

ELETRO MAGNETISMO APLICADO



LittleMax
e a luta contra o Câncer
Cerebral Infantil

Fomento a Pesquisa PPP do
FISP via Edital nº 823/2018

**Antenas Vivaldi Palm Tree para Imagens
Médicas por Micro-ondas de Campo Próximo**

História do Eletromag

Equações de Maxwell

Projeto de Antenas

CNC de Manufatura Aditiva

2ª Edição

www.Labmax.org

Instituto Federal de São Paulo
Laboratório Maxwell

Micro-ondas e Eletromagnetismo Aplicado

Certificado CNPq nº 5.497.663.866.471.659



INSTITUTO FEDERAL
São Paulo

7anos
2016 - 2023



**Alexandre Maniçoba De Oliveira, Dr.
Antonio Mendes De Oliveira Neto, Dr.
João Francisco Justo Filho, Ph.D.
Raimundo Eider Figueredo Sobrinho, Engº.**

ELETROMAGNETISMO APLICADO

Antenas Vivaldi Palm Tree para Imagens Médicas por Micro-ondas de Campo Próximo

2ª Edição

São Paulo / SP

LabMax

2023



Este livro é a compilação de mais de uma década de pesquisa em eletromagnetismo aplicado e práticas de docência para cursos de Engenharia pelo Dr. Alexandre Maniçoba de Oliveira, professor D303 do Instituto Federal de São Paulo, com a colaboração do Dr. João Francisco Justo Filho, professor titular da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo do Dr. Antonio Mendes de Oliveira Neto e do Eng. Raimundo Eider Figueredo Sobrinho.

Catálogo na publicação

A. M. De Oliveira, D.Sc. / A.M. De Oliveira Neto, D.Sc. / R.E.F. Sobrinho, Eng. / J. F. Justo, Ph.D.

ELETROMAGNETISMO APLICADO/ Antenas Vivaldi Palm Tree para Imagens Médicas por Micro-ondas de Campo Próximo – 2ª Ed./ A.M.D.O. – São Paulo: CDA, 2023.

310 p.

ISBN 978-65-00-72135-5

1. Engenharia Elétrica. 2. Eletromagnetismo. 3. Antena Vivaldi. 4. Imagens por Micro-ondas.



Eletromagnetismo Aplicado

Antenas Vivaldi Palm Tree para Imagens Médicas por Micro-ondas de Campo Próximo – 2ª Edição

Mais uma publicação do:



Laboratório Maxwell

Micro-ondas e Eletromagnetismo Aplicado

Instituto Federal de São Paulo | Campus Suzano e Cubatão

Laboratório Sede

Avenida Mogi das Cruzes, 1501, Suzano, SP, CEP 08673-010

Bloco A, Sala A108, 11. 2146-1809

Laboratório II

Rua Maria Cristina, 50, Cubatão, SP, CEP 11533-160

Bloco Industrial Lab. 217

Impresso no Brasil

www.labmax.org

ISBN 978-65-00-72135-5



9 786500 721355

Copyright © 2023 by Dr. Alexandre Maniçoba de Oliveira

Editora Clube de Autores

2ª Edição – São Paulo: Julho de 2023

Capa:

Alexandre Maniçoba De Oliveira, DSc. / IFSP

Autores:

Alexandre Maniçoba De Oliveira, D.Sc.

Professor D303 EBTT do Instituto Federal de São Paulo

Doutor em Ciências da Engenharia Elétrica pelo Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da EPUSP

Antonio Mendes De Oliveira Neto, D.Sc.

Professor D303 EBTT do Instituto Federal de São Paulo

Doutor em Ciências da Engenharia Elétrica pelo Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos da EPUSP

Raimundo Eider Figueredo Sobrinho, Eng.

Engenheiro de Controle e Automação formado pelo Instituto Federal de São Paulo

João Francisco Justo Filho, Ph.D.

Professor Titular da Escola Politécnica da USP

Philosophiae Doctor em Engenharia Nuclear pelo Massachusetts Institute of Technology

Editor:

Alexandre Maniçoba De Oliveira, DSc.



LittleMax
e a luta contra o Câncer
Cerebral Infantil



AGRADECIMENTOS

Dr. Alexandre M. De Oliveira agradece a Deus, por toda força concedida nesta jornada e aos colegas do Laboratório James Clerk Maxwell por todo apoio e colaboração acadêmica.

Dr. Antônio M. de Oliveira Neto agradece a Deus, a sua família e seus amigos do LabMax pelo apoio na execução deste trabalho.

Ph.D. João Francisco Justo Filho agradece aos colegas de pesquisa do LabMax pelo continuado suporte.

Raimundo Eider Figueredo Sobrinho agradece ao Dr. Alexandre M. De Oliveira pelo incentivo à pesquisa e a produção acadêmica. Agradece também a sua esposa, a sua mãe (*in memorian*), a sua madrasta, pai e irmãs por proporcionarem o alicerce sobre o qual se baseia toda a sua vida: a família!



