



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS
APLICANDO CAMPOS POLARIZADOS E FOCALIZADOS

TESE DE DOUTORADO

ANTÔNIO VINÍCIUS CORRÊA BARBOSA



Março- Belém

2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

ANTÔNIO VINÍCIUS CORRÊA BARBOSA

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS
APLICANDO CAMPOS POLARIZADOS E FOCALIZADOS

Tese apresentada ao Curso de Pós-graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, para obtenção do título de Doutor em Geofísica.

Área de concentração:
Métodos Eletromagnéticos

Orientador: Om Prakash Verma (in memoriam)



Belém

2006



Universidade Federal do Pará
Centro de Geociências
Curso de Pós-graduação em Geofísica

AVALIAÇÃO DE MÉTODOS ELETROMAGNÉTICOS APLICANDO CAMPOS POLARIZADOS E FOCALIZADOS

TESE APRESENTADA POR

ANTONIO VINICIUS CORRÊA BARBOSA

COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE DOUTOR EM
CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA

Data da aprovação: 17 de janeiro de 2006

Nota: (%) 68% (Regular)

COMITÊ DE TESE:

Prof. Dr. Om Prakash Verma (Orientador) in memoriam

Prof. Dr. Luiz Rijo

Prof. Dr. José Gouvêa Luiz

Prof. Dr. Paulo Roberto de Carvalho

Prof. Dr. Antônio Abel G. Carrasquila

Prof. Dr. Cícero Roberto Teixeira Régis

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Barbosa, Antonio Vinicius Corrêa

Avaliação de métodos eletromagnéticos aplicando campos polarizados e focalizados. / **Antonio Vinicius Corrêa Barbosa; orientador, Om Prakash Verma (in memoriam). - 2006**

91f. : il

Tese (Doutorado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2006.

1. Métodos eletromagnéticos 2. Campos polarizados 3. Campos focalizados 4. Modelagem numérica 5. Elementos finitos I. Verma, Om Prakash (in memoriam), orient. II Universidade Federal do Pará III Título.

CDD 20. ed.: 573

Dedico esta tese a minha mãe Maria de Lourdes que me ajudou a enfrentar todos os obstáculos na vida e às minhas irmãs Marly e Luciana.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dada inspiração e força em nunca desistir nos momentos de dificuldade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Om P. Verma – UFPa (*In Memoriam*), pela ajuda, compreensão e principalmente por ter assumido comigo este desafio.

Ao Prof. Dr. Luiz Rijo - UFPa, pelo auxílio no entendimento da técnica numérica e computacional.

Ao Prof. Dr. Gouvêa - UFPa, pelas correções finais e sugestões à conclusão deste trabalho.

Ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, responsável pelo meu aprimoramento.

Aos funcionários do Centro de Geociências, pelo apoio e cooperação, Alberto, Álvaro e, especialmente a secretária do CPGf, Benildes, pelas constantes ajudas e momentos de descontração.

Aos funcionários da biblioteca do CG, Lúcia, Hélio e todos aqueles que colaboraram na obtenção do material de pesquisa.

Aos amigos do curso Marcus Welby, Victor Tocantins, e todos aqueles que estiveram próximos nos momentos de descontração.

Aos meus familiares a quem eu amo tanto, especialmente a minha mãe Lourdes, e irmãs Marly e Luciana, nas horas de alegria e nos momentos de dificuldades, pelo permanente carinho e estímulo para comigo dedicados durante todo esse longo percurso, obrigado por tudo.

Ao grande amigo Idnir Júnior pelo companheirismo, amizade e compreensão dedicados todos esses anos.

Este trabalho recebeu apoio do projeto “Métodos Eletromagnéticos Aplicados à Região Amazônica: Consolidação do programa de Pós-Graduação em Geofísica da UFPa”, processo 620240/2004-0, financiado pelo PADCT/CT – INFRA/CNPq.

“O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto.”(Thomas Huxley)

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1	Diagrama esquemático do princípio físico dos métodos de prospecção por indução eletromagnética (GRANT e WEST, 1965).	5
FIGURA 1.2	Situação de máximo acoplamento magnético entre campo primário e alvo.	5
FIGURA 2.1	No item (a), colunas da esquerda e da direita, as combinações entre os dipolos \overline{DMV} 's e \overline{DMH} 's, respectivamente e, no item (b) as combinações entre o \overline{DMV} e \overline{DMH} . Setas que apontam nos sentidos de cima para baixo e da esquerda para a direita representam dipolos com momentos magnéticos positivos e nos sentidos opostos os dipolos com momentos negativos.	7
FIGURA 2.2	Mapas direcionais dos campos magnéticos no plano X-Z calculados num semi-espaço de condutividade 10^{-3} S/m. No item (a) dois Dipolo Magnético Vertical (\overline{DMV}) acionados separadamente e, em (b) dois Dipolos Magnéticos Verticais Paralelos $\left[\left(+\overline{DMV} \right)_+ \left(+\overline{DMV} \right)_+ \right]$ acionados simultaneamente, polarizando verticalmente os campos em $X/L = 0$. As escalas estão normalizadas pela abertura L. A porção destacada pelo retângulo tracejado representa região de campo nulo que corresponde à profundidade aproximada de $Z/L = 0,7$.	10
FIGURA 2.3	Mapas direcionais dos campos magnéticos no plano X-Z calculados num semi-espaço de condutividade 10^{-3} S/m. No item (a) dois Dipolo Magnético Horizontal (\overline{DMH}) acionados separadamente e, em (b) dois Dipolos Magnéticos Horizontais antioaxiais $\left[\left(-\overline{DMH} \right)_+ \left(+\overline{DMH} \right)_+ \right]$ acionados simultaneamente, polarizando verticalmente os campos em $X/L = 0$. As escalas estão normalizadas pela abertura L	11
FIGURA 2.4	Varição em profundidade da intensidade dos campos magnéticos em Tesla, na região central entre os transmissores, para os sistemas: convencional \overline{DMH} e POLFOCEM $\left[\left(-\overline{DMH} \right)_+ \left(+\overline{DMH} \right)_+ \right]$ que focalizam os campos em profundidade e, o $\left[\left(+\overline{DMV} \right)_+ \left(+\overline{DMV} \right)_+ \right]$ que não os focaliza.	12
FIGURA 2.5	Mapa de magnitudes relativas às componentes H_x^p e H_z^p dos campo magnéticos com polarização vertical calculada para a configuração $\left[\left(-\overline{DMH} \right)_+ \left(+\overline{DMH} \right)_+ \right]$, nos planos XZ e YZ.	12
FIGURA 2.6	Mapas direcionais dos campos magnéticos no plano X-Z calculados num semi-espaço de condutividade 10^{-3} S/m. No item (a) dois Dipolo Magnético Horizontal (\overline{DMH}) acionados separadamente e, em (b) dois Dipolos Magnéticos Horizontais Coaxiais $\left[\left(+\overline{DMH} \right)_+ \left(+\overline{DMH} \right)_+ \right]$ acionados simultaneamente, polarizando horizontalmente os campos em $X/L = 0$. As escalas estão normalizadas pela abertura L. A porção destacada pelo retângulo tracejado representa região de campo nulo que corresponde à profundidade aproximada de $Z/L = 1,36$.	15
FIGURA 2.7	Mapas de direção dos campos magnéticos no plano X-Z calculados num semi-espaço de condutividade 10^{-3} S/m. No item (a) dois Dipolo Magnético Vertical (\overline{DMV}) acionados separadamente e, em (b) dois Dipolos Magnéticos Verticais antiparalelos $\left[\left(+\overline{DMV} \right)_+ \left(-\overline{DMV} \right)_+ \right]$ acionados simultaneamente, polarizando horizontalmente os campos em $X/L = 0$. As escalas estão normalizadas pela abertura L.	16
FIGURA 2.8	Varição em profundidade da intensidade dos campos magnéticos em Tesla, na região central entre os transmissores, para os sistemas: convencional \overline{DMV} e POLFOCEM $\left[\left(+\overline{DMV} \right)_+ \left(-\overline{DMV} \right)_+ \right]$ que focalizam os campos em profundidade e, o $\left[\left(+\overline{DMH} \right)_+ \left(+\overline{DMH} \right)_+ \right]$ que não os focalizam.	17
FIGURA 2.9	Mapas de magnitudes relativas às componentes H_x^p e H_z^p do campo magnético com polarização horizontal calculadas para a configuração $\left[\left(+\overline{DMV} \right)_+ \left(-\overline{DMV} \right)_+ \right]$, nos planos XZ e YZ.	17
FIGURA 2.10	Campos assimétricos sendo, em (a) um par de dipolos vertical e horizontal $\left[\left(+\overline{DMV} \right)_+ \left(+\overline{DMH} \right)_+ \right]$ e, em (b) dipolos antivertical e anti-horizontal $\left[\left(-\overline{DMV} \right)_+ \left(-\overline{DMH} \right)_+ \right]$.	18

FIGURA 2.11	Campos assimétricos sendo, em (a) um par de dipolos vertical e anti-horizontal $[(+\overline{DMV})_+(-\overline{DMH})]$ e, em (b) Dipolos antiverticial e horizontal $[(+\overline{DMV})_+ (+\overline{DMH})]$.	18
FIGURA 3.1	Comparação entre as anomalias obtidas por modelagem analógica e por Elementos Finitos, para um alvo vertical com número de indução $\alpha = 15$, inserido num espaço homogêneo (ar atmosférico).	20
FIGURA 3.2	Sistema de coordenadas do modelo adotado, assim como as condutividades dos alvos prismáticos e do semi-espaço.	21
FIGURA 3.3	Disposição geométrica dos receptores para o cálculo das anomalias eletromagnéticas, representadas por dipolos magnéticos verticais e horizontais.	22
FIGURA 3.4	Modelo geoeletrico bidimensional de um alvo com três inclinações ($90^\circ, 45^\circ$ e 0°), inseridos num semi-espaço de condutividades de 10^{-3} S/m. A posição $Z/L = 0,5$ representa a região de foco dos campos primários. Em (a) a posição do receptor é deslocada em profundidade e, em (b) a posição do receptor é fixa na superfície. Sendo $L = 12$ m o espaçamento entre fontes e o receptor (representado pelos asteriscos).	23
FIGURA 3.5	Anomalias calculadas para um alvo vertical empregando os sistemas convencionais e POLFOCEM, com polarização horizontal. Demonstrando que as anomalias deste último sistema corresponde a soma de duas anomalias calculadas por cada transmissor acionado separadamente. Conforme princípio da linearidade dos campos eletromagnéticos.	24
FIGURA 3.6	Representação esquemática da SITUAÇÃO I ilustrando o ponto de cálculo das anomalias para alvos prismáticos bidimensionais, com inclinações de $90^\circ, 45^\circ$ e 0° sendo, em (a) campos com polarização vertical $[(+\overline{DMH})_+(-\overline{DMH})]$ e, em (b) campos gerados por um único dipolo (\overline{DMH}).	25
FIGURA 3.7	Representação esquemática da SITUAÇÃO II ilustrando o ponto de cálculo das anomalias para alvos prismáticos bidimensionais, com inclinações de $90^\circ, 45^\circ$ e 0° sendo, em (a) campos com polarização vertical $[(+\overline{DMH})_+ (+\overline{DMH})]$ e, em (b) campos gerados por um único dipolo (\overline{DMH}).	267
FIGURA 3.8	Respostas em componente vertical ($H_z^S/H_x^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação I).	28
FIGURA 3.9	Respostas em componente vertical ($H_z^S/H_x^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação II).	29
FIGURA 3.10	Respostas em componente horizontal ($H_x^S/H_x^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação I).	31
FIGURA 3.11	Respostas em componente horizontal ($H_x^S/H_x^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação II).	32
FIGURA 3.12	Resposta em componente horizontal ($H_x^S/H_x^P\%$) de um prisma de condutividade 1,0 S/m com diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico das anomalias estão descritos nos retângulos. (Situação II).	33

FIGURA 3.13	Representação esquemática da SITUAÇÃO II ilustrando o ponto de cálculo das anomalias para alvos prismáticos bidimensionais, com inclinações de 90°, 45° e 0° sendo, em (a) campos com polarização horizontal $\left[\left(+ \overline{DMV} \right)_+ \left(- \overline{DMV} \right)_- \right]$ e, em (b) campos gerados por um único dipolo (\overline{DMV}).	34
FIGURA 3.14	Respostas em componente vertical (H_z^S / H_z^P %) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização horizontal. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação I).	36
FIGURA 3.15	Respostas em componente vertical (H_z^S / H_z^P %) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização horizontal. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação II).	37
FIGURA 3.16	Respostas em componente horizontal (H_x^S / H_x^P %) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização horizontal. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação I).	39
FIGURA 3.17	Respostas em componente horizontal (H_x^S / H_x^P %) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização horizontal. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação II).	40
FIGURA 3.18	Reapresentação esquemática dos MODOS 1 e 2. Para a polarização vertical $\left[\left(- \overline{DMH} \right)_+ \left(+ \overline{DMH} \right)_- \right]$.	43
FIGURA 3.19	Anomalias pico negativo das componentes H_z^S , para um alvo horizontal, calculado para os MODOS 1 e 2	43
FIGURA 3.20	Reapresentação esquemática dos MODOS 1 e 2. Para a polarização horizontal $\left[\left(+ \overline{DMV} \right)_+ \left(- \overline{DMV} \right)_- \right]$.	44
FIGURA 3.21	Anomalias pico negativo das componentes H_x^S , para um alvo horizontal, calculado para os MODOS 1 e 2.	44
FIGURA 4.1	Espaçamento entre os transmissores com relação ao sensor.	45
FIGURA 4.2	Anomalias verticais H_z^S / H_x^P % de prismas horizontais em campo com polarização vertical. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.	48
FIGURA 4.3	Anomalias verticais H_z^S / H_x^P % de prismas verticais em campo com polarização vertical. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.	48
FIGURA 4.4	Anomalias horizontais H_x^S / H_x^P % de prismas horizontais em campo com polarização vertical. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.	49
FIGURA 4.5	Anomalias horizontais H_x^S / H_x^P % de prismas verticais em campo com polarização vertical. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.	49
FIGURA 4.6	Anomalias verticais H_z^S / H_x^P % de prismas horizontais em campo com polarização horizontal. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.	51
FIGURA 4.7	Anomalias verticais H_z^S / H_x^P % de prismas verticais em campo com polarização horizontal. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.	51

FIGURA 4.8	Anomalias horizontais H_x^S / H_x^P % de prismas horizontais em campo com polarização horizontal. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.	52
FIGURA 4.9	Anomalias horizontais H_x^S / H_x^P % de prismas verticais em campo com polarização horizontal. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.	52
FIGURA 5.1	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo vertical com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	55
FIGURA 5.2	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo vertical com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	56
FIGURA 5.3	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo com inclinação de 45° com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e em (b) a componente H_x^S .	57
FIGURA 5.4	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo com inclinação de 45° com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	58
FIGURA 5.5	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo horizontal com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	59
FIGURA 5.6	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo horizontal com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	60
FIGURA 5.7	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo vertical com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	62
FIGURA 5.8	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo vertical com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	63
FIGURA 5.9	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo com inclinação de 45° e, com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	64
FIGURA 5.10	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo com inclinação de 45° e, com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	65
FIGURA 5.11	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo horizontal com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	66
FIGURA 5.12	Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo horizontal com σt , em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .	67

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA

AGRADECIMENTOS

EPÍGRAFE

LISTA DE FIGURAS

RESUMO.....	1
ABSTRACT	2
1 INTRODUÇÃO	3
2 GERAÇÃO DE CAMPOS POLARIZADOS-FOCALIZADOS.....	6
2.1 POLARIZAÇÃO VERTICAL.....	8
2.2 POLARIZAÇÃO HORIZONTAL.....	13
2.3 CAMPOS ASSIMÉTRICOS.....	14
3 ANOMALIAS CALCULADAS NOS SISTEMAS CONVENCIONAIS E POLFOCEM.....	19
3.1 METODOLOGIA EMPREGADA	19
3.2 INFLUÊNCIA DA POLARIZAÇÃO	20
3.2.1 Efeitos da Polarização Vertical (H_z^P).....	25
3.2.1.1 Componente vertical (H_z^S) do campo secundário.....	26
3.2.1.2 Componente horizontal (H_x^S) do campo secundário.....	30
3.2.2 Efeitos da polarização horizontal (H_x^P).....	33
3.2.2.1 Componente vertical (H_z^S) do campo secundário.....	34
3.2.2.2 Componente horizontal (H_x^S) do campo secundário.....	38
3.3 INFLUÊNCIA DA FOCALIZAÇÃO	41
3.3.1 Alvo horizontal em campo com polarização vertical e alvo vertical em campo com polarização horizontal.....	42
4 RESPOSTAS DE CONDUTORES MÚLTIPLOS	45
4.1 RESOLUÇÃO NA POLARIZAÇÃO VERTICAL.....	47
4.2 RESOLUÇÃO NA POLARIZAÇÃO HORIZONTAL	50
5 ANÁLISES DAS ANOMALIAS PRODUZIDAS PELOS SISTEMAS POLFOCEM E CONVENCIONAIS ATRAVÉS DE DIAGRAMAS DE ARGAND.....	53
5.1 POLARIZAÇÃO VERTICAL (H_z^P).....	54
5.1.1 Componentes Vertical (H_z^S) e Horizontal (H_x^S) do campo secundário.....	54
5.2 POLARIZAÇÃO HORIZONTAL (H_x^P).....	61
5.2.1 Componentes Vertical (H_z^S) e Horizontal (H_x^S) do campo secundário.....	61

6 CONCLUSÃO.....	68
6.1 SUGESTÕES	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXOS	71
ANEXO 1 Componentes do campo eletromagnético num semi-espaço	72
ANEXO 2 Modelo bi-dimensional: fonte tri-dimensional (2-d/3-d)	74

RESUMO

Em investigações geofísicas rasas que empregam os métodos eletromagnéticos indutivos mais avançados, alvos com baixo número de indução (*Low Induction Number – LIN*) produzem anomalias eletromagnéticas muito baixas e de difícil interpretação. Para suprir esta deficiência, neste trabalho são estudados a aplicabilidade de campos eletromagnéticos polarizados e focalizados – POLFOCEM como fonte primária de indução. Os campos E.M. focalizados e polarizados, vertical e horizontalmente, são obtidos pelas combinações vetoriais de pares de dipolos transmissores e, ocorrem na região central entre eles. A focalização é observada nesta região na profundidade de 0,25 do espaçamento entre esses transmissores – L. Portanto, máximos acoplamentos podem ser obtidos através da seleção da polarização de acordo com a geometria do alvo, ocorrendo um aumento na densidade de fluxo magnético sobre ele e, máximas anomalias produzidas. É utilizada uma metodologia numérica para o cômputo dessas anomalias por meio da técnica dos elementos finitos para solução do problema 2,5-D. Em todos os experimentos numéricos são realizadas comparações qualitativas e quantitativas entre as respostas obtidas pelos sistemas POLFOCEM e convencional, o qual emprega um único dipolo como transmissor (dipolo-dipolo). As anomalias produzidas pelo sistema POLFOCEM, em que os dipolos transmissores são acionados simultaneamente, correspondem à soma das anomalias produzidas por cada um desses dipolos independentes, caracterizando, desta forma, a linearidade dos campos eletromagnéticos. Os experimentos numéricos são realizados para alvos prismáticos bidimensionais com três diferentes inclinações, inseridos num semi-espaço resistivo, e para as frequências das fontes na faixa das ondas de rádio. As anomalias assimétricas no sistema convencional, que se tornam simétricas no sistema POLFOCEM, apresentam valores menores em amplitude. Contudo, aquelas anomalias tanto assimétricas quanto simétricas que se tornam anti-simétricas apresentam valores maiores. Em decorrência dessas diminuições e aumentos nas amplitudes ocorrem rotações nos diagramas de Argand, no sentido horário e anti-horário para alvos com baixos valores de condutividade, respectivamente. Em experimentos de identificação de presença de dois alvos próximos, o sistema convencional é capaz de identificá-los primeiramente, prevalecendo o seu uso.

ABSTRACT

In the near surface investigations employing advanced electromagnetic induction methods, the low induction number – LIN targets produce very low anomalies which are difficult to interpret. To overcome this difficulty, in this thesis I have studied the applicability of the Polarized Focused Electromagnetic – POLFOCEM fields as a primary inductive source. The horizontal and vertical E.M. field polarizations are obtained by the vectorial combinations of the fields due to the coil pairs in the central region between them; and the focalization occurs in this region at a depth 0.25 of the spacing between the transmitting coils – L . Therefore, maximum coupling can be obtained by selecting the field polarizations depending upon the geometry of the target and focusing the magnetic flux on it by varying L ; consequently producing higher anomalies. This study has been realized by computing anomalies employing the Finite Element Technique for 2.5D problem. In all these numerical experiments a comparative qualitative and quantitative study has been done between the POLFOCEM anomalies and the conventional system anomalies where only one transmitter is used (dipole-dipole system). The POLFOCEM system anomalies, wherein both transmitters T_1 and T_2 are energized simultaneously, correspond to the sum of the anomalies produced by the T_1 -R and R- T_2 dipoles independently; obeying in this way the linearity of the electromagnetic fields. These numerical experiments have been carried out for a bidimensional prismatic model in a resistive half-space at three different inclinations and using radio frequencies. The asymmetrical anomalies obtained in a conventional coil system become symmetrical in POLFOCEM system, and have their amplitudes reduced in relation to that of the conventional system. On the other hand conventional anomalies, symmetrical or asymmetrical, become anti-symmetrical in POLFOCEM, and have their amplitude increased. As a consequence, the Argand diagrams of LIN targets for conventional coil system suffer respectively anticlockwise or clockwise rotation for POLFOCEM system. The experiments, to verify the quality in identifying the two nearby targets, shows that the conventional system is superior in relation to the POLFOCEM system.

1 INTRODUÇÃO

Em estudos de geofísica rasa como na arqueologia, meio ambiente e geotecnia, que empregam métodos indutivos eletromagnéticos (E.M.), os alvos investigados são conhecidos como de “baixo número de indução” (*Low Induction Number – LIN*), devido às baixas condutividades. Os mesmos produzem anomalias eletromagnéticas normalmente menores que 1% e, conseqüentemente, são difíceis de serem interpretadas, pois os ruídos geológicos interferem significativamente nestas anomalias.

Para investigar estes alvos foram desenvolvidas novas técnicas e ferramentas de investigação indireta da subsuperfície terrestre através do emprego de equipamentos com alta resolução e precisão nas técnicas de campo, as quais foram impulsionadas pelos avanços na computação e microeletrônica, porém apresentam limitações quanto aos seus usos. Assim, equipamentos como o GPR – *Ground Penetrating Radar* (DANIELS *et al.* 1988, DAVIS e ANNAN 1989), RIM – *Radio Frequency Investigation Methods*, e os que operam no domínio do tempo curto até cinco mseg (VETEM – *Very Early Time Electromagnetic Methods*) são normalmente empregados para investigar estes alvos, porém são limitadas na profundidade de penetração/investigação, particularmente, em terrenos condutivos, além de demandarem altos custos dos equipamentos, técnicas de campo e processamento de dados mais sofisticados.

Essas anomalias eletromagnéticas são controladas basicamente por três aspectos básicos, e estão ilustradas na FIG 1.1, de uma forma bastante geral, elaborada por GRANT e WEST (1965). A saber: força eletromotriz induzida no alvo de acordo com a Lei de Faraday; o acoplamento mútuo entre o alvo e a bobina receptora; e o parâmetro resposta do alvo ($\alpha = \mu\sigma\omega L^2$), sendo μ a permeabilidade magnética ($\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m), σ a condutividade do meio, ω a frequência angular da fonte dada por $\omega = 2\pi f$ (frequência da fonte em Hz), e L distância entre fonte e receptor.

Então, levando em consideração estes três aspectos, o objetivo desta tese é estudar condições de máximo acoplamento entre a fonte dos campos eletromagnéticos primários com os alvos de baixa condutividade, para que a maior força eletromotriz seja induzida e flua maior corrente nestes e, conseqüentemente, maior anomalia seja produzida. Isto pode ser obtido

através da geração de campos focalizados em profundidade e polarizados vertical ou horizontalmente, conforme ilustra FIG 1.2.

Diversos trabalhos têm sido publicados nestes últimos 40 anos focalizando os campos E.M. primários. Em geofísica de poço tem-se a ferramenta de focalização laterolog (SCHLUMBERGER, 1972); a ferramenta de focalização com alta frequência sugerida por HAGIWARA (1985); CARVALHO (2000) que utilizou arranjo coplanar de dipolos para polarizar o campo defronte as interfaces das camadas, entre outros. Na superfície do terreno pode-se citar o trabalho de SPIES (1975) que utiliza o mesmo princípio de polarização só que emprega dois “loops” adjacentes, DUBUS et al (1978) empregaram um transmissor auxiliar colocado entre o transmissor principal e o receptor para aumentar as anomalias eletromagnéticas. Então, como sugerido por Hagiwara, é estudado um sistema onde é acrescentando um segundo dipolo transmissor ao convencional que emprega um único dipolo como fonte de campo primário.

Este novo sistema que emprega um par de transmissores será chamado de **POLFOCEM**, que é a síncope das seguintes palavras: **POL**arização e **FO**calização de **C**ampos **E**letr**M**agnéticos. A frequência desses transmissores corresponde a um valor compreendido entre o GPR e equipamentos que utilizam baixas frequências.

A seqüência de apresentação desta tese foi organizada da seguinte maneira.

No capítulo 2 é estudada a geração de campos polarizados e focalizados por meio da combinação vetorial das componentes vertical (H_z^p) e horizontal (H_x^p), empregando como fontes pares de transmissores iguais: Dipolos Magnéticos Verticais (DMV's) e Horizontais (DMH's).

No capítulo 3 é apresentada a metodologia numérica escolhida para o cômputo dos campos magnéticos secundários (anomalias eletromagnéticas), empregando técnica dos elementos finitos para solução do problema de dimensões 2,5. Também são efetuados estudos comparativos dos efeitos da polarização e da focalização sobre alvos condutivos para o sistema POLFOCEM, quanto para os sistemas de arranjos de dipolos convencionais, nas mesmas situações de alvos.

No capítulo 4 é estudada a capacidade do sistema POLFOCEM em separar dois alvos prismáticos condutivos vizinhos (próximos), determinando se este ou o convencional é capaz de identificar alvos com menor espaçamento entre si.

No capítulo 5 é realizada uma análise quantitativa e qualitativa dos resultados, empregando o sistema convencional e o POLFOCEM, por meio de diagramas de Argand, considerando os alvos com baixos e altos valores de condutividade em diferentes profundidades.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas às conclusões desta tese.

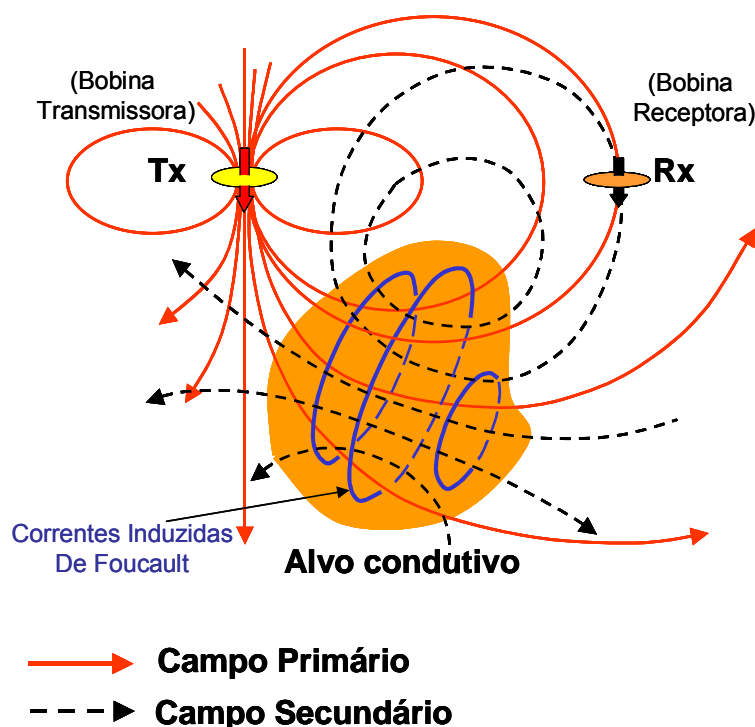


FIGURA 1.1 – Diagrama esquemático do princípio físico dos métodos de prospecção por indução eletromagnética (GRANT e WEST, 1965).

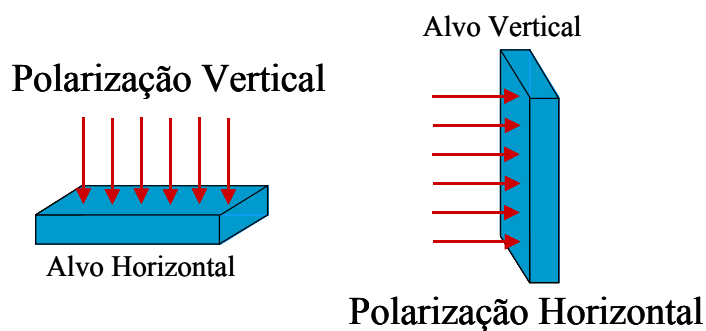


FIGURA 1.2 – Situação de máximo acoplamento magnético entre campo primário e alvo.

2 GERAÇÃO DE CAMPOS POLARIZADOS-FOCALIZADOS

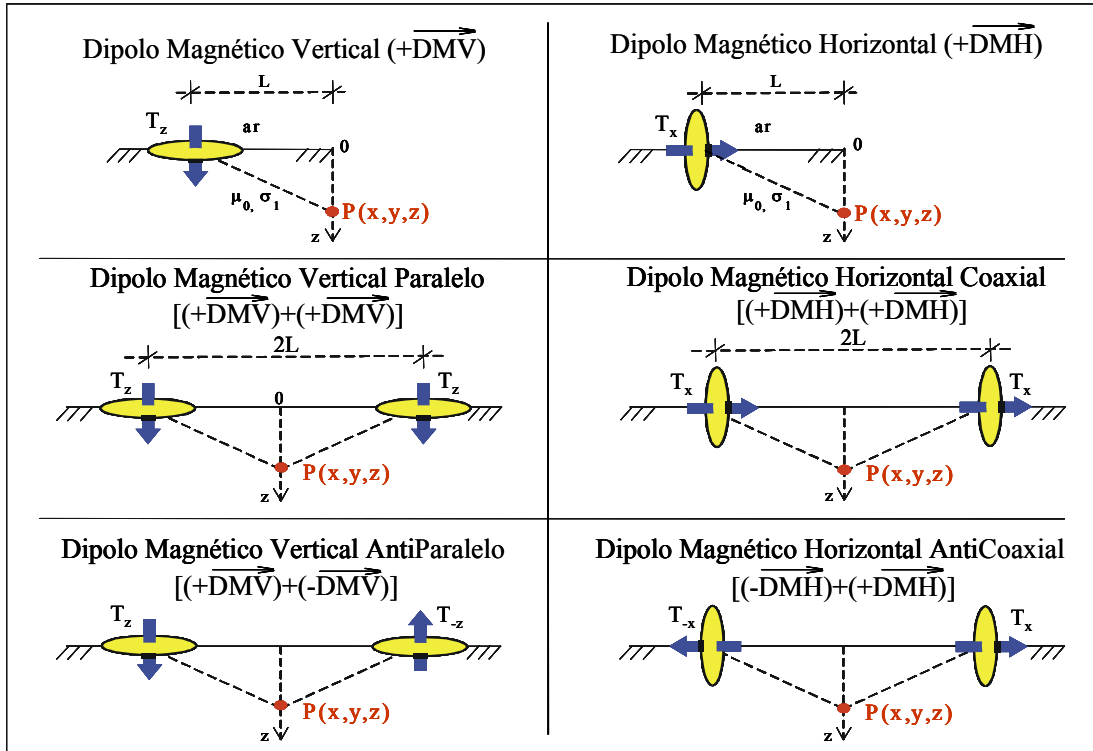
Os campos primários focalizados em profundidade com polarização vertical ou horizontal foram gerados pelas combinações das configurações de pares de Dipolos Magnéticos Verticais (\overline{DMV}) e Horizontais (\overline{DMH}), por meio da soma vetorial de suas componentes (vertical H_z^P e horizontal H_x^P). Os métodos de cálculo de obtenção dessas componentes em um semi-espaço são amplamente conhecidos e são apresentados no Anexo 1 (HOHMANN, 1988; KAUFMAN e KELLER, 1989 e RIJO, 1990). Essas componentes verticais e horizontais são escritas na forma da transformada de Hankel e de Fourier com relação à variável orientada segundo o eixo “y” do sistema cartesiano.

Adotou-se a convenção de sinal positivo ou negativo dentro dos parênteses em cada sistema para representar o sentido do momento magnético de cada um e a geometria desses transmissores, conforme ilustra a FIG. 2.1, em que se têm os dipolos verticais paralelos $\left[\left(+ \overline{DMV} \right) + \left(+ \overline{DMV} \right) \right]$, verticais antiparalelos $\left[\left(+ \overline{DMV} \right) + \left(- \overline{DMV} \right) \right]$, horizontais coaxiais $\left[\left(+ \overline{DMH} \right) + \left(+ \overline{DMH} \right) \right]$ e horizontais antioaxiais $\left[\left(- \overline{DMH} \right) + \left(+ \overline{DMH} \right) \right]$, representados no item (a) desta figura, respectivamente, como também o vertical e horizontal $\left[\left(+ \overline{DMV} \right) + \left(+ \overline{DMH} \right) \right]$, antivertial e anti-horizontal $\left[\left(- \overline{DMV} \right) + \left(- \overline{DMH} \right) \right]$, vertical e anti-horizontal $\left[\left(+ \overline{DMV} \right) + \left(- \overline{DMH} \right) \right]$ e antivertial e horizontal $\left[\left(- \overline{DMV} \right) + \left(+ \overline{DMH} \right) \right]$, representados no item (b). As setas nos dipolos determinam o sentido das correntes que fluem nos mesmos operando com frequência de 10 kHz, podendo ser horário ou anti-horário naquele instante, *i.e.*, 180° fora de fase entre os transmissores.

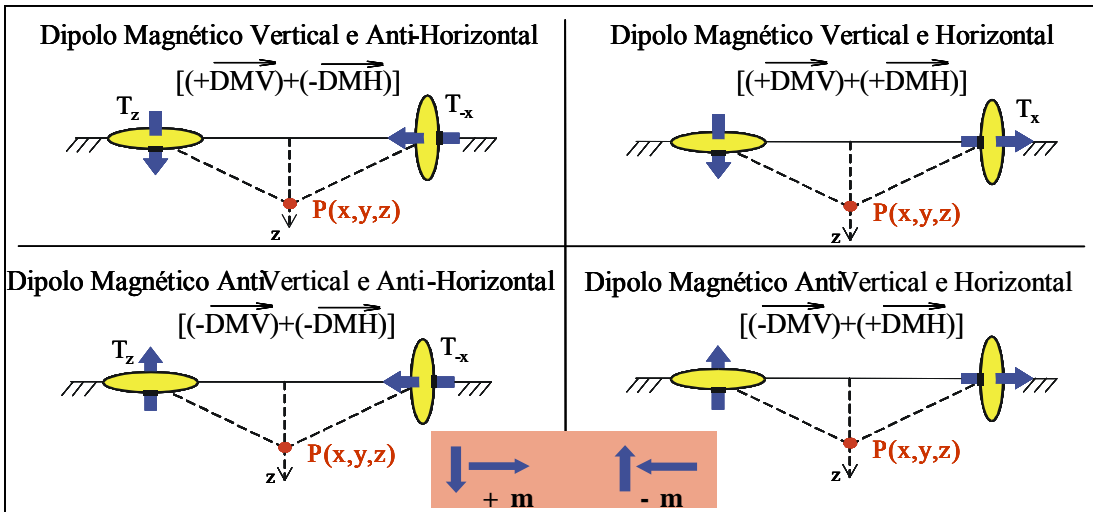
O espaçamento entre o par de transmissores é de $2L$, em que L é a metade da distância entre eles, correspondendo à distância entre transmissor-receptor no sistema convencional. Neste estudo o módulo do momento magnético dos dipolos foi considerado unitário com $m_x = m_z = \pm 1 \text{ A.m}^2$, posicionados na superfície de um semi-espaço homogêneo de condutividade $\sigma = 0,001 \text{ S/m}$.

