-2  -6.30920E-1,2.39807E-1
-5.35766E-1,4.01184E-1  2.66475E-2,2.91576E-2  1.57699E-2,2.04505E-2  -5.80169E-1,3.74908E-1
-4.26193E-1,4.79232E-1  2.70729E-2,2.44369E-2  1.14803E-2,2.51045E-2  -4.60220E-1,4.90737E-1
-2.94433E-1,5.38818E-1  3.37753E-2,2.42614E-2  1.95388E-2,3.32260E-2  -3.30749E-1,5.65429E-1
-1.53015E-1,5.49194E-1  4.61158E-2,1.50947E-2  3.73153E-2,3.66210E-2  -1.64794E-1,5.84533E-1
-1.18713E-2,5.26641E-1  5.07335E-2,0.64315E-2  6.17294E-2,2.60810E-2  0.00885E-1,5.70404E-1
1.13250E-1,4.69390E-1  6.27899E-2,-1.12304E-2  7.83958E-2,0.25749E-2  1.31012E-1,4.80804E-1
2.38525E-1,3.69110E-1  6.19182E-2,-3.10154E-2  8.73680E-2,-3.34243E-2  2.42736E-1,3.66882E-1
3.07037E-1,2.10601E-1  5.61714E-2,-6.30455E-2  7.10792E-2,-7.77816E-2  2.87323E-1,2.30560E-1
2.90359E-1,0.47576E-1  2.02293E-2,-8.30574E-2  2.57568E-2,-9.86022E-2  2.96539E-1,0.83633E-1
2.29126E-1,-7.82241E-2  -9.41467E-3,-7.70683E-2  -8.55255E-3,-9.55925E-2  2.52655E-1,-5.63812E-2
1.32438E-1,-1.79397E-1  -2.30407E-2,-7.73963E-2  -3.28750E-2,-9.29946E-2  1.57302E-1,1.69738E-1
0.04531E-1,-2.31880E-1  -5.53665E-2,-7.59353E-2  -7.20367E-2,-8.33587E-2  0.23872E-1,-2.40280E-1
-1.23779E-1,-2.27676E-1  -9.28039E-2,-5.62133E-2  -1.03843E-1,-5.12085E-2  -1.30401E-1,-2.59872E-1
-2.13165E-1,-1.94900E-1  -1.05625E-1,-1.21955E-2  -1.14925E-1,-2.10571E-3  -2.72186E-1,-1.96624E-1
-3.19107E-1,-1.57150E-1  -9.94567E-2,3.11393E-2  -1.00036E-1,3.90548E-2  -3.80462E-1,-1.00051E-1
-4.10339E-1,-6.77642E-2  -7.02056E-2,5.60455E-2  -7.41806E-2,6.58264E-2  -4.31961E-1,0.22583E-1
-4.58831E-1,0.47302E-1  -5.55038E-2,6.63490E-2  -5.03921E-2,7.70492E-2  -4.43344E-1,1.51397E-1
-4.74426E-1,1.60400E-1  -3.39355E-2,8.25042E-2  -2.65579E-2,9.38034E-2  -4.21630E-1,2.49939E-1
-4.66751E-1,2.76702E-1  -6.42013E-3,9.39903E-2  0.84648E-2,9.17358E-2  -3.89175E-1,3.41384E-1
-4.28283E-1,3.90197E-1  3.26232E-2,8.92334E-2  3.79257E-2,8.69522E-2  -3.37463E-1,4.31457E-1
-3.50372E-1,4.90387E-1  5.73272E-2,6.82754E-2  6.71234E-2,6.24389E-2  -2.75817E-1,5.05981E-1
2.69012E-1,5.58288E-1  7.57560E-2,4.03060E-2  7.64160E-2,3.00865E-2  -1.92627E-1,5.62194E-1
-1.73339E-1,6.15783E-1  7.52258E-2,1.13830E-2  7.14035E-2,0.52261E-2  -1.10961E-1,6.30310E-1
-7.18078E-2,6.57775E-1  6.75392E-2,-1.17034E-2  6.68945E-2,-9.96398E-3  0.05645E-1,6.50512E-1
0.49987E-1,6.75994E-1  5.93662E-2,-2.56843E-2  6.12297E-2,-3.31401E-2  1.36535E-1,6.67633E-1
1.61926E-1,6.75537E-1  4.4487E-2,-4.51698E-2  4.15115E-2,-5.01022E-2  2.28393E-1,6.27929E-1
2.84362E-1,6.42730E-1  2.35347E-2,-4.89292E-2  1.34220E-2,-4.96730E-2  3.54614E-1,5.84564E-1
3.97369E-1,5.86334E-1  0.48103E-2,-4.32491E-2  0.56476E-2,-4.09126E-2  4.16046E-1,5.37841E-1
4.86938E-1,5.04730E-1  0.13847E-2,-3.53374E-2  -3.69644E-3,-3.50627E-2  5.12756E-1,4.53613E-1
5.61828E-1,4.17602E-1  -5.36346E-3,-3.35464E-2  -4.59098E-3,-3.23524E-2  5.81756E-1,4.03289E-1
6.12884E-1,3.29498E-1  -6.78634E-3,-3.17134E-2  -1.30729E-2,-3.21769E-2  6.40655E-1,2.83023E-1
6.66595E-1,2.22595E-1  -1.60541E-2,-3.20053E-2  -1.83029E-2,-2.70919E-2  6.99707E-1,1.95861E-1
6.92199E-1,1.15844E-1  -2.30560E-2,-2.60372E-2  -2.34260E-2,-2.06737E-2  7.05505E-1,0.65826E-1
7.02117E-1,-3.23486E-3  -2.91366E-2,-1.67064E-2  -2.56366E-2,-1.56498E-2  7.24304E-1,-4.96521E-2
6.96502E-1,-1.15722E-1  -2.92758E-2,-8.20732E-3  -3.09429E-2,-6.84166E-3  6.89453E-1,-1.66564E-1
6.64306E-1,-2.34497E-1  -2.59685E-2,0.05855E-2  -2.48165E-2,0.29478E-2  6.50421E-1,-2.84088E-1
6.17981E-1,-3.41827E-1  -2.04391E-2,0.19722E-2  -2.03561E-2,0.58584E-2  5.85113E-1,-3.73504E-1
5.49438E-1,-4.42962E-1  -2.00567E-2,0.11253E-2  -1.38406E-2,5.40447E-3  5.25177E-1,-4.57275E-1
4.65240E-1,-5.29022E-1  -2.10409E-2,0.22554E-2  -1.50356E-2,0.74195E-3  4.54925E-1,-5.39398E-1
3.67950E-1,-5.7930E-1  -2.48479E-2,0.48532E-2  -1.9063E-2,0.11882E-2  3.73168E-1,-6.13098E-1
2.77832E-1,-6.51977E-1  -2.61173E-2,1.13325E-2  -2.55937E-2,0.58307E-2  2.61077E-1,-6.74499E-1
1.63085E-1,-7.03277E-1  -2.70185E-2,2.00223E-2  -2.49872E-2,1.55782E-2  1.48284E-1,-7.31414E-1
0.43029E-1,-7.35382E-1  -1.84936E-2,2.87160E-2  -2.44932E-2,2.23789E-2  0.11779E-1,-7.39288E-1

```



```

-9.27734E-2,-7.39624E-1 -1.42097E-2,3.22380E-2 -1.63765E-2,3.52554E-2 -1.29150E-1,-7.53326E-1
-2.27294E-1,-7.27661E-1 -1.24931E-3,3.87496E-2 -4.07218E-3,3.6026E-2 -2.42981E-1,-7.08496E-1