“Eu creio em mim mesmo. Creio nos que trabalham comigo, creio nos meus amigos e creio na minha família. Creio que Deus me emprestará tudo que necessito para triunfar, contanto que eu me esforce para alcançar com meios lícitos e honestos. Creio nas orações e nunca fecharei meus olhos para dormir, sem pedir antes a devida orientação a fim de ser paciente com os outros e tolerante com os que não acreditam no que eu acredito. Creio que o triunfo é resultado de esforço inteligente, que não depende da sorte, da magia, de amigos, companheiros duvidosos ou de meu chefe. Creio que tirarei da vida exatamente o que nela colocar. Serei cauteloso quando tratar os outros, como quero que eles sejam comigo. Não caluniarei aqueles que não gosto. Não diminuirei meu trabalho por ver que os outros o fazem. Prestarei o melhor serviço de que sou capaz, porque jurei a mim mesmo triunfar na vida, e sei que o triunfo é sempre resultado do esforço consciente e eficaz. Finalmente, perdoo os que me ofendem, porque compreendo que às vezes ofendo os outros e necessito de perdão”.

Mahatma Gandhi.



APRESENTAÇÃO

O objetivo deste trabalho é propor a síntese e o estudo de novas técnicas aplicadas a antenas Vivaldi, com o intuito de melhorar suas características de diretividade e com isso possa ser aplicada a área de análise médica por imagens de micro-ondas. 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 dos fractais de Koch e de Cantor, que funcionam como radiadores auxiliares (antenas parasitas), 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 novas antenas Vivaldis efetivamente diretivas. Os resultados foram obtidos através de simulações do modelo numérico 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.



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. 50	
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. 51	51
Figura 3 - Ilustração da Lei de Indução Magnética de Faraday. 59	59
Figura 4 - Ilustração da densidade de corrente superficial. 61	61
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. 62	62
Figura 6- Linhas de campo magnético atravessando a superfície fechada ∂V 64	64
Figura 7- Ilustração da discretização de domínio do problema eletromagnético nas malhas ortogonais. 66	66
Figura 8- Ilustração das etapas de aplicação das equações de Maxwell nas faces do hexaedro. 67	67
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). 70	70
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. 73	73
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. 74	74
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. 76	76
Figura 13- Oscilador HP 8350B (a) e RF Plug-in HP 83540A 2.0-8.4 GHz (b). 77	77



Figura 14- Oscilador HP 8350B (a) e RF Plug-in HP 83595A .01-26.5 GHz (b).....	78
Figura 15- Medidor de potência HP 438A.....	78
Figura 16- Sensor de potência HP 8740D.....	79
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).....	83
Figura 18- AVA-974 proposta com detalhe da abertura exponencial do irradiador (DE OLIVEIRA, <i>et al.</i> 2012a).	84
Figura 19- Parâmetros do projeto da AVA-974 referência proposta por De Oliveira <i>et al.</i> (2012a).....	85
Figura 20- Fotografia da AVA-974 Referência fabricada, sendo a vista superior à esquerda e a inferior à direita.	86
Figura 21- Perda por retorno da AVA-974 Referência Medida (linha contínua) e Simulada (linha tracejada).....	87
Figura 22- Diagrama de radiação da AVA-974 Referência Medido ($X's$) e Simulado (linha tracejada) a 6 e 8,4 GHz.	89
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 do lóbulos laterais.	91
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).	92
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).	93
Figura 26- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz, da AVA-974 Referência.	94
Figura 27- AVA-974 original (a) e RSE-AVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.	106
Figura 28- Fotografia da RSEAVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior.	107
Figura 29- Perda por retorno simulada da RSEAVA-974 (linha contínua) e da AVA-974 (linha tracejada).	108



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.	110
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).	111
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).	112
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).	114
Figura 34- AVA-974 original (a) e TSEAVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.	115
Figura 35- Fotografia da TSEAVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior.	116
Figura 36- Perda por retorno simulada da TSEAVA-974 (linha contínua) e da AVA-974 (linha tracejada).	117
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.	118
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).	119
Figura 39 - Diagrama de distribuição de correntes de superfície da TSEAVA-974 com orientação de sentido e direção das correntes identificadas	121
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).	122
Figura 41- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6GHz. Acima AVA-974 e abaixo RSEAVA-974.	124



Figura 42- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz. Acima AVA-974 e abaixo TSEAVA-974.	126
Figura 43- Diagrama de distribuição de campos elétricos no plano x-z, a 6 GHz. Acima AVA-974 e abaixo Palm Tree AVA-974.	128
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.	129
Figura 45- AVA-974 original (a) e Palm Tree AVA-974 (b) com as respectivas indicações de medidas.	132
Figura 46- Fotografia da Palm Tree AVA-974 fabricada, onde a esquerda está a vista superior e a direita a vista inferior (DE OLIVEIRA, <i>et al.</i> 2015).	134
Figura 47- Detalhe dos três principais parâmetros (i , α e β) de aplicação da técnica ESE.	135
Figura 48- Diferentes Palm Tree AVA obtidas durante o processo de otimização.	136
Figura 49- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro i da Palm Tree AVA.	137
Figura 50- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro i	138
Figura 51- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro i	138
Figura 52- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro β da Palm Tree AVA.	139
Figura 53- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro β	140
Figura 54- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro β	140
Figura 55- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro α da Palm Tree AVA.	141
Figura 56- Resultado do ganho da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro α	142
Figura 57- Resultado do SLL da Palm Tree AVA em função da variação do parâmetro α	142
Figura 58- Tela do programa CAD DraftSight utilizado para criar as plantas da antena.	144
Figura 59- Fotografia da segunda remessa de laminados Rogers de cortesia.	145