Nas FIG. 2.2, 2.3, 2.6, 2.7, 2.10 e 2.11 estão representadas as distribuições vetoriais dos campos no semi-espaço. Esses vetores foram normalizados pelo campo total em cada

ponto tornando-os unitários para que se pudessem observar os efeitos da polarização, pois é muito alta a intensidade dos campos próximos aos dipolos.



(a)



(b)

FIGURA 2.1 – No item (a), colunas da esquerda e da direita, as combinações entre os dipolos \overline{DMV} 's e \overline{DMH} 's, respectivamente e, no item (b) as combinações entre o \overline{DMV} e \overline{DMH} . Setas que apontam nos sentidos de cima para baixo e da esquerda para a direita representam dipolos com momentos magnéticos positivos e nos sentidos opostos os dipolos com momentos negativos.

2.1 POLARIZAÇÃO VERTICAL

A polarização vertical, na região central entre os transmissores, pode ser obtida por meio das configurações de dipolos verticais paralelos $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMV} \right) \right]$ e horizontais antiaxiais $\left[\left(- \overrightarrow{DMH} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$, conforme ilustram as FIG. 2.2 e 2.3, respectivamente. Sendo que nos itens (a) de cada uma delas estão representados os campos gerados pelos dipolos separadamente, e nos itens (b), os campos são calculados quando os dipolos são acionados simultaneamente. Note que durante a soma dos campos as componentes horizontais (H_x^p) se anulam em $X/L = 0$ prevalecendo somente a componente vertical, caracterizando, desta forma, a polarização vertical.

Na região central ($X/L = 0$) para o sistema $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMV} \right) \right]$, FIG 2.2, há inversão de 180° no sentido destes vetores na profundidade aproximada de $Z/L = 0,7$ (representado pelo retângulo tracejado), sendo que acima deste ponto os vetores são de baixo para cima e abaixo deste ponto têm sentido de cima para baixo. Este mesmo efeito não se observa para o sistema com dipolos horizontais antiaxiais $\left[\left(- \overrightarrow{DMH} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$, FIG 2.3, onde eles apresentam o mesmo sentido.

Por conta destes efeitos é possível identificar regiões de máximas intensidades dos campos magnéticos em Tesla, ilustradas na FIG 2.4, calculadas na região central entre os transmissores. Observa-se que para os sistemas $\left[\left(- \overrightarrow{DMH} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$ e \overrightarrow{DMH} estas zonas ocorrem na profundidade aproximada de $Z/L = 0,5$, caracterizando zona de foco, sendo que para o sistema $\left[\left(- \overrightarrow{DMH} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$ a intensidade é o dobro do valor do que é calculado para o sistema convencional de um único transmissor \overrightarrow{DMV} , pois a potência da fonte é dobrada devido ao acréscimo de um segundo transmissor com a mesma potência do primeiro. Porém para o sistema com par de dipolos verticais paralelos $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMV} \right) \right]$ não ocorre zona de foco e o campo é máximo na superfície do terreno e nulo em aproximadamente $Z/L = 0,7$. Sendo nulo o campo não há correntes induzidas nos alvos e, conseqüentemente, não há anomalias produzidas.

Uma outra forma sugerida para a visualização da região de foco está representada na FIG. 2.5, em que foram desenhados mapas de distribuição das magnitudes relativas às componentes vertical (H_z^P) e horizontal (H_x^P) dos campos magnéticos. Para gerar estas figuras, primeiramente, calcularam-se essas componentes para o dipolo da esquerda, normalizando-os em cada ponto pelo campo total devido apenas à contribuição deste dipolo. O mesmo procedimento foi realizado também para o dipolo da direita. Logo em seguida foram somadas as componentes dos dois dipolos, conforme regra abaixo:

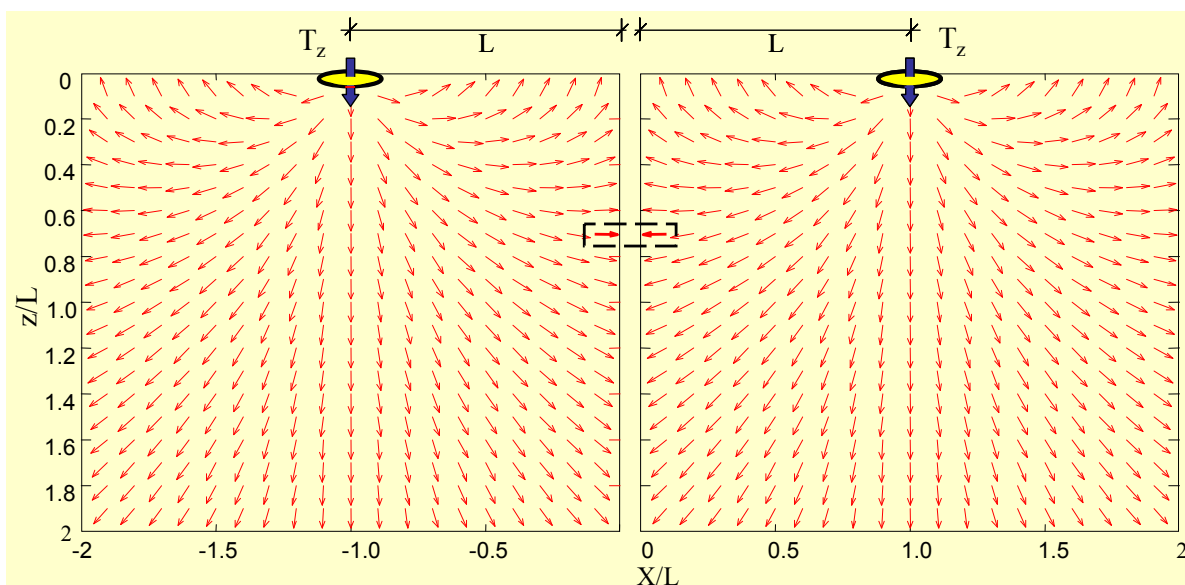
$$\left(\frac{(H_z^P)_1}{\sqrt{(H_x^P)_1^2 + (H_z^P)_1^2}} \right)_1 + \left(\frac{(H_z^P)_2}{\sqrt{(H_x^P)_2^2 + (H_z^P)_2^2}} \right)_2, \quad (2.1)$$

e as componentes horizontais, com:

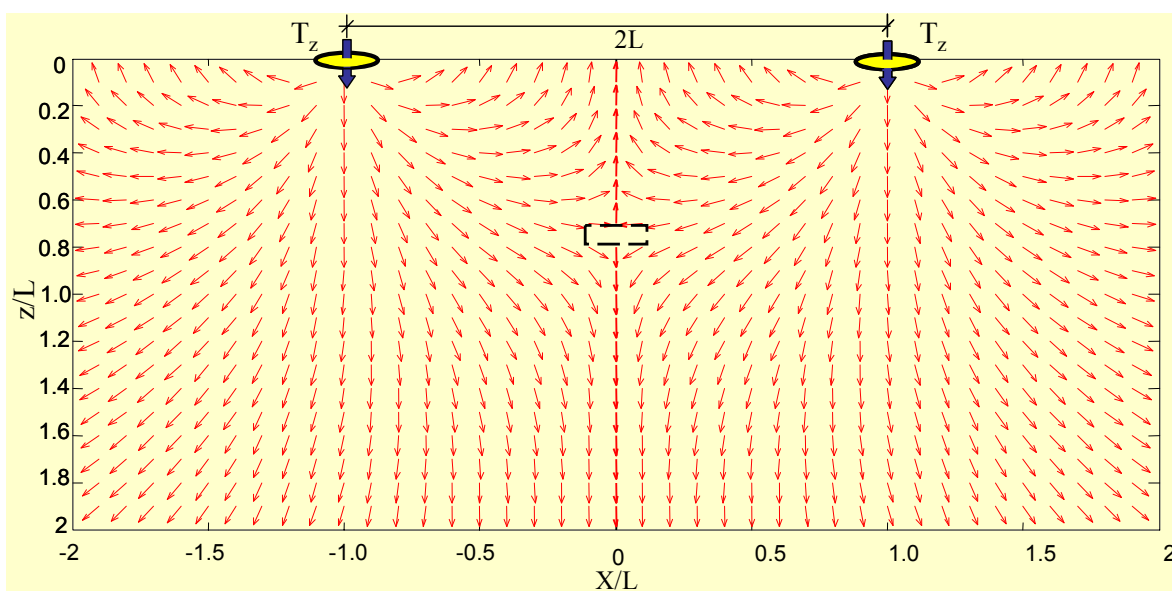
$$\left(\frac{(H_x^P)_1}{\sqrt{(H_x^P)_1^2 + (H_z^P)_1^2}} \right)_1 + \left(\frac{(H_x^P)_2}{\sqrt{(H_x^P)_2^2 + (H_z^P)_2^2}} \right)_2. \quad (2.2)$$

Note que os índices 1 e 2 representam os dipolo da esquerda e da direita, respectivamente. Observa-se que na FIG. 2.5 (a) e (c), no plano XZ e YZ, existe o máximo valor de campo em $Z/L = 0,5$, caracterizando a região de foco. Na FIG. 2.5 (b), a componente horizontal em $X/L = 0$ é nula, demonstrando assim que só existe a componente vertical na região central entre os transmissores.

Então, as configurações de dipolos verticais paralelos $\left[(+\overline{DMV}) + (+\overline{DMV}) \right]$ e horizontais antiaxiais $\left[(-\overline{DMH}) + (+\overline{DMH}) \right]$ polarizam os campos verticalmente na região central entre os transmissores, porém, apenas a configuração $\left[(-\overline{DMH}) + (+\overline{DMH}) \right]$ polariza e focaliza esses campos.

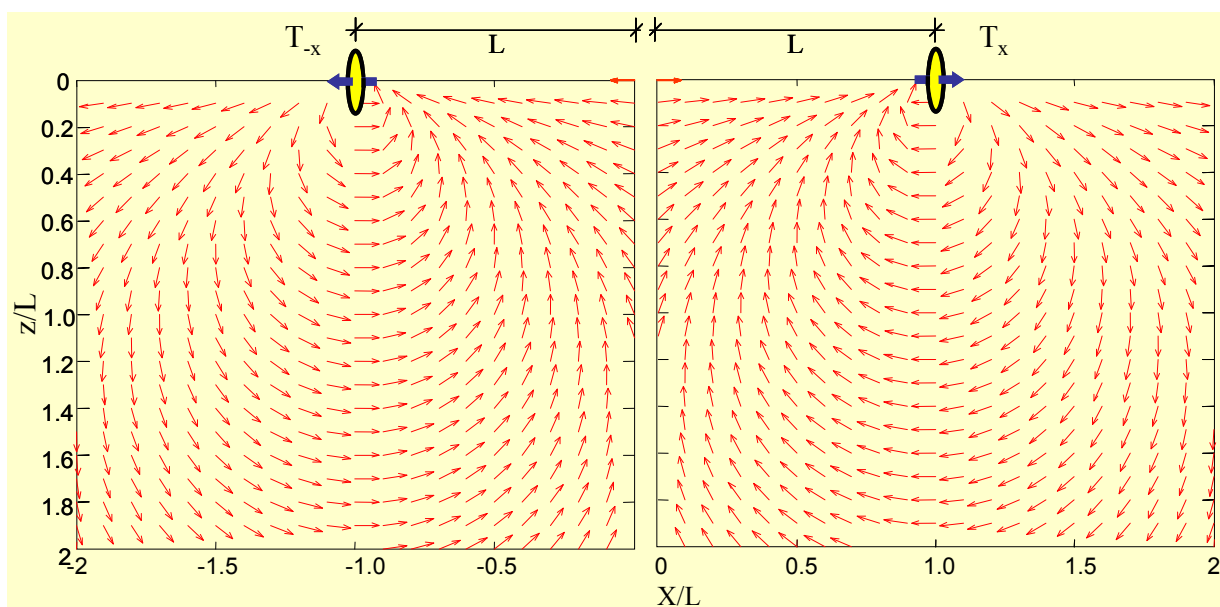


(a)

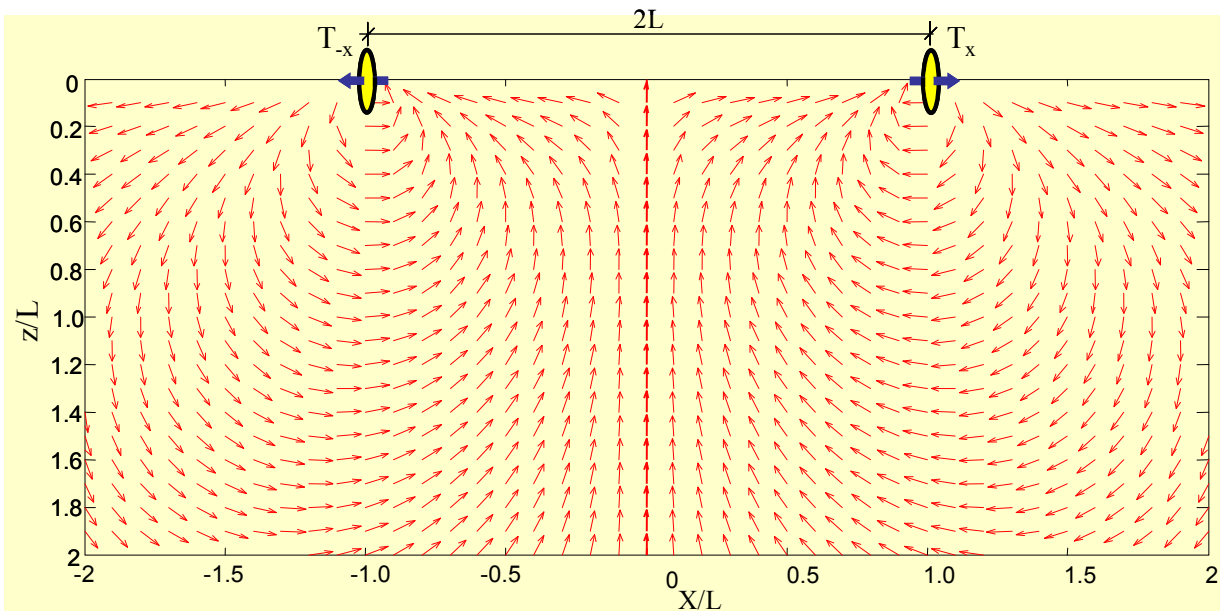


(b)

FIGURA 2.2 – Mapas direcionais dos campos magnéticos no plano X-Z calculados num semi-espço de condutividade 10^{-3} S/m. No item (a) dois Dipolos Magnéticos Verticais (\overline{DMV}) acionados separadamente e, em (b) dois Dipolos Magnéticos Verticais Paralelos $\llbracket +\overline{DMV} \rrbracket + \llbracket +\overline{DMV} \rrbracket$ acionados simultaneamente, polarizando verticalmente os campos em $X/L = 0$. As escalas estão normalizadas pela abertura L. A porção destacada pelo retângulo tracejado representa região de campo nulo que corresponde à profundidade aproximada de $Z/L = 0,7$.



(a)



(b)

FIGURA 2.3 – Mapas direcionais dos campos magnéticos no plano X-Z calculados num semi-espço de condutividade 10^{-3} S/m. No item (a) dois Dipolos Magnéticos Horizontais ($\overline{\text{DMH}}$) acionados separadamente e, em (b) dois Dipolos Magnéticos Horizontais antiaxiais $\{[-\overline{\text{DMH}}] + [+ \overline{\text{DMH}}]\}$ acionados simultaneamente, polarizando verticalmente os campos em $X/L = 0$. As escalas estão normalizadas pela abertura L.

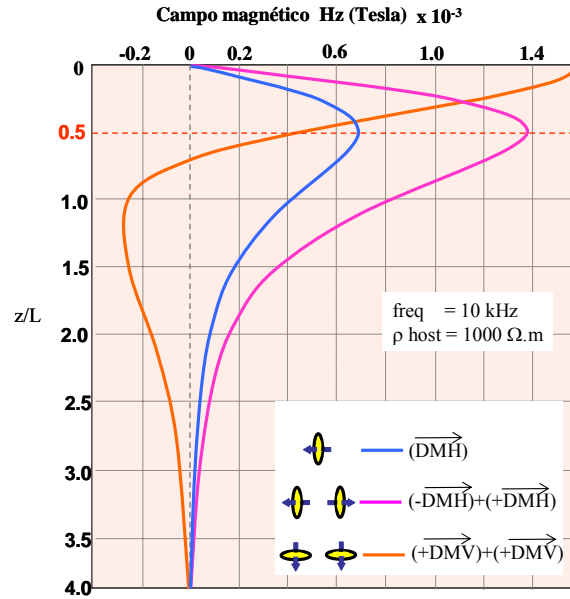


FIGURA 2.4 – Variação em profundidade da intensidade dos campos magnéticos em Tesla, na região central entre os transmissores, para os sistemas: convencional \overline{DMH} e POLFOCEM $\left[(-\overline{DMH})+(\overline{DMH})\right]$ que focalizam os campos em profundidade e, o $\left[(+\overline{DMV})+(\overline{DMV})\right]$ que não os focaliza.

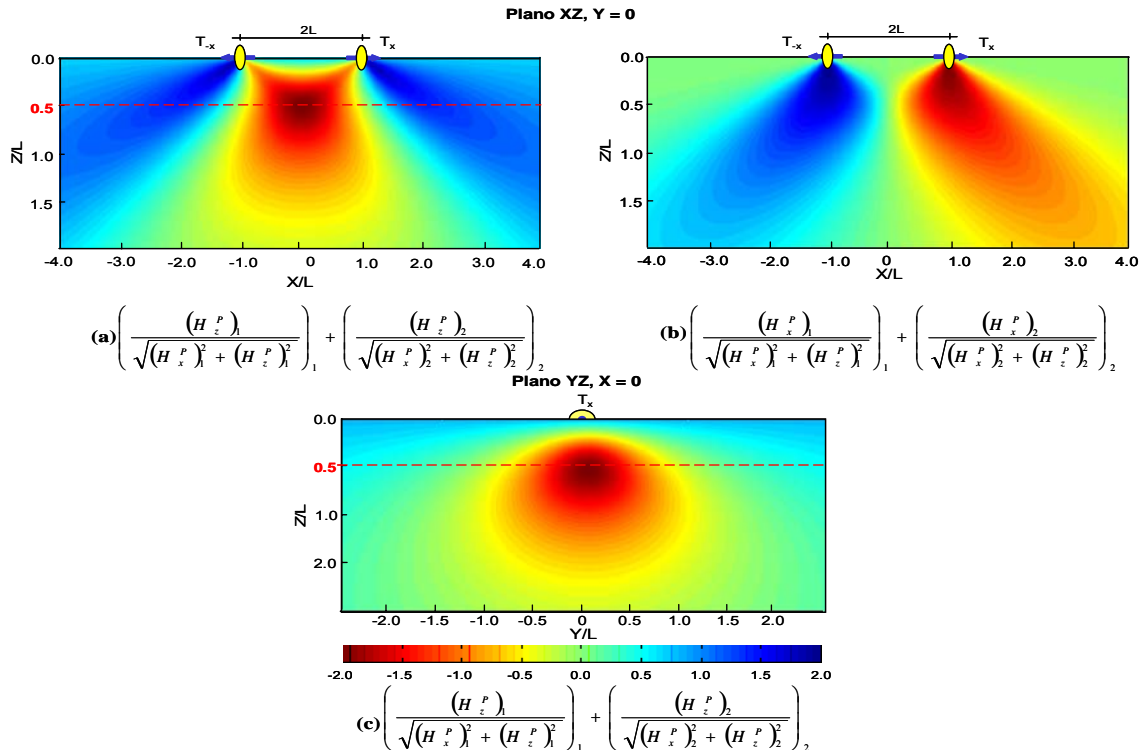


FIGURA 2.5 – Mapa de magnitudes relativas às componentes H_x^p e H_z^p dos campo magnéticos com polarização vertical calculada para a configuração $\left[(-\overline{DMH})+(\overline{DMH})\right]$, nos planos XZ e YZ.

2.2 POLARIZAÇÃO HORIZONTAL

A polarização horizontal, na região central entre os transmissores, pode ser obtida combinando os dipolos horizontais coaxiais $\left[\left(+ \overrightarrow{DMH} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$ e verticais antiparalelos $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(- \overrightarrow{DMV} \right) \right]$, conforme ilustram as FIG. 2.6 e 2.7, respectivamente. Sendo que nos itens (a) de cada uma delas estão representados os campos gerados pelos dipolos separadamente, e nos itens (b), os campos calculados quando os dipolos são acionados simultaneamente. Para esta polarização a componente que se anula nesta região central é a vertical (H_z^P). Desta forma apenas os vetores horizontais (componente horizontal H_x^P) é que apresentam valores de intensidades dos campos.

Analisando a distribuição dos vetores em $X/L = 0$, observa-se que para o sistema $\left[\left(+ \overrightarrow{DMH} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$, ilustrado na FIG. 2.6, há inversão de 180° no sentido dos vetores na profundidade aproximada de $Z/L = 1,36$ (representada pelo retângulo tracejado), assim, acima desta profundidade, os vetores são da esquerda para a direita e abaixo desta, da direita para a esquerda, ficando nulo o campo total neste ponto. Já para o sistema $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(- \overrightarrow{DMV} \right) \right]$ este fato não ocorre, todos os vetores têm um único sentido, conforme FIG. 2.7, como consequência deste último efeito ocorre focalização em profundidade.

São ilustradas na Figura 2.8 as intensidades dos campos magnéticos em Tesla, calculados na região central entre os transmissores. Existe novamente a presença de zona de foco na profundidade aproximada de $Z/L = 0,5$, geradas pelos sistemas \overrightarrow{DMV} e $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(- \overrightarrow{DMV} \right) \right]$, sendo que a intensidade deste último é o dobro do valor do que é calculado para o primeiro, pois a potência da fonte é dobrada devido ao acréscimo de um segundo transmissor com a mesma potência do primeiro. No sistema $\left[\left(+ \overrightarrow{DMH} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$ o campo é máximo na superfície do terreno e nulo na profundidade aproximada de $Z/L = 1,36$. Sendo nulo não há correntes induzidas nos alvos e, conseqüentemente, não há anomalias produzidas.

É sugerido uma segunda forma de visualização da zona de foco através de mapas de distribuição das magnitudes relativas às componentes vertical (H_z^P) e horizontal (H_x^P) dos

campos magnéticos, calculados exatamente igual ao que foi realizado para a polarização vertical. Assim, na FIG. 2.9 (a) e (c), nos planos XZ e YZ, respectivamente, estão representadas as componentes horizontais H_x^p , assinalando a região de foco em $Z/L = 0,5$. E no item (b) é ilustrada a componente vertical, observa-se que em $X/L = 0$ esta componente é nula.

Então, as configurações de dipolos horizontais coaxiais $\left[\left(+ \overrightarrow{DMH} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$ e verticais antiparalelos $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(- \overrightarrow{DMV} \right) \right]$ polarizam verticalmente os campos horizontalmente na região central entre os transmissores, porém apenas a configuração $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(- \overrightarrow{DMV} \right) \right]$ polariza e focaliza esses campos em profundidade.

2.3 CAMPOS ASSIMÉTRICOS

Quatro outras possíveis combinações de pares de dipolos verticais e horizontais assimetricamente postos foram estudados e, como consequência desta combinação, produziram campos assimétricos, conforme ilustram as FIG. 2.10 e 2.11.

Para a FIG. 2.10 a combinação de dipolos vertical e outro horizontal $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$ e de dipolos antiverticial e anti-horizantal $\left[\left(- \overrightarrow{DMV} \right) + \left(- \overrightarrow{DMH} \right) \right]$, itens (a) e (b), respectivamente.

Para a FIG. 2.11 as seguintes combinações de dipolos vertical e anti-horizantal $\left[\left(+ \overrightarrow{DMV} \right) + \left(- \overrightarrow{DMH} \right) \right]$ e dipolos anti-verticial e horizontal $\left[\left(- \overrightarrow{DMV} \right) + \left(+ \overrightarrow{DMH} \right) \right]$, itens (a) e (b), respectivamente.

Apesar de apresentarem uma sutil polarização, não serão objetos de estudos nesta tese devido à distribuição assimétrica desses campos que, possivelmente, irão produzir anomalias assimétricas e de difícil interpretação.

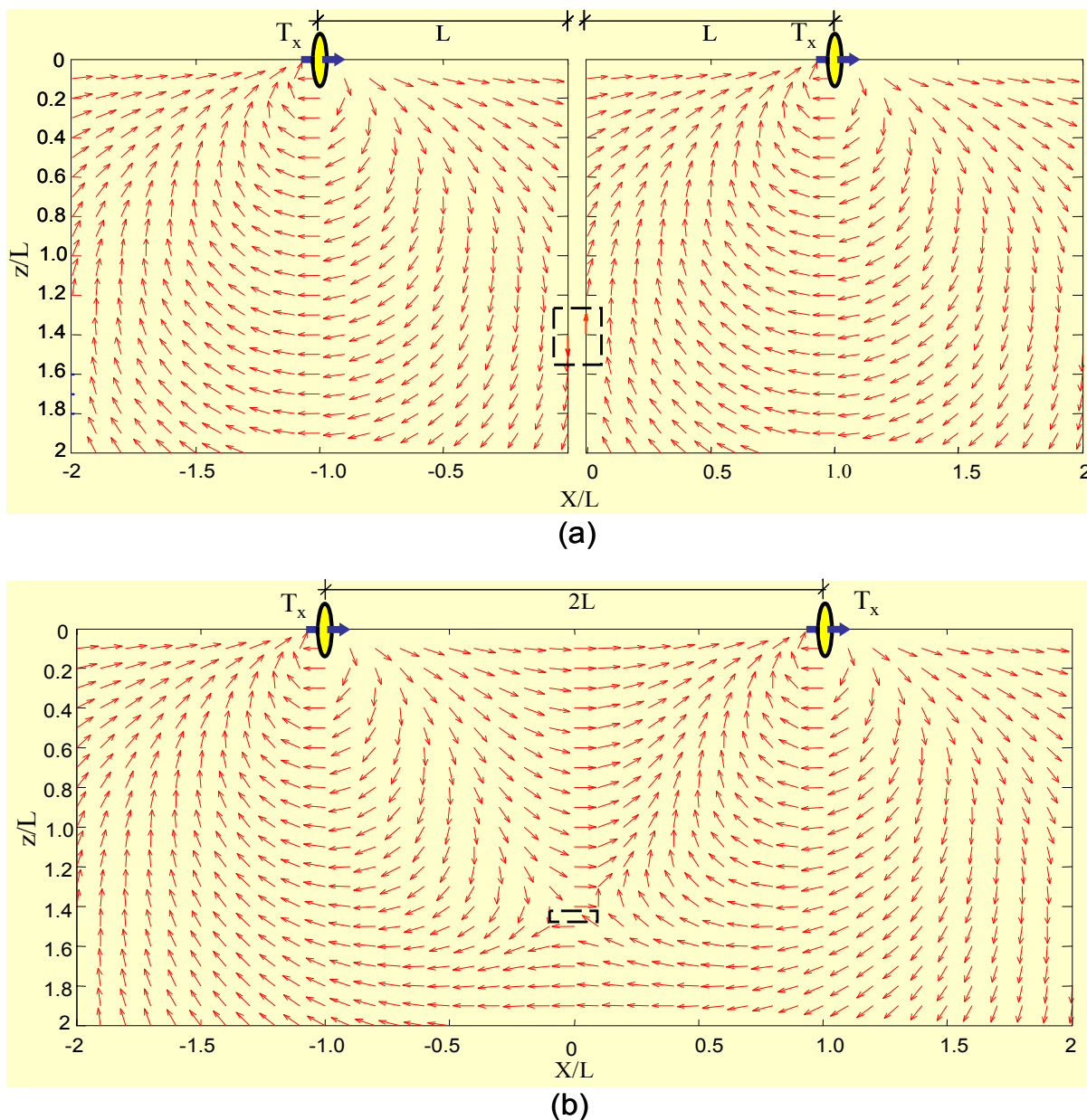
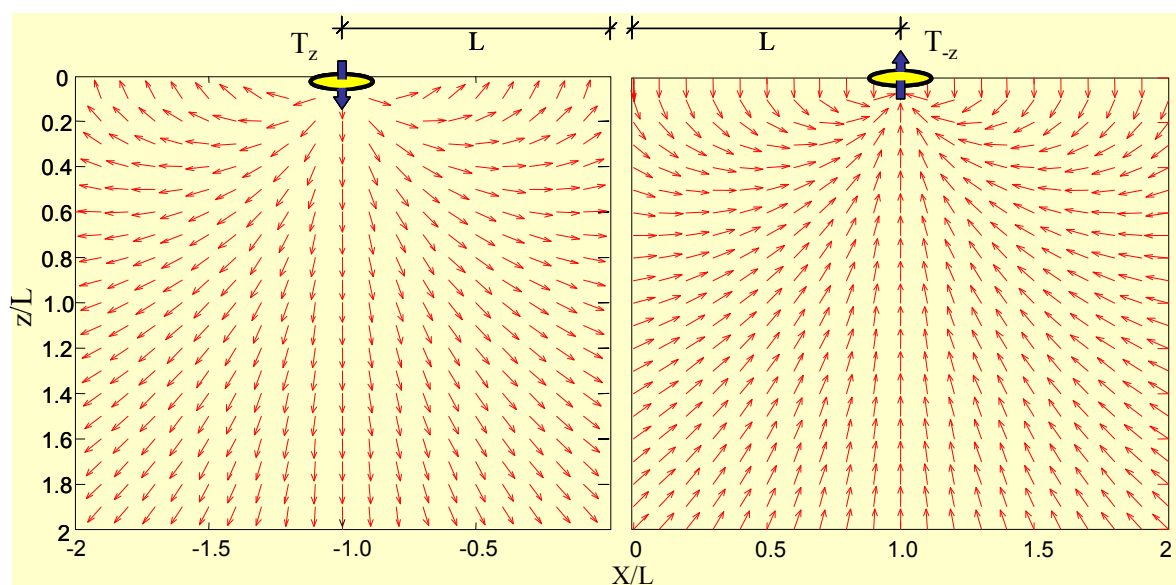
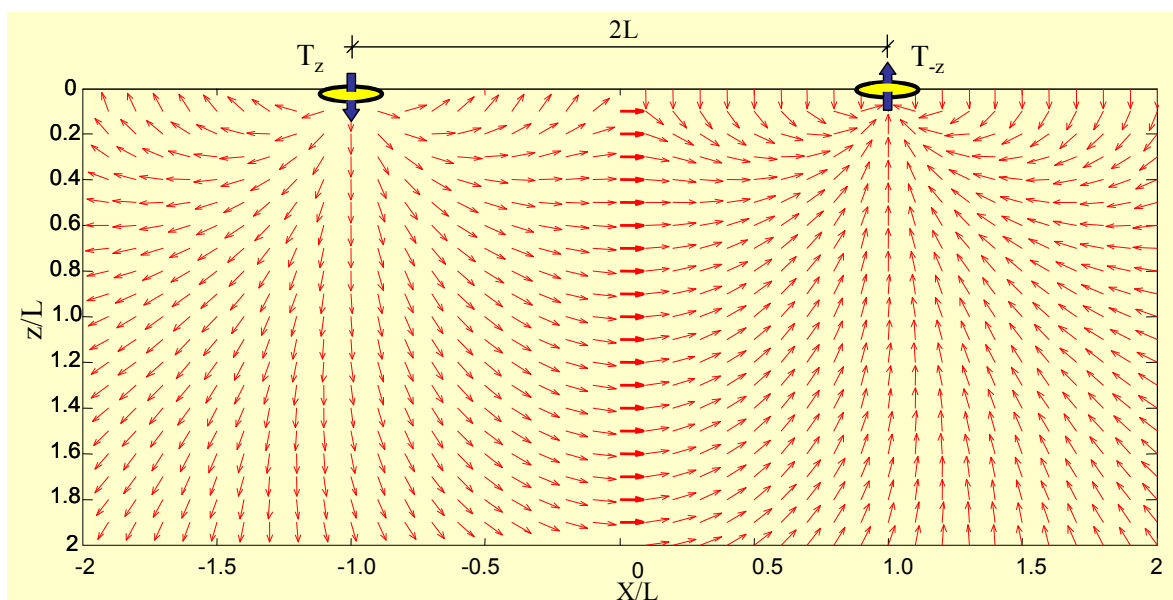


FIGURA 2.6 – Mapas direcionais dos campos magnéticos no plano X-Z calculados num semi-espço de condutividade 10^{-3} S/m. No item (a) dois Dipolos Magnéticos Horizontais ($\overline{\text{DMH}}$) acionados separadamente e, em (b) dois Dipolos Magnéticos Horizontais Coaxiais $\left[(+\overline{\text{DMH}}) + (+\overline{\text{DMH}}) \right]$ acionados simultaneamente, polarizando horizontalmente os campos em $X/L = 0$. As escalas estão normalizadas pela abertura L . A porção destacada pelo retângulo tracejado representa região de campo nulo que corresponde à profundidade aproximada de $Z/L = 1,36$.



(a)



(b)

FIGURA 2.7 – Mapas de direção dos campos magnéticos no plano X-Z calculados num semi-espço de condutividade 10^{-3} S/m. No item (a) dois Dipolos Magnéticos Verticais (\overline{DMV}) acionados separadamente e, em (b) dois Dipolos Magnéticos Verticais antiparalelos $\left[\left(\overline{DMV} \right)_+ \left(\overline{DMV} \right)_- \right]$ acionados simultaneamente, polarizando horizontalmente os campos em $X/L = 0$. As escalas estão normalizadas pela abertura L.

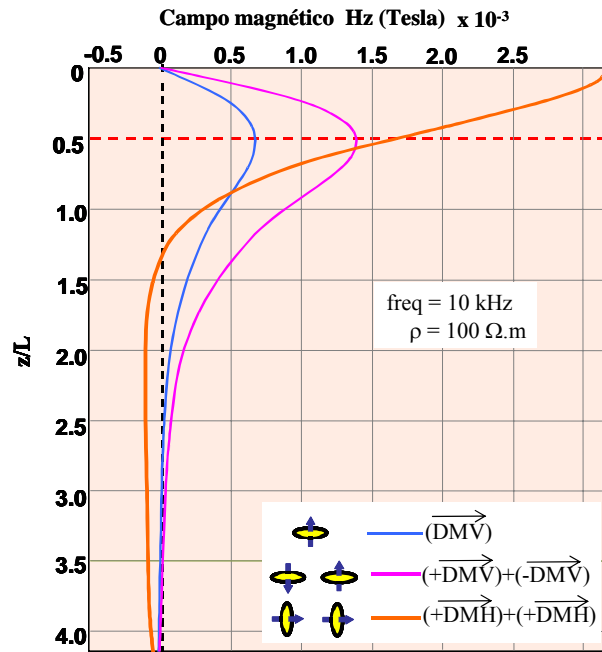


FIGURA 2.8 – Variação em profundidade da intensidade dos campos magnéticos em Tesla, na região central entre os transmissores, para os sistemas: convencional \overline{DMV} e POLFOCEM $\left[(+\overline{DMV}) + (-\overline{DMV}) \right]$ que focalizam os campos em profundidade e, o $\left[(+\overline{DMH}) + (+\overline{DMH}) \right]$ que não os focalizam.