-3.58398E-1,-6.74316E-1 0.80413E-2,3.37219E-2 0.59356E-2,3.44047E-2 -3.96972E-1,-6.61865E-1
-4.81140E-1,-6.07055E-1 1.21612E-2,2.90527E-2 0.92754E-2,3.26042E-2 -4.82605E-1,-5.89843E-1
-5.76416E-1,-5.12756E-1 1.57699E-2,3.08551E-2 1.78756E-2,2.97126E-2 -6.07910E-1,-4.69238E-1
-6.64001E-1,-4.01855E-1 2.36625E-2,2.49748E-2 2.03170E-2,2.97756E-2 -6.68579E-1,-3.89465E-1
-7.21984E-1,-2.87963E-1 2.56633E-2,2.54249E-2 3.11756E-2,2.45780E-2 -7.22229E-1,-2.35534E-1
-7.61047E-1,-1.51611E-1 3.50265E-2,2.00195E-2 3.35311E-2,2.17781E-2 -7.70690E-1,-1.35925E-1
-7.75482E-1,-2.70385E-2 4.00333E-2,1.88770E-2 4.34665E-2,1.66091E-2 -7.51739E-1,0.12054E-1
-7.56012E-1,1.08825E-1 5.32074E-2,0.75073E-2 5.21888E-2,1.11198E-2 -7.62908E-1,1.34887E-1
-7.25341E-1,2.23693E-1 5.82408E-2,-1.99317E-3 6.33392E-2,-1.03035E-2 -7.05505E-1,2.6297E-1
-6.64459E-1,3.36181E-1 6.68945E-2,-2.57034E-2 5.77964E-2,-2.03914E-2 -6.50756E-1,3.79516E-1
-5.92376E-1,4.29260E-1 5.82962E-2,-4.03099E-2 6.89964E-2,-4.65469E-2 -5.56121E-1,4.72747E-1
-5.05798E-1,5.06927E-1 6.18400E-2,-6.74438E-2 4.63409E-2,-6.75888E-2 -4.59991E-1,5.42877E-1
-4.09027E-1,5.65704E-1 3.04336E-2,-9.46312E-2 3.70788E-2,-8.97102E-2 -3.51959E-1,5.93322E-1
-3.00109E-1,5.99639E-1 0.45433E-2,-1.05381E-1 0.11978E-2,-1.0783E-1 -2.46124E-1,-6.20910E-1
-1.99707E-1,6.04675E-1 -3.28674E-2,-1.15402E-1 -3.81622E-2,-1.08779E-1 -1.24084E-1,6.13769E-1
-1.05865E-1,5.96954E-1 -8.46862E-2,-1.02691E-1 -7.01904E-2,-9.70535E-2 -4.11377E-2,5.95428E-1
-2.79541E-2,5.74462E-1 -1.10473E-1,-6.20956E-2 -1.12258E-1,-7.83691E-2 -4.0618E-1,5.45135E-1
0.41015E-1,5.41015E-1 -1.31210E-1,-2.90985E-2 -1.38069E-1,-2.41088E-2 0.97808E-1,5.12695E-1
1.00067E-1,5.10742E-1 -1.28265E-1,0.19592E-1 -1.36009E-1,0.17280E-1 1.43951E-1,4.65850E-1
1.62231E-1,4.69574E-1 -1.19834E-1,5.35507E-2 -1.19392E-1,6.74285E-2 1.95312E-1,4.24743E-1
2.16095E-1,4.07440E-1 -9.48219E-2,8.39614E-2 -9.28802E-2,8.90197E-2 2.20977E-1,3.67095E-1
2.36694E-1,3.38714E-1 -8.10089E-2,1.10103E-1 -6.15387E-2,1.12537E-1 2.51586E-1,3.13751E-1
2.43438E-1,2.80670E-1 -3.75137E-2,1.35330E-1 -4.28657E-2,1.24080E-1 2.55371E-1,2.66693E-1
2.37762E-1,2.31903E-1 -6.75964E-3,1.44805E-1 0.06820E-1,1.47964E-1 2.65838E-1,2.15637E-1
2.14996E-1,1.98547E-1 0.49667E-1,1.50856E-1 0.46493E-1,1.34674E-1 2.56546E-1,1.71142E-1
2.13943E-1,1.71356E-1 0.94047E-1,1.25770E-1 0.88821E-1,1.26518E-1 2.39669E-1,1.28494E-1
1.97418E-1,1.34277E-1 1.34437E-1,0.94772E-1 1.33926E-1,0.90240E-1 2.21069E-1,1.01593E-1
1.69982E-1,1.17569E-1 1.64375E-1,0.42060E-1 1.57043E-1,0.39299E-1 1.92199E-1,0.79299E-1
1.51428E-1,1.16470E-1 1.67060E-1,-2.51236E-2 1.58371E-1,-1.77307E-2 1.72515E-1,0.73043E-1
1.50177E-1,1.17034E-1 1.32263E-1,-7.31201E-2 1.38214E-1,-6.55822E-2 1.56829E-1,0.61523E-1
1.47941E-1,1.01005E-1 1.03134E-1,-9.84458E-2 1.04332E-1,-1.00006E-1 1.34277E-1,0.56739E-1
1.32110E-1,0.87402E-1 6.78596E-2,-1.19865E-1 7.02438E-2,-1.18045E-1 1.14372E-1,6.42471E-2
1.12861E-1,9.08203E-2 0.29777E-1,-1.27082E-1 0.30342E-1,-1.27273E-1 9.94720E-2,7.61795E-2
1.05667E-1,1.00936E-1 -2.47955E-3,-1.20475E-1 0.03051E-2,-1.22673E-1 9.71374E-2,9.79156E-2
1.08840E-1,1.08528E-1 -2.57110E-2,-1.14608E-1 -2.80609E-2,-1.18110E-1 1.09237E-1,1.12847E-1
1.11923E-1,1.13929E-1 -5.42678E-2,-1.08627E-1 -5.42984E-2,-1.09436E-1 1.28883E-1,1.18995E-1
1.15974E-1,1.16409E-1 -7.98492E-2,-9.29107E-2 -8.45565E-2,-9.61456E-2 1.46575E-1,1.12793E-1
1.19377E-1,1.121299E-1 -1.10176E-1,-7.34787E-2 -1.14418E-1,-6.73828E-2 1.57501E-1,1.03408E-1
1.31225E-1,1.31057E-1 -1.31919E-1,-3.11126E-2 -1.30065E-1,-3.08380E-2 1.59668E-1,0.94421E-1
1.53015E-1,1.31408E-1 -1.31553E-1,0.15098E-1 -1.32820E-1,0.18356E-1 1.67907E-1,0.88760E-1
1.69570E-1,1.21139E-1 -1.08745E-1,5.44548E-2 -1.09737E-1,5.76095E-2 1.70082E-1,0.78224E-1
1.81076E-1,1.12808E-1 -7.87162E-2,7.69195E-2 -7.26966E-2,8.26950E-2 1.69441E-1,0.78666E-1
1.91818E-1,1.10534E-1 -4.22172E-2,7.96852E-2 -3.64875E-2,7.91130E-2 1.83486E-1,0.95939E-1
2.16262E-1,1.18576E-1 -2.25982E-2,6.09760E-2 -1.49040E-2,5.68122E-2 2.28179E-1,1.05789E-1
2.79983E-1,1.15387E-1 -3.16753E-2,3.80439E-2 -3.21693E-2,2.85320E-2 3.09616E-1,0.89431E-1
3.66912E-1,0.29953E-1 -8.35037E-2,5.52444E-2 -9.07745E-2,5.61523E-2 3.75061E-1,-4.11529E-2
3.39660E-1,-1.22192E-1 -6.62231E-2,1.53465E-1 -6.91986E-2,1.51260E-1 3.05618E-1,-1.74621E-1
