

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO ESPECTRAL PARA LOCALIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS DESCARGAS
PARCIAIS NA PARTE DIELÉTRICA DE BOBINAS DE HIDROGERADORES

JONATHAS FELIPPE MORAIS MODESTO

DM 22 / 2014

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO ESPECTRAL PARA LOCALIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS DESCARGAS
PARCIAIS NA PARTE DIELÉTRICA DE BOBINAS DE HIDROGERADORES

JONATHAS FELIPPE MORAIS MODESTO

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO ESPECTRAL PARA LOCALIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS DESCARGAS
PARCIAIS NA PARTE DIELÉTRICA DE BOBINAS DE HIDROGERADORES

JONATHAS FELIPPE MORAIS MODESTO

Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica da UFPA para a obtenção
do Grau de Mestre em Engenharia
Elétrica na área de Telecomunicações.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá

Belém-Pará-Brasil

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÉTODO ESPECTRAL PARA LOCALIZAÇÃO DE MÚLTIPLAS DESCARGAS
PARCIAIS NA PARTE DIELÉTRICA DE BOBINAS DE HIDROGERADORES

AUTOR: JONATHAS FELIPPE MORAIS MODESTO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE TELECOMUNICAÇÕES

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rodrigo Melo e Silva de Oliveira
(ORIENTADOR - PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Victor Dmitriev
(CO-ORIENTADOR - PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Ronaldo de Freitas Zampolo
(MEMBRO - UFPA)

Prof. Dr. Fabrício José Brito Barros
(MEMBRO - UFPA)

“Se você não quer ser esquecido quando morrer, escreva coisas que valham a pena serem lidas ou faça coisas que valham a pena escrever a respeito.”

Benjamin Franklin.

(1706 - 1790)

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido o fôlego de vida, saúde, sabedoria e forças para poder alcançar mais esta etapa da minha vida. Aos meus pais Jaime e Silvete pelo constante apoio, carinho, atenção, confiança e principalmente por todo o amor incondicional transmitido ao longo da minha vida. Aos meus irmãos Jaime Júnior, Roberto e Gizelle por estarem sempre presentes nas horas em que mais precisei. Agradeço também a toda a minha família que torceram por mim para chegar onde eu estou. Não posso deixar de agradecer aos meus amigos da Missão com Jovens do Telégrafo que também estiveram ao meu lado durante toda essa etapa, dando palavras de apoio e incentivo, que foram de grande valia para o meu desempenho.

Faço um agradecimento especial à Ana Julia Carvalho, por todo carinho, amor, paciência, apoio e compreensão que me foram dados. A sua companhia foi muito importante e ajudou a superar alguns momentos difíceis durante essa jornada.

Não posso deixar de agradecer ao meu orientador Rodrigo M. S. de Oliveira, que sempre, sem hesitar, e com bastante paciência, esteve à disposição para me apoiar, ensinar e, principalmente, por acreditar no meu trabalho. Sem dúvida, é um excelente e competente orientador e uma ótima pessoa.

Agradeço a todos os amigos do LEMAG (Laboratório de Eletromagnetismo): Augusto Masashigue, Daiyuki, Edinaldo, Lorena, Nilton, Ramon, Washington e Weliton pela grande ajuda na elaboração e conclusão deste trabalho.

Não posso deixar de agradecer ao professor Victor Dmitriev e aos engenheiros da Eletro-norte, Paulo Vilhena e Fernando Brasil. A realização deste trabalho não teria sido possível sem a grande ajuda deles.

Lista de Símbolos

\vec{E}	Vetor Intensidade de Campo Elétrico
\vec{H}	Vetor Intensidade de Campo Magnético
ϵ_0	Permissividade Elétrica do Vácuo
μ_0	Permeabilidade Magnética do Vácuo
ϵ	Permissividade Elétrica
μ	Permeabilidade Magnética
σ	Condutividade Elétrica
ρ	Resistividade Elétrica
t	Tempo
x, y e z	Coordenadas do Sistema Cartesiano
E_x, E_y e E_z	Componentes do Campo Elétrico
H_x, H_y e H_z	Componentes do Campo Magnético
$\frac{df}{d\alpha}$	Derivada de f em relação a α
$\frac{\partial f}{\partial \alpha}$	Derivada Parcial de f em relação a α
(i, j, k)	Endereçamento no Espaço Discretizado
n	Índice Temporal
Δ_x, Δ_y e Δ_z	Incrementos Espaciais
Δ_t	Incremento Temporal
$\vec{\nabla} \times \vec{A}$	Operador Rotacional de \vec{A}
f_r	Frequência de ressonância
f_i	Frequências de máximo e mínimo
p	percentual do total de frequências de máximo e mínimo correspondentes a um dado padrão espectral

Sumário

1	Introdução	3
1.1	Introdução Geral	3
1.2	Estado da Arte em Descargas Parciais em ambientes de Geração de Energia . .	4
1.3	Organização do Trabalho	9
2	Revisão Teórica	11
2.1	Descargas Parciais: considerações gerais	11
2.2	Classificação de Descargas Parciais	12
2.2.1	Descargas Internas	12
2.2.2	Descargas Externas (corona)	13
2.2.3	Descargas Superficiais	14
2.3	Métodos de Medição e Localização de Descargas Parciais	14
2.3.1	Método das ondas viajantes (<i>Traveling Wave Method</i>)	16
2.3.2	Método “Intech”	17
3	Novo Método Espectral Desenvolvido para Localização de Descargas Parciais em bobinas de Hidrogeradores	22
3.1	Definição do Problema para Estudo de Caso	22
3.2	Física do problema: Análise de Ressonância	25
3.3	Técnica Espectral Proposta para Diagnóstico da Bobina do Hidrogerador	34

4	Estudo de Casos e Resultados	40
4.1	Validação do <i>Software</i>	40
4.2	Múltiplas descargas na isolação de uma única bobina do hidrogerador.	44
4.3	Diagnóstico de múltiplas descargas na isolação de duas bobinas adjacentes e conectadas do hidrogerador.	51
5	Resultados Experimentais	62
5.1	Experimentos realizados na Eletronorte	62
6	Considerações Finais	80
A	Método FDTD	83
A.1	Equações de Maxwell	84
A.1.1	Algoritmo de Yee	86
A.2	Precisão e Estabilidade	89

Lista de Figuras

2.1	Exemplo de descargas parciais ocorrendo no isolamento entre dois condutores.	12
2.2	Arborescência elétrica.	13
2.3	Descarga Corona.	14
2.4	Esboço da localização de descargas parciais pela medida da diferença de tempo de trânsito entre dois sensores. Adaptado de [34]	16
2.5	Calibração pela injeção de pulsos de onda quadrada que passa pela capacitância entre uma folha de metal dobrada em torno da bobina do estator, e o condutor da bobina. C1 e C2 são as capacitâncias do enrolamento para a terra. Adaptado de [33]	18
2.6	Princípio de medição “Intech”: (a) Fonte de DP dentro do objeto testado v_1 e v_2 estão em oposição de fase, $ v_1 - v_2 \gg v_1 + v_2 $, (b) A DP ou fonte de distúrbio está situada fora do objeto a ser testado e v_1 e v_2 estão em fase $ v_1 - v_2 \ll v_1 + v_2 $. Adaptado de [33]	19
3.1	(a) Vista 3D de uma bobina da máquina hidrogeradora (<i>SolidWorks</i> [®]), (b) estrutura interna do modelo, representada no simulador SAGS.	23
3.2	(a) Forma de onda normalizada da fonte de excitação utilizada para modelar descargas parciais, (b) Espectro da fonte de excitação.	24
3.3	<i>Cluster</i> Maxwell, localizado no LEMag	24
3.4	(a) corte de uma barra e a relação da variável L com as regiões da estrutura; (b) variável L em um sistema unidimensional de coordenadas.	25

3.5	Barra retangular : (a) Vista longitudinal e (b) Vista transversal.	26
3.6	Visualização da propagação do campo magnético para DP ocorrendo em P1 (a) para $t = 0,0076 \mu s$, (b) para $t = 0,0152 \mu s$, (c) para $t = 0,0228 \mu s$. Os Parâmetros Dielétricos são $\epsilon_r = 5.4$, $\sigma = 0.00010394 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$	27
3.7	Visualização da propagação do campo magnético para DP ocorrendo em P2 (a) para $t = 0,0076 \mu s$, (b) para $t = 0,0152 \mu s$, (c) para $t = 0,0228 \mu s$. Os Parâmetros Dielétricos são $\epsilon_r = 5.4$, $\sigma = 0.00010394 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$	28
3.8	Visualização da propagação do campo magnético para DP ocorrendo em P3 (a) para $t = 0,0076 \mu s$, (b) para $t = 0,0152 \mu s$, (c) para $t = 0,0228 \mu s$. Os Parâmetros Dielétricos são $\epsilon_r = 5.4$, $\sigma = 0.00010394 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$	28
3.9	(a) Comparação entre os espectros do sinal recebido para cada tempo de subida (com permissividade relativa de 5,4) para descarga parcial ocorrendo em P1, (b) visualização do campo magnético para $\tau = 0,5 \text{ ns}$, (c) $\tau = 1 \text{ ns}$, (d) $\tau = 3 \text{ ns}$ e (e) $\tau = 5 \text{ ns}$	29
3.10	(a) Comparação entre os espectros do sinal recebido para cada tempo de subida (com permissividade relativa de 5,4) para descarga parcial ocorrendo em P2, (b) visualização do campo magnético para $\tau = 0,5 \text{ ns}$, (c) $\tau = 1 \text{ ns}$, (d) $\tau = 3 \text{ ns}$ e (e) $\tau = 5 \text{ ns}$	30
3.11	(a) Comparação entre os espectros do sinal recebido para cada tempo de subida (com permissividade relativa de 5,4) para descarga parcial ocorrendo em P3, (b) visualização do campo magnético para $\tau = 0,5 \text{ ns}$, (c) $\tau = 1 \text{ ns}$, (d) $\tau = 3 \text{ ns}$ e (e) $\tau = 5 \text{ ns}$	31
3.12	Comparação entre os espectros dos sinais recebidos para cada valor de σ (com permissividade relativa de 5.4) para DP ocorrendo em P1.	32
3.13	Comparação entre os espectros dos sinais recebidos para cada valor de σ (com permissividade relativa de 5.4) para DP ocorrendo em P2.	33

3.14	Comparação entre os espectros dos sinais recebidos para cada valor de σ (com permissividade relativa de 5.4) para DP ocorrendo em P3.	33
3.15	Comparação entre as frequências calculadas usando (3.1) e as frequências obtidas via simulação FDTD	35
3.16	(a) Visualização da propagação do campo elétrico para $t = 0,0191 \mu s$ (plano x - y que intercepta o baricentro da barra); (b) Localização do sensor (antena) e localização das descargas simultâneas para as simulações 5 e 161.	36
3.17	Fluxograma do Algoritmo da técnica proposta.	37
3.18	Sinais relativos à simulação 161, registrados pelo sensor: (a) transitório obtido devido apenas à descarga 1, (b) transitório obtido devido apenas à descarga 2, (c) espectro do sinal relativo à descarga 1, (d) espectro do sinal relativo à descarga 2, (e) espectro relativo à ocorrência concomitante das descargas 1 e 2.	39
4.1	Representação gráfica do modelo <i>FDTD</i> da <i>GIS</i> :(a) Vista externa, (b) Vista interna	41
4.2	Pulso de excitação normalizado (campo elétrico em função do tempo)	41
4.3	Sinal registrado no sensor indicado pela Figura 4.1 - validação do software desenvolvido	42
4.4	Circuito definido e usado experimentalmente em [48], aqui reproduzido numericamente.	43
4.5	Representação do modelo FDTD da barra mostrado no SAGS: dimensões e representação 3D de vários meios.	43
4.6	Comparação entre formas de ondas numérica (deste trabalho) e experimental [48] para a tensão V_2	44
4.7	Estatística de localização de descargas para uma única bobina (primeira parte).	46
4.8	Estatística de localização de descargas para uma única bobina (segunda parte).	47
4.9	Estatística de localização de descargas para uma única bobina (terceira parte).	48
4.10	Estatística de localização de descargas para uma única bobina (quarta parte).	49

4.11	Estatística de localização de descargas para uma única bobina (quinta parte).	50
4.12	Duas bobinas adjacentes conectadas, do hidrogerador.	51
4.13	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (primeira parte).	52
4.14	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (segunda parte).	53
4.15	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (terceira parte).	54
4.16	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (quarta parte).	55
4.17	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (quinta parte).	56
4.18	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (sexta parte).	57
4.19	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (sétima parte).	58
4.20	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (oitava parte).	59
4.21	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (nona parte).	60
4.22	Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (última parte).	61
5.1	Setup Experimental utilizado para as medições	63
5.2	(a) Osciloscópio, (b) gerador de funções Agilent 33250A, (c) Calibrador CAL 542 da Omicron, (d) mini furadeira Smart AD-19F.	64
5.3	Localização dos pontos de injeção de sinais na barra.	65
5.4	Injeção dos sinais na barra.	65
5.5	(a) Pulso gerado pelo gerador Agilent 33250A, (b) Espectro do pulso gerado pelo gerador Agilent 33250A.	66
5.6	(a) Pulso gerado pelo calibrador CAL 542, (b) Espectro do pulso gerado pelo calibrador CAL 542.	66
5.7	Acoplador utilizado para registrar sinais relativos a descargas parciais na bo- bina: (a) vista frontal (fita), (b) vista traseira (plano de terra).	67
5.8	Detalhe da injeção do sinal no par de furos P1.	68
5.9	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	69

5.10	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	69
5.11	Detalhe da injeção do sinal no par de furos P2.	70
5.12	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	71
5.13	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	71
5.14	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	72
5.15	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	72
5.16	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	73
5.17	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	73
5.18	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	74
5.19	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	74
5.20	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	75
5.21	(a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2	75
5.22	Representação do modelo numérico da barra utilizada nos experimentos	76
5.23	Outra representação do modelo numérico da barra utilizada nos experimentos .	77
5.24	Modelo numérico do acoplador direcional:(a) Vista frontal, (b) Vista traseira e (c) Vista lateral.	78

5.25	Comparação entre os espectros obtidos pelo experimento e pela simulação. . .	79
A.1	Idéia da aproximação da derivada de $f(x)$ por diferença centrada no ponto x_0 . .	84
A.2	Célula de Yee e a disposição das componentes de campo elétrico e magnético. .	86
A.3	<i>Leapfrog</i> : distribuição intercalada no tempo e no espaço das componentes de campo elétrico e magnético para um caso unidimensional do algoritmo de Yee.	87

Resumo

Neste trabalho, é estabelecida uma metodologia baseada em análise espectral para localização de múltiplas descargas parciais na região dielétrica de bobinas de hidrogeradores. Esta localização de várias descargas objetiva viabilizar diagnóstico preventivo da região isolante da bobina. É concebido um modelo computacional utilizando-se o método das diferenças finitas no domínio do tempo para solucionar numericamente as equações de Maxwell, o qual é validado experimentalmente. O campo elétrico transitório associado a descargas parciais que ocorrem em diferentes posições da bobina é registrado e seu espectro, após processamento e análise estatística, é utilizado para realizar o diagnóstico. Em aproximadamente 90% das simulações realizadas, estimativas precisas da localização das descargas foram obtidas. Um novo método de injeção de sinais de descargas parciais também foi desenvolvido neste trabalho.

Palavras-Chave - Hidrogerador, método de diagnóstico, descargas parciais na isolação, análise espectral.

Abstract

A methodology based on spectral analysis is established for performing localization of multiple partial discharges in dielectric region of hydro-generators coils. This pinpointing of multiple discharges aims to provide means for performing preventive diagnosis of the insulating region of the referred coil. A computer model of the structure was conceived by using the finite-difference time-domain method (FDTD-3D) to numerically solve Maxwell's equations, which is experimentally validated. The transient electric field associated with partial discharges that occur at different positions of the coil is calculated and its spectrum, after processing and statistical analysis, is used to perform the diagnosis. In approximately 90% of simulations, accurate estimates of simultaneous discharges location were obtained. Transient numerical results are in agreement with literatures measurements performed experimentally. A new method of injection of partial discharge signals was also developed in this work.

Keywords - Hydro-generator coils, method of diagnosis, partial discharges in isolation, spectral analysis.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução Geral

O atual cenário do setor elétrico brasileiro trouxe novos desafios para as concessionárias de energia elétrica. Para sobreviverem a um mercado tão competitivo, as concessionárias precisam ser o mais eficiente possível [1]. Há a necessidade da oferta de energia acompanhar as variações da curva de demanda ao longo do tempo, não podendo haver riscos de interrupções no fornecimento de energia elétrica [1]. Se por um lado a demanda exige um serviço de qualidade, por outro lado os custos envolvidos para se atender esta expectativa são elevados. Sendo assim, as companhias do setor elétrico estão sempre procurando uma maior eficiência na operação de seus equipamentos [1].

A manutenção preditiva é o conceito que vai ao encontro da necessidade deste aumento de eficiência. Neste tipo de manutenção, diagnosticam-se possíveis falhas com base em indicadores de defeitos que o próprio equipamento fornece durante o seu funcionamento [2]. Por isso, metodologias de manutenção baseadas no tempo de utilização do equipamento vem sendo substituídas por metodologias de manutenção baseadas nas condições do equipamento [3].

Conseqüentemente, esse novo cenário do setor elétrico faz com que os equipamentos trabalhem a plena carga por longos períodos de tempo. Por conseguinte, estes e outros fatores podem

conduzir a um aumento dos riscos de falha, degradando a isolação dos equipamentos, causando a perda de suas propriedades elétricas e mecânicas e, contribuindo para a possível formação de DPs (Descargas Parciais) e perdas econômicas.

Neste cenário, cada vez mais o uso de técnicas adequadas de medição, monitoração e diagnóstico do estado de operação dos equipamentos elétricos, com a finalidade de melhorar sua confiabilidade e reduzir o número de paradas não programadas, faz-se necessário. Dessa forma, as concessionárias de energia elétrica estão prestando cada vez mais atenção na preservação de seus equipamentos mais importantes, como hidrogeradores, transformadores de potência e disjuntores, para garantir um serviço contínuo de energia elétrica. Descargas Parciais são descargas elétricas que ocorrem devido ao rompimento localizado da rigidez dielétrica, devido à existência de falhas dentro do isolamento, como fissuras, bolhas de ar, partículas metálicas ou poeiras [4].

A avaliação nível de ocorrências de DPs é uma das ferramentas mais importantes para o diagnóstico de equipamentos de alta tensão como hidrogeradores, transformadores e disjuntores. Os sinais de DPs ajudam a revelar o estado de envelhecimento dos materiais isolantes, defeitos de fabricação, assim como prevenir saídas de serviço não programadas. Por essa razão, DPs vêm sendo pesquisadas por várias décadas [5–7], formando-se linhas de pesquisa em medição, detecção e localização.

1.2 Estado da Arte em Descargas Parciais em ambientes de Geração de Energia

Em 1989, um teste para detecção de descargas parciais (*screening test*) foi definido pelo IEEE [5] para barras e bobinas do estator. A faixa de operação do teste foi fixada de 8 MHz a 100 MHz. Na época, verificou-se que nesta faixa de frequências, as medições são mais sensíveis a descargas parciais que ocorrem em aberturas internas nos dielétricos (*internal voids*) do que métodos empregados até então. Em [6], mudanças no esquema de medição original foram

propostas para garantir a repetitibilidade dos experimentos. Observou-se que a escolha adequada da voltagem de operação de determinadas bobinas e barras, baseada no teste proposto, aumentam o tempo de vida útil destes dispositivos.

Em [7], a isolação de um gerador de 16 kV / 250 MVA é investigada. Acopladores capacitivos instalados permanentemente nas barras de saída do gerador foram usados para monitorar descargas parciais. Um osciloscópio de quatro canais foi usado para registrar sinais transitórios provenientes de descargas parciais. Os sinais obtidos foram filtrados utilizando wavelets, de forma que a técnica apresentada é capaz de distinguir (pequenas) descargas superficiais em três fases distintas. Foi observado que a impedância de entrada na medição afeta a sensibilidade da medição.

Em [8], barras de saída que operaram durante 7 e 22 anos foram retiradas do gerador para verificação do estado de isolação. Nesta ocasião, foram avaliadas a tensão de ruptura AC, tensão de interceptação de descargas parciais (PDIV), as cargas elétricas máxima e total aparente relativas às descargas parciais, além da $\text{tg } \delta$. Todas as grandezas foram avaliadas estatisticamente após a realização de um procedimento experimental descrito no trabalho. Foi observado que a tensão de ruptura AC, a tensão de interceptação de descargas parciais e o valor de carga elétrica máxima têm forte dependência do tempo de serviço da barra. A tensão de ruptura AC e a tensão de interceptação de descargas parciais são reduzidas com o tempo de trabalho da barra e a carga elétrica máxima associada às descargas aumenta com o tempo de uso. Nada de conclusivo a respeito da $\text{tg } \delta$ e da carga elétrica total aparente foi obtido.

Técnicas de Redes Neurais foram usadas em [9] para identificar padrões relativos a descargas parciais. Os dados foram obtidos a partir de barras feitas especialmente para as experiências práticas, as quais foram conduzidas de forma a caracterizar diversas situações que originam diferentes tipos de descargas (laminação, enrolamento e ranhuras).

Em 2003, no artigo [10], é apresentado um método de avaliação das condições de isolação de barras de estatores através da velocidade de propagação de ondas pulsantes ultrassônicas. Dados relativos a velocidades mínimas e médias de propagação foram levantados para barras

em operação durante 16, 18 e 23 anos. Após estes testes, parâmetros elétricos, tais como fator de dissipação e capacitância, além de descargas parciais, foram medidos. Foi estabelecida uma relação entre a redução das velocidades mínima e média de propagação com o grau de deterioração dos materiais dielétricos. Análises estruturais microscópicas também foram realizadas e os parâmetros obtidos foram associados às velocidades de propagação.

Em 2005, F.T. Emery apresenta em [11] aspectos relativos ao projeto de barras de saída de geradores e apresenta forma de reduzir descargas parciais e o efeito corona (ambos sendo fortemente relacionados) durante a operação. Tal como descrito detalhadamente no trabalho, com o uso de fitas de mica combinado com resina epóxi especial para altas temperaturas, reduzem-se as formações de bolhas de ar e, portanto, de descargas parciais, preservando as características dielétricas dos isoladores. Melhorias no sistema de isolamento das barras são propostas, de forma a aumentar a vida útil de operação das barras.

Em [12], o desgaste das barras de saída do estator é usado para se avaliar o envelhecimento da isolamento do enrolamento do estator. Os resultados dos testes mostram que a assimetria da fase de descarga parcial e a crista de alta frequência de descarga parcial mudam acentuadamente mais com o tempo de envelhecimento do que os parâmetros convencionais. Dessa forma, o trabalho propõe o uso destes dois parâmetros para se avaliar as condições de isolamento do gerador, o que se mostrou efetivo, de acordo com os resultados dos testes realizados.

As condições de desgaste das barras do estator foram usadas em [13] para se avaliar a degradação da isolamento ao terra. Com o método apresentado no trabalho, parâmetros estatísticos relativos a descargas parciais, especialmente assimetrias na distribuição de descargas parciais, foram usados para determinar a forma geométrica das bolhas presentes nos dielétricos usados para isolamento e a formação de defeitos em forma de raízes na estrutura de isolamento (*electrical treeing*).

O método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD, proposto por Kane Yee em 1966 [14, 15]) foi usado em [16] para modelar descargas parciais em barramentos de uma GIS (*gas-insulated switchgears*). Foram avaliadas características de atenuação na GIS e o vazamento

de campo eletromagnético pelas aberturas da estrutura. Boa concordância foi observada com resultados experimentais. O método consiste na solução numérica das equações de Maxwell no domínio do tempo através da aproximação das derivadas por diferenças centradas [15]. Na área de descargas parciais, este método tem sido aplicado para modelar transitórios envolvendo transformadores [17, 18], junções de cabos de energia [19], resposta de sensores de PDs [20], acopladores direcionais [21], simulações de múltiplas fontes de PD [22], chaves isoladoras em GIS [23] e transformadores de corrente [24]. Na maioria dos casos, excelentes respostas foram obtidas em comparação com medições.

Ao medir descargas parciais on-line em hidrogeradores, para verificar as condições em que os mesmos se encontram (condições da isolação e situação dos enrolamentos, entre outras), para planejar manutenção, frequentemente se verificam altos níveis de interferência eletromagnética, comuns em máquinas grandes como um hidrogerador. Dessa forma, em [25] é apresentado um sensor capaz de diferenciar descargas nos enrolamentos da máquina de outras fontes de interferência elétrica. O ruído é diferenciado das descargas de interesse utilizando a forma dos pulsos recebidos no sensor. O sensor, chamado *Stator Slot Coupler*, foi instalado em seis turbinas e não apresentou riscos para o sistema.

A questão do ruído foi tratada diferentemente em [26]. Uma fibra óptica fluorescente é usada para detectar luz visível gerada pelas descargas. Descargas com correntes mínimas de $9\mu\text{A}$ podem ser detectadas com a técnica. Além da boa imunidade ao ruído, a técnica garante isolação Galvânica dada a composição da fibra. A principal limitação do método é que a luminescência do sinal é reduzida em materiais com Fluor em relação ao ar. Dessa forma, o material da fibra deve ser escolhido adequadamente dependendo do espectro de frequências de interesse, de forma a minimizar os limiares de detecção.

Uma técnica de rejeição de ruído baseada em análises pulso-a-pulso é proposta em [27]. A técnica usa múltiplos sensores, em diferentes posições, para registrar as descargas. A correlação da amplitude do pulso em duas bandas de frequência é avaliada. É calculada também a correlação entre as amplitudes dos pulsos de dois sensores de descargas parciais. Ambas as técnicas

se mostram bem sucedidas em relação a trabalhos anteriores.

Em [28], é proposto o uso de acopladores direcionais para registrar descargas parciais em máquinas rotativas em operação (enrolamentos). Capacitores dos acopladores de 80 pF se mostraram eficientes para registro das descargas. Porém, há dois pontos que precisam ser observados neste tipo de sistema de medição: sensibilidade às descargas parciais dos enrolamentos e evitar ruídos. Para otimizar a sensibilidade às descargas, um acoplador deve estar posicionado o mais próximo possível dos enrolamentos. A blindagem do cabo que carrega os sinais deve ser aterrada à carcaça do estator. Mostra-se que é possível diferenciar descargas do estator dos ruídos da máquina utilizando os tempos de chegada dos pulsos nos sensores. É recomendado que as distâncias entre os sensores seja minimizada para reduzir os efeitos associados ao ruído e aumentar as distâncias para melhorar a sensibilidade do sistema. Assim, um compromisso deve ser assumido de forma a se obter uma distância ótima.

A sensibilidade dos acopladores capacitivos pode ser incrementada, conforme descrito em [29]. Isto pode ser conseguido aumentando-se a capacitância para valores maiores do que 80 pF (foram usados capacitores de 500 pF). Neste trabalho, análises teóricas e experimentais foram feitas. Um estudo relativo a largura de banda dos sensores é realizada. Os acopladores que se utilizam dos capacitores de 500 pF puderam registrar descargas adicionais em relação aos baseados em 80 pF.

Em [30], uma técnica muito interessante é proposta para tratar os sinais medidos contendo informações sobre descargas parciais: o uso de filtros casados. Um filtro casado é uma forma ótima de detectar um sinal na presença de ruído, desde que a forma de onda do sinal de interesse seja conhecida. Esta técnica é usada em sistemas de comunicação. Se $s(t)$ é a função de interesse, $h(t) = As(-t)$ deve ser a resposta ao impulso do filtro. Um filtro deste tipo maximiza a relação sinal/ruído, tal como demonstrado em [31].

Em 2004, é proposto um sistema em [32] baseado na medida de grandes conjuntos de descargas parciais e na separação das mesmas em classes, utilizando para isto a forma de onda dos pulsos. Isto permite separar o padrão completo PRPD (*phase resolved partial discharge*) em

sub-padrões, cada um relevante para apenas um tipo de descarga parcial. Isto facilita consideravelmente o uso de tecnologias de reconhecimento de padrões, tais como Fuzzy, podendo ser identificado, dessa forma, com mais confiabilidade, o defeito causador de PD.

O uso de sensores indutivos em cada bobina da máquina é introduzido em [33], de forma que é possível identificar com mais precisão a região do gerador que está gerando as descargas. Esta técnica reduz problemas relativos a calibração dos sensores, ruídos, atenuação e distorção dos sinais relativos às descargas. Em [34], é proposta uma técnica para localizar Descargas Parciais em bobinas do estator de grandes geradores. O método é baseado na medição do tempo de trânsito da Descarga Parcial entre os dois lados do núcleo de um estator.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma nova técnica, baseada em análise espectral, para localização de descargas parciais em bobinas de hidrogeradores. Em síntese, a técnica consiste em mapear frequências associadas a máximos e mínimos do espectro dos sinais recebidos por um sensor e relacioná-las a posições de ocorrência das descargas. A principal vantagem deste método é a possibilidade de identificar múltiplas descargas concorrentes, inclusive ocorrendo em bobinas diferentes, o que é confirmado através dos resultados numéricos apresentados neste trabalho. Outro objetivo deste trabalho é apresentar uma nova metodologia para injeção de sinais de descargas parciais em barras de estatóricas de hidrogeradores. Esta metodologia visa simular a ocorrência de descargas parciais na região dielétrica da barra.

1.3 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em seis capítulos, os quais são constituídos dos seguintes tópicos:

Capítulo I – Apresentam-se a introdução e a organização do trabalho;

Capítulo II – São apresentados conceitos sobre descargas parciais, métodos de medição e localização de descargas e apresenta-se a definição precisa do problema para o estudo de caso;

Capítulo III – Trata do método espectral desenvolvido neste trabalho para localizar múltiplas descargas parciais em bobinas do estator de hidrogeradores

Capítulo IV – Apresenta validações numéricas do *Software* SAGS, bem como os resultados obtidos do estudo de caso.

Capítulo V – Apresenta os resultados experimentais produzidos para este trabalho;

Capítulo VI – Considerações finais

Capítulo 2

Revisão Teórica

2.1 Descargas Parciais: considerações gerais

A NBR 6940/1981 [4] define descargas parciais como sendo descargas elétricas que curto-circuitam parte da isolação entre dois eletrodos. Estas descargas podem ocorrer ou não adjacientemente ao eletrodo ou a outra parte da isolação. Nesse sentido, a descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre em uma região sujeita a um campo elétrico intenso, cujo caminho percorrido pelo elétrons da descarga não conecta eletricamente dois eletrodos de forma completa [35].

A denominação "parcial" tem por intuito indicar que a descarga elétrica é localizada, ou seja, não percorre todo o caminho de um isolamento existente entre duas superfícies condutoras submetidas a uma diferença de potencial estabelecida entre as mesmas. O termo descarga parcial é definido pela norma IEC 60270 [36] como sendo uma descarga elétrica localizada que atravessa parcialmente um meio isolante entre dois meios condutores, podendo ou não ocorrer próximo a esse meio condutor. Ainda segundo a norma IEC 60270 [36], o pulso de uma DP é definido como a corrente ou tensão pulsante que resulta da ocorrência de uma ruptura localizada (parcial) da rigidez dielétrica da isolação em um equipamento sob teste. A Fig. 2.1 ilustra descargas parciais ocorrendo na isolação entre condutores.

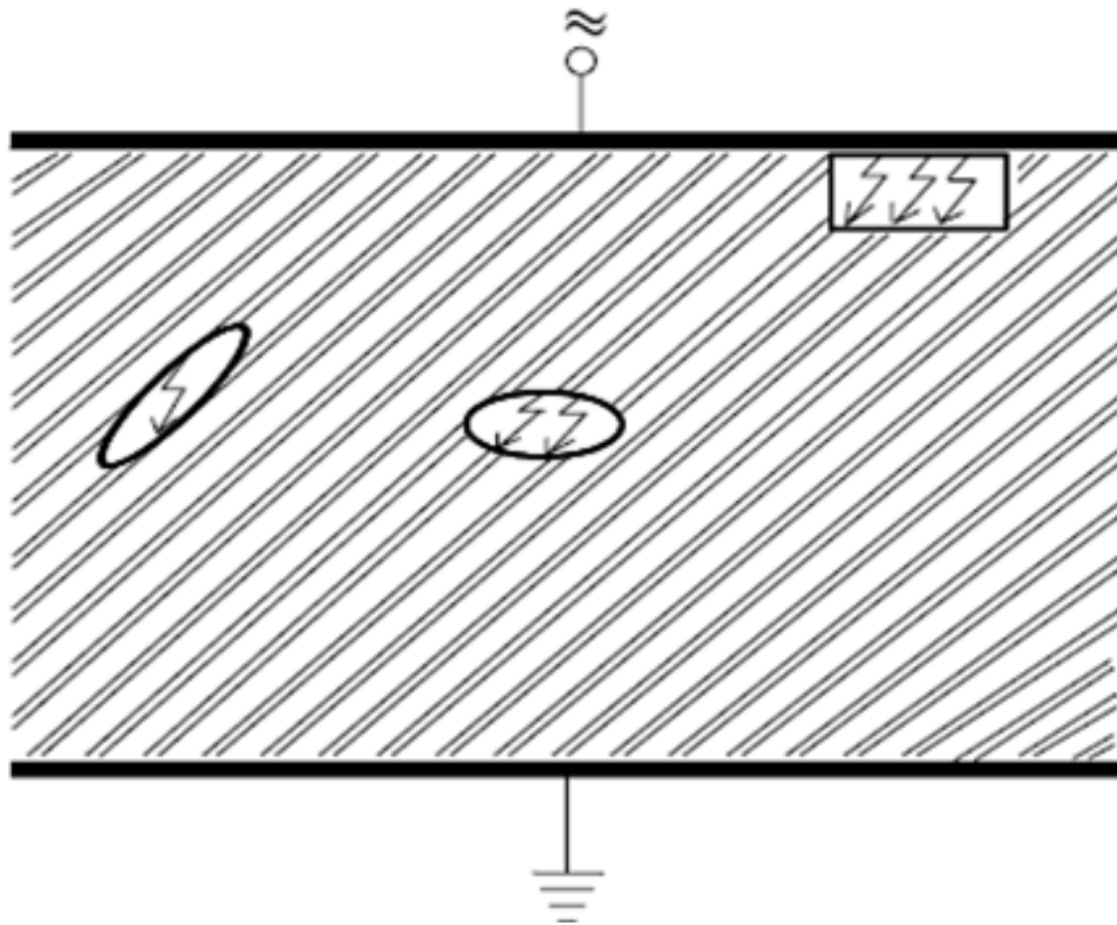


Figura 2.1: Exemplo de descargas parciais ocorrendo no isolamento entre dois condutores.

2.2 Classificação de Descargas Parciais

De acordo com a norma IEC 60270 [36], as descargas podem ser classificadas em três grupos, dependendo da localização de ocorrência: descargas internas, descargas externas (corona) e descargas superficiais.

2.2.1 Descargas Internas

As descargas internas são aquelas que ocorrem em cavidades ou vazios dos dielétricos sólidos, ou seja, em inclusões de baixa rigidez dielétrica de materiais isolantes utilizados em sistemas de isolamento de alta tensão [35]. Estas descargas resultam, em geral, de um forte *stress* decorrente de significativo gradiente de tensão entre pontos na isolação. As descargas parciais internas podem ocorrer em uma bolha, totalmente circundada por um meio isolante, ou na interface entre um meio isolante e uma parte energizada [35]. Assim, esse tipo de DP é, geralmente, resultado de um *stress* provocado por um campo elétrico intenso que ioniza um gás ou ar dentro

de um pequeno vazio [37].

Um tipo particular de fenômeno associado a descargas internas é conhecido como arborescência, que é definido como um fenômeno de pré-ruptura que ocorre internamente a um meio isolante sólido de um equipamento elétrico, cuja origem é decorrente de DPs internas em vazios [35]. A designação arborescência é devida ao fato de que o dielétrico, após submetido a diversas descargas parciais, apresenta marcas visíveis que lembram raízes galhos de árvores. Tais descargas produzem contínua e gradualmente vários caminhos de baixa rigidez dielétrica que podem provocar curto entre eletrodos energizados (e o desligamento da máquina nos casos mais críticos). A Fig. 2.2 ilustra o fenômeno de arborescência.



Figura 2.2: Arborescência elétrica.

2.2.2 Descargas Externas (corona)

As descargas externas ocorrem geralmente no ar (ambiente) e são conhecidas como descargas corona. As descargas corona acontecem quando uma corrente de duração longa passa através de um eletrodo, em alta tensão, que está em contato com algum fluido neutro, geral-

mente o ar. O fluido ao redor de pontas do eletrodo acaba se tornando ionizado, tornando-se parcialmente condutivo, assim, permitindo a passagem de corrente entre a ponta curvada do eletrodo e o fluido e entre o fluido e outra parte do eletrodo, produzindo as descargas corona, que geralmente vêm acompanhadas de respostas luminosas e sonoras [37, 38]. A Fig. 2.3 ilustra o fenômeno de descarga corona.



Figura 2.3: Descarga Corona.

2.2.3 Descargas Superficiais

Descarga parcial superficial é a descarga que ocorre na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo de um eletrodo para a superfície. Quando o campo elétrico paralelo à superfície excede um certo valor crítico, inicia-se o processo de descarga superficial [38]. Assim como as descargas internas, as descargas superficiais ocasionam alterações na superfície, produzindo caminhos condutores que se formam ao longo da direção do campo elétrico. Estes caminhos condutores, conhecidos como trilhamento também podem levar o isolamento à ruptura total.

2.3 Métodos de Medição e Localização de Descargas Parciais

As descargas parciais provocam vários fenômenos físicos e químicos. Esses fenômenos podem ser detectados utilizando métodos baseados nos seguintes fenômenos físicos:

- Fenômenos Elétricos (correntes elétricas transitórias) ;
- Radiação Eletromagnética (eletrodinâmica);
- Emissão de Luz;
- Variações térmicas (termodinâmica);
- Emissão Acústica (fluido-dinâmica);
- Transformações Químicas.

Dos itens acima, o mais frequentemente utilizado para detecção é o fenômeno elétrico, por estar associado a métodos de sensibilidade elevada [39] e, além disso, permite quantificar as descargas parciais. A detecção através da emissão acústica é utilizada em aplicações especiais, geralmente, para detecção e localização de ponto de ocorrência de DP em grandes transformadores de potência [40]. Os principais problemas associados aos métodos acústicos são os altos níveis de ruído produzidos por diversas fontes. Para uma melhor escolha do método de medição para determinado equipamento, é necessário compreender as características das descargas parciais. Geralmente, dependendo dos níveis das grandezas físicas medidas (relativas a cada diferente fenômeno físico), é possível inferir a gravidade do problema, a sua evolução e as suas prováveis causas. Em qualquer dos métodos de detecção, é necessário determinar a ausência ou a presença de descargas parciais, medindo a sua magnitude, onde é necessária uma calibração do sistema de medição, e procurar fazer aquisição de dados com menor interferência de ruído possível. As medições de campos eletromagnéticos ou de correntes elétricas são geralmente feitas em ambiente ruidoso. Porém, o ruído pode ser tratado conforme descrito em [41]- [42]

A seguir, são apresentados dois métodos já conhecidos de medição e localização de descargas parciais.

2.3.1 Método das ondas viajantes (*Traveling Wave Method*)

Em [34], Koch *et al.* propõem uma técnica para localizar Descargas Parciais em bobinas do estator de grandes geradores. O método é baseado na medição do tempo de trânsito da Descarga Parcial entre os dois lados do núcleo do estator.

A descarga parcial que surge na barra na seção da ranhura produz uma onda eletromagnética propagante em todas as direções. Com a utilização de sensores adequados (do tipo SSC - Stator Slot Coupler), inseridos na extremidade da ranhura, estes pulsos de descargas captados pelos sensores são registrados com um osciloscópio digital.

O princípio de localização do método proposto em [34] é esboçado na Figura 2.4. A distância l entre os sensores 1 e 2 é um pouco maior que o comprimento do núcleo do estator.

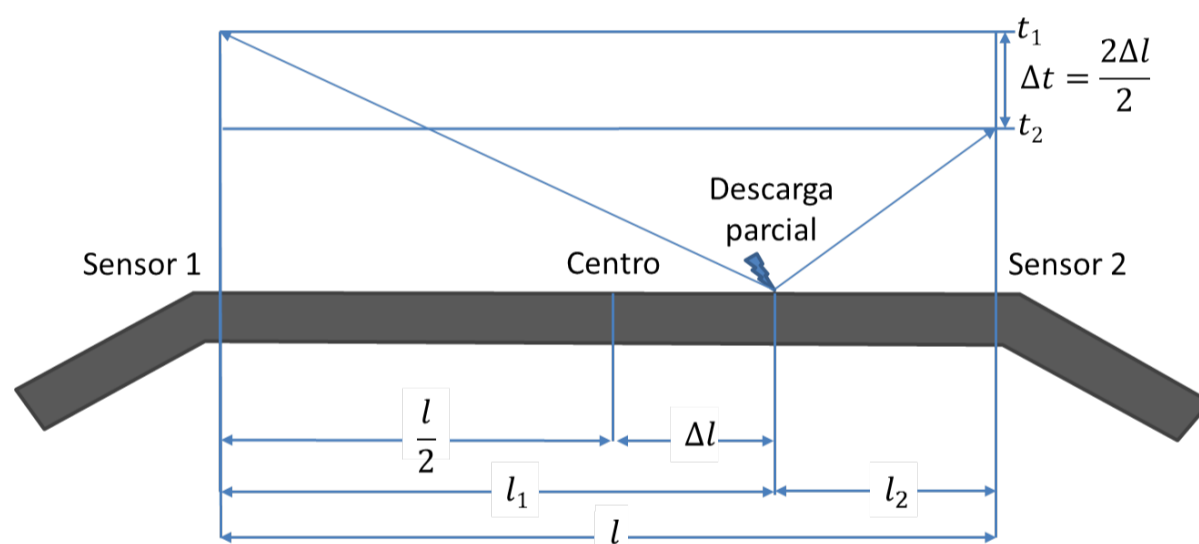


Figura 2.4: Esboço da localização de descargas parciais pela medida da diferença de tempo de trânsito entre dois sensores. Adaptado de [34]

O pulso da descarga parcial propaga-se pela ranhura com uma velocidade v . Este pulso é gerado por uma fonte de DP a uma distância de

$$\Delta l = l_1 - \frac{l}{2} = \frac{l}{2} - l_2, \quad (2.1)$$

do centro da barra e alcança o sensor 1 após ter alcançado o sensor 2 por uma diferença de

tempo de

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{2\Delta l}{v}. \quad (2.2)$$

Além da distância l entre os dois sensores, a localização automática da fonte de DP pelo método proposto em [34] também necessita da exata velocidade de propagação v do pulso de descarga na ranhura.

A velocidade de propagação v do pulso de descarga parcial depende das propriedades do material. A seguinte expressão é aplicada para meios sem perdas.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}, \quad (2.3)$$

onde $c = 2,998.10^8$ m/s ≈ 30 cm/ns.

A velocidade de propagação obtida em [34] varia entre 14 e 16,5 cm/ns. Utiliza-se um osciloscópio digital com quatro canais com taxa de amostragem de 4 GS/s para registrar os pulsos individuais relativos às descargas parciais para medição da diferença de tempo. O osciloscópio é ajustado para registrar a primeira subida do sinal, isto é, valores entre 0 V e o primeiro máximo ou mínimo. O valor absoluto do sinal de DP medido é então determinado. Um limiar é estabelecido para iniciar a aquisição dos sinais.

2.3.2 Método “Intech”

Em [33], uma nova técnica de medição, denotada “Intech”, bem como um sistema de medição para monitoramento de DP de grandes máquinas rotativas, é apresentado. Sensores indutivos instalados em barras do estator são usados para captar os pulsos de corrente relativos a DPs. Estes sensores são vantajosos, porque os pulsos de DP são dissociados diretamente das bobinas do estator, antes de serem atenuados e distorcidos. Além disso, a calibração é realizada diretamente sobre a bobina do estator (ver Figura 2.5). A capacitância C , entre o condutor da bobina e um pedaço de cobre ou folha de alumínio dobrada, temporariamente, em torno da

bobina do estator é utilizada para esta finalidade. C é medida por um medidor de capacitância conectado entre o filme de metal e a terra quando o enrolamento está aterrado.

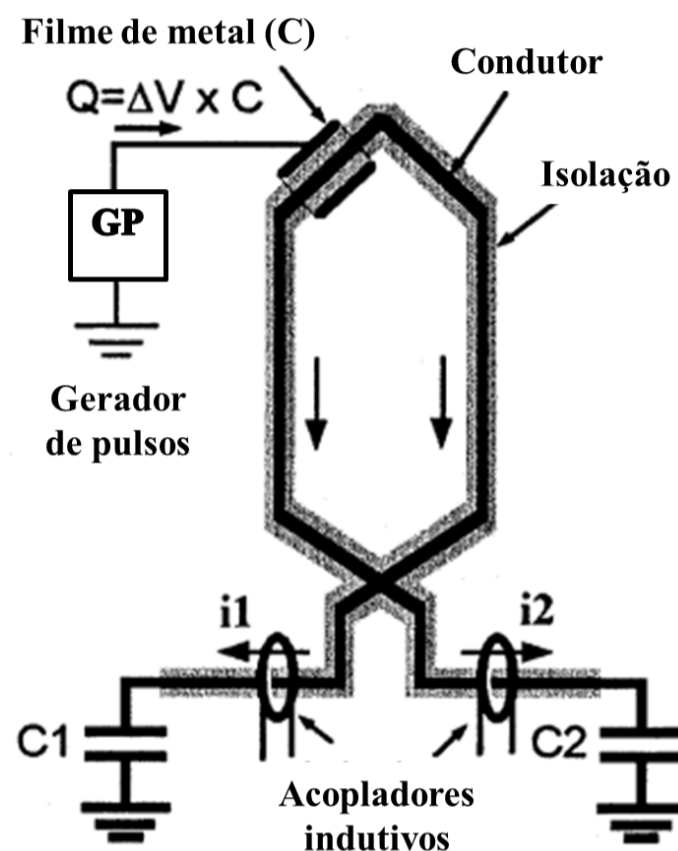


Figura 2.5: Calibração pela injeção de pulsos de onda quadrada que passa pela capacitância entre uma folha de metal dobrada em torno da bobina do estator, e o condutor da bobina. $C1$ e $C2$ são as capacitâncias do enrolamento para a terra. Adaptado de [33]

A técnica proposta em [33] baseia-se na dissociação de pulsos de DP utilizando sensores indutivos colocados nos terminais do objeto a ser testado e no tratamento dos sinais do sensor, o que resulta em uma medição do nível de DP no objeto em teste. Suponhamos que um aparelho de alta tensão ou uma parte dele está para ser testada para a descarga parcial. Por exemplo, uma junta de cabos de alta tensão ou de uma das bobinas de um estator. Os sensores $RC1$ e $RC2$ são colocados nos dois lados do objeto de teste (ver Figura 2.6). Dois diferentes casos são significativos para estudar: quando a DP é originária de uma fonte dentro do objeto de teste ou, alternativamente, quando a fonte de DP ou perturbação origina-se fora do objeto.