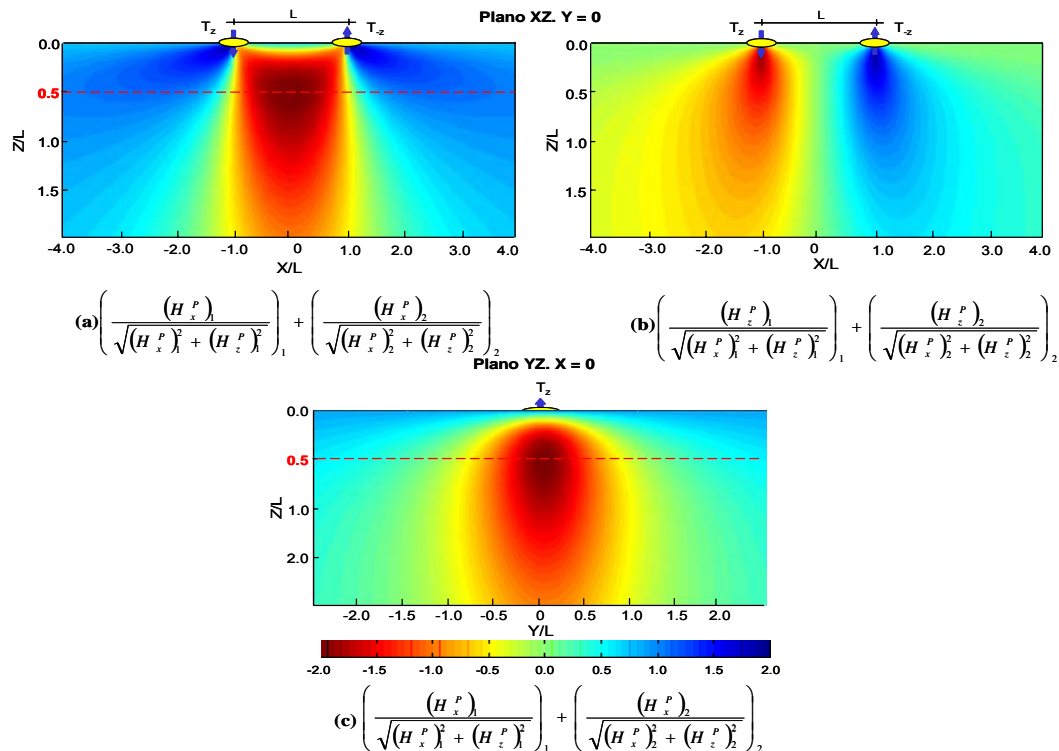


FIGURA 2.9 – Mapas de magnitudes relativas às componentes H_x^p e H_z^p do campo magnético com polarização horizontal calculadas para a configuração $\left[(+\overline{DMV}) + (-\overline{DMV}) \right]$, nos planos XZ e YZ.

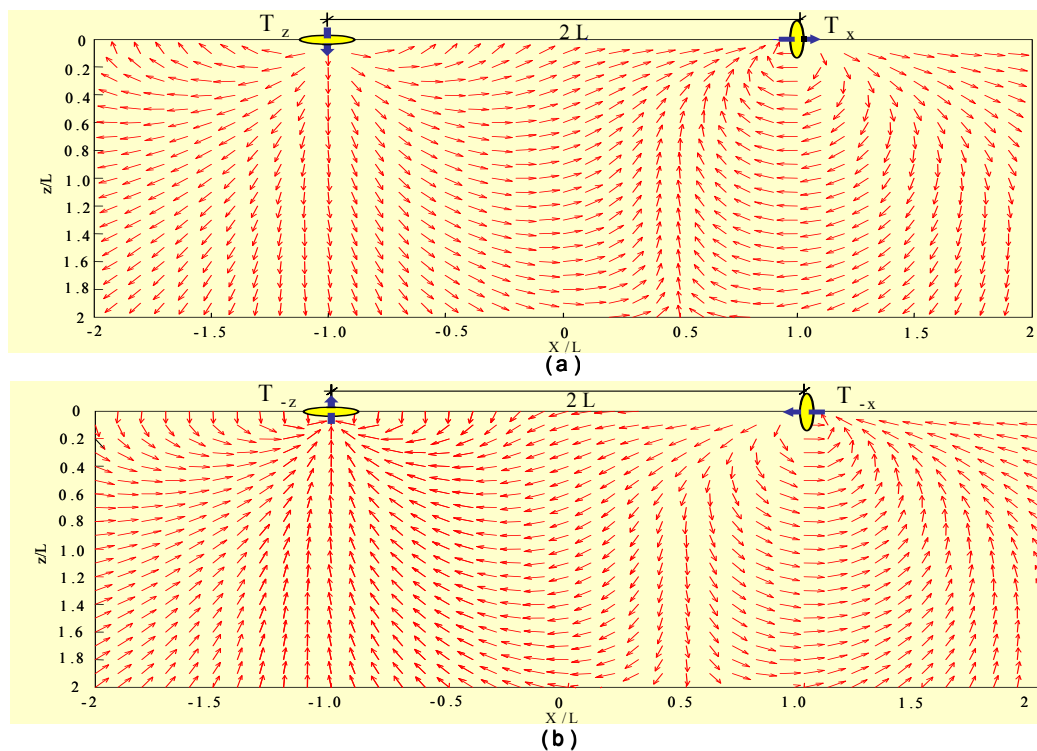


FIGURA 2.10 – Campos assimétricos sendo, em (a) um par de dipolos vertical e horizontal $\left[(+\overline{DMV})_+ (+\overline{DMH}) \right]$ e, em (b) dipolos antiverical e anti-horizantal $\left[(-\overline{DMV})_+ (-\overline{DMH}) \right]$.

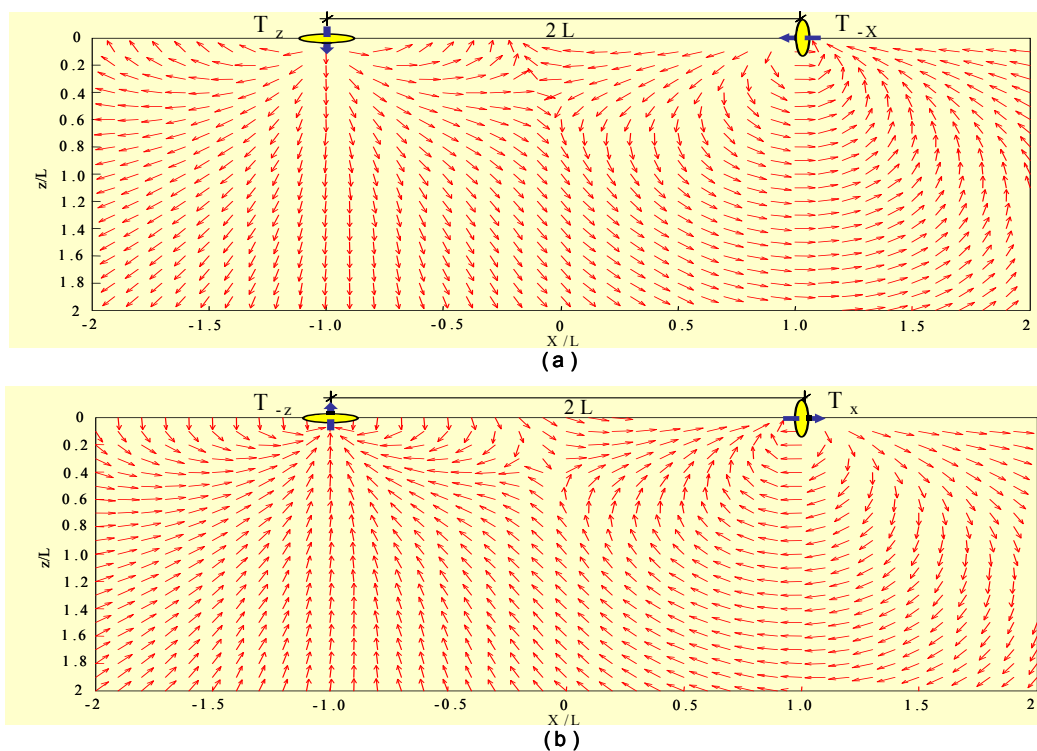


FIGURA 2.11 – Campos assimétricos sendo, em (a) um par de dipolos vertical e anti-horizantal $\left[(+\overline{DMV})_+ (-\overline{DMH}) \right]$ e, em (b) Dipolos antiverical e horizontal $\left[(-\overline{DMV})_+ (+\overline{DMH}) \right]$.

3 ANOMALIAS CALCULADAS NOS SISTEMAS CONVENCIONAIS E POLFOCEM

Neste Capítulo são calculadas anomalias eletromagnéticas por meio de modelagem numérica, com o objetivo de averiguar qualitativa e quantitativamente a influência dos campos polarizados e focalizados sobre alvos condutivos prismáticos, comparando esses resultados com os calculados para o sistema convencional que emprega um único dipolo como transmissor.

3.1 METODOLOGIA EMPREGADA

Diferentes técnicas numéricas são empregadas para os cálculos das anomalias eletromagnéticas, tais como os Elementos Finitos (EF), Diferenças Finitas (DF) e Equações Integrais (EI). Por uma questão de conveniência devido a um maior domínio da técnica foi adotada a de Elementos Finitos para solução do problema 2,5-D descrita no Anexo 2 (STOYER e GREENFIELD, 1976 e HOHMANN,1988).

Com o objetivo de validação da metodologia numérica são comparadas, na FIG. 3.1, as anomalias eletromagnéticas calculadas pela técnica dos elementos finitos com as obtidas por modelagem analógica (LOWRIE e WEST, 1965). Ambos os sistemas empregaram a configuração de dipolos ou bobinas magnéticas verticais (\overline{DMV}), respectivamente. São locadas as componentes EM-FASE e QUADRATURA das anomalias produzidas por um alvo vertical com número de indução $\alpha = 15$ ($\alpha = \omega \mu \sigma e L$), em que ω é a frequência angular da corrente elétrica na fonte, μ a permeabilidade magnética, σ a condutividade elétrica, e a espessura do alvo e L a distância entre transmissor e receptor, inserido num espaço homogêneo e isotrópico (ar atmosférico). As anomalias calculadas representam a componente vertical do campo secundário normalizada pela componente vertical do campo primário (H_z^S / H_z^P %). Observa-se que os resultados apresentam coerências entre si com sutis diferenças entre suas intensidades. Isto pode ter ocorrido, pois, na modelagem analógica, são empregadas bobinas que apresentam dimensões físicas da ordem de centímetros, influenciando nos acoplamentos entre transmissor-alvo-receptor, enquanto que para a

modelagem numérica, por se tratar de dipolos pontuais, não existe a influência das dimensões do transmissor e receptor.

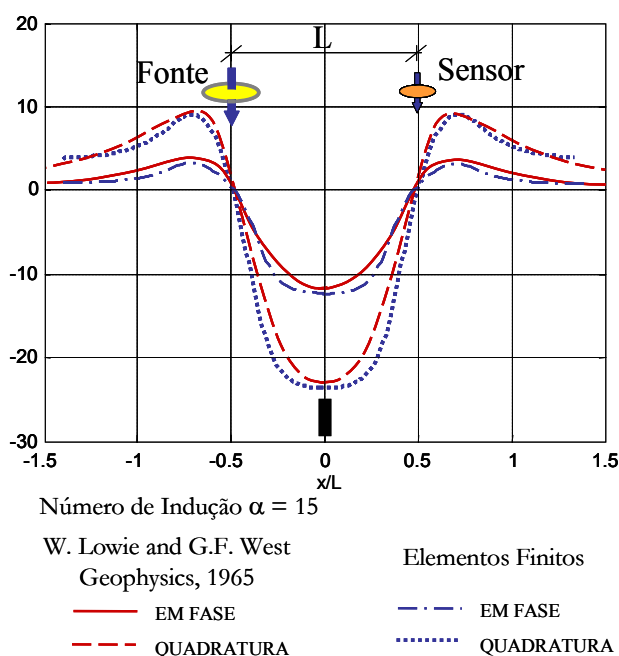


FIGURA 3.1 – Comparação entre as anomalias obtidas por modelagem analógica e por Elementos Finitos, para um alvo vertical com número de indução $\alpha = 15$, inserido num espaço homogêneo (ar atmosférico).

3.2 INFLUÊNCIA DA POLARIZAÇÃO

Nesta seção são apresentados os efeitos da influência de direção da polarização vertical e horizontal dos campos primários sobre alvos prismáticos condutivos, comparando as anomalias eletromagnéticas calculadas para o sistema POLFOCEM e convencional por meio de suas componentes vertical (H_z^s) e horizontal (H_x^p).

As anomalias foram geradas por alvos prismáticos bidimensionais com três diferentes inclinações: 90° , 45° e 0° , apresentando as seguintes dimensões: altura de 4 m, espessura de 0,4 m e comprimento infinito na direção do eixo “y”, simulando corpos bi-dimensionais, com condutividades de 1,0 S/m e 0,3 S/m. As dimensões dos alvos foram escolhidas considerando os espaçamentos entre os transmissores e a localização da zona de foco, de tal forma que

pudessem ser locados nesta zona a uma profundidade de $p = 4$ m em relação ao topo do alvo e a superfície do semi-espço com 10^{-3} S/m. A frequência dos transmissores é de 10 kHz e estão espaçados entre si no sistema POLFOCEM de $2L = 24$ m ($T_1 - R - T_2$) e no sistema convencional de $L = 12$ m ($T_1 - R$), em que a letra “R” representa a posição de cálculo dos campos secundários simulando a posição do receptor. Este experimento numérico consiste em deslocar o sistema POLFOCEM e o convencional numa linha horizontal em superfície perpendicular ao *strike* do alvo, ilustrada na FIG. 3.2.

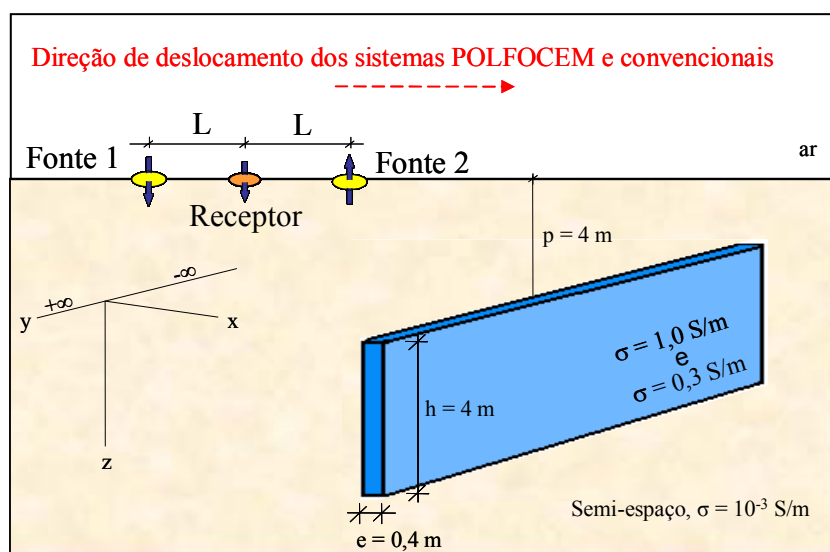


FIGURA 3.2 – Sistema de coordenadas do modelo adotado, assim como as condutividades dos alvos prismáticos e do semi-espço.

Para representar o ponto de cálculo das anomalias foram utilizados dipolos nas posições vertical para o cálculo das componentes verticais (H_z^S) e um outro horizontal para o cálculo das componentes horizontais (H_x^P), FIG. 3.3. Estes dipolos são utilizadas para melhor visualizar e explicar os acoplamentos que ocorrem entres os transmissores com o receptor e dos alvos com este último.

Os efeitos da polarização vertical foram estudados em duas situações dos alvos prismáticos em relação à zona de foco:

- SITUAÇÃO I – Os alvos, independentes de suas inclinações, devem ter seus baricentros sempre inseridos na zona de foco para receber a máxima intensidade dos campos, conforme ilustra a FIG. 3.4 (a). Assim, a medida em que os alvos

foram inclinados à distância de seu topo a superfície do semi-espço sofreu variação. Para retirar os efeitos de profundidade e apenas um parâmetro ser variável (inclinação), fixou-se à distância do ponto de cálculo das anomalias ao topo dos alvos em $p = 4,0$ m ($p/L = 0,333$). Com isso, este ponto de cálculo é deslocado em profundidade, conforme está representado pelos asteriscos nesta figura. Este experimento é puramente hipotético e importante para avaliação da influência da zona de foco.

- SITUAÇÃO II – O ponto de cálculo está fixo na superfície do terreno alinhado com os transmissores. Como na situação anterior, a distância deste ponto ao topo do alvo é fixa, então, a medida que o alvo é inclinado, este se afasta da zona de foco, confira esquema na FIG. 3.4(b).

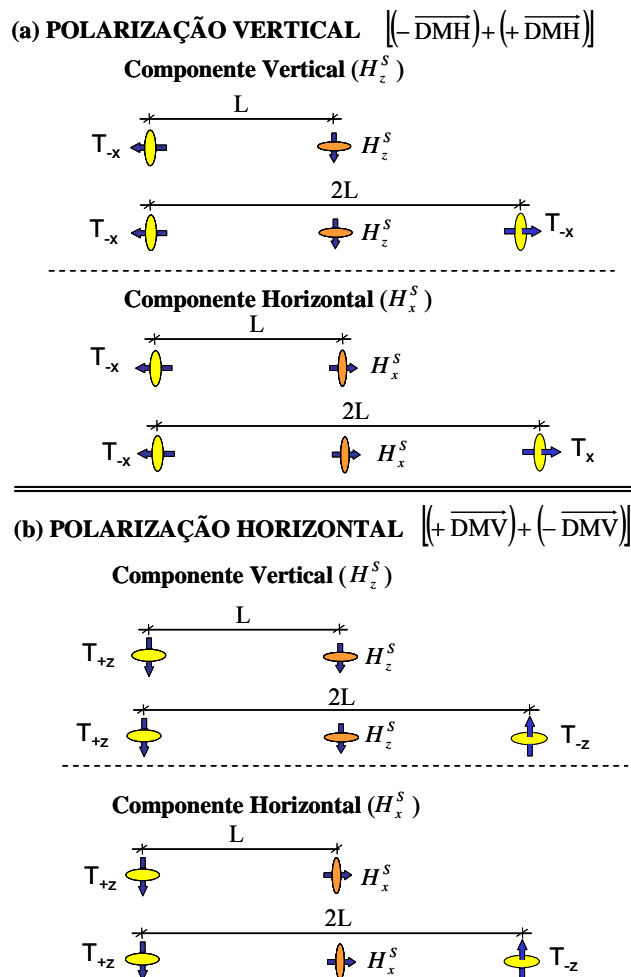


FIGURA 3.3 – Disposição geométrica dos receptores para o cálculo das anomalias eletromagnéticas, representadas por dipolos magnéticos verticais e horizontais.

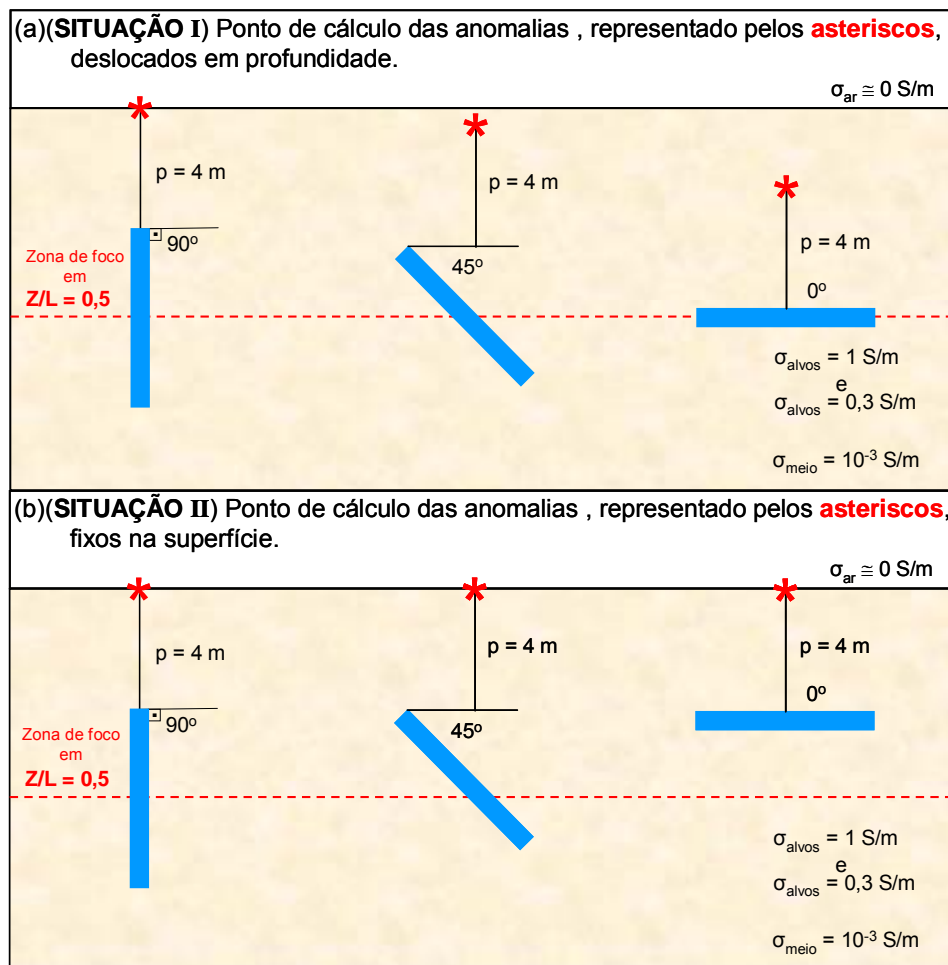


FIGURA 3.4 – Modelo geoeletrico bidimensional de um alvo com três inclinações (90° , 45° e 0°), inseridos num semi-espaco de condutividades de 10^{-3} S/m . A posição $Z/L = 0,5$ representa a região de foco dos campos primários. Em (a) a posição do receptor é deslocada em profundidade e, em (b) a posição do receptor é fixa na superfície. Sendo $L = 12 \text{ m}$ o espaçamento entre fontes e o receptor (representado pelos asteriscos).

As comparações qualitativas e quantitativas, entre os sistemas convencionais e POLFOCEM, foram estabelecidas da seguinte forma: as qualitativas consideram as geometrias das componentes EM-FASE, QUADRATURA e as quantitativas foram realizadas por meio de uma função denominada *VARIAÇÃO* (equação 3.1), em que os valores de entrada são os valores pico a pico das componentes EM-FASE, QUADRATURA, dadas por:

$$VARIAÇÃO = \left(\frac{(\text{Anomalia POLFOCEM}) - (\text{Anomalia CONVENCIONAL})}{\text{Anomalia CONVENCIONAL}} \right) \times 100\% .(3.1)$$

Observações:

- Analisando as geometrias das componentes calculadas para o sistema POLFOCEM, observa-se que estas correspondem à soma de duas anomalias produzidas por cada transmissor ativado isoladamente, conforme ilustra FIG. 3.5, em que se tem o perfil da anomalia calculado pelo dipolo da esquerda, representado pelo item (a) e do dipolo da direita, no item (b). Realizando a soma destes dois perfis obtém-se exatamente o mesmo perfil quando os dipolos são ativados simultaneamente (sistema POLFOCEM). Fisicamente isto ocorre devido à linearidade dos campos eletromagnéticos.
- Os perfis das anomalias eletromagnéticas e os conjuntos de transmissores e receptores foram deslocados para a esquerda de $X/L = 0,5$ em todos os experimentos numéricos desta tese, ou seja, ao invés do transmissor ocupar a posição $X/L = -0,5$ e o receptor a posição $X/L = 0,5$, como é convencionalmente adotado, passaram a ocupar as posições $X/L = -1,0$ e $X/L = 0$, respectivamente. Esta convenção é necessária, pois, quando se acrescenta um segundo transmissor, o ponto de cálculo e de referência das anomalias é a posição $X/L = 0$, exatamente onde se localiza o receptor (verificar a FIG. 3.5).

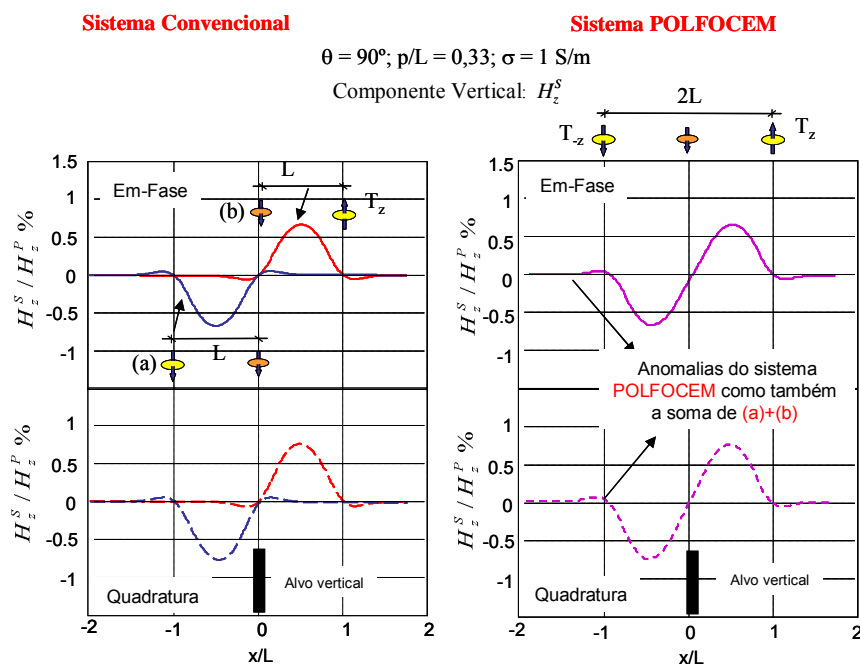


FIGURA 3.5 – Anomalias calculadas para um alvo vertical empregando os sistemas convencionais e POLFOCEM, com polarização horizontal. Demonstrando que as anomalias deste último sistema corresponde a soma de duas anomalias calculadas por cada transmissor acionado separadamente. Conforme princípio da linearidade dos campos eletromagnéticos.

3.2.1 Efeitos da Polarização Vertical (H_z^P)

Para esta polarização, produzida pelo sistema $\left[(-\overline{DMH})_+ (+\overline{DMH})\right]$, as componentes vertical (H_z^S) e horizontal (H_x^S) dos campos secundários são normalizadas em função da componente horizontal do campo primário (H_x^P), pois como o ponto de cálculo se localiza na superfície de separação do semi-espço, na mesma linha horizontal que os transmissores, esta é a única componente que não apresenta valor nulo. Assim, tem-se H_z^S/H_x^P % e H_x^S/H_x^P %, adotadas para o sistema convencional e POLFOCEM.

Nas FIG. 3.6 e 3.7, são esquematizados os acoplamentos dos campos primários com as três inclinações dos alvos, para as situações I e II, respectivamente. Sendo no item (a) o acoplamento para a polarização horizontal e no item (b), o acoplamento devido a um único transmissor. A zona de foco está representada pela linha tracejada em $Z/L = 0,5$.

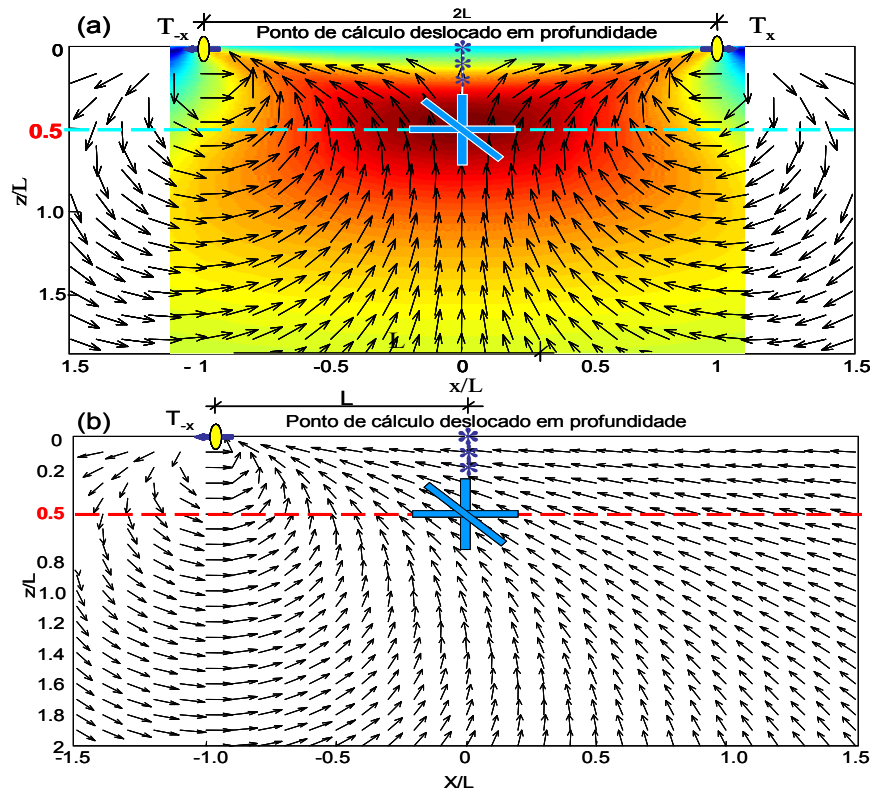


FIGURA 3.6 – Representação esquemática da **SITUAÇÃO I** ilustrando o ponto de cálculo das anomalias para alvos prismáticos bidimensionais, com inclinações de $90^\circ, 45^\circ$ e 0° sendo, em (a) campos com polarização vertical $\left[(-\overline{DMH})_+ (+\overline{DMH})\right]$ e, em (b) campos gerados por um único dipolo (\overline{DMH}) .

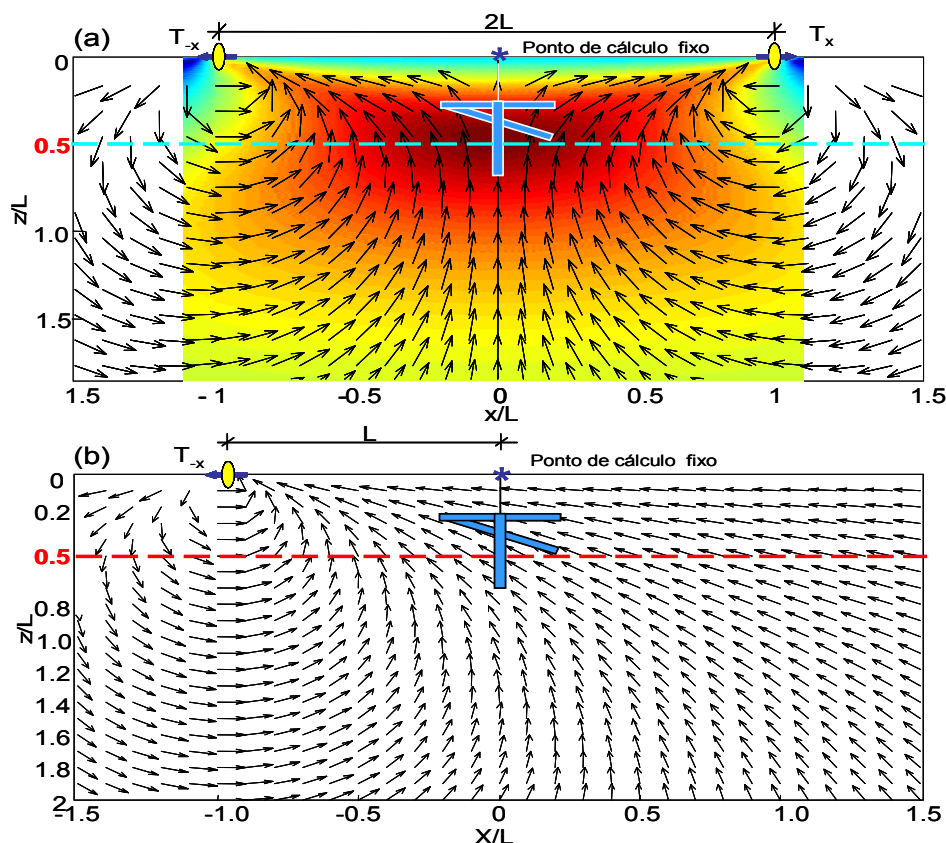


FIGURA 3.7 – Representação esquemática da **SITUAÇÃO II** ilustrando o ponto de cálculo das anomalias para alvos prismáticos bidimensionais, com inclinações de 90° , 45° e 0° sendo, em (a) campos com polarização vertical $\left[(-\overline{DMH})_+ (+\overline{DMH})\right]$ e, em (b) campos gerados por um único dipolo (\overline{DMH}) .

3.2.1.1 Componente vertical (H_z^s) do campo secundário

Nas FIG. 3.8 (Situação I) e 3.9 (Situação II) os alvos apresentam condutividades de 1 S/m e 0,3 S/m. Onde são comparadas as anomalias do sistema convencional (\overline{DMH}) , nos itens (a) com as do POLFOCEM nos itens (b).

Observa-se que no sistema convencional as anomalias são assimétricas para quaisquer das três inclinações, tornando-se simétricas em campos com polarização vertical. Esta simetria pode ser explicada quando se somam os perfis produzidos devido aos transmissores da esquerda com o da direita, quando são acionados separadamente, sendo que um é rebatido em relação ao outro na posição $X/L = 0$.

Para o alvo vertical ($\theta = 90^\circ$), em $X/L = 0$ a anomalia é nula em ambos os sistemas, pois no convencional não existe acoplamento entre o campo secundário produzido pelo alvo e esta geometria de receptor, e no POLFOCEM, além de existir este mesmo acoplamento nulo também o acoplamento é nulo entre campo primário e o alvo, devido à polarização e alvo serem verticais. Existe a presença de um pico positivo em aproximadamente $X/L = 0,7$ e outro negativo em $X/L = 0,3$.

Para as inclinações de 45° e 0° , na posição de $X/L = 0$, as anomalias, nos dois sistemas não são nulas, pois os acoplamentos entre campo-alvo-receptor não são nulos e o máximo valor de acoplamento se verifica quando o alvo é horizontal ($\theta = 0^\circ$), devido ao fluxo do campo primário é perpendicular à secção transversal deste alvo. Apresentam um pico positivo e outro negativo nas posições aproximadas de $X/L = \pm 0,7$ e $X/L = \pm 0,3$, respectivamente.

As *VARIAÇÕES* nas anomalias são negativas para as três inclinações do alvo ($\theta = 90^\circ$, 45° e 0°), sendo, aproximadamente, de -3% , -5% e -9% , respectivamente. Isto ocorre durante a soma das anomalias do sistema convencional, produzidas pelos transmissores separadamente, em que parte de uma que é positiva subtrai de outra que é negativa, acarretando uma diminuição de sua magnitude.