2.40333E-1,-1.88049E-1 0.20523E-1,1.89506E-1 0.24116E-1,1.92985E-1 1.97540E-1,-2.00309E-1
1.56150E-1,-1.94534E-1 1.12686E-1,1.5979E-1 1.08337E-1,1.57333E-1 1.29364E-1,-1.89880E-1
0.91285E-1,-1.82853E-1 1.54754E-1,0.97869E-1 1.57150E-1,1.00784E-1 0.88844E-1,-1.59027E-1
0.45349E-1,-1.48071E-1 1.72653E-1,0.39474E-1 1.69616E-1,0.40054E-1 0.73333E-1,-1.42807E-1
3.25012E-2,-1.18522E-1 1.70349E-1,-1.58157E-2 1.73294E-1,-1.47018E-2 0.51536E-1,-1.39755E-1
1.92260E-2,-1.03866E-1 1.52244E-1,-6.87027E-2 1.54602E-1,-6.91375E-2 0.25299E-1,-1.28166E-1
0.44021E-2,-8.39157E-2 1.20216E-1,-1.05346E-1 1.21700E-1,-1.10183E-1 0.53863E-2,-1.08886E-1
1.27410E-2,-5.8918E-2 0.80146E-1,-1.3591E-1 0.77163E-1,-1.36421E-1 -5.47027E-3,-1.56616E-1
0.72994E-2,-3.95717E-2 0.31982E-1,-1.43829E-1 -5.33065E-2,-5.84907E-2 -1.22604E-1,-1.37664E-1
2.05669E-2,-3.78398E-2 -8.33892E-3,-1.40930E-1 -1.07864E-1,-8.45031E-2 -1.72653E-1,-2.33306E-2
2.50816E-2,-4.25300E-2 -4.93164E-2,-1.26190E-1 -1.63353E-1,-2.95181E-2 -1.29539E-1,0.61691E-1
3.02772E-2,-5.24406E-2 -8.00476E-2,-9.47723E-2 -1.68632E-1,0.46913E-1 -7.70187E-2,9.56192E-2
3.18374E-2,-7.18994E-2 -8.47473E-2,-5.22308E-2 -1.36268E-1,0.96992E-1 -3.43551E-2,1.02459E-1
2.94303E-2,-1.10553E-1 -5.95207E-2,-3.66210E-2 -1.00105E-1,1.36749E-1 -2.62832E-2,9.57527E-2
-5.85327E-2,-1.93313E-1 -5.14297E-2,-5.77697E-2 -5.19943E-2,1.57493E-1 1.92565E-2,8.66851E-2
-2.16796E-1,-8.42285E-2 -1.01669E-1,-8.86383E-2 -1.29699E-3,1.62780E-1 4.43649E-2,7.47642E-2
-1.84234E-1,0.53260E-1 -1.65351E-1,-3.30276E-2 0.40351E-1,1.52252E-1 6.12144E-2,5.48248E-2
-1.29936E-1,1.10252E-1 -1.71043E-1,0.43487E-1 0.82199E-1,1.36856E-1 6.88171E-2,3.30581E-2
-7.47604E-2,1.39732E-1 -1.37329E-1,0.98381E-1 1.16241E-1,1.08161E-1 6.44378E-2,1.99127E-2
-2.90527E-2,1.43875E-1 -9.88769E-2,1.34750E-1 1.43310E-1,0.69587E-1 6.31103E-2,1.17454E-2
0.10253E-1,1.38237E-1 -5.28183E-2,1.53358E-1 1.55342E-1,0.26504E-1 5.99231E-2,-5.39779E-4
4.27703E-2,1.20376E-1 -6.40106E-3,1.60545E-1 1.55914E-1,-1.77764E-2 5.12199E-2,-1.69258E-2
6.13174E-2,9.54132E-2 0.36270E-1,1.51542E-1 1.43112E-1,-6.12564E-2 3.18031E-2,-2.55374E-2
6.60705E-2,7.65380E-2 0.7547E-1,1.40762E-1 1.19388E-1,-9.58137E-2 1.92518E-2,-2.50539E-2
7.44171E-2,6.05163E-2 1.13571E-1,1.13502E-1 0.89866E-1,-1.25915E-1 0.90751E-2,-2.38695E-2
7.65152E-2,3.7323E-2 1.40716E-1,0.78010E-1 0.48645E-1,-1.45675E-1 0.28724E-2,-2.22044E-2
6.81457E-2,1.99813E-2 1.59545E-1,0.34446E-1 0.05081E-1,-1.50528E-1 -4.38690E-3,-2.75383E-2
6.14471E-2,0.48065E-2 1.63192E-1,-1.51214E-2 -3.52172E-2,-1.42410E-1 -2.77786E-2,-3.25164E-2
4.38156E-2,-1.08547E-2 1.48689E-1,-6.20727E-2 -6.84280E-2,-1.26907E-1 -5.77812E-2,-1.57699E-2
1.95541E-2,-1.38492E-2 1.22451E-1,-9.93385E-2 -1.00105E-1,-1.0392E-1 -6.99958E-2,1.24893E-2
-2.14600E-3,-4.14347E-3 0.89279E-1,-1.26655E-1 -1.23580E-1,-7.30590E-2 -7.61718E-2,3.58047E-2
-1.56993E-2,1.46493E-2 0.51292E-1,-1.45668E-1 -1.39320E-1,-3.54309E-2 -7.59582E-2,6.03981E-2
-1.53617E-2,3.40232E-2 0.07751E-1,-1.52114E-1 -1.39320E-1,-3.54309E-2
-5.30624E-3,4.24976E-2 -3.18832E-2,-1.45668E-1
0.24642E-2,3.85246E-2 -6.82983E-2,-1.31225E-1
-2.54058E-3,2.73790E-2 -1.01242E-1,-1.08955E-1
-2.10053E-2,2.37064E-2 -1.25564E-1,-7.67211E-2
-4.40044E-2,3.32107E-2 -1.42463E-1,-3.96728E-2

```

```

-6.12449E-2,5.67493E-2 -1.46873E-1,0.01754E-1 -1.40502E-1,0.01693E-1 -7.03506E-2,8.13140E-2
-7.24105E-2,8.53576E-2 -1.41151E-1,0.42518E-1 -1.37527E-1,0.39398E-1 -6.66236E-2,1.01688E-1
-7.55004E-2,1.22470E-1 -1.19941E-1,8.11309E-2 -1.18206E-1,7.51838E-2 -5.81131E-2,1.27914E-1
-6.29119E-2,1.62277E-1 -9.35058E-2,1.05888E-1 -9.54284E-2,1.03538E-1 -4.19769E-2,1.53442E-1
-3.79028E-2,1.97097E-1 -6.03332E-2,1.27121E-1 -6.17256E-2,1.24034E-1 -1.71661E-2,1.77261E-1
0.00076E-1,2.22297E-1 -2.53372E-2,1.35574E-1 -2.79541E-2,1.38084E-1 0.17692E-1,1.88339E-1
0.41931E-1,2.32421E-1 0.12878E-1,1.37893E-1 0.14526E-1,1.36489E-1 0.44677E-1,1.90261E-1
0.79193E-1,2.33123E-1 0.47271E-1,1.25457E-1 0.46798E-1,1.26541E-1 0.70678E-1,1.90460E-1
1.12976E-1,2.26730E-1 7.86666E-2,1.09726E-1 8.11157E-2,1.0952E-1 0.96939E-1,1.93298E-1
1.45309E-1,2.19574E-1 1.03134E-1,8.36715E-2 1.03729E-1,8.11157E-2 1.26113E-1,1.88812E-1
1.84265E-1,2.06817E-1 1.21566E-1,5.38330E-2 1.21398E-1,5.22460E-2 1.55578E-1,1.82159E-1
2.13943E-1,1.73782E-1 1.30767E-1,0.22209E-1 1.27983E-1,0.18745E-1 1.82434E-1,1.64871E-1