Na Figura 2.6(a), as correntes i_1 e i_2 originadas de uma fonte de DP dentro do objeto testado passam pelos sensores $RC1$ e $RC2$ em direções opostas e induzem as tensões $v_1(t)$ e $v_2(t)$ nos

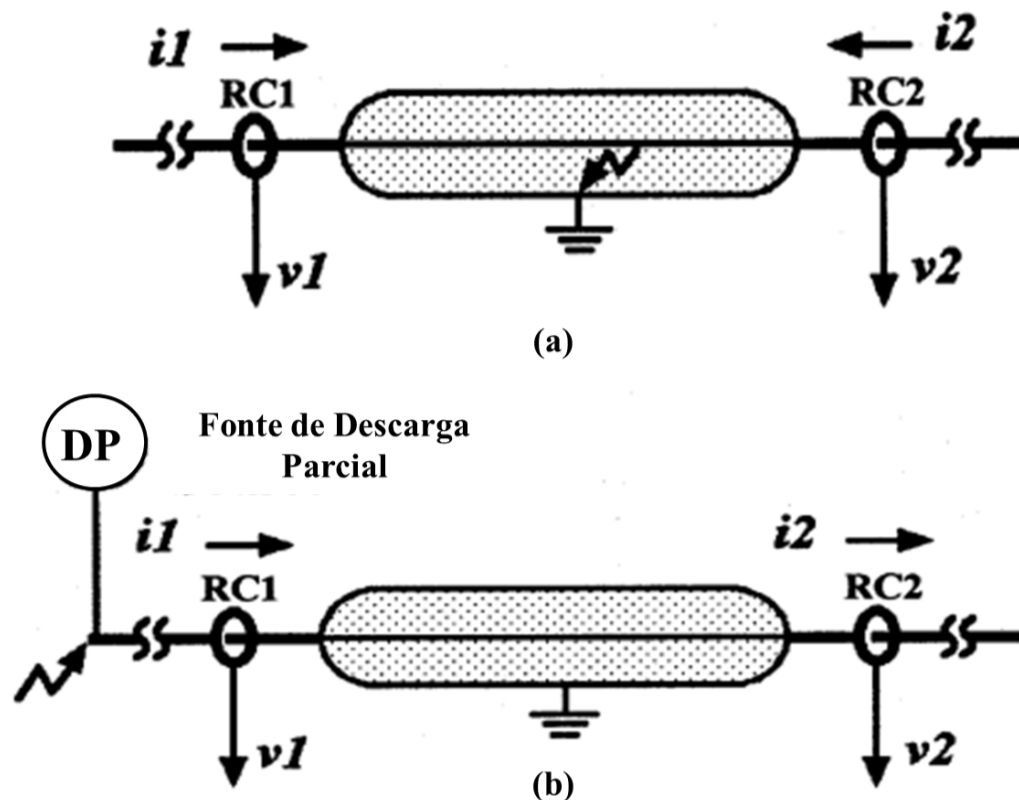


Figura 2.6: Princípio de medição “Intech”: (a) Fonte de DP dentro do objeto testado v_1 e v_2 estão em oposição de fase, $|v_1 - v_2| \gg |v_1 + v_2|$, (b) A DP ou fonte de distúrbio está situada fora do objeto a ser testado e v_1 e v_2 estão em fase $|v_1 - v_2| \ll |v_1 + v_2|$. Adaptado de [33]

sensores, que são proporcionais a $di_1(t)/dt$ e $di_2(t)/dt$, e podem ser descritas por 2.4 e 2.5,

$$v_1(t) = K \frac{di_1(t)}{dt}, \quad (2.4)$$

$$v_2(t) = K \frac{di_2(t)}{dt}, \quad (2.5)$$

onde K é o coeficiente de acoplamento magnético entre os sensores e o condutor. A subtração e adição de 2.4 e 2.5 resulta em 2.6 e 2.7.

$$v_1(t) - v_2(t) = K \frac{di_1(t)}{dt} - K \frac{di_2(t)}{dt} \quad (2.6)$$

$$v_1(t) + v_2(t) = K \frac{di_1(t)}{dt} + K \frac{di_2(t)}{dt} \quad (2.7)$$

Um caso especial ocorre quando a impedância de ambos os lados do objeto de teste são as mesmas. Se a impedância conjunta pode ser desprezada em comparação com a impedância do

cabo de alta tensão, então [33]

$$i_1 = -i_2 \Rightarrow v_1 = -v_2 = v, \quad (2.8)$$

$$v_1 - v_2 = 2v \quad (2.9)$$

e

$$v_1 + v_2 = 0. \quad (2.10)$$

Quando a DP ou fonte de ruído existe fora do objeto a ser testado, ver Figura 2.6(b), e se a impedância do objeto em teste é baixa, tal que quando o objeto de teste é um conjunto de cabos, as correntes i_1 e i_2 estão no mesmo sentido e as tensões induzidas $v_1(t)$ e $v_2(t)$ estão quase em fase e têm a mesma amplitude, o que resulta em

$$i_1 = i_2 \Rightarrow v_1 = v_2 = v, \quad (2.11)$$

$$v_1 - v_2 = 0 \quad (2.12)$$

e

$$v_1 + v_2 = 2v. \quad (2.13)$$

A comparação entre (2.9) e (2.10) com (2.12) e (2.13) é um meio para distinguir a fonte de DP no interior do objeto em teste de uma localizada fora do mesmo.

Em resumo, a consequência de uma fonte de DP no interior do objeto em teste é de sinais v_1 e v_2 em oposição de fase, o que resulta em $SR_{PD} = |v_1 - v_2| / |v_1 + v_2| \gg 1$, onde SR_{PD} é denotada como taxa de seletividade de pulso de DP.

Para uma fonte de DP/perturbação situada fora do objeto em teste, v_1 e v_2 estão em fase, como resultado, a taxa de seletividade do pulso de ruído $SR_{ruído} = |v_1 - v_2| / |v_1 + v_2| \ll 1$.

Considerando 2.6(b), com o aumento da impedância o objeto em ensaio (comprimento), tal que quando uma bobina do estator ou grupo de bobinas do estator está para ser testado, a

diferença entre ambas a fase e a amplitude dos sinais do sensor $v_1(t)$ e $v_2(t)$ aumenta. Isto faz com que SR_{DP} diminua. No entanto, desde que seja maior do que um, o pulso detectado é distinguido como um pulso de DP. No entanto, se $SR_{ruído}$ aumenta, mas permanece inferior a um, o pulso detectado é classificado como ruído.

Capítulo 3

Novo Método Espectral Desenvolvido para Localização de Descargas Parciais em bobinas de Hidrogeradores

3.1 Definição do Problema para Estudo de Caso

Neste trabalho, o objetivo é determinar a posição de uma ou mais descargas parciais que ocorram no interior do material dielétrico da barra de um hidrogerador. Para isto, o projeto do enrolamento de um gerador síncrono de 48 pólos salientes foi fornecido à Eletronorte pelo fabricante. A máquina é acionada por turbina Kaplan e tem as seguintes especificações nominais: potência de 30402 kVA, tensão de 13200 V, faixa de operação $\pm 5\%$, corrente de 1330 A oscilando a 60 Hz e fator de potência de 0,95. A partir dos arquivos de projeto do equipamento (em SolidWorks) [43], foi possível obter-se um modelo computacional preciso de uma bobina do estator, o qual é mostrado na Figura 3.1(a). Foi desenvolvida uma rotina computacional específica para realizar a exportação destes dados geométricos para o simulador FDTD desenvolvido em [44], chamado SAGS (Figura 3.1(b)). Validações numéricas deste software são apresentadas no apêndice A.

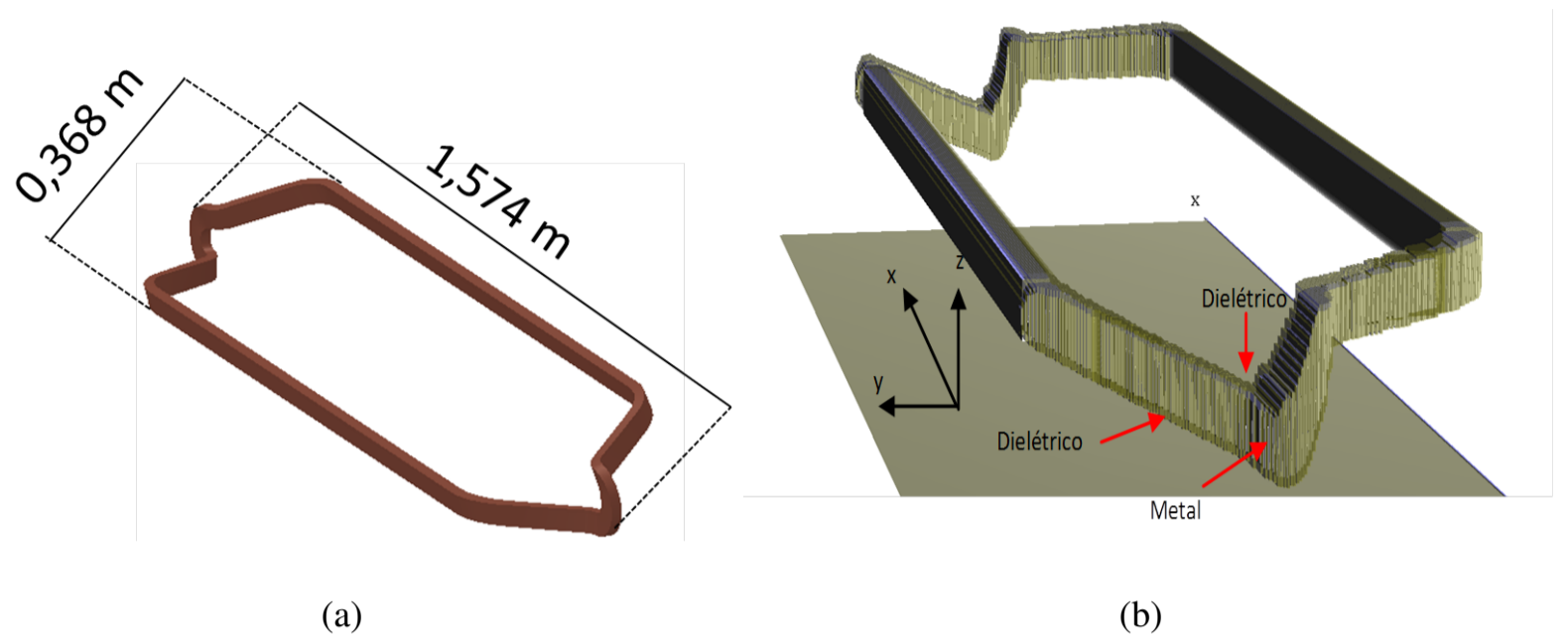


Figura 3.1: (a) Vista 3D de uma bobina da máquina hidrogeradora (*SolidWorks*[®]), (b) estrutura interna do modelo, representada no simulador SAGS.

O modelo numérico FDTD é formado por três camadas: estrutura metálica interna, que é envolvida por uma camada dielétrica (mica), que por sua vez é revestida por uma camada metálica (externa), tal como é ilustrado pela Figura 3.1(a). A camada dielétrica (mica) é caracterizada pelos parâmetros $\epsilon_r = 7$, $\sigma = 1.0 \times 10^{-15}$ S/m e $\mu_r = 1$ [45]. As partes de metal são consideradas de cobre ($\epsilon_r = 1$, $\sigma = 5,8 \times 10^7$ S/m e $\mu_r = 1$) [46].

O *grid* computacional retangular criado para representar o espaço consiste de $848 \times 254 \times 165$ células cúbicas de *Yee*, com aresta $\Delta = 2\text{mm}$. A representação matemática do pulso da descarga segue [47]. A Figura 3.2(a) ilustra a forma de onda da fonte de tensão utilizada para modelar as descargas, em função do tempo. A Figura 3.2(b) ilustra o espectro da fonte de tensão.

Em todas as simulações realizadas neste trabalho utilizou-se um *cluster* de computadores, devido ao domínio computacional destas simulações serem grandes. Utilizou-se o *Cluster Maxwell*, localizado no Laboratório de Eletromagnetismo (LEMag). Este *cluster* possui 64 processadores e 128 GB de memória RAM, o que tornou possível a realização das simulações. A Fig. 3.3 mostra uma imagem do *cluster Maxwell*.

Para efeito de simplificação de análise e definição das regiões de ocorrência das descargas, foi estabelecida uma variável de comprimento L , dada em metros, que representa uma aproxi-

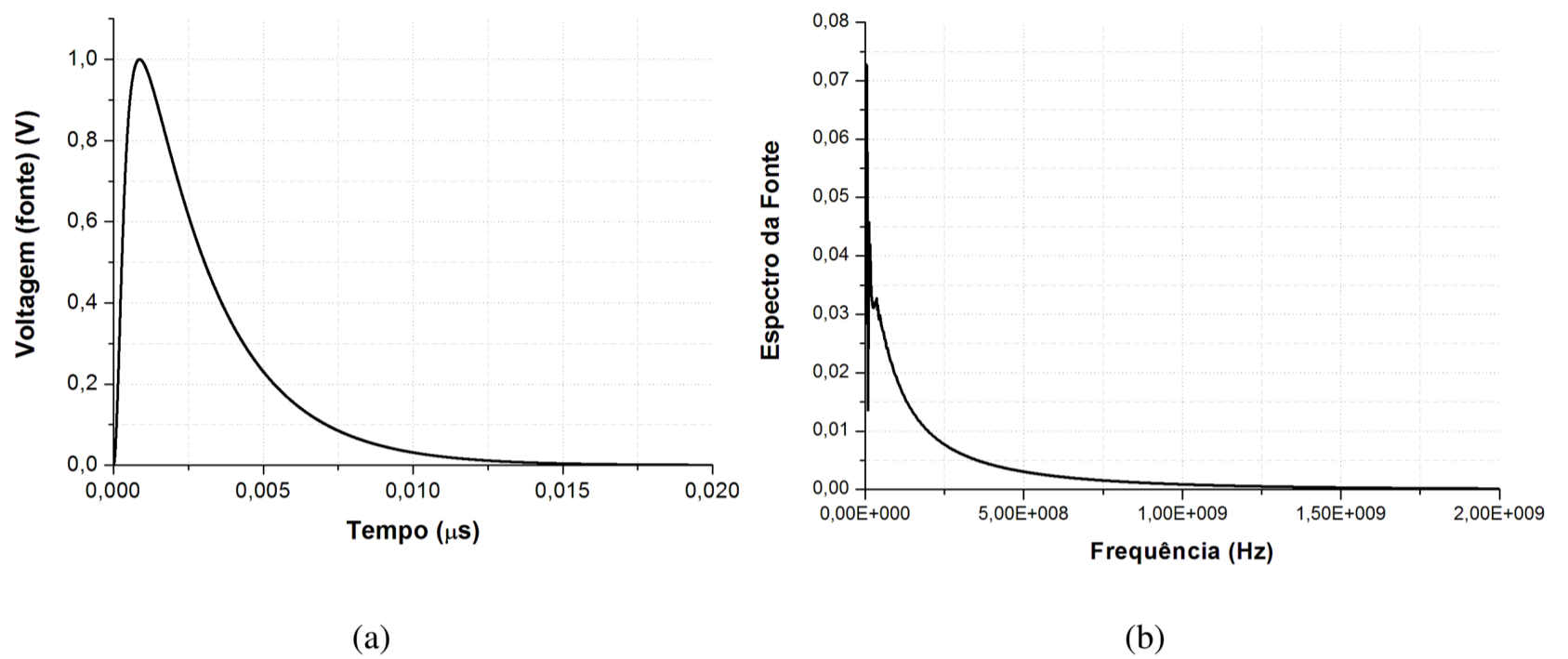


Figura 3.2: (a) Forma de onda normalizada da fonte de excitação utilizada para modelar descargas parciais, (b) Espectro da fonte de excitação.



Figura 3.3: *Cluster Maxwell*, localizado no LEMag

mação da posição destes pontos de interesse ao longo da linha tracejada indicada na Figura 3.4. Adicionalmente, foram definidos os quadrantes de Q1 a Q4. Para captar os sinais relativos às descargas, modelou-se um sensor de campo elétrico na estrutura, cuja posição é indicada por S na Figura 3.4. A localização de S é compatível com a posição de um sensor real instalado no hidrogenador de Coaracy Nunues, no Amapá.

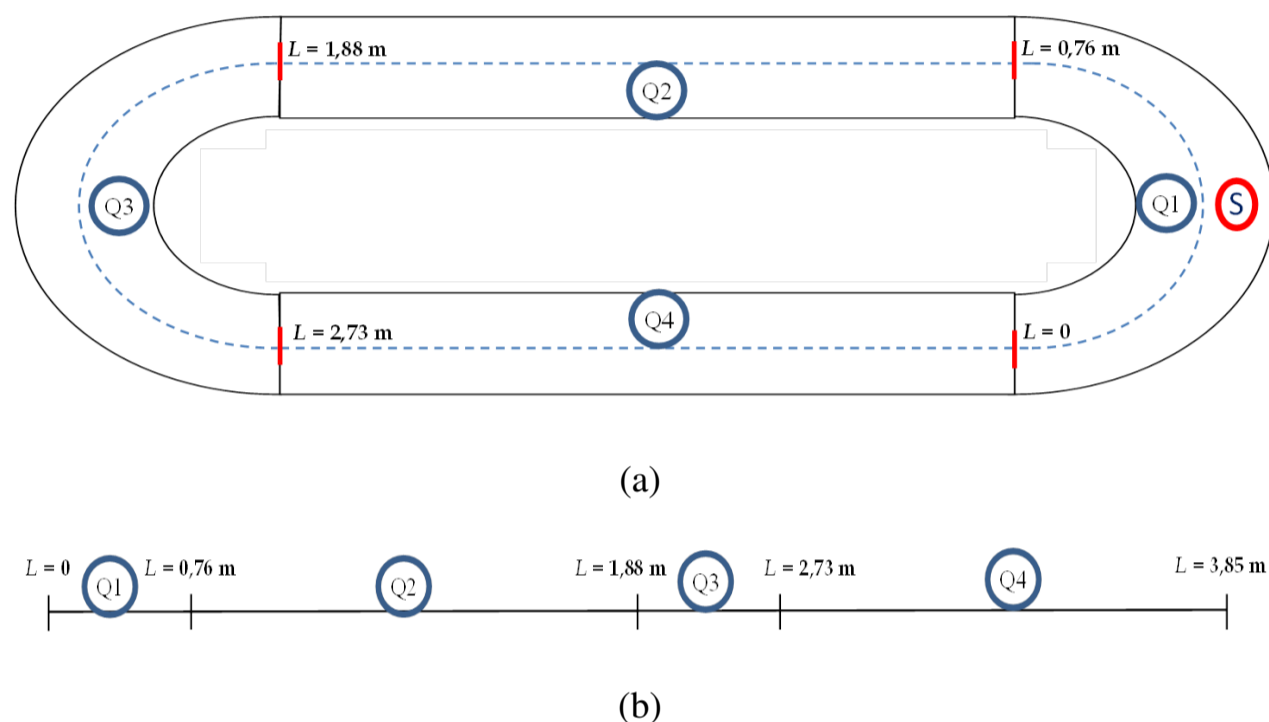
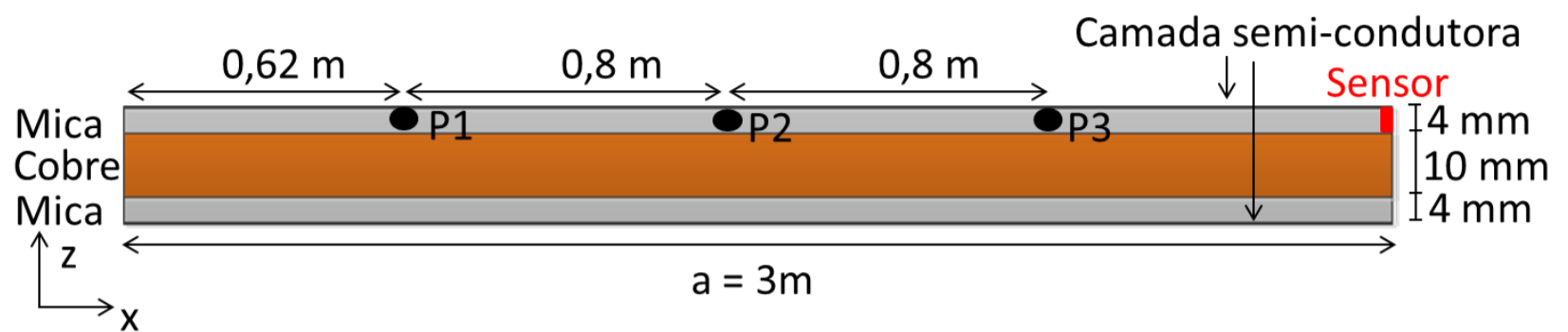


Figura 3.4: (a) corte de uma barra e a relação da variável L com as regiões da estrutura; (b) variável L em um sistema unidimensional de coordenadas.

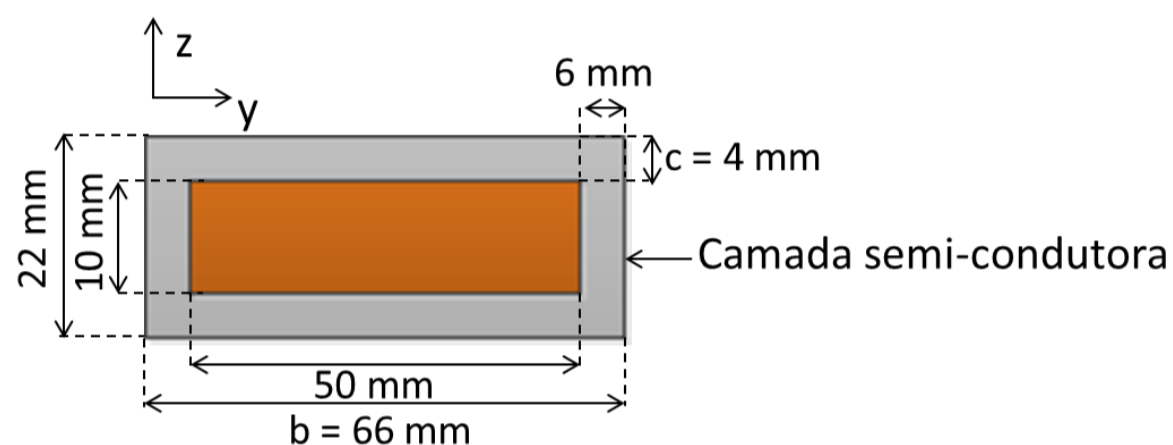
3.2 Física do problema: Análise de Ressonância

A fim de verificar os aspectos físicos básicos do problema, uma barra retangular foi modelada (Figura 3.5). A barra modelada (Figura 3.5(a)) possui 3 m de comprimento e é formada por três camadas: a estrutura interna de metal (cobre), que é rodeado por uma camada de dielétrico (mica), que por sua vez é revestida com uma camada semi-condutora exterior (Figura 3.5(b)). A componente z do campo elétrico foi registrada, através do sensor (Figura 3.5(a)), e usada para a obtenção de tensões (funções do tempo foram obtidas).

Ocorrências separadas de descargas parciais, polarizadas em z , foram simuladas em três pontos (P1, P2 e P3) do modelo FDTD-3D da barra (Figura 3.5) por excitação da componente



(a)



(b)

Figura 3.5: Barra retangular : (a) Vista longitudinal e (b) Vista transversal.

Ez e a tensão transitória induzida foi registrada no ponto indicado pela Figura 3.5(a). Várias simulações foram realizadas, alterando os seguintes parâmetros: permissividade elétrica e condutividade da mica e tempo de subida do sinal de excitação. A Fig. 2 mostra a visualização da propagação do campo magnético devido a descargas parciais (individuais) simuladas em P1, P2 e P3 para três instantes diferentes. Os parâmetros dielétricos são $\epsilon_r = 5,4$, $\sigma = 0,00010394$ S/m e $\mu_r = 1$ [45], [48]. É possível observar claramente nas Figuras 3.6- 3.8 que os diferentes comprimentos de onda são produzidos como uma função da posição da DP. Isto ocorre devido a reflexões de campo nas extremidades da barra e às distâncias envolvidas neste processo eletrodinâmico (a partir da posição da DP para os limites da barra), naturalmente produzindo ressonâncias eletromagnéticas. Ressonâncias adicionais surgem devido a reflexões de campo nas partes metálicas da barra.

O primeiro parâmetro estudado é o tempo de subida τ do pulso de descarga. Pulsos com tempo de subida de 0,5 ns, 1 ns, ns 3 e 5 ns [49] foram simulados. Para esta análise, a região isolante (mica) foi modelada usando os parâmetros $\epsilon_r = 5,4$, $\sigma = 0,00010394$ S / m e $\mu_r =$

1 [45], [48] . Verificou-se que máximos e mínimos no espectro de frequências, em essência, dependem da estrutura em si e, é claro, da posição da DP, uma vez que permanecem inalterados quando τ é modificado (Figuras 3.9(a) , 3.10(a) e 3.11(a) .) Isto é associado às reflexões de campo nas extremidades da barra , tal como foi previamente discutido (comprimentos de onda diferentes para este caso são observáveis em distribuições de campos das Figuras 3.9(b) - 3.9(e) , Figuras 3.10(b) - 3.10(e) e as Figuras 3.11(b) - 3.11(e)) . Deve notar-se que, para tempos de subida de 0,5 ns e 1,0 ns , a amplitude do sinal recebido pelo sensor é maior nas bandas de frequências superiores da faixa espectral analisada(de aproximadamente 600 MHz em diante). Nota-se que os pontos nos quais os máximos e os mínimos ocorrem no espectro de frequências são conservados , desde que o pulso DP contenha energia na faixa espectral analisada .

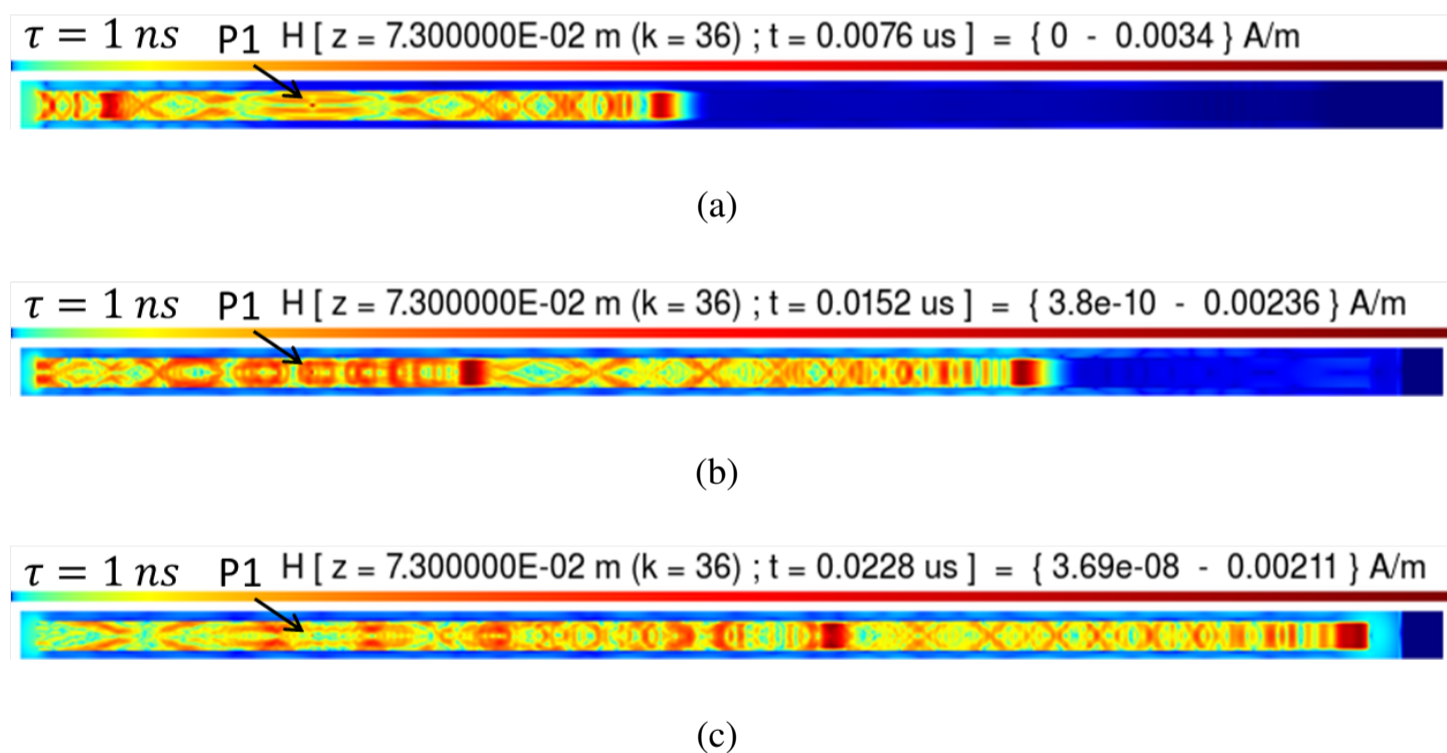


Figura 3.6: Visualização da propagação do campo magnético para DP ocorrendo em P1 (a) para $t = 0,0076 \mu s$, (b) para $t = 0,0152 \mu s$, (c) para $t = 0,0228 \mu s$. Os Parâmetros Dielétricos são $\epsilon_r = 5.4$, $\sigma = 0.00010394 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$.

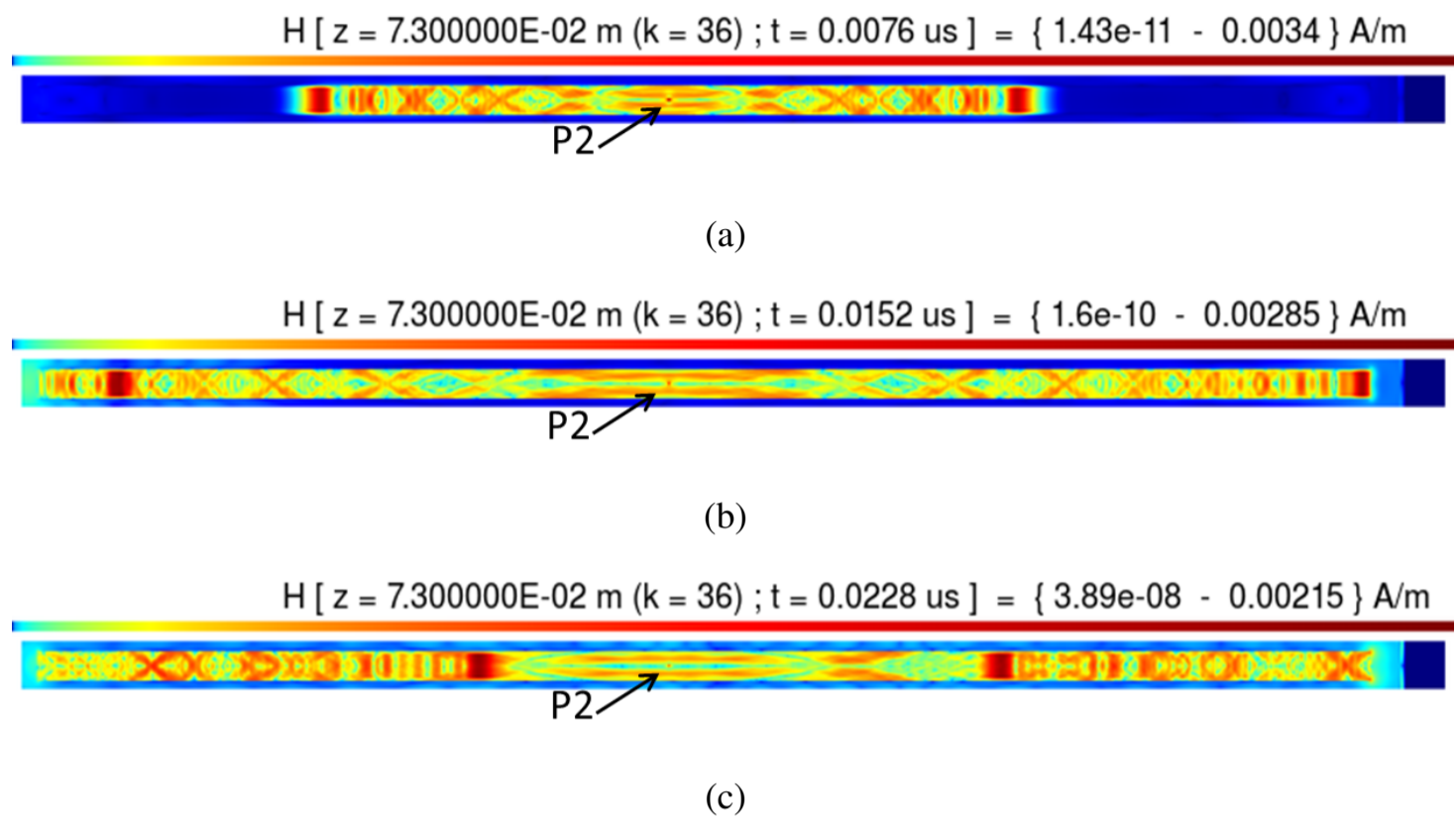


Figura 3.7: Visualização da propagação do campo magnético para DP ocorrendo em P2 (a) para $t = 0,0076 \mu\text{s}$, (b) para $t = 0,0152 \mu\text{s}$, (c) para $t = 0,0228 \mu\text{s}$. Os Parâmetros Dielétricos são $\epsilon_r = 5.4$, $\sigma = 0.00010394 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$.

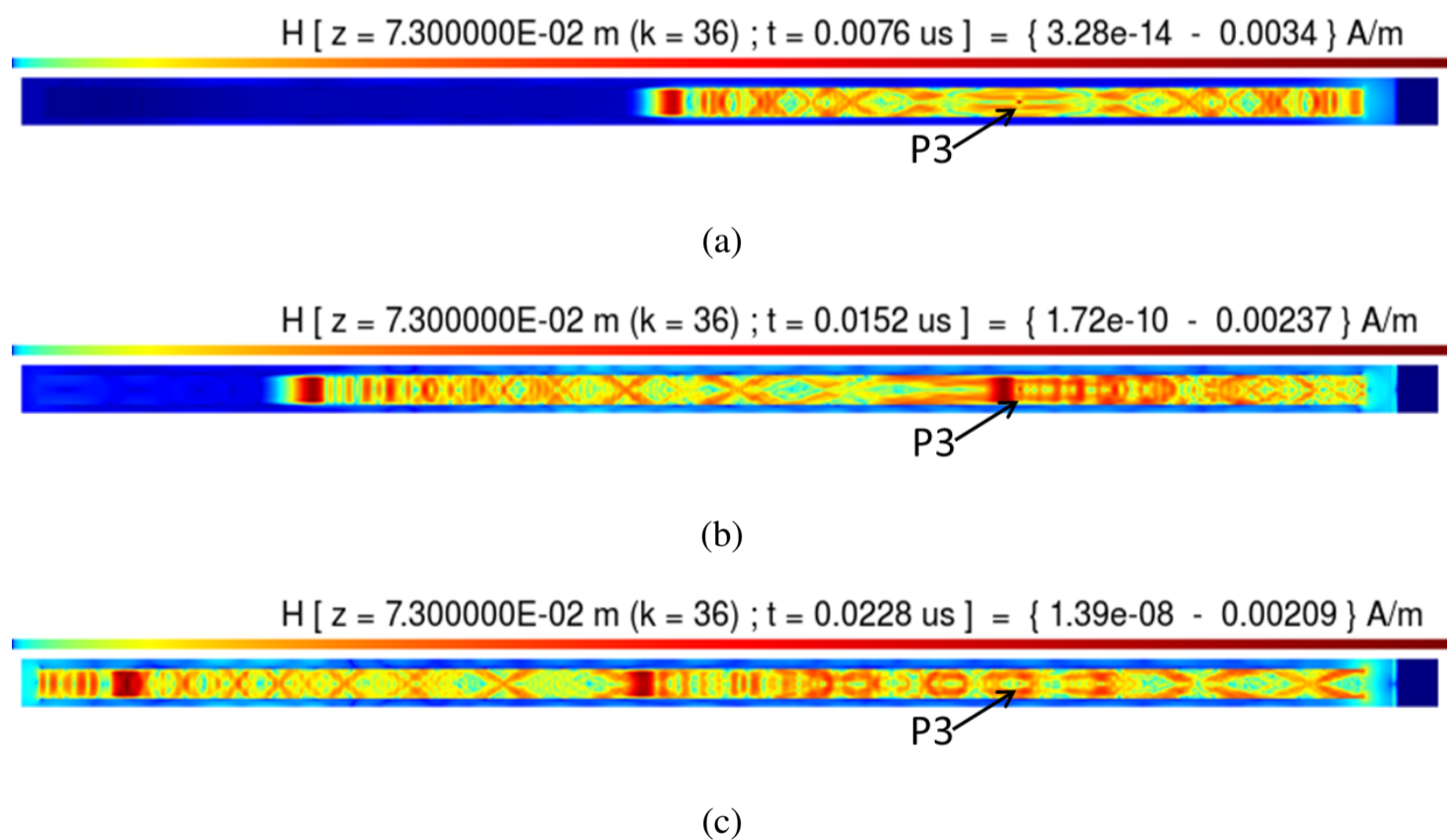
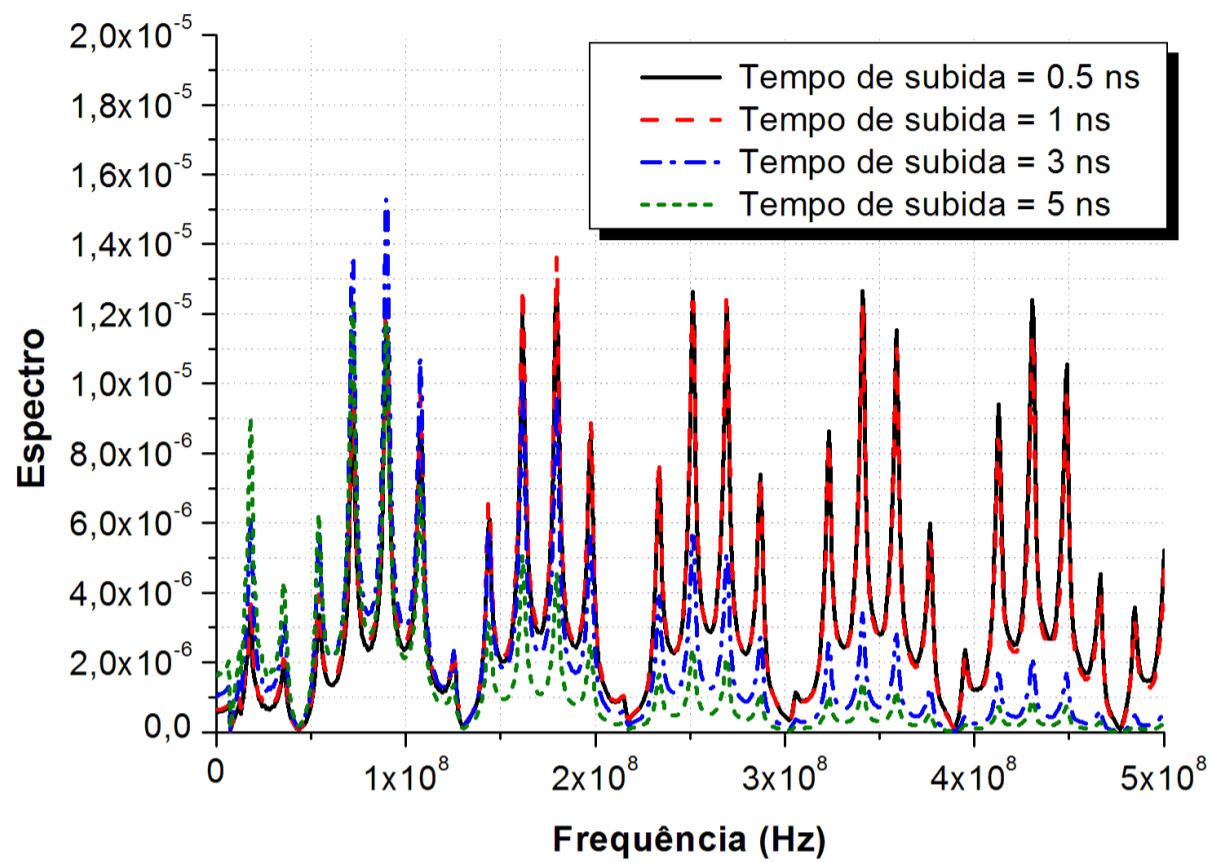
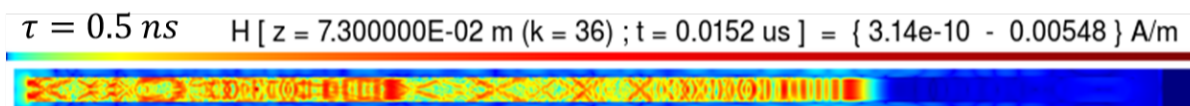


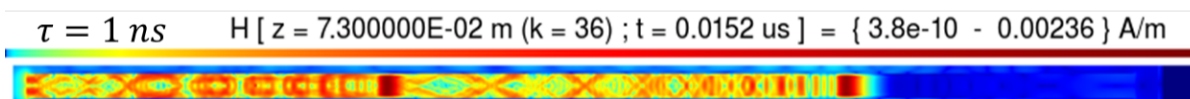
Figura 3.8: Visualização da propagação do campo magnético para DP ocorrendo em P3 (a) para $t = 0,0076 \mu\text{s}$, (b) para $t = 0,0152 \mu\text{s}$, (c) para $t = 0,0228 \mu\text{s}$. Os Parâmetros Dielétricos são $\epsilon_r = 5.4$, $\sigma = 0.00010394 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$.



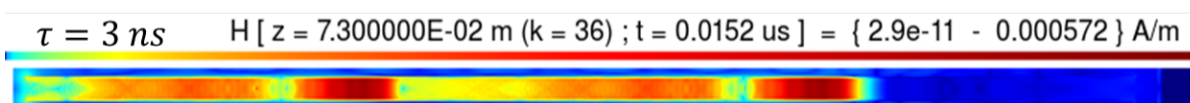
(a)



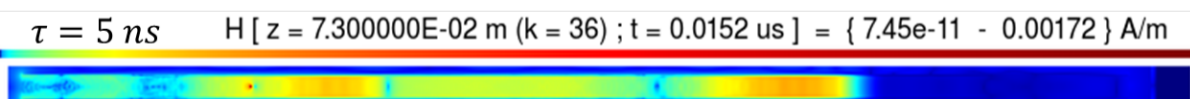
(b)



(c)

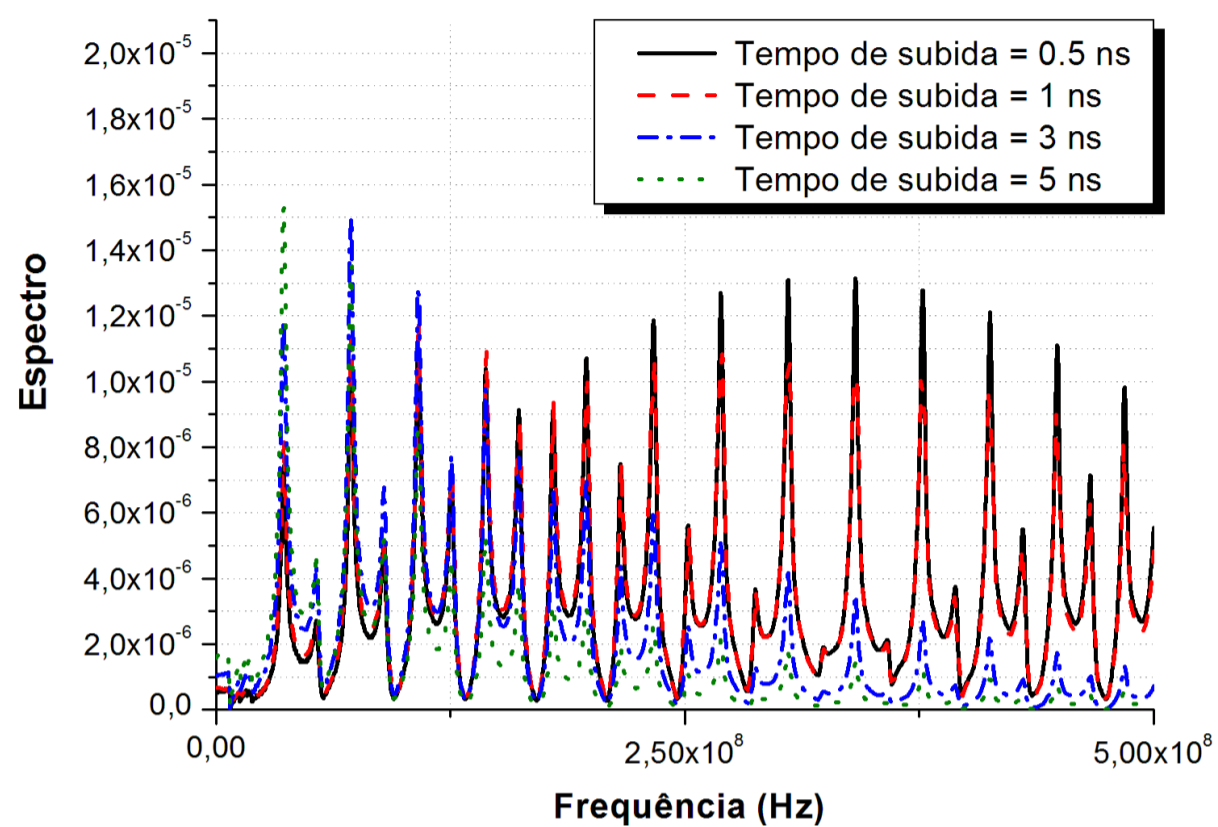


(d)

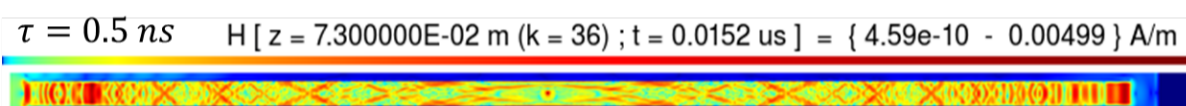


(e)

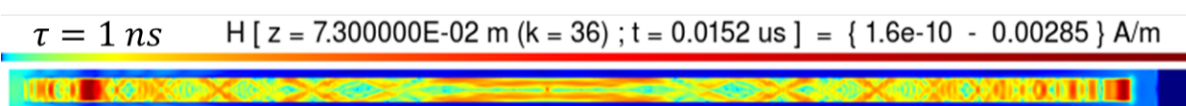
Figura 3.9: (a) Comparação entre os espectros do sinal recebido para cada tempo de subida (com permissividade relativa de 5,4) para descarga parcial ocorrendo em P1, (b) visualização do campo magnético para $\tau = 0,5$ ns, (c) $\tau = 1$ ns, (d) $\tau = 3$ ns e (e) $\tau = 5$ ns .



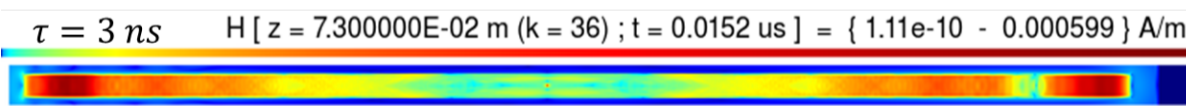
(a)



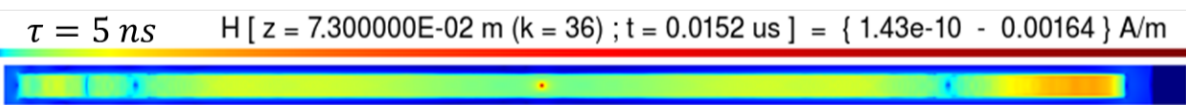
(b)



(c)

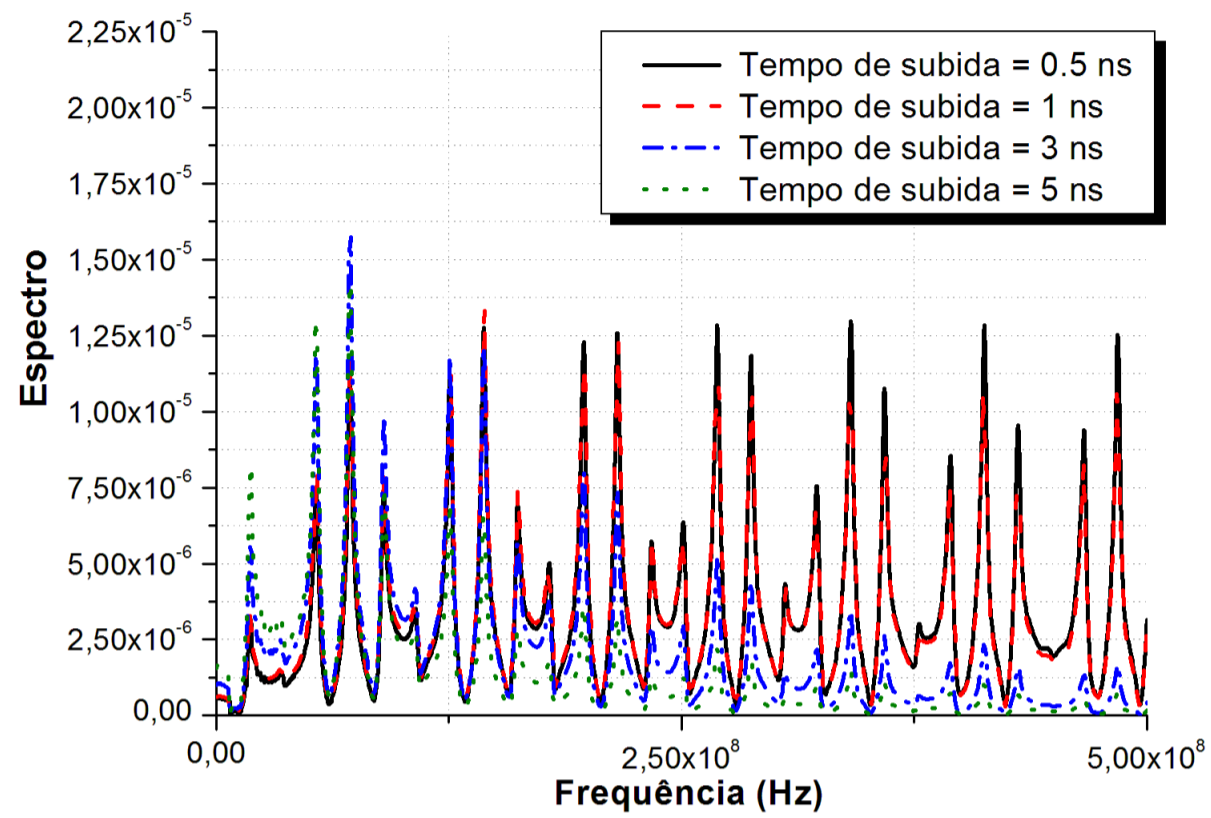


(d)

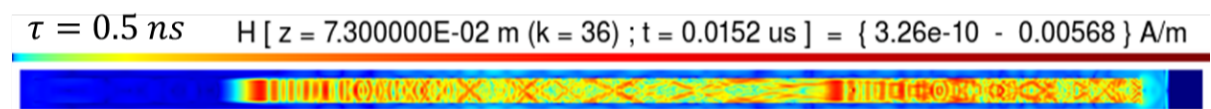


(e)

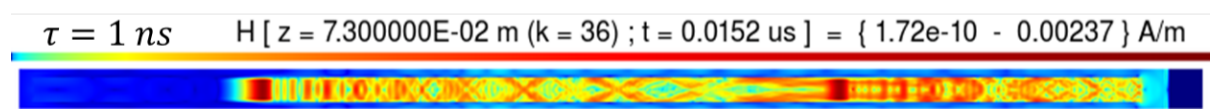
Figura 3.10: (a) Comparação entre os espectros do sinal recebido para cada tempo de subida (com permissividade relativa de 5,4) para descarga parcial ocorrendo em P2, (b) visualização do campo magnético para $\tau = 0,5 \text{ ns}$, (c) $\tau = 1 \text{ ns}$, (d) $\tau = 3 \text{ ns}$ e (e) $\tau = 5 \text{ ns}$.