Figura 60- Conector SMA 50Ω. A foto superior é do conector real e abaixo do modelo numérico no CST Microwave Studio (DE OLIVEIRA, 2015).....	147
Figura 61- Modelo numérico do conector SMA utilizado com o detalhe das portas 1 e 2 para simulação.....	148
Figura 62- Distribuição de campos elétricos (a) e magnéticos (b) na porta 1 durante simulação em Modo 1 (TEM).....	149
Figura 63- Perda por retorno do conector SMA modelado.....	149
Figura 64- Fotografia microscópica com detalhe da precisão de usinagem do processo de fabricação da MTL.....	150
Figura 65- Fotografia microscópica com detalhe da precisão de usinagem do ESE.....	151
Figura 66- Perda por retorno simulada e medida da AVA Referência e da Palm Tree AVA-974 (a) e detalhe do LIF (b).....	152
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.....	153
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).....	157
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).....	159
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).	160
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.....	163
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.....	165
Figura 73- Fotografia ampliada do detalhe da cavidade de terceira geração do fractal.....	166



- 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)..... 167
- Figura 75- Três primeiras iterações do SFI da curva de Koch para a geometria inicial A. 169
- 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.... 170
- Figura 77- Resultado da perda por retorno em função da variação do parâmetro número da iteração Koch AVA..... 171
- Figura 78- Resultado do ganho da Koch AVA em função da variação do número de iterações. 171
- Figura 79- Resultado do SLL da Koch AVA em função da variação do número da iteração..... 172
- Figura 80- Perda por retorno simulada e medida da AVA Referência e da Koch AVA-974. 173
- 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..... 174
- 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)..... 176
- 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)..... 178
- Figura 84- Distribuição absoluta de campos elétricos no plano *xy* a 7GHz para (a) AVA-974 e (b) FSEAVA-974..... 179
- Figura 85 - Parâmetros de projeto e antena no plano XZ, onde a parte hachurada na cor clara (esquerda) representa a metalização da vista superior, a parte hachurada na cor escura (direita) representa a



metalização da vista inferior: (a) AVA regular e (b) FAVA proposta.	191
Figura 86 - FAVA Fabricada: Vistas superior (a) e inferior (b).	192
Figura 87 - S11 medido e simulado do AVA e FAVA. Redução da frequência do limite inferior da FAVA em detalhes.	193
Figura 88 - Ganhos simulados AVA, ESE-AVA e FAVA.	194
Figura 89 - Diagrama de correntes superficiais: (a) AVA, (b) FAVA e (c) ESE-AVA, todas a 1,5 GHz.	194
Figura 90 - Distribuição de campo elétrico no plano xz a 1,5 GHz para (a) AVA, (b) FAVA e (c) ESE-AVA.	195
Figura 91 - Diagrama de radiação de campo distante em (a) 1,5 GHz, (b) 1,75 GHz e (c) 2 GHz da FAVA e em (d) 1,5 GHz, (e) 1,75 GHz e (F) 2 GHz da AVA regular, o padrão radiante de campo próximo em (g) 1,5 GHz, (h) 1,75 GHz e (i) 2 GHz da FAVA e em (j) 1,5 GHz, (k) 1,75 GHz, e (l) 2 GHz da AVA regular, e no campo próximo reativo à (m) 1,5 GHz, (n) 1,75 GHz, e (o) 2 GHz da FAVA à (p) 1,5 GHz, (q) 1,75 GHz, e (r) 2 GHz da AVA regular.	198
Figura 92 - Parâmetros da AVA e das antenas projetadas. (a) AVA convencional, (b) AC-FSE-AVA, (c) OC-FSE-AVA, (d) HC-FSE-AVA, (e) QC-FSE-AVA e (f) TIC-FSE-AVA.	204
Figura 93 - Geometria fractal de Cantor e suas derivadas. (a) Anel de cantor, (b) Octógono, (c) Hexágono, (d) Quadrado e (e) Triângulo.	206
Figura 94 - Etapas no processo de prototipação da AVA e das antenas propostas.	210
Figura 95 - Protótipos das antenas. (a) AVA, (b) AC-FSE-AVA, (c) OC-FSE-AVA, (d) HC-FSE-AVA, (e) QC-FSE-AVA e (f) TIC-FSE-AVA.	211
Figura 96 - Parâmetro S11 simulado e medido da AVA, AC-FSE-AVA, OC-FSE-AVA, HC-FSE-AVA, QC-FSE-AVA e TIC-FSE-AVA. ...	212
Figura 97 - Ganho em relação a frequência da AVA, AC-FSE-AVA, OC-FSE-AVA, HC-FSE-AVA, QC-FSE-AVA e TIC-FSE-AVA.	213
Figura 98 - Diretividade em relação a frequência da AVA, AC-FSE-AVA, OC-FSE-AVA, HC-FSE-AVA, QC-FSE-AVA e TIC-FSE-AVA. ...	214
Figura 99 - Diagrama de radiação 2D em 2,75 GHz. (a) AVA, (b) AC-FSE-AVA, (c) OC-FSE-AVA, (d) HC-FSE-AVA, (e) QC-FSE-AVA e (f) TIC-FSE-AVA.	215
Figura 100 - Comportamento das linhas de campo elétrico nas antenas em frequência de 3,25 GHz. (a) AVA, (b) AC-FSE-AVA, (c) OC-FSE-	