2.27142E-1,1.44958E-1 1.34918E-1,-1.72271E-2 1.29516E-1,-1.54418E-2 2.06481E-1,1.48040E-1
2.33566E-1,1.18759E-1 1.21372E-1,-5.08155E-2 1.21814E-1,-4.56848E-2 2.26165E-1,1.25625E-1
2.31109E-1,0.96023E-1 1.06689E-1,-8.19320E-2 1.06262E-1,-8.07151E-2 2.47055E-1,0.96618E-1
2.27386E-1,0.87982E-1 7.92579E-2,-1.07502E-1 8.19969E-2,-1.02840E-1 2.54531E-1,0.69625E-1
2.39547E-1,0.84472E-1 0.46814E-1,-1.26274E-1 0.50598E-1,-1.28501E-1 2.61627E-1,0.39871E-1
2.59613E-1,0.73608E-1 0.07949E-1,-1.31179E-1 0.08331E-1,-1.34597E-1 2.68066E-1,0.16143E-1
2.82394E-1,0.52291E-1 -2.70156E-2,-1.26846E-1 -2.77328E-2,-1.28395E-1 2.66037E-1,-1.36108E-2
3.01788E-1,0.17013E-1 -6.06613E-2,-1.11763E-1 -5.97381E-2,-1.12693E-1 2.66830E-1,-4.06646E-2
3.04245E-1,-2.82897E-2 -8.22181E-2,-8.98094E-2 -8.41903E-2,-9.35249E-2 2.59552E-1,-6.79321E-2
2.91503E-1,-6.47277E-2 -1.02432E-1,-6.76040E-2 -1.05613E-1,-6.58950E-2 2.52944E-1,-9.78241E-2
2.79693E-1,-9.53064E-2 -1.14013E-1,-3.99398E-2 -1.13548E-1,-3.93753E-2 2.31964E-1,-1.25824E-1
2.64434E-1,-1.30508E-1 -1.23024E-1,-1.04217E-2 -1.24137E-1,-1.08795E-2 2.06451E-1,-1.51809E-1
2.31590E-1,-1.57295E-1 -1.22932E-1,2.16903E-2 -1.24603E-1,2.08892E-2 1.75537E-1,-1.57684E-1
2.02011E-1,-1.71821E-1 -1.15177E-1,5.62400E-2 -1.16901E-1,5.68771E-2 1.54853E-1,-1.63063E-1
1.70249E-1,-1.80763E-1 -9.41391E-2,8.43772E-2 -9.69543E-2,8.63990E-2 1.40678E-1,-1.67457E-1
1.38107E-1,-1.83029E-1 -6.94084E-2,1.06254E-1 -6.96868E-2,1.10313E-1 1.21330E-1,-1.72172E-1
1.08970E-1,-1.73988E-1 -3.96690E-2,1.21933E-1 -3.74679E-2,1.25831E-1 1.05682E-1,-1.77970E-1
0.90705E-1,-1.55448E-1 -2.13623E-3,1.29875E-1 0.00244E-1,1.32560E-1 0.82382E-1,-1.78932E-1
0.86906E-1,-1.42959E-1 3.25622E-1,1.24603E-1 3.55300E-2,1.24961E-1 0.62339E-1,-1.71691E-1
0.81268E-1,-1.37870E-1 6.24008E-2,1.11572E-1 6.72073E-2,1.11732E-1 0.49186E-1,-1.62117E-1
0.80345E-1,-1.32171E-1 9.36813E-2,9.30481E-2 9.57946E-2,8.97674E-2 0.38482E-1,-1.57295E-1
0.79177E-1,-1.32812E-1 1.16287E-1,6.11724E-2 1.17492E-1,6.02569E-2 0.28717E-1,-1.50360E-1
0.72425E-1,-1.47758E-1 1.27311E-1,0.26031E-1 1.28669E-1,0.23681E-1 0.16311E-1,-1.42326E-1
0.60615E-1,-1.50436E-1 1.27861E-1,-8.36181E-3 1.29180E-1,-1.14364E-2 0.09460E-1,-1.28776E-1
0.42800E-1,-1.50894E-1 1.20525E-1,-4.18968E-2 1.20277E-1,-4.65049E-2 0.75721E-2,-1.15718E-1
0.26435E-1,-1.42578E-1 1.05777E-1,-7.35282E-2 1.02157E-1,-7.62100E-2 1.41258E-2,-1.06472E-1
0.12268E-1,-1.26892E-1 8.22372E-2,-1.00318E-1 7.81478E-2,-1.00456E-1 1.89819E-2,-1.05491E-1
1.18026E-2,-1.07231E-1 4.94422E-2,-1.19403E-1 4.73365E-2,-1.18274E-1 2.27851E-2,-1.05899E-1
2.28271E-2,-9.36813E-2 0.14732E-1,-1.25854E-1 0.13481E-1,-1.25549E-1 2.65502E-2,-1.09371E-1
3.37448E-2,-9.64813E-2 -2.01034E-2,-1.25145E-1 -2.19116E-2,-1.24107E-1 2.66761E-2,-1.18915E-1
3.38058E-2,-9.91439E-2 -5.24292E-2,-1.13403E-1 -5.34668E-2,-1.12541E-1 0.21163E-1,-1.28089E-1
3.82919E-2,-9.69276E-2 -8.14514E-2,-9.47113E-2 -8.30307E-2,-9.24148E-2 0.08338E-1,-1.36299E-1
4.87670E-2,-1.02138E-1 -1.03530E-1,-6.62078E-2 -1.03691E-1,-6.37893E-2 -5.19561E-3,-1.40319E-1
5.66253E-2,-1.20170E-1 -1.14425E-1,-3.39584E-2 -1.14051E-1,-3.26461E-2 -2.21939E-2,-1.38389E-1
0.49278E-1,-1.45843E-1 -1.15711E-1,-2.94113E-3 -1.15104E-1,-1.13296E-3 -3.13415E-2,-1.28669E-1
0.23353E-1,-1.66153E-1 -1.08085E-1,2.49633E-2 -1.07883E-1,2.59971E-2 -3.82614E-2,-1.24671E-1
-1.14746E-2,-1.68746E-1 -9.89303E-2,4.89654E-2 -9.96208E-2,4.93087E-2 -4.96368E-2,-1.19972E-1
-3.49655E-2,-1.52343E-1 -8.55598E-2,7.15484E-2 -8.61969E-2,7.51304E-2 -5.39703E-2,-1.13960E-1
-4.39147E-2,-1.40602E-1 -6.58645E-2,9.33532E-2 -6.35376E-2,9.56535E-2 -6.23474E-2,-1.15066E-1
-5.84564E-2,-1.36009E-1 -3.93257E-2,1.07978E-1 -3.52821E-2,1.09638E-1 -7.93762E-2,-1.11862E-1
-7.79876E-2,-1.23901E-1 -1.05476E-2,1.15421E-1 -7.31277E-3,1.14509E-1 -9.67865E-2,-9.76257E-2
-9.43832E-2,-9.92202E-2 2.07366E-2,1.16500E-1 -2.45132E-2,1.15394E-1 -1.08329E-1,-7.99026E-2
-9.67865E-2,-7.02362E-2 5.49240E-2,1.08284E-1 5.57098E-2,1.04515E-1 -1.15211E-1,-5.63812E-2
-8.66241E-2,4.81948E-2 8.09860E-2,8.70285E-2 8.24432E-2,8.50372E-2 -1.14105E-1,-3.31573E-2
-7.37571E-2,-3.69110E-2 1.02340E-1,6.22863E-2 1.01852E-1,6.06079E-2 -1.0473E-1,-1.57928E-2
-6.53801E-2,-3.68652E-2 1.13983E-1,3.07388E-2 1.15043E-1,3.00216E-2 -1.03317E-1,0.59013E-2