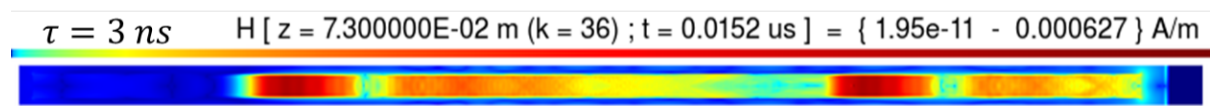
(a)



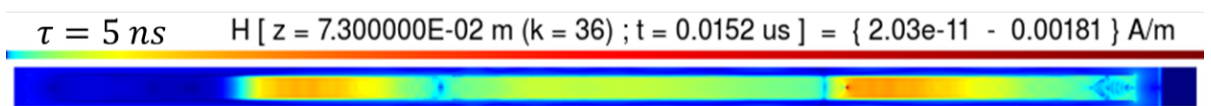
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3.11: (a) Comparação entre os espectros do sinal recebido para cada tempo de subida (com permissividade relativa de 5,4) para descarga parcial ocorrendo em P3, (b) visualização do campo magnético para $\tau = 0,5 \text{ ns}$, (c) $\tau = 1 \text{ ns}$, (d) $\tau = 3 \text{ ns}$ e (e) $\tau = 5 \text{ ns}$.

O efeito da condutividade eléctrica σ do dielétrico também foi investigado numericamente. Para cada ponto de excitação (P1, P2 e P3), três simulações foram feitas com diferentes valores de σ ($5,2 \times 10^{-5}$, $1,04 \times 10^{-4}$ e $2,07 \times 10^{-4}$ S/m) [48]. Os parâmetros ϵ_r e μ_r foram fixados em 5,4 e 1, respectivamente. Foi observado, como esperado, que as frequências onde ocorrem máximos e mínimos no espectro não mudam quando σ é alterado. As modificações observadas nos espectros (Figuras 3.12 - 3.14), em função de σ estão associadas apenas a amplitudes espectrais: maiores valores do σ (maiores perdas eléctricas) produzem maior atenuação do sinal. As Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 mostram a comparação entre os espectros do sinal recebido, para cada caso, que ilustra o efeito acima mencionado.

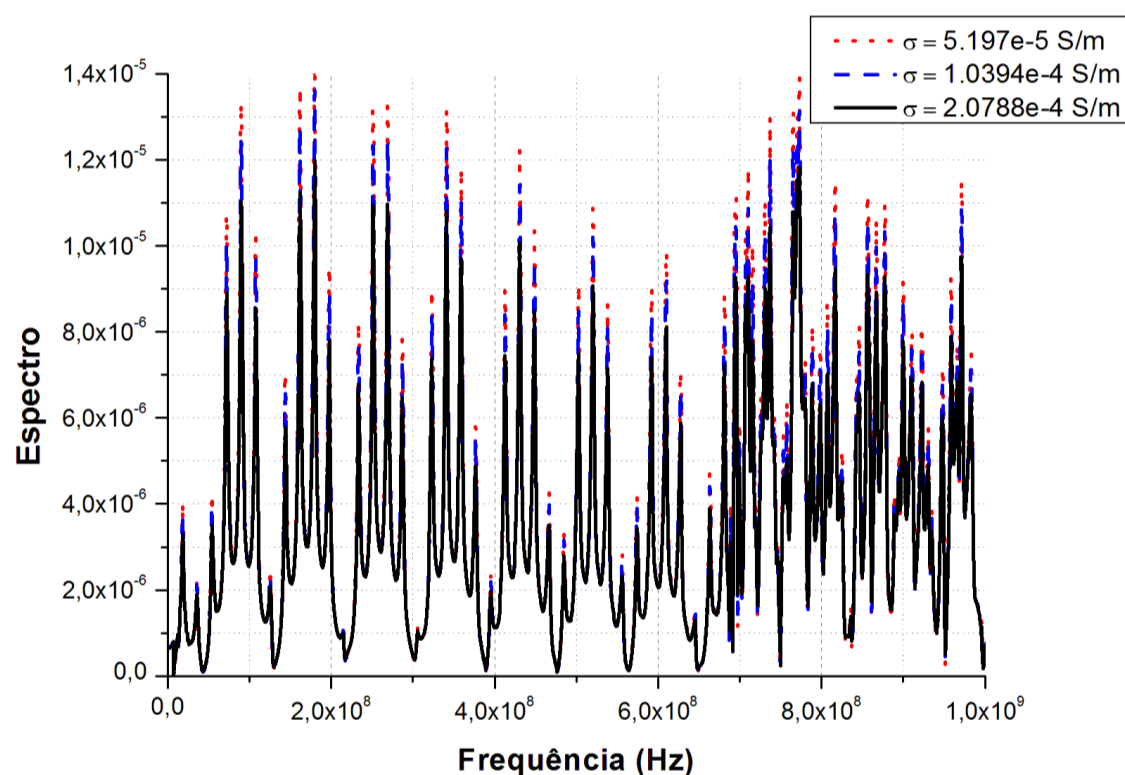


Figura 3.12: Comparação entre os espectros dos sinais recebidos para cada valor de σ (com permissividade relativa de 5.4) para DP ocorrendo em P1.

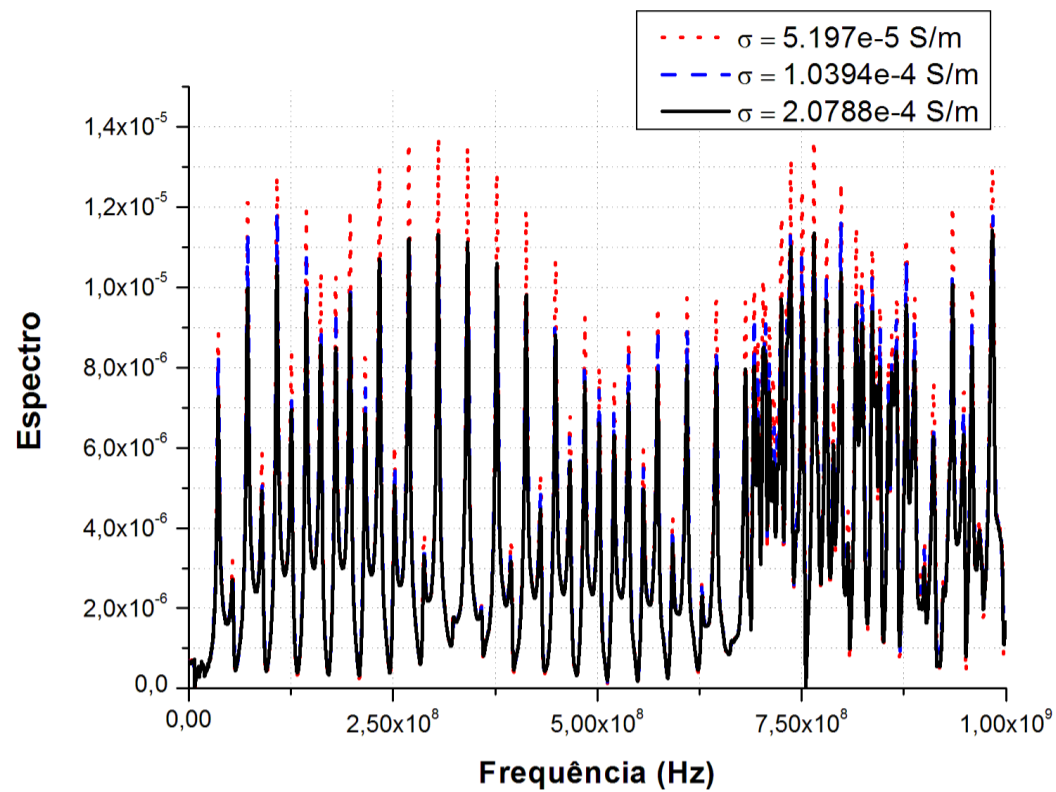


Figura 3.13: Comparação entre os espectros dos sinais recebidos para cada valor de σ (com permissividade relativa de 5.4) para DP ocorrendo em P2.

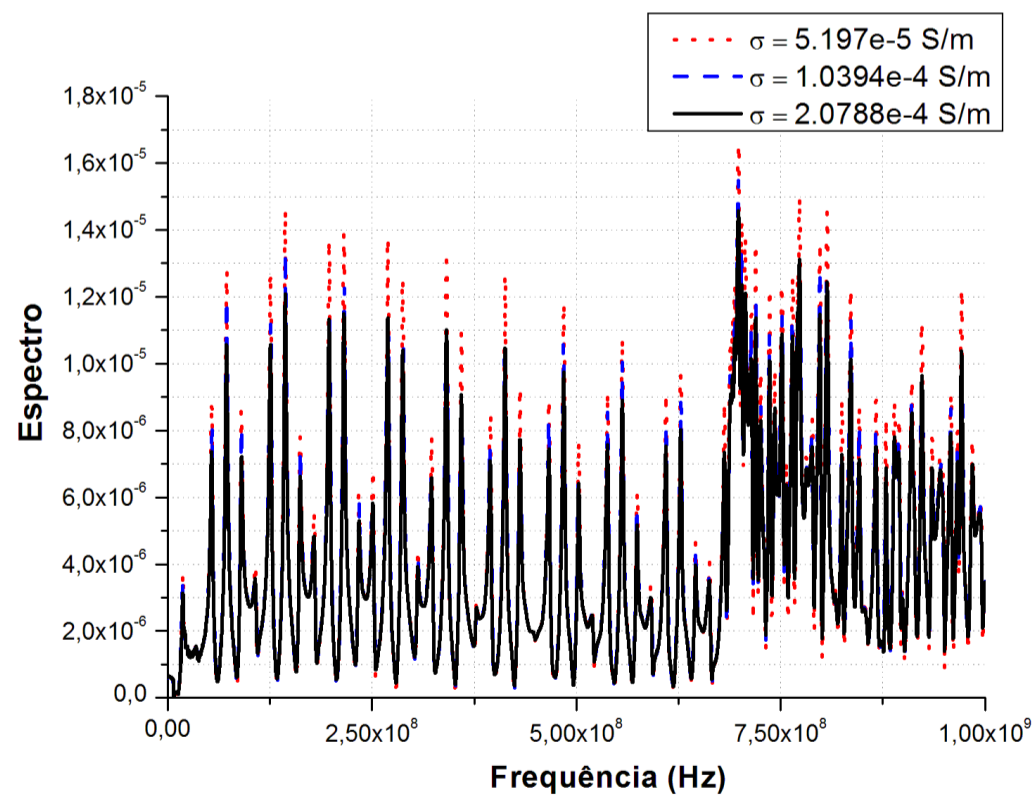


Figura 3.14: Comparação entre os espectros dos sinais recebidos para cada valor de σ (com permissividade relativa de 5.4) para DP ocorrendo em P3.

Por fim, foram avaliados os efeitos espectrais da permissividade elétrica relativa da mica . A simulação da descarga parcial que ocorre em P1 (Figura 3.5(a)) foi repetida. No entanto, ϵ_r do dielétrico foi ajustado para diferentes valores entre 5,4 e 8,0 (como está especificado para a mica em [46]). Considerando a barra da Figura 3.5, como um guia de ondas, verificou-se analiticamente a ocorrência de frequências de ressonância f_r na faixa espectral de 80 a 400 MHz. Para fins de validação de soluções numéricas, as frequências de ressonância da barra foram calculadas analiticamente usando a equação (3.1) [50]. A comparação das frequências calculados por 3.1 e por simulação FDTD é mostrada na Figura 3.15.

De acordo com [50] , as frequências de ressonância podem ser obtidas pela expressão

$$f_r = \frac{u'}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad (3.1)$$

em que u' é a velocidade de propagação do sinal (na mica , para o problema atual) . As dimensões do guia de ondas são expressas por a, b e c (Figura 3.5) . Note-se que m , n e p são números inteiros [50] . Observa-se na Figura 3.15 que os resultados analíticos e numéricos estão de acordo e que u' é função de ϵ_r .

3.3 Técnica Espectral Proposta para Diagnóstico da Bobina do Hidrogerador

Tal como descrito anteriormente, várias descargas parciais podem ocorrer concomitante-mente em uma dada bobina. Dessa forma, foram simulados pares de descargas simultâneas, ocorrendo nos quadrantes indicados na Figura 3.4. Descargas produzidas em um mesmo quadrante também foram consideradas. Os sinais das descargas parciais propagam-se através da estrutura e sofrem múltiplas reflexões, especialmente nas partes metálicas. Os sinais têm sua velocidade de propagação reduzida (em relação à velocidade da luz no vácuo) devido a permissividade relativa da isolamento. Além disso, os sinais são atenuados devido à (baixa) condutividade elétrica da mica e devido à expansão natural da onda. Dessa forma, os sinais transitórios

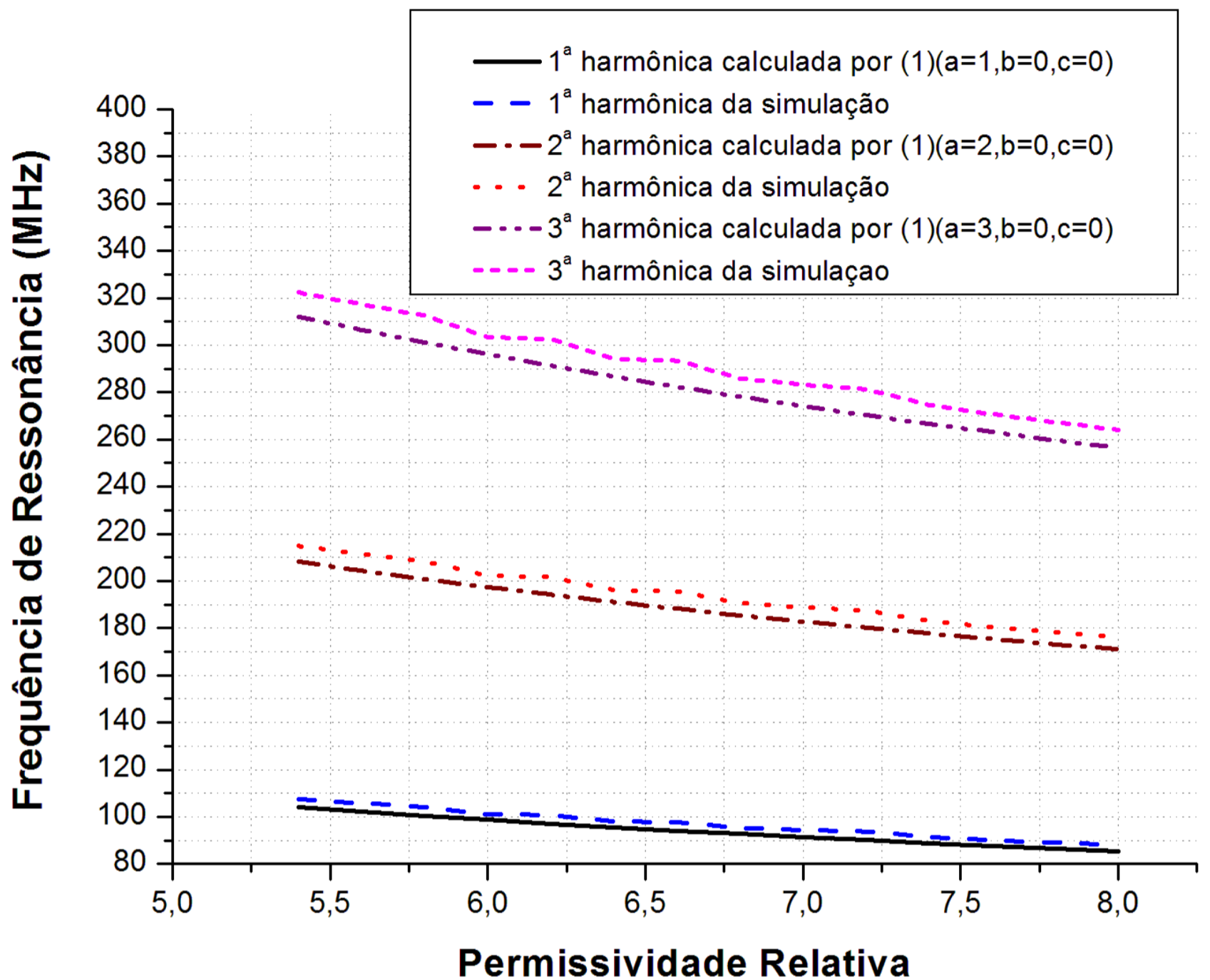
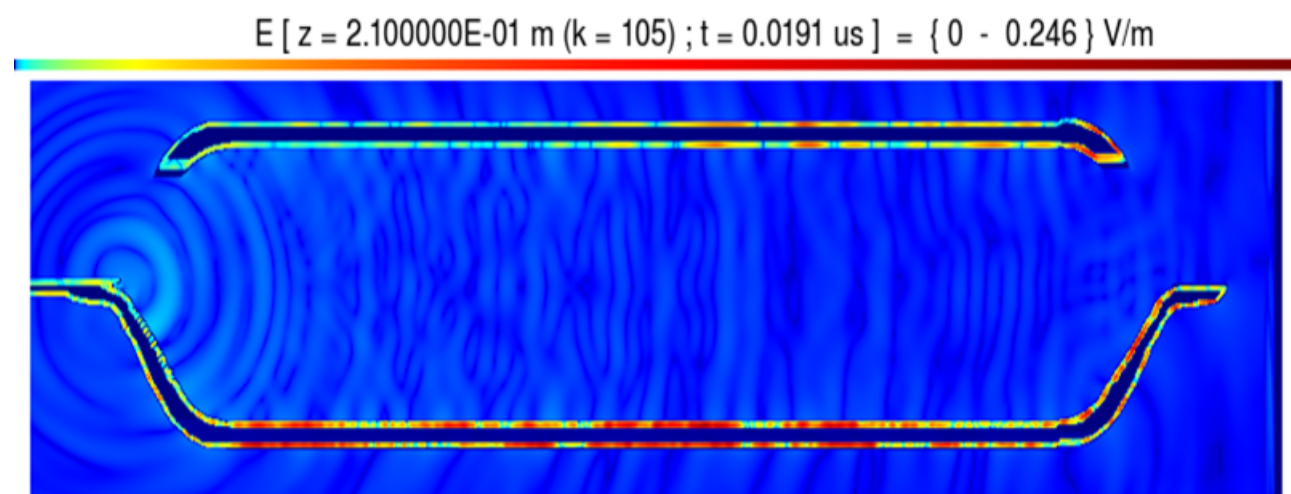


Figura 3.15: Comparação entre as frequências calculadas usando (3.1) e as frequências obtidas via simulação FDTD .

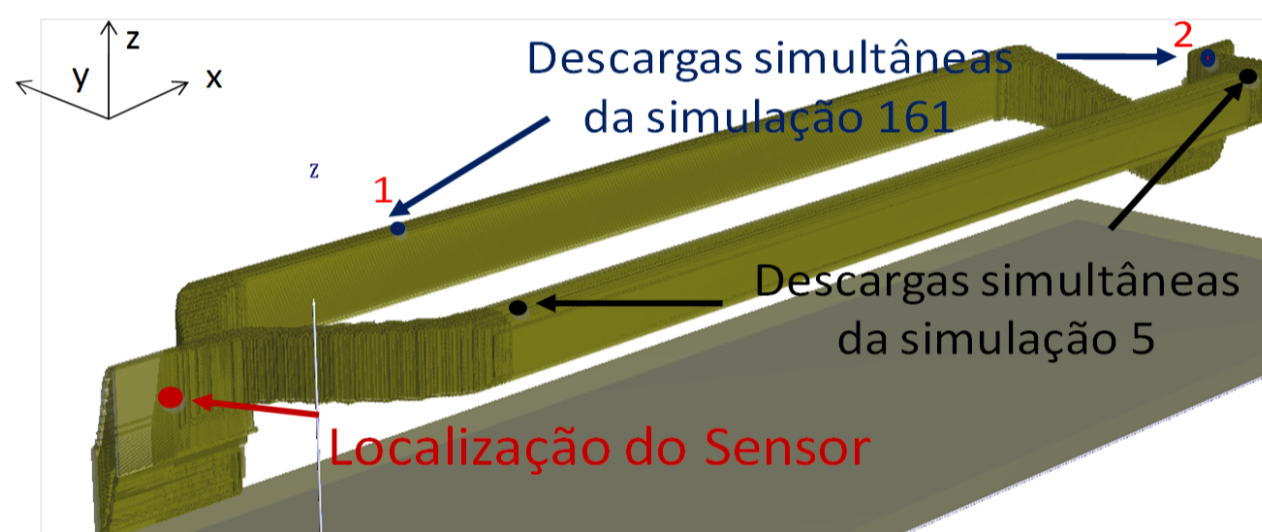
recebidos pelo sensor (Figura 3.4) são fortemente dependentes da posição da(s) descarga(s).

Considerando-se que cada par transmissor (onde ocorre a descarga) e receptor (antena) constitui um canal de propagação único (Figura 3.16(a)), verifica-se que cada parte da bobina, onde uma descarga ocorre, produz um padrão espectral próprio, no qual ocorrem máximos e mínimos locais característicos da região espacial considerada. Elaborou-se, dessa forma, uma rotina computacional que identifica as frequências onde há máximos e mínimos locais nos espectros, de forma que um banco de dados foi elaborado, contendo tais frequências e a região da bobina

associada a esses harmônicos. Este banco é utilizado para estimar a região onde há uma ou mais descargas.



(a)



(b)

Figura 3.16: (a) Visualização da propagação do campo elétrico para $t = 0,0191 \mu\text{s}$ (plano x - y que intercepta o baricentro da barra); (b) Localização do sensor (antena) e localização das descargas simultâneas para as simulações 5 e 161.

Após a geração do banco de dados, diversos problemas consistindo de duas descargas simultâneas foram realizadas e calculou-se a transformada de Fourier dos sinais captados pelo sensor. Foi realizada a comparação das frequências associadas aos máximos e mínimos do espectro do sinal relativo às duas descargas simultâneas com as frequências registradas no banco e, através desta comparação, pôde-se estimar a posição de ambas as descargas. Várias combinações de posições de descargas foram testadas e foi possível estimar os locais de maior probabilidade de ocorrência das mesmas, indicando, portanto, as regiões onde há não-homogeneidades na

isolação. Esta idéia é detalhada pelo fluxograma da Figura 3.17.

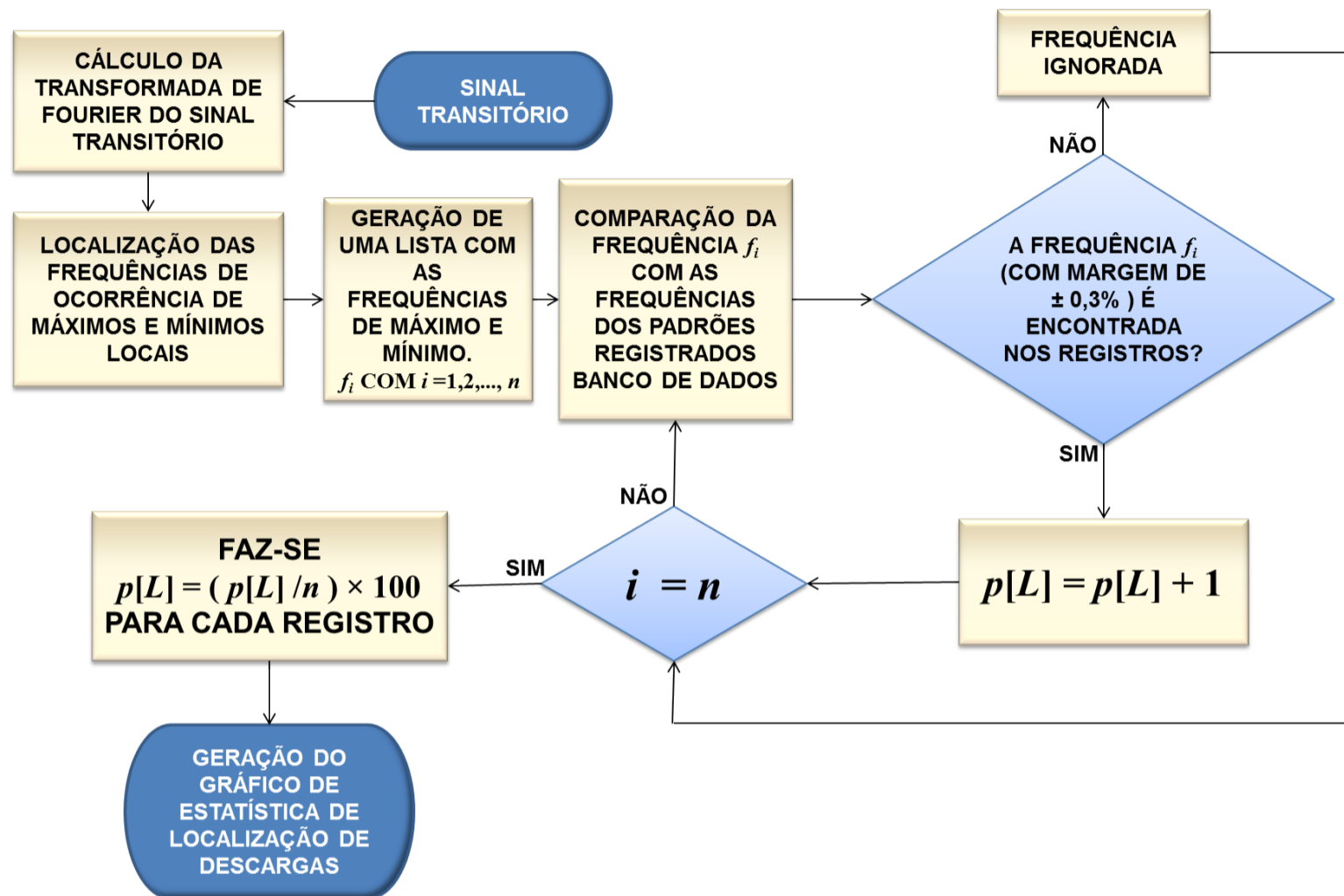
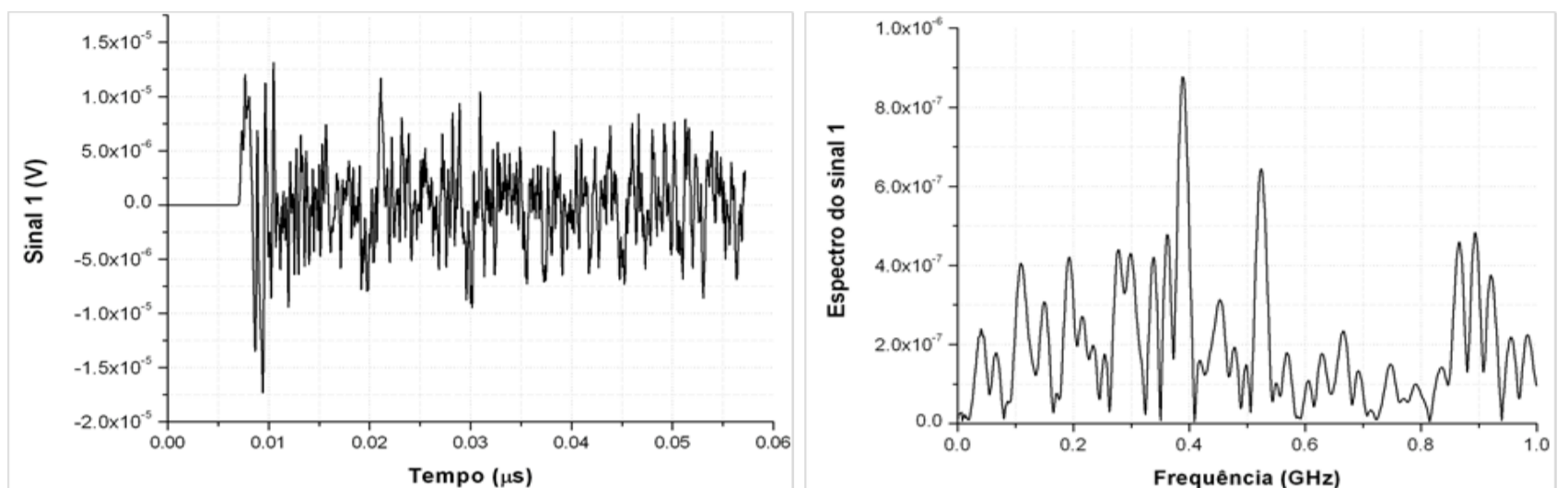


Figura 3.17: Fluxograma do Algoritmo da técnica proposta.

Cada par modelado de descargas parciais foi indexado por um número inteiro. Para efeito de ilustração, a Figura 3.16(b) mostra os pontos excitados por descargas parciais para as simulações indexadas pelos inteiros 5 e 161. Os sinais transitórios registrados pelo sensor S , quando as descargas ocorrem isoladamente, são os ilustrados pelas Figuras 3.18(a) e 3.18(b), para a simulação 161. Seus espectros são mostrados respectivamente pelas Figuras 3.18(c) e 3.18(d). Tal como previsto pelo princípio da superposição, a ocorrência concomitante dos dois pulsos gera combinação linear dos dois sinais temporais e de seus espectros (Figura 3.18(e)). Nota-se, comparando-se as Figuras 3.18(c)- 3.18(e), que a maior parte dos máximos e mínimos locais vistos nas Figuras 3.18(b) e 3.18(d) são preservados no gráfico da Figura 3.18(e), o que possibilita a identificação de múltiplas descargas. Adicionalmente, ressalta-se que isto é válido mesmo quando as descargas não são iniciadas exatamente no mesmo instante de tempo, pois o módulo da transformada de Fourier está sendo considerado e a influência da fase é negligenci-

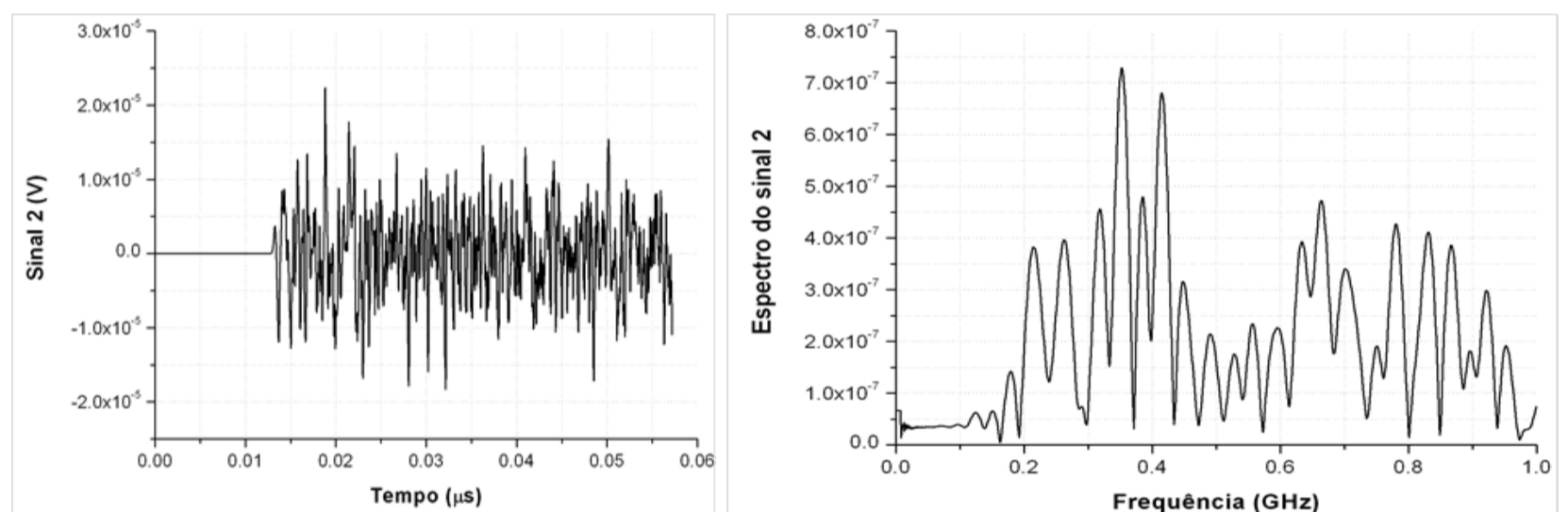
ada.

Tome como exemplo o sinal da Figura 3.18(e). Uma forma de estimar regiões da barra com maior probabilidade de ocorrência de descarga é identificar, no espectro do sinal registrado pelo sensor, as frequências nas quais ocorrem máximos e mínimos locais e determinar, no banco de dados, os registros com maior número de coincidências de ocorrência de tais frequências. Dessa forma, um gráfico envolvendo a variável L e o percentual do total de frequências de máximo e mínimo correspondentes a um dado padrão espectral (denotado por p) pode ser construído. Com este gráfico, podem ser determinadas visualmente as regiões da barra com maior probabilidade de ocorrência de descargas e diagnósticos podem ser gerados.



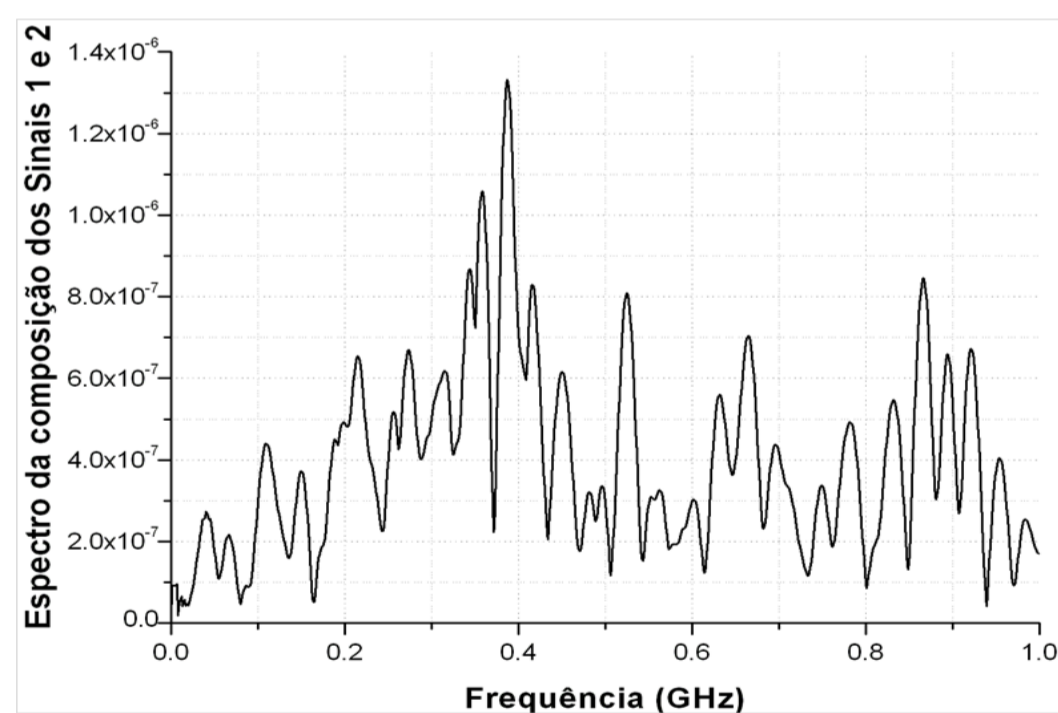
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

Figura 3.18: Sinais relativos à simulação 161, registrados pelo sensor: (a) transitório obtido devido apenas à descarga 1, (b) transitório obtido devido apenas à descarga 2, (c) espectro do sinal relativo à descarga 1, (d) espectro do sinal relativo à descarga 2, (e) espectro relativo à ocorrência concomitante das descargas 1 e 2. 39

Capítulo 4

Estudo de Casos e Resultados

4.1 Validação do *Software*

Para fins de validação do software *SAGS* [44], adaptado para modelagem de descargas parciais, reproduziram-se os resultados do problema proposto em [51], no qual são realizadas simulações de propagação de ondas eletromagnéticas devidas a descargas parciais em GIS (*Gas-Insulated Switchgears*) usando o método FDTD [14]. A região de análise concebida para a validação possui de $944 \times 170 \times 170$ células cúbicas de Yee, com aresta $\Delta = 5\text{mm}$. O modelo numérico da GIS é mostrado na Figura 4.1. As partes externas (Figura 4.1.a) e internas (Figura 4.1.b) são consideradas metais perfeitos. Entre os metais internos e externos da GIS, há vácuo. A Figura 4.1.b ilustra também o ponto de excitação do problema e a posição do sensor onde o sinal (campo elétrico transitório) é registrado.

O pulso de descarga parcial (fonte de excitação) modelado na simulação é Gaussiano, com tempo de subida (*rise time*) $t_r=530$ ps e tempo de descida idêntico, tal como especificado em [51] (Figura 4.2). A polarização do campo elétrico produzido pela descarga no ponto onde esta ocorre é paralela a z , assim como a polarização do campo elétrico registrado pelo receptor [51].

Certas aproximações foram realizadas na modelagem da estrutura, uma vez que não dispúnhamos de todos os dados geométricos em [51]. No entanto, o sinal obtido no sensor, mostrado

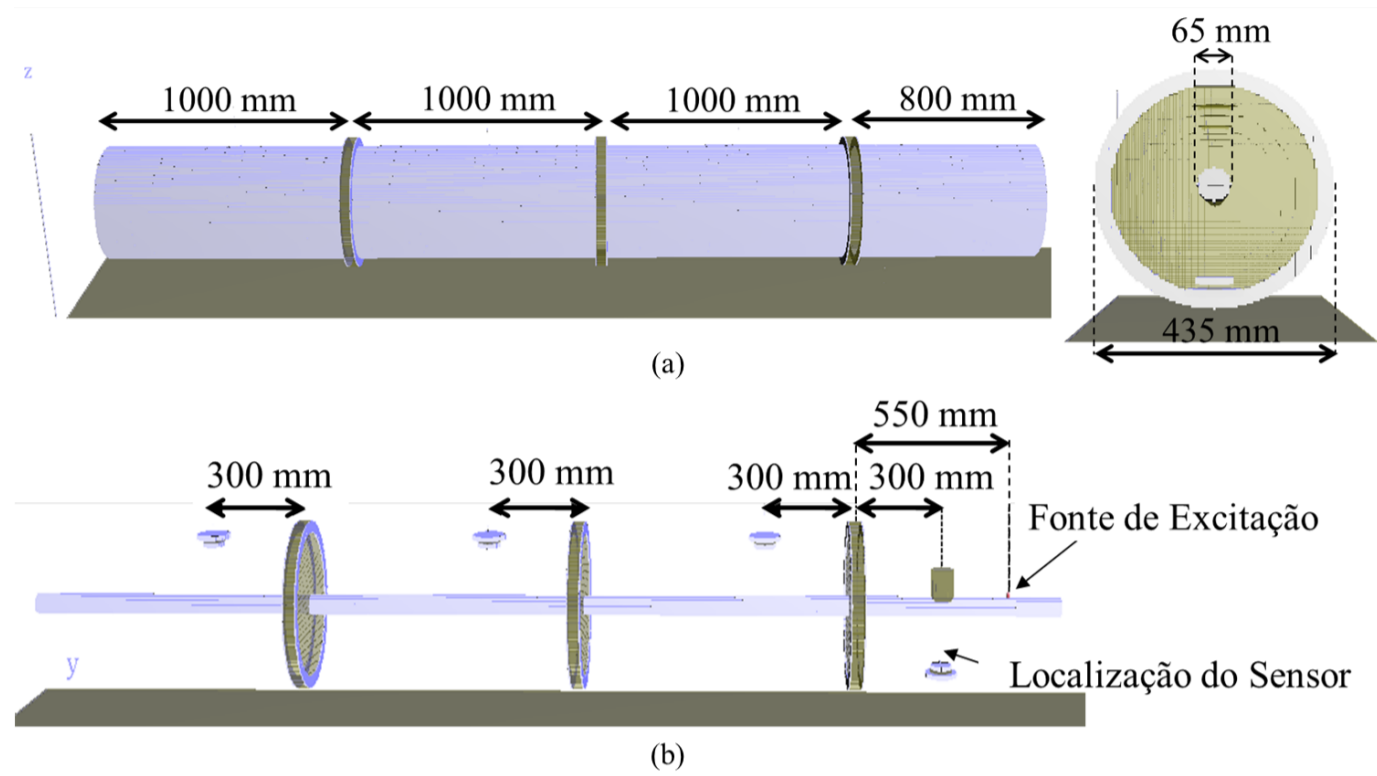


Figura 4.1: Representação gráfica do modelo *FDTD* da *GIS*:(a) Vista externa, (b) Vista interna

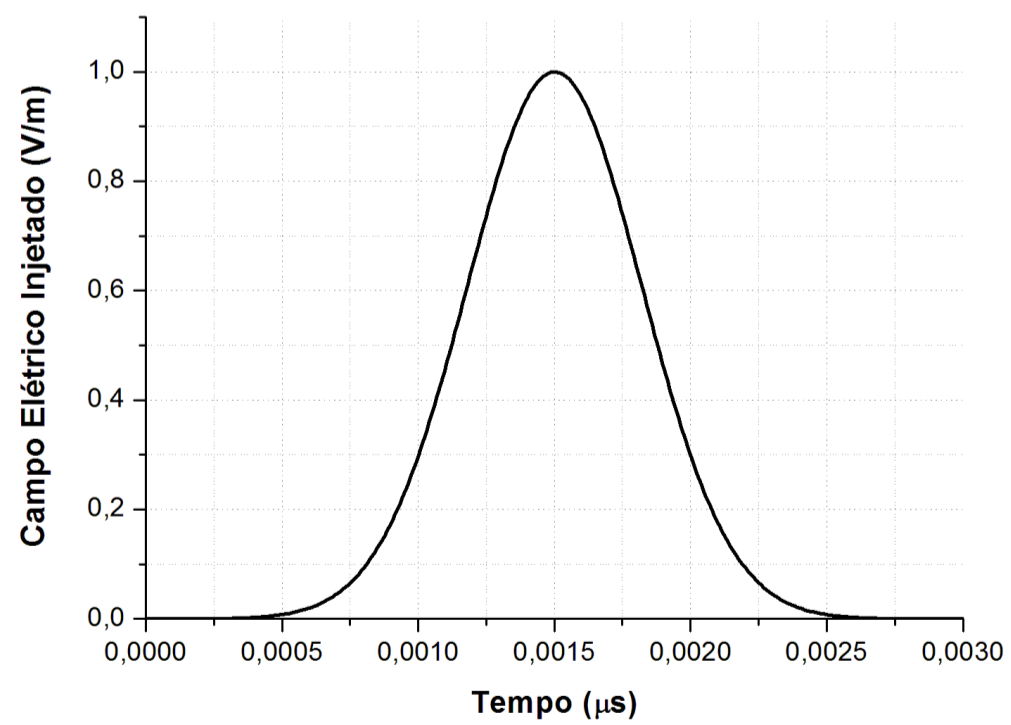


Figura 4.2: Pulso de excitação normalizado (campo elétrico em função do tempo)

na Figura 4.3, é muito semelhante ao sinal encontrado em [51] (tanto em relação ao valor de máximo quanto em relação à fase e frequência). Isto valida o *software* SAGS para o presente problema e o método utilizado para análise de descargas parciais.

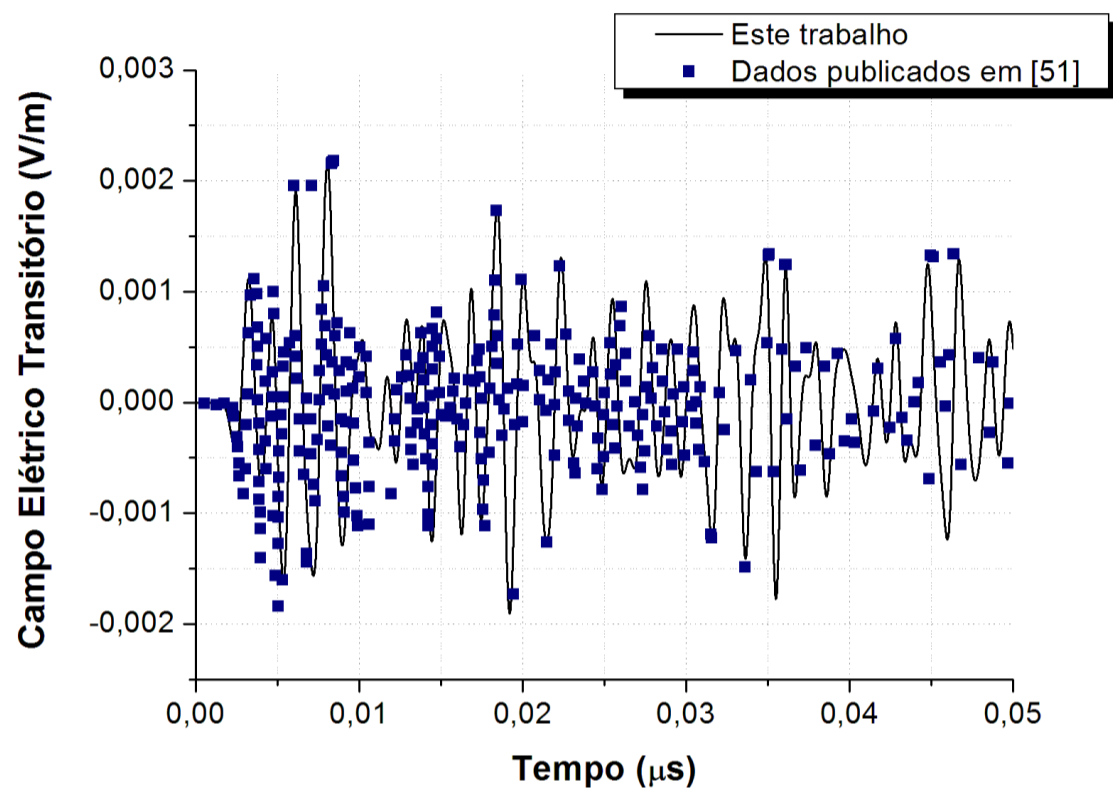


Figura 4.3: Sinal registrado no sensor indicado pela Figura 4.1 - validação do software desenvolvido

Outra validação do software *SAGS* [44] foi realizada. O problema analisado experimentalmente em [48] foi reproduzido numericamente. Em [48], para ser estudada a propagação de descargas parciais ao longo de barras estatóricas de geradores de potência, experimentos foram realizados em uma amostra de barra (do tipo Roebel), desmontada de um gerador de 900 MW. A barra possui 3,8 m de comprimento. Uma tensão V_1 [48] foi aplicada e uma tensão V_2 foi medida na saída, tal como mostra a Figura 4.4. Tal *setup* experimental, definido em [48], foi numericamente reproduzido por neste trabalho.

O *setup* experimental foi modelado no simulador *SAGS* [44]. O modelo FDTD é composto de três camadas: estrutura interna de metal, que é cercada por uma camada dielétrica, que por sua vez é revestida por uma camada metálica (externa), como é ilustrado na Figura 4.5. A camada dielétrica é caracterizada pelos seguintes parâmetros $\epsilon_r = 3,8$, $\sigma = 0,00010394$ S/m

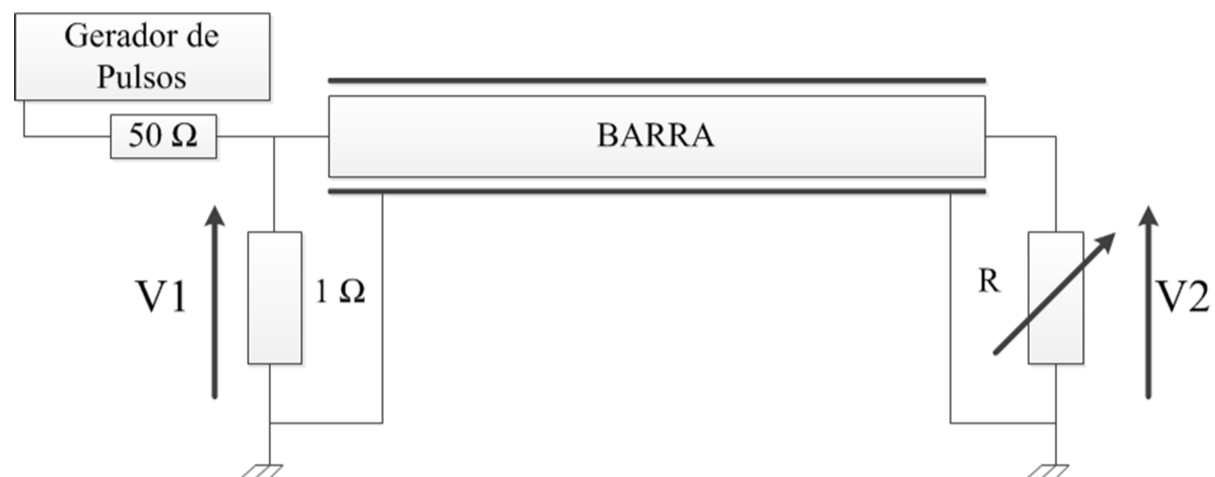


Figura 4.4: Circuito definido e usado experimentalmente em [48], aqui reproduzido numericamente.

e $\mu_r = 1$. As partes de metal são consideradas como cobre ($\epsilon_r = 1, \sigma = 10270 \text{ S/m}$ e $\mu_r = 1$). Ressalta-se que estes parâmetros foram inferidos a partir de resultados apresentados em [48] e de medidas realizadas em uma barra semelhante fornecida pela Eletronorte.