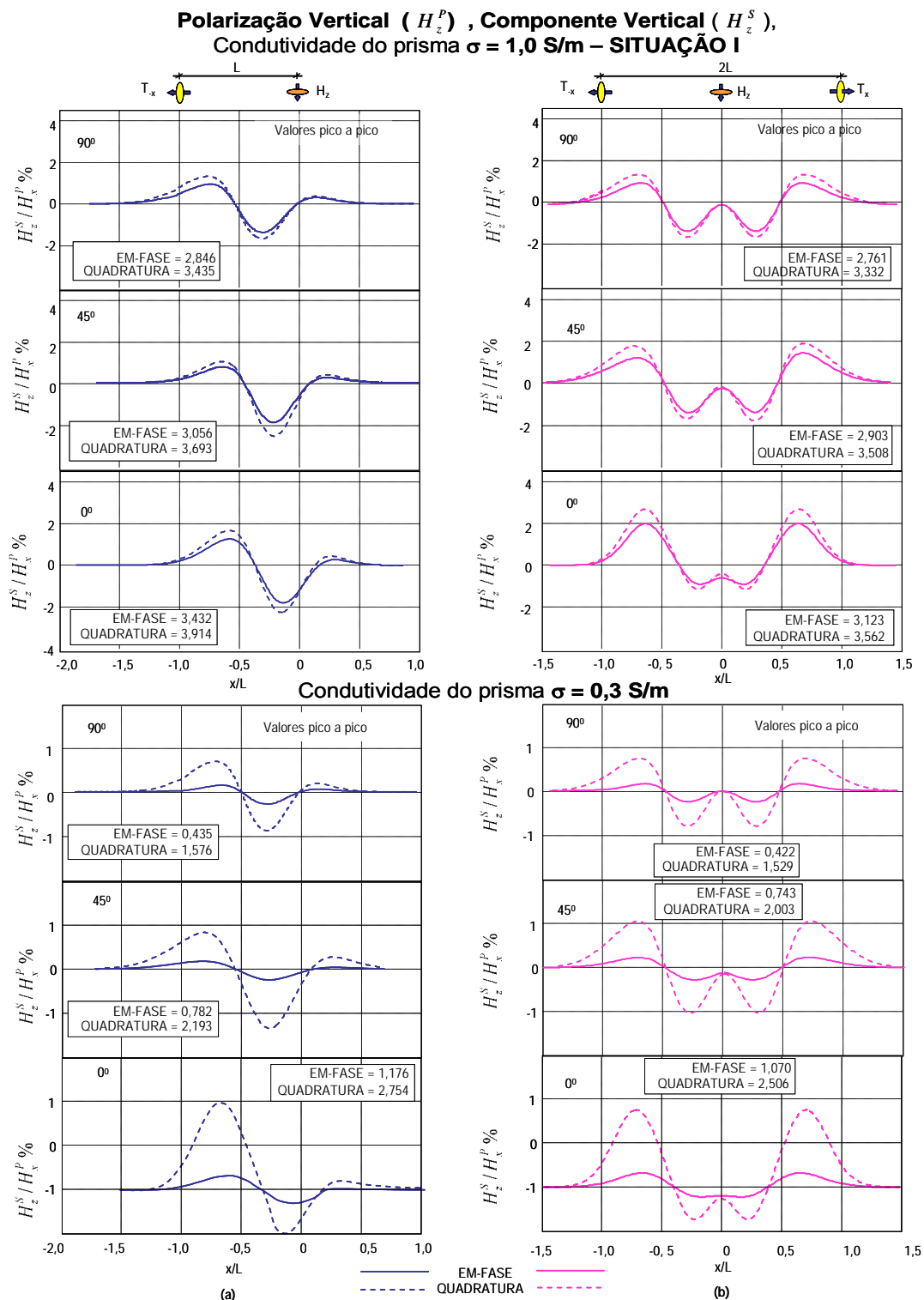


FIGURA 3.8 – Respostas em componente vertical ($H_z^S/H_x^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação I).

**Polarização Vertical (H_z^P), Componente Vertical (H_z^S),
Conductividade do prisma $\sigma = 1,0 \text{ S/m}$ – SITUAÇÃO II**

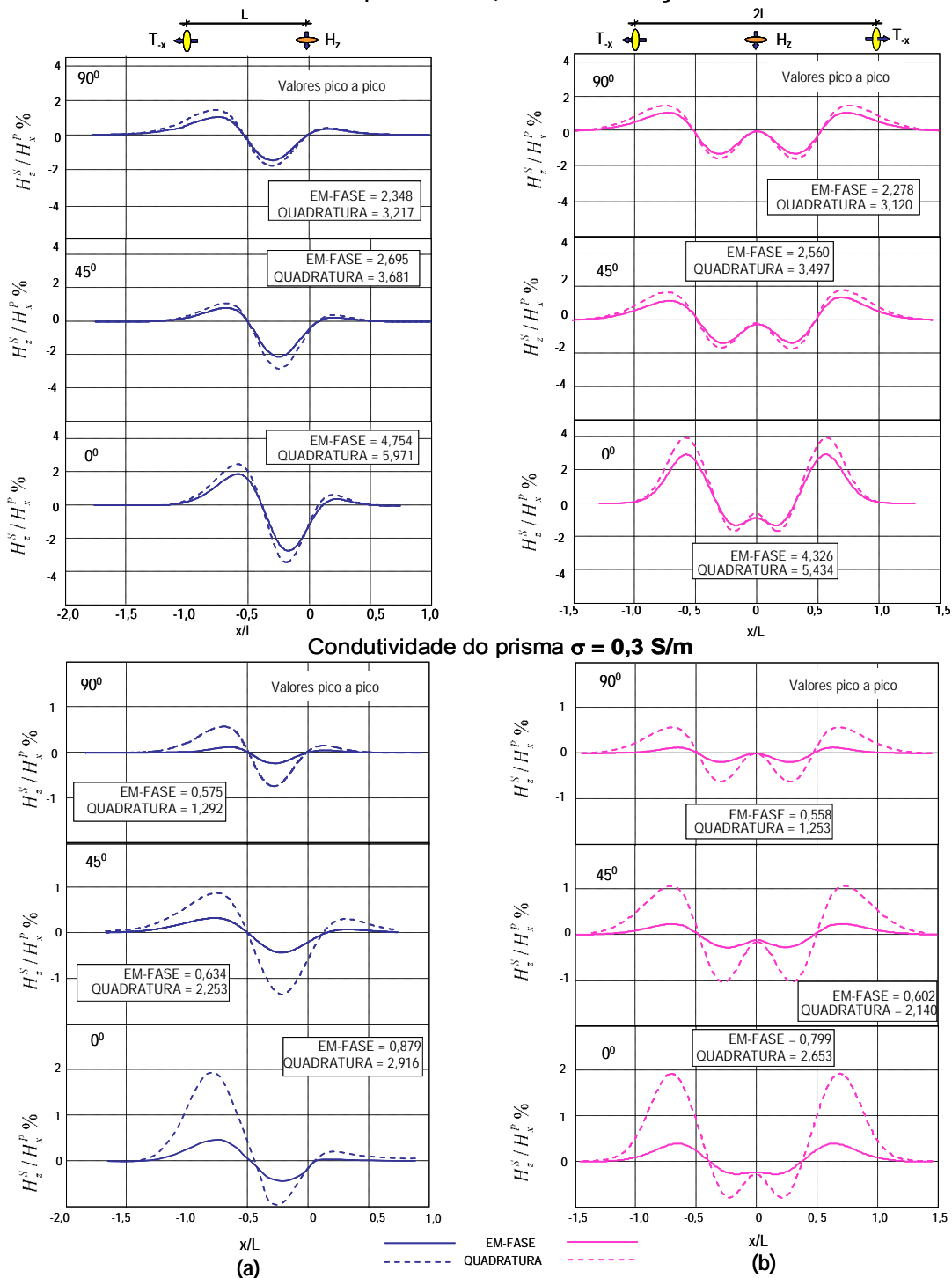


FIGURA 3.9 – Respostas em componente vertical ($H_z^S/H_x^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação II).

3.2.1.2 Componente horizontal (H_x^S) do campo secundário

Nas FIG. 3.10 (Situação I) e 3.11 (Situação II) os alvos apresentam condutividade de 1 S/m e 0,3 S/m. Em que são comparadas as anomalias dos sistemas convencionais (\overline{DMH}), nos itens (a), com as do POLFOCEM nos itens (b).

Observa-se que os perfis, no item (a), são simétricos para o alvo vertical ($\theta = 90^\circ$) e o horizontal ($\theta = 0^\circ$), e assimétrico quando este alvo tem inclinação de 45° . Essas anomalias simétricas e assimétricas tornam-se anti-simétricas, em campos com polarização vertical, item (b). Fisicamente este fato ocorre, pois, os acoplamentos dos transmissores da direita e da esquerda com o alvo, fazem com que este induza correntes no receptor no sentido horário e anti-horário, respectivamente. Mais uma vez para um melhor entendimento basta rebater e rotacionar a anomalia de 180° em $X/L = 0$, do item (a), simulando o perfil de um segundo transmissor e proceder à soma destas duas.

Em $X/L = 0$ as anomalias são nulas nos dois sistemas para as três inclinações do alvo. Valores de picos positivos e negativos são observados em campos com polarização vertical, itens (b). No alvo vertical esses valores se localizam na posição aproximada de $X/L = \pm 0,9$, respectivamente, pois abaixo dos transmissores em $X/L = \pm 1,0$ o campo é horizontal acarretando máximo acoplamento com esta geometria de alvo, conseqüentemente, maior anomalia é produzida. Se o alvo é inclinado de 45° , a posição destes picos se deslocam para aproximadamente $X/L = \pm 0,75$. Quando o alvo assume a posição horizontal ($\theta = 0^\circ$) estes valores estão próximos a $X/L = \pm 0,55$ e nulos em $X/L = \pm 1,0$, pois para esta última posição, são nulos os acoplamentos dos campos primários abaixo dos transmissores (campos horizontais) com esta geometria de alvo.

Os valores de *VARIAÇÕES* são positivos para as três inclinações de $\theta = 90^\circ$, 45° e 0° sendo aproximadamente de 99%, 52% e 83%, respectivamente. Isto ocorre, pois, existem dois picos máximos com mesma intensidade em módulo em decorrência da anti-simetria das anomalias.

**Polarização Vertical (H_z^P), Componente Horizontal (H_x^S),
Condutividade do prisma $\sigma = 1,0 \text{ S/m}$ – SITUAÇÃO I**

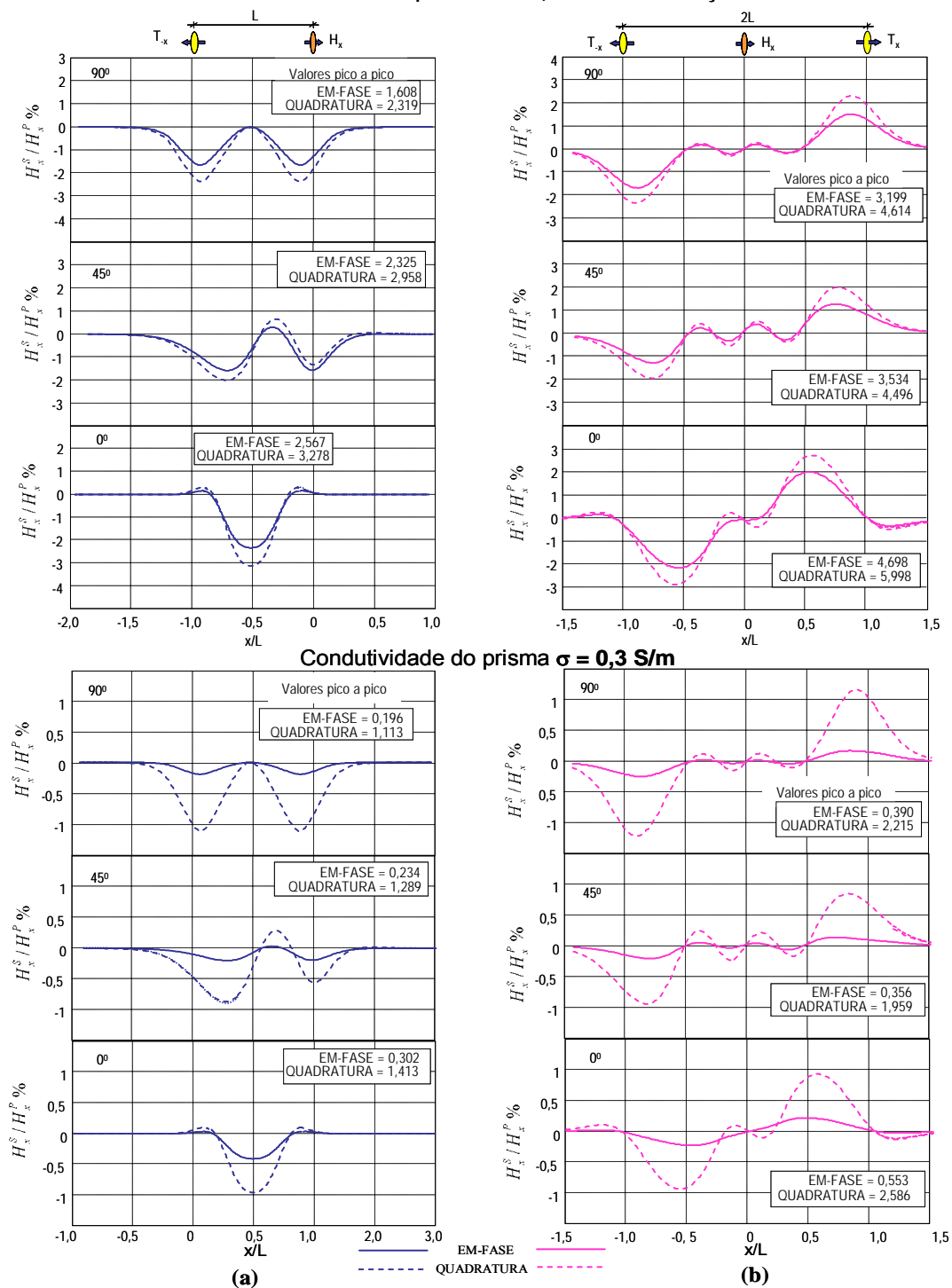


FIGURA 3.10 – Respostas em componente horizontal ($H_x^S / H_x^P \%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação I).

**Polarização Vertical (H_z^P), Componente Horizontal (H_x^S),
Condutividade do prisma $\sigma = 1,0$ S/m – SITUAÇÃO II**

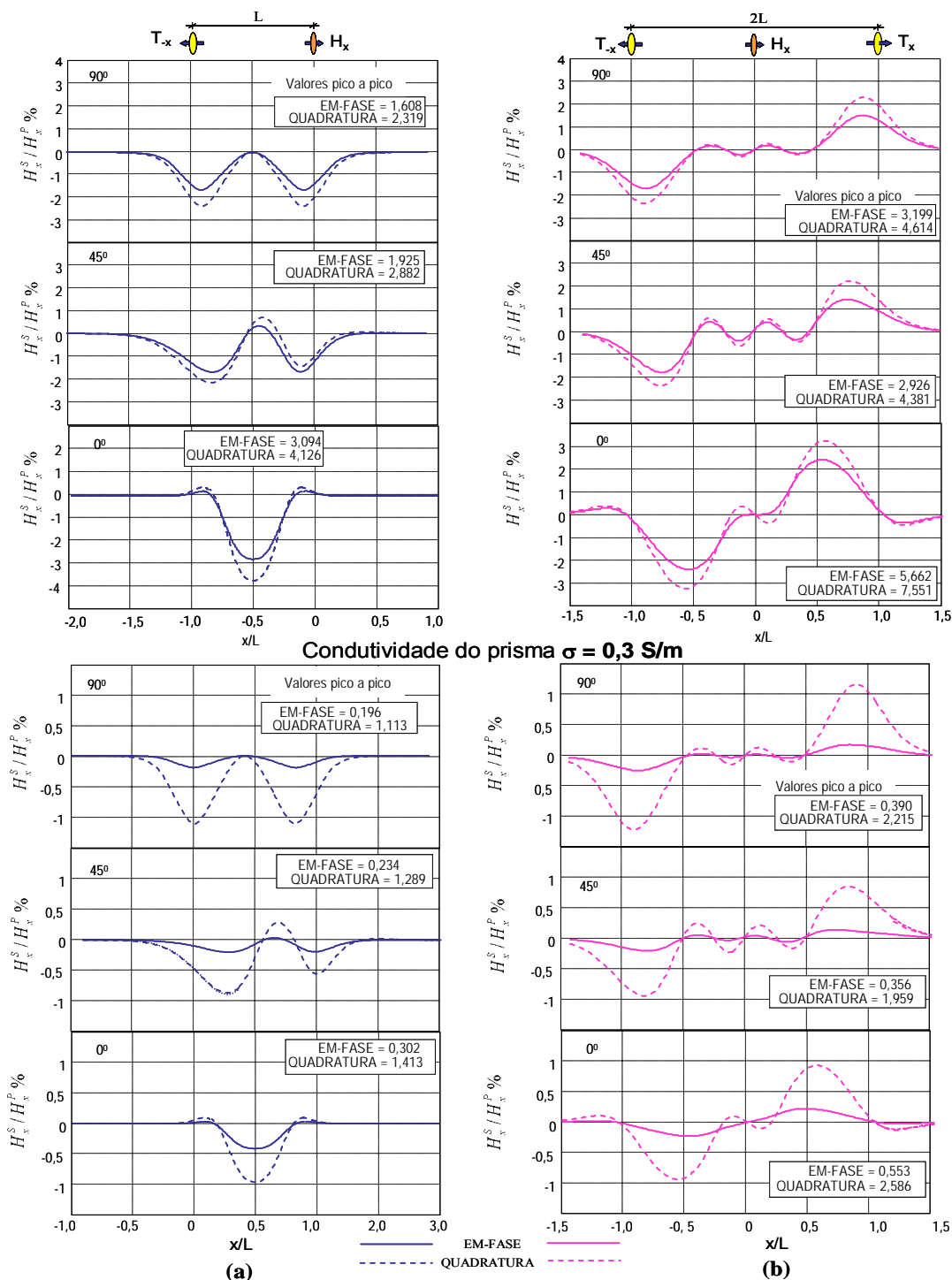


FIGURA 3.11 – Respostas em componente horizontal ($H_x^S / H_x^P \%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização vertical. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação II).

3.2.2 Efeitos da polarização horizontal (H_x^P).

Para esta polarização, produzida pelo sistema $\left[(+\overline{DMV}) + (-\overline{DMV}) \right]$, as componentes vertical (H_z^S) e horizontal (H_x^S) dos campos secundários são normalizadas em função da componente vertical do campo primário (H_z^P), pois como o ponto de cálculo se localiza na superfície de separação do semi-espço, na mesma linha horizontal que os transmissores, esta é a única componente que não apresenta valor nulo. Assim, tem-se H_z^S/H_z^P % e H_x^S/H_z^P %, para ambos os sistemas convencional e POLFOCEM.

Nas FIG. 3.12 e 3.13, são esquematizados os acoplamentos dos campos primários com as três inclinações dos alvos, para as situações I e II, respectivamente. Sendo nos itens (a) o acoplamento para a polarização vertical e nos itens (b), o acoplamento devido a um único transmissor (\overline{DMV}). A zona de foco está representada pela linha tracejada em $Z/L = 0,5$.

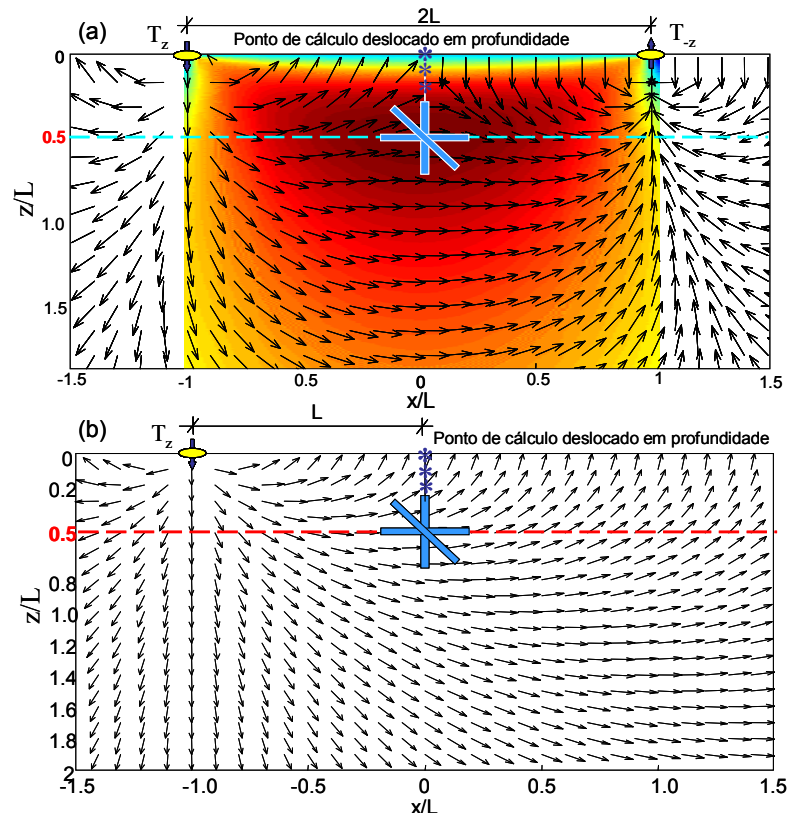


FIGURA 3.12 – Representação esquemática da **SITUAÇÃO I** ilustrando o ponto de cálculo das anomalias para alvos prismáticos bidimensionais, com inclinações de 90° , 45° e 0° sendo, em (a) campos com polarização horizontal $\left[(+\overline{DMV}) + (-\overline{DMV}) \right]$ e, em (b) campos gerados por um único dipolo (\overline{DMV}).

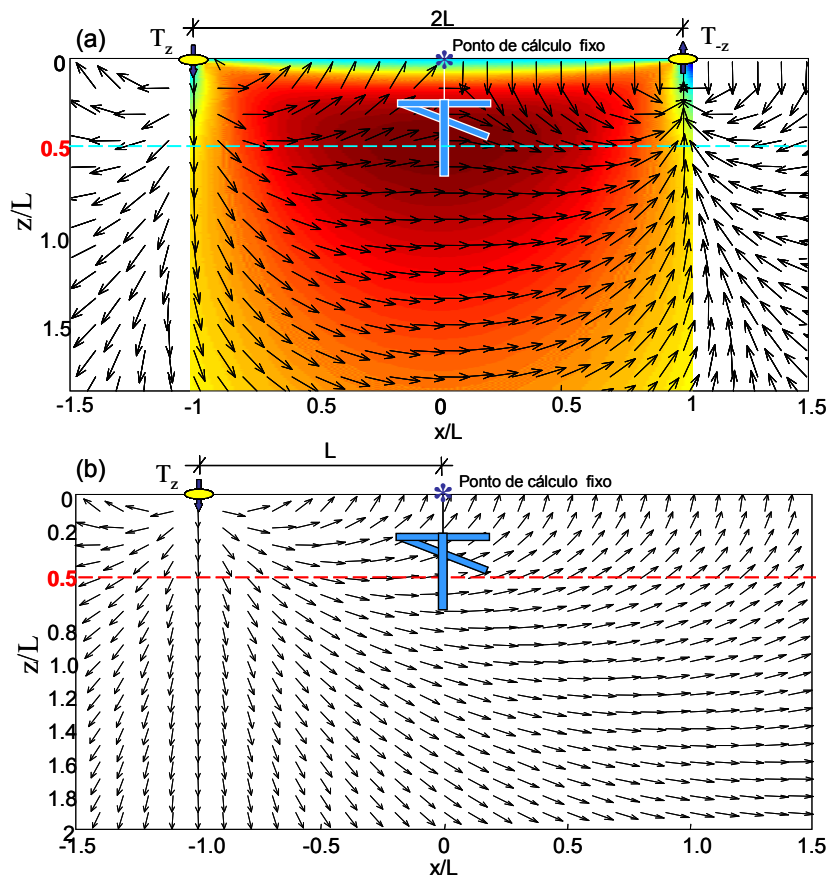


FIGURA 3.13 – Representação esquemática da **SITUAÇÃO II** ilustrando o ponto de cálculo das anomalias para alvos prismáticos bidimensionais, com inclinações de $90^\circ, 45^\circ$ e 0° sendo, em (a) campos com polarização horizontal $[(+\overline{DMV}) + (-\overline{DMV})]$ e, em (b) campos gerados por um único dipolo (\overline{DMV}) .

3.2.2.1 Componente vertical (H_z^S) do campo secundário

Nas FIG. 3.14 (Situação I) e 3.15 (Situação II) os alvos apresentam condutividades de 1 S/m e 0,3 S/m. Onde São comparadas as anomalias do sistema convencional (\overline{DMV}), nos itens (a) com as do POLFOCEM nos itens (b).

Conforme as FIG. 3.14 e 3.15, as anomalias dos sistemas convencionais que são simétricas (para as inclinações do alvo de $\theta = 90^\circ$ e 0°) e assimétricas (com $\theta = 45^\circ$), tornam-se anti-simétricas em campos com polarização horizontal. Fisicamente este fato ocorre, pois os acoplamentos dos transmissores da direita e da esquerda com o alvo, fazem com que este

induza correntes no receptor no sentido horário e anti-horário, respectivamente. Este mesmo efeito já foi comentado na seção 3.2.1.2.

Observa-se nestas figuras que para o alvo vertical as anomalias são nulas na posição $X/L = 0$ e em $X/L = \pm 1,0$, tanto no sistema convencional quanto no sistema com polarização horizontal. Em $X/L = 0$ não existem acoplamentos entre os campos gerados pelos alvos com as geometrias dos receptores. Já para as posições de $X/L = \pm 1,0$, os campos são nulos porque abaixo dos transmissores não há correntes induzidas nos alvos, sendo ambos verticais e, conseqüentemente, não há anomalia produzida. Os picos positivo e negativo se verificam nas posições próximas de $X/L = \pm 0,45$.

Para $\theta = 45^\circ$, nos sistema POLFOCEM, esses valores de picos se verificam em, aproximadamente, $X/L = \pm 0,3$, com anomalias nulas também em $X/L = 0$ e em aproximadamente $X/L = \pm 1,0$.

Quando os alvos assumem a posição horizontal ($\theta = 0^\circ$), os picos positivos e negativos se localizam nas posições aproximadas de $X/L = \pm 1,0$, pois os acoplamentos entre campos primários e os alvos são máximos, sendo que o campo é nulo em $X/L = 0$, pois, neste caso, é nulo o acoplamento entre campo primário e o alvo.

Os valores de *VARIAÇÕES* são positivos sendo, aproximadamente, de 93%, 95% 99% para as inclinações de $\theta = 90^\circ$, 45° e 0° , respectivamente. Esses valores são esperados já que existem dois picos máximos somados em módulos, devido às anomalias terem se tornado anti-simétricas.

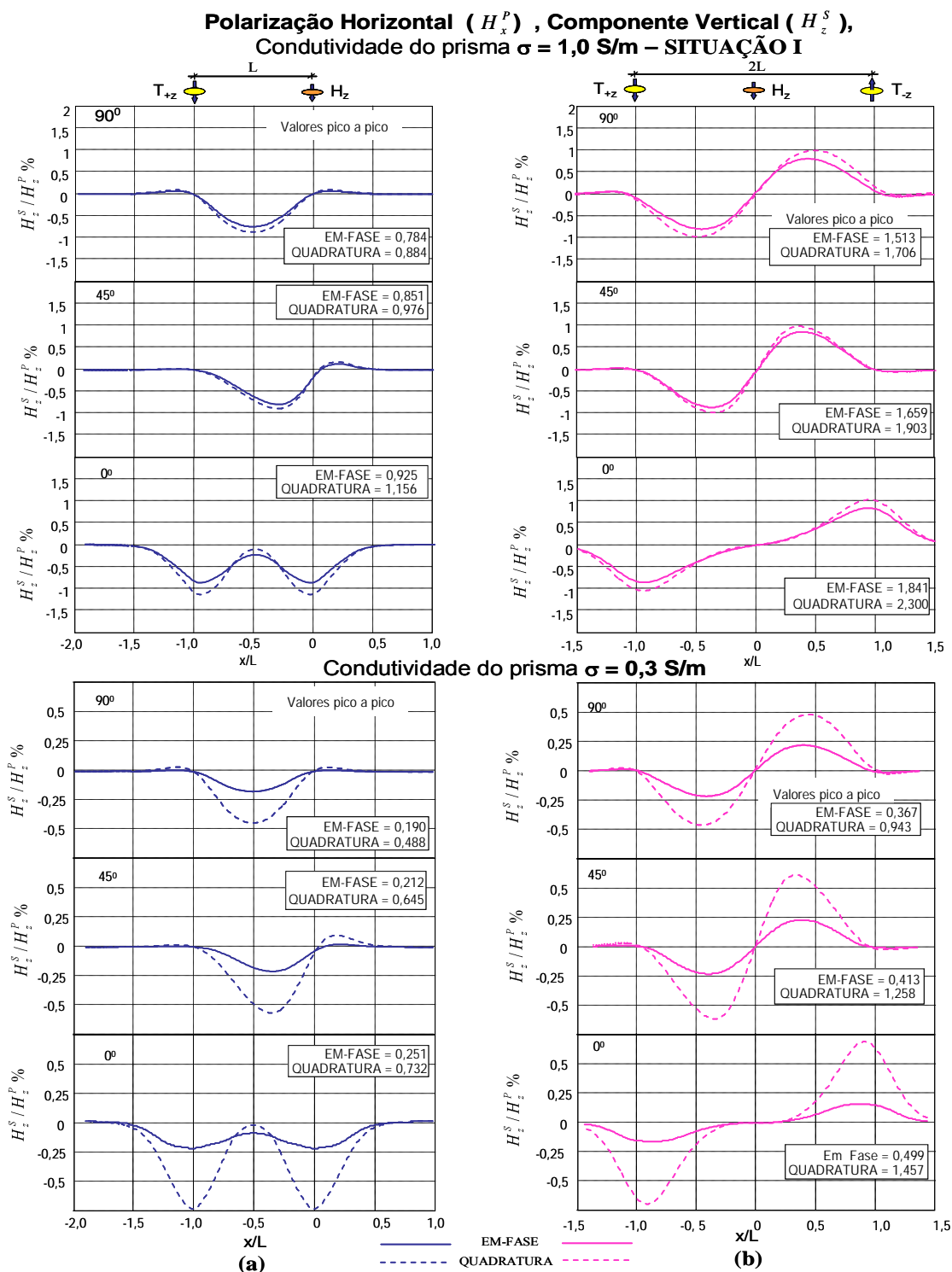


FIGURA 3.14 – Respostas em componente vertical ($H_z^S/H_z^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização horizontal. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação I).

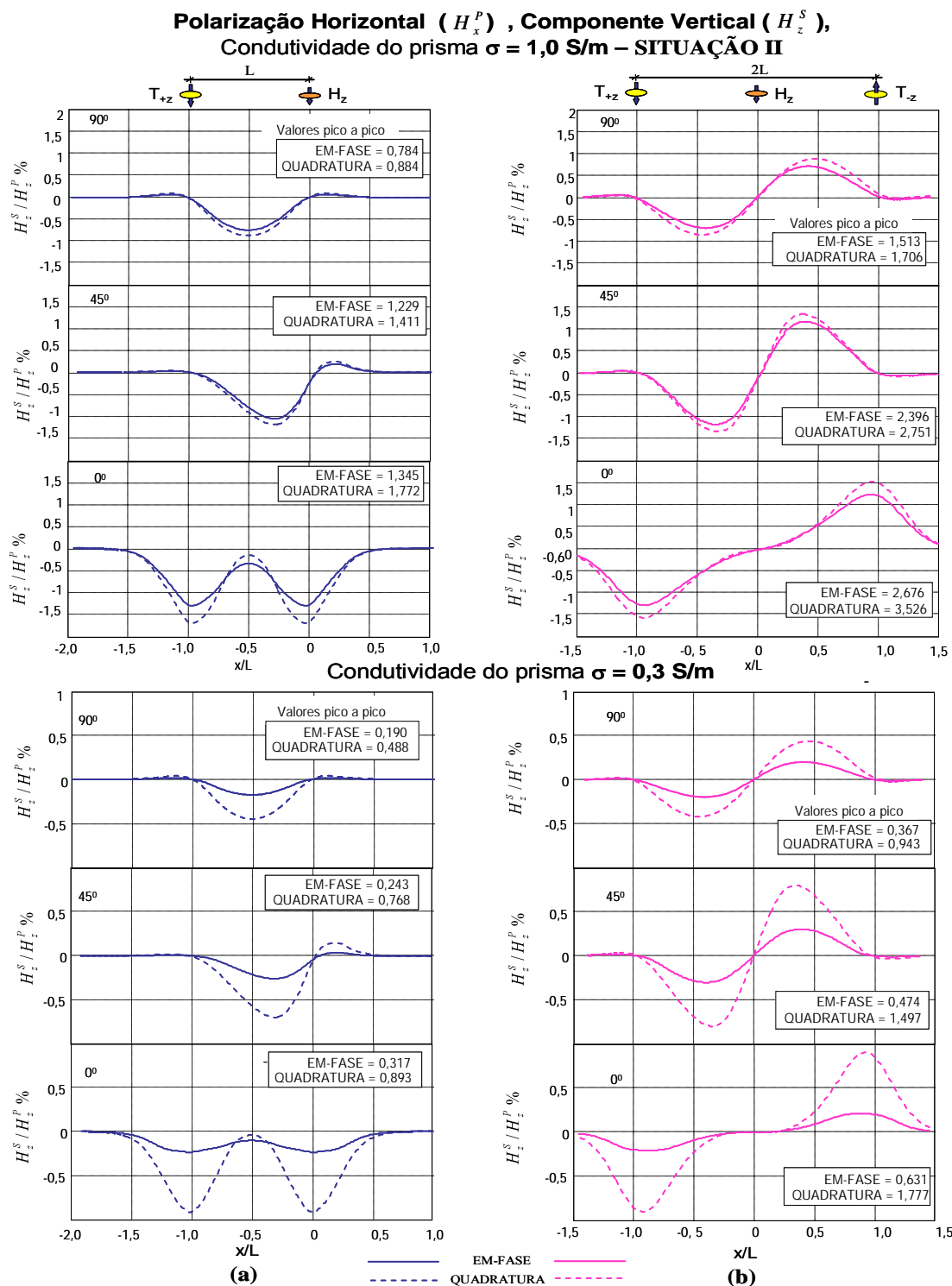


FIGURA 3.15 – Respostas em componente vertical ($H_z^S/H_z^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização horizontal. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação II).

3.2.2.2 Componente horizontal (H_x^S) do campo secundário

Nas FIG. 3.16 (Situação I) e 3.17 (Situação II) os alvos apresentam condutividade de 1 S/m, e 0,3 S/m. Onde são comparadas as anomalias do sistema convencional (\overline{DMV}), nos itens (a) com as do POLFOCEM nos itens (b).

Observa-se que no sistema convencional as anomalias são assimétricas para quaisquer das três inclinações, tornando-se simétricas em campos com polarização horizontal. Esta simetria pode ser explicada quando se somam os perfis devido aos transmissores acionados separadamente. Este mesmo efeito foi explicado na seção 3.2.1.1

Para $\theta = 90^\circ$, as anomalias são nulas em $X/L = -1,0$ para o sistema convencional e no sistema com polarização horizontal em $X/L = \pm 1,0$. Como os campos abaixo dos transmissores são verticais e os alvos nesta posição também são verticais, não há acoplamento entre ambos e, conseqüentemente, não existem anomalias produzidas. Na posição $X/L = 0$, ocorre situação de máximo acoplamento entre campo primário e alvo e a presença de um pico máximo positivo. Outros dois picos também se verificam nas aproximadas de $X/L = \pm 0,6$, porém são negativos.

Com o alvo inclinado de $\theta = 45^\circ$ os picos negativos se verificam em aproximadamente $X/L = \pm 0,65$ e um positivo também em $X/L = 0$.

Para $\theta = 0^\circ$ a anomalia é nula em $X/L = 0$, em ambos os sistemas. Para o sistema convencional é nulo o acoplamento entre o campo secundário e a geometria do receptor e, para o sistema com polarização horizontal, é nulo o acoplamento destes campos com a geometria dos alvos, como também destes com o receptor. Observam-se picos negativos em aproximadamente $X/L = \pm 1,0$, abaixo dos transmissores, acarretados pelos máximos acoplamentos entre campos primários verticais e os alvos horizontais.

Os valores de *VARIAÇÕES* são positivos para as inclinações de $\theta = 90^\circ$ e 45° , sendo de 15% e 22%, respectivamente. Porém para $\theta = 0^\circ$ essa variação é negativa da ordem de -8%, aproximadamente. Para esta última inclinação, esse valor negativo é justificado quando se analisa o perfil produzido por transmissor acionado separadamente, ou seja, durante a soma das anomalias na região próxima de $X/L = 0$ os valores positivos de uma delas subtrai de valores positivos da outra, acarretando desta forma a diminuição das anomalias.