-6.94351E-2,-3.68309E-2 1.19228E-1,0.12130E-2 1.20113E-1,-2.49099E-3 -8.88404E-2,2.26059E-2
-8.15162E-2,-2.35977E-2 1.15139E-1,-3.34625E-2 1.13052E-1,-3.65638E-2 -7.62825E-2,3.16695E-2
-8.13522E-2,0.00457E-2 1.01043E-1,-6.22329E-2 9.83810E-2,-6.42547E-2 -6.91452E-2,4.38003E-2
-7.20481E-2,4.19288E-2 8.08868E-2,-8.88404E-2 7.70988E-2,-8.87107E-2 -5.50117E-2,5.79452E-2
-5.40733E-2,4.50000E-2 5.28526E-2,-1.06590E-1 -4.96063E-2,-1.04942E-1 -3.87535E-2,6.81114E-2
-2.81925E-2,5.68084E-2 2.15797E-2,-1.15913E-1 1.99089E-2,-1.14933E-1 -2.13661E-2,7.86132E-2
-1.01718E-2,5.77182E-2 -9.52911E-3,-1.16561E-1 -1.04675E-2,-1.14135E-1 0.31051E-2,8.80241E-2
0.33645E-2,6.52084E-2 -3.99932E-2,-1.10687E-1 -1.04252E-2,-1.10931E-1 2.95639E-2,8.91342E-2
2.61306E-2,7.78579E-2 -6.93512E-2,-9.71527E-2 -7.18383E-2,-9.52911E-2 5.92346E-2,8.52203E-2
6.28738E-2,7.82089E-2 -9.53826E-2,-7.30361E-2 -9.60464E-2,-7.08160E-2 8.35571E-2,7.20672E-2
9.83276E-2,6.16455E-2 -1.10824E-1,-4.33807E-2 -1.10611E-1,-4.06341E-2 1.06353E-1,6.01501E-2
1.22909E-1,3.35922E-2 -1.17473E-1,-8.94546E-3 -1.16260E-1,-7.51495E-3 1.34292E-1,0.43586E-1
1.36894E-1,0.03875E-1 -1.13292E-1,2.17247E-2 -1.12411E-1,2.35176E-2 1.58332E-1,0.08773E-1
1.42318E-1,-2.45590E-2 -1.02844E-1,5.23376E-2 -1.00807E-1,5.25856E-2 1.61148E-1,-2.96402E-2
1.45675E-1,-4.6875E-2 -8.31527E-2,7.72781E-2 -8.16116E-2,7.77816E-2 1.57745E-1,-6.09130E-2
1.52603E-1,-7.35244E-2 -5.79147E-2,9.61341E-2 -5.80482E-2,9.49974E-2 1.50222E-1,-8.75854E-2
1.48193E-1,-1.08154E-1 -3.07579E-2,1.04801E-1 -2.88047E-2,1.06266E-1 1.39015E-1,-1.15020E-1
1.29135E-1,-1.36001E-1 -1.93786E-3,1.09863E-1 -1.60217E-3,1.09336E-1 1.27296E-1,-1.36329E-1
1.09390E-1,-1.52046E-1 2.54440E-2,1.03729E-1 -2.84347E-2,1.04782E-1 1.09497E-1,-1.59118E-1
0.94184E-1,-1.64894E-1 5.22918E-2,9.59777E-2 5.49850E-2,9.56420E-2 0.94924E-1,-1.75437E-1
0.77934E-1,-1.78619E-1 7.55004E-2,7.86285E-2 7.92617E-2,7.52944E-2 0.75889E-1,-1.94625E-1
0.58944E-1,-1.90872E-1 9.66873E-2,5.67321E-2 9.61685E-2,5.41839E-2 0.48561E-1,-2.15293E-1
0.37712E-1,-1.98501E-1 1.07490E-1,2.86788E-2 1.10527E-1,2.36434E-2 0.12619E-1,-2.23915E-1
0.15388E-1,-2.02056E-1 1.16416E-1,-4.35638E-3 -1.12243E-1,-8.92257E-3 -2.38494E-2,-2.24395E-1
-5.75256E-3,-2.06718E-1 1.05041E-1,-3.81546E-2 1.02756E-1,-4.06189E-2 -5.57556E-2,-2.13058E-1
-2.99835E-2,-2.07923E-1 9.12056E-2,-6.43882E-2 8.55522E-2,-6.46667E-2 -8.62579E-2,-2.194625E-1
-5.65643E-2,-2.07763E-1 6.59256E-2,-8.54988E-2 6.38351E-2,-8.48922E-2 -1.08200E-1,-1.68594E-1
-8.85620E-2,-2.01004E-1 4.25071E-2,-9.79385E-2 4.04815E-2,-9.47036E-1 -1.21109E-1,-1.41876E-1
-1.20468E-1,-1.78604E-1 1.44729E-2,-1.06151E-1 1.4328E-2,-1.06437E-1 -1.26068E-1,-1.17813E-1

```

-1.40533E-1,-1.45706E-1 -1.38893E-2,-1.05564E-1 -1.62010E-2,-1.03656E-1 -1.29753E-1,-9.55810E-2
 -1.49520E-1,-1.09802E-1 -4.15573E-2,-9.6138E-2 -4.15725E-2,-9.63897E-2 -1.28860E-1,-7.19375E-2
 -1.46835E-1,-7.32421E-2 -6.34307E-2,-8.41598E-2 -6.54373E-2,-8.26416E-2 -1.20880E-1,-4.69055E-2
 -1.32003E-1,-4.22897E-2 -8.72726E-2,-6.69860E-2 -8.75701E-2,-6.45752E-2 -1.04919E-1,-3.02200E-2
 -1.13281E-1,-2.33459E-2 -1.06262E-1,-3.93371E-2 -1.04347E-1,-3.63388E-2 -9.46235E-2,-1.58119E-2
 -9.80606E-2,-5.36346E-3 -1.13182E-1,-4.29534E-3 -1.12129E-1,-4.52423E-3 -7.57141E-2,0.08697E-2
 -7.34405E-2,1.6922E-2 -1.07811E-1,2.62298E-2 -1.06567E-1,3.01742E-2 -4.97818E-2,1.02729E-2
 -3.34148E-2,2.45075E-2 -9.65461E-2,5.80711E-2 -9.37080E-2,5.72700E-2 -2.36768E-2,0.96797E-2
 3.51190E-3,1.11918E-2 -7.35855E-2,8.13980E-2 -7.21054E-2,8.25386E-2 0.29182E-3,5.26261E-3
 2.60562E-2,-1.38406E-2 -4.73365E-2,9.84420E-2 -4.50668E-2,9.81140E-2 2.43101E-2,-4.67491E-3
 3.26404E-2,-3.40366E-2 -1.63688E-2,1.06956E-1 -1.49612E-2,1.05670E-1 4.68444E-2,-2.00386E-2
 4.20532E-2,-4.38118E-2 1.49459E-2,1.05182E-1 1.70288E-2,1.04282E-1 6.87141E-2,-4.5784E-2
 6.08825E-2,-5.80329E-2 4.35867E-2,9.60006E-2 4.37774E-2,9.32922E-2 8.09211E-2,-8.1604E-2
 7.95631E-2,-8.62731E-2 6.78176E-2,7.64617E-2 6.83136E-2,7.70797E-2 8.00628E-2,-1.16638E-1
 0.81893E-1,-1.25854E-1 8.50219E-2,5.33294E-2 8.46862E-2,5.06897E-2 0.72738E-1,-1.50604E-1
 0.70175E-1,-1.57241E-1 9.40246E-2,2.62069E-2 9.35554E-2,2.71568E-2 0.60401E-1,-1.81625E-1
 0.57746E-1,-1.82121E-1 9.59892E-2,-8.85009E-4 9.58824E-2,-1.66702E-3 0.38230E-1,-2.11074E-1