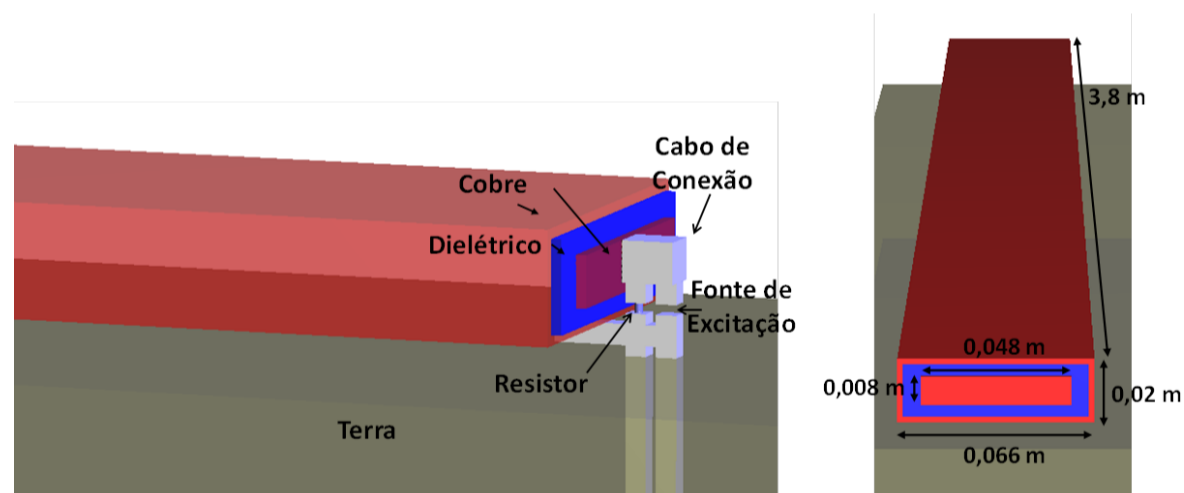


Figura 4.5: Representação do modelo FDTD da barra mostrado no SAGS: dimensões e representação 3D de vários meios.

O *grid* computacional criado para representar o espaço consiste de $848 \times 254 \times 165$ células cúbicas de Yee, com aresta $\Delta = 2\text{mm}$. Algumas aproximações foram feitas no modelo numérico da estrutura, uma vez que todos os dados geométricos não foram especificados em [48]. Verificou-se que o diâmetro dos cabos de conexão contribui significativamente para a tensão de saída V_2 . Cabos com diâmetro menor que 8 mm causam oscilações indesejadas no resultado. Uma comparação entre as formas de onda da tensão V_2 , obtida pela simulação FDTD e pelo experimento feito em [48] é mostrada na Figura 4.6.

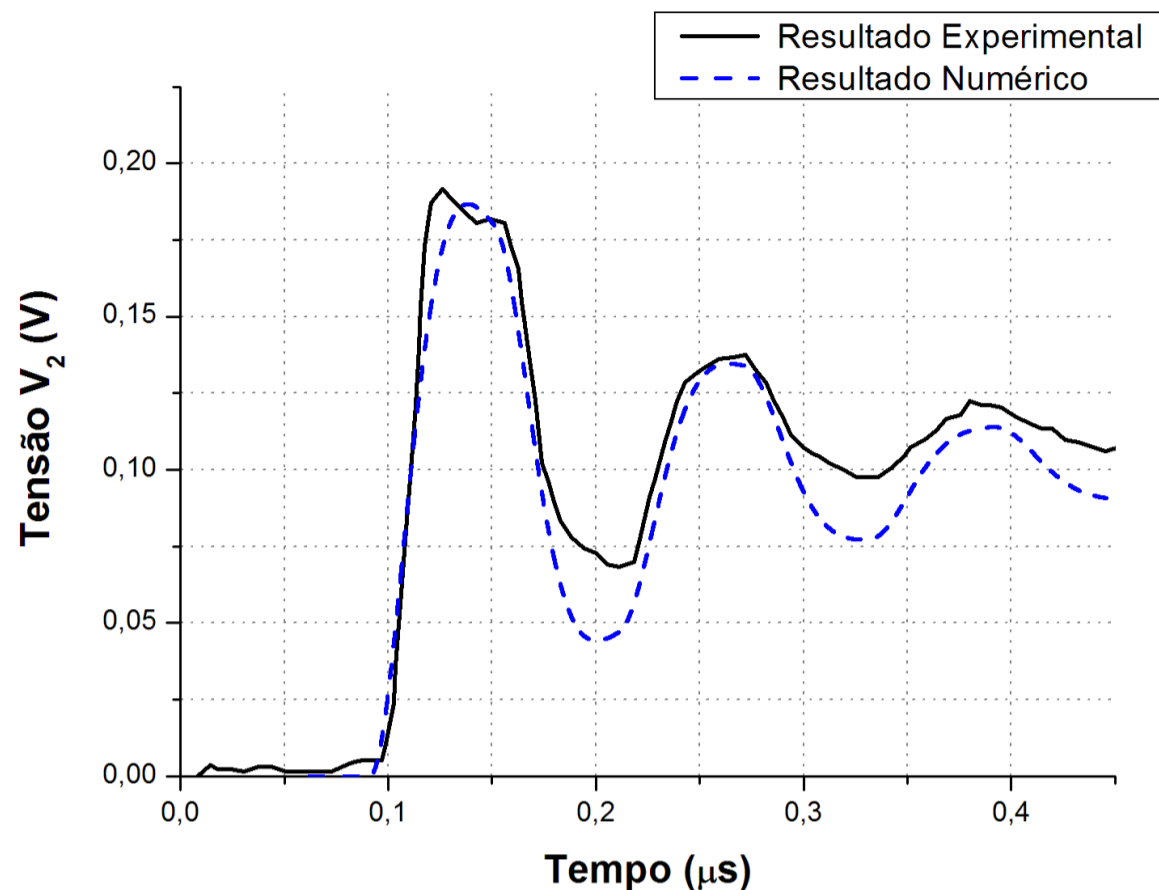


Figura 4.6: Comparação entre formas de ondas numérica (deste trabalho) e experimental [48] para a tensão V_2 .

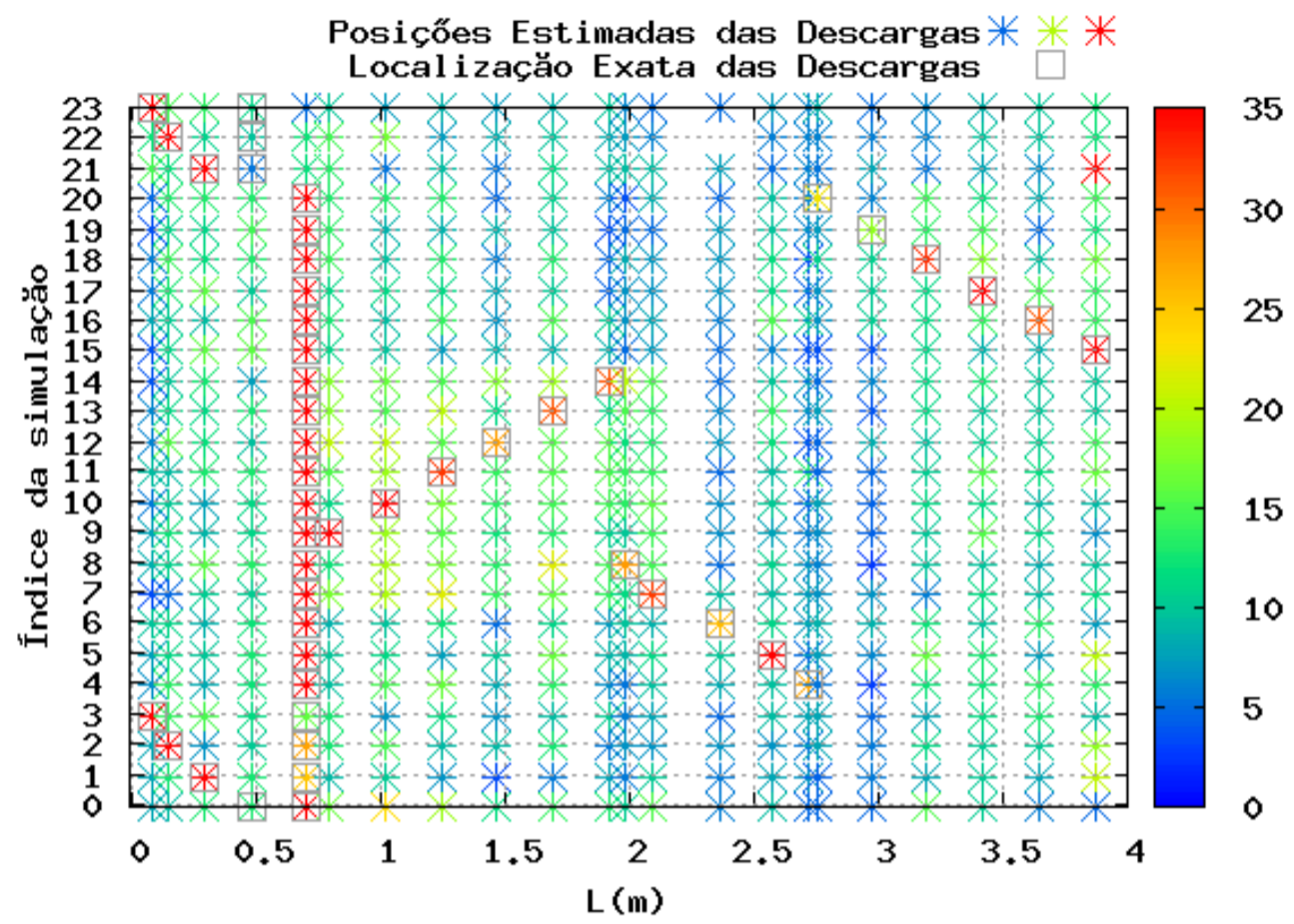
Observa-se que a tensão simulada não é idêntica a tensão experimental. Isto ocorre porque não são mostradas em [48] as dimensões exatas de largura e espessura da barra experimental. No entanto, verifica-se que elas apresentam fases e amplitudes semelhantes entre si. Isto valida o *software* SAGS e o método FDTD utilizado para simular presente problema.

4.2 Múltiplas descargas na isolação de uma única bobina do hidrogenador.

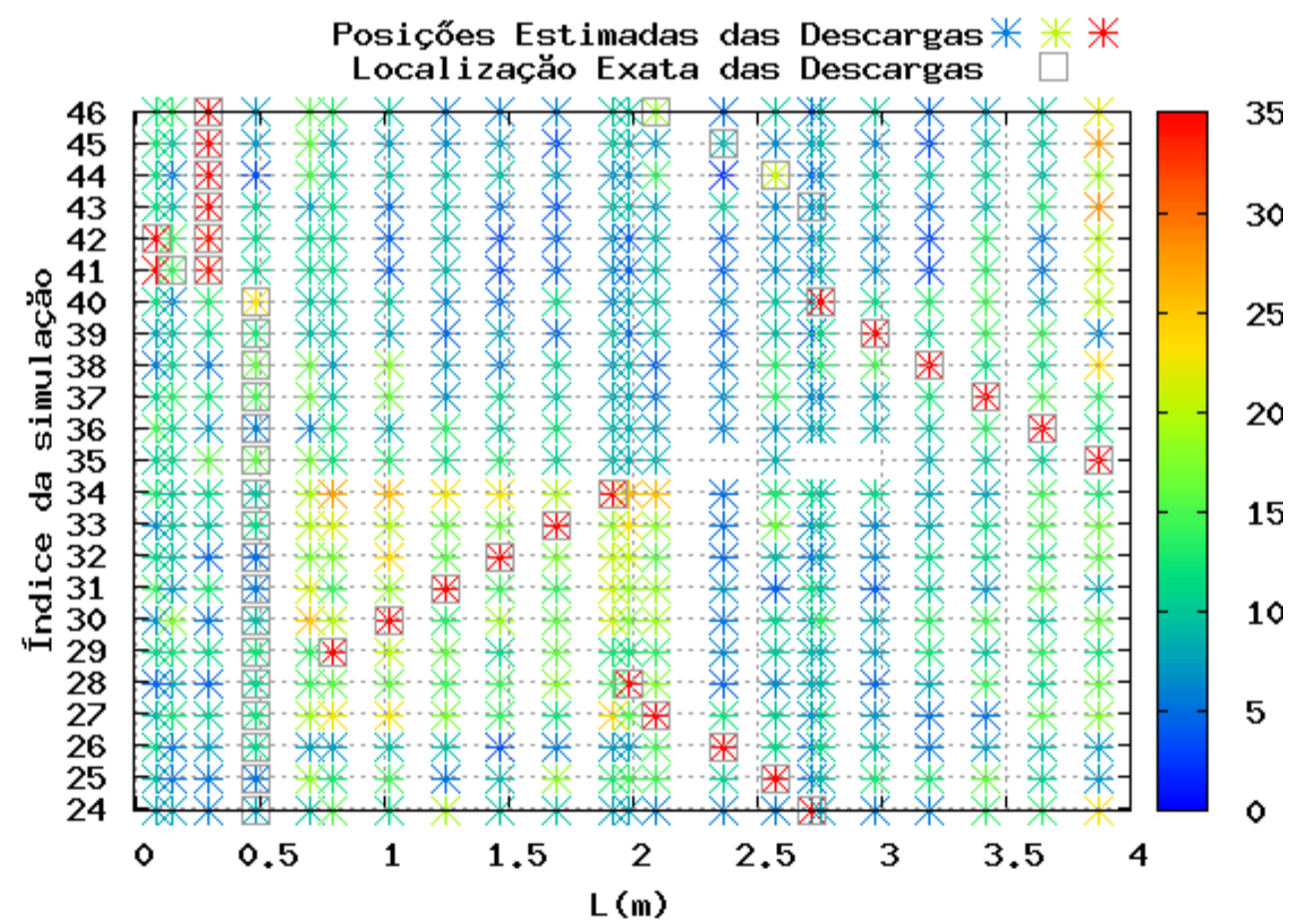
Para uma única bobina do estator do hidrogenador analisado, foram realizadas várias simulações de ocorrência de descargas parciais simultâneas. Para fins ilustrativos, mostra-se na Figura 3.16(a) a distribuição do campo elétrico em um plano horizontal (paralelo ao plano $x - y$) situado na coordenada z média da bobina. Cores avermelhadas significam maiores intensidades de campo e cores próximas ao azul identificam menores magnitudes.

As Figuras 4.7- 4.11 mostram os resultados obtidos usando o método de diagnóstico proposto neste trabalho. No eixo horizontal, tem-se L (em m) e o eixo vertical apresenta o índice das simulações realizadas. Foi realizado um total de 231 experimentos numéricos, nos quais diversas posições de ocorrência de descargas parciais foram simuladas ao longo de L (de zero a 3,866 m). O mapa de cores representa os valores assumidos pela variável p , que, como discutido anteriormente, é proporcional à probabilidade de ocorrência de descargas. Os retângulos em cinza indicam a localização exata das descargas parciais, tal como definido nas simulações. As figuras apresentam adicionalmente uma barra de cores que ilustra a correspondência dos valores assumidos por p com as cores vistas no gráfico de diagnóstico.

Em cerca de 90 % das simulações, o programa computacional aqui desenvolvido, baseado no método proposto, gerou informações estatísticas capazes de fornecer estimativas precisas a respeito da posição das duas descargas simuladas. Nos restante dos casos, o método localizou corretamente a primeira descarga e indicou locais próximos da posição real da segunda descarga. Em 60 % dos casos, desvios máximos de 0,5 m em relação a posição real da segunda descarga foram observados. Em apenas 6,7% dos testes, desvios entre 0,5 m e 1 m foram vistos. Em 30% das simulações, notaram-se desvios de 1 m a 1,5 m. Finalmente, em apenas 3,3 % dos casos, a posição foi estimada com desvios maiores que 1,5m.

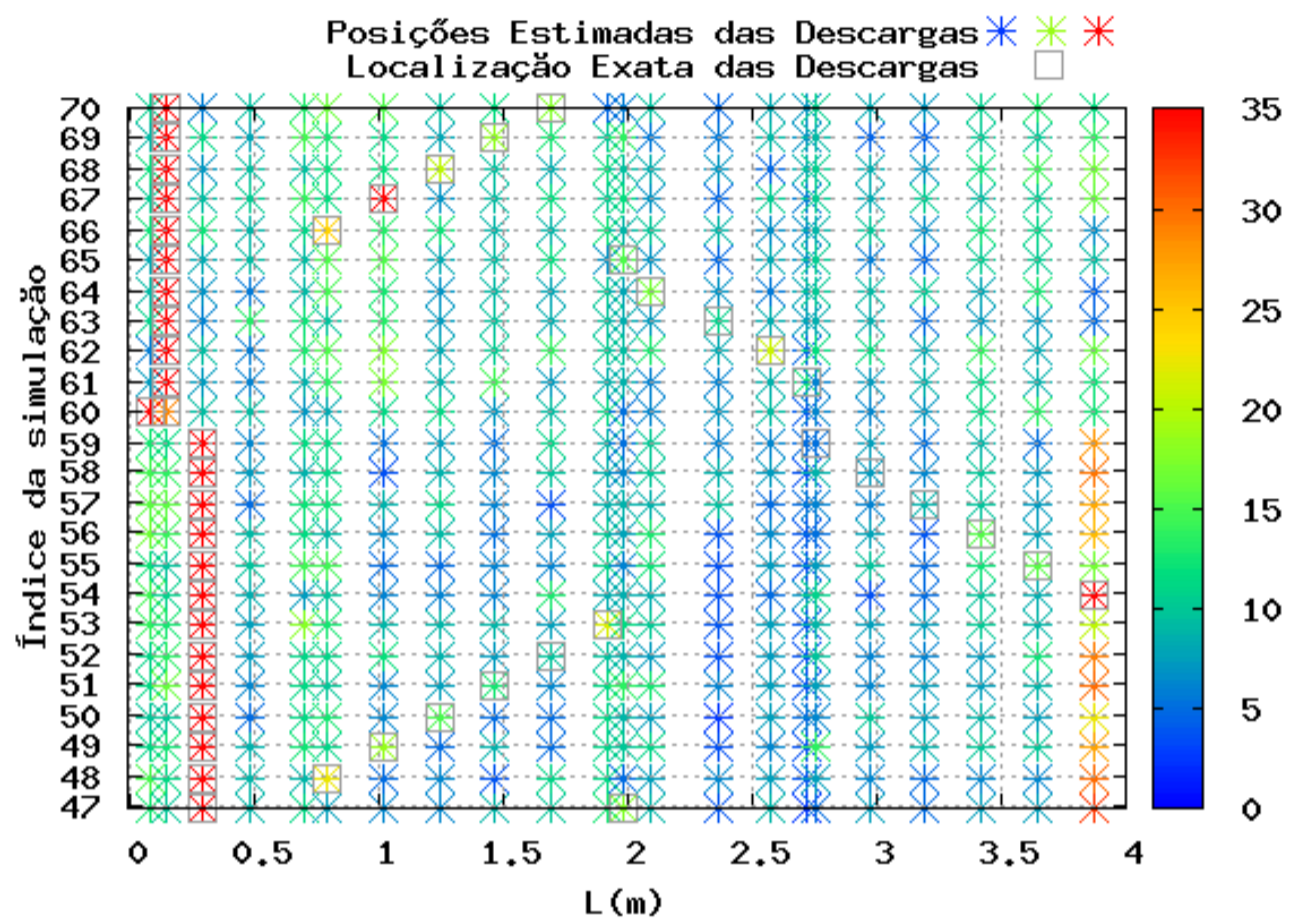


(a)

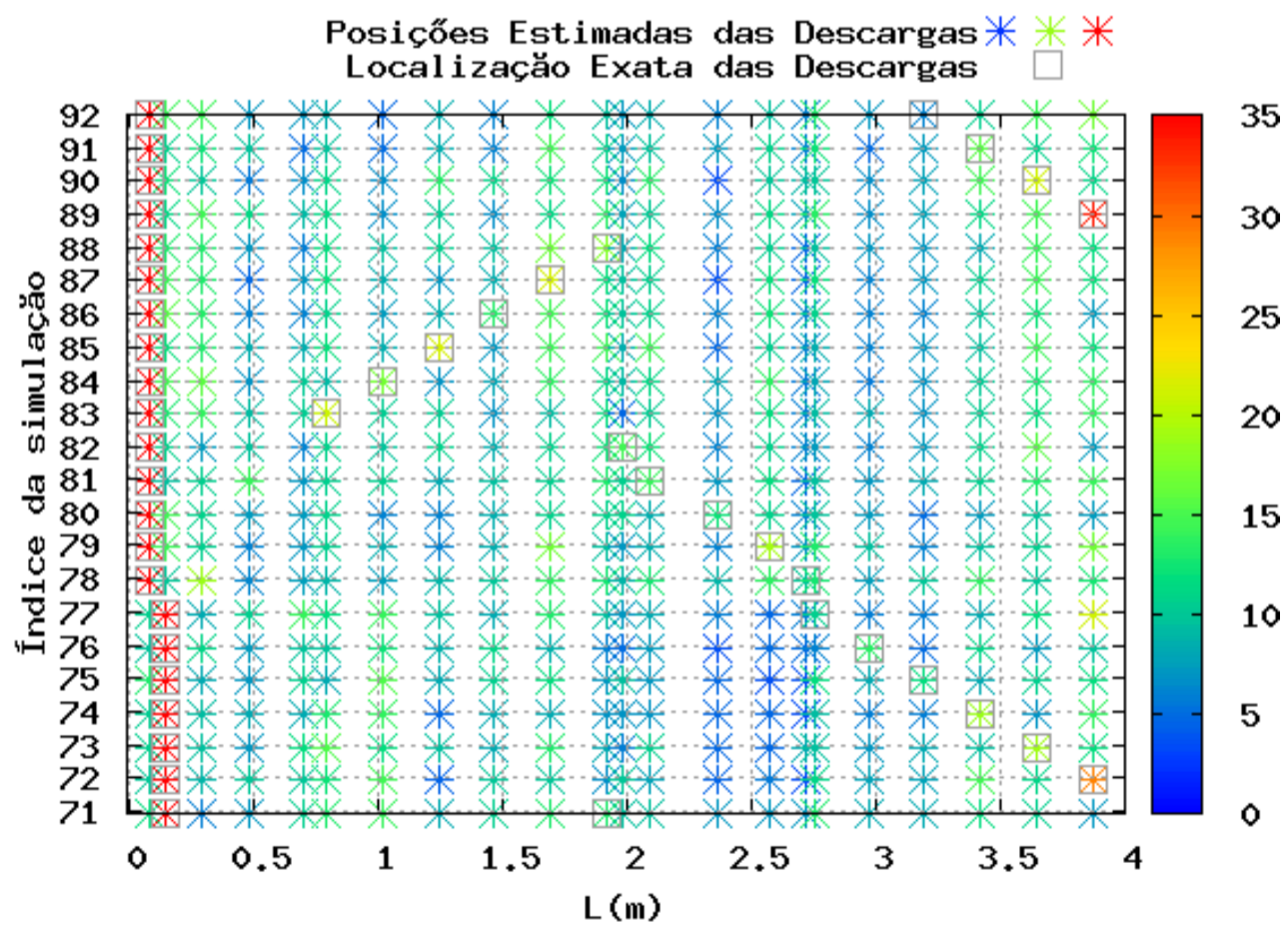


(b)

Figura 4.7: Estatística de localização de descargas para uma única bobina (primeira parte).

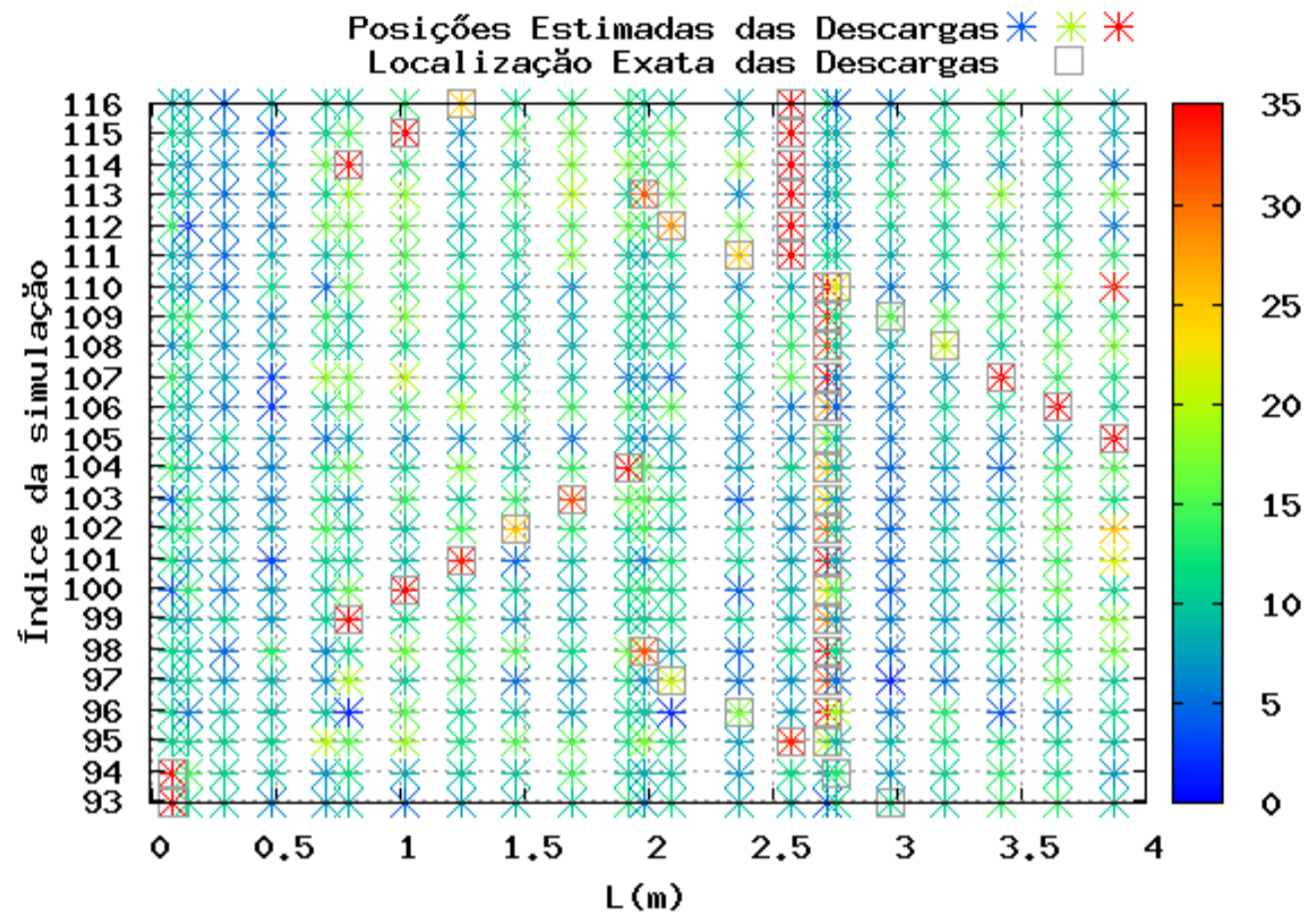


(a)

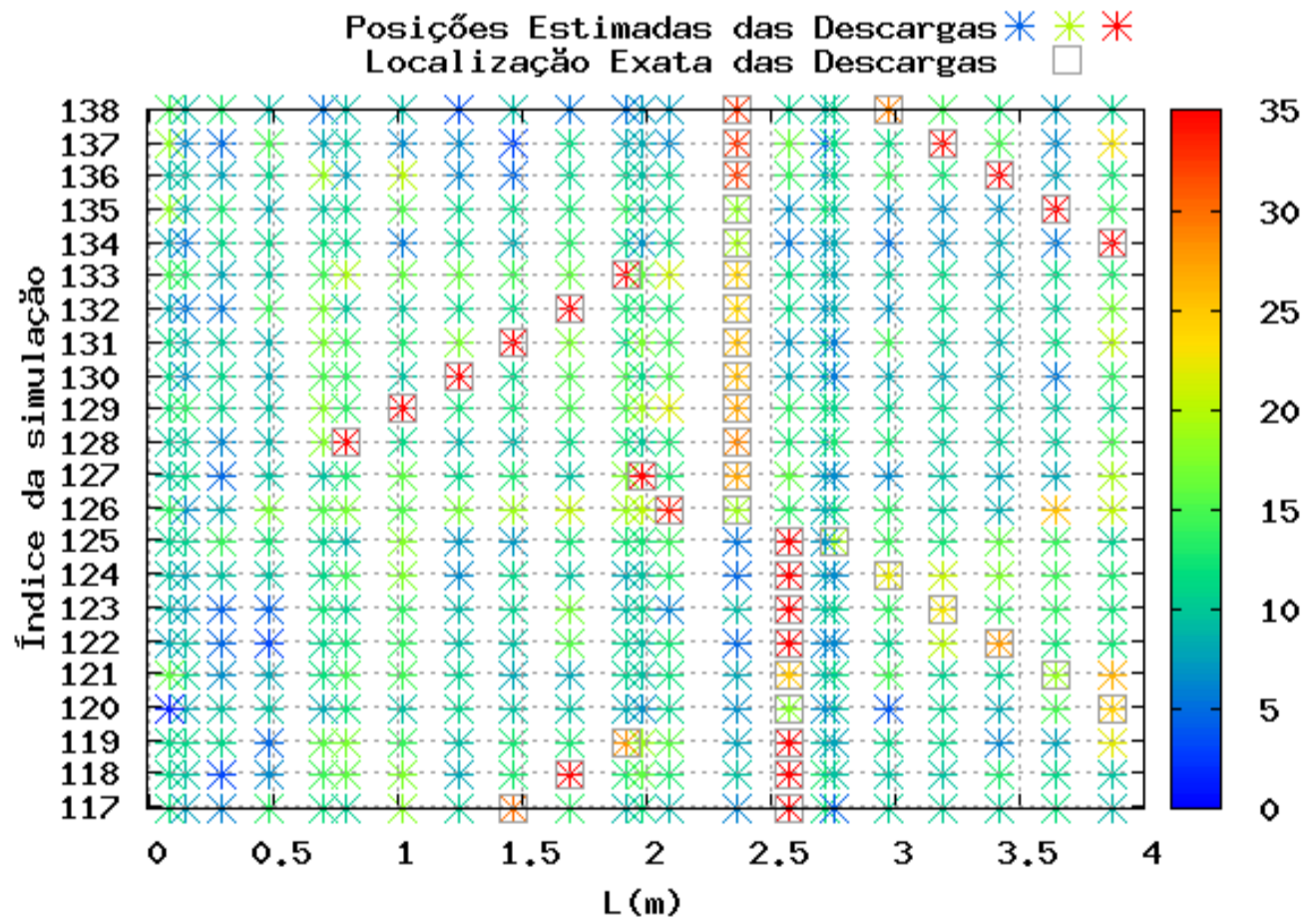


(b)

Figura 4.8: Estatística de localização de descargas para uma única bobina (segunda parte).

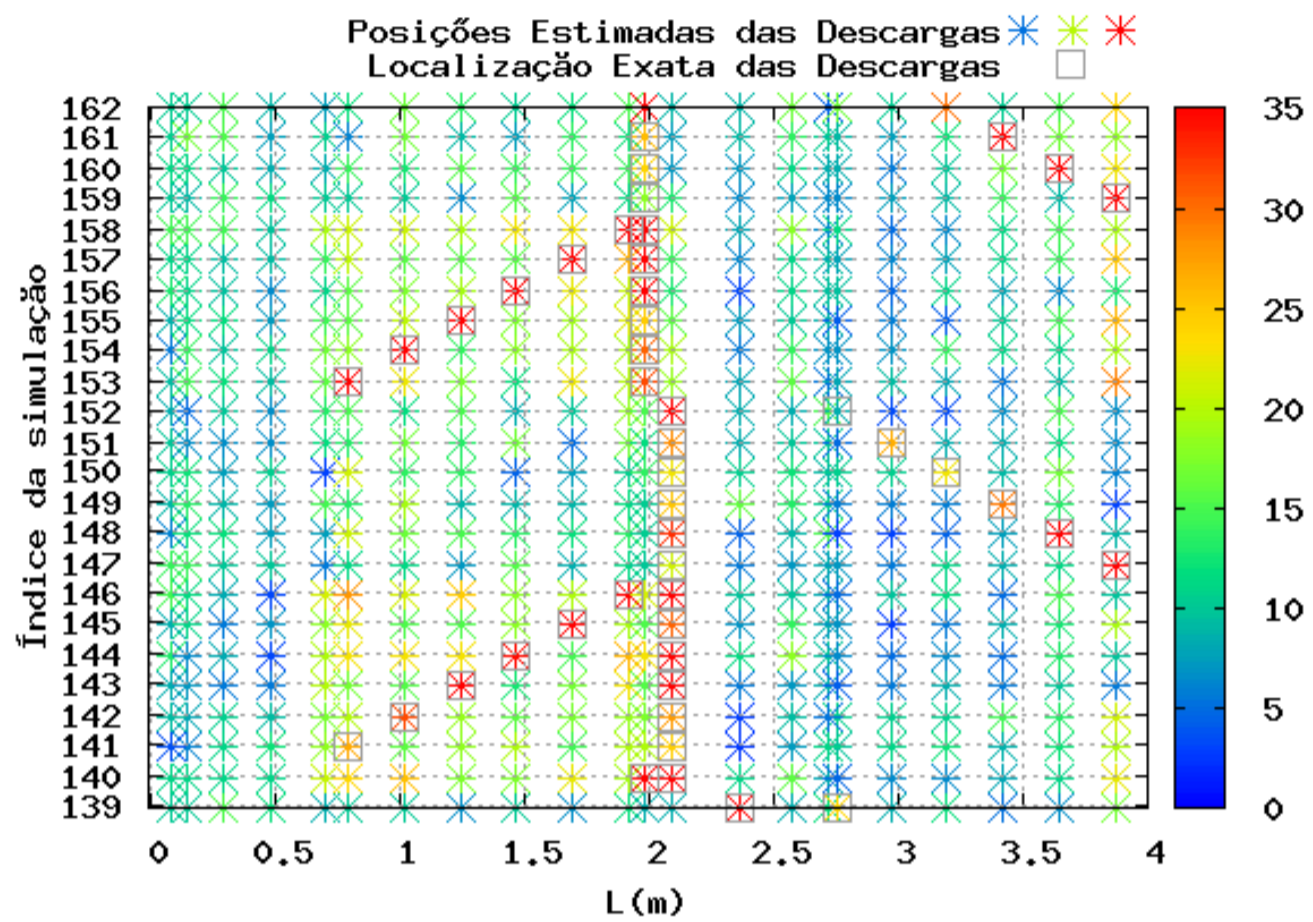


(a)

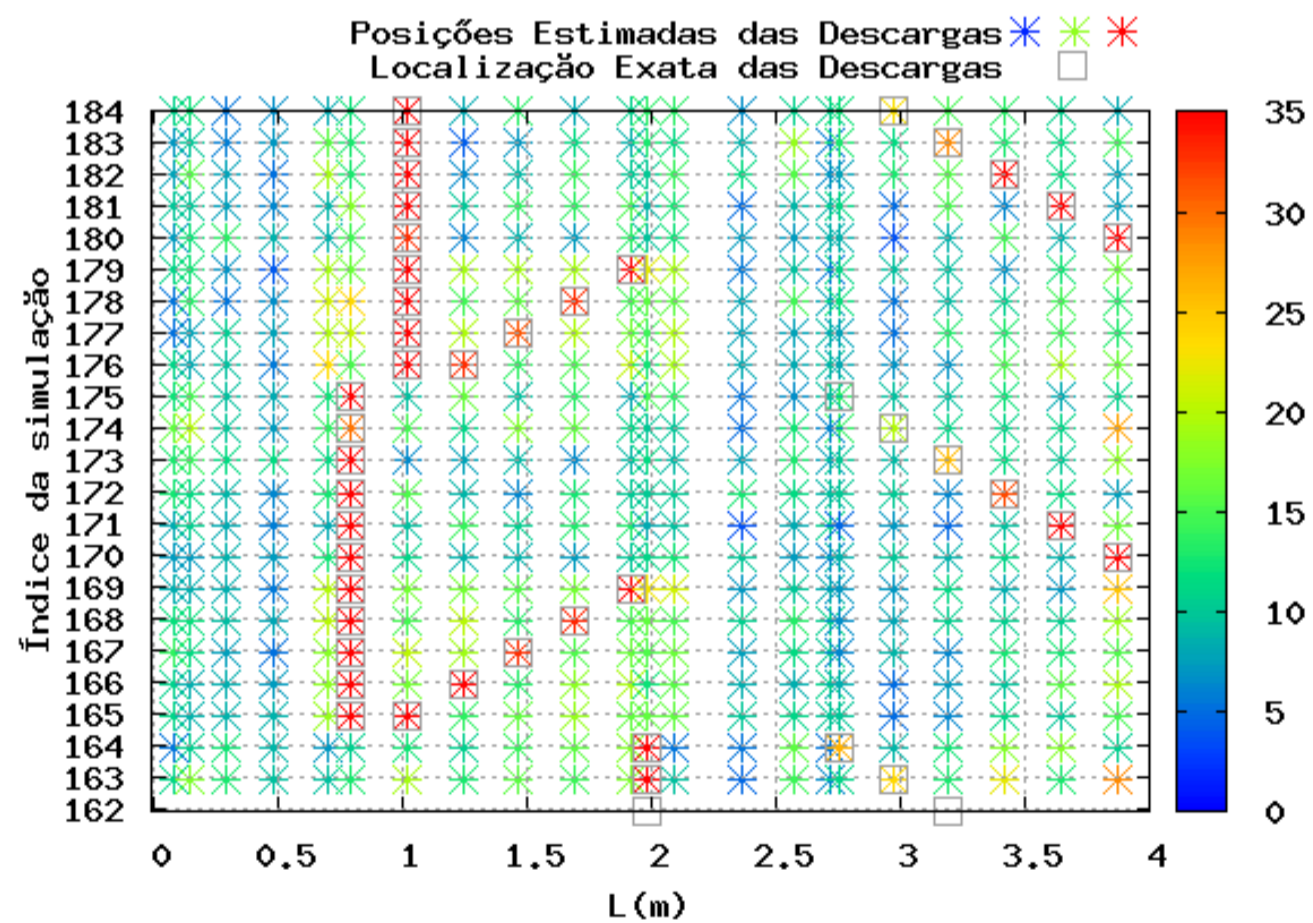


(b)

Figura 4.9: Estatística de localização de descargas para uma única bobina (terceira parte).

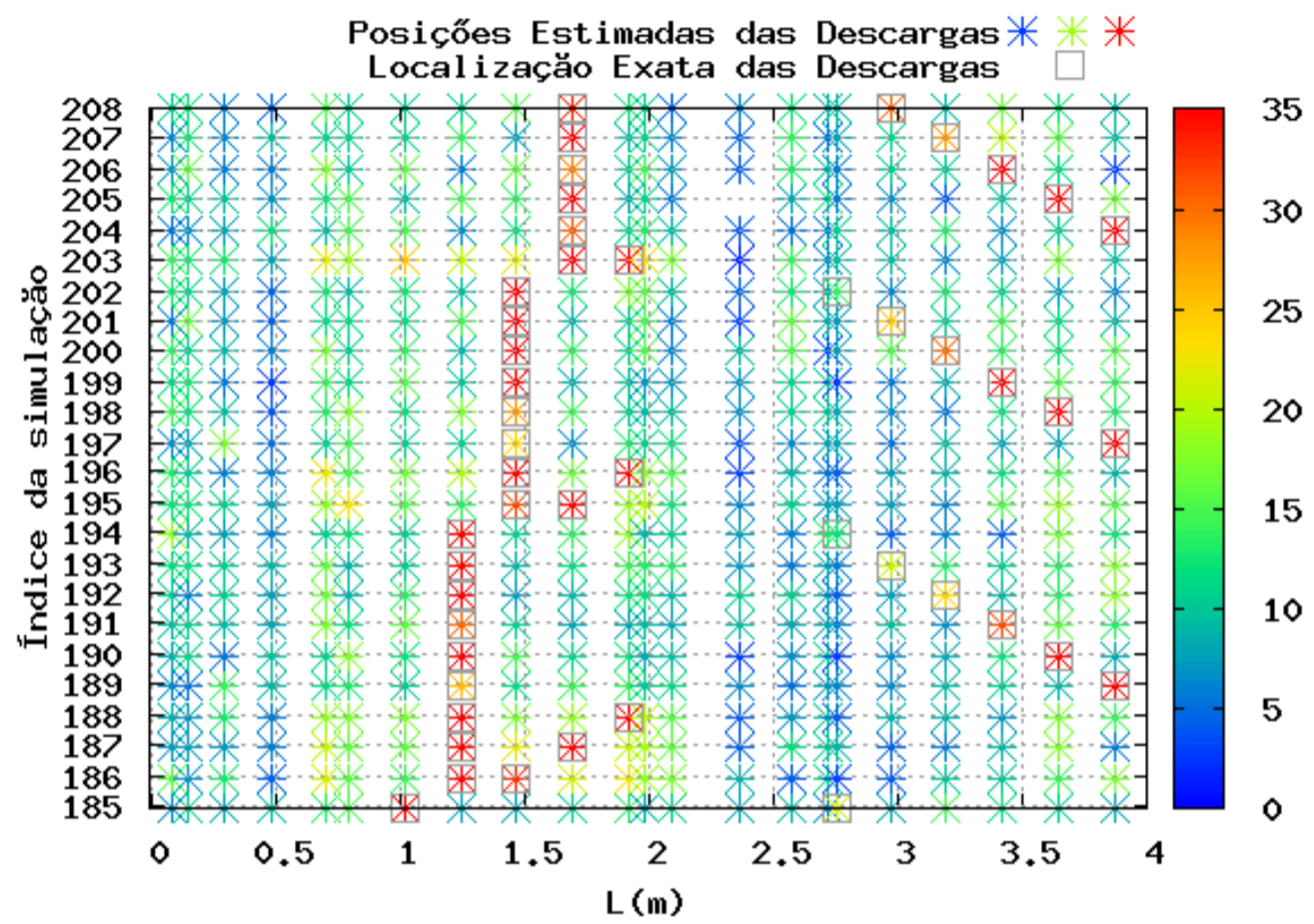


(a)

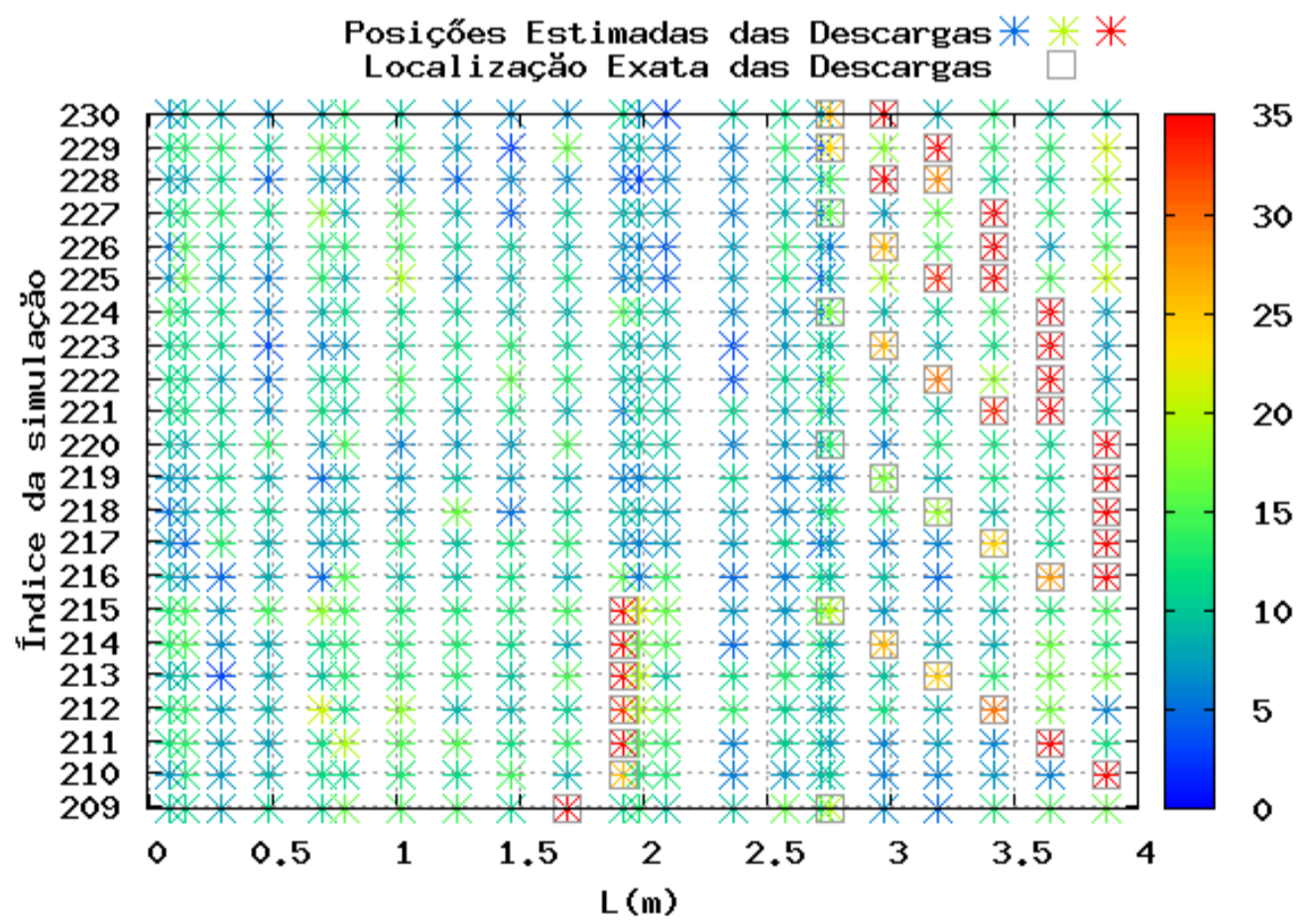


(b)

Figura 4.10: Estatística de localização de descargas para uma única bobina (quarta parte).



(a)



(b)

Figura 4.11: Estatística de localização de descargas para uma única bobina (quinta parte).

4.3 Diagnóstico de múltiplas descargas na isolação de duas bobinas adjacentes e conectadas do hidrogerador.

Para este caso, duas bobinas idênticas a analisada no caso anterior, foram modeladas e interconectadas eletricamente, tal como ilustrado pela Figura 4.12. Para este caso, foi produzido um *grid* computacional de $864 \times 254 \times 210$ células cúbicas de Yee, de aresta $\Delta = 2mm$. A localização do sensor e as demais características das simulações são idênticas ao caso para uma única bobina. Ressalta-se que, tal como na máquina real, as partes internas de cobre das duas barras foram postas em curto. Além disso, as camadas dielétricas de ambas as estruturas foram unidas, assim como as camadas externas de metal, gerando uma estrutura única.