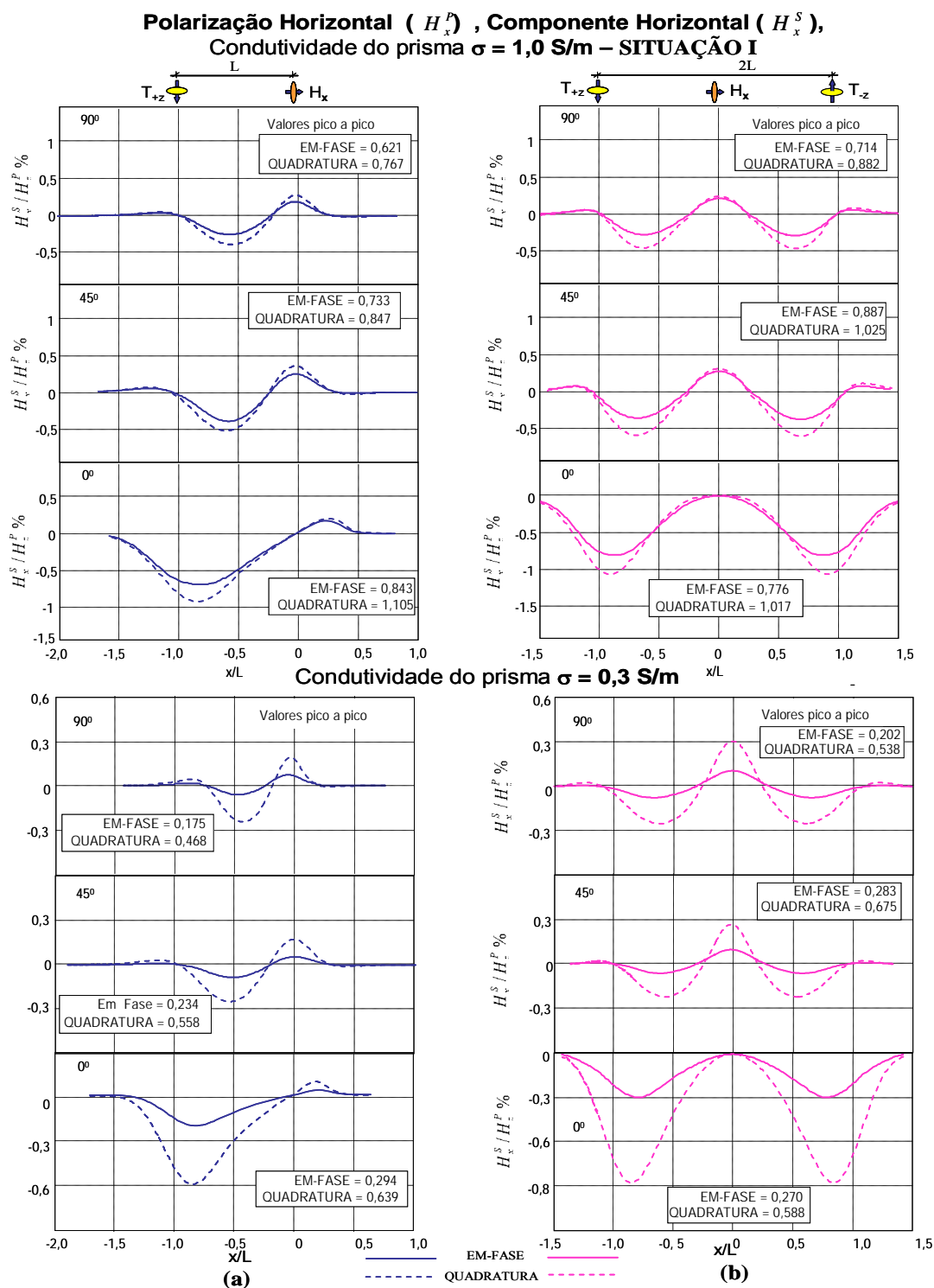


FIGURA 3.16 – Respostas em componente horizontal ($H_x^S / H_z^P \%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização horizontal. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação I).

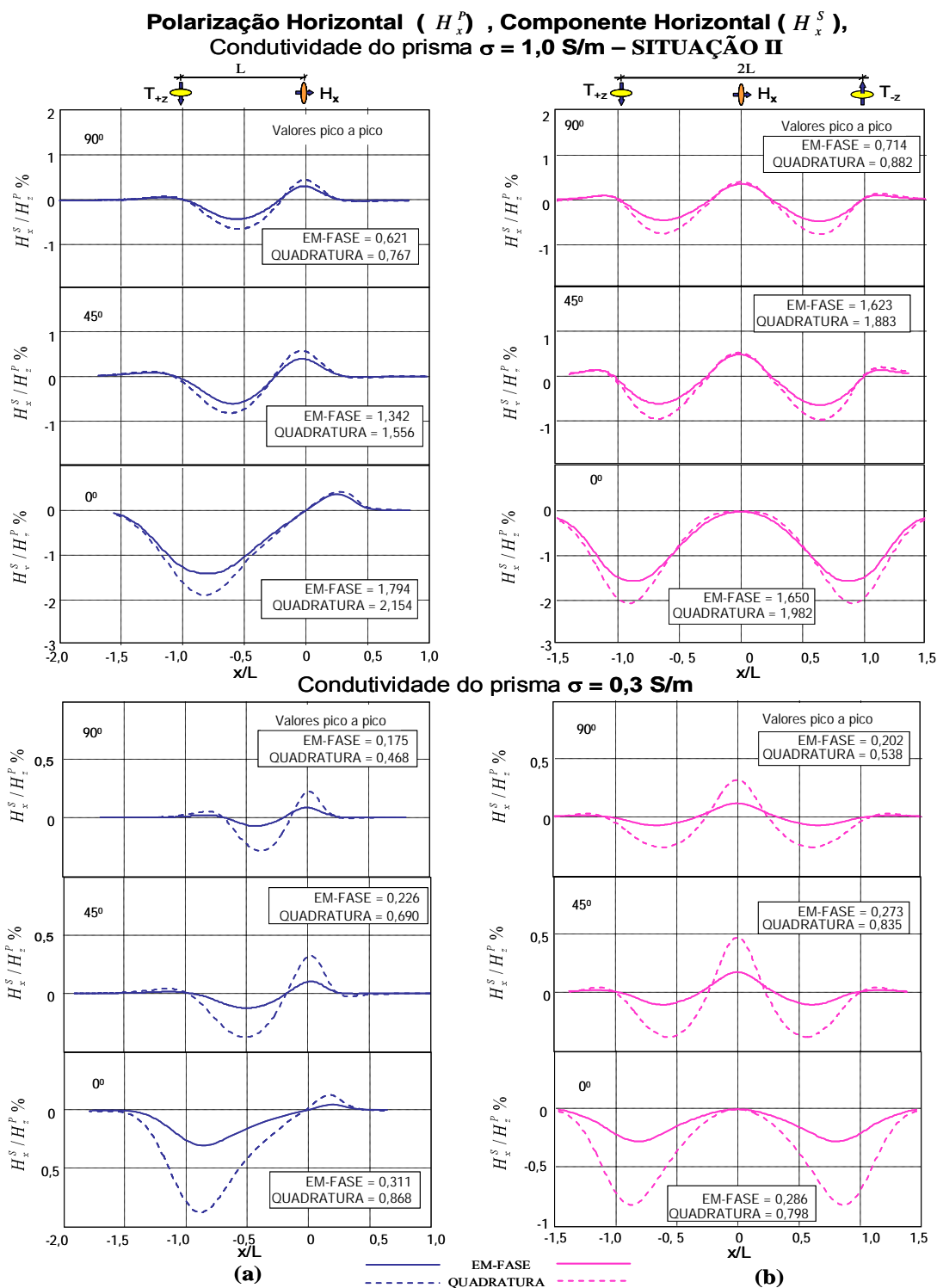


FIGURA 3.17 – Respostas em componente horizontal ($H_x^S/H_z^P\%$) de um prisma de condutividades 1,0 S/m e 0,3 S/m com três diferentes inclinações. Em (a) emprega-se o sistema convencional e em (b) campo com polarização horizontal. Os valores pico a pico, EM-FASE e QUADRATURA das anomalias, estão descritos nos retângulos. (Situação II).

3.3 INFLUÊNCIA DA FOCALIZAÇÃO

Esta seção tem por objetivo estudar o efeito da focalização dos campos, em profundidade, nas respostas dos alvos prismáticos, comparando esses resultados com os calculados para o sistema convencional.

Como há duas formas de polarização (vertical e horizontal), os alvos prismáticos escolhidos são aqueles que apresentam máximo acoplamento com estes campos, ou seja, nos casos em que haja polarização vertical o alvo escolhido é horizontal; e na polarização horizontal o alvo é vertical. Estes alvos estão localizados na região central entre os transmissores e apresentam condutividade de 1,0 S/m, com altura de 2,0 m por 0,4 m de espessura, inserido num semi-espaço com condutividade de 10^{-3} S/m. Estas geometrias de alvos apresentam pequenas dimensões para que a maior porção destes seja influenciada pela zona de foco, conforme os experimentos explicados a seguir:

- Modo 1 - Experimento puramente hipotético em que é fixada a zona de foco em profundidade por meio da fixação do espaçamento entre os dois transmissores, sendo à distância entre eles de $2L = 16$ m, com o ponto de cálculo da anomalia na metade desta distância ($L = 8$ m – simulando posição do receptor). O experimento consiste em deslocar o alvo em profundidade, que se encontra primeiramente acima de zona de foco e fora desta, razão pela qual foram escolhidas as pequenas dimensões dos alvos. De tal modo que ele atravesse esta zona e receba a máxima intensidade do campo primário. Com este deslocamento também é deslocado o ponto de cálculo da anomalia que apresenta uma distancia fixa em relação ao topo do alvo de $p = 1,0$ m. Esta consideração é realizada para que não haja influência do efeito de profundidade, enfatizando apenas o efeito da zona de foco.
- Modo 2 - Neste experimento o topo do alvo se localiza a uma distância fixa do ponto de cálculo das anomalias de $p = 4$ m, e os transmissores estão separados por uma distância inicial de $2L = 1,0$ m, com a zona de foco localizada acima do alvo. O experimento consiste em aumentar o espaçamento entre os transmissores e, conseqüentemente, a zona de foco é deslocada em profundidade, atravessando o alvo e lhe imprimindo a máxima intensidade do campo primário.

3.3.1 Alvo horizontal em campo com polarização vertical e alvo vertical em campo com polarização horizontal.

A FIG. 3.18 ilustra o experimento do MODO 1 de um alvo horizontal em campo com polarização vertical, com a distância entre os transmissores fixa em $2L = 16$ m e, conseqüentemente em $Z/L = 0,5$ e $X/L = 0$, tem-se a zona de foco. O experimento do MODO 2 também pode ser visualizado nesta ilustração, bastando para isso considerar o alvo a uma profundidade de $Z = 4$ m, e o espaçamento inicial entre transmissores $2L = 1$ m. Na FIG. 3.19 são calculadas as componentes verticais (H_z^S) dos campos secundários.

Para a polarização horizontal o experimento do MODO 1 está ilustrado na FIG. 3.20, com um alvo vertical. Assim, como foi realizado para a polarização vertical, a distância entre os transmissores está fixa em $2L = 16$ m e, conseqüentemente em $Z/L = 0,5$ e $X/L = 0$, onde tem-se a zona de foco. O experimento do MODO 2 também pode ser visualizado nesta ilustração, bastando para isso considerar o alvo agora a uma profundidade de $p = 1$ m, e o espaçamento inicial entre transmissores $2L = 1$ m. Na FIG. 3.21 são calculadas as componentes horizontais (H_x^S) dos campos secundários.

Observa-se que as anomalias são máximas quando o alvo se localiza em zona de foco, sendo que para ambas as polarizações o valor das intensidades das anomalias são duas vezes maior do que quando são calculadas para um único transmissor. Este valor dobrado era de se esperar, já que a potencia da fonte, com o acréscimo de um segundo transmissor, foi dobrada.

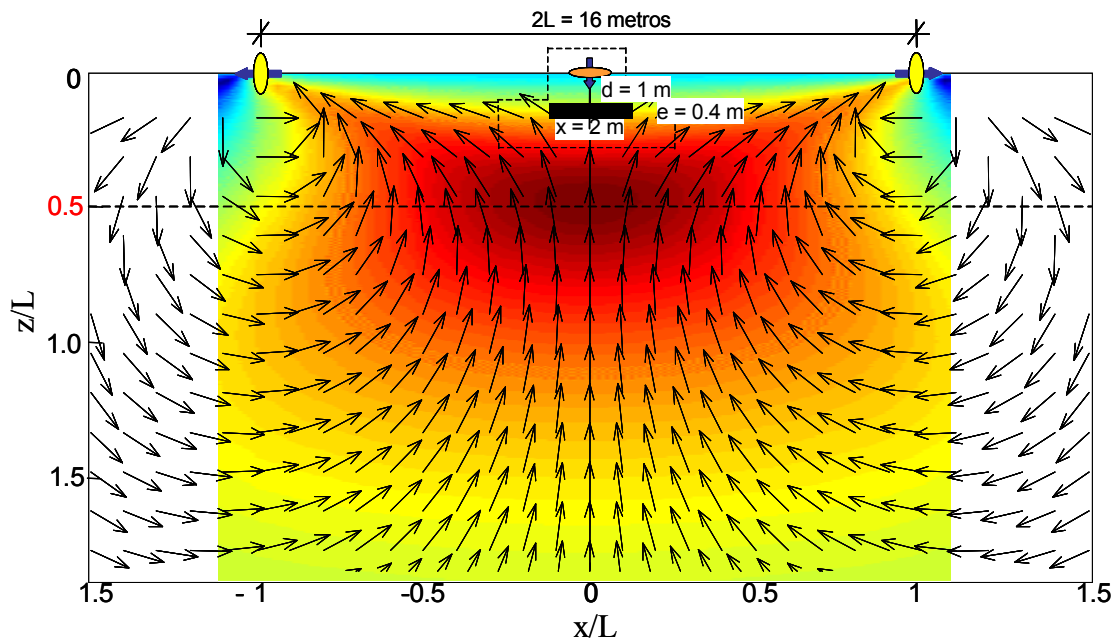


FIGURA 3.18 – Reapresentação esquemática dos MODOS 1 e 2. Para a polarização vertical $\left[(-\overline{DMH}) + (+\overline{DMH})\right]$.

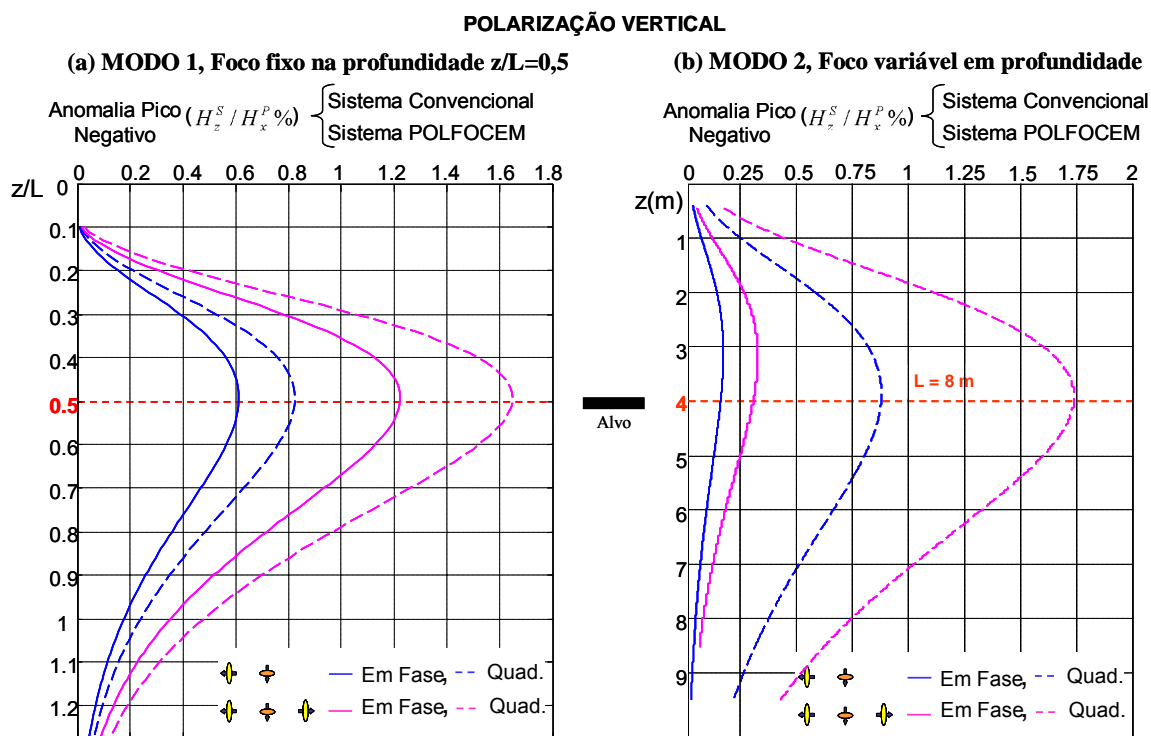


FIGURA 3.19 – Anomalias pico negativo das componentes H_z^S , para um alvo horizontal, calculado para os MODOS 1 e 2.

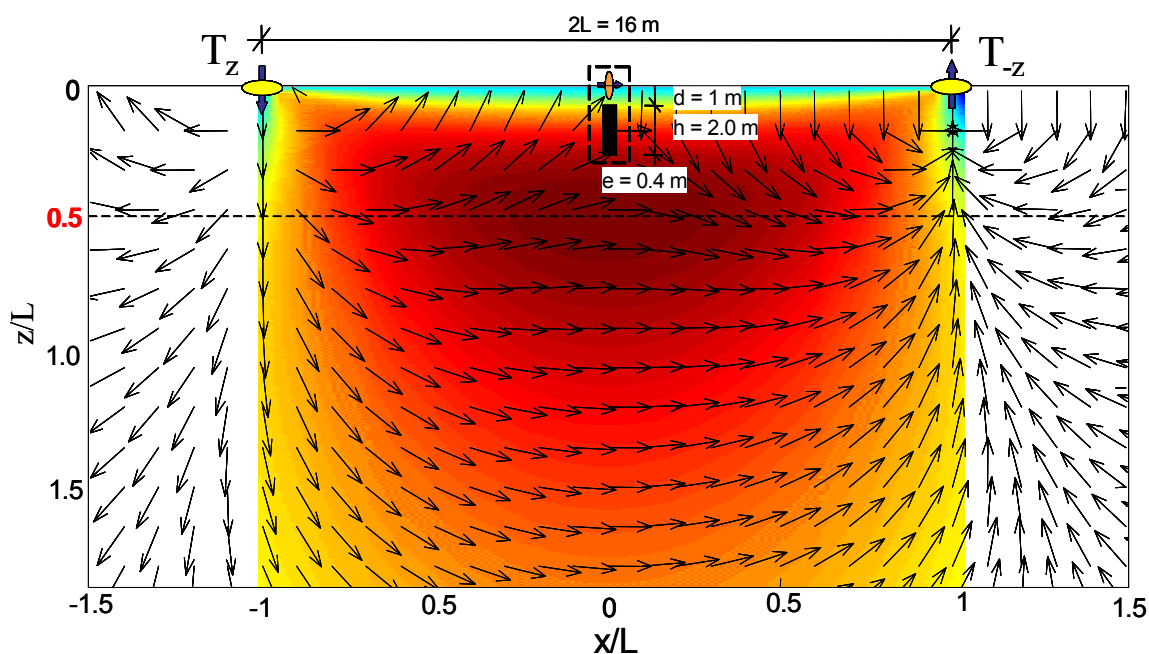


FIGURA 3.20 – Reapresentação esquemática dos MODOS 1 e 2. Para a polarização horizontal $\left[(+DMV) + (-DMV) \right]$.

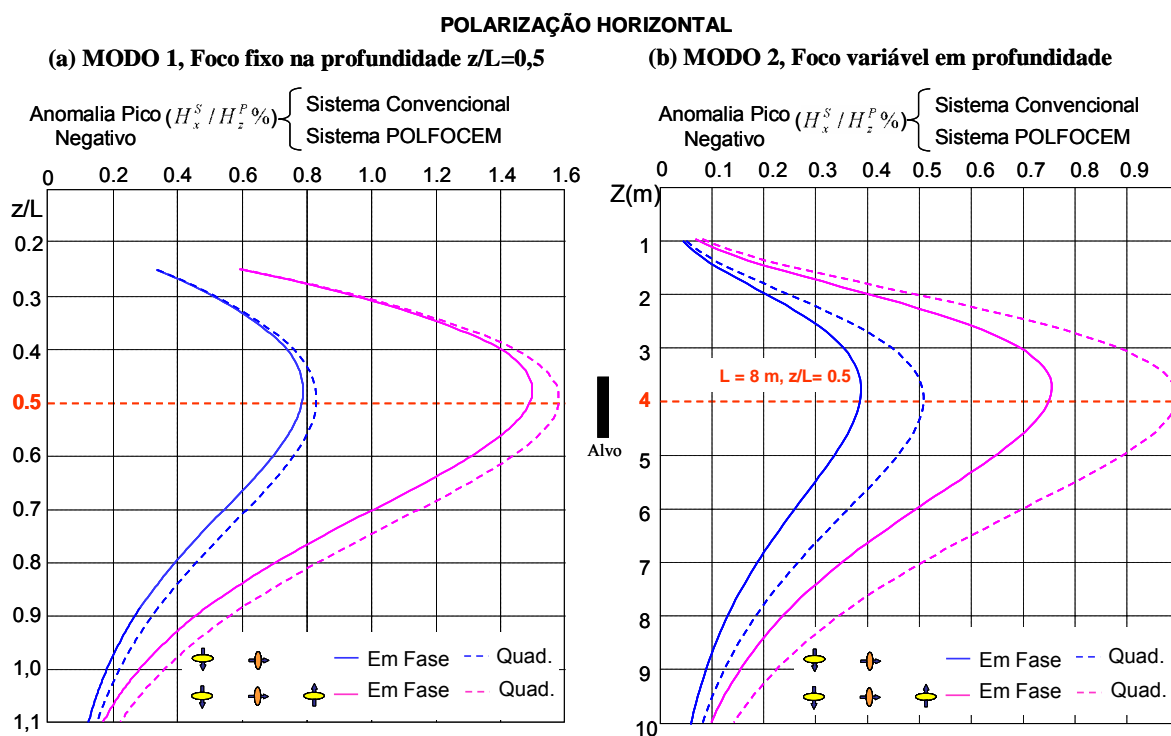


FIGURA 3.21 – Anomalias pico negativo das componentes H_x^S , para um alvo horizontal, calculado para os MODOS 1 e 2.

4 RESPOSTAS DE CONDUTORES MÚLTIPLOS

Quando dois alvos condutivos estão muito próximos um do outro, dependendo da distância entre eles, as anomalias eletromagnéticas podem não indicar a presença de cada um. Por este motivo foram realizados estudos comparativos entre os sistemas POLFOCEM e convencionais, com o objetivo de determinar qual dos sistemas primeiramente discrimina a presença desses alvos com a menor distância entre si.

Os sistemas que empregam um único transmissor apresentam espaçamentos entre fonte-sensor de $L = 12$ m. Para os pares de transmissores do sistema POLFOCEM, foram consideradas duas situações de espaçamentos entre os transmissores, conforme ilustra a FIG. 4.1. Na chamada primeira situação, o segundo transmissor é colocado na posição ocupada pelo receptor e os espaçamentos entre os transmissores são de $2L = 12$ m, com o receptor na metade desta distância. Para a chamada segunda situação, o segundo transmissor é colocado a uma distância do primeiro de $2L = 24$ m, de tal forma que o receptor fique na posição $L = 12$ m.

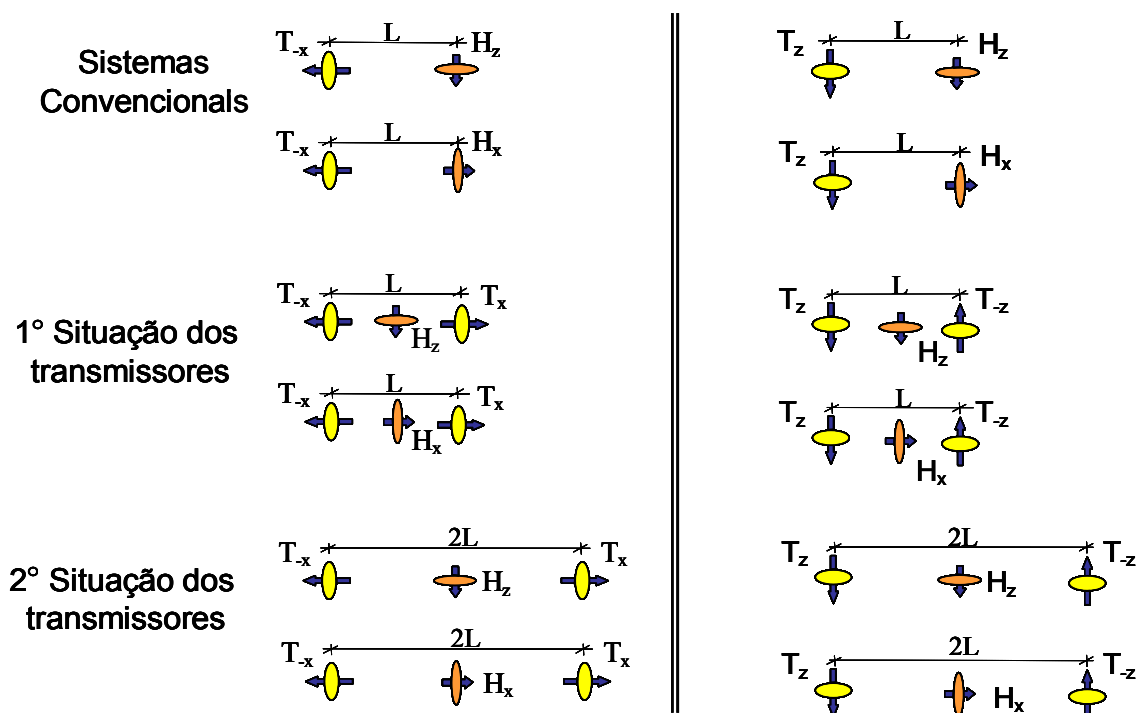


FIGURA 4.1 – Espaçamento entre os transmissores com relação ao sensor.

Os alvos horizontais e verticais com condutividades de 1 S/m, inseridos num semi-espaço de 10^{-3} S/m, apresentam as mesmas dimensões e são normalizados por $L = 12$ m, sendo a altura $h = 4$ m ($h/L = 0,33$) e a espessura $e = 0,4$ m ($e/L = 0,033$), com o seu topo distante do ponto de medida em $p = 5,8$ m ($p/L = 0,48$), para os alvos horizontais e, $p = 4$ m ($p/L = 0,33$), para os alvos verticais. Como há dois espaçamentos entre o par de transmissores no sistema POLFOCEM, conseqüentemente, a zona de foco se localiza em duas profundidades diferentes. Assim, na primeira situação, zona de foco em $Z/L = 0,25$, o alvo se localiza abaixo desta zona e na segunda situação, zona de foco em $Z/L = 0,5$, o alvo está inserido nela.

O experimento numérico consiste em deslocar os sistemas de transmissores em superfície gerando um perfil das componentes vertical (H_z^S) e horizontal (H_x^P) das anomalias eletromagnéticas, primeiramente para um alvo unitário apenas, na seqüência o mesmo procedimento para dois alvos um ao lado do outro como se fossem apenas um e, a partir daí, os alvos vão sendo distanciados entre si de suas faces internas, gradativamente, na horizontal, estes espaçamentos estão representados pela letra “d” normalizados por $L = 12$ m.

Duas etapas de identificação do alvo são consideradas:

1. Chamada de 1ª indicação de discriminação, em que é possível identificar nos perfis a presença de dois alvos com mínimo espaçamento entre eles, ilustrados nos itens (c) das FIG. 4.2 a 4.9;
2. Chamada de 2ª indicação de discriminação, quando os perfis demonstram separação completa entre os alvos, ou seja, não há interação dos campos gerados pelos dois alvos, ilustrado nas FIG. 4.2 a 4.9 itens (d).

Observação:

- Os perfis das anomalias eletromagnéticas e os conjuntos de transmissores e receptores foram deslocados para a esquerda de $X/L = 0,5$, ou seja, ao invés do transmissor ocupar a posição $X/L = -0,5$ e o receptor a posição $X/L = 0,5$, como é convencionalmente adotado, passaram a ocupar as posições $X/L = -1,0$ e $X/L = 0$, respectivamente. Esta mesma convenção já foi explicada no Capítulo 3 seção 3.2.

4.1 RESOLUÇÃO NA POLARIZAÇÃO VERTICAL

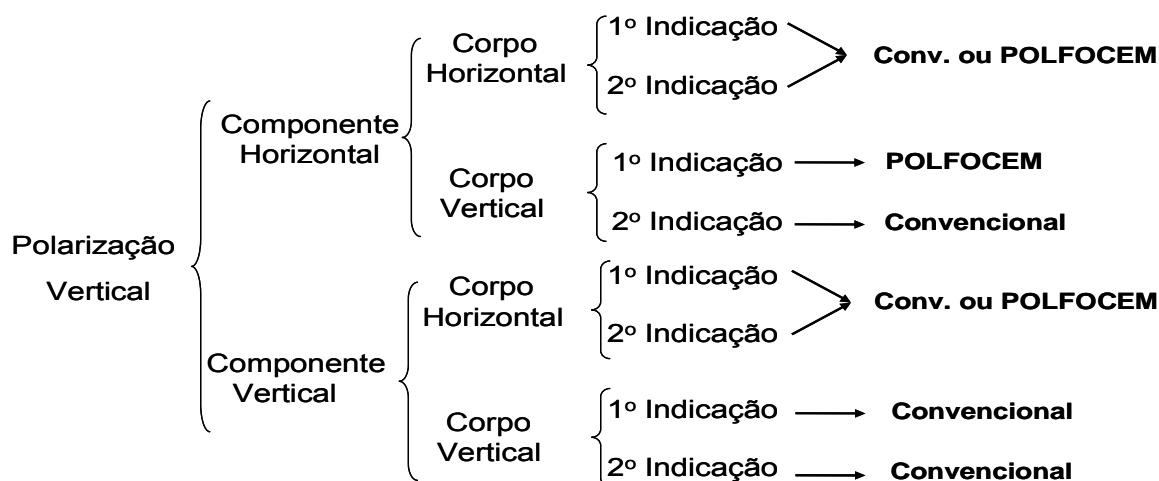
São comparadas as anomalias geradas pelo sistema de dipolos horizontais antioaxiais $\left[(-\overline{DMH})_+ (+\overline{DMH})\right]$ com o sistema convencional (\overline{DMH}) , por meio das componentes vertical (H_z^S) e horizontal (H_x^S) do campo secundário.

Nas FIG. 4.2 e 4.3 estão ilustrados os perfis das anomalias EM-FASE e QUADRATURA para as componentes verticais ($H_z^S/H_x^P \%$) de alvos horizontais e verticais, respectivamente e, em 4.4 e 4.5, os perfis das componente horizontais ($H_x^S/H_x^P \%$) para as mesmas disposições de alvos.

Após análise destas figuras, é apresentada na forma do DIAGRAMA. 4.1, comparações do poder de resolução entre os sistemas POLFOCEM e convencional, determinando qual destes sistemas é melhor na 1ª indicação de discriminação ou na 2ª indicação de discriminação. As geometrias das anomalias influenciaram significativamente na identificação de condutores múltiplos. Assim, como se observa nas FIG. 4.2 e 4.3, para ambos os sistemas convencionais e POLFOCEM, a análise visual destas geometrias não são tão complexas, porém para as anomalias das FIG. 4.4 e 4.5, calculadas no sistema POLFOCEM, esta interpretação se torna mais difícil, principalmente se forem incluídos ruídos. Observa-se que o uso dos sistemas convencionais apresentou-se mais vantajosos na identificação destes alvos do que o POLFOCEM.

DIAGRAMA 4.1

Comparação entre os sistemas POLFOCEM e convencional na discriminação de dois alvos condutivos.



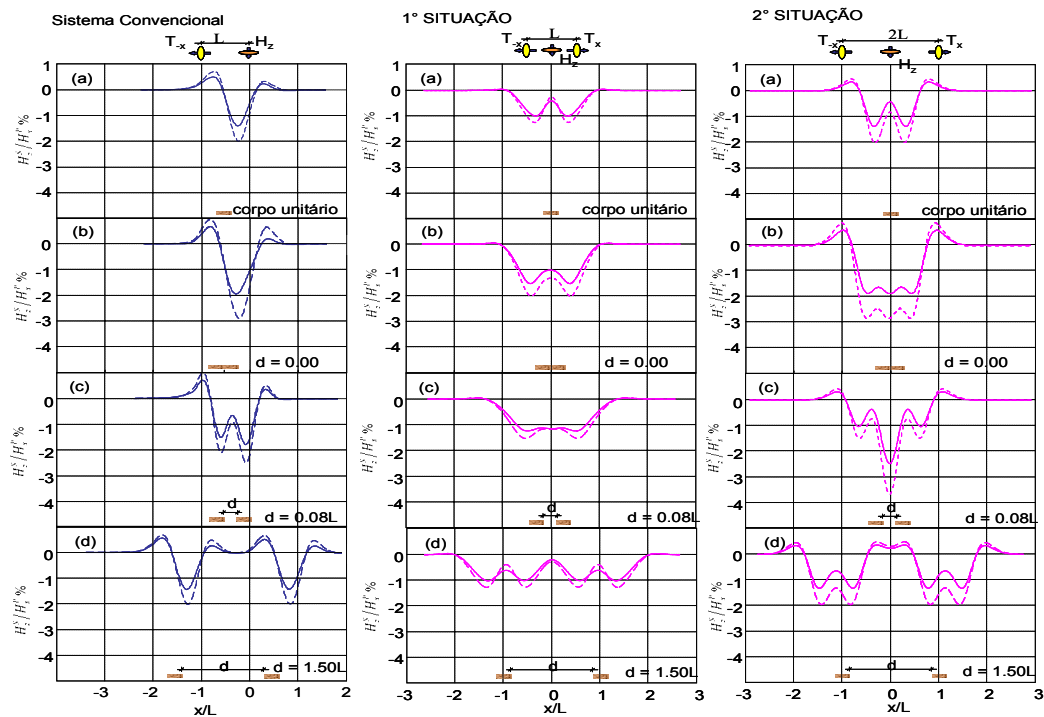


FIGURA 4.2 – Anomalias verticais H_z^S / H_x^P % de prismas horizontais em campo com polarização vertical. No item (c) a 1º indicação de discriminação e, em (d) 2º indicação de discriminação.