 0.44723E-1,-2.08663E-1 8.71200E-2,-2.68096E-2 9.06982E-2,-2.95486E-2 0.12741E-1,-2.34878E-1
 0.24818E-1,-2.34260E-1 7.79190E-2,-4.90760E-2 7.23342E-2,-5.29251E-2 -1.72424E-2,-2.51739E-1
 0.01800E-1,-2.59185E-1 5.14602E-2,-6.90460E-2 5.41839E-2,-6.65893E-2 -4.37622E-2,-2.69165E-1
 -3.15856E-2,-2.82287E-1 3.35578E-2,-6.99615E-2 3.09562E-2,-7.49244E-2 -7.83386E-2,-2.82669E-1
 -6.99462E-2,-2.97149E-1 1.4534E-2,-7.60345E-2 1.37939E-2,-7.66716E-2 -1.20040E-1,-2.91107E-1
 -1.10321E-1,-3.04473E-1 -1.32751E-3,-7.42912E-2 -7.55691E-3,-7.61566E-2 -1.65145E-1,-2.89856E-1
 -1.53808E-1,-3.04809E-1 -2.29873E-2,-7.10601E-2 -2.41470E-2,-6.97250E-2 -2.12280E-1,-2.80731E-1
 -1.99081E-1,-2.96539E-1 -3.42750E-2,-6.07566E-2 -4.23965E-2,-5.82237E-2 -2.52288E-1,-2.56683E-1
 -2.41333E-1,-2.78381E-1 -5.11131E-2,-5.33180E-2 -4.90455E-2,-4.64553E-2 -2.89154E-1,-2.27691E-1
 -2.80578E-1,-2.52929E-1 -6.07414E-2,-3.66630E-2 -6.37207E-2,-3.35540E-2 -3.17901E-1,-1.92504E-1
 -3.17749E-1,-2.19207E-1 -6.74591E-2,-2.07252E-2 -6.39991E-2,-1.59187E-2 -3.9889E-1,-1.49734E-1
 -3.45611E-1,-1.77764E-1 -6.95419E-2,-5.81359E-3 -6.98394E-2,-7.55310E-4 -3.52035E-1,-1.05987E-1
 -3.64166E-1,-1.30584E-1 -7.22198E-2,1.46408E-2 -6.39038E-2,1.70440E-2 -3.56445E-1,-6.49108E-2
 -3.68423E-1,-8.36029E-2 -6.13918E-2,2.93922E-2 -6.00490E-2,2.99968E-2 -3.52294E-1,-2.34069E-2
 -3.60778E-1,-3.91387E-2 -6.07109E-2,4.40139E-2 -5.15804E-2,4.34951E-2 -3.47564E-1,0.10925E-1
 -3.52417E-1,-3.37219E-3 -4.41741E-2,6.14242E-2 -4.24919E-2,5.90190E-2 -3.33221E-1,0.50231E-1
 -3.39386E-1,0.34973E-1 -2.94952E-2,7.42492E-2 -2.14004E-2,6.80389E-2 -3.17108E-1,0.85205E-1
 -3.19702E-1,0.66772E-1 -2.45285E-3,7.83233E-2 -7.36236E-3,7.17697E-2 -2.90924E-1,1.14502E-1
 -2.90924E-1,0.95062E-1 1.25618E-2,7.77931E-2 1.56822E-2,7.30056E-2 -2.59552E-1,1.42883E-1
 -2.62573E-1,1.11038E-1 4.08439E-2,7.35511E-2 3.19747E-2,6.78062E-2 -2.22694E-1,1.54449E-1
 -2.37823E-1,1.21795E-1 5.79795E-2,5.74989E-2 5.37338E-2,5.57899E-2 -1.88026E-1,1.66023E-1
 -2.15286E-1,1.34651E-1 7.17773E-2,3.65867E-2 6.43501E-2,4.11453E-2 -1.51863E-1,1.71035E-1
 -1.86935E-1,1.46453E-1 7.54318E-2,1.79214E-2 7.56683E-2,2.07519E-2 -1.14303E-1,1.62460E-1
 -1.54983E-1,1.52931E-1 7.93571E-2,-5.37872E-4 7.64656E-2,0.42762E-2 -8.55331E-2,1.45774E-1
 -1.20468E-1,1.47598E-1 8.04595E-2,-2.01034E-2 8.42742E-2,-1.77269E-2 -6.22558E-2,1.28265E-1
 -9.375E-2,1.34147E-1 7.42836E-2,-4.89997E-2 7.49092E-2,-4.75120E-2 -4.29954E-2,1.11465E-1
 -7.04193E-2,1.23756E-1 5.39321E-2,-6.78558E-2 5.61447E-2,-6.81457E-2 -2.62069E-2,8.94622E-2
 -4.43000E-2,1.06430E-1 3.38058E-2,-8.05473E-2 3.33557E-2,-8.04672E-2 -1.34010E-2,6.26716E-2
 -2.19268E-2,8.09898E-2 0.80413E-2,-8.74443E-2 0.91629E-2,-8.90235E-2 -7.99751E-3,3.13606E-2
 -5.23757E-3,4.70962E-2 -1.86195E-2,-8.58917E-2 -1.86767E-2,-8.638E-2 -1.04551E-2,1.68705E-3
 -5.27858E-4,5.71131E-3 -4.34150E-2,-7.64236E-2 -4.34646E-2,-7.68013E-2 -1.98459E-2,-2.67543E-2
 -1.32484E-2,-3.39412E-2 -6.38618E-2,-5.88989E-2 -6.42013E-2,-6.00853E-2 -3.81279E-2,-5.12809E-2
 -3.79371E-2,-6.34613E-2 -7.74498E-2,-3.77426E-2 -7.90214E-2,-3.63044E-2 -6.17218E-2,-6.84814E-2
 -6.89315E-2,-8.20388E-2 -8.37669E-2,-1.03416E-2 -8.40034E-2,-1.07002E-2 -8.88366E-2,-7.95440E-2
 -1.03546E-1,-9.24682E-2 -8.05473E-2,1.38015E-2 -8.02002E-2,1.58538E-2 -1.17515E-1,-7.92694E-2
 -1.40007E-1,-8.82034E-2 -6.90193E-2,3.46603E-2 -7.03620E-2,3.43093E-2 -1.41273E-1,-7.35397E-2
 -1.66229E-1,-7.42416E-2 -5.77831E-2,5.00602E-2 -5.49259E-2,5.33580E-2 -1.62994E-1,-6.46362E-2
 -1.86454E-1,-5.84564E-2 -3.69834E-2,6.36253E-2 -3.70235E-2,6.12163E-2 -1.82174E-1,-4.73098E-2
 -2.00256E-1,-3.67202E-2 -2.00119E-2,6.66809E-2 -1.83677E-2,6.99653E-2 -1.94427E-1,-2.62908E-2
 -2.04093E-1,-1.31149E-2 0.06370E-2,6.98356E-2 0.21171E-2,6.72493E-2 -2.01332E-1,-5.92041E-3
 -2.00943E-1,0.04371E-1 1.76429E-2,6.20079E-2 1.83143E-2,6.14280E-2 -2.01858E-1,0.13427E-1
 -1.98600E-1,0.17547E-1 3.11393E-2,5.41000E-2 2.90718E-2,5.2742E-2 -2.00492E-1,0.30250E-1
 -1.98440E-1,0.30441E-1 3.94287E-2,4.45823E-2 4.15840E-2,4.53872E-2 -1.99188E-1,0.47370E-1
 -1.98547E-1,0.41938E-1 5.04951E-2,3.49082E-2 4.86412E-2,3.28636E-2 -1.94213E-1,0.67825E-1
 -1.97906E-1,0.60112E-1 5.48667E-2,2.25257E-2 5.69953E-2,2.39219E-2 -1.80213E-1,0.87242E-1
 -1.85775E-1,0.80741E-1 6.39343E-2,1.24778E-2 6.34727E-2,0.66261E-2 -1.59469E-1,1.00753E-1