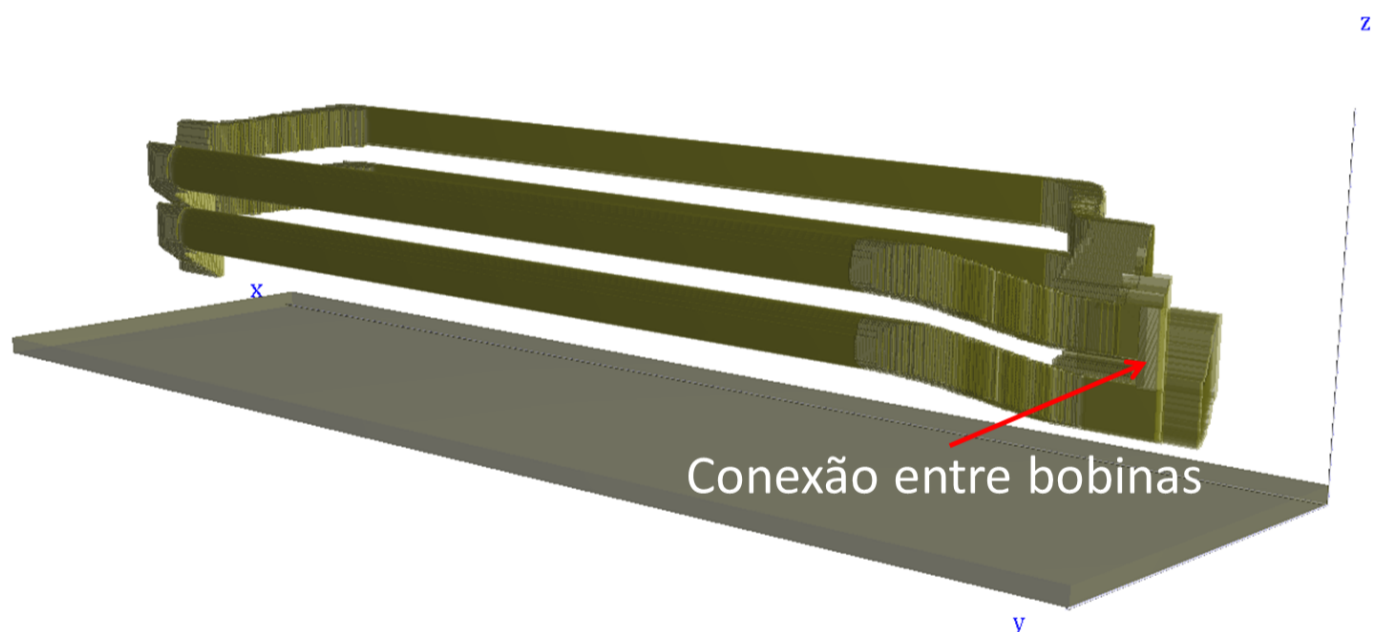
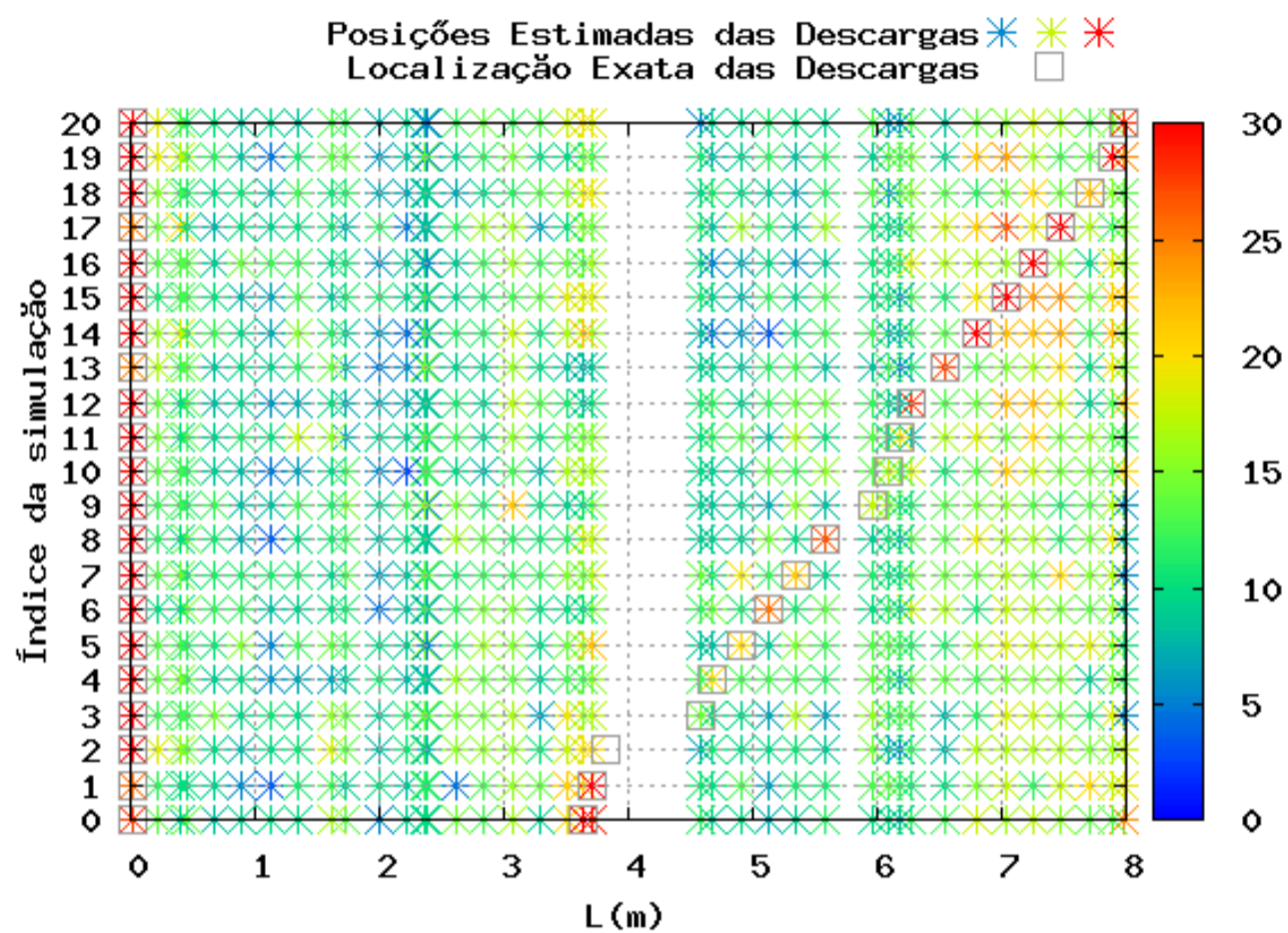


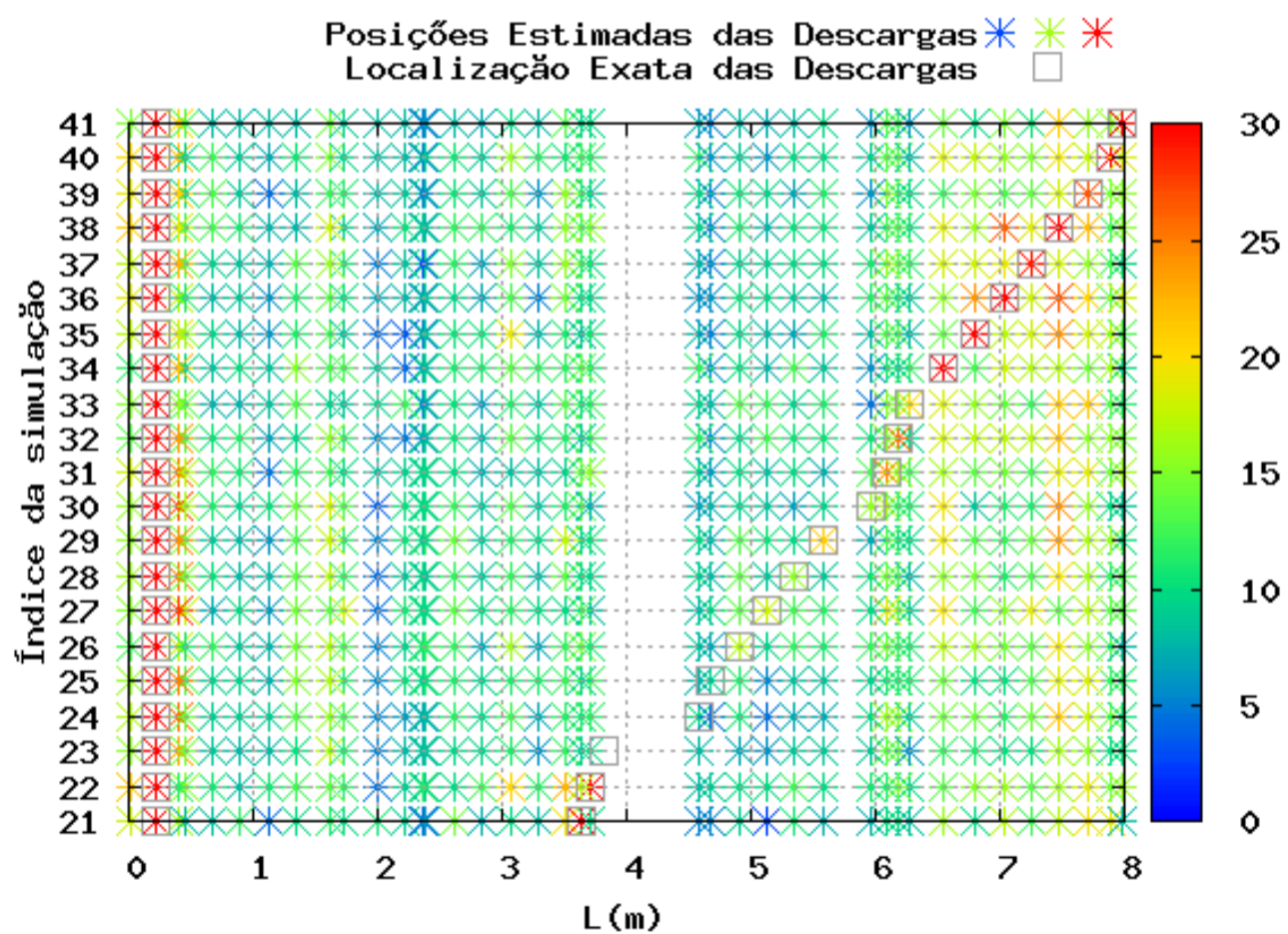
Figura 4.12: Duas bobinas adjacentes conectadas, do hidrogerador.

As Figuras 4.13- 4.22 mostram os resultados obtidos para este caso utilizando o método proposto. Para este caso de duas bobinas adjacentes, em cerca de 81 % das simulações os resultados produzidos (Figuras 4.13- 4.22) possibilitam estimar corretamente as posições das duas descargas, mesmo que elas ocorram em bobinas diferentes. No restante dos casos, aferiu-se corretamente a localização da primeira descarga e estimaram-se locais próximos da posição real da segunda descarga. Em 47,4 % dos casos, obteve-se desvio de estimativa menor ou igual a 0,5 m da posição real da segunda descarga. Em 39,7 % dos testes, estimou-se uma posição com desvio entre 0,5m e 1 m da real posição da segunda descarga. Em 11,5% dos casos, verificam-se

desvios entre 1 m e 1,5 m e, em apenas 1,4% dos casos, a posição foi estimada com imprecisão de 1,5m a 2m.

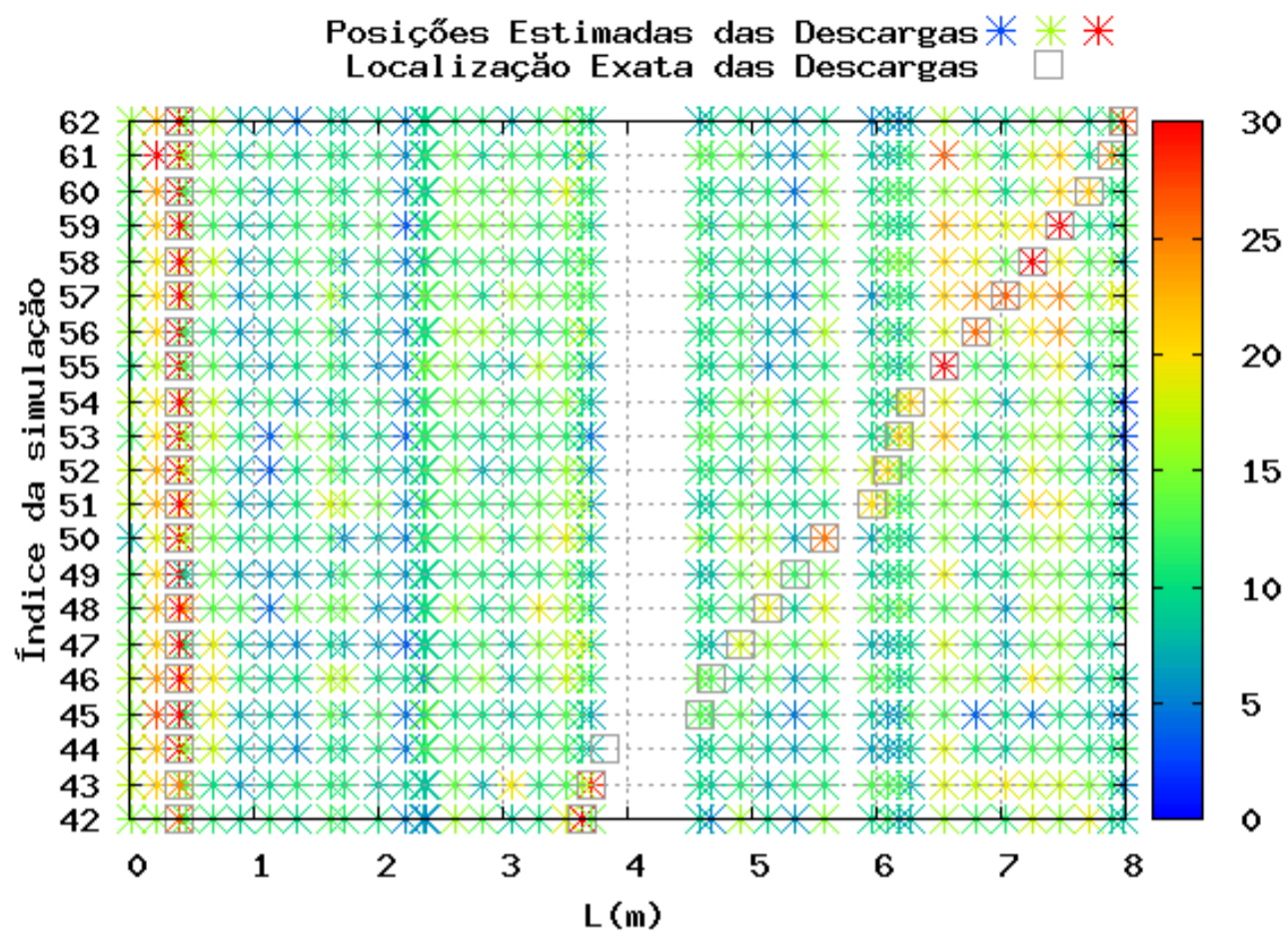


(a)

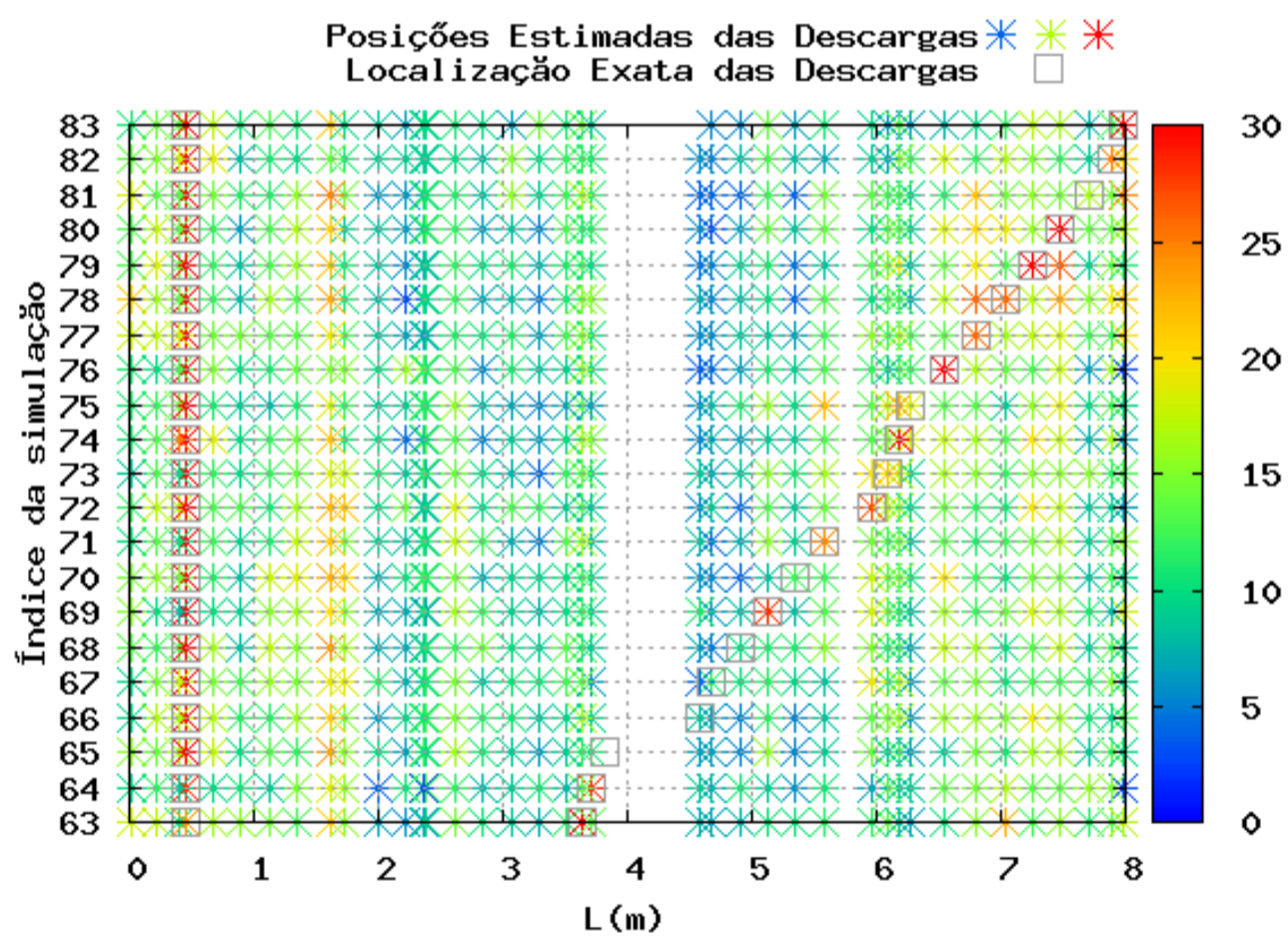


(b)

Figura 4.13: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (primeira parte).

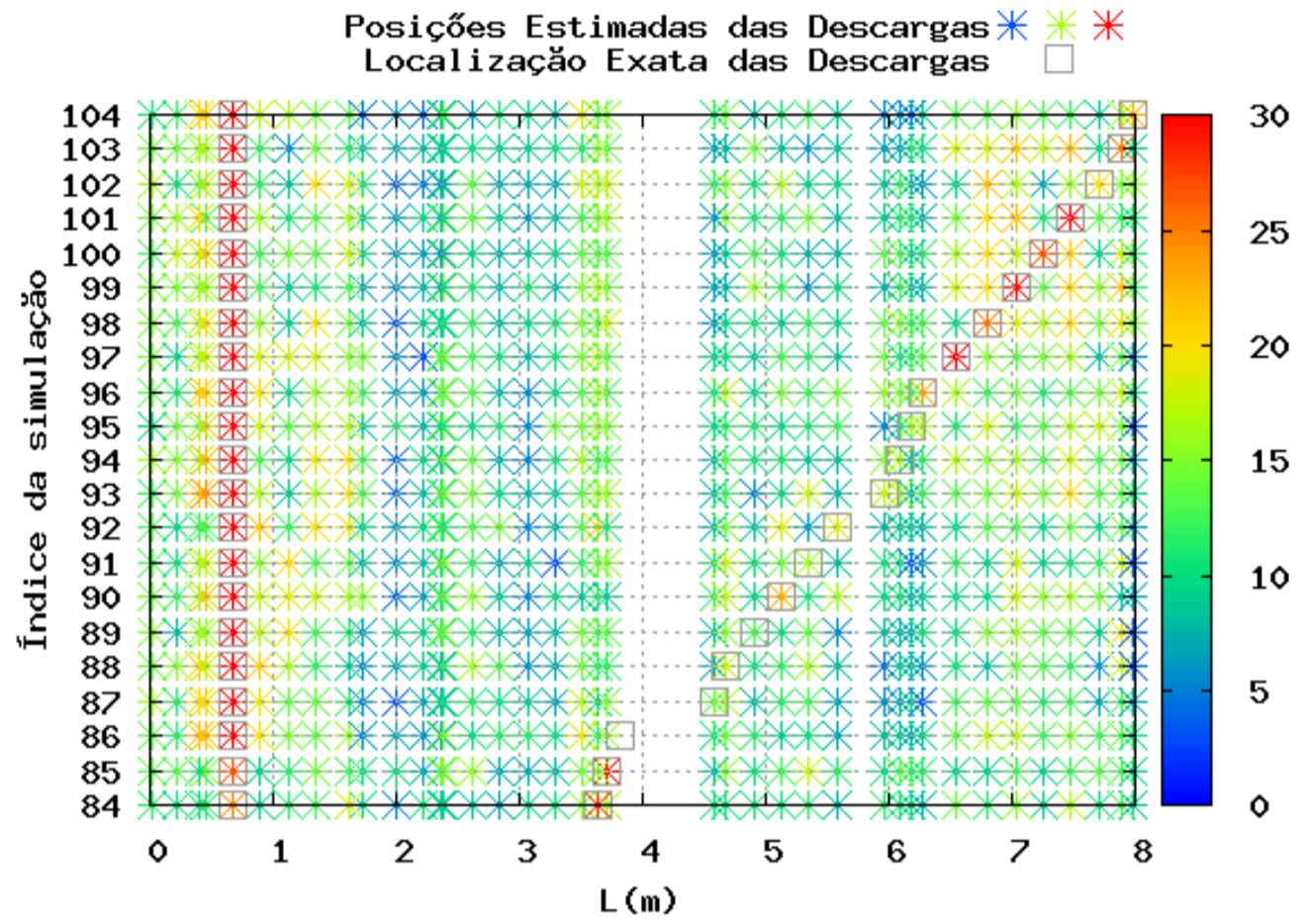


(a)

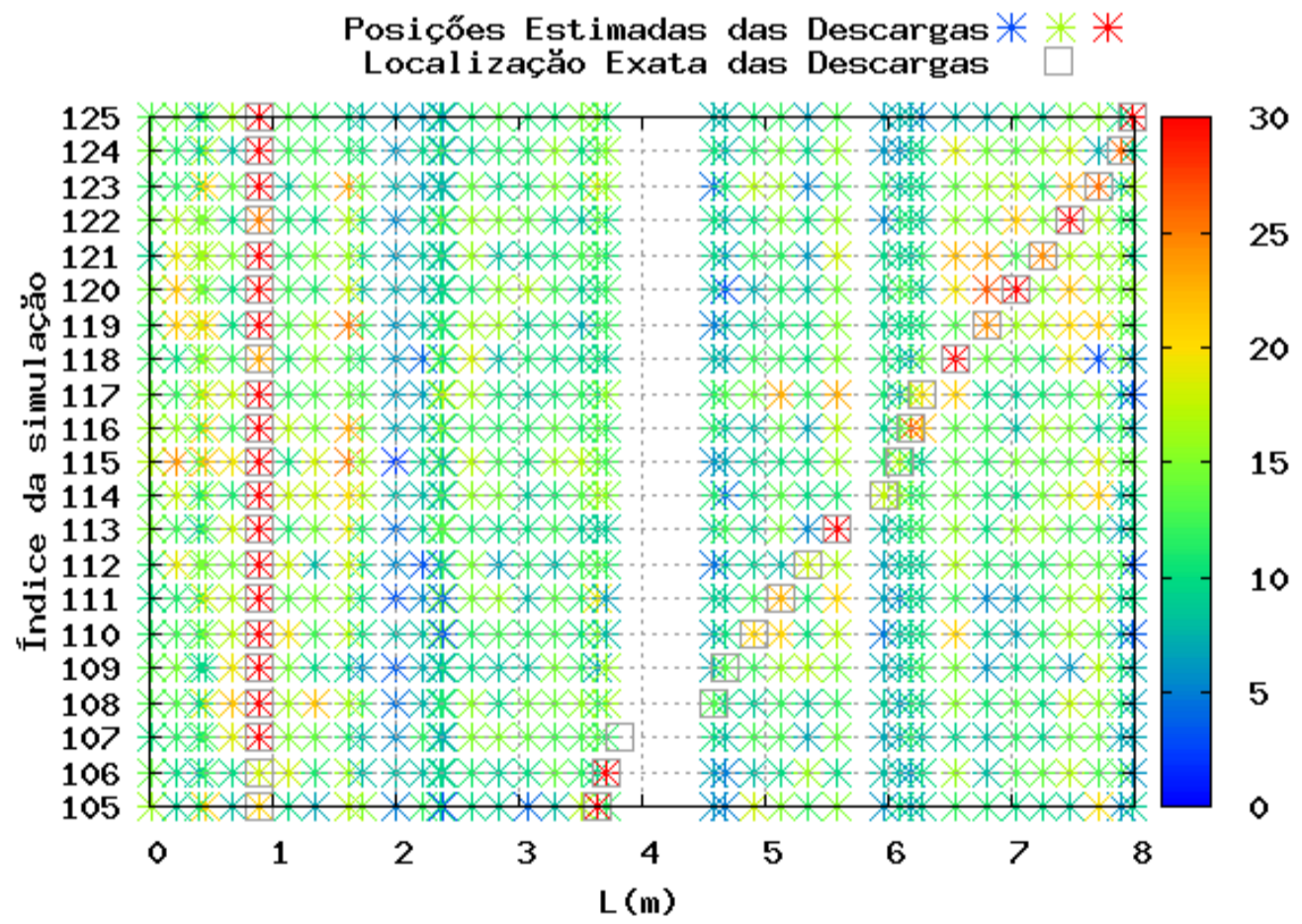


(b)

Figura 4.14: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (segunda parte).

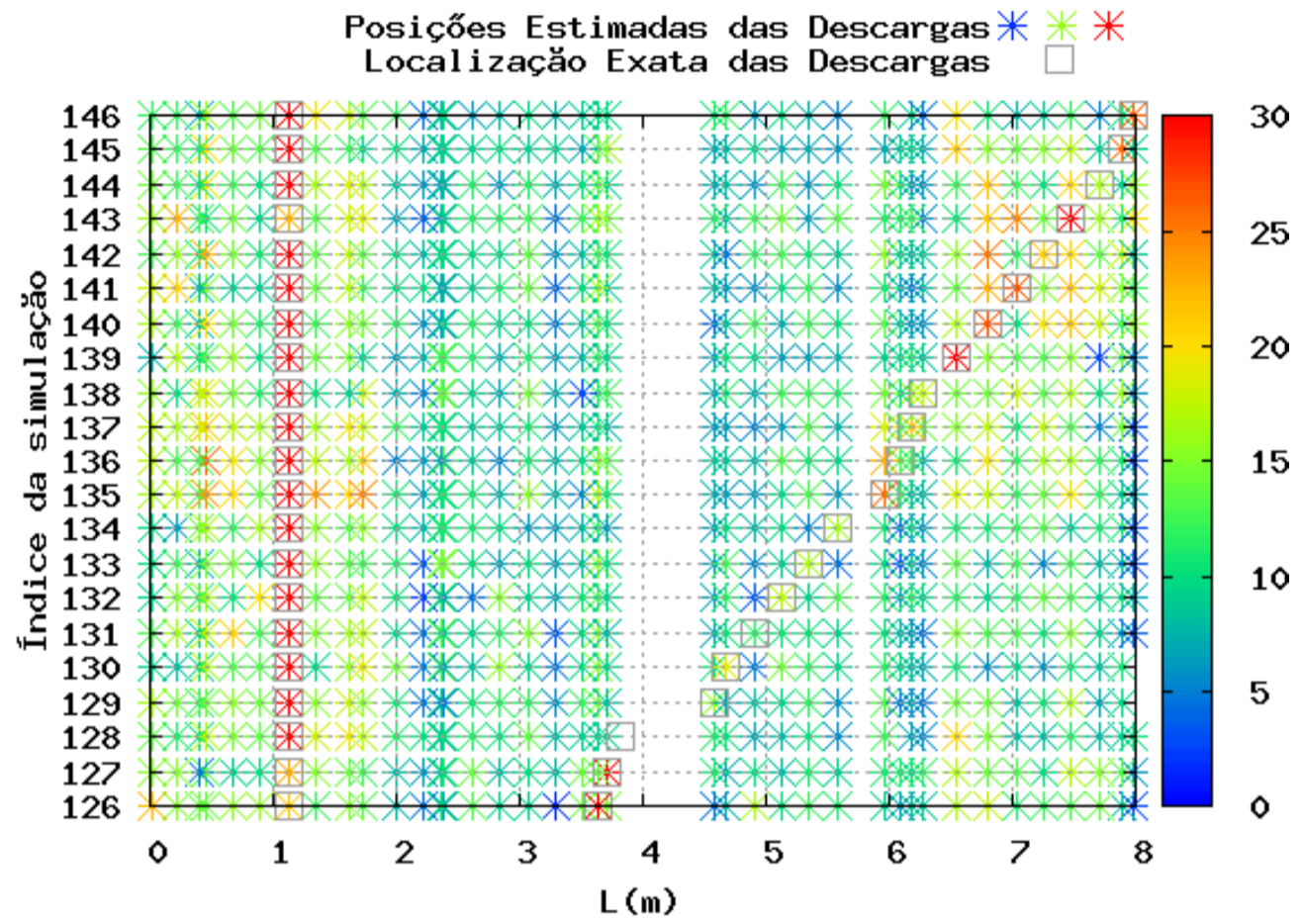


(a)

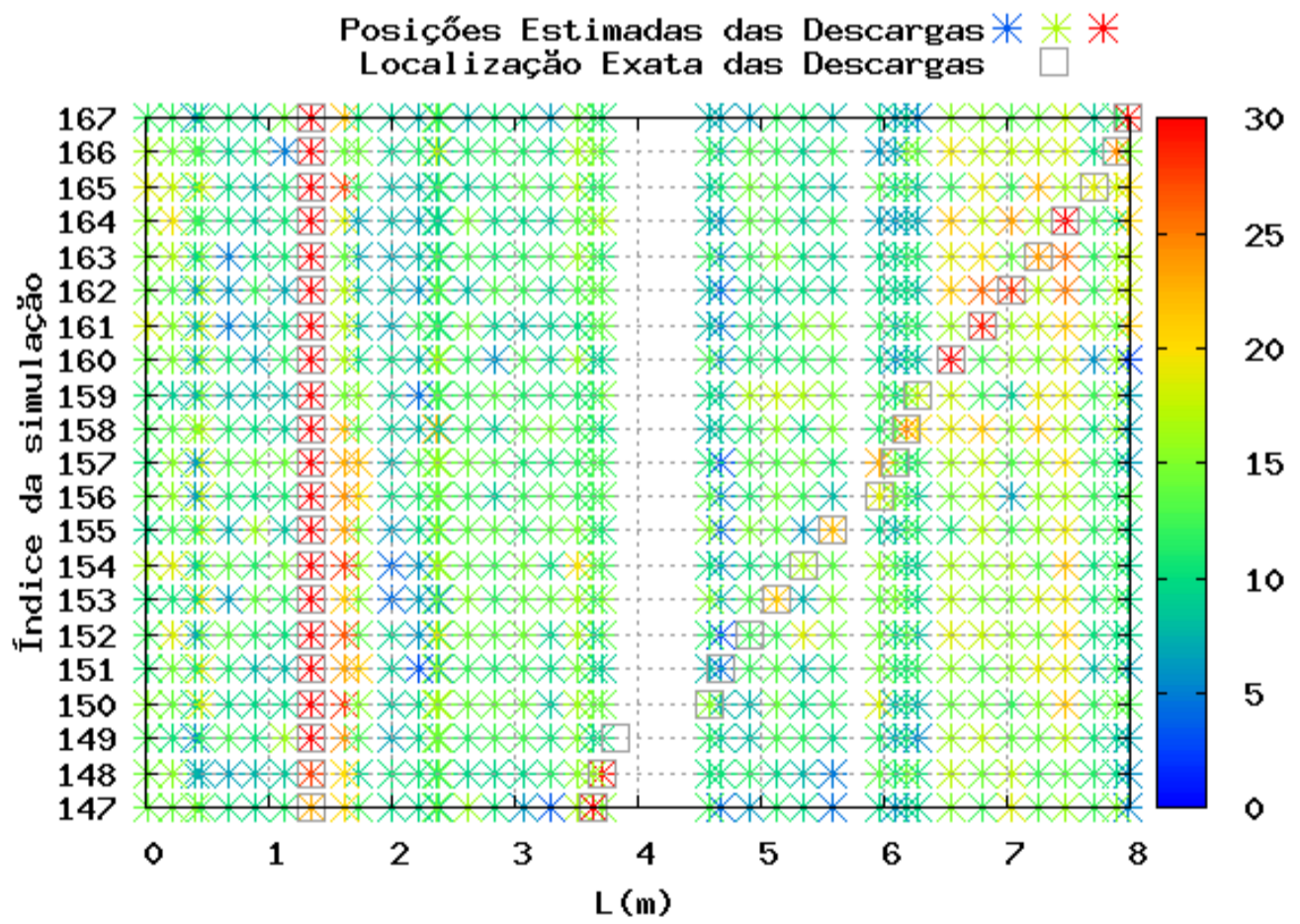


(b)

Figura 4.15: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (terceira parte).

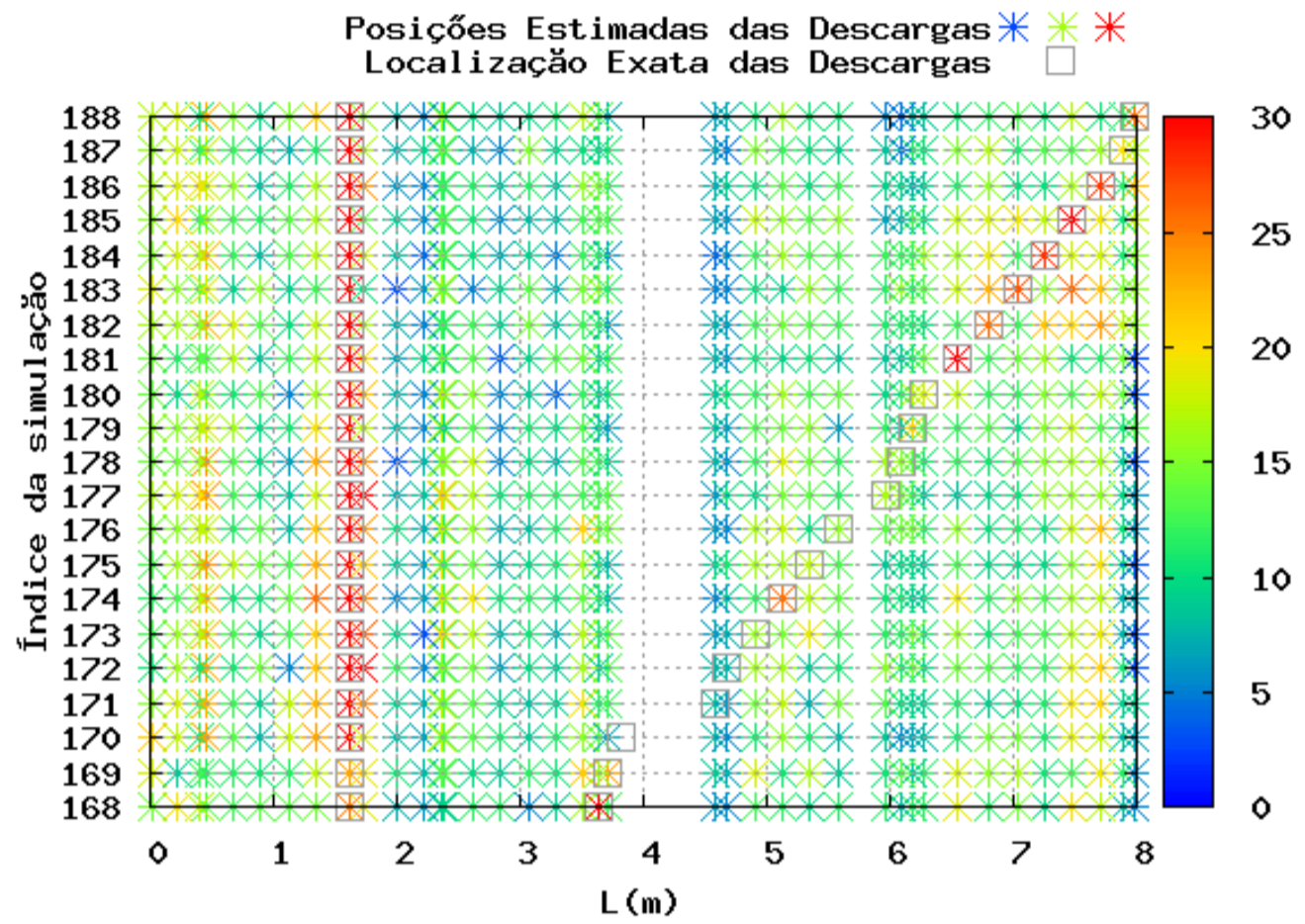


(a)

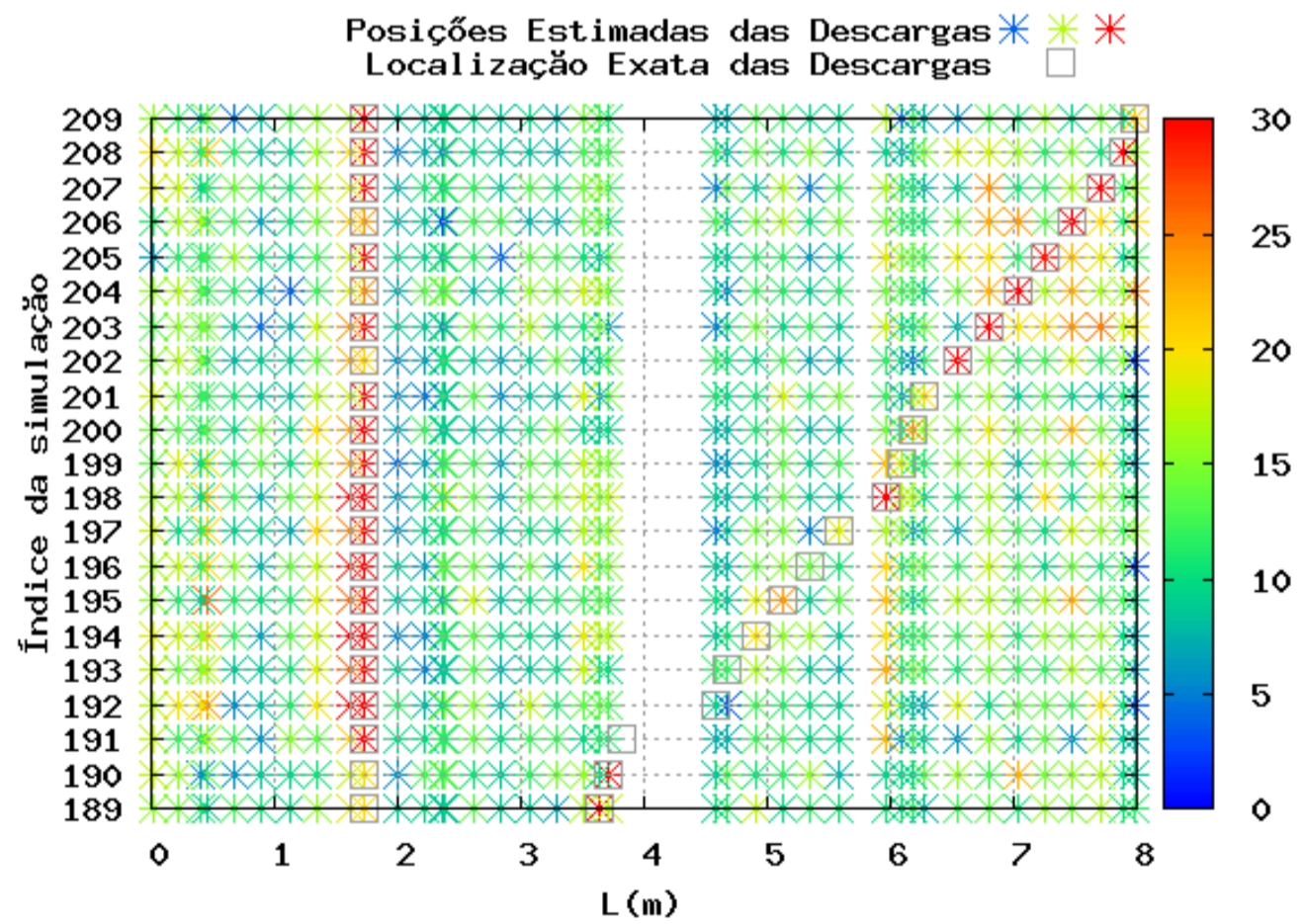


(b)

Figura 4.16: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (quarta parte).

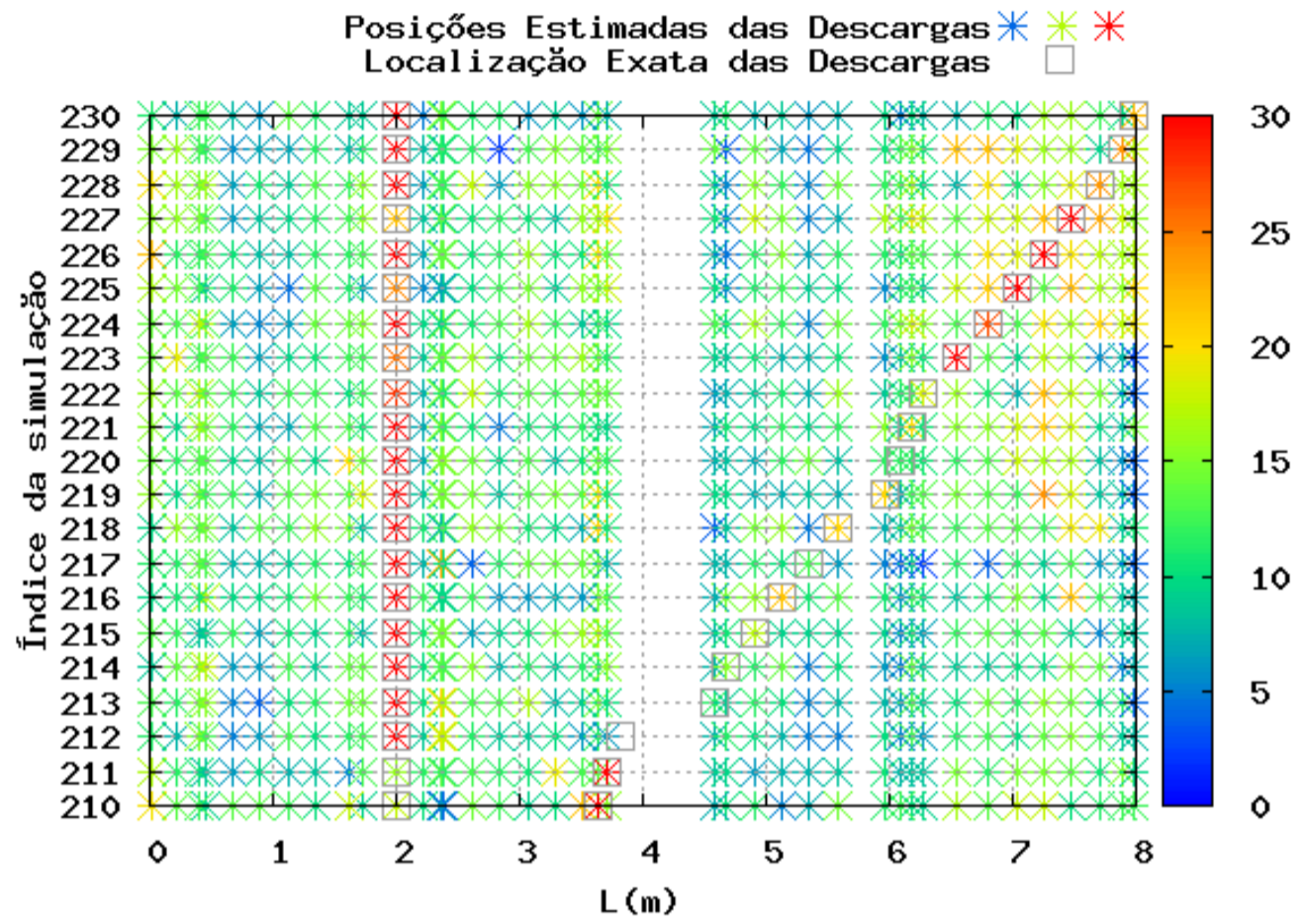


(a)

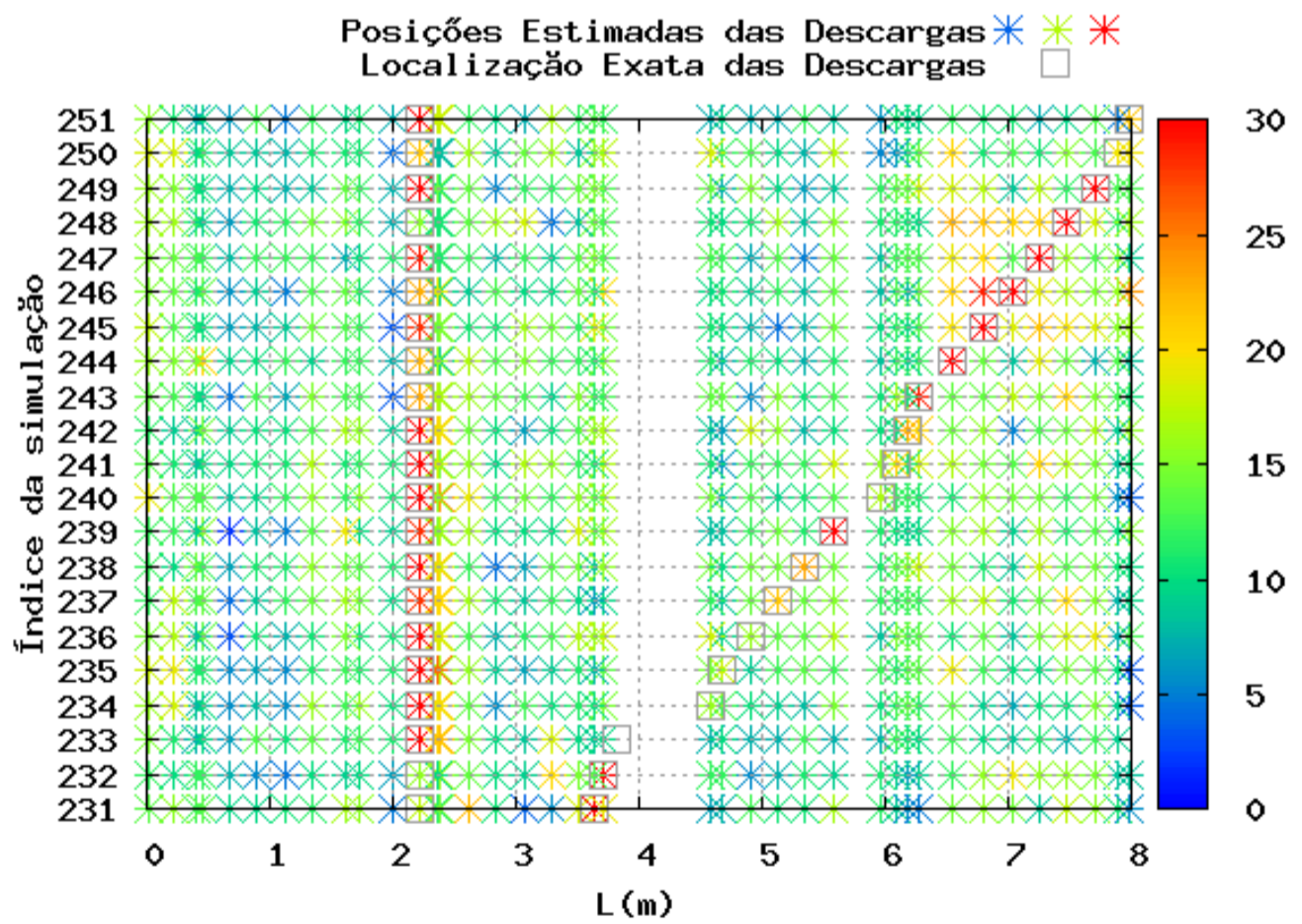


(b)

Figura 4.17: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (quinta parte).