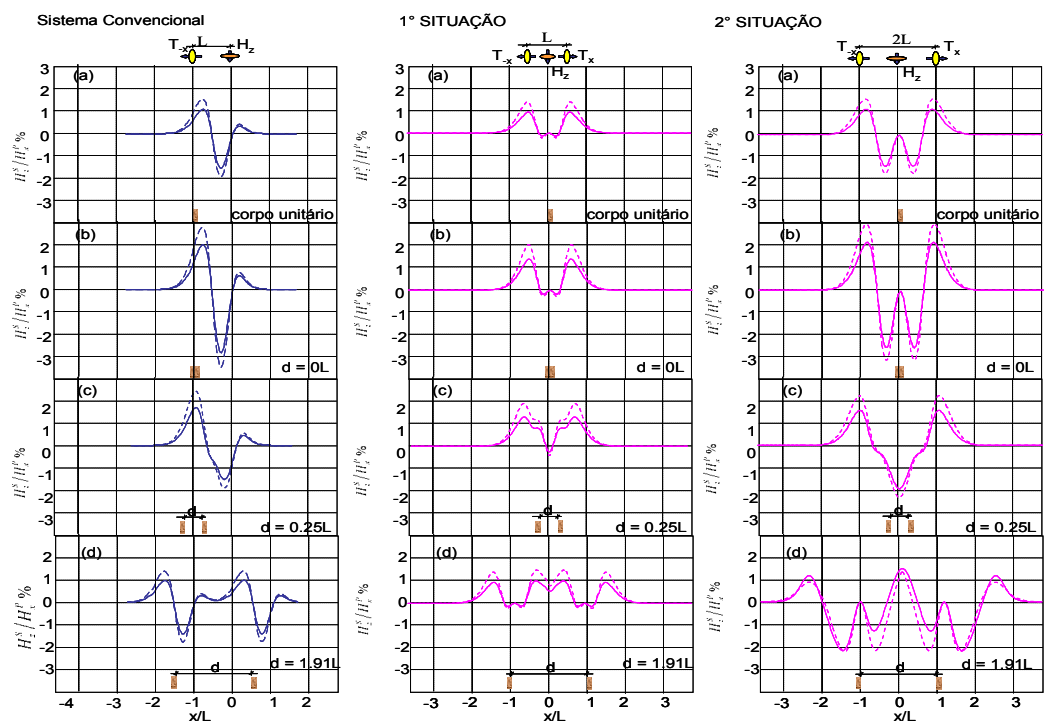


FIGURA 4.3 – Anomalias verticais H_z^S / H_x^P % de prismas verticais em campo com polarização vertical. No item (c) a 1º indicação de discriminação e, em (d) 2º indicação de discriminação.

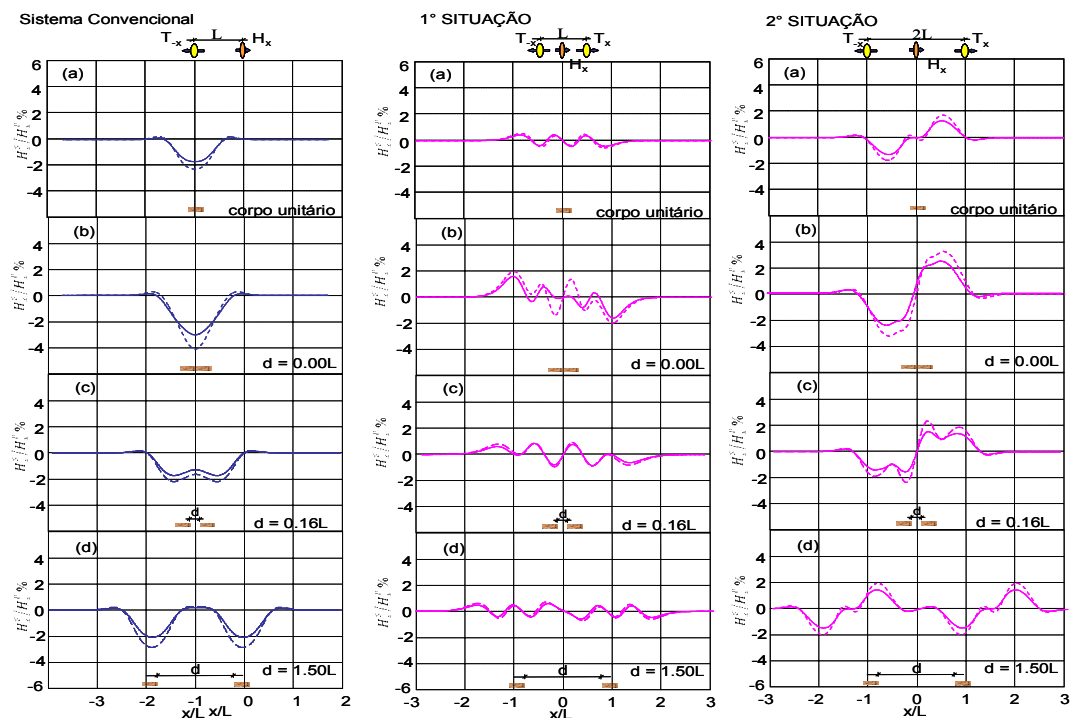


FIGURA 4.4 – Anomalias horizontais H_x^S / H_x^P % de prismas horizontais em campo com polarização vertical. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.

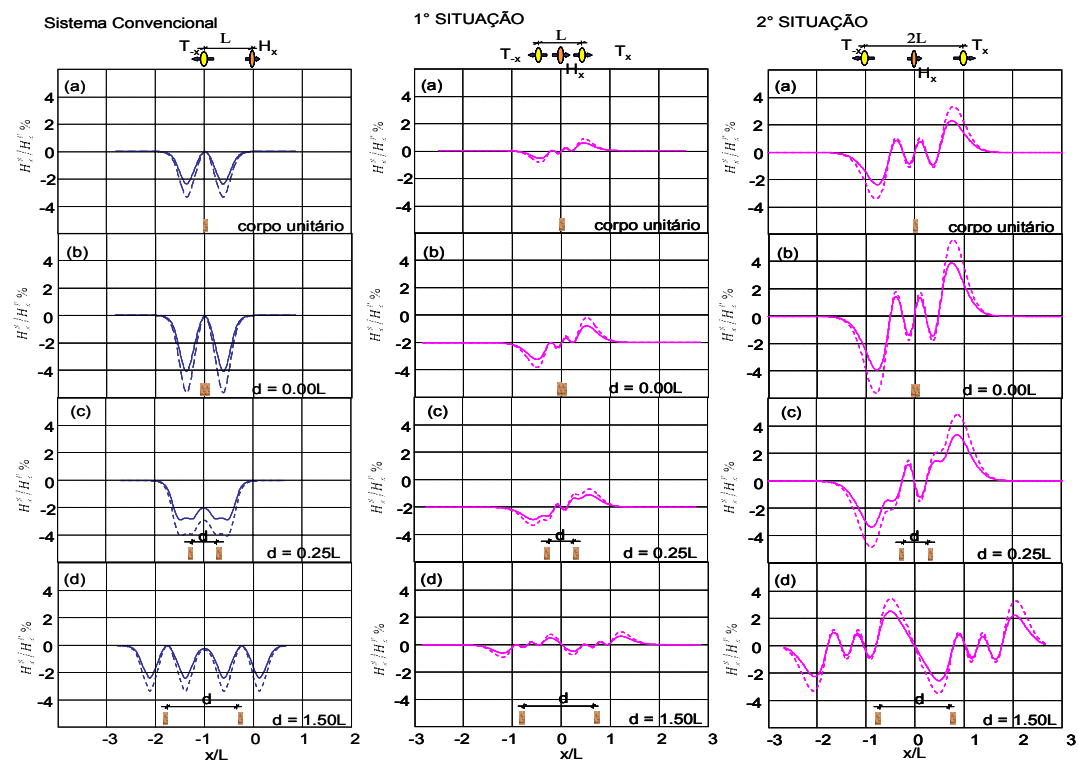


FIGURA 4.5 – Anomalias horizontais H_x^S / H_x^P % de prismas verticais em campo com polarização vertical. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.

4.2 RESOLUÇÃO NA POLARIZAÇÃO HORIZONTAL

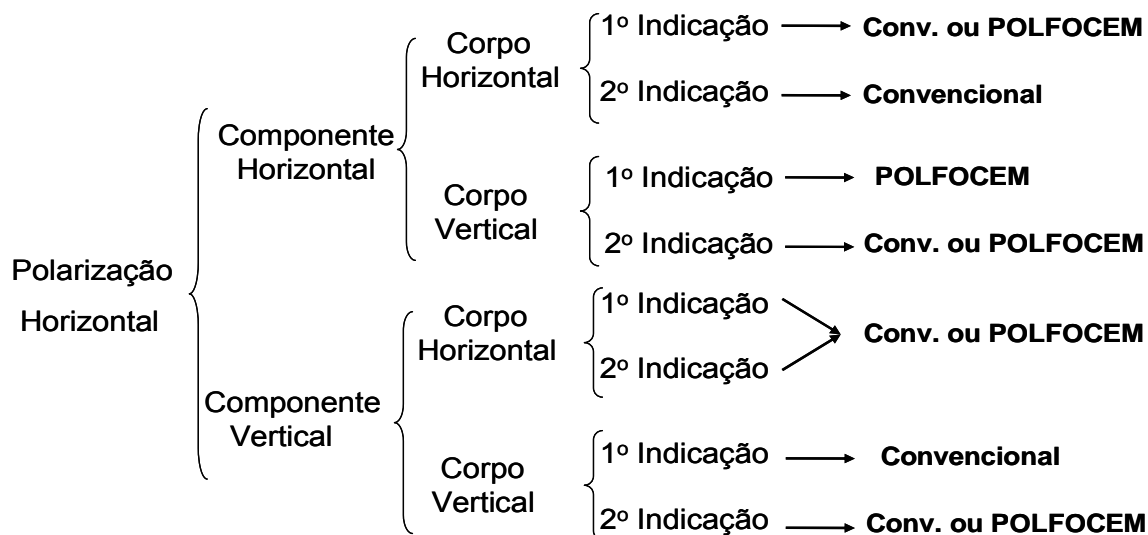
São comparadas as anomalias geradas pelo sistema de dipolos verticais antiparalelos $[(+\overline{DMV})+(-\overline{DMV})]$ com o sistema convencional (\overline{DMV}) , por meio das componentes vertical (H_z^S) e horizontal (H_x^S) do campo secundário.

Nas FIG. 4.6 e 4.7 estão ilustrados os perfis das anomalias EM-FASE e QUADRATURA para as componentes verticais $(H_z^S/H_x^P \%)$ de alvos horizontais e verticais, respectivamente e, em 4.8 e 4.9, os perfis das componente horizontais $(H_x^S/H_x^P \%)$ para as mesmas disposições de alvos.

Após análise destas figuras, é apresentada na forma da DIAGRAMA. 4.2, comparações do poder de resolução entre os sistemas POLFOCEM e convencional, determinando qual destes sistemas é melhor na 1ª indicação de discriminação ou na 2ª indicação de discriminação. Para esta polarização as geometrias das anomalias não são tão complicadas a ponto de dificultarem a identificação de alvos múltiplos, como ocorreu na polarização vertical. Mais uma vez, os sistemas convencionais apresentaram-se com um número maior de identificações e, conseqüentemente prevaleceram o seu uso nestas identificações.

DIAGRAMA 4.2

Comparação entre os sistemas POLFOCEM e convencional na discriminação de dois alvos condutivos.



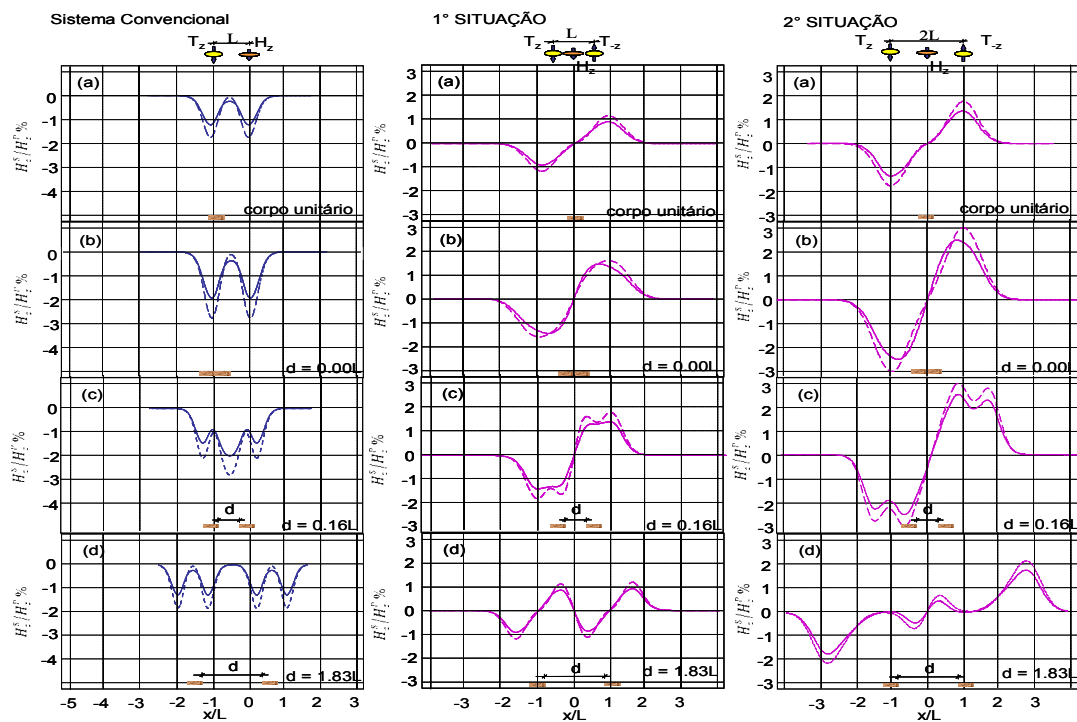


FIGURA 4.6 – Anomalias verticais H_z^S / H_x^P % de prismas horizontais em campo com polarização horizontal. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.

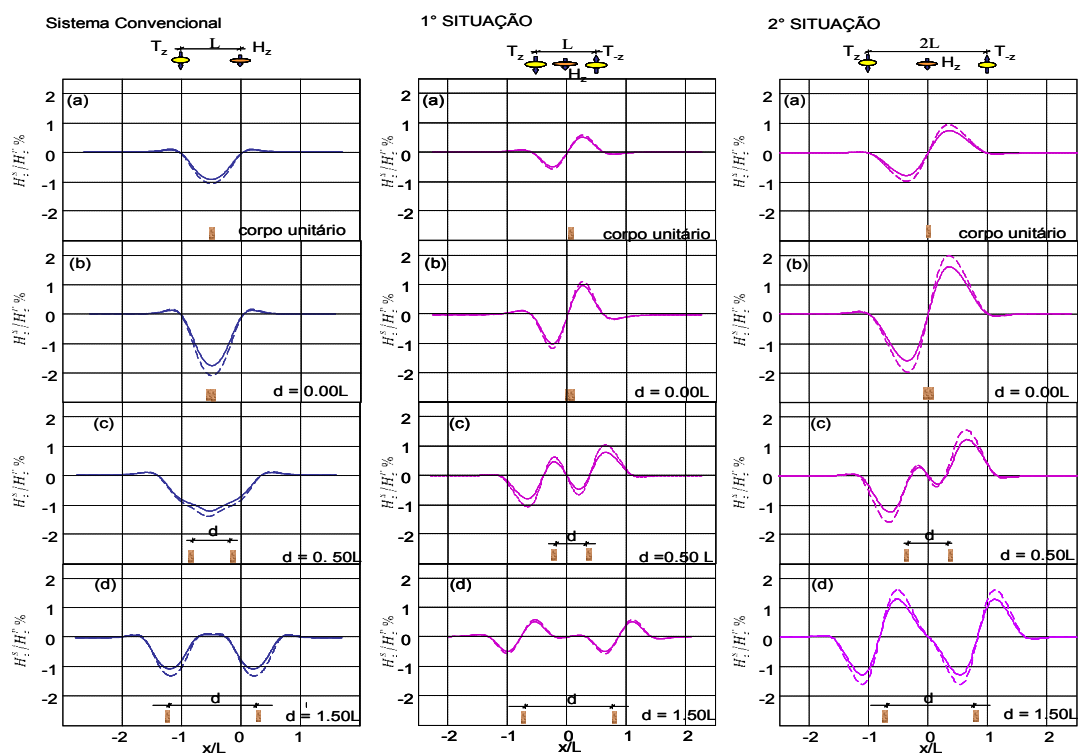


FIGURA 4.7 – Anomalias verticais H_z^S / H_x^P % de prismas verticais em campo com polarização horizontal. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.

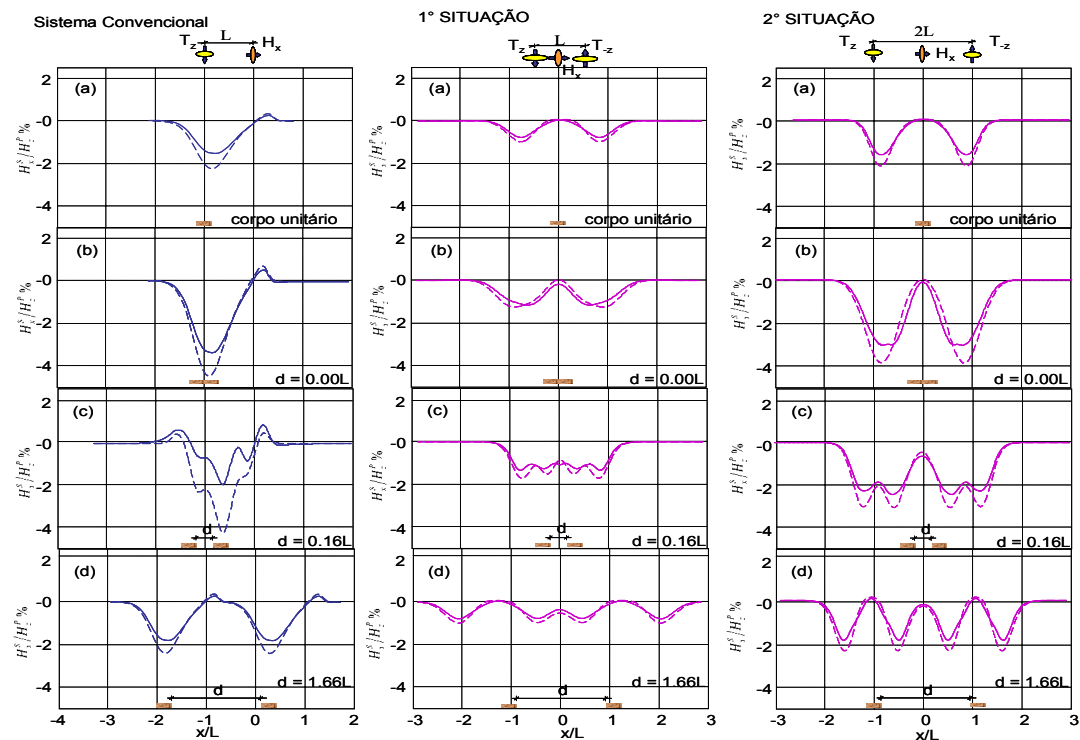


FIGURA 4.8 – Anomalias horizontais H_x^S / H_x^P % de prismas horizontais em campo com polarização horizontal. No item (c) a 1° indicação de discriminação e, em (d) 2° indicação de discriminação.

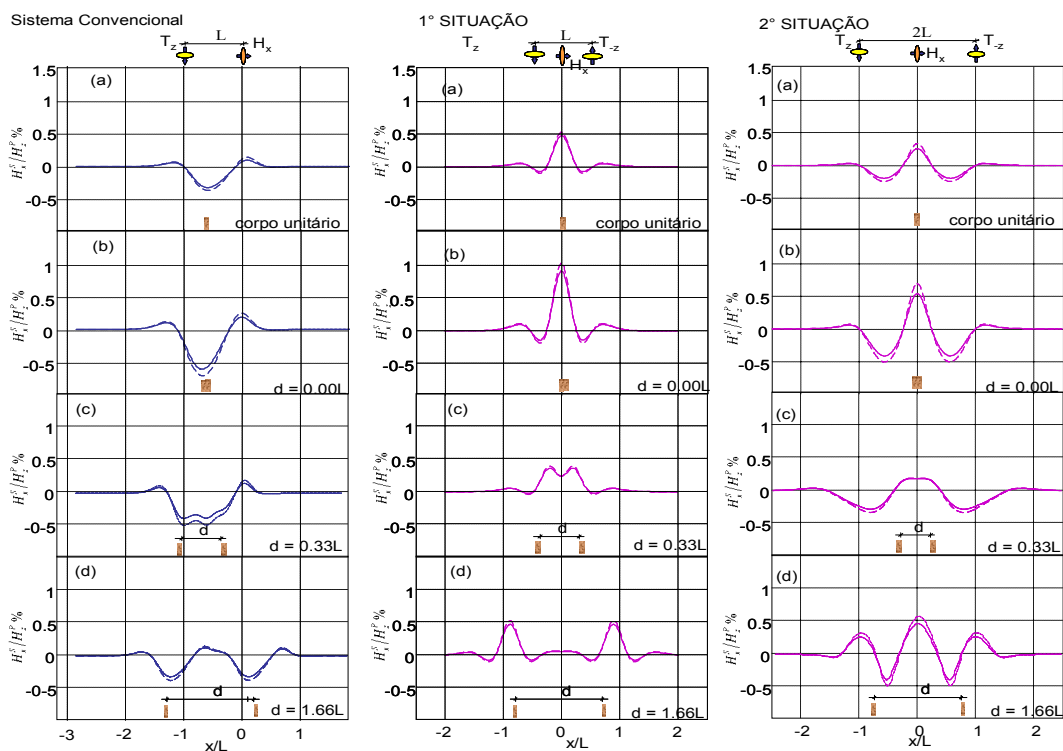


FIGURA 4.9 – Anomalias horizontais H_x^S / H_x^P % de prismas verticais em campo com polarização horizontal.

No item (c) a 1º indicação de discriminação e, em (d) 2º indicação de discriminação.

5 ANÁLISES DAS ANOMALIAS PRODUZIDAS PELOS SISTEMAS POLFOCEM E CONVENCIONAIS ATRAVÉS DE DIAGRAMAS DE ARGAND.

Através de diagramas de Argand foram comparadas as anomalias produzidas por campos com polarizações vertical e horizontal com as anomalias dos sistemas convencionais calculadas para alvos com baixos e altos valores de condutividades em diferentes profundidades.

A frequência dos transmissores é de 10 kHz e os espaçamentos entre eles são de $2L = 32$ m levando em consideração as geometrias, inclinações ($\theta = 90^\circ, 45^\circ$ e 0°) e as posições dos alvos em profundidade para que estes estejam acima, inseridos e abaixo da zona de foco que se localize na profundidade de $Z = 8$ m ($Z/L = 0,5$). Para tanto os alvos apresentaram as seguintes dimensões: altura de 4 m, espessura de 0,4 m e comprimento infinito na direção do eixo “y”, simulando alvos prismáticos bi-dimensionais.

Para este experimento foram escolhidos diferentes valores de profundidades e de condutividades dos alvos. As profundidades estão representadas por d/L (sendo ‘d’ a distância entre o ponto de cálculo das anomalias, localizado na superfície do semi-espaço de condutividade 10^{-3} S/m, e o topo do alvo). Assim, variou-se d/L de 0,25, 0,34, 0,40 e 0,50 para $\theta = 90^\circ$, $p/L = 0,32, 0,38, 0,44$ e 0,50 para $\theta = 45^\circ$ e finalmente $d/L = 0,46, 0,48, 0,50$ e 0,52 para $\theta = 0^\circ$. As condutividades foram divididas em dois grupos caracterizando baixos e altos valores, representadas pelo parâmetro σt , sendo σ a condutividade do alvo em S/m (parâmetro variável) e t a espessura do mesmo em metros (parâmetro fixo, com $t = 0,4$ m). Então, esses valores ficaram assim representados: 0,06, 0,08, 0,10 e 0,12 correspondentes a baixas condutividades e 0,32, 0,48, 0,64 e 0,80 correspondentes a altas condutividades.

Os diagramas de Argand foram calculados tomando os valores pico a pico das componentes verticais (H_z^S) e horizontais (H_x^S) das anomalias EM-FASE e QUADRATURA.

5.1 POLARIZAÇÃO VERTICAL (H_z^P)

Nas FIG. 5.1, 5.3 e 5.5 são apresentados os diagramas de Argand para o primeiro grupo de valores de σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80) e nas FIG. 5.2, 5.4 e 5.6, o segundo grupo de valores (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12) em que no item (a) a componente calculada é a vertical (H_z^S) e, em (b), é a horizontal (H_x^S). Para as inclinações dos alvos de 90° , 45° e 0° .

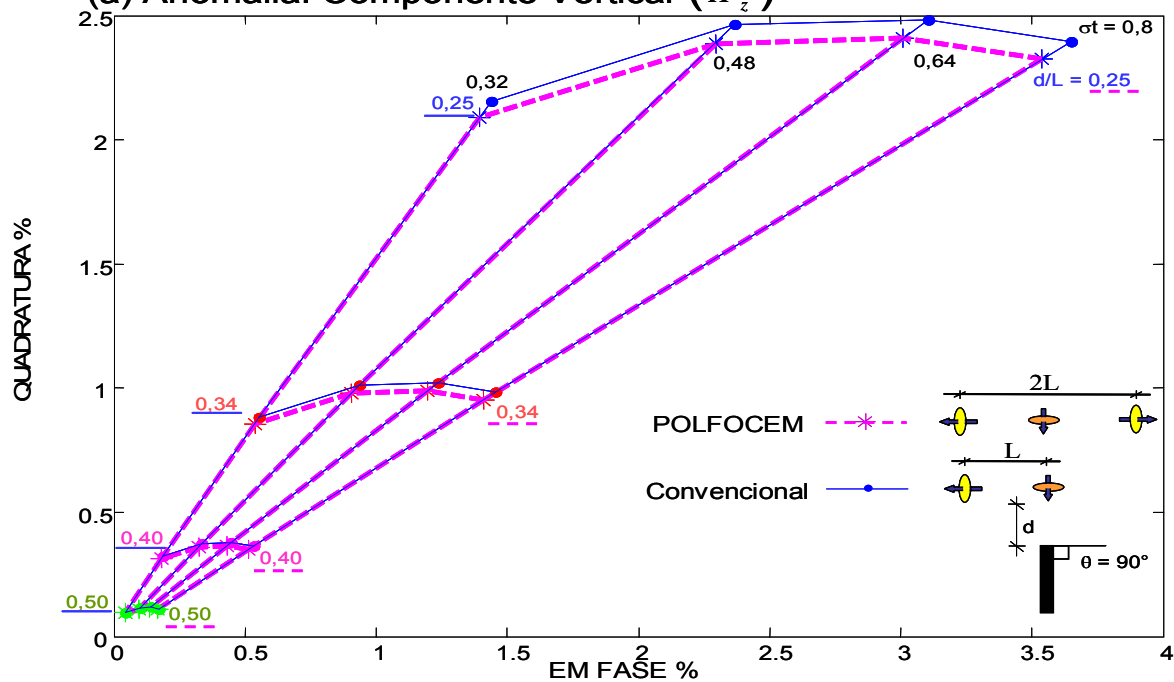
5.1.1 Componentes Vertical (H_z^S) e Horizontal (H_x^S) dos campos secundários

Observa-se nas FIG. 5.1 a 5.6, para quaisquer das três inclinações, que nos itens (a) as componentes verticais (H_z^S) EM-FASE e QUADRATURA são menores quando os alvos estão sob a influência dos campos com polarização vertical (sistema POLFOCEM) e, como consequência desta diminuição, para baixos valores de σt (FIG. 5.2, 5.4 e 5.6), ocorre uma rotação deste diagrama no sentido horário comparado com o diagrama do sistema convencional. Porém esta rotação não ocorre para altos valores de σt (FIG. 5.1, 5.3 e 5.5). Os motivos da diminuição dessas anomalias já foram discutidos no capítulo 3, na seção 3.2.1.1.

Nos itens (b) destas mesmas figuras são apresentadas as componentes horizontais (H_x^S) EM-FASE e QUADRATURA. Para esta componente as anomalias são maiores no sistema POLFOCEM do que no convencional e, como consequência deste aumento, para baixos valores de σt , ocorre uma rotação deste diagrama no sentido anti-horário comparado com o diagrama do sistema convencional. Da mesma forma que na componente anterior esta rotação não ocorre para altos valores de σt . No capítulo 3, na seção 3.2.1.2 já foram discutidos os motivos dessas anomalias serem maiores.

Polarização Vertical, $\theta = 90^\circ$, Altos σt

(a) Anomalia: Componente Vertical (H_z^s)



(b) Anomalia: Componente Horizontal (H_x^s)

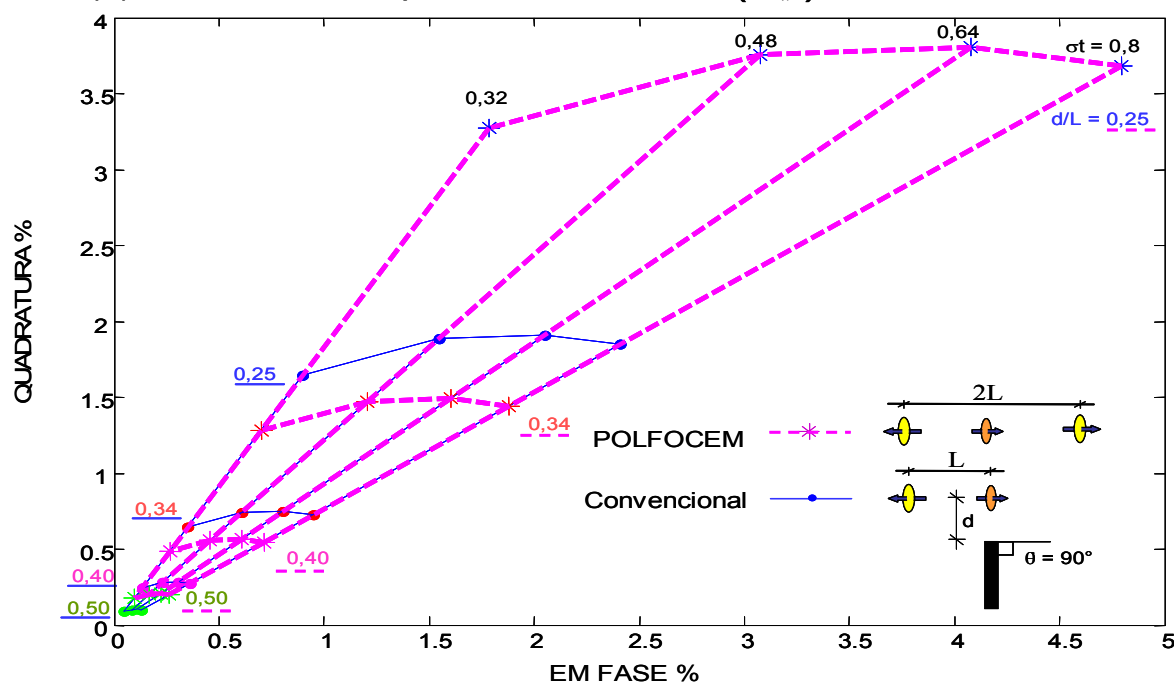
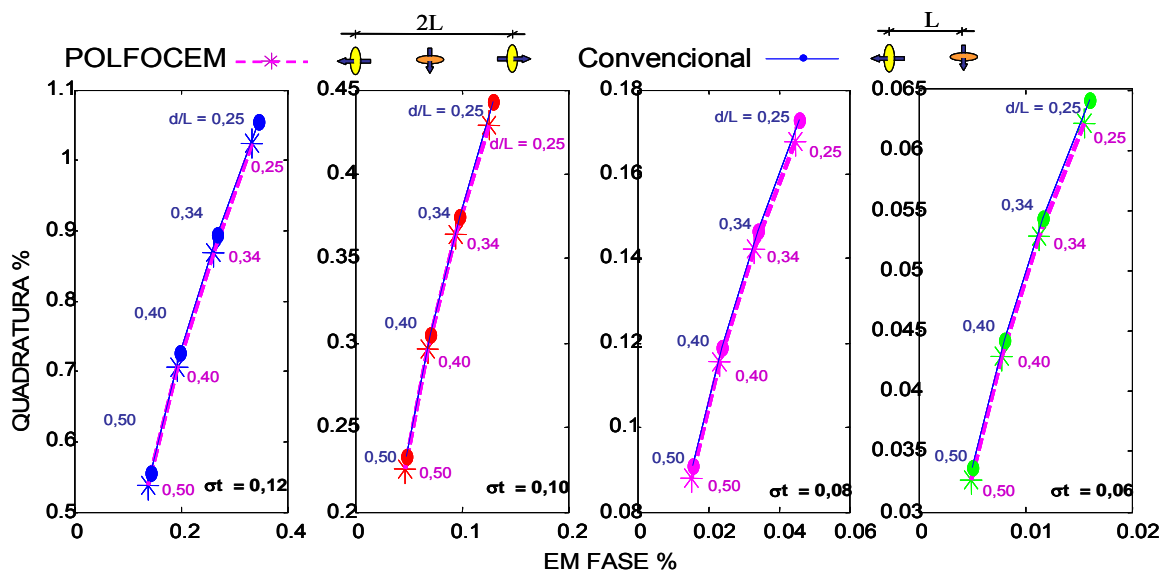


FIGURA 5.1 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo vertical com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

Polarização Vertical, $\theta = 90^\circ$, baixos σt

(a) Anomalia: Componente Vertical (H_z^S)



(b) Anomalia: Componente Horizontal (H_x^S)

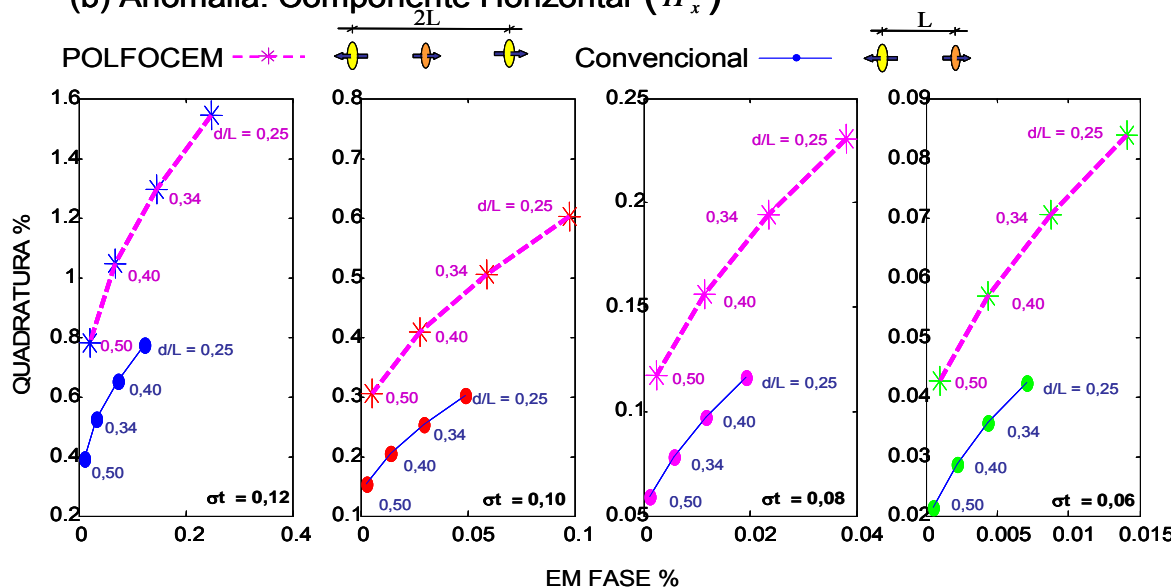


FIGURA 5.2 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo vertical com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