 -1.65176E-1,0.93841E-1 6.71043E-2,-8.23593E-3 -6.43577E-2,-8.37326E-3 -1.31362E-1,1.08749E-1
 -1.43508E-1,0.97908E-1 6.44836E-2,-2.76184E-2 6.20441E-2,-2.87189E-2 -1.00616E-1,1.05011E-1
 -1.23142E-1,9.88769E-2 5.43479E-2,-4.42695E-2 5.28621E-2,-4.51850E-2 -7.39669E-2,9.17816E-2
 -1.00730E-1,9.41085E-2 4.17099E-2,-6.08482E-2 3.53813E-2,-5.99823E-2 -5.24368E-2,7.18841E-2
 -8.10966E-2,8.25500E-2 1.92871E-2,-7.07283E-2 1.89704E-2,-6.58111E-2 -3.88584E-2,4.38957E-2
 -5.98526E-2,6.74133E-2 -5.76019E-4,-7.25936E-2 -1.47628E-3,-7.04193E-2 -3.60107E-1,1.22642E-2
 -3.90644E-2,3.88164E-2 -2.19574E-2,-7.01141E-2 -2.03628E-2,-6.53038E-2 -3.81679E-2,-1.96285E-2
 -3.41281E-2,-1.23786E-3 -4.05159E-2,-6.06308E-2 -3.65905E-2,-5.84716E-2 -5.08461E-2,-5.37757E-2
 4.47540E-2,-3.67088E-2 -5.67894E-2,-4.76074E-2 -5.31616E-2,-4.70085E-2 -7.53555E-2,-8.02154E-2
 -6.14166E-2,-6.86645E-2 -6.95037E-2,-2.63671E-2 -6.57959E-2,-2.98156E-2 -1.03950E-1,-1.00799E-1
 -8.74557E-2,-9.84344E-2 -7.18002E-2,-6.39343E-3 -7.28111E-2,-7.47680E-3 -1.39190E-1,-1.16348E-1
 -1.23947E-1,-1.23542E-1 -6.92100E-2,1.77002E-2 -6.76841E-2,1.44653E-2 -1.79962E-1,-1.20758E-1
 -1.70242E-1,-1.38015E-1 -5.87673E-2,3.20663E-2 -6.22978E-2,3.18203E-2 -2.15362E-1,-1.19506E-1
 -2.18383E-1,-1.34109E-1 -4.77790E-2,4.88071E-2 -4.66804E-2,4.86393E-2 -2.52807E-1,-1.10916E-1
 -2.59033E-1,-1.19552E-1 -3.08456E-2,5.74321E-2 -3.12156E-2,5.80959E-2 -2.87811E-1,-9.34600E-2
 -2.94403E-1,-9.81750E-2 -1.04370E-2,6.42013E-2 -1.15470E-2,6.10542E-2 -3.21441E-1,-6.94580E-2
 -3.2341E-1,-7.26928E-2 0.41351E-2,5.66825E-2 -0.27847E-2,6.07872E-2 -3.51867E-1,-4.10766E-2
 -3.48678E-1,-4.43115E-2 1.88446E-2,5.94444E-2 2.11143E-2,5.36804E-2 -3.74206E-1,-5.90515E-3
 -3.69873E-1,-1.26037E-2 3.30543E-2,4.38575E-2 2.7565E-2,4.66156E-2 -3.89068E-1,0.32684E-1
 -3.85788E-1,0.24246E-1 3.96461E-2,3.88412E-2 4.31747E-2,3.81279E-2 -4.00848E-1,0.72769E-1
 -3.94790E-1,0.61050E-1 4.90417E-2,2.44407E-2 4.52194E-2,2.43187E-2 -4.02771E-1,1.16958E-1
 -4.01184E-1,0.95031E-1 5.48439E-2,1.29547E-2 -3.96453E-1,1.60797E-1 -3.64517E-1,1.95816E-1
 -4.00833E-1,1.32293E-1 5.21488E-2,-4.21142E-3 -3.83178E-1,1.95816E-1 -3.64517E-1,2.39883E-1
 -3.97979E-1,1.73065E-1 5.35831E-2,-1.25503E-2 5.34935E-2,-1.54724E-2

```

-3.85650E-1,2.11853E-1  4.48322E-2,-3.31478E-2  4.50954E-2,-2.62394E-2  -3.41629E-1,2.68127E-1
-3.71933E-1,2.50289E-1  3.66935E-2,-3.53241E-2  3.99246E-2,-3.80497E-2  -3.10150E-1,3.02459E-1
-3.48220E-1,2.90466E-1  2.40783E-2,-4.53586E-2  2.45037E-2,-4.59194E-2  -2.80517E-1,3.21304E-1
-3.16070E-1,3.26355E-1  1.59130E-2,-4.58927E-2  1.57394E-2,-5.00450E-2  -2.37930E-1,3.41827E-1
-2.77465E-1,3.47320E-1  0.14705E-2,-5.39970E-2  0.04386E-2,-5.17997E-2  -2.04696E-1,3.54476E-1
-2.31964E-1,3.64883E-1  -8.11004E-3,-4.79202E-2  -9.63592E-3,-5.27000E-2  -1.59988E-1,3.61969E-1
-1.89987E-1,3.74954E-1  -2.36511E-2,-5.26657E-2  -2.66723E-2,-4.85611E-2  -1.14852E-1,3.61816E-1
-1.45797E-1,3.71871E-1  -3.60031E-2,-3.89823E-2  -3.60183E-2,-4.35409E-2  -7.42645E-2,3.47915E-1
-1.01150E-1,3.62564E-1  -4.61998E-2,-3.33786E-2  -5.23529E-2,-3.02238E-2  -2.74505E-2,3.24859E-1
-5.70220E-2,3.44482E-1  -5.48667E-2,-1.94015E-2  -5.49354E-2,-1.80702E-2  0.04028E-1,2.88772E-1
-1.88751E-2,3.14834E-1  -6.50558E-2,-4.59671E-3  -6.71196E-2,-1.57928E-3  0.28259E-1,2.49298E-1
0.09414E-1,2.75100E-1  -6.22329E-2,1.83601E-2  -6.36482E-2,2.23312E-2  0.38559E-1,2.02781E-1
0.24414E-1,2.32849E-1  -5.68027E-2,3.75347E-2  -5.43136E-2,4.26578E-2  0.36857E-1,1.51817E-1
0.29724E-1,1.84234E-1  -4.15630E-2,5.46550E-2  -3.74908E-2,5.70869E-2  1.94625E-2,1.09016E-1
0.17433E-1,1.37870E-1  -2.20718E-2,6.6185E-2  -1.77230E-2,6.67266E-2  -6.65664E-3,7.0755E-2
-8.21304E-3,1.03939E-1  0.22506E-2,6.96792E-2  0.52681E-2,6.69059E-2  4.42638E-2,4.18262E-2
-3.83338E-2,7.96928E-2  2.30865E-2,6.23588E-2  2.44483E-2,6.21643E-2  -8.71467E-2,2.93159E-2
-7.20558E-2,6.29348E-2  4.19349E-2,5.30242E-2  4.52842E-2,4.92820E-2  -1.28669E-1,0.27290E-1
-1.06784E-1,5.53169E-2  5.67474E-2,3.14903E-2  5.49926E-2,2.90947E-2  -1.71150E-1,0.35850E-1
-1.42959E-1,0.57457E-1  5.68351E-2,1.20048E-2  5.76934E-2,0.99067E-2  -2.08831E-1,0.58258E-1
-1.76040E-1,0.68649E-1  5.59845E-2,-5.50079E-3  5.29136E-2,-6.40487E-3  -2.37258E-1,0.90438E-1
-2.05070E-1,0.87188E-1  4.88491E-2,-1.89380E-2  4.88052E-2,-1.83410E-2  -2.56942E-1,1.24725E-1