AVA, (d) HC-FSE-AVA, (e) QC-FSE-AVA e (f) TIC-FSE-AVA.	217
Figura 101 - Corrente de superfície da AVA e antenas proposta na frequência de 3,25 GHz. (a) AVA, (b) AC-FSE-AVA, (c) OC-FSE-AVA, (d) HC-FSE-AVA, (e) QC-FSE-AVA e (f) TIC-FSE-AVA.	219
Figura 102 - Metodologia de processamento de sinais implementada.....	222
Figura 103 - Ambiente de teste e desenvolvimento com o uso do Phantom SAM A01 físico (a) criado pelo grupo. Dentro dele há um tumor artificial de 5×5×5 mm ³ . Modelo matemático do Phantom (b) para análises em ambientes de simulação eletromagnética.....	224
Figura 104 - Parâmetro S11 com o uso da FSE-AVA em duas posições: na frente do alvo, no centro da área de varredura (40 mm), em dB, no domínio da frequência (a) no domínio do tempo, com a aplicação do IFT (b), com remoção do ruído de fundo (c), valores absolutos (módulo) (d) e o envelope (e); No extremo da área de varredura (posição 0 ou 80 mm) em dB, ou seja, na diagonal do alvo; no domínio da frequência (f), no domínio do tempo, com a aplicação de IFT (g), com a remoção do ruído de fundo (h), valores absolutos (i) e, finalmente, o envelope (j).....	230
Figura 105 - 2-D mapa de varredura do tumor cerebral com a FSE-AVA em (“a”, “b”, “c” e “d”), e com a AVA referência em (“e”, “f”, “g” e “h”). Em (“a” e “e”), aparece o mapa do parâmetro S11 medido. Em (“b” e “f”), o mapa sem o ruído de fundo. Em (“c” e “g”), o mapa em valores absolutos. E finalmente em (“d” e “h”), as imagens finais por micro-ondas obtidas pela aplicação do algoritmo de envoltória (envelope).	231
Figura 106 - 2-D mapa de varredura do alvo com a FSE-AVA (a), e com a AVA referência (b), ambas com o detalhe da região que representa o alvo detectado. O alvo detectado usando a AVA referência foi representado pela figura de cor azul claro em (c) e usando a FSE-AVA (d) pela figura de contorno azul claro e com interior em vermelho. A região hachurada em (e) e (f) determina a área de superfície da imagem.	234
Figura 107 - Relação da frequência com a constante dielétrica e a condutividade do pulmão inflado com ar.....	236
Figura 108 - Imagem 153 do paciente 10 da tomografia computadorizada de paciente com COVID-19, coletado do banco de dados do trabalho de SHAKOURI et al. (2021).....	238



Figura 109 - Impressão 3D com filamento de PLA das camadas do modelo conceitual do pulmão.....	239
Figura 110 - Modelo de pulmão com PLA e o do tumor com tubo de ensaio com álcool.....	239
Figura 111 – Vista a e b do modelo da estrutura para medição do TDR com modelo pulmonar.....	240
Figura 112 - Fluxo do algoritmo desenvolvido para processamento do sinal para geração de imagens por micro-ondas.....	242
Figura 113 - Processamento de sinal para geração de imagens do tumor. (a) Imagem do TDR normalizado, (b) sinal normalizado do TDR, (c) imagem com subtração de fundo, (d) sinal com subtração de fundo, (e) imagem com Shannon Energy aplicado, (f) sinal do Shannon Energy, (g) imagem com função envelope aplicada, (h) sinal da função envelope, (i) imagem com a função quadrática e (j) sinal da função quadrática.....	244
Figura 114 - O ambiente de prova conceitual é formado por um Phantom infantil homogêneo e semi-realista. As partes Phantoms são (a) Isopor Daiso; (b) Modelo Impresso ABS 3D condutor de cérebro infantil; (c) bolsa de silicone de filme de fino com 11,8 ml de água mineral e (d) ilustração da configuração de teste.....	250
Figura 115 - Um cenário de teste do Phantom analisado pela FAVA. (a) Phantom infantil semi-realista e homogênea. (b) Dentro do modelo de cabeça, feito de poliestireno expandido (isopor) da Daiso Industries co., Ltd., Modelo YM-18-P6 C028 600-EPS # 4, lote # 2009bj. (c) Modelo do cérebro infantil, feito com uma técnica de CNC de Manufatura Aditiva (impressora 3D) usando filamento condutor, composto por ABS e grafite. (d) O modelo tumoral (posição frontal) foi modelado com uma bolsa de silicone, com paredes de 30 μ m de espessura, cheia de água mineral. (e) configuração de teste proposta com o Phantom de cabeça em uma base móvel controlada pelo computador com etapas de 1 mm; a fava; e o site anritsu Master S331b, operando com a função DTF.....	251
Figura 116 - O design digital 3D do cérebro infantil (cinza) foi obtido de uma ressonância magnética e importada para Freecad 0.16. Em detalhes, o tumor (azul) e o corte da superfície submetidos à análise por imagem de micro-ondas na prova de conceito.....	253
Figura 117 - Diagrama de blocos da metodologia de sinal de alvo de destaque em três estágios.....	254