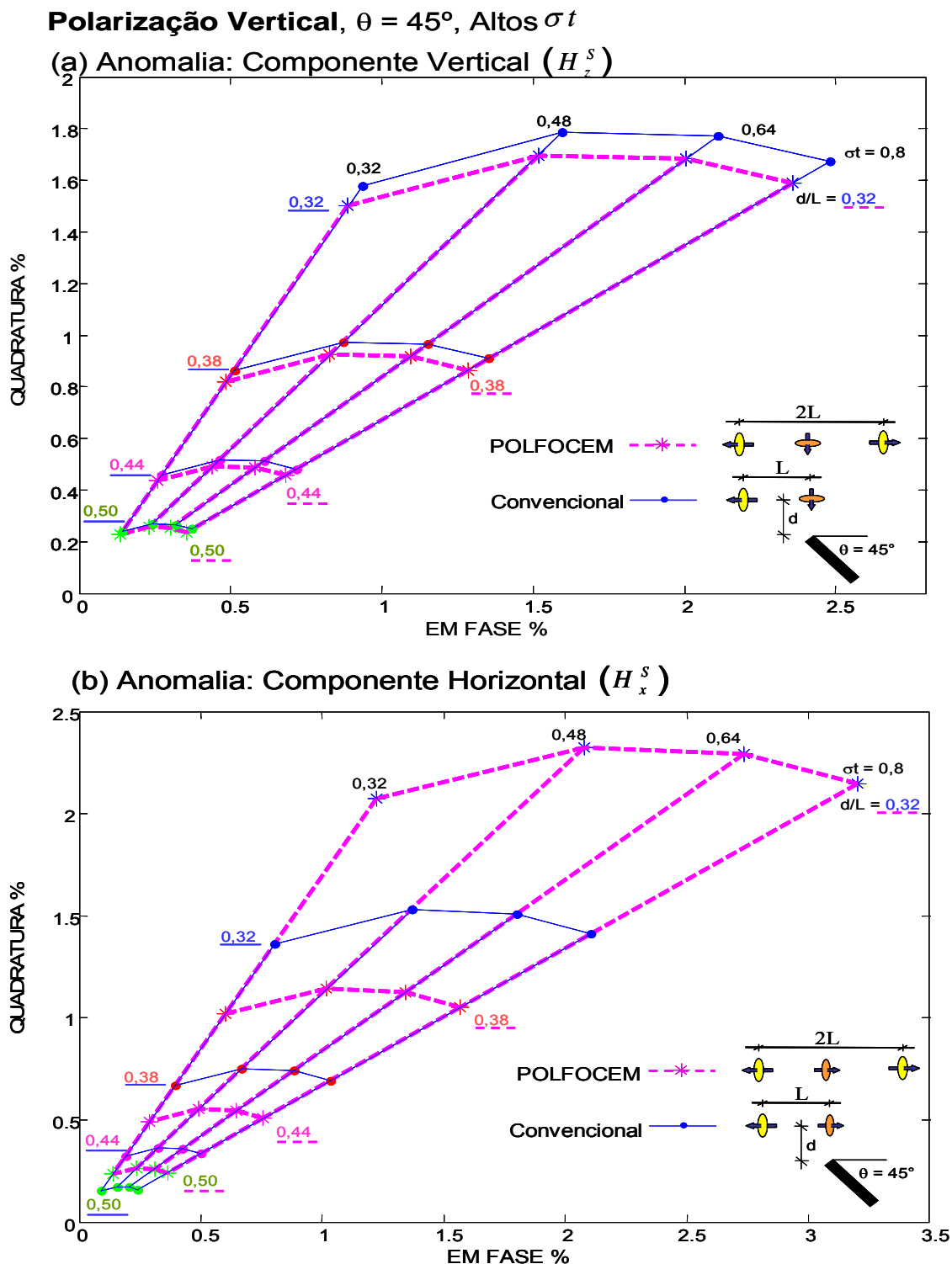
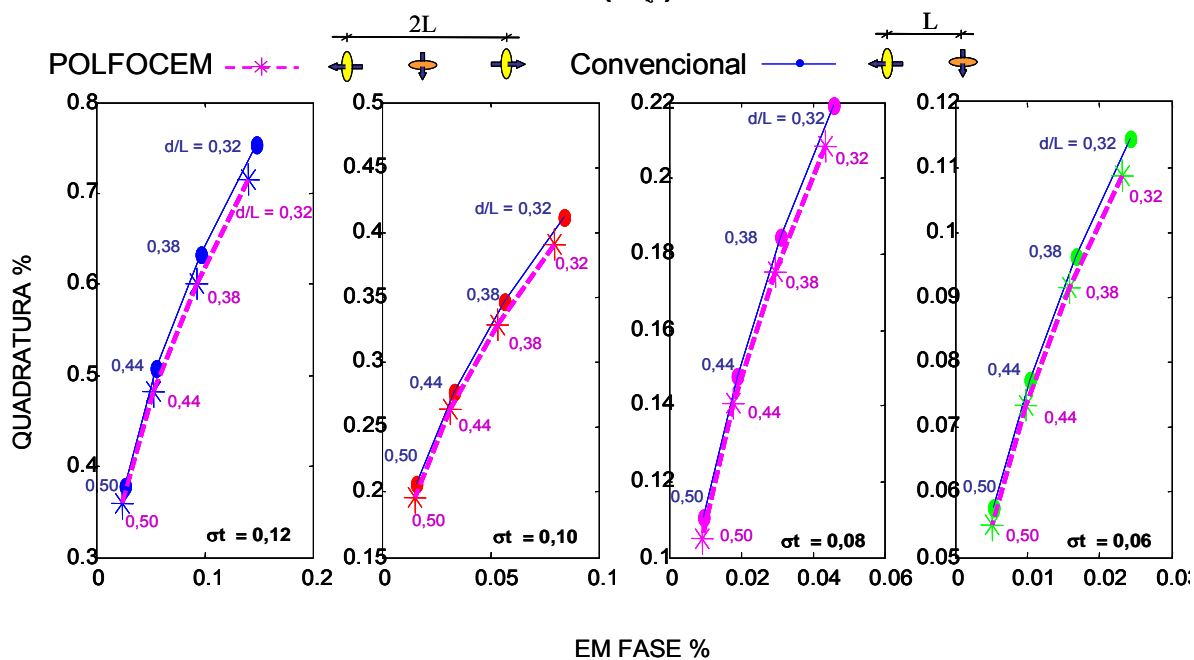


FIGURA 5.3 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo com inclinação de 45° com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

Polarização Vertical, $\theta = 45^\circ$, baixos σt

(a) Anomalia: Componente Vertical (H_z^S)



(b) Anomalia: Componente Horizontal (H_x^S)

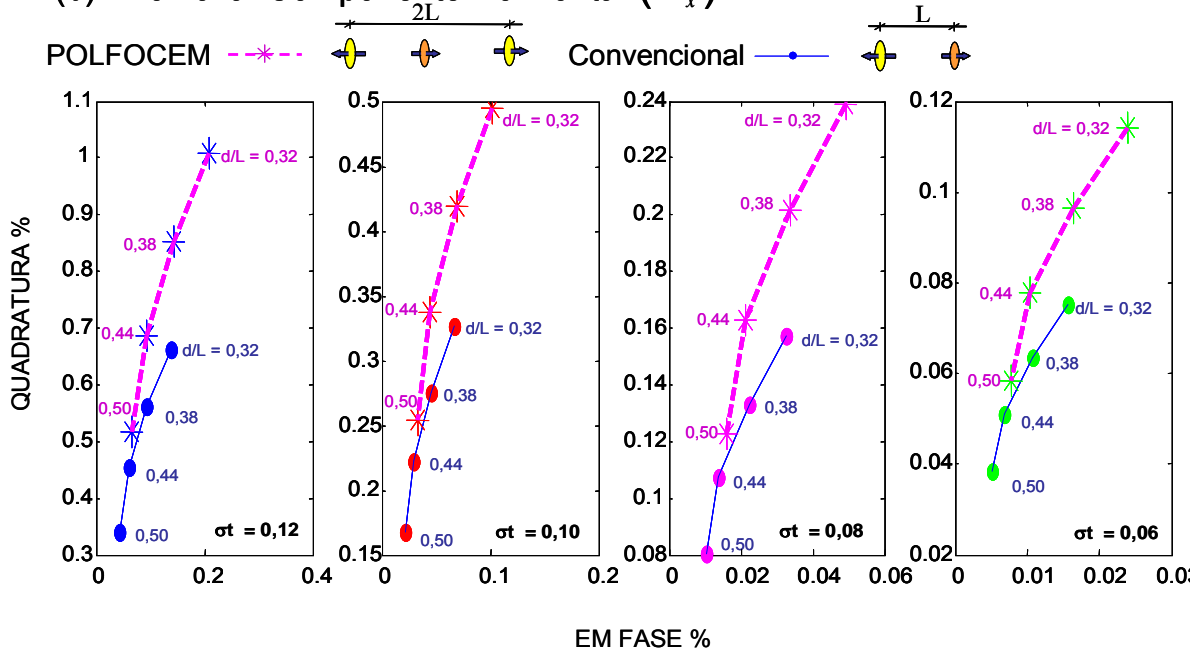


FIGURA 5.4 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo com inclinação de 45° com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

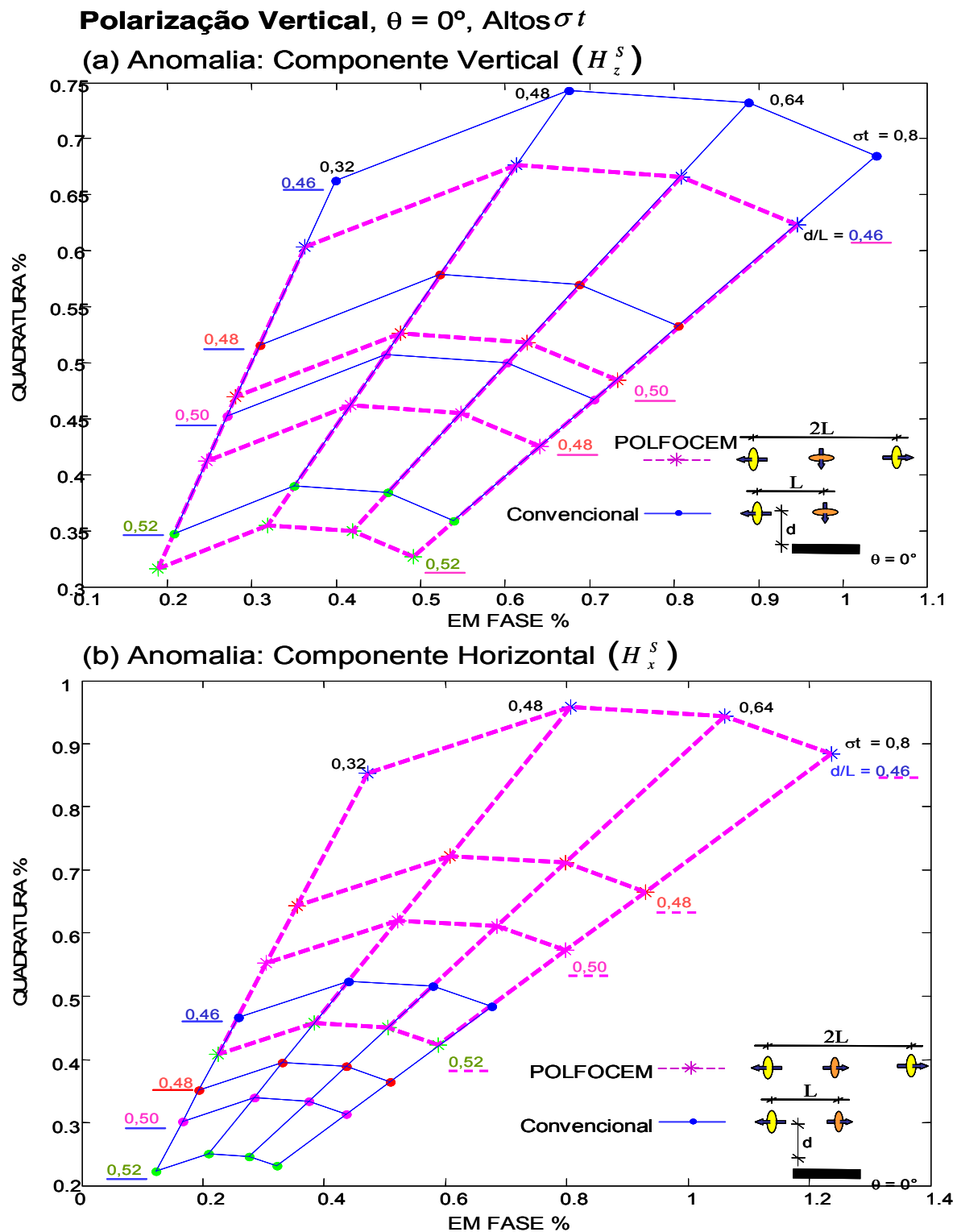
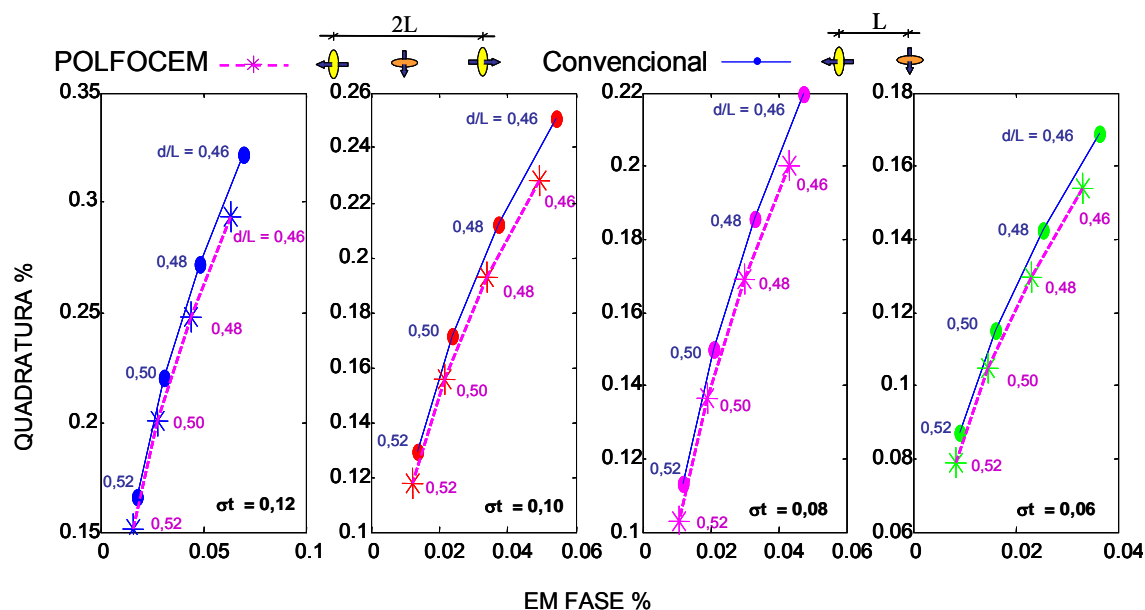


FIGURA 5.5 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo horizontal com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

Polarização Vertical, $\theta = 0^\circ$, baixos σt

(a) Anomalia: Componente Vertical (H_z^S)



(b) Anomalia: Componente Horizontal (H_x^S)

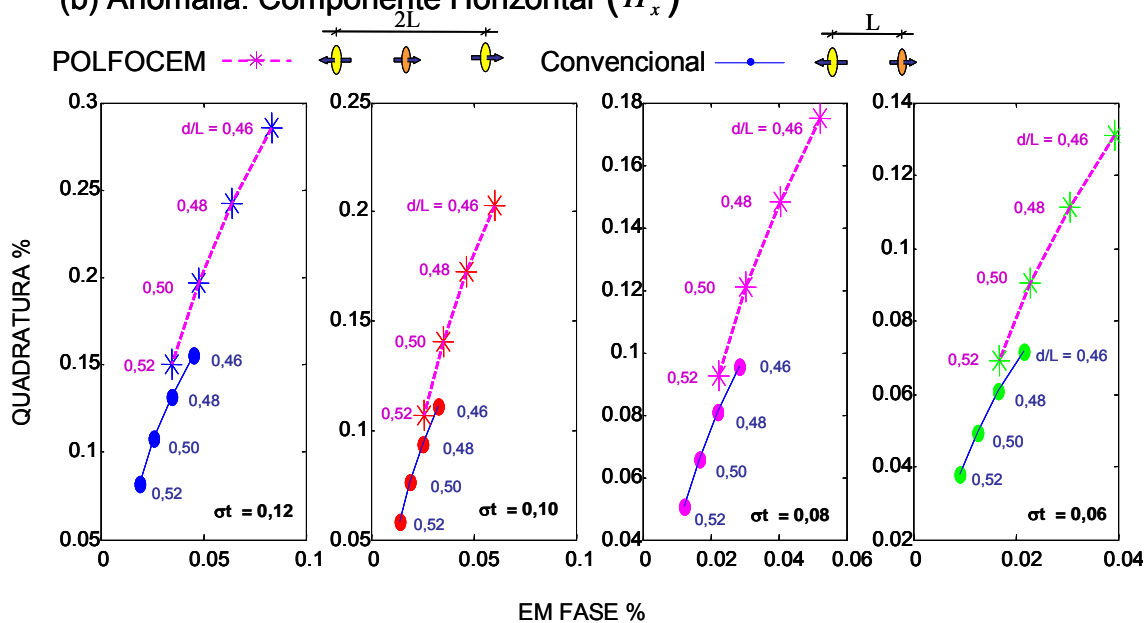


FIGURA 5.6 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM e convencional, calculadas para um alvo horizontal com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

5.2 POLARIZAÇÃO HORIZONTAL (H_x^P)

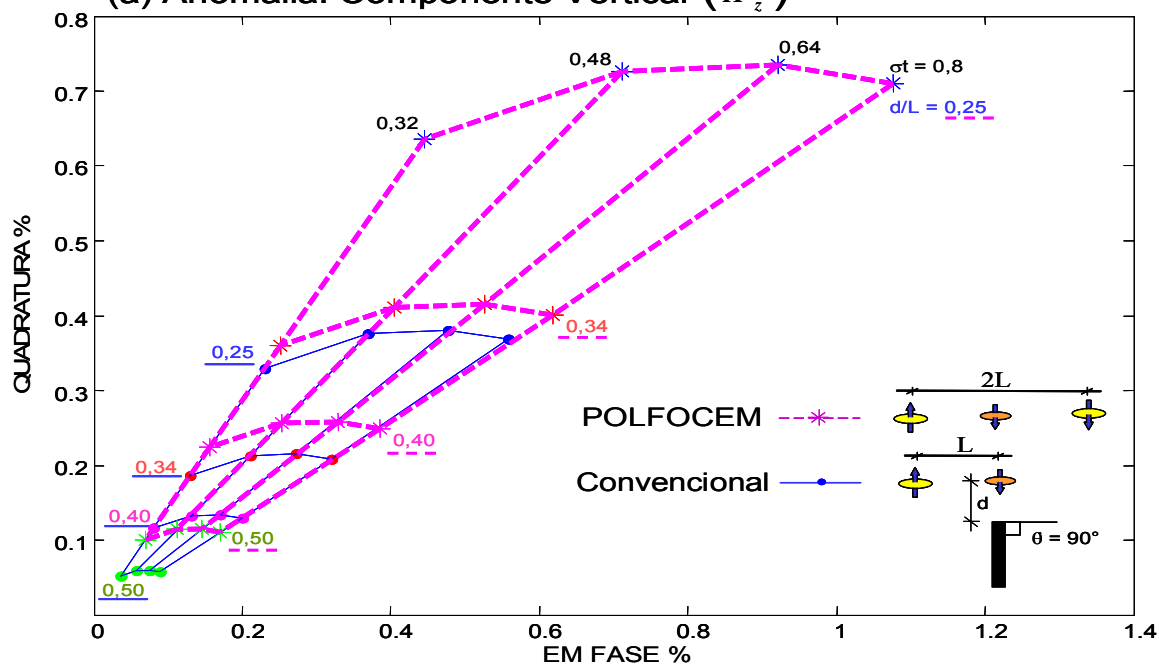
As FIG. 5.7, 5.9 e 5.11 apresentam os diagramas de Argand para o primeiro grupo de valores de σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80) e as FIG. 5.8, 5.10 e 5.12, o segundo grupo de valores de σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em que, em (a) a componente calculada é a vertical (H_z^S) e, em (b), é a horizontal (H_x^S). Para as inclinações dos alvos de 90° , 45° e 0° .

5.2.1 Componentes Vertical (H_z^S) e Horizontal (H_x^S) dos campos secundários

Observa-se que para as componentes verticais (H_z^S), nas três inclinações dos alvos e, nas componentes horizontais (H_x^S), somente para os alvos com inclinações de 90° , 45° , as anomalias EM-FASE e QUADRATURA são maiores quando os alvos estão sob a influência dos campos com polarização horizontal e, conseqüentemente, para baixos valores de σt (FIG. 5.8, 5.10 e 5.12), estes diagramas sofrem uma rotação no sentido anti-horário não ocorrendo para os altos valores de σt . Porém para o alvo horizontal ($\theta = 0^\circ$) nas componentes horizontais (H_x^S), as anomalias EM-FASE e QUADRATURA são menores quando estes alvos estão sob a influência dos campos com polarização horizontal e, conseqüentemente, para baixos valores de σt (FIG. 5.8, 5.10 e 5.12), estes diagramas sofrem uma rotação no sentido horário não ocorrendo para os altos valores de σt . Da mesma forma como na polarização vertical as explicações referentes ao aumento ou diminuição destas anomalias podem ser verificadas no capítulo 3 na seção 3.2.2.

Polarização Horizontal, $\theta = 90^\circ$, Altos σt

(a) Anomalia: Componente Vertical (H_z^s)



(b) Anomalia: Componente Horizontal (H_x^s)

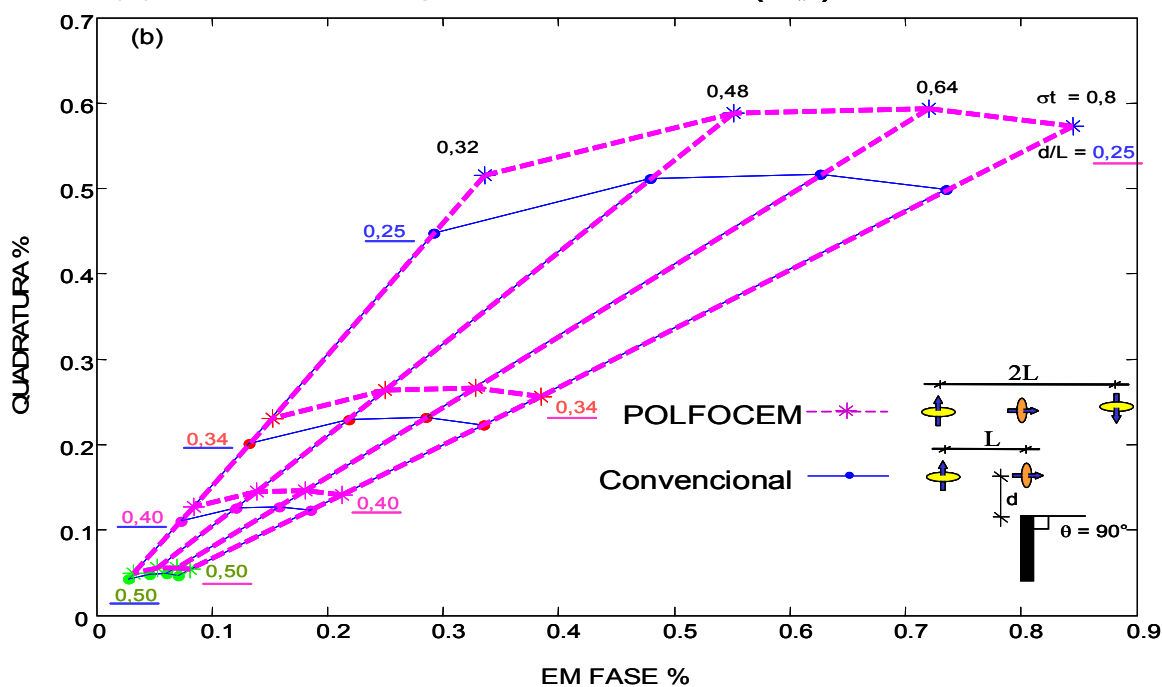


FIGURA 5.7 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo vertical com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

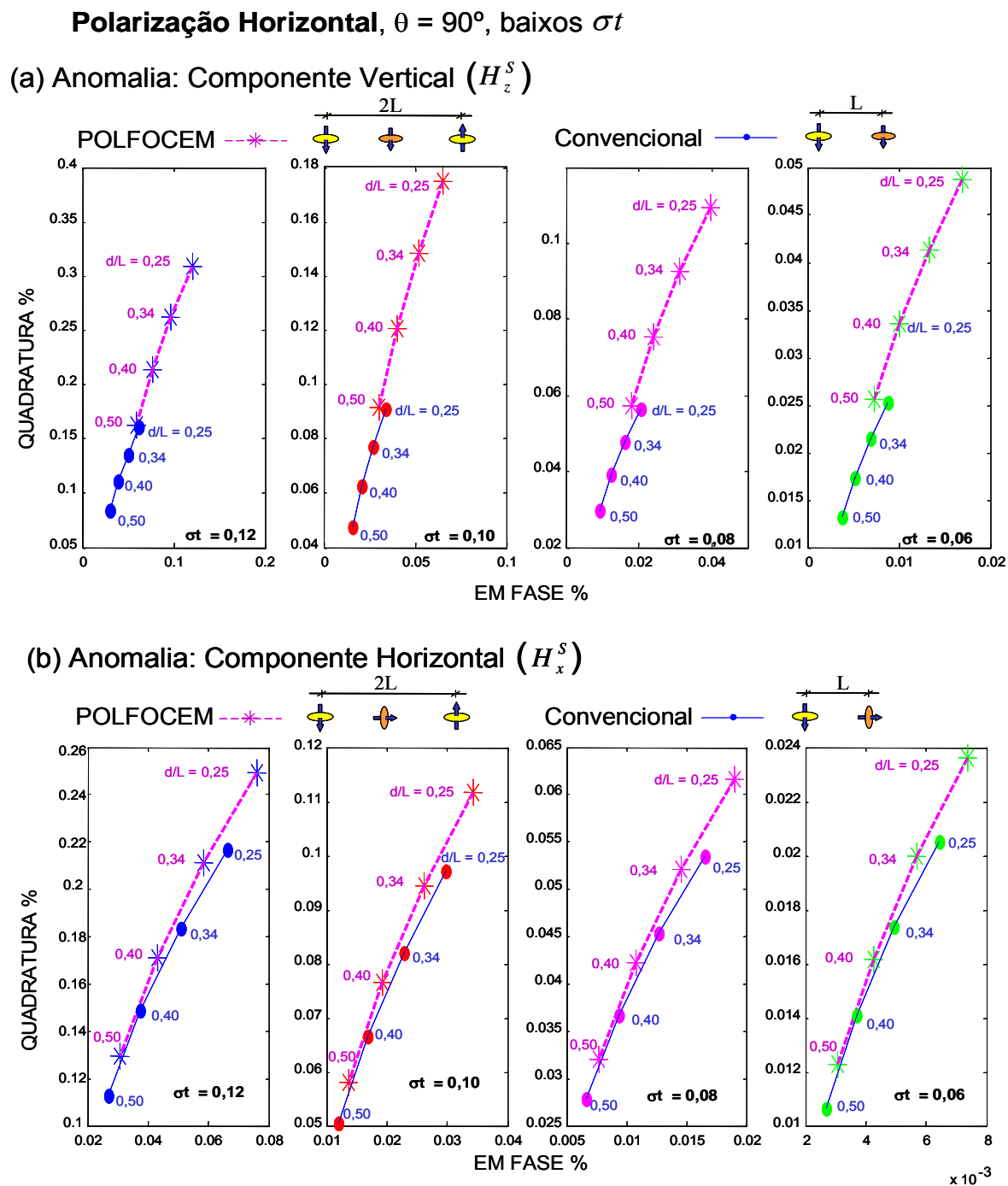


FIGURA 5.8 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo vertical com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

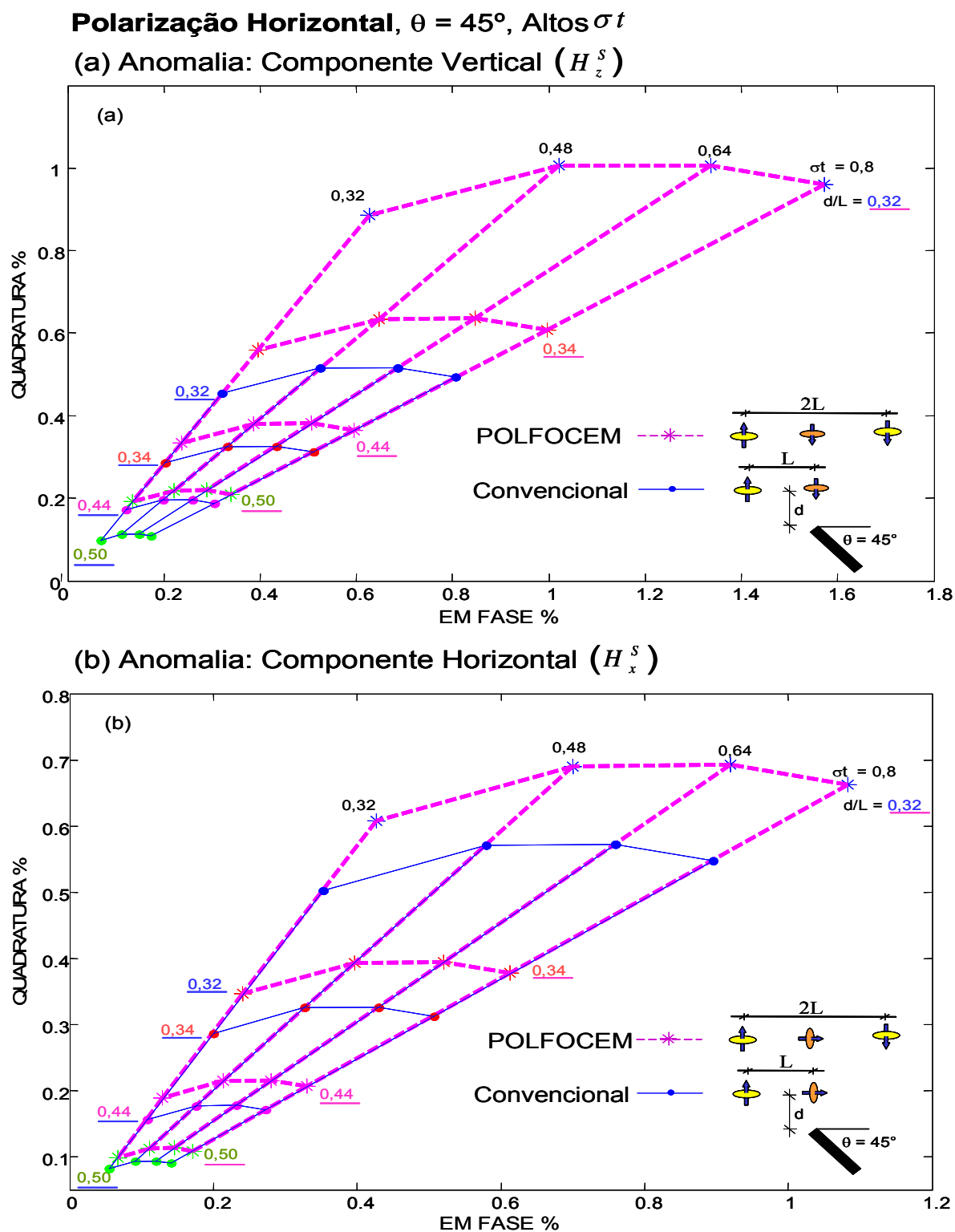
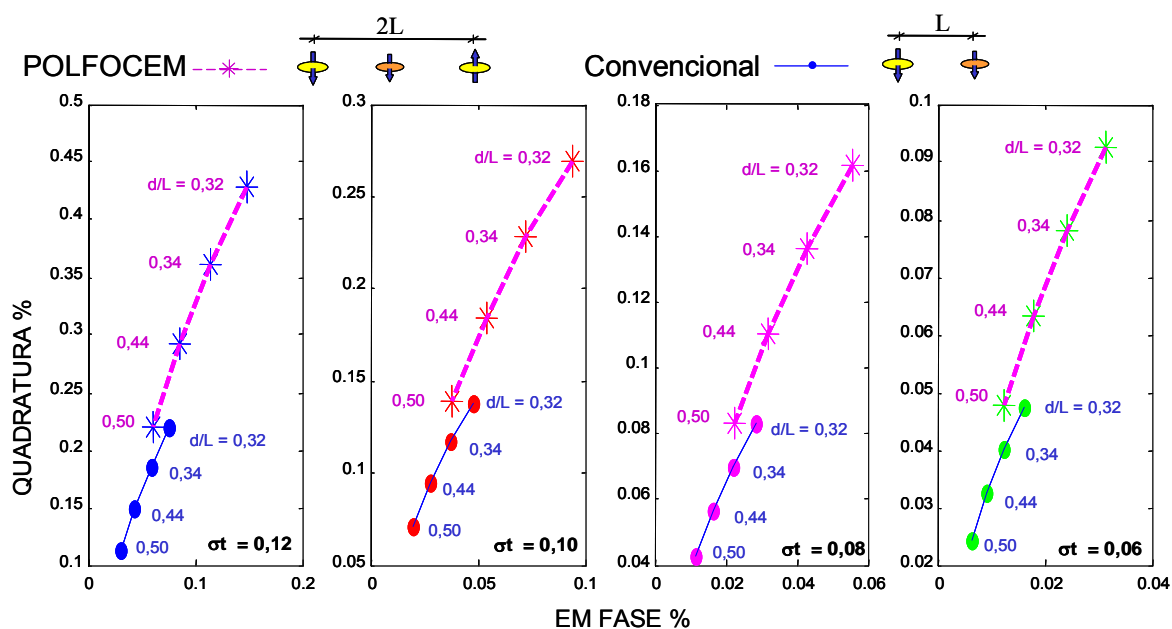


FIGURA 5.9 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo com inclinação de 45° e, com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

Polarização Horizontal, $\theta = 45^\circ$, baixos σt

(a) Anomalia: Componente Vertical (H_z^S)



(b) Anomalia: Componente Horizontal (H_x^S)

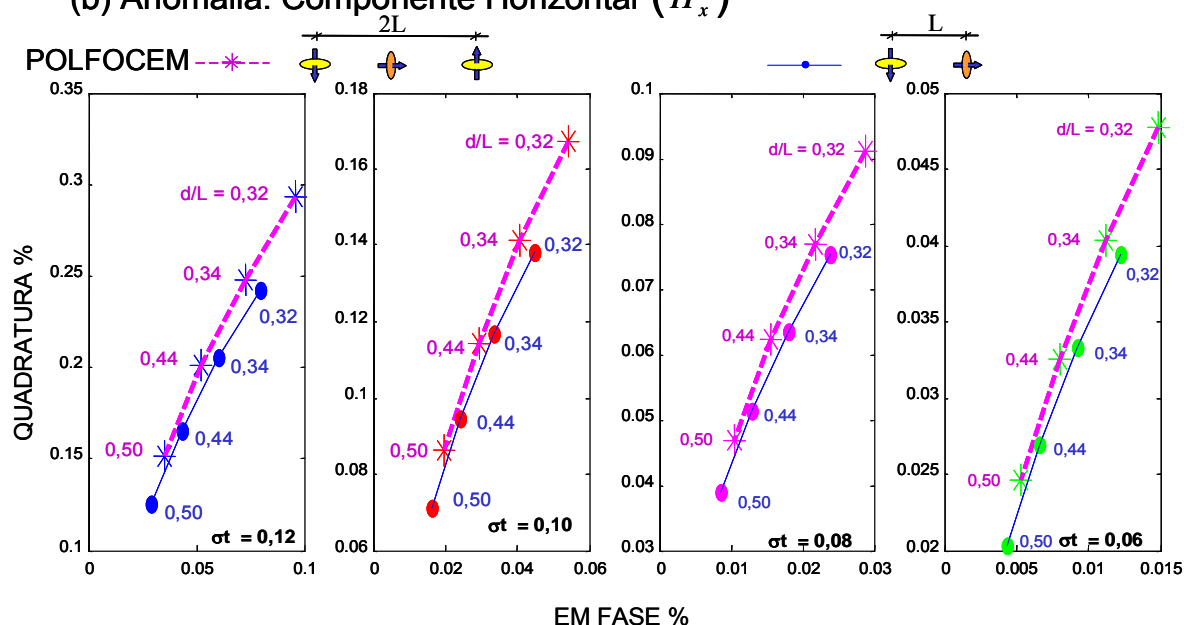


FIGURA 5.10 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo com inclinação de 45° e, com σt (0,06, 0,08, 0,10 e 0,12), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

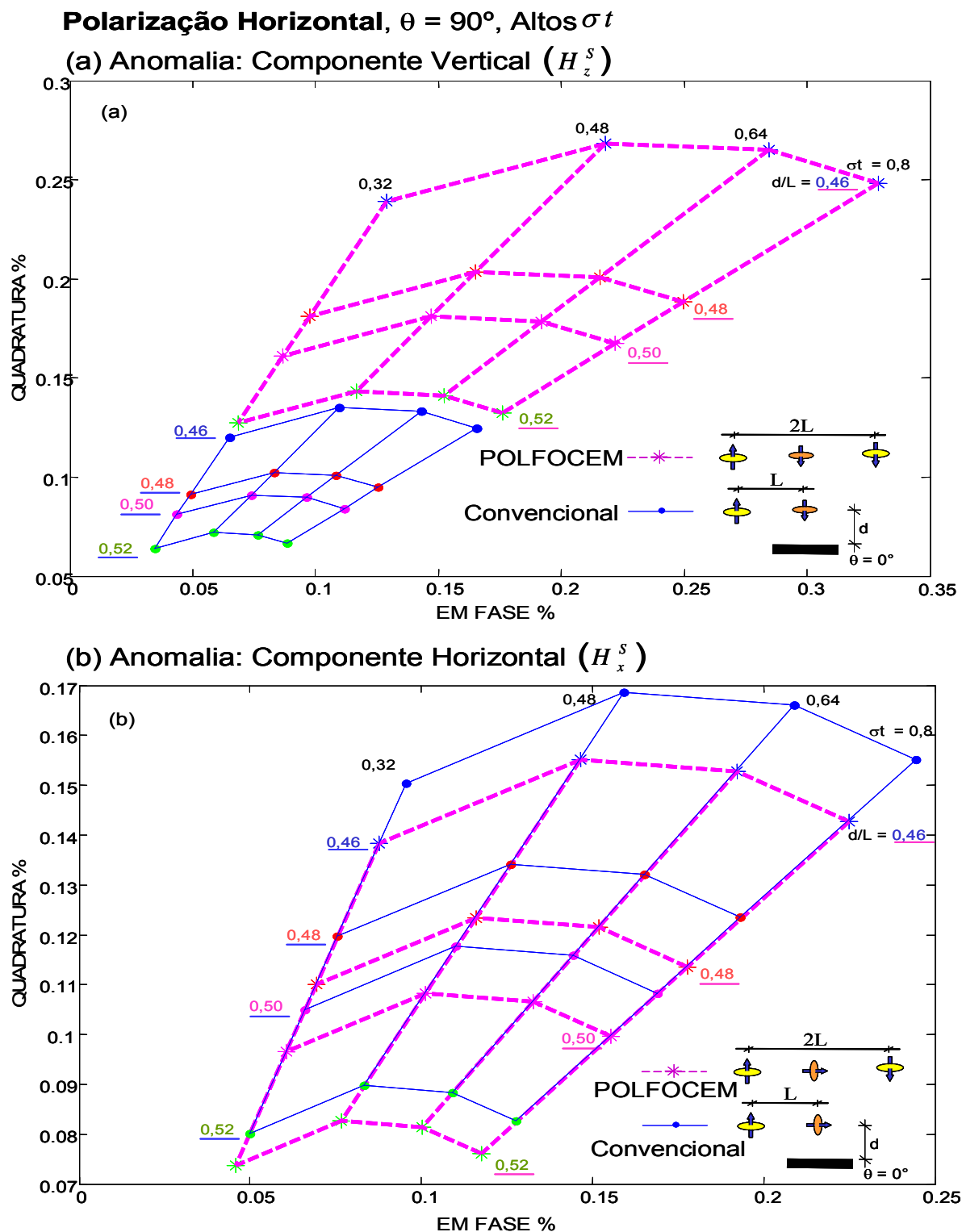
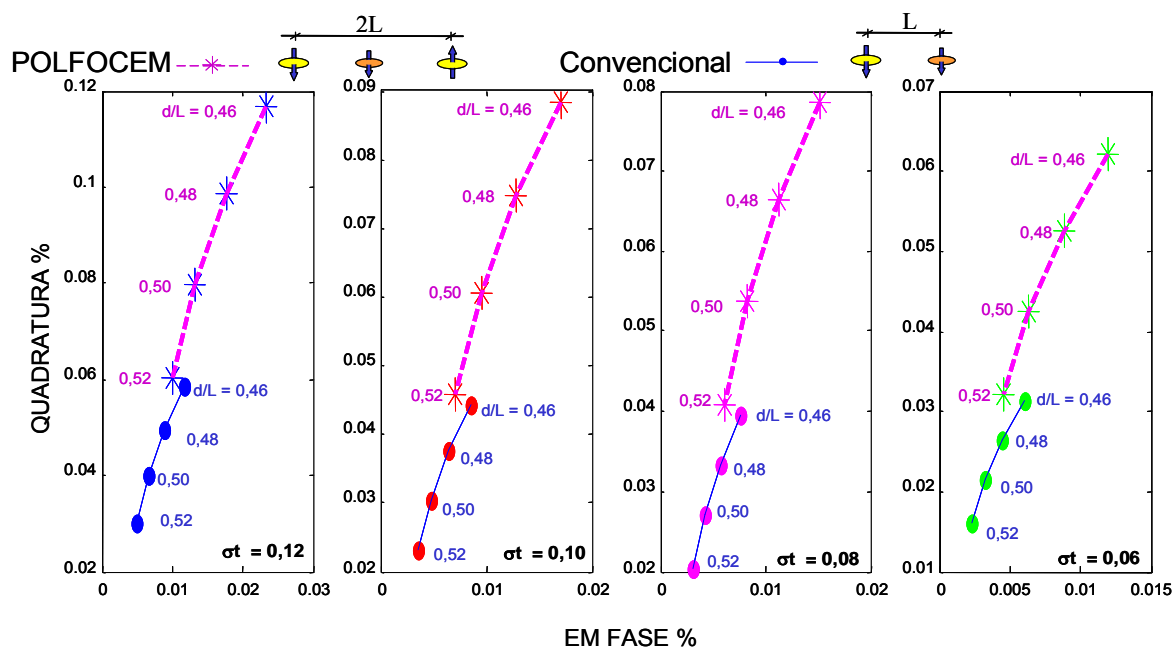


FIGURA 5.11 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo horizontal com σt (0,32, 0,48, 0,64 e 0,80), em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

Polarização Horizontal, $\theta = 0^\circ$, baixos σt

(a) Anomalia: Componente Vertical (H_z^S)



(b) Anomalia: Componente Horizontal (H_x^S)

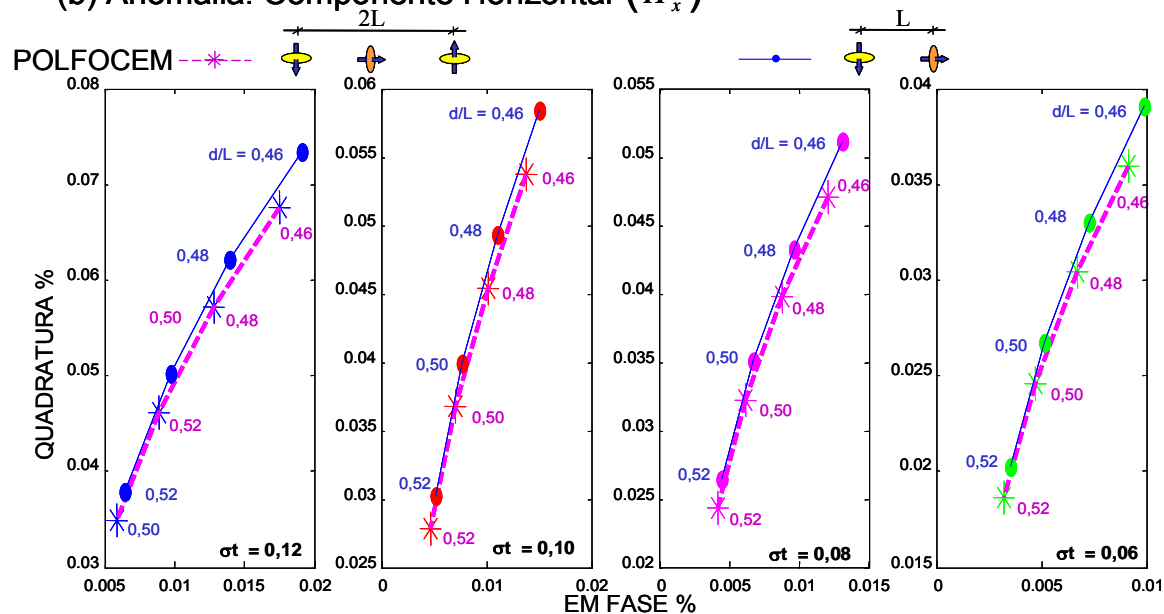


FIGURA 5.12 – Comparação entre as anomalias do sistema POLFOCEM (com polarização horizontal) e convencional, calculadas para um alvo horizontal com σt , em diferentes profundidades. Em (a) a componente H_z^S e, em (b) a componente H_x^S .

6 CONCLUSÃO

Esta tese estudou a geração da **POL**arização e **FO**calização de **C**ampos **E**letr**M**agnéticos (POLFOCEM) sobre alvos prismáticos condutivos com “baixo número de indução” (*Low Induction Number – LIN*), para aumentar o acoplamento e a densidade de fluxo magnético sobre eles e, conseqüentemente, melhorar as anomalias eletromagnéticas que normalmente são muito baixas e difíceis de serem interpretadas.

O sistema POLFOCEM emprega pares de dipolos como transmissores, para gerar campos focalizados e polarizados vertical e horizontalmente na região central entre eles. Assim, a polarização vertical foi obtida pela combinação de dois dipolos horizontais antiaxiais $\left[\left(-\overrightarrow{DMH} \right) + \left(+\overrightarrow{DMH} \right) \right]$, e a polarização horizontal pelo par de dipolos verticais antiparalelos $\left[\left(+\overrightarrow{DMV} \right) + \left(-\overrightarrow{DMV} \right) \right]$, ambos focalizando esses campos na profundidade correspondente a um quarto do espaçamento entre esses transmissores.

Os perfis de anomalias do sistema POLFOCEM nada mais são do que a soma de um perfil calculado para o dipolo da esquerda com o perfil do dipolo da direita. Isto ocorre devido à linearidade dos campos eletromagnéticos.

Vantagens e limitações puderam ser verificadas com o emprego do sistema POLFOCEM. Verificaram-se aumentos e diminuições nos valores de amplitudes das anomalias eletromagnéticas (valores pico a pico de cada perfil), bem como mudanças em suas geometrias. As anomalias que eram simétricas e assimétricas no sistema convencional e tornaram-se anti-simétricas, apresentaram aumentos em suas amplitudes da ordem de 49% a 99% (para a polarização vertical) e 94% a 99% (para a polarização horizontal), nas três inclinações dos alvos. Porém, as anomalias que eram assimétricas e tornaram-se simétricas, sofreram diminuição da ordem de -9% a -3% (para a polarização vertical, nas três inclinações e para a polarização horizontal, apenas para o alvo a $\theta = 0^\circ$), aproximadamente.

As mudanças nas geometrias das anomalias podem apresentar dificuldades na indicação da inclinação dos alvos condutivos, por este motivo, os sistemas convencionais

prevalecem sobre o POLFOCEM, em contrapartida, os ganhos em amplitude podem ser de grande valia no reconhecimento das anomalias.

No experimento de identificação de dois alvos prismáticos com pequenas distâncias entre si, observou-se que em geral o uso dos sistemas convencionais prevaleceu sobre o POLFOCEM, sendo que este último apresentou vantagens quando os alvos são verticais em campos com polarizações vertical e horizontal calculados na componente horizontal.

As anomalias apresentadas nos diagramas de Argand, para alvos com baixos valores de condutividade, sofreram rotações no sentido horário ou anti-horário no sistema POLFOCEM comparados com o convencional:

- Para a polarização vertical nas três inclinações – anomalias: para a componente vertical a rotação foi horária e para a componente horizontal a rotação foi anti-horária;
- Para a polarização horizontal nas inclinações de $\theta = 90^\circ$ e 45° houve rotação anti-horária para as duas componentes, porém para $\theta = 0^\circ$ na componente vertical a rotação foi anti-horária e na componente horizontal a rotação foi horária.

6.1 SUGESTÕES

Recomenda-se para estudos futuros o emprego do sistema POLFOCEM nas seguintes situações:

- A inclusão de ruídos geológicos;
- Cálculos das anomalias na presença de manto de intemperismo;
- Aplicação na geofísica de poço para a identificação de camadas finas e a influência da zona lavada sobre estas camadas e alvos condutivos;
- Em tomografia eletromagnética poço a poço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CARVALHO, P. R. 2000. *Respostas Eletromagnéticas dos Arranjos Coplanar e Coaxial em Poço*. Belém, Universidade Federal do Pará. Belém, 79F (Tese de Doutorado)
- DANIELS, D. J.; GUNTON, D. J.; SCOTT, H. F. 1988. Introduction to Surface Radar. *IEEE Proceedings*, 135 (F, 4): 278-320.
- DAVIS, J.L.; ANNAN, A.P. 1989. Ground-Penetrating Radar for High-Resolution of Soil and Rock Stratigraph. *Geophysical Prospecting*, 37 (5): 531-551.
- DUBUS, J. P.; CLICQUE, J.; GABILARD, R. 1978. Procèds de Filtrage de Focalisation de Champ pour la Detection Electromagnetique des carries Souterraines. *Geophysical Prospecting*, 26: 407-420.
- GRANT, F. S.; WEST, G. F. 1965. *Interpretation theory in Applied Geophysics*. New York: Mc Graw-Hill Book. 584p.
- HAGIWARA, T. 1985. A Focused very High Frequency Induction Log. In: 55th Annual Meeting of the Society of Exploration Geophysics, Borehole Geophysics IV. *Extended Abstracts*. [S.L.]. p. 79-812
- HOHMANN, G. W. 1988. *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics*. [S.L.]: Society of Exploration Geophysics. v. 1 e2.
- KAUFMAN, A. A.; KELLER, G. V. 1989. *Induction Logging*. Amsterdam: Elsevier. 600p
- LOWRIE, W., WEST, G. F. 1965. The Effect of a Conducting Overburden on Electromagnetic Prospecting Measurements. *Geophysics*. 30 (4): 624-632.
- RIJO, L. 1990. *Teoria dos Métodos eletromagnéticos I e II*: Notas de aulas do Curso de Pós-Graduação em Geofísica da UFPA. Belém.
- RIJO, L. 1996. *Respostas Eletromagnéticas de Dimensões 2,5 e 3,5*: Belém, UFPA. CG. (Dissertação do Concurso de Professor Titular do Departamento de Geofísica do Curso de Pós-Graduação em Geofísica da UFPA). Belém, p. 75.

SCHLUMBERGER LOG INTERPRETATION. Principles. [S.l.: s.n.], 1972. v. 1, cap. 4.

SPIES, B. R. 1975. The Dual Loop Configuration of the Transient Electromagnetic Method. *Geophysics*, 40: 1051-1057.

STOYER. C. H.; GREENFIELD, R. J. 1976. Numerical Solution of the Response of Two Dimensional Earth to Anoscilating Magnetic Dipole Source. *Geophysics*. (41): 519-530.

ANEXOS

ANEXO 1

Componentes do campo eletromagnético num semi-espço

Num semi-espço homogêneo, as componentes magnéticas e elétricas para o Dipolo Magnético Horizontal (DMH) e para o Dipolo Magnético Vertical (DMV), na superfície do terreno, escritas no domínio k_x, k_y e k_r (HOHMANN, 1988, RIJO, 1996) são dadas por:

Dipolo magnético horizontal na direção x (DMH).

Componentes \hat{H}_x^P e \hat{H}_z^P do campo magnético escrito na forma da transformada de Hankel:

$$\hat{H}_x^P = -\frac{m}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{2x^2}{r^3} \right) \int_0^\infty \frac{u_1 k_r e^{-u_1 z}}{k_r + u_1} J_1(k_r r) dk_r - \frac{m}{2\pi} \left(\frac{x^2}{r^3} \right) \int_0^\infty \frac{u_1 k_r^2 e^{-u_1 z}}{k_r + u_1} J_0(k_r r) dk_r, \quad (1)$$

e

$$\hat{H}_z^P = -\frac{m}{2\pi} \left(\frac{x}{r} \right) \int_0^\infty \frac{k_r^3 e^{-u_1 z}}{k_r + u_1} J_1(k_r r) dk_r. \quad (2)$$

Componentes \hat{E}_x^P e \hat{E}_y^P do campo elétrico escrito na forma da transformada de Fourier:

$$\hat{E}_x^P(x, k_y, z) = 2 \int_0^{+\infty} \frac{u_0}{u_0 + u_1} e^{-u_1 z} \frac{k_x k_y}{k_x^2 + k_y^2} \sin(k_x x) dk_x, \quad (3)$$

e

$$\hat{E}_y^P(x, k_y, z) = 2 \int_0^{+\infty} \frac{u_0}{u_0 + u_1} e^{-u_1 z} \frac{k_x^2}{k_x^2 + k_y^2} \cos(k_x x) dk_x. \quad (4)$$

2) Dipolo magnético vertical (DMV).

Componentes \hat{H}_r^P e \hat{H}_z^P do campo magnético escrito na forma da transformada de Hankel:

$$\hat{H}_r^P = \frac{m}{2\pi} \int_0^\infty \frac{k_r^3 e^{-u_1 z}}{k_r + u_1} J_1(k_r r) dk_r, \quad (5)$$

e

$$\hat{H}_z^P = \frac{m}{2\pi} \int_0^\infty \frac{k_r^3 e^{-u_1 z}}{k_r + u_1} J_0(k_r r) dk_r. \quad (6)$$

Componentes \hat{E}_x^P e \hat{E}_y^P do campo elétrico escrito na forma da transformada de Fourier:

$$\hat{E}_x^P(x, k_y, z) = 2 \int_0^{+\infty} \frac{u_0}{u_0 + u_1} e^{-u_1 z} k_y \cos(k_x x) dk_x, \quad (7)$$

e

$$\hat{E}_y^p(x, k_y, z) = -2 \int_0^{+\infty} \frac{u_0}{u_0 + u_1} e^{-u_1 z} k_x \sin(k_x x) dk_x. \quad (8)$$

em que $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, $k_r = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ e $u_1 = \sqrt{k_r^2 + i\omega\mu_0\sigma_1}$, sendo u_1 a constante de propagação e σ_1 a condutividade elétrica no semi-espaço, respectivamente; ω a frequência angular dada por $\omega = 2\pi f$, sendo f a frequência em Hz, μ_0 a permeabilidade magnética ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m e $\sigma_0 = 0$ no vácuo/ar), m_z o momento da fonte, J_0 e J_1 são as funções de Bessel de primeira espécie de ordem 0 e 1.

ANEXO 2

Modelo Bi-Dimensional: Fonte Tri-Dimensional (2-D/3-D)

EQUAÇÕES DE MAXWELL

As equações de Maxwell no domínio da frequência, do campo elétrico \vec{E} e magnético \vec{H} , são dadas por:

$$\nabla \times \vec{E} = -i\omega\mu\vec{H} - \vec{M}_i, \quad (1)$$

e

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + \vec{J}_i, \quad (2)$$

em que σ é a condutividade, μ a permeabilidade do meio, ω a frequência angular da corrente elétrica na fonte, \vec{J}_i e \vec{M}_i as densidades de corrente elétrica e magnética no transmissor, respectivamente.

Esses campos representam o campo total composto pela soma de duas quantidades: uma primária, devido à presença da fonte eletromagnética e outra secundária, que é induzida pela heterogeneidade presente no meio. Essa separação é adotada visando a estabilidade numérica do método (RIJO, 1996). Assim, separando o campo total em primário e secundário, a condutividade total σ em condutividade primária σ^p (devido ao meio) e secundária $\Delta\sigma$ (devido ao contraste da condutividade da heterogeneidade em relação ao campo primário) e fazendo o mesmo com a permeabilidade, tem-se:

$$\nabla \times (\vec{E}^p + \vec{E}^s) = -i\omega(\mu^p + \Delta\mu)(\vec{H}^p + \vec{H}^s) - \vec{M}_i, \quad (3)$$

e

$$\nabla \times (\vec{H}^p + \vec{H}^s) = (\sigma^p + \Delta\sigma)(\vec{E}^p + \vec{E}^s) + \vec{J}_i. \quad (4)$$

Como os campos primários satisfazem as equações:

$$\nabla \times \vec{E}^p = -i\omega\mu^p\vec{H}^p - \vec{M}_i, \quad (5)$$

e

$$\nabla \times \vec{H}^p = \sigma^p\vec{E}^p + \vec{J}_i, \quad (6)$$

resulta de (3) e (4) que as equações do campo secundário são:

$$\nabla \times \vec{E}^s = -i\omega\mu\vec{H}^s - i\omega\Delta\mu\vec{H}^p, \quad (7)$$

e

$$\nabla \times \vec{H}^p = \sigma\vec{E}^s + \Delta\sigma\vec{E}^p. \quad (8)$$

Note que as fontes energizantes do campo primário são as correntes no transmissor, enquanto que as fontes energizantes do campo secundário são as correntes induzidas na heterogeneidade.

Explorando a característica da heterogeneidade se alongada (infinita) na direção “y” e suas propriedades físicas não variarem nesta direção, com a permeabilidade magnética constante, sendo $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m no vácuo. O problema que é tridimensional é reduzido a uma série de problemas bidimensionais. Para tanto é usada uma transformada especial de Fourier para passar do domínio “y” para o domínio k_y , sendo ela:

$$\hat{F}(x, k_y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(x, y, z) e^{-ik_y y} dy. \quad (9)$$

Assim, cada solução obtida por $\hat{F}(x, k_y, z)$ compõe a resposta de $F(x, y, z)$, dada pela transformada especial inversa de Fourier:

$$F(x, y, z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{F}(x, k_y, z) e^{ik_y y} dy. \quad (10)$$

Aplicando (9) em (7), as equações em coordenadas cartesianas se desdobram em:

$$ik_y \hat{E}_z^s - \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} = -i\omega\mu_0 \hat{H}_x^s, \quad (11)$$

$$\frac{\partial \hat{E}_x^s}{\partial z} - \frac{\partial \hat{E}_z^s}{\partial x} = -i\omega\mu_0 \hat{H}_y^s, \quad (12)$$

e

$$\frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} - ik_y \hat{E}_x^s = -i\omega\mu_0 \hat{H}_z^s; \quad (13)$$

e (9) em (8) as equações em coordenadas cartesianas se desdobra em:

$$ik_y \hat{H}_z^s - \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} = \sigma \hat{E}_x^s + \Delta \sigma \hat{E}_x^p, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \hat{H}_x^s}{\partial z} - \frac{\partial \hat{H}_z^s}{\partial x} = \sigma \hat{E}_y^s + \Delta \sigma \hat{E}_y^p, \quad (15)$$

e

$$\frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} - ik_y \hat{H}_x^s = \sigma \hat{E}_z^s + \Delta \sigma \hat{E}_z^p. \quad (16)$$

Após manipulação algébrica das equações de (1) a (16) escrevem-se as componentes do campo eletromagnético secundário $\hat{E}_x^s, \hat{H}_x^s, \hat{E}_z^s, \hat{H}_z^s$, dependentes apenas de \hat{E}_y^s, \hat{H}_y^s e do campo primário:

$$\hat{E}_x^s = \left(-\frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} - \frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) - \frac{\hat{z}_0 \Delta \sigma \hat{E}_x^p}{u_e^2}, \quad (17)$$

$$\hat{H}_x^s = \left(-\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} + \frac{\sigma}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) + \frac{ik_y \Delta \sigma \hat{E}_z^p}{u_e^2}, \quad (18)$$

$$\hat{E}_z^s = \left(\frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} - \frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\hat{z}_0 \Delta \sigma \hat{E}_z^p}{u_e^2}, \quad (19)$$

e

$$\hat{H}_z^s = \left(-\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} - \frac{\sigma}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) - \frac{ik_y \Delta \sigma \hat{E}_x^p}{u_e^2}, \quad (20)$$

em que $u_e^2 = k_y^2 + i\omega\mu_0\sigma$ é a constante de propagação e $\hat{z}_0 = i\omega\mu$.

Fazendo a substituição das equações (17) e (19) em (12), tem-se para o Modo transversal magnético (TM):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) - i\omega\mu_0 \hat{H}_y^s - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) \\ &= \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\hat{z}_0 \Delta \sigma}{u_e^2} \hat{E}_x^p \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\hat{z}_0 \Delta \sigma \hat{E}_z^p \right). \end{aligned} \quad (21)$$

De maneira análoga empregando as equações (18) e (20) em (15), tem-se para o Modo transversal elétrico (TE):

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) - \sigma \hat{E}_y^s + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right) \\ &= -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \hat{E}_x^p \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \hat{E}_z^p \right) + \Delta \sigma \hat{E}_y^p. \end{aligned} \quad (22)$$

As equações (21) e (22) formam um sistema de equações de onda dos campos acoplados \hat{H}_y^s e \hat{E}_y^s , em que os termos:

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^s}{\partial x} \right) e, \quad \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^s}{\partial x} \right), \quad (23)$$

são os fatores de acoplamento entre os dois modos de polarização TM e TE, respectivamente.

A resolução das equações (21) e (22) é feita através de técnica dos Elementos Finitos (EF) aproximando as soluções \hat{H}_y^s e \hat{E}_y^s , por uma combinação de funções lineares, tais que:

$$\hat{H}_y^s = \hat{H}_{yi}^s \psi_i + \hat{H}_{yj}^s \psi_j + \hat{H}_{yk}^s \psi_k, \quad (24)$$

e

$$\hat{E}_y^s = \hat{E}_{yi}^s \psi_i + \hat{E}_{yj}^s \psi_j + \hat{E}_{yk}^s \psi_k, \quad (25)$$

nos nós i, j e k de um elemento triangular genérico de um domínio Ω_e , ilustrado na Figura 2.1.

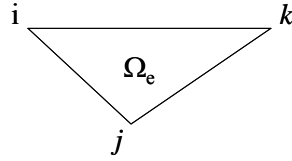


Figura 2.1 – Elemento triangular genérico que representa um domínio Ω_e , compondo as funções bases da solução dos MEF.

Em cada elemento é adotada a formulação variacional baseada no critério de Galerkin. Assim, as equações (24) e (25) ficam escritas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega_e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial z} \right) \right] \psi_i dx dz - \int_{\Omega_e} \hat{z}_0 \hat{H}_y^S \psi_i dx dz \\
& + \int_{\Omega_e} \left[- \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial x} \right) \right] \psi_i dx dz \\
& = - \int_{\Omega_e} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\hat{z}_0 \Delta \sigma}{u_e^2} \hat{E}_x^P \right) \psi_i dx dz + \int_{\Omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(\hat{z}_0 \Delta \sigma \hat{E}_z^P \right) \psi_i dx dz,
\end{aligned} \tag{26}$$

e

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega_e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\sigma}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\sigma}{u_e^2} \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial z} \right) \right] \psi_i dx dz - \int_{\Omega_e} \sigma \hat{E}_y^S \psi_i dx dz \\
& + \int_{\Omega_e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial z} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ik_y}{u_e^2} \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial x} \right) \right] \psi_i dx dz \\
& = - \int_{\Omega_e} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \hat{E}_x^P \right) \psi_i dx dz - \int_{\Omega_e} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \hat{E}_z^P \right) \psi_i dx dz + \int_{\Omega_e} \Delta \sigma \hat{E}_y^P \psi_i dx dz.
\end{aligned} \tag{27}$$

Para se obter as contribuições das integrais nas fronteiras dos elementos, empregam-se integrações por partes às equações (26) e (27), que se tornam:

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega_e} \frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial z} + u_e^2 \hat{H}_y^S \psi_i \right) dx dz - \frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \left(\oint_{\partial \Omega_e} \psi_i \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial x} dz + \oint_{\partial \Omega_e} \psi_i \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial z} dx \right) \\
& + \int_{\Omega_e} \frac{ik_y}{u_e^2} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial z} - \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial x} \right) dx dz - \frac{ik_y}{u_e^2} \left(\oint_{\partial \Omega_e} \psi_i \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial z} dz + \oint_{\partial \Omega_e} \psi_i \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial x} dx \right) \\
& = \int_{\Omega_e} \frac{\hat{z}_0 \Delta \sigma}{u_e^2} \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \hat{E}_x^P dx dz + \oint_{\partial \Omega_e} \frac{\hat{z}_0 \Delta \sigma}{u_e^2} \psi_i \hat{E}_x^P dx \\
& - \int_{\Omega_e} \frac{i \omega \mu_0 \Delta \sigma}{u_e^2} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \hat{E}_z^P dx dz + \oint_{\partial \Omega_e} \frac{i \omega \mu_0 \Delta \sigma}{u_e^2} \psi_i \hat{E}_z^P dz,
\end{aligned} \tag{28}$$

e

$$\begin{aligned}
& \int_{\Omega_e} \frac{\sigma}{u_e^2} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial z} + u_e^2 \hat{H}_y^S \psi_i \right) dx dz - \frac{\sigma}{u_e^2} \left(\oint_{\partial \Omega_e} \psi_i \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial x} dz - \oint_{\partial \Omega_e} \psi_i \frac{\partial \hat{E}_y^S}{\partial z} dx \right) \\
& + \int_{\Omega_e} \frac{ik_y}{u_e^2} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial z} - \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial x} \right) dx dz - \frac{ik_y}{u_e^2} \left(\oint_{\partial \Omega_e} \psi_i \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial z} dz + \oint_{\partial \Omega_e} \psi_i \frac{\partial \hat{H}_y^S}{\partial x} dx \right) \\
& = - \int_{\Omega_e} \frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \hat{E}_x^P dx dz + \oint_{\partial \Omega_e} \frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \psi_i \hat{E}_x^P dz \\
& - \int_{\Omega_e} \frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \hat{E}_z^P dx dz - \oint_{\partial \Omega_e} \frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \psi_i \hat{E}_z^P dx \\
& - \int_{\Omega_e} \Delta \sigma \psi_i \hat{E}_y^P dx dz.
\end{aligned} \tag{29}$$

Devido à continuidade dos campos \hat{H}_y^S e \hat{E}_y^S , as integrais de linha em (29) e (30) se anulam mutuamente nos elementos internos ao domínio Ω_e da malha de elementos finitos. Assim, aplicando (23) e (25) em (27) e (28), tem-se:

$$\begin{aligned}
& - \sum_{j=1}^3 \hat{H}_{yj}^S \left[\int_{\Omega_e} \frac{\hat{z}_0}{u_e^2} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \psi_j}{\partial z} + u_e^2 \psi_i \psi_j \right) dx dz \right] \\
& + \sum_{j=1}^3 \hat{E}_{yj}^S \left[\int_{\Omega_e} \frac{ik_y}{u_e^2} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial z} - \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} \right) dx dz \right] \\
& = \int_{\Omega_e} \frac{\hat{z}_0 \Delta \sigma}{u_e^2} \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \hat{E}_x^P dx dz - \int_{\Omega_e} \frac{\hat{z}_0 \Delta \sigma}{u_e^2} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \hat{E}_z^P dx dz,
\end{aligned} \tag{30}$$

e

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^3 \hat{E}_{yj}^S \left[\int_{\Omega_e} \frac{\sigma}{u_e^2} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} + \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \psi_j}{\partial z} + u_e^2 \psi_i \psi_j \right) dx dz \right] \\
& + \sum_{j=1}^3 \hat{H}_{yj}^S \left[\int_{\Omega_e} \frac{ik_y}{u_e^2} \left(\frac{\partial \psi_i}{\partial x} \frac{\partial \psi_j}{\partial z} - \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \frac{\partial \psi_j}{\partial x} \right) dx dz \right] \\
& = - \int_{\Omega_e} \frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \hat{E}_x^P dx dz - \int_{\Omega_e} \frac{ik_y \Delta \sigma}{u_e^2} \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \hat{E}_z^P dx dz - \int_{\Omega_e} \Delta \sigma \psi_i \hat{E}_y^P dx dz.
\end{aligned} \tag{31}$$

O sistema linear local é obtido após a escolha das funções bases lineares para os elementos triangulares, obtendo um sistema linear local em cada elemento, da forma (RIJO, 1996):

$$\begin{pmatrix} K_{11}^{TM} & -K_{11}^{AC} & \dots & K_{13}^{AC} \\ K_{11}^{AC} & K_{11}^{TE} & \dots & K_{13}^{TE} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{31}^{TM} & -K_{31}^{AC} & \dots & K_{33}^{AC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{H}_{y1}^S \\ \hat{E}_{y1}^S \\ \vdots \\ \hat{H}_{y3}^S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1^{TM} \\ f_1^{TE} \\ \vdots \\ f_3^{TE} \end{pmatrix}, \quad (32)$$

Cujas entradas são:

$$K_{ij}^{TM} = \int_{\Omega_e} \frac{i\omega\mu_0}{u_e^2} \left(\frac{\partial\psi_i}{\partial x} \frac{\partial\psi_j}{\partial x} + \frac{\partial\psi_i}{\partial z} \frac{\partial\psi_j}{\partial z} + u_e^2 \psi_i \psi_j \right) dx dz \quad (33)$$

$$K_{ij}^{TE} = \int_{\Omega_e} \frac{\sigma}{u_e^2} \left(\frac{\partial\psi_i}{\partial x} \frac{\partial\psi_j}{\partial x} + \frac{\partial\psi_i}{\partial z} \frac{\partial\psi_j}{\partial z} + u_e^2 \psi_i \psi_j \right) dx dz \quad (34)$$

$$K_{ij}^{AC} = \int_{\Omega_e} \frac{ik_y}{u_e^2} \left(\frac{\partial\psi_i}{\partial x} \frac{\partial\psi_j}{\partial z} - \frac{\partial\psi_i}{\partial z} \frac{\partial\psi_j}{\partial x} \right) dx dz \quad (35)$$

$$f_j^{TM} = \int_{\Omega_e} \frac{i\omega\mu_0\Delta\sigma}{u_e^2} \frac{\partial\psi_j}{\partial z} \hat{E}_x^P dx dz - \int_{\Omega_e} \frac{i\omega\mu_0\Delta\sigma}{u_e^2} \frac{\partial\psi_j}{\partial x} \hat{E}_z^P dx dz \quad (36)$$

$$f_j^{TE} = - \int_{\Omega_e} \frac{ik_y\Delta\sigma}{u_e^2} \frac{\partial\psi_j}{\partial x} \hat{E}_x^P dx dz - \int_{\Omega_e} \frac{ik_y\Delta\sigma}{u_e^2} \frac{\partial\psi_j}{\partial z} \hat{E}_z^P dx dz - \int_{\Omega_e} \Delta\sigma\psi_j \hat{E}_y^P dx dz \quad (37)$$

O sistema linear da equação (32) dá origem a um sistema global, que caracteristicamente tem a matriz associada simétrica e bandeda. Estas características são propícias para encontrar a solução aplicando o método de eliminação gaussiana.

Um vez obtidos os campos \hat{H}_y^S e \hat{E}_y^S , os demais campos H_x^S , H_z^S , E_x^S e E_z^S são imediatamente determinados utilizando diferenciação numérica nas equações (18), (20), (17) e (19), respectivamente.