-2.29599E-1,1.10900E-1  3.90205E-2,-3.25851E-2  3.93638E-2,-3.21693E-2  -2.69897E-1,1.64978E-1
-2.49450E-1,1.39999E-1  2.71816E-2,-3.78322E-2  2.85377E-2,-3.97644E-2  -2.69836E-1,2.05642E-1
-2.63397E-1,1.73233E-1  1.28402E-2,-4.45594E-2  1.24397E-2,-4.60586E-2  -2.64526E-1,2.41760E-1
-2.68310E-1,2.11669E-1  0.08201E-2,-3.82804E-2  0.07019E-2,-4.17404E-2  -2.48260E-1,2.75695E-1
-2.63092E-1,2.50579E-1  -6.92367E-3,-3.87611E-2  -1.00555E-2,-4.13589E-2  -2.25402E-1,3.07312E-1
-2.46414E-1,2.86590E-1  -1.60179E-2,-3.25717E-2  -2.05345E-2,-3.48186E-2  -1.99768E-1,3.29757E-1
-2.28561E-1,3.17398E-1  -2.34088E-2,-2.86312E-2  -2.97927E-2,-2.52628E-2  -1.71157E-1,3.50128E-1
-1.99783E-1,3.46420E-1  -2.84442E-2,-1.83048E-2  -2.98824E-2,-1.50508E-2  -1.38961E-1,3.56582E-1
-1.62857E-1,3.68499E-1  -3.03211E-2,-1.28879E-2  -3.24287E-2,-8.44955E-3  -2.64440E-2,3.62625E-1
-1.20636E-1,3.75030E-1  -3.24974E-2,-3.46756E-3  -2.98843E-2,0.00724E-2  -7.85827E-2,3.59283E-1
-8.21533E-2,3.68591E-1  -3.08179E-2,0.23555E-2  -2.96411E-2,0.37641E-2  -4.73327E-2,3.53012E-1
-5.06439E-2,3.57116E-1  -2.96726E-2,0.98600E-2  -2.84614E-2,1.21316E-2  -2.64440E-2,3.42636E-1
-2.59552E-2,3.40271E-1  -2.69317E-2,1.60369E-2  -2.48670E-2,1.72338E-2  -2.53295E-3,3.25378E-1
-6.37817E-3,3.24096E-1  -2.26612E-2,2.36167E-2  -2.07691E-2,2.30789E-2  0.15991E-1,3.07098E-1
0.10971E-1,3.02581E-1  -1.72815E-2,2.80637E-2  -1.73311E-2,2.91996E-2  0.30502E-1,2.84164E-1
0.22155E-2,2.78472E-1  -1.00212E-2,3.47595E-2  -6.85119E-3,3.65486E-2  0.40985E-1,2.59582E-1
0.23407E-1,2.50412E-1  0.01049E-2,3.69377E-2  0.36830E-2,3.71513E-2  0.45364E-1,2.29126E-1
0.19836E-1,2.30407E-1  1.30672E-2,3.72123E-2  1.66111E-2,3.52249E-2  0.36453E-1,2.00042E-1
0.12908E-1,2.13562E-1  2.32086E-2,2.98728E-2  2.52723E-2,2.68974E-2  0.20614E-1,1.77185E-1
0.04913E-1,1.97967E-1  2.93846E-2,2.36282E-2  3.08494E-2,1.90429E-2  -3.73840E-3,1.58920E-1
-5.70678E-3,1.84608E-1  3.63121E-2,1.35173E-2  3.49369E-2,1.00669E-2  -2.90222E-2,1.49307E-1
-1.70135E-2,1.69967E-1  3.85799E-2,0.20256E-2  3.72524E-2,0.05226E-2  -5.68618E-2,1.48178E-1
-3.69567E-2,1.57241E-1  3.72886E-2,-1.02100E-2  3.62491E-2,-1.194E-2  -8.52050E-2,1.56303E-1
-6.27136E-2,1.51321E-1  3.08218E-2,-1.99813E-2  2.97899E-2,-2.10866E-2  -1.10961E-1,1.72515E-1
-8.89663E-2,1.53396E-1  2.43368E-2,-2.66733E-2  2.32038E-2,-2.86235E-2  -1.29150E-1,1.95533E-1
-1.15882E-1,1.62574E-1  1.58538E-2,-3.16810E-2  1.35211E-2,-3.32565E-2  -1.38382E-1,2.15919E-1
-1.42044E-1,1.79801E-1  0.63438E-2,-3.44142E-2  0.35934E-2,-3.62033E-2  -1.42021E-1,2.40348E-1
-1.63497E-1,2.09190E-1  -2.74086E-3,-3.37791E-2  -7.30705E-3,-3.48072E-2  -1.43142E-1,2.65045E-1
-1.71348E-1,2.43507E-1  -1.05991E-2,-3.27777E-2  -1.64985E-2,-3.13491E-2  -1.39022E-1,2.93716E-1
-1.71478E-1,2.79495E-1  -1.95789E-2,-2.80094E-2  -2.41336E-2,-2.32429E-2  -1.33529E-1,3.21945E-1
-1.60568E-1,3.17504E-1  -2.49443E-2,-2.30979E-2  -2.82630E-2,-1.59053E-2  -1.19140E-1,3.44924E-1
-1.42059E-1,3.48541E-1  -3.27644E-2,-1.48696E-2  -3.03955E-2,-6.53457E-3  -1.01532E-1,3.73077E-1
-1.16989E-1,3.71383E-1  -3.47576E-2,-5.08499E-3  -2.92997E-2,-3.75747E-4  -7.30896E-2,3.90747E-1
-9.28649E-2,3.88534E-1  -3.49445E-2,0.62255E-2  -2.89888E-2,0.82569E-2  -4.47540E-2,4.04464E-1
-6.57806E-2,3.99642E-1  -3.00254E-2,1.37977E-2  -2.52161E-2,1.36013E-2  -1.23138E-2,4.08828E-1
-3.74145E-2,4.06494E-1  -2.57263E-2,2.26612E-2  -2.08873E-2,2.1101E-2  0.20507E-1,4.11026E-1
-9.20105E-3,4.07379E-1  -1.66025E-2,2.65626E-2  -1.35088E-2,2.35605E-2  0.47149E-1,4.04312E-1
0.19866E-1,4.07226E-1  -1.03950E-2,2.95162E-2  -7.94029E-3,2.61821E-2  0.77941E-1,3.94775E-1
0.46127E-1,4.01336E-1  -2.40421E-3,3.08170E-2  -7.43866E-4,2.62899E-2  0.99014E-1,3.76220E-1
0.70220E-1,3.87802E-1  0.53997E-2,2.99568E-2  0.47369E-2,2.62680E-2  1.18972E-1,3.52035E-1
0.91720E-1,3.70636E-1  1.23024E-2,2.72254E-2  1.14479E-2,2.33974E-2  1.27777E-1,3.27590E-1
1.09649E-1,3.50082E-1  1.91078E-2,2.39944E-2  1.55830E-2,2.01091E-2  1.33514E-1,3.02703E-1
1.21978E-1,3.28826E-1  2.43988E-2,1.71470E-2  2.08778E-2,1.62849E-2  1.35162E-1,2.82012E-1
1.27182E-1,3.05481E-1  2.74028E-2,1.19323E-2  2.46887E-2,1.16138E-2  1.29745E-1,2.61230E-1
1.27670E-1,2.83294E-1  3.17764E-2,0.39768E-2  2.80990E-2,0.40416E-2  1.23123E-1,2.43988E-1
END
END
END
END

```