Figura 118 - Imagens 2D de micro-ondas de campo próximo e sinal único Phantom na região central, por varredura DTF SWR com a FAVA. Aquisição de dados: (a), (b), (k) e (l); Pré-processamento de sinal: (c), (d), (m), (n), (e), (f), (o) e (p); Extração quadrática de envelope: (g), (h), (q), (r), (i), (j), (s) e (t).	257
Figura 119 - Gráfico 3D das imagens de micro-ondas de campo próximo por DTF SWR com a antena FAVA. Aquisição de dados: (a) e (b); Pré-processamento de sinal: (c), (d), (e) e (f); Extração quadrática de envelope: (g), (h), (i) e (j).	259
Figura 120 - Imagem 2D de micro-ondas de campo próximo da cabeça e sinal único da região central do Phantom, por varredura DTF SWR com a AVA (esquerda) e FAVA (direita). Aquisição de dados: (a), (b), (k) e (l); Pré-processamento de sinal: (c), (d), (m), (n), (o), (n), (e), (f), (o) e (p); Extração quadrática de envelope: (g), (h), (q), (r), (i), (j), (s) e (t).	260
Figura 121 – Esquema de uma lente dielétrica, que concentra o feixe de micro-ondas a sua frente.	265
Figura 122 – Esquema de um dispositivo projetado por Mei <i>et al.</i> que é capaz de curva a trajetória de um feixe de micro-ondas em um ângulo de 45°.	266
Figura 123 – Esquema da lente dielétrica para planificação de frente de ondas.	268
Figura 124 – (a) Esquema com representação interna do processo de mistura de filamentos da cabeça <i>Diamond HotEnd</i> . (b) Foto de uma cabeça de impressão <i>Diamond HotEnd</i> instalada em uma CNC de Manufatura Aditiva (impressora 3D) FDM.	271
Figura 125 – (a) Foto de um dos tracionadores utilizados no tracionamento dos filamentos para a cabeça de extrusão <i>Diamond HotEnd</i> . (b) Esquema interno com as engrenagens utilizadas no tracionador.	274
Figura 126 – Esquema de uma microlinha com o ressonador em “T” produzido por Catarinucci <i>et al.</i> em seu trabalho.	276
Figura 127 – a) Fotos de algumas microlinhas montadas. b) Detalhe ampliado de uma parte de um substrato impresso.	277
Figura 128 – Permissividade relativa e tangente de perdas em função da proporção de misturas entre ABS e ABSg.	278
Figura 129 – Processo de modelagem do conjunto LAVA em ordem cronológica.	281



Figura 130 – Modelo da LAVA final projetado no simulador eletromagnético. A parte amarela é a antena e as partes em azul, verde, roxo e vermelho são componentes da lente. 282

Figura 131 – Protótipo impresso da lente dielétrica com a antena acoplada (LAVA). 283

Figura 132 – Parâmetros S_{11} medidos e simulados para a AVA e LAVA. . 284

Figura 133 – Diagrama de radiação simulados (azul) e medidos (laranja) para a AVA e LAVA em diversas frequências. 285



LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões da AVA-974 referência.....	86
Tabela 2 – Estudo qualitativo de características de radiação de diferentes propostas do uso de LD em AV.....	97
Tabela 3 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.....	98
Tabela 4 – Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de lentes de metamaterial.....	99
Tabela 5 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.....	99
Tabela 6 – Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de diretores metálicos.....	100
Tabela 7 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.....	101
Tabela 8-Estudo qualitativo de radiação de diferentes propostas do uso de SE em AV.....	102
Tabela 9 – Estudo qualitativo das características de construção das diferentes técnicas propostas.....	103
Tabela 10- Quadro comparativo entre diferentes técnicas para melhoria de diretividade de AV para análise geral e qualitativa e pré-seleção.....	104
Tabela 11 - Parâmetros da arquitetura da AVA-974.....	133
Tabela 12 - Especificações técnicas do laminado Rogers RO3206 (ROGERS, 2015).....	146
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.....	156
Tabela 14 - Parâmetros da arquitetura da FSEAVA-974.....	164
Tabela 15- Tabela comparativa a 7GHz entre as antenas AVA, RSEAVA, TSEAVA, ESEAVA e FSEAVA.....	175
Tabela 16- Investigação antenas Vivaldi e técnicas para melhorias de radiação.....	186
Tabela 17 - Parâmetros das arquiteturas AVA e FAVA.....	192
Tabela 18 - Comparação entre a AVA e a FAVA.....	199