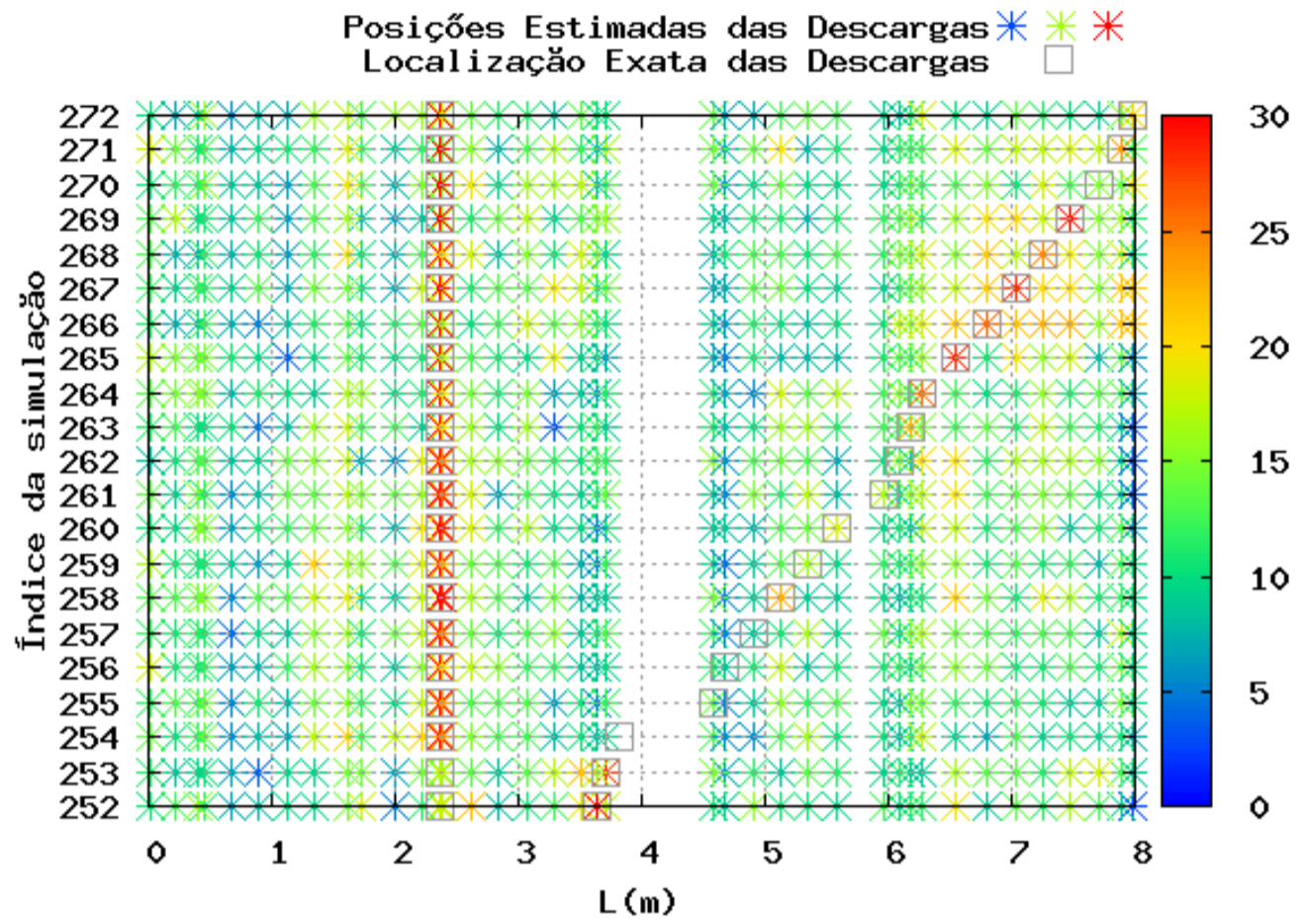


(a)

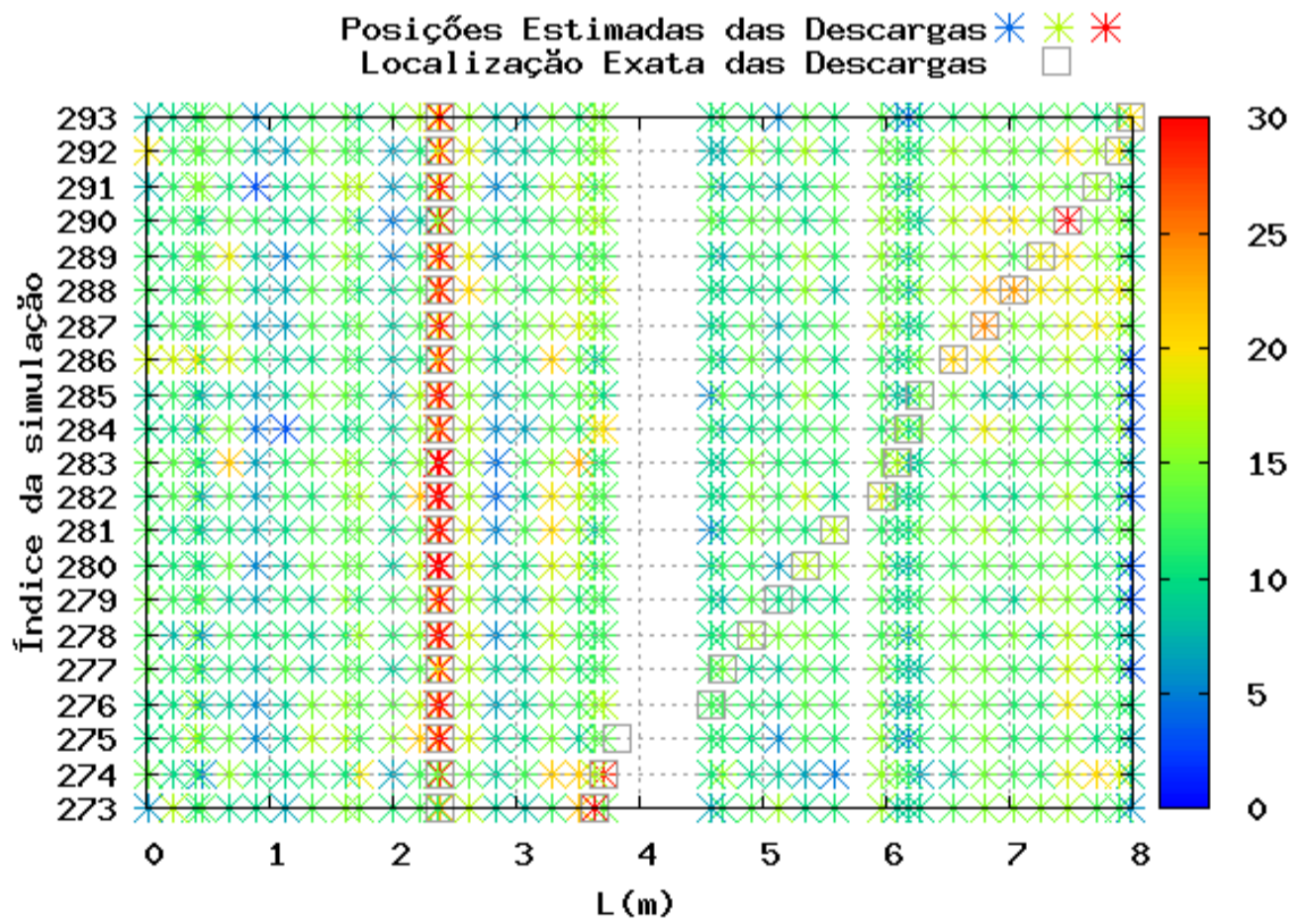


(b)

Figura 4.18: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (sexta parte).

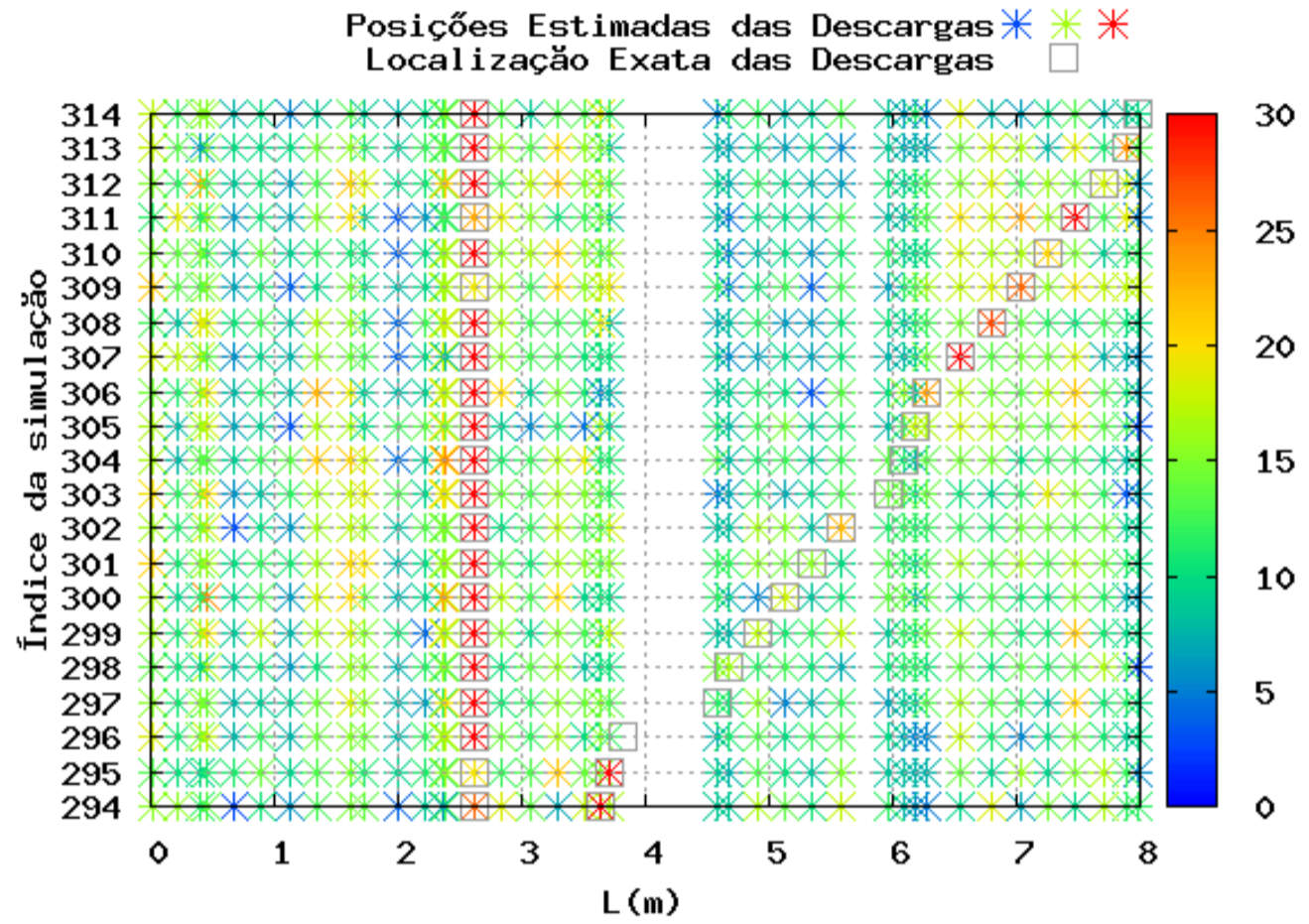


(a)

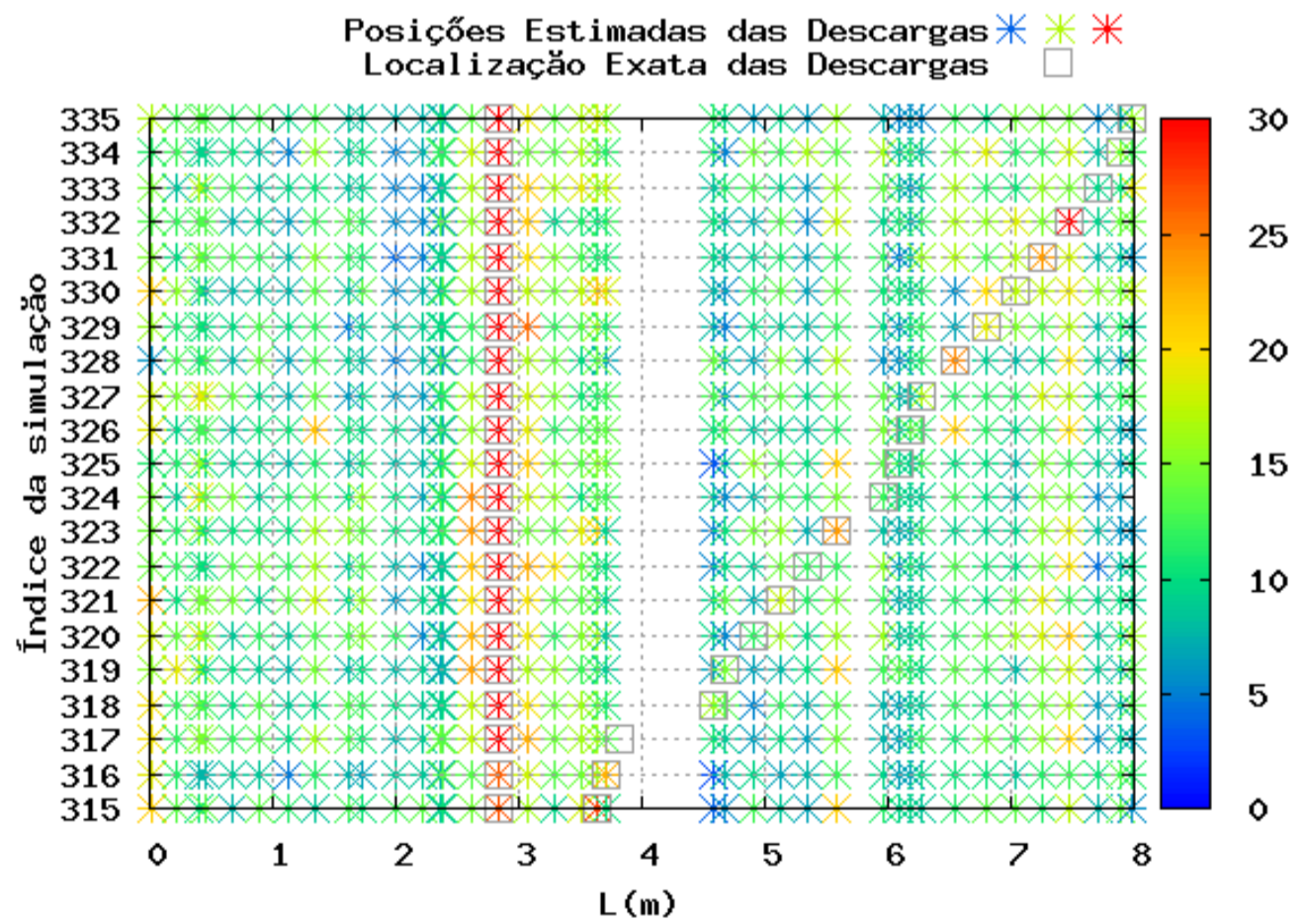


(b)

Figura 4.19: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (sétima parte).

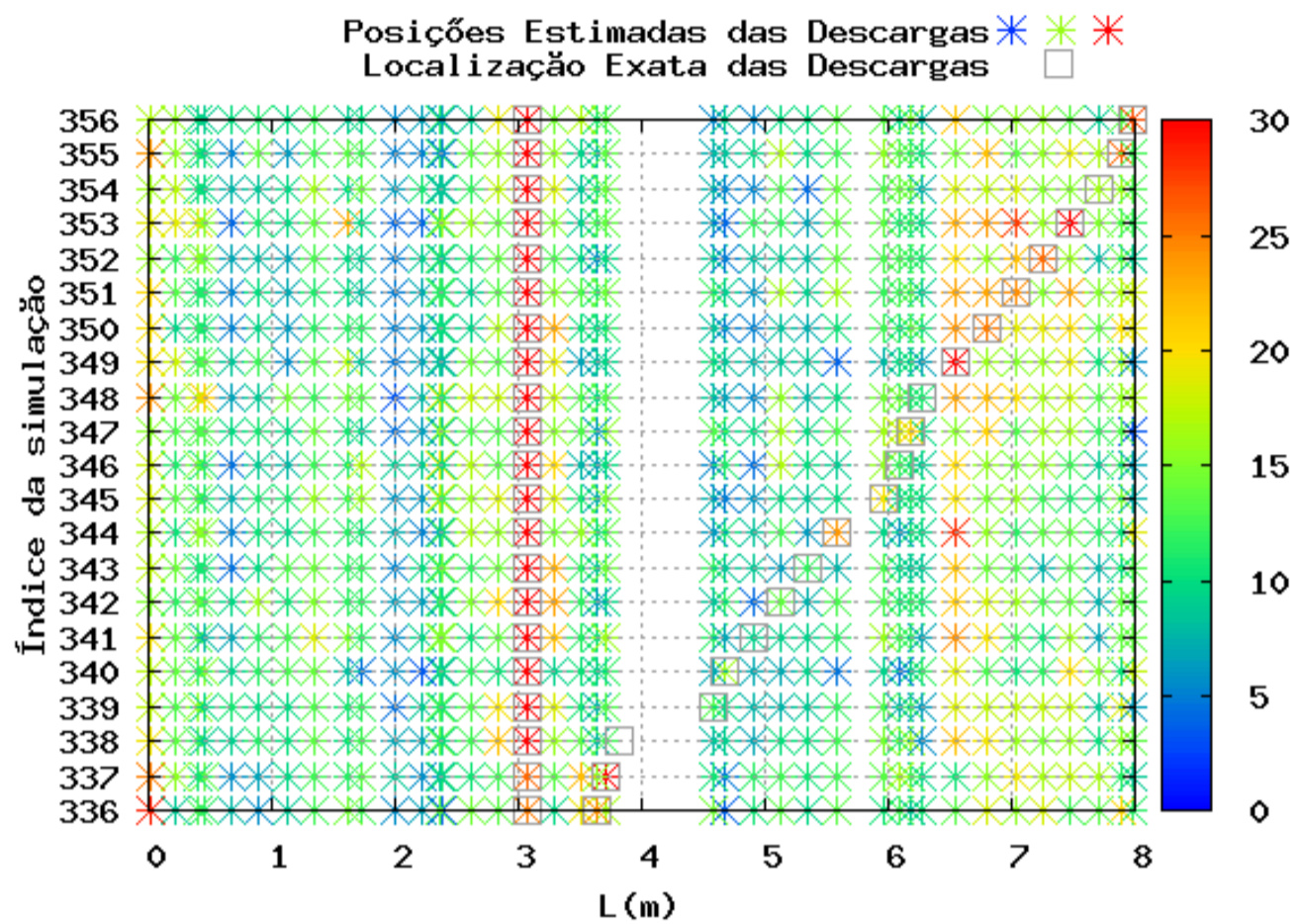


(a)

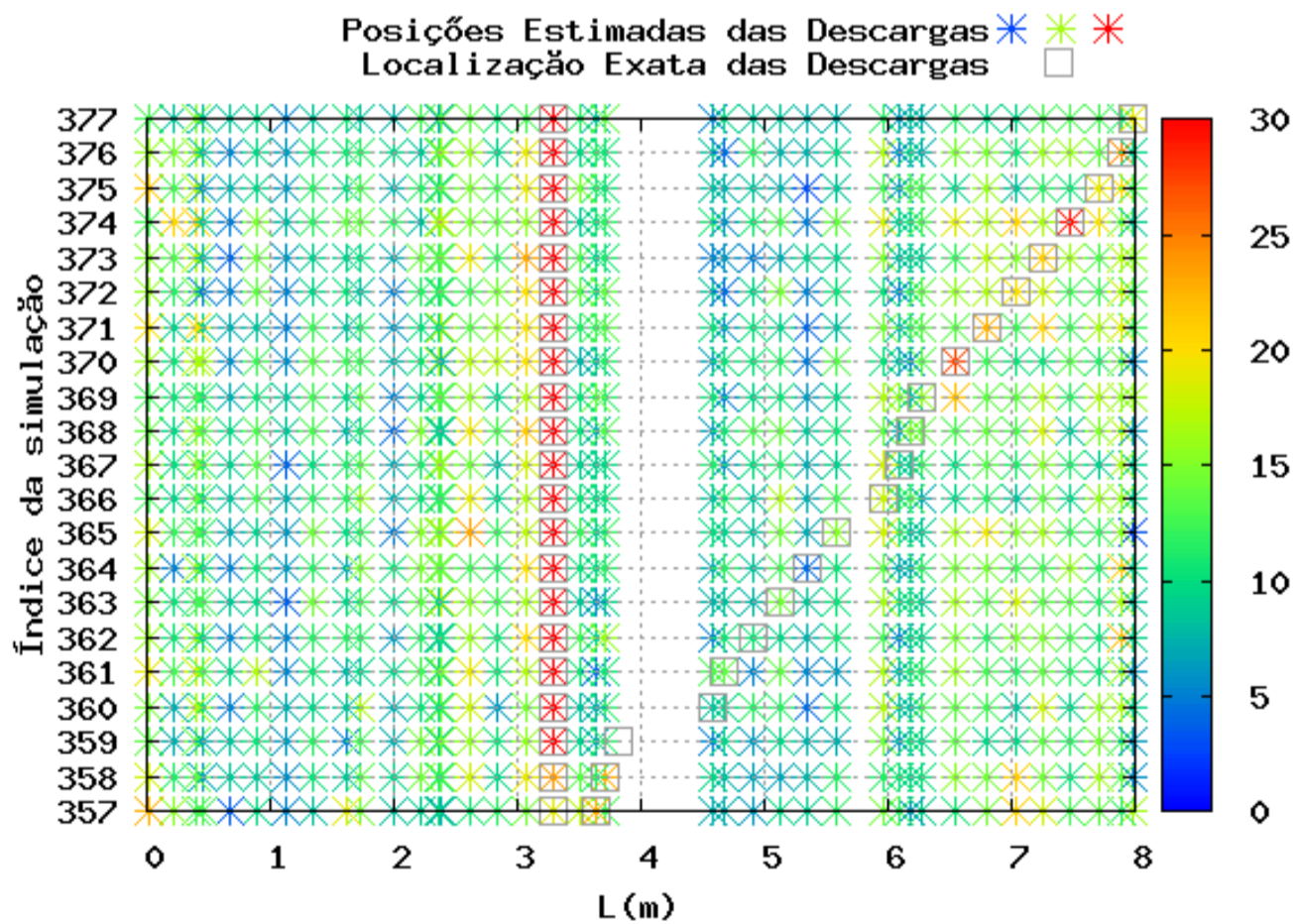


(b)

Figura 4.20: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (oitava parte).



(a)



(b)

Figura 4.21: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (nona parte).

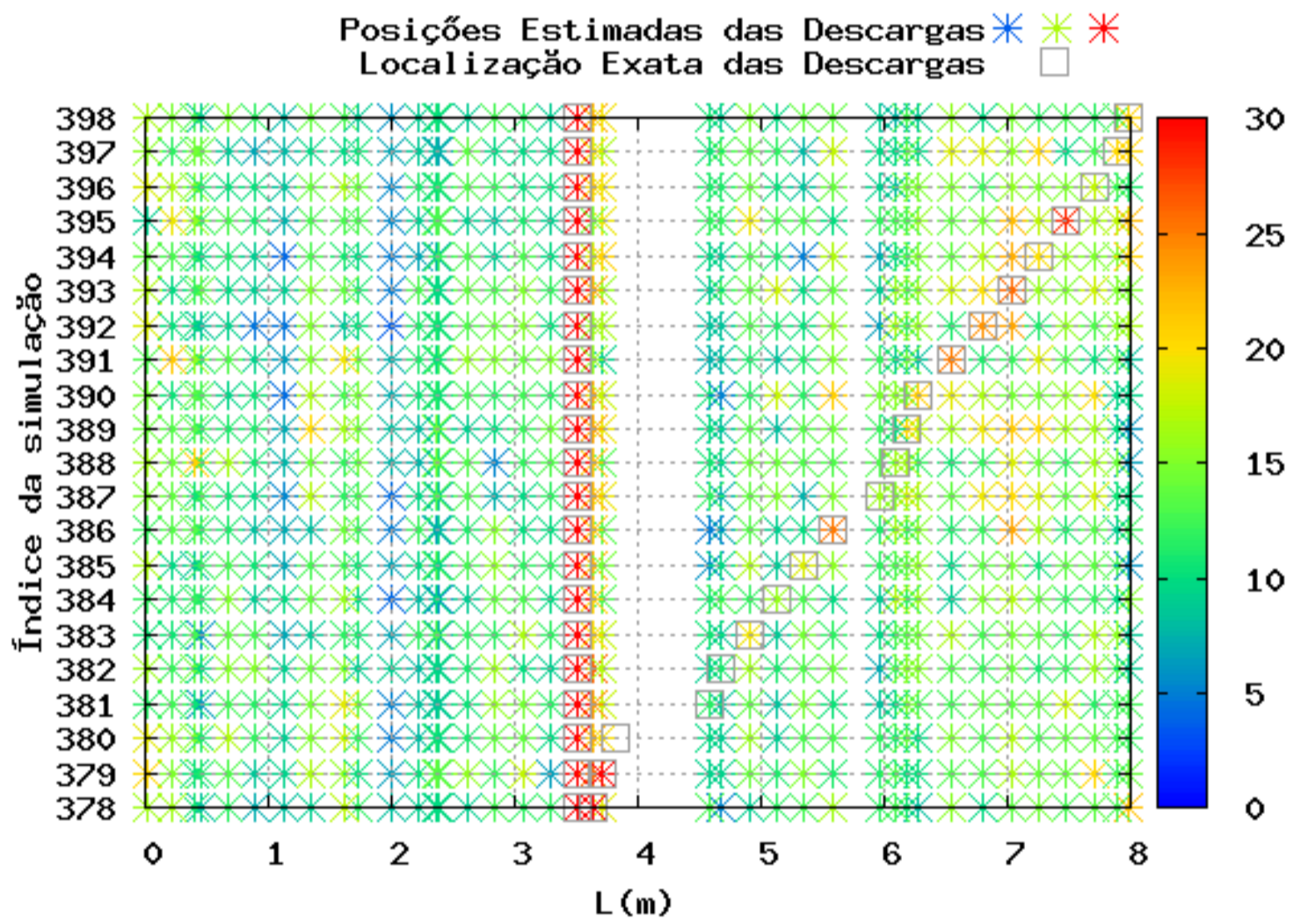


Figura 4.22: Diagnóstico estatístico para duas bobinas adjacentes (última parte).

Capítulo 5

Resultados Experimentais

5.1 Experimentos realizados na Eletronorte

Foi realizado um experimento prático na Eletronorte - Miramar, com o intuito de validar experimentalmente o *Software* SAGS [44], adaptado para modelarem-se descargas parciais. Neste experimento foi utilizada uma barra da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. A barra possui as seguintes dimensões (aproximadamente): $2,92\text{ m} \times 18\text{ mm} \times 64,3\text{ mm}$. Essa barra é composta por três partes: o condutor interno de cobre, a região dielétrica (mica) e uma tinta semicondutiva externa. A Figura 5.1 mostra o setup utilizado para a realização do experimento. As barras de aço acopladas à barra simulam a ranhura da máquina.

Os equipamentos utilizados para a realização do experimento foram:

- Uma parte de uma bobina estatórica (barra),
- 2 (duas) barras de aço para caracterizar da ranhura,
- Cabos coaxiais,
- Um osciloscópio Tektronix DPO 3034 com taxa de amostragem de $2,5\text{GS/s}$,
- Um gerador de pulso (calibrador) CAL 542, da Omicron,

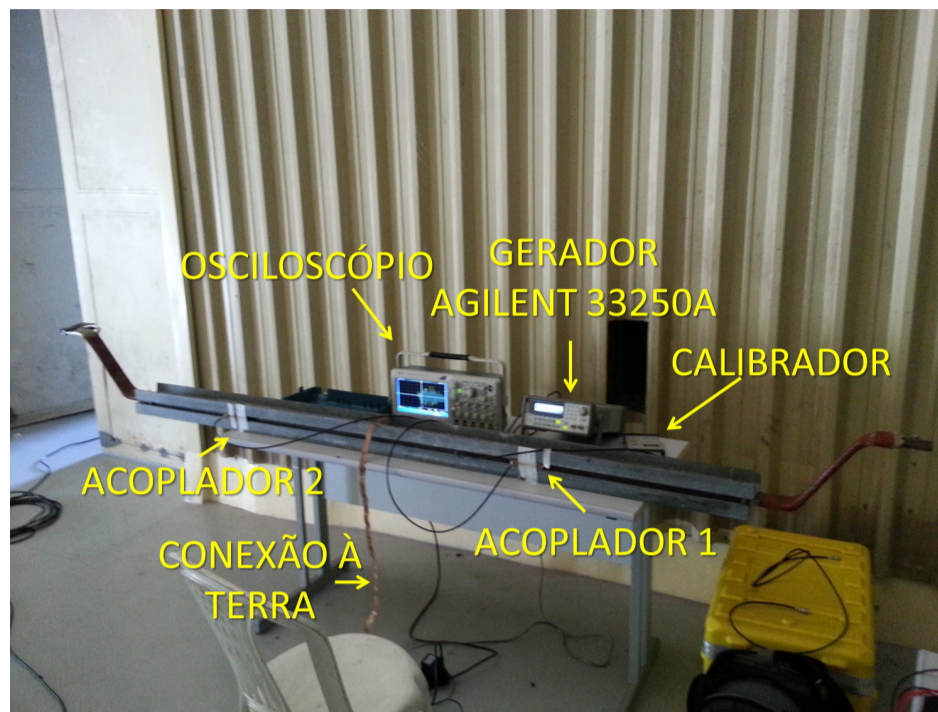


Figura 5.1: Setup Experimental utilizado para as medições

- Um gerador de funções Agilent 33250A,
- 2 (dois) acopladores direcionais,
- 1 (uma) mini furadeira Smart AD-19F.

As Figuras 5.2.(a) - 5.2.(d) ilustram os equipamentos utilizados na realização do experimento.

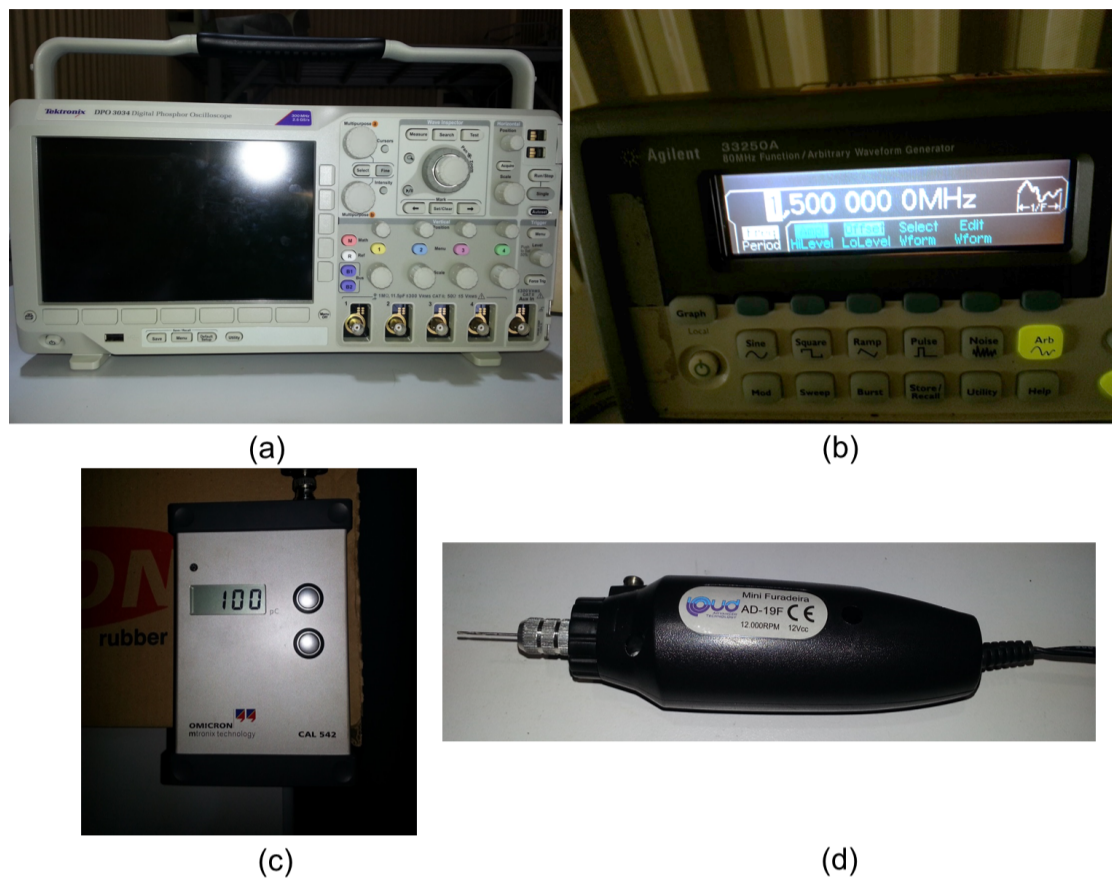


Figura 5.2: (a) Osciloscópio, (b) gerador de funções Agilent 33250A, (c) Calibrador CAL 542 da Omicron, (d) mini furadeira Smart AD-19F.

Utilizando a mini furadeira, foram efetuados 6(seis) pares de furos(P1 a P6) na barra, pelos quais foram injetados os sinais de descarga parcial. Um dos furos do par chega até o condutor interno da barra, o outro furo fica 2 mm distante do condutor interno. A Figura 5.3 indica onde estão localizados os furos na barra.

A injeção dos sinais de descarga foi feita da seguinte forma: adaptou-se um cabo coaxial para realizar a injeção. O condutor central do cabo coaxial foi colocado no furo mais profundo do par e encosta no condutor interno da barra, o plano de terra do cabo coaxial foi colocado no outro furo. O objetivo de utilizar essa forma de injeção dos sinais é tentar simular experimentalmente a ocorrência de descargas na região dielétrica (mica) da barra. A Figura 5.4 mostra como foi feita a injeção dos sinais.

Foram utilizados dois geradores de pulsos para realizar o experimento. O gerador de funções Agilent 33250A (Figura 5.2.(b)) e o CAL 542 da Omicron (Figura 5.2.(c)). Utilizou-se a função de inserir um sinal arbitrário do gerador da Agilent para programar um sinal que se assemelha ao pulso de descarga parcial. O outro gerador (CAL 542 da Omicron) já é um

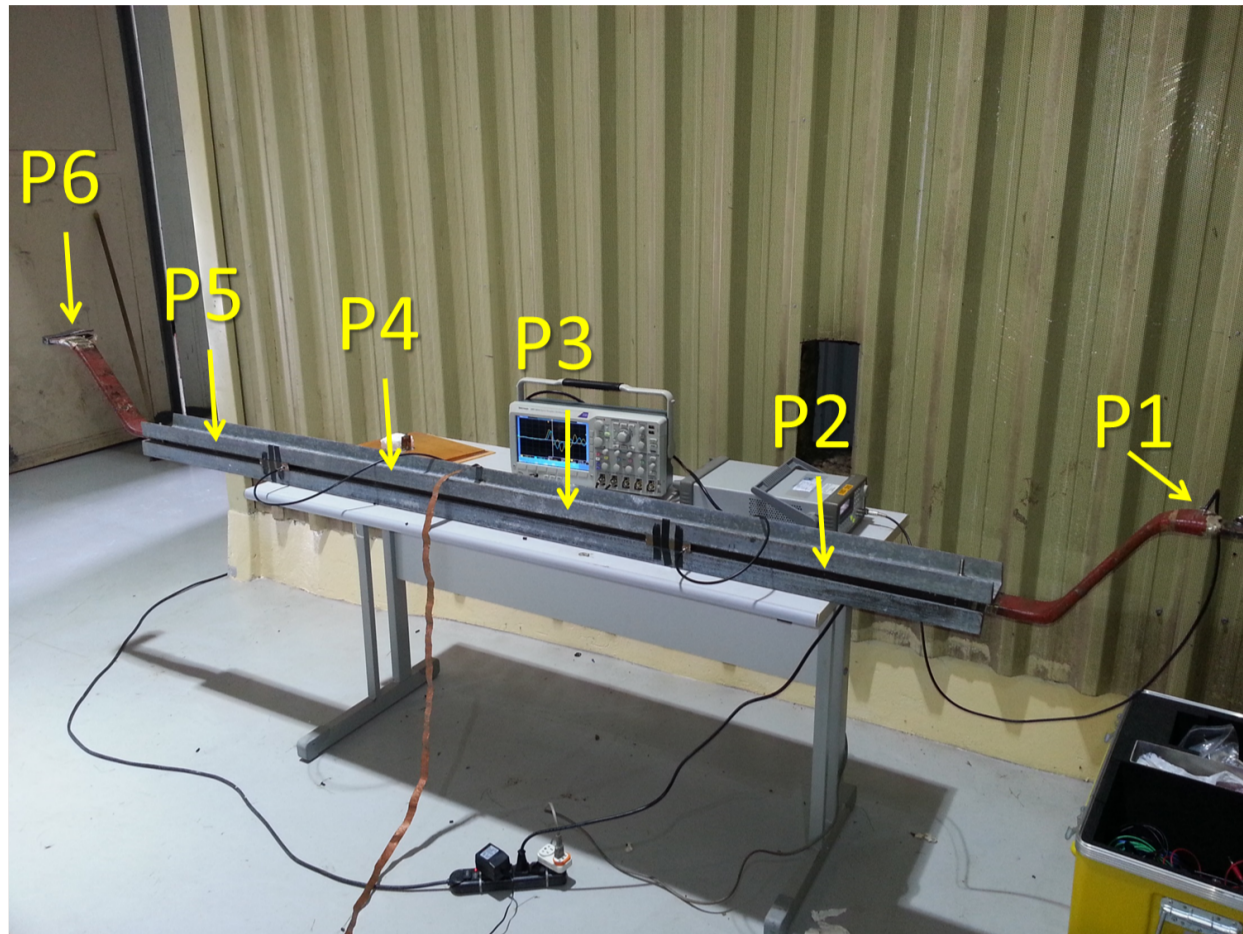


Figura 5.3: Localização dos pontos de injeção de sinais na barra.

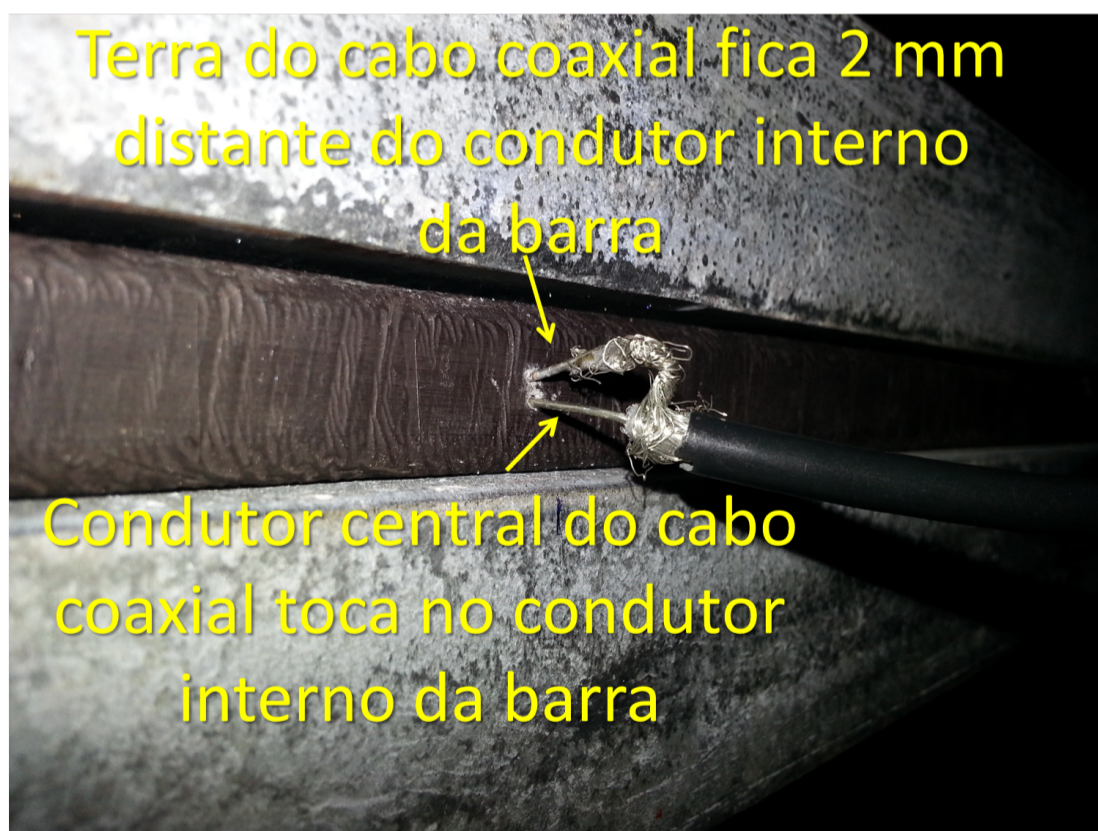


Figura 5.4: Injeção dos sinais na barra.

gerador de pulso de descarga parcial. A forma de onda, no domínio do tempo, e o espectro dos sinais gerados pelo gerador da Agilent e pelo gerador da Omicron são mostrados nas Figuras 5.5 e 5.6, respectivamente. Vale ressaltar que os sinais gerados por ambos os geradores foram medidos utilizando o Osciloscópio.

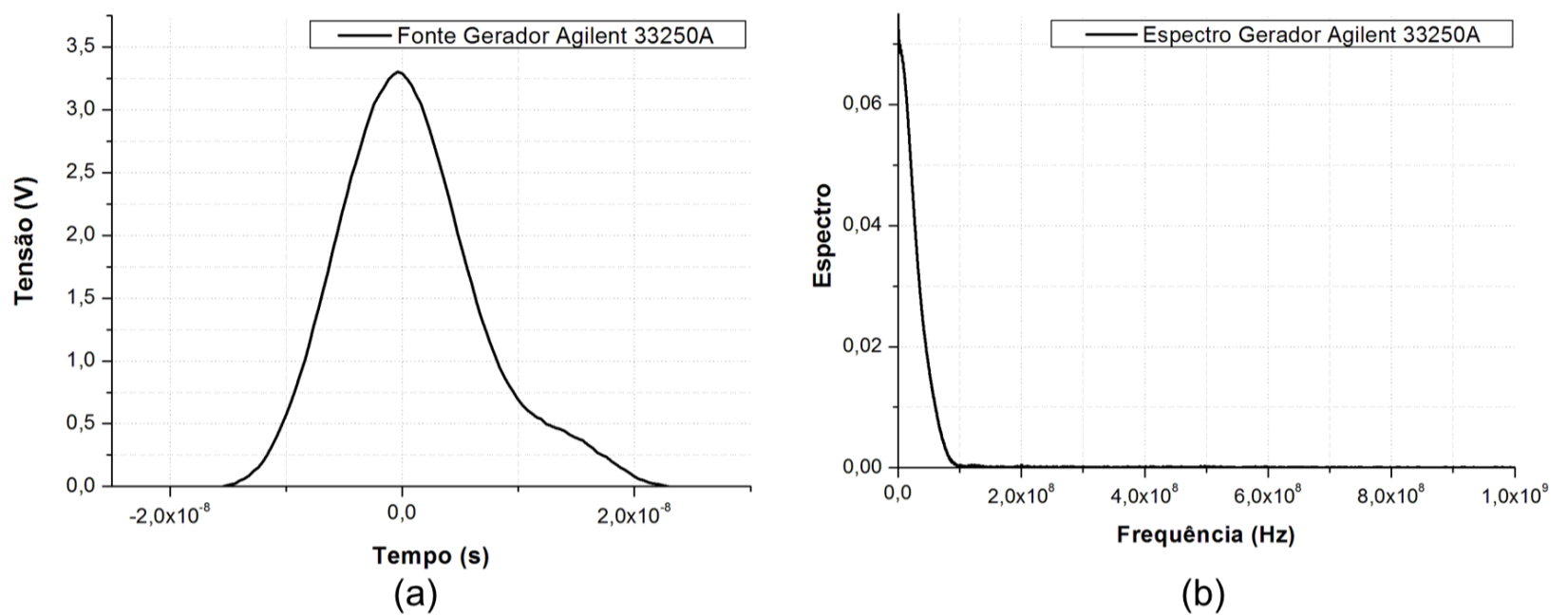


Figura 5.5: (a) Pulso gerado pelo gerador Agilent 33250A, (b) Espectro do pulso gerado pelo gerador Agilent 33250A.

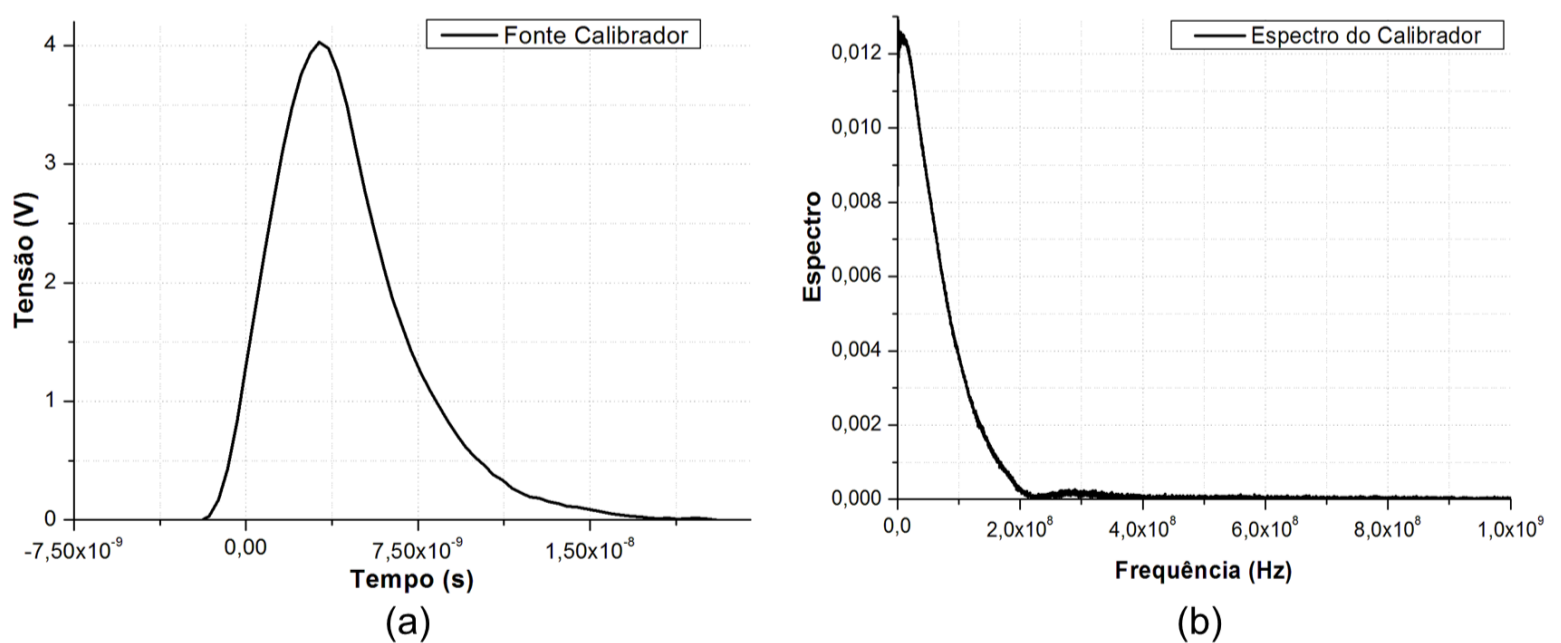


Figura 5.6: (a) Pulso gerado pelo calibrador CAL 542, (b) Espectro do pulso gerado pelo calibrador CAL 542.

Dois acopladores direcionais idênticos (acoplador 1 e acoplador 2) foram afixados na barra para captar os sinais de descargas parciais. Estes acopladores possuem 10 cm de comprimento,

2 cm de largura e 1,5 mm de espessura. A fita dos acopladores possui 9 cm de comprimento e 3,5 mm de largura. Este acoplador possui um conector SMA para ser realizada a conexão com o osciloscópio e uma resistência de 47Ω entre a fita e o plano de terra, para reduzir reflexões. A Figura 5.1 mostra a localização onde os acopladores foram afixados e a Figura 5.7 mostra os detalhes do acoplador.

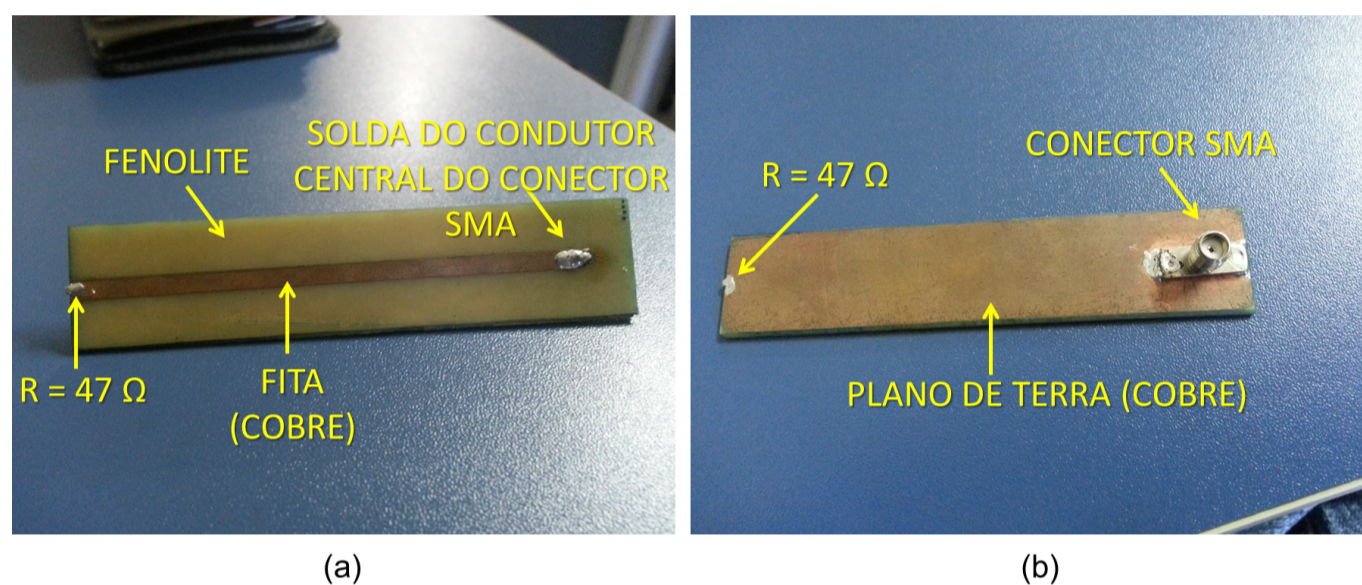


Figura 5.7: Acoplador utilizado para registrar sinais relativos a descargas parciais na bobina: (a) vista frontal (fita), (b) vista traseira (plano de terra).

Primeiramente, injetou-se o sinal proveniente do gerador da Agilent no par de furos P1. A Figura 5.8 mostra o detalhe da injeção do sinal de descargas parciais no par de furos P1. O sinal foi registrado pelos acopladores 1 e 2. A forma dos sinais registrados pelos acopladores, bem como os seus espectros são mostrados na Figura 5.9. Ressalta-se que o osciloscópio foi configurado para gravar a média de 512 amostras do sinal registrado pelos acopladores, para todos os casos apresentados neste capítulo.

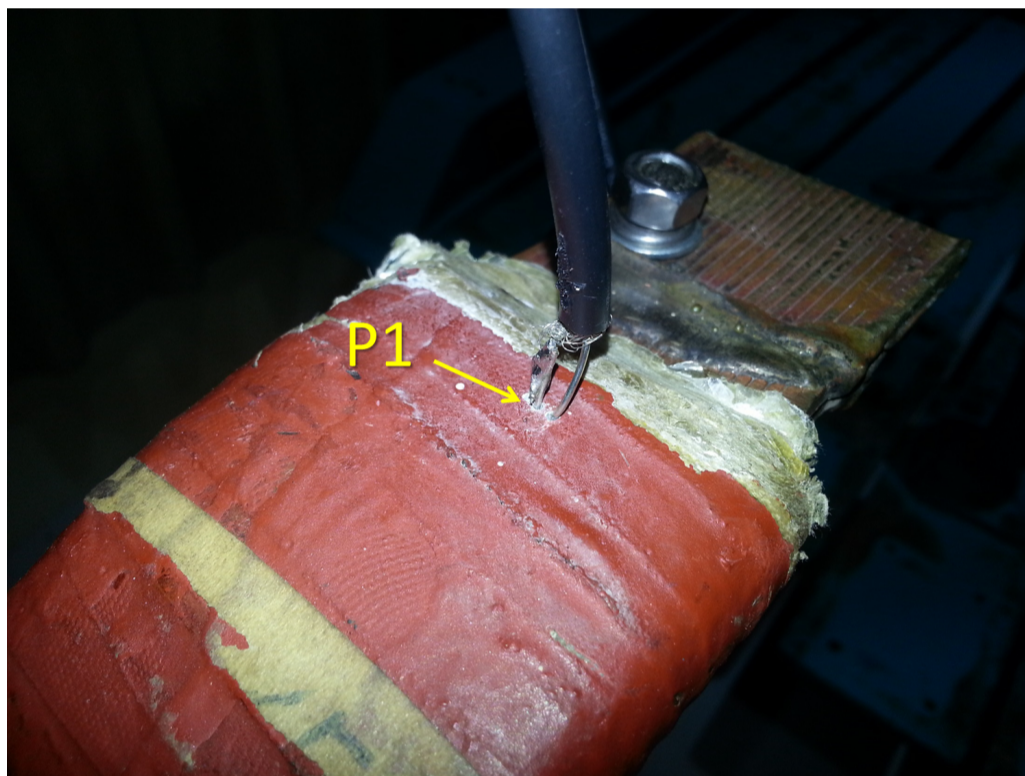


Figura 5.8: Detalhe da injeção do sinal no par de furos P1.

Analisando a Figura 5.9.(a), pode-se perceber que o sinal injetado no ponto P1 sofre diversas reflexões. Estas reflexões acontecem quando o sinal de descarga parcial, que está propagando na região dielétrica, chega nas extremidades da barra, na interface entre a região dielétrica (mica) e a tinta semi-condutora que reveste externamente a barra e na interface entre a região dielétrica e o condutor interno da barra, uma vez que, tanto a tinta semicondutora, quanto o condutor interno da barra possuem alta condutividade elétrica, o que faz com que boa parte do sinal de descarga parcial sofra reflexão. Observa-se também, na Figura 5.9.(b), a ocorrência de ressonâncias no espectro de frequências. Estas ressonâncias são devidas a própria geometria da barra, conforme foi explicado na Seção 3.2.

Em seguida, utilizou-se o calibrador CAL 542 da Omicron para injetar o sinal de descarga no

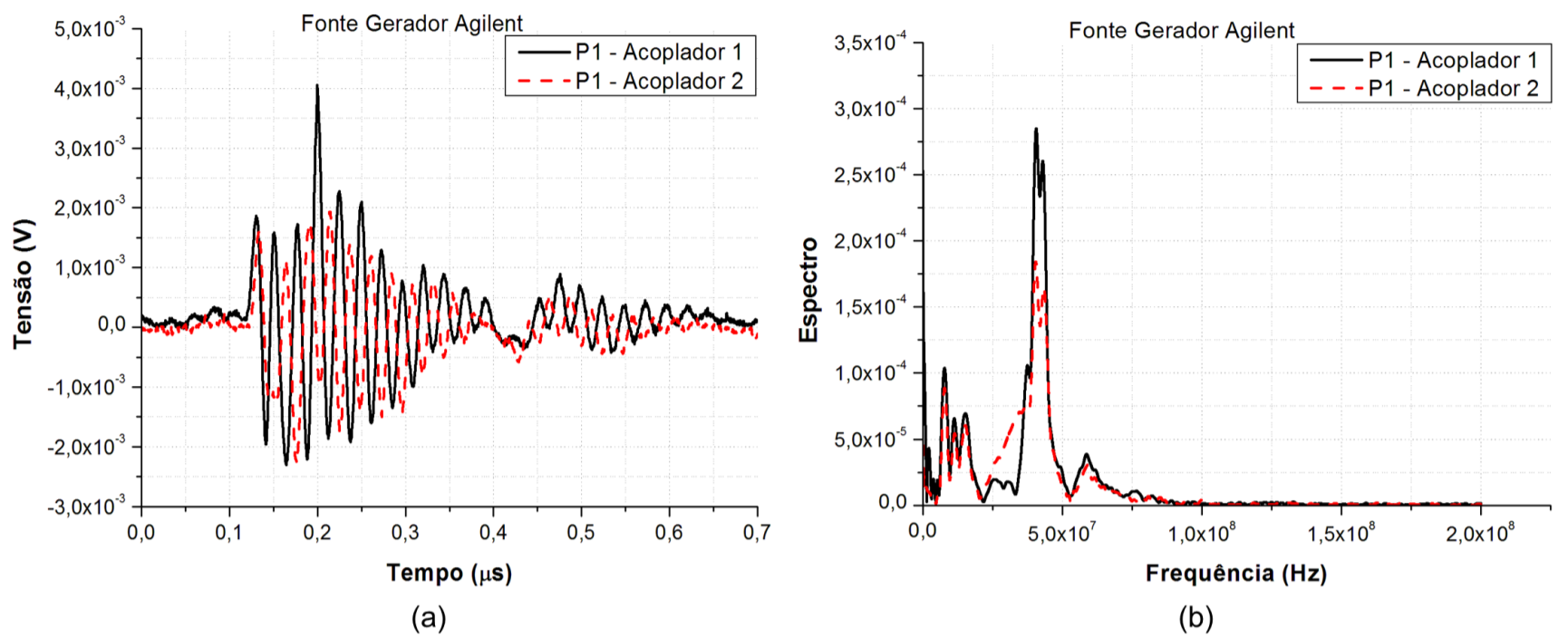


Figura 5.9: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

par de furos P1. A forma dos sinais registrados pelos acopladores, bem como os seus espectros são mostrados na Figura 5.10

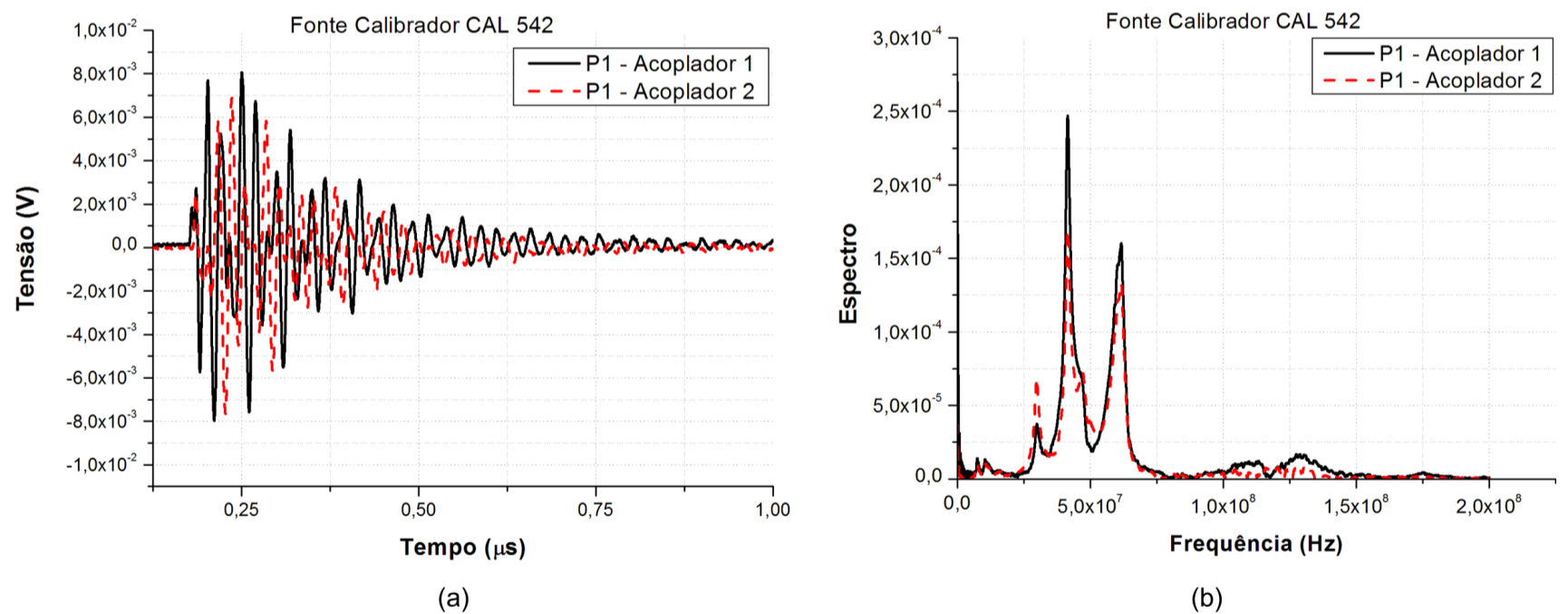


Figura 5.10: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

Logo após, injetou-se o sinal proveniente do gerador da Agilent no par de furos P2. A Figura

5.11 mostra o detalhe da injeção do sinal de descargas parciais no par de furos P1. O sinal foi recebido pelos acopladores 1 e 2. A forma dos sinais recebidos pelos acopladores, bem como os seus espectros são mostrados na Figura 5.12

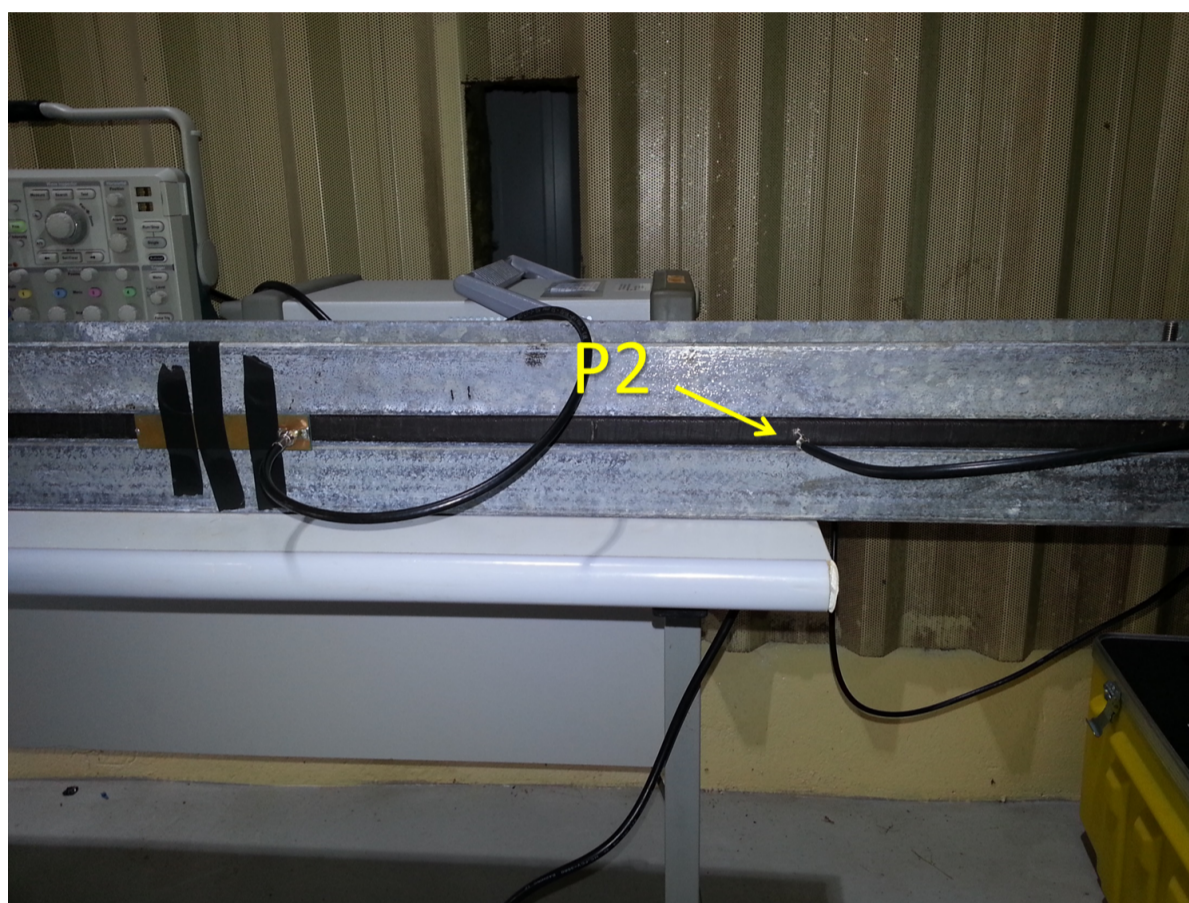


Figura 5.11: Detalhe da injeção do sinal no par de furos P2.

Em seguida, utilizou-se o calibrador CAL 542 da Omicron para injetar o sinal de descarga no par de furos P2. A forma dos sinais registrados pelos acopladores, bem como os seus espectros são mostrados na Figura 5.13

Procedeu-se da mesma forma para os pares de furos P3, P4, P5 e P6. Primeiramente usando o gerador da Agilent e, em seguida, o calibrador da Omicron. As Figuras 5.14 - 5.21 mostram os resultados obtidos para estes casos.

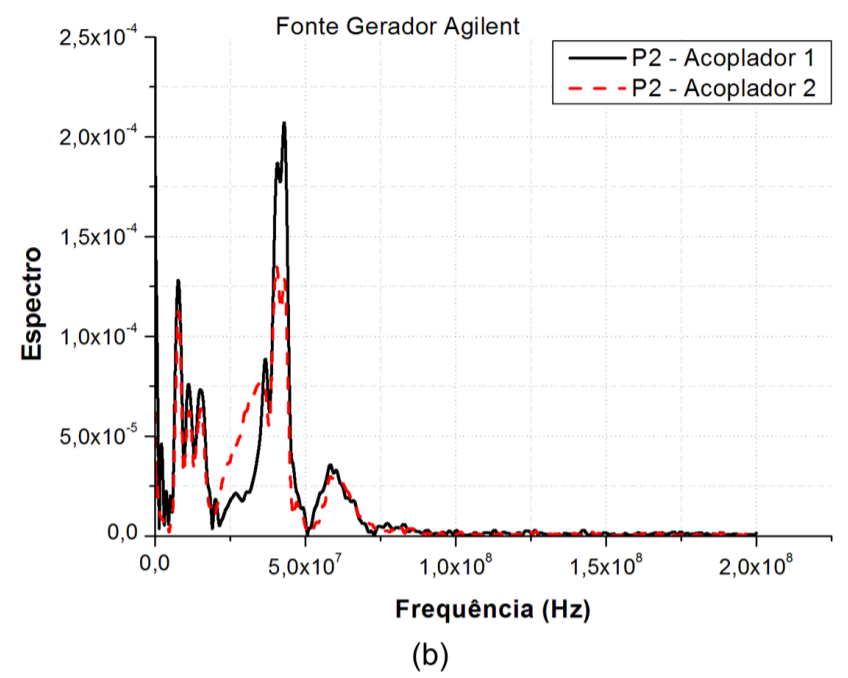
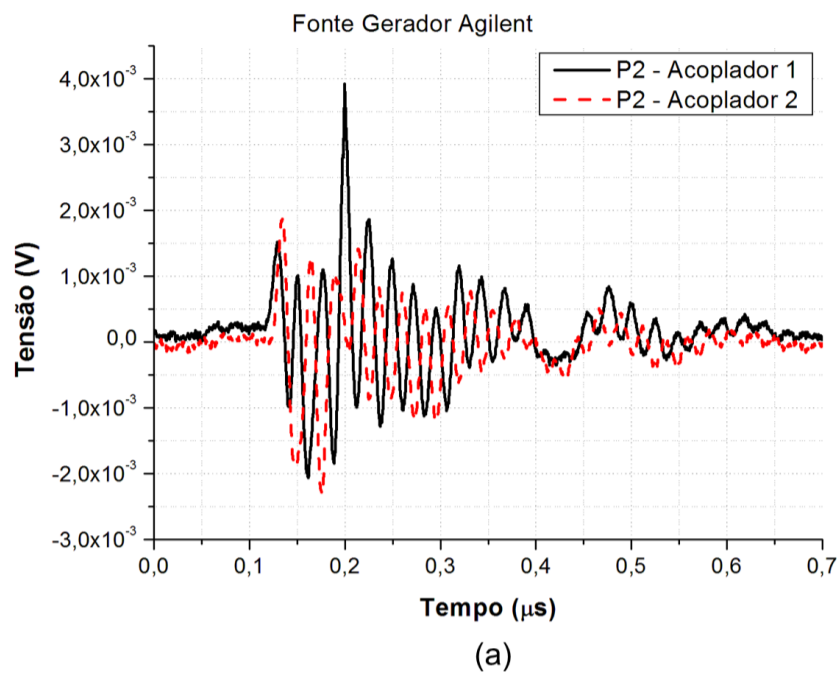


Figura 5.12: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

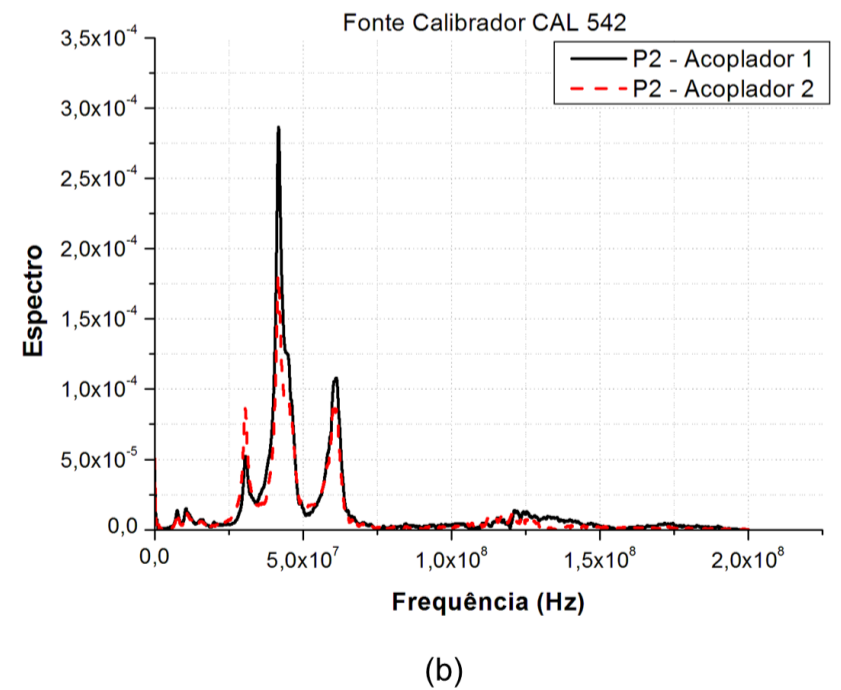
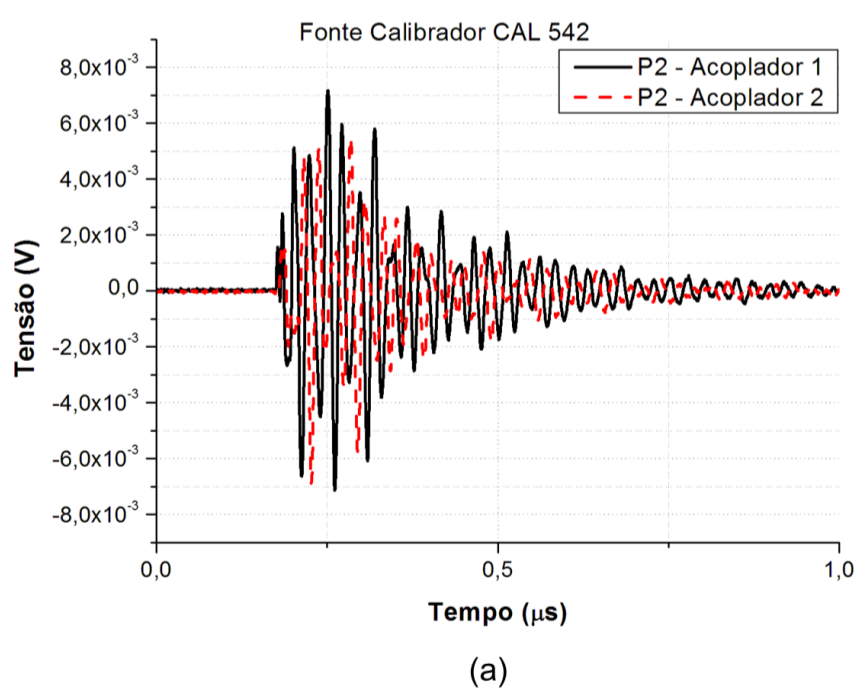


Figura 5.13: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

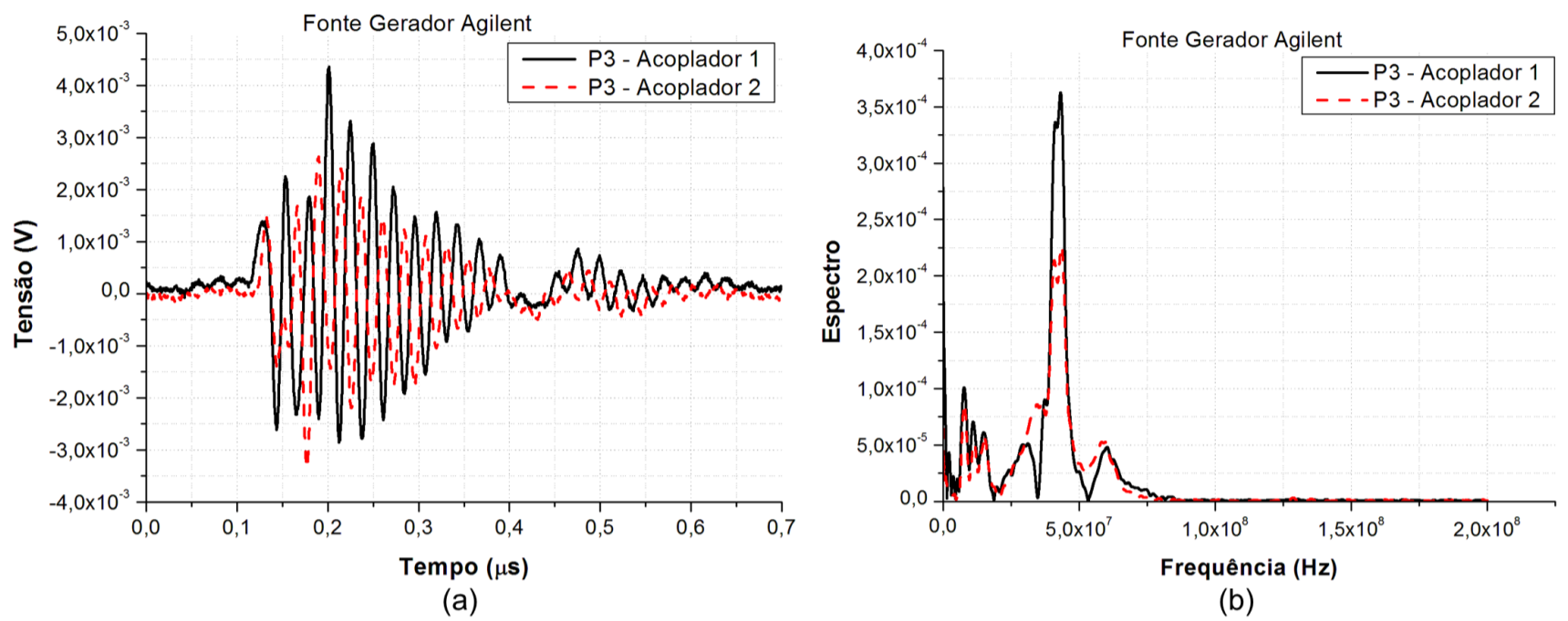


Figura 5.14: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

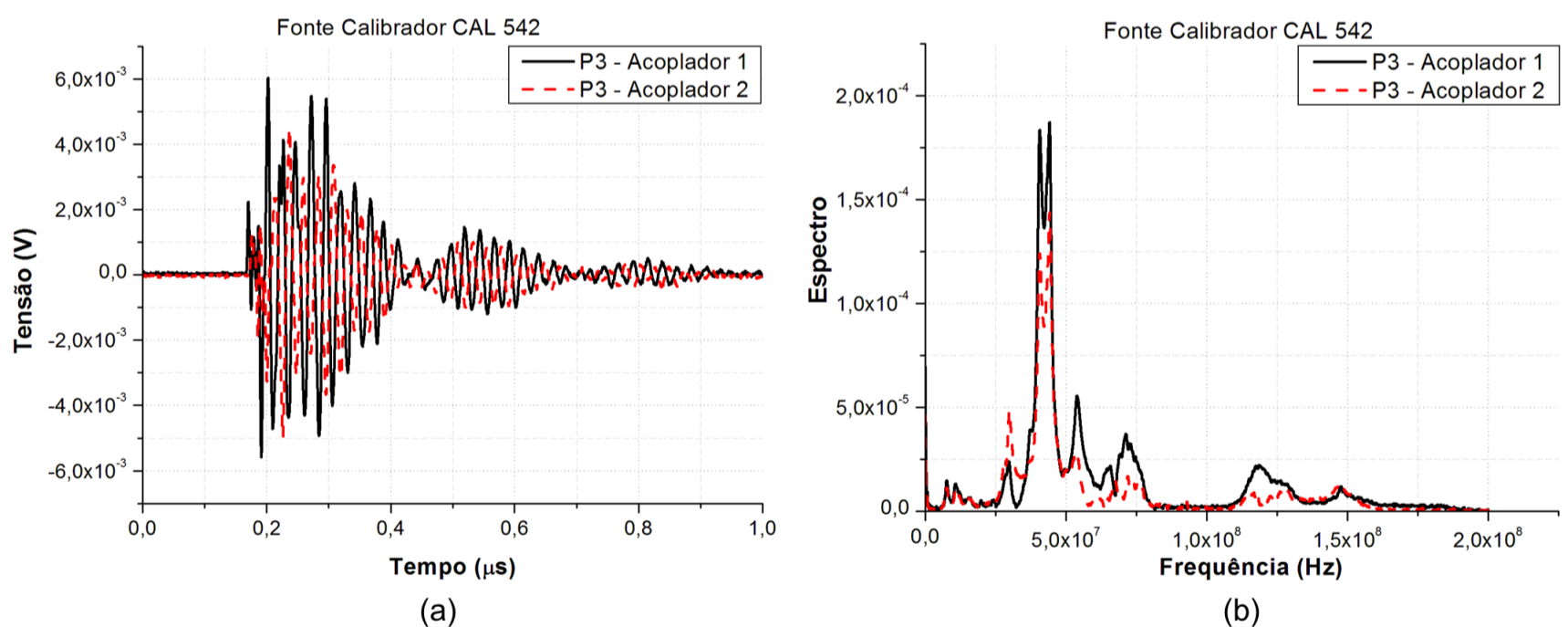


Figura 5.15: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

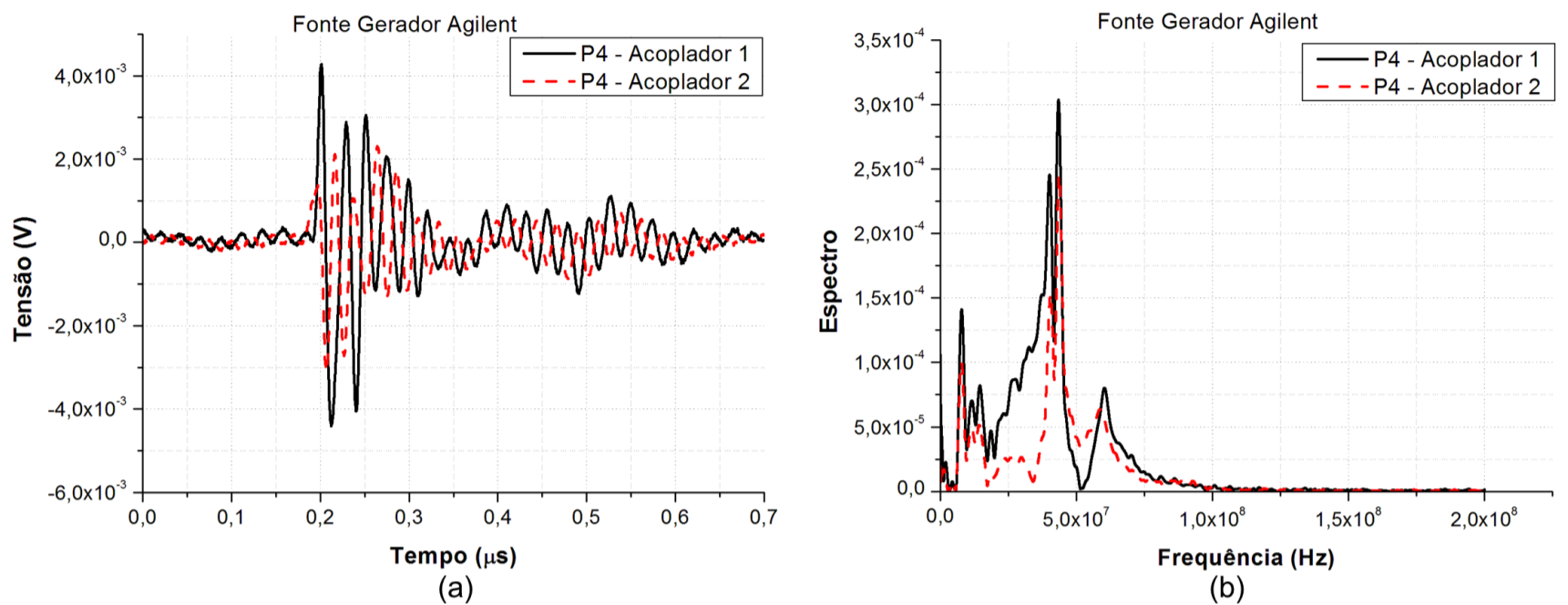


Figura 5.16: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

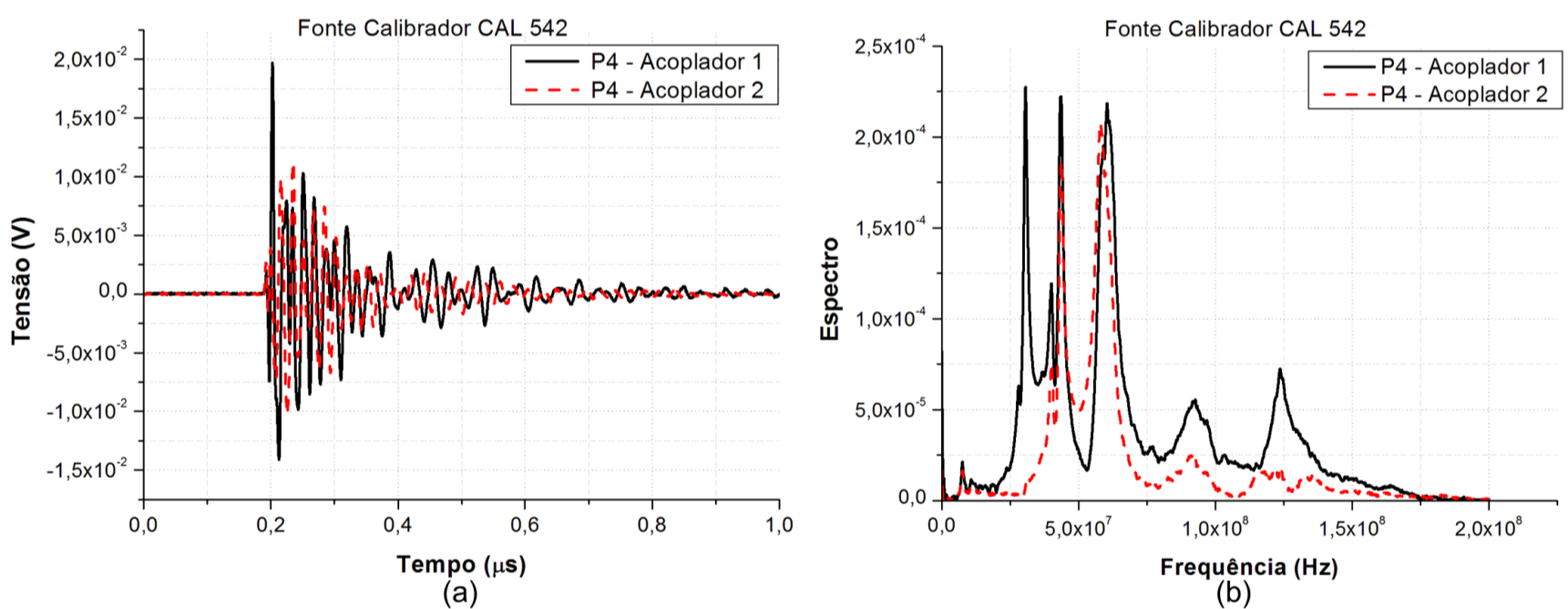


Figura 5.17: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

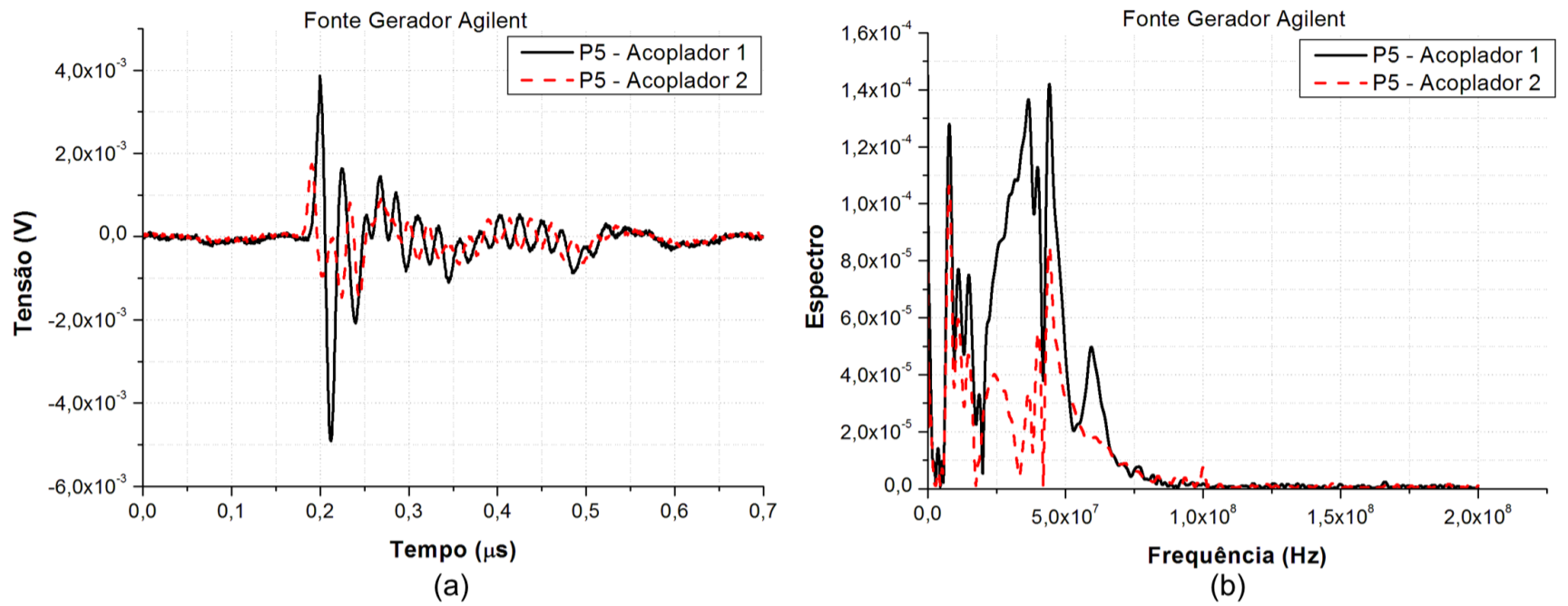


Figura 5.18: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

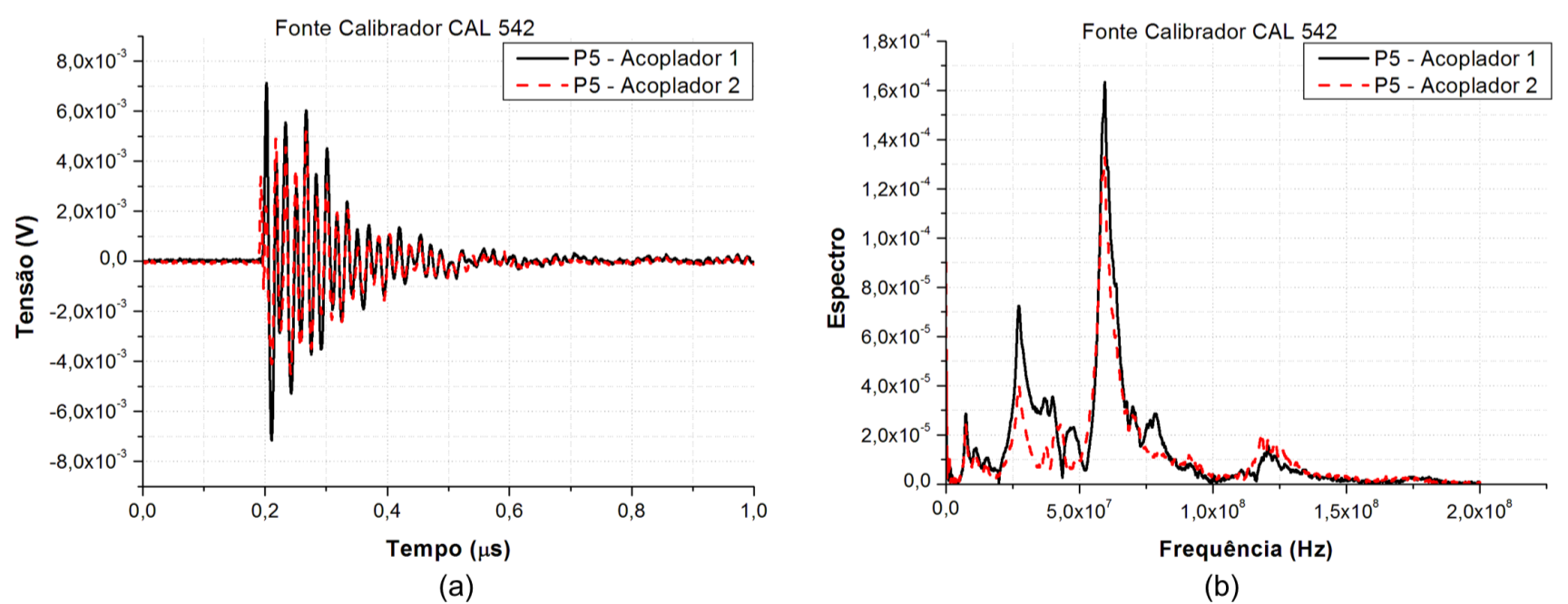


Figura 5.19: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

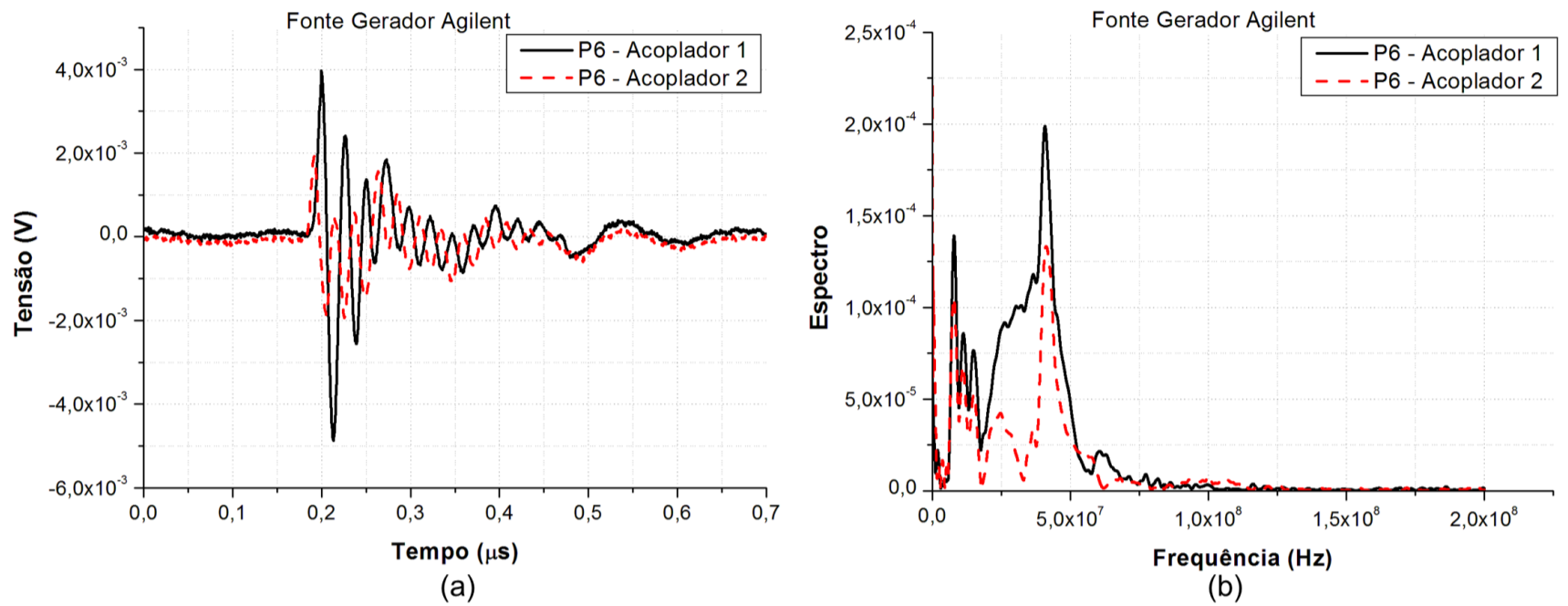


Figura 5.20: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

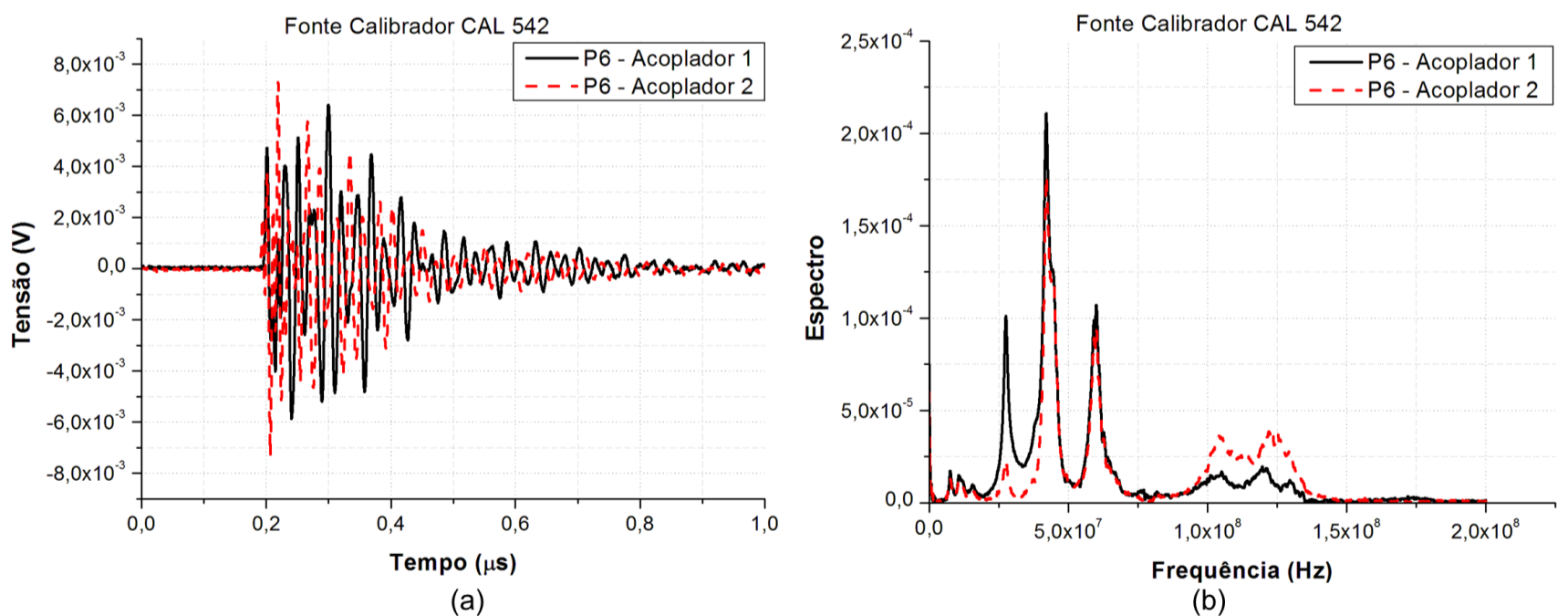


Figura 5.21: (a) Sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2, (b) Espectro dos sinais transitórios recebidos nos acopladores 1 e 2 .

Um modelo numérico desta barra foi construído no *software* SAGS. A parte metálica externa possui os seguintes parâmetros: $\epsilon_r = 1$, $\sigma = 0,000433$; $\mu_r = 1$, o condutor interno possui os seguintes parâmetros: $\epsilon_r = 1$, $\sigma = 10270.3$, $\mu_r = 1$. O meio dielétrico entre as partes de cobre possui as seguintes características eletromagnéticas: $\epsilon_r = 10,814$; $\sigma = 0,00020788$; $\mu_r = 1$. O grid computacional concebido possui $1600 \times 205 \times 124$ células cúbicas de Yee, com $\Delta = 0,002mm$. As Figuras 5.22 e 5.23 ilustra este modelo numérico (imagens do software simulador). A Figura 5.24 ilustra o modelo numérico do acoplador direcional.

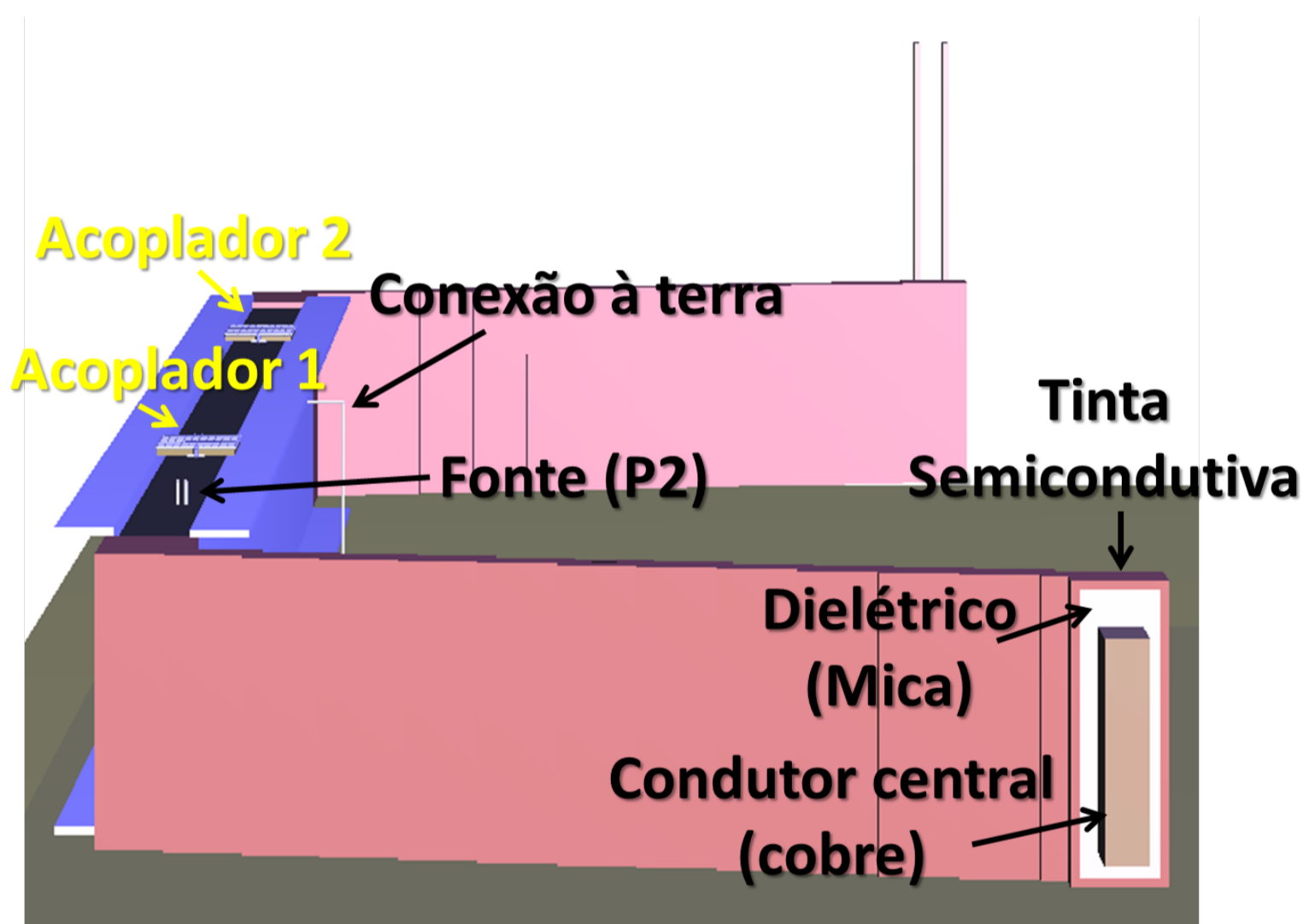


Figura 5.22: Representação do modelo numérico da barra utilizada nos experimentos .

Reproduziu-se, numericamente, a ocorrência da descarga nos pares de furos P2, utilizando o sinal gerado pelo Calibrador CAL 542 da Omicron. O local onde o sinal é injetado no modelo numérico da barra está indicado nas Figuras 5.22 e 5.23 .

O espectro do resultado obtido numericamente foi comparado com o espectro obtido experimentalmente. Esta comparação é mostrada na Figura 5.25.

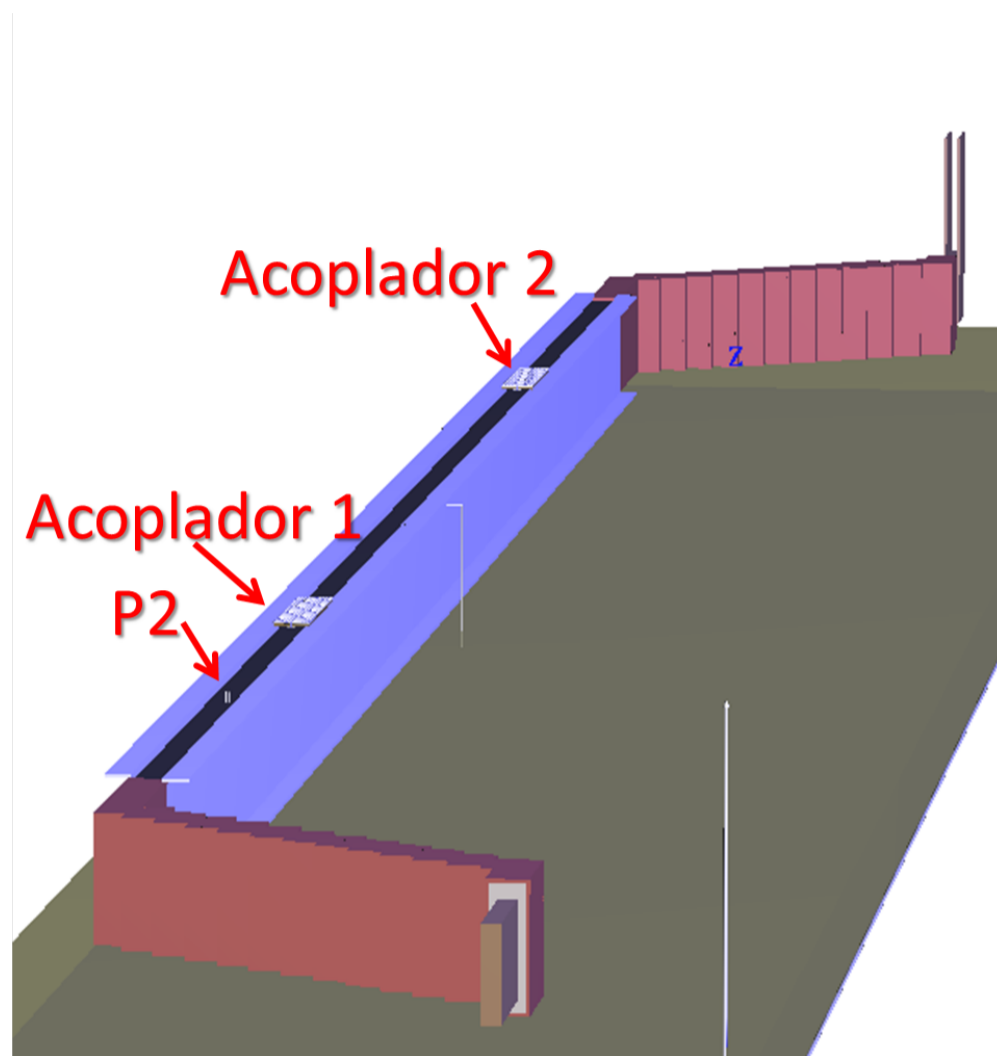
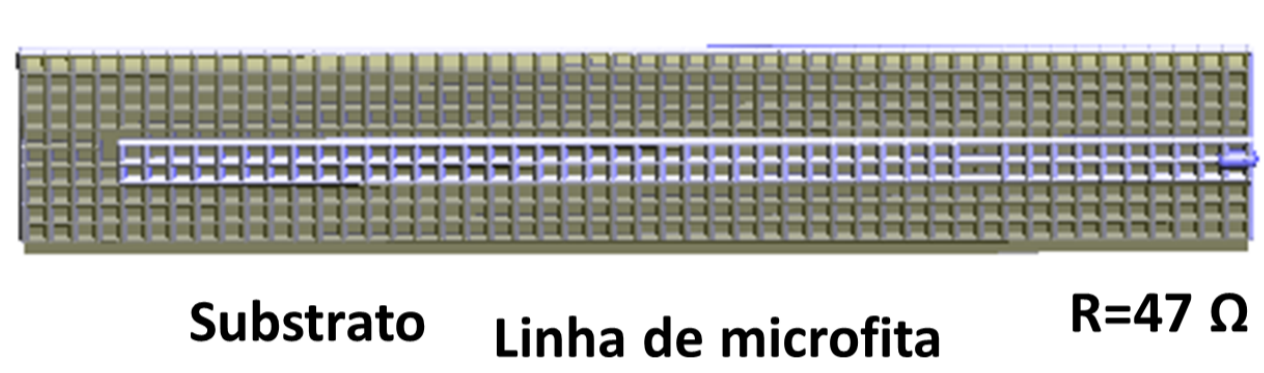
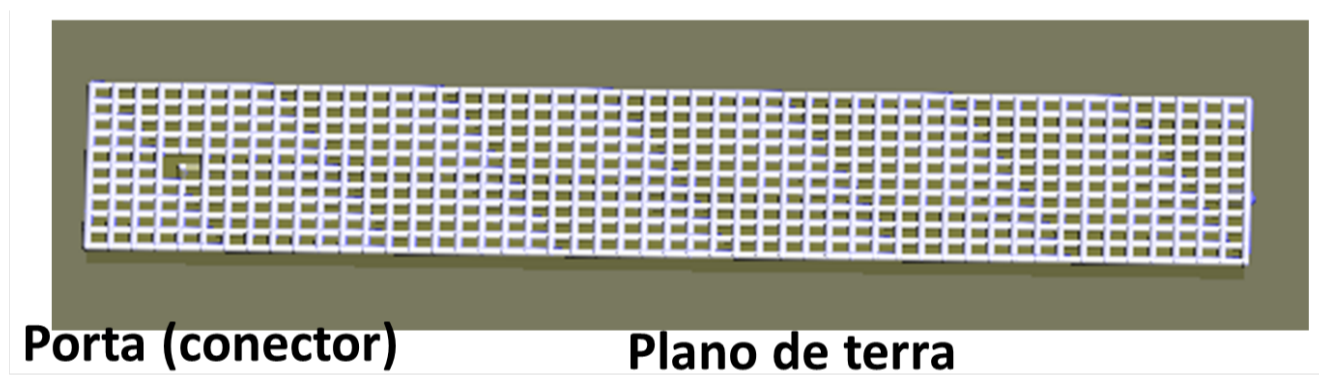


Figura 5.23: Outra representação do modelo numérico da barra utilizada nos experimentos .

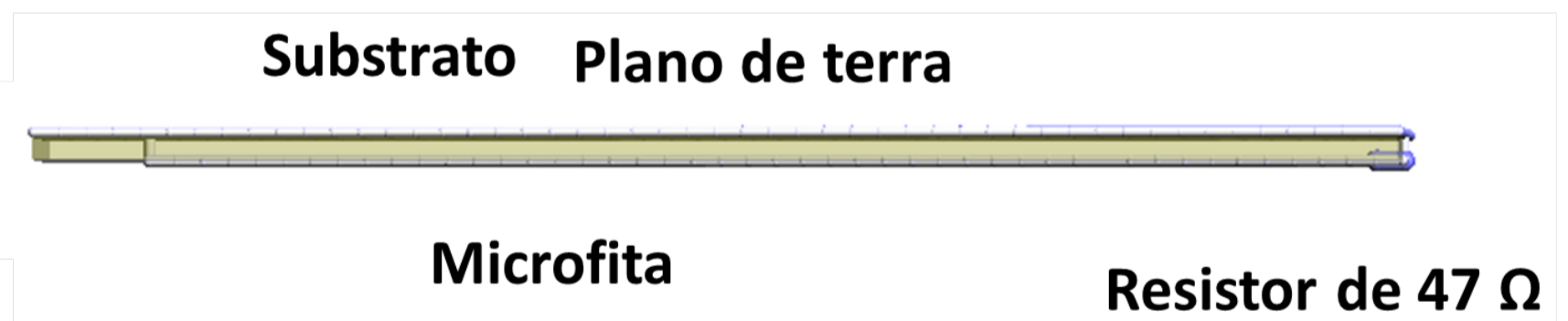
Analisando a Figura 5.25, observa-se que tanto o espectro obtido experimentalmente quanto o espectro obtido pela simulação são bastante parecidos. Ambos possuem a maior parte da sua energia localizada entre 40 MHz e 75 MHz, e os seus picos ocorrem aproximadamente nas mesmas frequências e possuem aproximadamente a mesma amplitude, o que valida o *software* SAGS experimentalmente. Ressalta-se que o método de injeção de sinais de descargas parciais em barras estáticas utilizado neste capítulo é umas das contribuições deste trabalho.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.24: Modelo numérico do acoplador direcional:(a) Vista frontal, (b) Vista traseira e (c) Vista lateral.

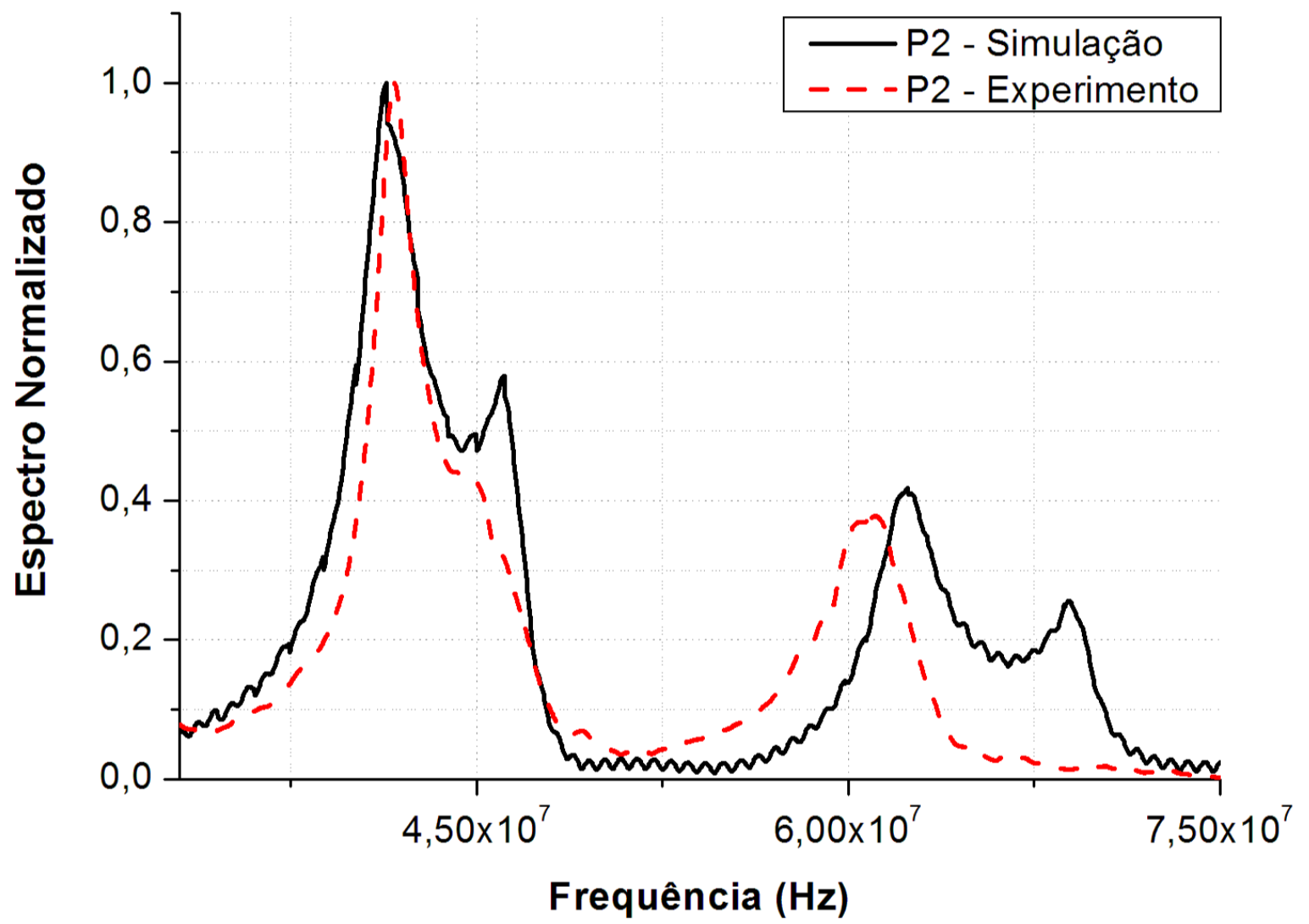


Figura 5.25: Comparação entre os espectros obtidos pelo experimento e pela simulação.

Capítulo 6

Considerações Finais

Uma nova metodologia para localização de Descargas Parciais, baseada em análise espectral, foi desenvolvida. O método FDTD foi utilizado para realizar as simulações e a modelagem eletromagnética do problema. Foi realizada a localização de múltiplas descargas parciais ocorrendo em uma única bobina do hidrogenador e em duas bobinas adjacentes interligadas. Em síntese, a técnica baseia-se na determinação das frequências nas quais máximos e mínimos ocorrem no espectro do sinal transitório registrado pelo sensor. Tais frequências são dependentes da posição de ocorrências das DPs. Com essas informações, um mapa de probabilidades de ocorrência das descargas, em função do espaço, é obtido e, com ele, é possível obter visualmente as regiões nas quais há maior possibilidade de haver problemas na isolação. Este mapa estatístico é obtido através de uma rotina computacional que identifica as frequências onde há máximos e mínimos locais nos espectros, de forma que um banco de dados é elaborado, contendo tais frequências e a região da bobina associada a esses harmônicos. Este banco é utilizado para estimar a região onde há uma ou mais descargas.

Para o caso de apenas uma bobina, em aproximadamente 90% das simulações foram obtidas estimativas precisas da localização das duas descargas simuladas. Nos outros 10% das simulações, a primeira descarga foi localizada corretamente e locais próximos à posição exata da segunda descarga foram estimados, com até 1,5m de desvio. Da mesma forma, para duas bobinas adjacentes, em cerca de 81% das simulações realizadas foi possível estimar a localiza-

ção exata das duas descargas parciais simultâneas. Os resultados obtidos comprovam a eficácia do método de localização proposto neste trabalho. Quando comparado com outros métodos encontrados na literatura, o mesmo se mostrou eficaz, com a vantagem de localizar mais de uma descarga parcial ocorrendo simultaneamente.

Uma nova metodologia para injeção de sinais de descargas parciais em barras estatóricas de hidrogeradores foi desenvolvida. A metodologia consiste em efetuar um par de furos, distantes 2 mm um do outro, na barra. Um dos furos do par chega até o condutor interno da barra, o outro furo fica distante 2 mm distante do condutor interno. Um cabo coaxial é adaptado, onde o condutor central deste cabo é colocado no furo mais profundo, que chega ao condutor interno da barra. O plano terra do cabo coaxial é colocado no outro furo, simulando assim a ocorrência de descargas parciais na região dielétrica da barra.

Foram realizadas duas validações numéricas e uma validação experimental do *software* SAGS. Na primeira validação numérica, realizou-se a simulação de propagação de ondas eletromagnéticas devidas a descargas parciais em GIS (*Gas Insulated Switchgears*). Os resultados obtidos pelo *software* SAGS foram coerentes aos obtidos na literatura, o que validou o SAGS. A segunda validação numérica consistiu em reproduzir numericamente o arranjo experimental proposto por Lesaint. Um modelo numérico de uma barra estatórica de um gerador de 900 MW foi modelado no SAGS. Os resultados obtidos por Lesaint concordaram fortemente com os obtidos através do *software* SAGS, validando-o.

Foi realizado um experimento na Eletronorte, com intuito de revalidar o *software* SAGS experimentalmente. Utilizou-se uma barra proveniente do estator da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Montou-se um setup experimental e injetou-se sinais de descargas parciais em seis pontos diferentes da barra. A injeção dos sinais foi realizada utilizando a metodologia de injeção de sinais de descargas parciais proposta neste trabalho e registrou-se os sinais utilizando dois acopladores direcionais. Modelou-se a barra proveniente da Usina Hidrelétrica, bem como os acopladores, no SAGS. Reproduziu-se numericamente a ocorrência de descargas parciais em um dos pontos da barra onde o sinal de descarga parcial foi injetado experimentalmente. Os resul-

tados obtidos numericamente concordaram com os obtidos experimentalmente, o que validou o SAGS experimentalmente.

Para trabalhos futuros, planeja-se verificar a influência de ruídos na metodologia de localização de descargas parciais proposta. Planeja-se também fazer o modelo numérico completo da máquina hidrogenadora e aprimorar a metodologia proposta neste trabalho para casos de tal complexidade.

Apêndice A

Método FDTD

Em 1966, Kane Yee publicou o trabalho [14], que introduziu uma nova maneira de solucionar problemas de eletromagnetismo. Esta publicação apresentou uma técnica capaz de solucionar numericamente as equações de Maxwell no domínio do tempo. Entretanto, naquela época, a baixa capacidade computacional limitava a utilização do método em sua plenitude.

Posteriormente, desenvolveram-se técnicas capazes de solucionar o problema da truncagem do domínio de análise, possibilitando ao método tratar problemas abertos. Este tipo de técnica, conhecido como ABCs (*Absorbing Boundary Conditions*), simula as ondas se propagando para o infinito, de forma que, neste trabalho, a absorção das mesmas é realizada segundo a técnica CPML (*Convolution Perfectly Matched Layer*) [52].

Com a revolução da informática nas últimas décadas o estudo de casos por métodos numéricos se tornou uma das principais vertentes na solução de problemas na engenharia, pois possibilita a representação da realidade física de forma fiel. O método das Diferenças Finitas se baseia no cálculo de aproximações algébricas das derivadas das equações diferenciais, no caso em questão, das equações de Maxwell. As diferenças algébricas são obtidas por expansão em série de Taylor.

Em um caso unidimensional, a derivada de uma função (ver Figura A.1), que é finita e contínua em torno de um ponto x_0 , pode ser obtida pela diferença das expansões em série de Taylor nos pontos $x_0 + \Delta x$ e $x_0 - \Delta x$.

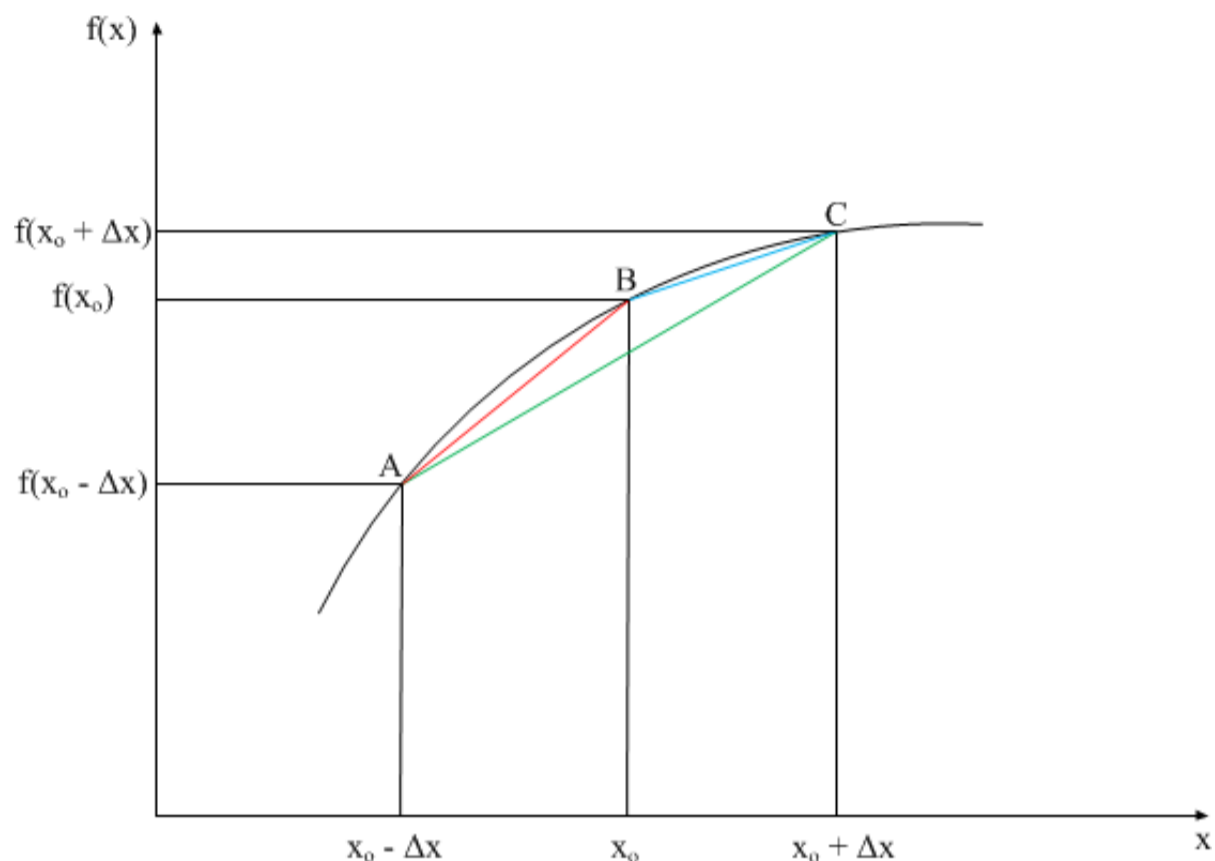


Figura A.1: Idéia da aproximação da derivada de $f(x)$ por diferença centrada no ponto x_0 .

Os pontos desta função podem ser descritos como em A.1 e A.2.

$$f(x + \Delta x) = f(x) + \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \frac{1}{2!} \Delta x^2 \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \frac{1}{3!} \Delta x^3 \frac{\partial^3 f(x)}{\partial x^3} + \dots \quad (\text{A.1})$$

e

$$f(x - \Delta x) = f(x) - \Delta x \frac{\partial f(x)}{\partial x} + \frac{1}{2!} \Delta x^2 \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} - \frac{1}{3!} \Delta x^3 \frac{\partial^3 f(x)}{\partial x^3} + \dots, \quad (\text{A.2})$$

o que resulta, subtraindo-se (A.1) de (A.2) em A.3

$$\frac{\partial f(x)}{\partial x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x - \Delta x) + \left[0 \Delta x^2 \frac{\partial^2 f(x)}{\partial x^2} + \frac{2}{3!} \Delta x^3 \frac{\partial^3 f(x)}{\partial x^3} + \dots \right]}{2\Delta x}. \quad (\text{A.3})$$

Desprezando os termos de ordem maior ou igual a dois, chega-se em uma aproximação de segunda ordem, sendo a equação resultante a utilizada para aproximar as derivadas no método FDTD.

A.1 Equações de Maxwell

As equações rotacionais de Maxwell no domínio do tempo, considerando-se um meio isotrópico, não dispersivo e com perdas, podem ser escritas na sua forma diferencial como em A.4

e A.5.

$$\nabla \times \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (\text{A.4})$$

$$\nabla \times \vec{H} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sigma \vec{E} \quad (\text{A.5})$$

onde \vec{E} representa o vetor intensidade de campo elétrico (V/m) e \vec{H} o vetor intensidade de campo magnético (A/m), μ representa a permeabilidade magnética, expressa em Henry/m, ε a permissividade elétrica, medida em Farad/m e σ a condutividade elétrica dada em Siemens/m, todos esses sendo parâmetros do meio em estudo. A equação (A.4), conhecida como a Lei de Faraday, descreve como o campo magnético variante no tempo gera campo elétrico rotacional a ele. A equação (A.5) é conhecida como a Lei de Ampère corrigida por Maxwell e é dual a (A.4). Em coordenadas retangulares, as equações supracitadas podem ser expandidas e escritas como:

$$\frac{\partial H_x}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_y}{\partial z} - \frac{\partial E_z}{\partial y} \right), \quad (\text{A.6})$$

$$\frac{\partial H_y}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_z}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial z} \right), \quad (\text{A.7})$$

$$\frac{\partial H_z}{\partial t} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial E_x}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial x} \right), \quad (\text{A.8})$$

e

$$\frac{\partial E_x}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} - \sigma E_x \right), \quad (\text{A.9})$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} - \sigma E_y \right), \quad (\text{A.10})$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial t} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} - \sigma E_z \right), \quad (\text{A.11})$$

respectivamente, onde E_x, E_y, E_z e H_x, H_y, H_z representam as componentes do vetor intensidade de campo elétrico e o vetor intensidade de campo magnético, respectivamente, sendo todas funções do tempo t e das coordenadas x, y e z .

A.1.1 Algoritmo de Yee

O conceito deste método baseia-se na solução das equações rotacionais de Maxwell, partindo-se da representação da região de análise em pontos de forma que $x = i\Delta x$, $y = j\Delta y$ e $z = k\Delta z$, sendo i , j e k índices inteiros e Δx , Δy e Δz os incrementos espaciais de x , y e z respectivamente. A estrutura do domínio de análise é representada por um conjunto de paralelepípedos (célula de Yee), sendo as componentes dos campos elétrico e magnético dispostas segundo a Figura A.2.

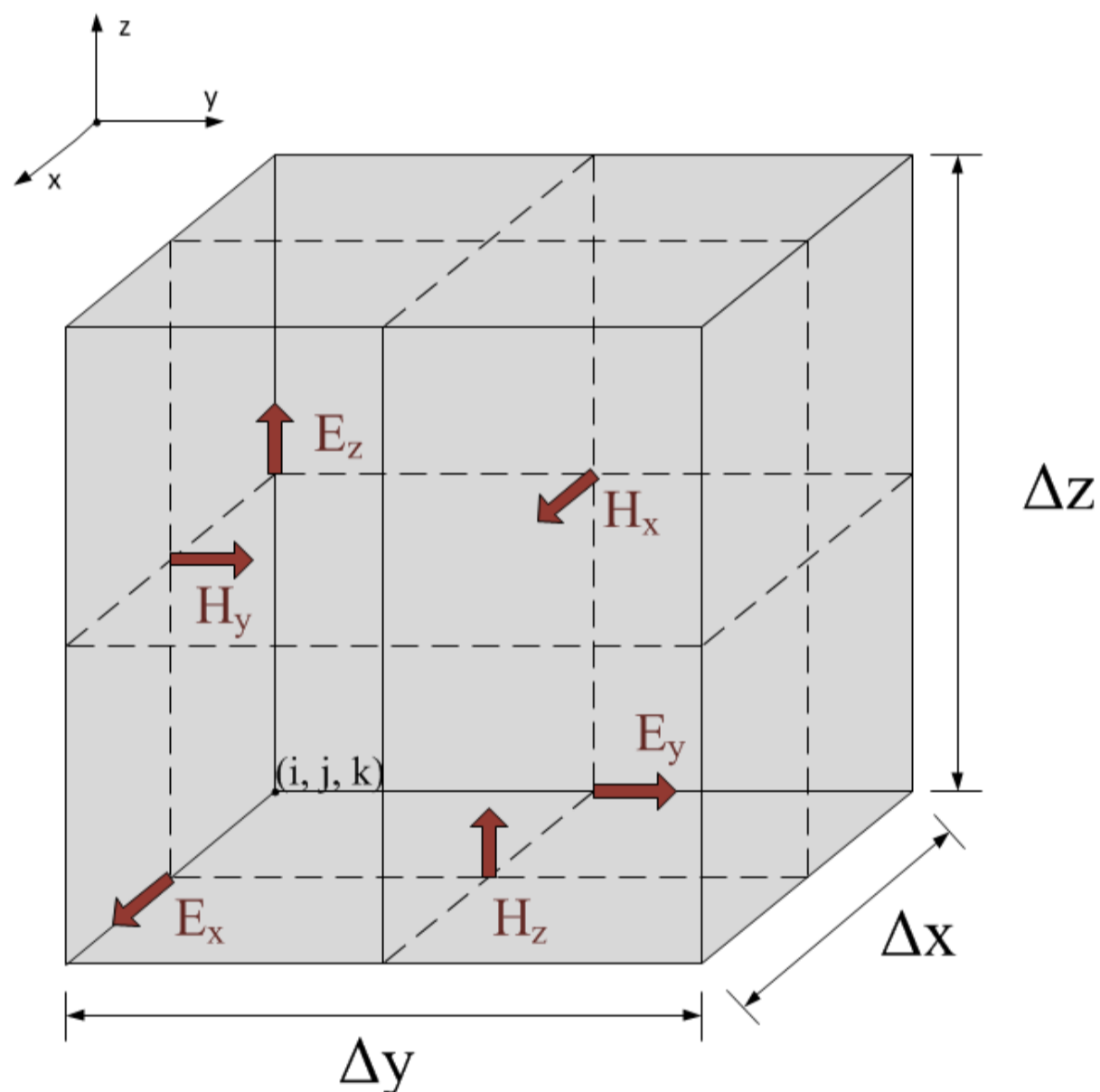


Figura A.2: Célula de Yee e a disposição das componentes de campo elétrico e magnético.

As componentes de campo elétrico estão localizadas no centro das arestas e as de campo magnético se encontram no centro das faces das células. Com isso, verifica-se que as componentes de campo magnético são atualizadas em um intervalo de tempo $\Delta t/2$, depois da atualização das componentes de campo elétrico, pois há uma intercalação no tempo entre elas comumente chamadas de *leapfrog* [53] (ver Figura A.3), devido à intercalação espacial.

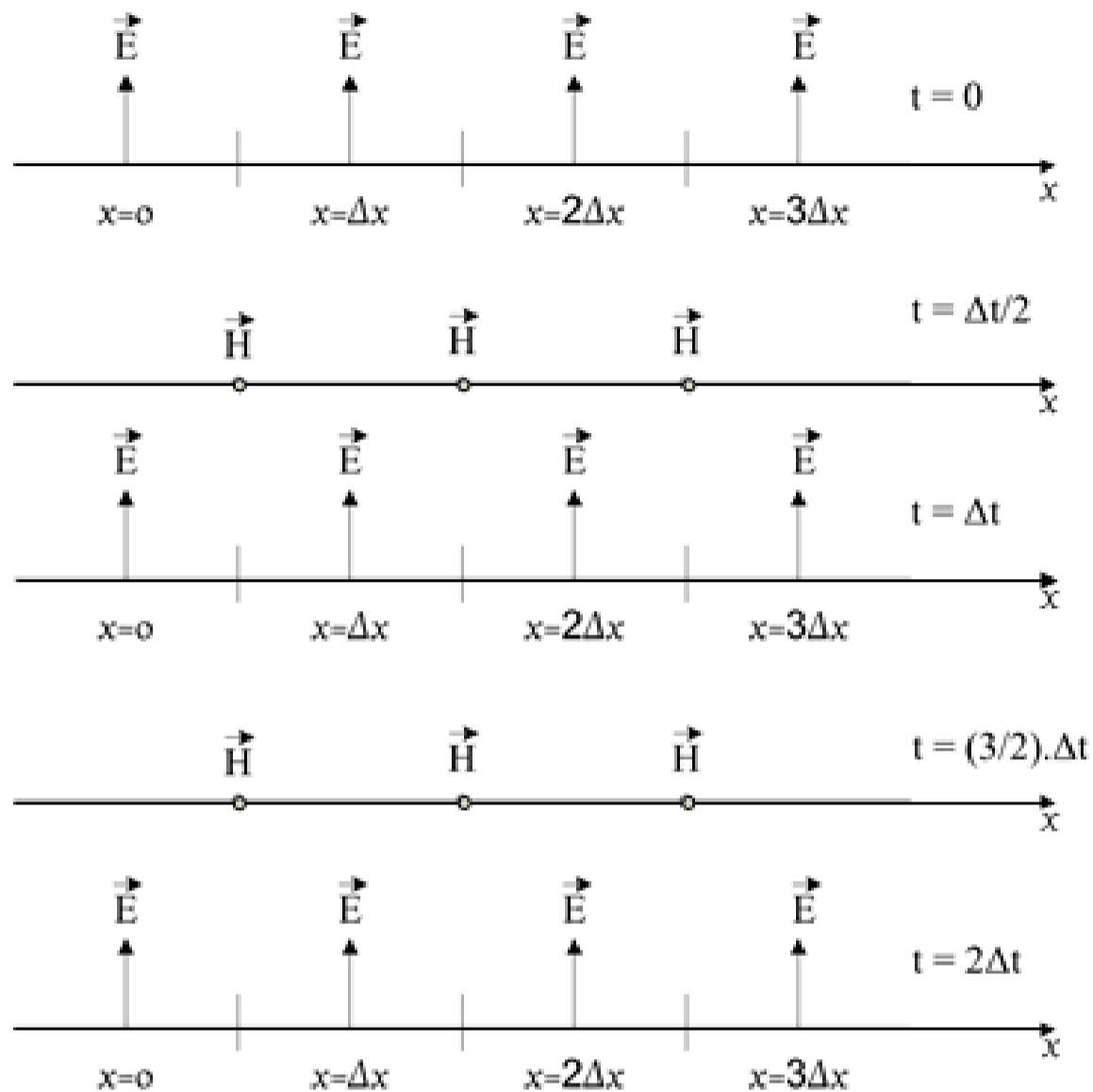


Figura A.3: *Leapfrog*: distribuição intercalada no tempo e no espaço das componentes de campo elétrico e magnético para um caso unidimensional do algoritmo de Yee.

Funções que dependam de x , y , z e t , podem ser, portanto, reescritas no espaço discreto da seguinte forma

$$F(x, y, z, t) = F(i\Delta x, j\Delta y, k\Delta z, n\Delta t) = F_{i,j,k}^n, \quad (\text{A.12})$$

onde Δt é o passo temporal e n o índice do tempo (inteiro).

Aplicando a expansão em Série de Taylor com precisão de 2ª ordem, e considerando que os incrementos espaciais são iguais $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \Delta$, é correto afirmar que as derivadas espacial em relação a x e temporal podem ser aproximadas da seguinte forma (usando (A.3)), respectivamente:

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial x} \approx \frac{F^n(i+1/2, j, k) - F^n(i-1/2, j, k)}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\partial F^n(i, j, k)}{\partial t} \approx \frac{F^{n+1/2}(i, j, k) - F^{n-1/2}(i, j, k)}{\Delta t} + 0(\Delta t^2) \quad (\text{A.14})$$

devido ao cancelamento (truncamento) dos termos $0(\Delta x^2)$ e $0(\Delta t^2)$ o método FDTD possui precisão também de segunda ordem [54] [53].

As equações escalares de Maxwell mostradas em (A.6)-(A.11) na forma de equações diferenciais são aproximadas, como mostrado abaixo, utilizando as equações A.13 e A.14:

$$+ \frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k+1) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta_z} - \frac{E_z^n(i, j+1, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta_y} \right], \quad H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) = H_x^{n-\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) + \quad (\text{A.15})$$

$$+ \frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{E_z^n(i+1, j, k+\frac{1}{2}) - E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta_x} - \frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k+1) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta_z} \right], \quad H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) = H_y^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) + \quad (\text{A.16})$$

$$+ \frac{\Delta t}{\mu} \left[\frac{E_x^n(i+\frac{1}{2}, j+1, k) - E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k)}{\Delta_y} - \frac{E_y^n(i+1, j+\frac{1}{2}, k) - E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta_x} \right], \quad H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) = H_z^{n-\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) + \quad (\text{A.17})$$

$$E_x^{n+1}(i+\frac{1}{2}, j, k) = E_x^n(i+\frac{1}{2}, j, k) \left(\frac{1 - \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon}} \right) + \frac{\Delta t}{\varepsilon \left(1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon} \right)} \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j-\frac{1}{2}, k)}{\Delta_y} \right] - \frac{\Delta t}{\varepsilon \left(1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon} \right)} \left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k-\frac{1}{2})}{\Delta_z} \right], \quad (\text{A.18})$$

$$\begin{aligned}
E_y^{n+1}(i, j+\frac{1}{2}, k) &= E_y^n(i, j+\frac{1}{2}, k) \left(\frac{1 - \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon}} \right) + \\
&+ \frac{\Delta t}{\varepsilon \left(1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon} \right)} \left[\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k-\frac{1}{2})}{\Delta z} \right] \\
&- \frac{\Delta t}{\varepsilon \left(1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon} \right)} \left[\frac{H_z^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k) - H_z^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j+\frac{1}{2}, k)}{\Delta x} \right], \tag{A.19}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
E_z^{n+1}(i, j, k+\frac{1}{2}) &= E_z^n(i, j, k+\frac{1}{2}) \left(\frac{1 - \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon}}{1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon}} \right) + \\
&+ \frac{\Delta t}{\varepsilon \left(1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon} \right)} \left[\frac{H_y^{n+\frac{1}{2}}(i+\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2}) - H_y^{n+\frac{1}{2}}(i-\frac{1}{2}, j, k+\frac{1}{2})}{\Delta x} \right] \\
&- \frac{\Delta t}{\varepsilon \left(1 + \sigma \frac{\Delta t}{2\varepsilon} \right)} \left[\frac{H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j+\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2}) - H_x^{n+\frac{1}{2}}(i, j-\frac{1}{2}, k+\frac{1}{2})}{\Delta y} \right]. \tag{A.20}
\end{aligned}$$

A.2 Precisão e Estabilidade

Para as equações (A.15)-(A.20), há a necessidade de se estabelecer condições que assegurem que os resultados computados convirjam para a solução exata, evitando efeitos numéricos como a dispersão; que ocorre devido as aproximações nos cálculos criarem erros que são propagados, acumulando desvios de fase e de magnitude que fazem com que fenômenos não físicos se manifestem [55]. Estes erros estão associados às dimensões da célula de Yee e ao passo temporal Δt . Para garantir a precisão e minimizar estes efeitos numéricos, deve-se ter 10 ou mais células para representar o menor comprimento de onda λ_{min} [50]; assim o incremento espacial, ou seja, as dimensões das células, obedecem ao seguinte critério:

$$\Delta x, y, z \leq \frac{\lambda_{min}}{10}, \tag{A.21}$$

de forma que as células não sejam pequenas o bastante ao ponto de inviabilizar a simulação do programa computacional, o que implicará em erros de arredondamento e grandes requisitos

computacionais. Com relação à estabilidade numérica do método, o incremento Δt segue a condição de Courant [55]

$$\Delta t \leq \frac{1}{v_{max} \sqrt{\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2}}}, \quad (\text{A.22})$$

onde $v_{max} = [\mu\epsilon]^{-1/2}$ é a velocidade máxima da onda eletromagnética, na região de análise.

Esta condição associa o incremento Δt com a diagonal da célula, que é a máxima distância que a onda percorre dentro da mesma. Se as células forem cúbicas, a equação (A.22) passa a ser:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta}{v_{max} \sqrt{3}}. \quad (\text{A.23})$$

Referências Bibliográficas

- [1] José Márcio Faier, “Curvas principais aplicadas na identificação de descargas parciais em equipamentos de potência,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [2] Rômulo Damasceno Moura, “Chave fusível com duplo isolamento para redes de distribuição,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, 2012.
- [3] João Luiz Botelho Duarte , “Utilização de técnicas inteligentes nas metodologias de manutenção de geradores síncronos,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.
- [4] *NBR 6940: Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão - medição de descargas parciais*, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS Std., 1981.
- [5] “IEEE Recommended Practice for Voltage-Endurance Testing of Form-Wound Bars and Coils,” *IEEE Std 1043-1989*, pp. 0–1, 1989.
- [6] W. McDermid and J. Bromley, “Partial discharge screening test for internal voids and delaminations in stator coils and bars,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 3, pp. 292 –297, sep 1999.
- [7] S. Birlasekaran, “Identification of the type of partial discharges in an operating 16kV/250 MVA generator,” in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003. Annual Report. Conference on*, oct. 2003, pp. 559 – 562.

- [8] R. Morin, J. Novak, R. Bartnikas, and R. Ross, "Analysis of in-service aged stator bars," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 4, pp. 645 –654, dec 1995.
- [9] W. Wang, C. Li, W. Li, L. Liu, Z. Wang, and L. Ding, "Pattern recognition of single and composite partial discharge on generator stators," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2001 Annual Report. Conference on*, 2001, pp. 335 –339.
- [10] Y. Hao, H. Xie, G. Wang, and Z. Jia, "Assessment of insulation condition of generator stator bars based on velocity of ultrasonic waves," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 3, pp. 539 – 547, june 2003.
- [11] F. Emery, "Partial discharge, dissipation factor, and corona aspects for high voltage electric generator stator bars and windings," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 2, pp. 347 – 361, april 2005.
- [12] B. Yue, X. Chen, Y. Cheng, J. Song, and H. Xie, "Diagnosis of stator winding insulation of large generator based on partial discharge measurement," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 21, no. 2, pp. 387 – 395, june 2006.
- [13] Z. Jia, X. Peng, Z. Guan, L. Wang, and B. Yue, "Evaluation of the Degradation of Generator Stator Ground Wall Insulation Under Multistresses Aging," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 2, pp. 474 –483, june 2008.
- [14] K. Yee, "Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 3, pp. 302–307, may 1966.
- [15] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics, The Finite-Difference Time-Domain Method*, 3rd ed. Artech House Inc., 2005.
- [16] T. Hoshino, S. Maruyama, and T. Sakakibara, "Simulation of Propagating Electromagnetic Wave Due to Partial Discharge in GIS Using FDTD," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 1, pp. 153 –159, jan. 2009.

- [17] A. Ishak, M. Judd, and W. Siew, "A study of UHF partial discharge signal propagation in power transformers using FDTD modelling," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, 31 2010-sept. 3 2010, pp. 1 –5.
- [18] Xu Bin and Li Junhao and Si Wenrong and Li Yanming, "Simulating Propagation Characteristic of UHF Signal for PD Monitoring in Transformers by FDTD Technique," in *Power and Energy Engineering Conference, 2009. APPEEC 2009. Asia-Pacific*, march 2009, pp. 1 –4.
- [19] D. Pommerenke, R. Jobava, and R. Heinrich, "Numerical simulation of partial discharge propagation in cable joints using the finite difference time domain method," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 18, no. 6, pp. 6 –11, nov.-dec. 2002.
- [20] A. Reid, M. Stewart, and M. Judd, "FDTD modeling of UHF partial discharge sensor response," in *Sustainable Power Generation and Supply, 2009. SUPERGEN '09. International Conference on*, april 2009, pp. 1 –4.
- [21] R. Jobava, D. Pommerenke, R. Heinrich, W. Kalkner, and A. Gheonjian, "Simulation of transient field coupling into directional coupler sensors using a 3D FDTD algorithm in cylindrical coordinates," in *Applied Electromagnetism, 2000. Proceedings of the Second International Symposium of Trans Black Sea Region on*, 2000, p. 67.
- [22] Y. Tian, M. Kawada, and K. Isaka, "Visualization of electromagnetic waves emitted from multiple PD sources on distribution line by using FDTD method," in *Electrical Insulating Materials, 2008. (ISEIM 2008). International Symposium on*, sept. 2008, pp. 95 –98.
- [23] L. Wenhao, C. Jun, C. Min, Q. Jiangtao, L. Junhao, and L. Yanming, "Simulation study of E-M wave propagation characteristics in GIS model considering isolating switch," in *Electrical and Control Engineering (ICECE), 2011 International Conference on*, sept. 2011, pp. 2557 –2560.

- [24] S. Xiao, P. Moore, M. Judd, and I. Portugues, “An investigation into electromagnetic radiation due to partial discharges in high voltage equipment,” in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*, june 2007, pp. 1 –7.
- [25] H. Sedding, S. Campbell, G. Stone, and G. Klempner, “A new sensor for detecting partial discharges in operating turbine generators,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 4, pp. 700 –706, dec 1991.
- [26] R. Mangeret, J. Farenc, B. Ai, P. Destruel, D. Puretolas, and J. Casanovas, “Optical detection of partial discharges using fluorescent fiber,” *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 26, no. 4, pp. 783 –789, aug 1991.
- [27] K. Itoh, Y. Kaneda, S. Kitamura, K. Kimura, A. Nishimura, T. Tanaka, H. Tokura, and I. Okada, “New noise rejection techniques on pulse-by-pulse basis for on-line partial discharge measurement of turbine generators,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 11, no. 3, pp. 585 –594, sep 1996.
- [28] W. McDermid and J. Bromley, “Experience with directional couplers for partial discharge measurements on rotating machines in operation,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 2, pp. 175 –184, jun 1999.
- [29] H. Zhu, V. Green, M. Sasic, and S. Halliburton, “Increased sensitivity of capacitive couplers for in-service PD measurement in rotating machines,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 4, pp. 1184 –1192, dec 1999.
- [30] J. Veen and P. van der Wiellen, “The application of matched filters to PD detection and localization,” *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 19, no. 5, pp. 20 –26, sept.-oct. 2003.
- [31] A. Whalen, *Detection of Signals in Noise*. New York: Academic Press, 1971.
- [32] J. Borghetto, A. Cavallini, A. Contin, G. Montanari, M. de Nigris, G. Pasini, and R. Passaglia, “Partial discharge inference by an advanced system. Analysis of online measurements

- performed on hydrogenerator,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 2, pp. 333 – 339, June 2004.
- [33] A. Kheirmand, M. Leijon, and S. Gubanski, “Advances in online monitoring and localization of partial discharges in large rotating machines,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 1, pp. 53–59, March 2004.
- [34] Koch, R. and Pohlmann, F. and Weidner, J.R., “A new diagnostic tool for preventive maintenance on large generators-PD location in stator windings by the traveling wave method,” in *Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo, 2005. Proceedings*, Oct 2005, pp. 71–77.
- [35] C. SILVA, G, “Descargas parciais estimuladas por raio X contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças,” Tese de Doutorado, Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- [36] *IEC 60270 High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION Std., 2000.
- [37] KUFFEL, E.; ZAENGL, W.S, *High Voltage Engineering Fundamentals*. Pergamon Press, 1990.
- [38] KRUEGER, F. H., *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*, 1st ed. Butterworth-Heinemann, 1989.
- [39] Brasil, F. S., “Estudo experimental de técnicas de medição de descargas parciais nos enrolamentos estáticos de hidrogeradores,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, 2013.
- [40] Júnior, S. R., “Análise da ruptura dielétrica em materiais isolantes elétricos de cabos isolados XLPE e EPR por tomografia 2D e 3D,” Dissertação de Mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2008.

- [41] H. de Oliveira Mota, L. C. D. da Rocha, T. C. de Moura Salles, and F. H. Vasconcelos, “Partial discharge signal denoising with spatially adaptive wavelet thresholding and support vector machines,” *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 2, pp. 644 – 659, 2011. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779610002658>
- [42] S. Sriram, S. Nitin, K. M. M. Prabhu, and M. J. Bastiaans, “Signal denoising techniques for partial discharge measurements,” *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 12, no. 6, pp. 1182–1191, Dec 2005.
- [43] Siemens, *Folha de dados elétricos*, U.H.E Coaracy Nunes, 1997, gerador de Polos Salientes 1DH7139-3WF24-Z.
- [44] R. de Oliveira and C. Sobrinho, “Computational Environment for Simulating Lightning Strokes in a Power Substation by Finite-Difference Time-Domain Method,” *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 4, pp. 995, 1000, Nov. 2009.
- [45] A. Svatik, V. Adamec, and J. Calderwood, “Dielectric properties of epoxy/mica insulation,” in *Dielectric Materials, Measurements and Applications, 1988., Fifth International Conference on*, Jun 1988, pp. 262–265.
- [46] F. T. Ulaby, *Electromagnetics For Engineers*. Prentice Hall, 2005.
- [47] Z. Liu, T. Blackburn, B. T. Phung, and R. James, “Detection of partial discharge in solid and liquid insulation with an electric field sensor,” in *Electrical Insulating Materials, 1998. Proceedings of 1998 International Symposium on*, 1998, pp. 661–664.
- [48] Lesaint, O. and Lebey, T. and Dinculescu, S. and Debruyne, H. and Petit, A., “Propagation of fast PD signals within stator bars performance and limitations of a high frequency monitoring system,” in *Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003. Proceedings of the 7th International Conference on*, vol. 3, 2003, pp. 1112–1115 vol.3.

- [49] *IEEE Std 1434 Guide to Measurement of Partial Discharge in Rotating Machinery*, USA Std., 2000.
- [50] M. Sadiku, *Elements of Electromagnetics*, 2nd ed. Oxford University Press, 1995.
- [51] S. Hoshino, T.; Maruyama and T. Sakakibara, “Simulation of Propagating Electromagnetic Wave Due to Partial Discharge in GIS Using FDTD,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 24, no. 1, pp. 153–159, Jan. 2009.
- [52] J. A. Roden and S. D. Gedney, “Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media,” *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 27, pp. 334–339, 2000.
- [53] R. M. e Silva de Oliveira, “Nova metodologia para análise e síntese de sistemas de aterramento complexos utilizando o método LN-FDTD, computação paralela automática e Redes Neurais Artificiais,” Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, 2008.
- [54] G. D. Smith, *Numerical Solution of Partial Differential Equations: Finite Difference Methods*, 3rd ed. Oxford University Press, 1985.
- [55] A. Taflove and M. E. Brodwin, “Numerical solution of steady-state electromagnetic scattering problems using the time-dependent Maxwell’s equations,” *IEEE Transactions on Microwave Theory Tech.*, vol. 23, pp. 623–630, 1975.