Tabela 19 - Parâmetros e dimensões da AVA, AC-FSE-AVA, OC-FSE-AVA, HC-FSE-AVA, QC-FSE-AVA e TIC-FSE-AVA.....	205
Tabela 20 - Resultados dos parâmetros de funcionamento a 3,25 GHz da AVA, AC-FSE-AVA, OC-FSE-AVA, HC-FSE-AVA, QC-FSE-AVA e TIC-FSE-AVA.....	220
Tabela 21 - Desempenho das antenas Vivaldi investigadas para aplicações médicas de imagem por micro-ondas.....	247
Tabela 22 - Desempenho das antenas Vivaldi investigadas para imagens médicas do micro-ondas do cérebro.	248



ÍNDICE

CAPÍTULO 1 - HISTÓRICO DO ELETROMAGNETISMO	26
1.1 Os Notáveis Cientistas Influentes do Eletromagnetismo	28
1.2 A Evolução do Estudo do Eletromagnetismo.....	37
CAPÍTULO 2 - INTRODUÇÃO	47
2.1 Motivação.....	48
2.2 Dimensionamento do Problema	49
2.3 Objetivo.....	53
2.4 Impactos Esperados.....	53
CAPÍTULO 3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E METODOLÓGICA	54
3.1 Metodologia de projeto de antenas assistido pelo Computador ...	55
3.1.1 FIT – Técnica de Integração Finita	56
3.1.1.1 As equações de Maxwell na forma integral e diferencial	57
3.1.1.1.1 Lei de Faraday na 1º equação de Maxwell	58
3.1.1.1.2 Lei de Ampère na 2ª equação de Maxwell.....	60
3.1.1.1.3 Lei de Gauss na 3ª equação de Maxwell.....	63
3.1.1.1.4 Lei do Magnetismo na 4ª equação de Maxwell	64
3.1.1.2 Discretização volumétrica.....	65
3.1.2 Solucionador de transiente	69
3.2 Métodos e equipamentos de medidas adotados.....	71
3.2.1 Obtenção dos parâmetros S	71
3.2.2 Medida do diagrama de radiação	75
CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE TÉCNICAS EXISTENTES PARA MELHORIA DA DIRETIVIDADE DA ANTENA VIVALDI.....	80

Eletromagnetismo Aplicado

4.1	Identificação da Necessidade	81
4.1.1	Antena Vivaldi Antipodal Referência (AVA-974)	82
4.1.2	Resultados de operação da AVA-974 Referência	87
4.2	Definição do Problema	90
4.3	Definição dos Objetivos	95
4.4	Síntese	96
4.4.1	Proposta 1 – Uso de lentes dielétricas	96
4.4.2	Proposta 2 – Uso de lentes de metamateriais	98
4.4.3	Proposta 3 – Uso de diretores metálicos	100
4.4.4	Proposta 4 – Uso de cavidades ressonantes	101
4.4.5	Análise das propostas e pré-seleção	104
4.5	Seleção e otimização	105
4.5.1	AVA-974 com RSE (RSEAVA-974)	105
4.5.1.1	Resultados de operação da RSEAVA-974	108
4.5.2	AVA-974 com TSE (TSEAVA-974)	115
4.5.2.1	Resultados de operação da TSEAVA-974	117
4.5.3	Seleção e otimização da técnica de cavidades de borda	123
CAPÍTULO 5 - DESENVOLVIMENTO DA PALM TREE AVA (ESEAVA-974)		131
5.1	A Palm Tree AVA	132
5.1.1	Otimização da Palm Tree AVA	136
5.1.1.1	Varição do parâmetro i	137
5.1.1.2	Varição do parâmetro β	139
5.1.1.3	Varição do parâmetro α	141
5.1.1.4	Resultado da variação dos parâmetros i , β e α	143
5.2	Prototipação	143
5.2.1	Desenho da antena	143
5.2.2	Escolha dos materiais	144
5.2.2.1	Laminados Rogers RO3206	144
5.2.2.2	Conector SMA 50 Ω	146
5.2.3	Fabricação	149
5.3	Resultados de operação da Palm Tree AVA-974	151
CAPÍTULO 6 - DESENVOLVIMENTO DA KOCH AVA (FSEAVA-974)		162



6.1	A Koch AVA.....	163
6.1.1	Arquitetura da Cavidade Radiante com a curva de Koch	166
6.1.1.1	Propriedade Fractal da curva de Koch	168
6.1.2	Otimização da Koch AVA pela variação do número de iterações	170
6.2	Resultados de operação da Koch AVA-974.....	172
CAPÍTULO 7 - DESENVOLVIMENTO DA FERN AVA (FAVA)		180
7.1	Estudo para desenvolvimento Fern AVA (FAVA)	181
7.2	A Fern AVA (FAVA)	190
7.3	Resultados de operação da Fern AVA (FAVA)	193
CAPÍTULO 8 - DESENVOLVIMENTO DA ANEL DE CANTOR AVA (ACA VA)		202
8.1	A Anel de Cantor AVA	203
8.1.1	Arquitetura da Cavidade Radiante com fractal Anel de Cantor	206
8.1.2	Prototipação das Antenas baseadas no fractal Anel de Cantor	208
8.2	Resultados de operação da Anel de Cantor AVA e suas derivadas	211
CAPÍTULO 9 - IMAGENS MÉDICAS POR MICRO-ONDAS		221
9.1	Processamento da Imagem de Micro-ondas	225
9.2	Metodologia de Pesquisa Adotada	226
9.3	Resultado do Processamento de Sinais e Geração da Imagem...	229
9.4	A FSE-AVA e a Geração de Imagens por Micro-ondas.....	234
9.5	A AC-FSE-AVA e a Geração de Imagens por Micro-ondas.....	235
9.5.1	Desenvolvimento do modelo conceitual pulmonar e o processamento de sinais	237
9.5.2	Imagens sintetizadas do modelo conceitual de tumores pulmonares	243
9.6	A FAVA e a Geração de Imagens por Micro-ondas	245



Eletromagnetismo Aplicado

9.6.1	Prova conceitual pulmonar de imagem médica de micro-ondas de campo próximo.....	249
9.6.1.1	Phantom semi-realista da cabeça	251
9.6.1.2	Metodologia do processamento de sinais.....	253
9.6.2	Resultados de imagens de NMI	255
CAPÍTULO 10 - DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS COM VARIAÇÃO DIELÉTRICA 263		
10.1	Formas de se produzir a variação dielétrica	265
10.2	Uma nova técnica para produção de objetos com variação dielétrica.....	269
10.3	Escolha do material a ser utilizado como filamento.....	271
10.4	Método para impressão e caracterização dielétrica de substratos impressos com a técnica de mistura de filamentos.....	273
10.5	Resultados dos testes de caracterização dielétrica.....	276
10.6	Aplicação da técnica de mistura de filamentos para o desenvolvimento de um dispositivo com variação dielétrica	279
10.7	Impressão da lente dielétrica e caracterização.....	283
CAPÍTULO 11 - CONSIDERAÇÕES E PROSPECÇÃO DE NOVOS DESDOBRAMENTOS 287		
11.1	Propostas Futuras	290



CAPÍTULO 1

- HISTÓRICO DO ELETROMAGNETISMO

Em um momento ou outro, talvez alguém teria feito as suas descobertas, entretanto, se esse notável cientista não tivesse nascido, provavelmente ainda estaríamos vivendo como nossos antepassados dos anos 1600's, sem o auxílio dos elétrons e todo o trabalho que eles nos proporcionam nos dias de hoje.

Sem os esforços deste brilhante educador, muito provavelmente esse livro teria sido escrito a pena, ou quem sabe em um antigo equipamento mecanizado de tipografia, uma vez que não teríamos nem mesmo os computadores, tão pouco impressoras.

A quem me refiro? **Michael Faraday** (1791 – 1867)!



Eletromagnetismo Aplicado

Nascido em Newington Butts, Surrey, em 22 de setembro de 1791, onde viveu até os cinco anos e após este período, mudou-se para Londres com seus pais James Faraday e Margaret Hastwell, e seus irmãos, Elizabeth e Robert Faraday (TYNDALL, 1961).

Naquela época, Faraday não pôde receber uma boa formação escolar, devido a difícil situação financeira da família, a doença de seu pai e as consequências, sofridas pela Inglaterra, da Revolução Francesa. Apesar dos esforços de sua mãe, Faraday só teve uma insuficiente formação básica, o que se resumia em ler, escrever e realizar operações matemáticas mais simples.

Já aos treze anos de idade, Faraday teve uma grande oportunidade de ter contato com os estudos novamente, pois havia sido contratado para trabalhar em uma livraria, onde de dia trabalhava arduamente e a noite lia incansavelmente, mais e mais livros de ciências, e diante de seus olhos, um novo mundo ia se apresentando.

Ficou ainda mais fascinado pela ciência, quando em 1812, teve a oportunidade de assistir algumas conferências de **Sir. Humphry Davy**, na Royal Institution, onde após cuidadosas anotações, escreveu, encadernou e enviou a Sir. Hunphry, o livro intitulado *FOUR LECTURES being part of a Course on The Elements of CHEMICAL PHILOSOPHY*, com a esperança de trabalhar na Royal Institution. Faraday realmente foi contratado como assistente de laboratório de Sir H. Davy.



Após anos tendo contato com os mais notáveis esforços de pesquisas de Sir Hunphry, na Royal Institution em Londres, aos 29 anos Faraday iniciou seus próprios esforços para estudar e desvendar os fenômenos do eletromagnetismo, que foram de 1820 a 1831, culminando em uma série de publicações científicas. Talvez algumas destas publicações congregassem os avanços de eletricidade e magnetismo de seus precursores e contemporâneos.

Agora é chegado o momento, caro leitor, de nos debruçarmos sobre um breve relato de alguns dos mais notáveis cientistas que por ventura influenciaram a ciência do eletromagnetismo, assim como Faraday.

1.1 Os Notáveis Cientistas Influentes do Eletromagnetismo

Podemos iniciar pela lembrança de um homem interessantemente, bonachão e polivalente, tanto quanto suas diversas atividades exercidas. Um norte americano brilhante do século XVIII. Político, tipógrafo, criador do corpo de bombeiros, redator da Declaração de Independência de seu país e vejam só, um experimentalista da área da eletricidade. Quem diria!

Refiro-me a **Benjamin Franklin** (1706 - 1790), que com seus experimentos, provou que a descarga atmosférica era uma forma de “**faísca elétrica**”, além de ser o inventor do para-raios.



Eletromagnetismo Aplicado



Neste ponto, caro leitor, vale uma nota interessante: Ao estudarmos esta pessoa, tão relevante para o avanço do campo da eletricidade, assim como ao estudarmos a maioria dos demais notáveis pesquisadores da eletricidade e magnetismo descritos nesta obra, vamos perceber que estes, em sua esmagadora maioria, não entendiam muito a respeito de eletricidade ou magnetismo. Estes revolucionários da eletricidade e do magnetismo não possuíam sofisticados laboratórios, como temos hoje em qualquer escola de engenharia, ou até mesmo em algumas escolas de nível médio. Ao contrário disso, sem muitos recursos, mas cheios de curiosidade e entusiasmo, estes pesquisadores natos revelaram ao mundo todo o potencial do uso dos elétrons e suas aplicações.

Imagine se pessoas com tão pouco conhecimento e recursos tecnológicos limitadíssimos, quando comparados sobretudo, com qualquer aluno de nível superior atualmente, venceram os desafios do estudo da eletricidade e do magnetismo.

Assim sendo, você, estimado leitor, também é capaz de desbravar essa ciência do eletromagnetismo, contribuindo para o mundo a sua volta, por meio do exercício da atividade profissional com excelência e domínio dos fenômenos envolvidos no funcionamento de máquinas elétricas ou mesmo dispositivos de micro-ondas como satélites e estações de radar, ou quem sabe, apresentando novas formulações, teorias e experimentos que revolucionem ainda mais a humanidade.

Desta forma, sintase bem à vontade para estudar o eletromagnetismo, substituindo o receio, ou talvez o medo, do fracasso que espreita, pela curiosidade e inesgotável persistência que lhe serão companhia ao longo desta jornada. Nunca se esqueça: **Você é Capaz!**



Dando continuidade na leitura de pessoas simples, mas com muita curiosidade e que eternizaram seus nomes no fluxo contínuo do rio temporal da história, através de seu trabalho científico, eis que surge um engenheiro francês, por nome chamado **Charles Augustin de Coulomb** (1736 - 1806). Coulomb é considerado um dos pioneiros da física experimental.

Utilizava em seus experimentos, equipamentos rudimentares e artesanais, feitos com cortiça, madeira, vidro e mesmo finos fios de crina de cavalo. Através de seus estudos, descobriu em 1787 a lei das forças eletrostáticas de atração e repulsão. Foi também um grande estudioso de materiais isolantes, eletricidade e magnetismo. Em sua homenagem, denomina-se a unidade de carga elétrica por Coulomb.

Nascido no mesmo ano que Coulomb, o escocês **James Watt** (1736 – 1819) iniciou suas atividades técnicas como aprendiz de ferramenteiro e bem cedo, demonstrou grande interesse pelos estudos da área da eletricidade.

Anos mais tarde tornou-se fabricante de peças e de equipamentos matemáticos na Universidade de Glasgow. Nesta época apresentou seu mais relevante invento. Uma eficiente, rápida e econômica máquina a vapor que revolucionou o setor industrial em sua época.

A exemplo de seu contemporâneo Coulomb, Watt foi homenageado através do uso de seu nome familiar para designar a unidade de potência elétrica.

Alessandro Giuseppe Volta (1745 – 1827), que inventou a pilha elétrica, amplamente utilizada por seus contemporâneos nos estudos de eletricidade e magnetismo, era estudioso e provou a existência de manifestações elétricas em organismos vivos a partir dos estudos e acidentais descobertas nesta área pelo físico e anatomista **Luigi Galvani** (1737 – 1798).



Eletromagnetismo Aplicado

A partir das observações de Galvani, que durante um procedimento de amputação de um membro inferior de uma rã, notou que ao tocar os nervos, da perna amputada, com duas pinças de metais diferentes e quando suas extremidades se tocavam, a perna mexia-se. Galvani acreditava que a perna possuía a capacidade de gerar energia elétrica.

Os estudos de Volta provaram o contrário, que na verdade, como as pinças eram feitas de materiais diferentes e estavam em parte mergulhadas em solução eletrolítica (água + sais) produziam eletricidade.

Neste sentido, partindo de vários experimentos, Volta estabeleceu que ao mergulhar-se metais diferentes em uma solução de ácido ou salina (eletrolítica) e conectar a estes metais um condutor ligando-os, promovia-se neste condutor um fluxo constante de cargas elétricas. A esta descoberta ele deu o nome de célula voltaica, a precursora, ou melhor, um antepassado das atuais pilhas e baterias.

Em sua homenagem, foi convencionado que a unidade de medida de diferença de potencial elétrico é o volt.

E por falar em fluxo de cargas elétricas, também conhecido como correntes elétricas, me lembro de um comentário, partindo de um Doutor, colega meu, que ao ler parte dos rascunhos da minha tese de doutorado, disse:

–Alexandre, você me lembra Ampère, pois fica analisando quase que unicamente as correntes superficiais de suas antenas.

Outra lembrança, em que meu trabalho de doutorado tivera sido relacionado a filosofia de Ampère, foi durante a defesa da tese, quando um dos proeminentes doutores que compunham a banca, mencionou:

