

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

Stevan Grubisic

**TÉCNICA DE TRAÇADO DE RAIOS ASSOCIADA A META-
HEURÍSTICAS PARA OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO
DE ANTENAS EM AMBIENTES INTERIORES**

Tese submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Santa
Catarina como parte dos requisitos
para a obtenção do grau de Doutor em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Walter Pereira
Carpes Junior.

Coorientador: Prof. Dr. João Pedro
Assumpção Bastos.

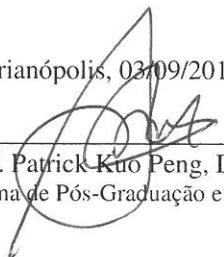
Florianópolis
2012

STEVAN GRUBISIC

**TÉCNICA DE TRAÇADO DE RAIOS ASSOCIADA A META-
HEURÍSTICAS PARA OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO
DE ANTENAS EM AMBIENTES INTERIORES**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 03/09/2012



Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

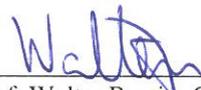


Prof. Walter Pereira Carpes Jr, Dr.
Orientador

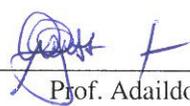


Prof. João Pedro Assumpção
Bastos, Dr. – Coorientador

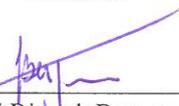
Banca Examinadora:



Prof. Walter Pereira Carpes Jr, Dr.
Presidente



Prof. Adaildo Gomes
d'Assunção, Dr. – UFRN



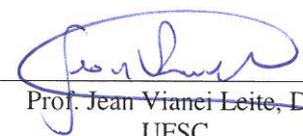
Prof. José Ricardo Bergmann, Dr.
PUC/RJ



Prof. Marcelo Grafulha Vanti, Dr.
FURB



Prof. Carlos Aurélio Faria da
Rocha, Dr. – UFSC



Prof. Jean Vianei Leite, Dr.
UFSC

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado a força, a sabedoria e a saúde necessárias para o cumprimento deste projeto.

Ao meu pai (em memória), por ser a minha referencia de vida.

A toda minha família, especialmente à minha mãe, Clara Alice Emmendoerfer Grubisic, às minhas irmãs, Katarina Grubisic e Ana Grubisic e à minha esposa, Viviane Vasconcellos Ferreira Grubisic, pela paciência, dedicação e amor em todos os momentos.

Ao Professor Walter Pereira Carpes Junior, pela orientação e pelas brilhantes contribuições conferidas em todas as etapas do trabalho, mas também por ter permitido realizá-lo com ampla liberdade e independência.

Ao Professor João Pedro Assumpção Bastos, pela coorientação e pela confiança de sempre.

Aos professores Adaildo Gomes D'Assunção, José Ricardo Bergmann, Marcelo Grafulha Vanti, Carlos Aurélio Faria da Rocha, Jean Viane Leite, Sérgio Luciano Ávila e Golberi de Salvador Ferreira, pelas importantes contribuições conferidas nas bancas do exame de qualificação e da defesa de doutorado.

Aos professores e colegas do GRUCAD, especialmente à Emanuela Cabral e ao Guilherme Santos, que nos períodos de realização de seus trabalhos de Iniciação Científica contribuíram sobremaneira na construção deste trabalho de doutorado.

Agradeço à secretária executiva do GRUCAD, Celly D. Melo, e aos servidores da Secretaria do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Wilson Silva Costa e Marcelo Siqueira, pelo constante apoio.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por todas as oportunidades proporcionadas na graduação, no mestrado e no doutorado.

Por fim, agradeço à Agência Nacional de Telecomunicações, por contribuir indiretamente para a concretização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho propõe a otimização do posicionamento de antenas em sistemas de comunicação sem fio para ambientes interiores (*indoor*) por meio de meta-heurísticas populacionais associadas à Técnica de Traçado de Raios. Algoritmos Genéticos (GA) e Otimizadores por Enxames de Partículas (PSO) foram as duas modalidades de meta-heurísticas utilizadas como ferramentas de otimização. Em todas as aplicações, a Técnica de Traçado de Raios foi utilizada para o cálculo da função objetivo, utilizada para predição da cobertura *indoor*. As variáveis do problema são compostas pelas posições das antenas das estações base, que servem como dados de entrada para o algoritmo de Traçado de Raios. Por sua vez, tal algoritmo retorna a aptidão de cada indivíduo que compõe a população em uma dada iteração do processo de otimização. Para aplicações multiobjetivo, o PSO foi estendido usando o conceito de dominância de Pareto, por meio de um otimizador por enxame de partículas multiobjetivo (MOPSO). Uma ferramenta de predição mais precisa foi implementada, utilizando-se um algoritmo de Traçado de Raios “quase-3D” aplicável a ambientes interiores (RTQ3D-*indoor*). No método proposto, os raios transmitidos através de obstáculos são considerados de forma precisa, e os efeitos da terceira dimensão são contemplados por meio da conversão de cada raio 2D em cinco raios 3D. O algoritmo RTQ3D-*indoor* foi avaliado por meio de uma série de comparações com medições obtendo-se resultados tão bons quanto os obtidos por meio de algoritmos plenamente tridimensionais. Por fim, diversos estudos de caso são apresentados como aplicações de associações das meta-heurísticas com os algoritmos de Traçado de Raios.

Palavras-chave: Traçado de Raios, quase 3D, *indoor*, Algoritmos Genéticos, PSO.

ABSTRACT

This work proposes the optimization of antennas placement in wireless communication systems for indoor environments by means of population-based meta-heuristics associated with the Ray Tracing Technique. Genetic Algorithms (GA) and Particle Swarm Optimizers (PSO) were the two types of meta-heuristics used as optimization tools. In all applications, the ray-tracing technique was used to evaluate the objective function to predict indoor coverage. The variables of the problem correspond to the positions of the antennas of the base stations, which are used as input to the Ray-Tracing algorithm. Such algorithm returns the fitness of each individual that makes up the population at a given iteration of the optimization process. For multi-objective applications, the PSO is extended using the concept of Pareto dominance through the multi-objective particle swarm optimizer (MOPSO). A more accurate prediction tool was implemented using a ray tracing algorithm "quasi 3D" applicable to indoor environments (RTQ3D-indoor). In the proposed method, the transmitted rays through obstacles are considered accurately and the effects of the third dimension are considered by converting each 2D path in five 3D rays. The algorithm RTQ3D-indoor was evaluated by comparison with measurements. The results were as good as those obtained by algorithms full 3D ray-tracing algorithms. Finally, several study cases are presented as applications of the meta-heuristics and ray-tracing algorithms associations.

Keywords: Ray-tracing, *quasi* 3D, indoor, Genetic Algorithms, PSO.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 CONTRIBUIÇÕES.....	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	3
2 ASPECTOS E MODELOS DE PROPAGAÇÃO.....	5
2.1 INTRODUÇÃO	5
2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CANAL RADIOMÓVEL	6
2.3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO EMPÍRICOS E SEMIEMPÍRICOS	10
2.4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO DETERMINÍSTICOS.....	12
2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	13
3 TÉCNICA DE TRAÇADO DE RAIOS.....	15
3.1 INTRODUÇÃO	15
3.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	16
3.3 MÉTODO SBR.....	20
3.4 MÉTODO DAS IMAGENS	21
3.4.1 Campo devido ao raio direto.....	23
3.4.2 Campo devido aos raios refletidos.....	24
3.4.2.1 Coeficiente de Reflexão de Fresnel.....	26
3.4.3 Campo devido aos raios difratados.....	30
3.4.4 Campo devido aos raios transmitidos.....	34
3.4.4.1 Coeficiente de transmissão de Fresnel	35
3.4.5 Representação bidimensional dos cenários.....	38
3.4.6 Técnicas de aceleração.....	39
3.4.6.1 Matriz SVP.....	41
3.4.7 Validação do algoritmo RT bidimensional.....	41
3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
4 TRAÇADO DE RAIOS QUASE 3D PARA APLICAÇÃO EM AMBIENTES INTERIORES.....	44
4.1 INTRODUÇÃO	44
4.2 CONVERSÃO DE RAIOS 2D EM PERCURSOS QUASE 3D.....	45
4.3 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO RT QUASE 3D EM AMBIENTES INTERIORES	48
4.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM UM CENÁRIO PRÁTICO	57
4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59

5 META-HEURÍSTICAS POPULACIONAIS APLICADAS À OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE ANTENAS EM AMBIENTES INTERIORES	60
5.1 INTRODUÇÃO	60
5.2 ALGORITMOS GENÉTICOS	62
5.2.1 Operadores Genéticos.....	64
5.2.2 Convergência.....	66
5.3 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO).....	66
5.3.1 Formulação.....	67
5.3.2 Convergência.....	69
5.3.3 Extensão do algoritmo PSO para resolução de problemas multiobjetivo – MOPSO.....	69
5.4 APLICAÇÃO DE META-HEURÍSTICAS PARA OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE ANTENAS EM AMBIENTES INTERIORES	70
5.4.1 RT associado ao AG.....	71
5.4.2 RT associado ao PSO.....	72
5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	74
6 ESTUDOS DE CASOS	75
6.1 INTRODUÇÃO	75
6.1.1 Considerações gerais acerca das aplicações.....	75
6.2 ESTUDOS DE CASOS COM RT 2D ASSOCIADO A OTIMIZADORES GA E PSO MONO-OBJETIVO	80
6.2.1 Primeiro estudo de caso.....	80
6.2.2 Segundo estudo de caso.....	82
6.2.3 Terceiro estudo de caso.....	83
6.3 ESTUDO DE CASO COM RT 2D E OTIMIZADOR PSO MULTI-OBJETIVO.....	92
6.3.1 Quarto estudo de caso.....	92
6.4 ESTUDOS DE CASOS COM RTQ3D- <i>INDOOR</i> E O OTIMIZADOR PSO MONO-OBJETIVO	96
6.4.1 Quinto estudo de caso.....	96
6.4.2 Sexto estudo de caso.....	100
6.5 ESTUDOS DE CASOS COM RTQ3D- <i>INDOOR</i> E O OTIMIZADOR PSO MULTI-OBJETIVO (MOPSO)	103
6.5.1 Sétimo estudo de caso.....	103
6.5.2 Oitavo estudo de caso.....	106
6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110

7 COMENTÁRIOS FINAIS	111
ANEXO A	115
A.1 CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE IMAGENS.....	115
A.2 REGIÃO DE ILUMINAÇÃO	117
ANEXO B	119
B.1 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAR O PERCURSO DOS RAIOS TRANSMITIDOS [35]	119
REFERÊNCIAS.....	123

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Nas últimas décadas, o mundo presenciou uma grande evolução e popularização dos serviços e das tecnologias de telecomunicações, sobretudo no campo das comunicações sem fio. Com esse acelerado ritmo de mudanças, as diversas modalidades de pesquisa se tornaram ainda mais importantes para dar continuidade ao desenvolvimento do setor.

No escopo dos sistemas de comunicação sem fio (*wireless*), não são apenas os padrões tecnológicos e os equipamentos que evoluem. Um planejamento adequado na implantação dos sistemas requer especial atenção, principalmente devido ao melhor aproveitamento do espectro eletromagnético aliado a adequados níveis de qualidade. Isto se deve ao frenético aumento do número de usuários associado ao volume de dados que trafegam nas redes de comunicações, não havendo mais espaço para sistemas mal planejados, com baixo grau de eficiência espectral e de reuso de frequências.

Com isso, além da tecnologia empregada no sistema, questões como uma correta partição de áreas geográficas em células ou setores e um adequado posicionamento das estações base devem ser cuidadosamente observadas.

Nesse contexto, as técnicas e métodos utilizados para a predição de cobertura na fase de planejamento de sistemas sem fio são ferramentas essenciais para tornarem ágeis as implantações das redes e para garantir uma melhor qualidade dos serviços aos usuários. Um dos principais apoios que essas ferramentas fornecem é a estimativa de distribuição de campos eletromagnéticos no ambiente para um dado posicionamento da antena da estação base, ou seja, a predição de cobertura radioelétrica. Isto possibilita uma verificação prévia da adequação de dada posição da antena transmissora em um cenário específico.

Embora a utilização de modelos empíricos e semiempíricos seja a forma computacional mais utilizada no planejamento de cobertura celular urbana, cenários como os de micro, pico, e femtocélulas são mais bem caracterizados quando utilizadas técnicas determinísticas para o cálculo dos campos [1]. Nesse cenário, é comum o uso das redes locais sem fio (WLANs – *Wireless Area Network*), com destaque também às femtocélulas, aplicáveis a ambientes interiores (*indoor*) e que têm sido

cada vez mais utilizadas como soluções para os modernos sistemas de comunicação sem fio.

Haja vista a faixa de frequência elevada em que a maioria dos sistemas sem fio mais recentes operam (p. ex: 900 MHz, 1,8 GHz, 2,1 GHz, 2,4 GHz, 3,5 GHz, 5,8 GHz), os métodos assintóticos, que determinam as trajetórias das ondas por meio da Técnica de Traçado de Raios (RT – *Ray Tracing*), estão entre os mais utilizados [2]. Nesses casos, os campos obtidos por meio da Ótica Geométrica Moderna (GO – *Geometrical Optics*) e, alternativamente, pela Teoria Uniforme da Difração (UTD – *Uniform Theory of Diffraction*) estão entre as formas de tratamento eletromagnético mais comuns de se obter a distribuição de campos por meio da RT.

Por outro lado, na fase de planejamento dos sistemas sem fio, um dos principais desafios é o posicionamento das antenas das estações base. Este, assim como qualquer outro problema de otimização, pode ser resolvido com auxílio de ferramentas computacionais.

Neste contexto, uma família de algoritmos estocásticos tem sido cada vez mais comum nas aplicações de engenharia. São as meta-heurísticas populacionais, algoritmos de otimização inspirados em fenômenos populacionais observados na natureza. Mais especificamente, os Algoritmos Genéticos (GA – *Genetic Algorithm*) e a Otimização por Enxame de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*) têm sido algumas das ferramentas de otimização mais utilizadas em problemas práticos de engenharia, ambos apresentando excelente desempenho em problemas de eletromagnetismo [3, 4].

1.2 CONTRIBUIÇÕES

Neste trabalho, propõe-se a otimização do posicionamento de antenas em sistemas de comunicação sem fio para ambientes interiores (*indoor*), utilizando-se algoritmos meta-heurísticos, associados à Técnica de Traçado de Raios. Especificamente, propõem-se duas modalidades de meta-heurísticas como otimizadores, quais sejam: Algoritmo Genético (GA – *Genetic Algorithm*) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO – *Particle Swarm Optimization*).

Nos dois métodos, a função objetivo, é retornada a partir de algoritmos de predição de cobertura desenvolvidos para ambientes interiores, baseados na Técnica de Traçado de Raios, que utiliza o Método das Imagens. As variáveis do problema a ser otimizado são, basicamente, as posições das antenas (das estações base).

Com isso, as maiores contribuições deste trabalho são:

- Proposta e implementação de um algoritmo de Traçado de Raios “quase 3D” aplicável a ambientes interiores (RTQ3D-*indoor*). No método proposto, os raios transmitidos através de obstáculos são considerados de forma precisa, e os efeitos da terceira dimensão são contemplados por meio da conversão de cada raio 2D em cinco raios 3D, eliminando-se a necessidade do uso dos complexos algoritmos tridimensionais e mantendo o comprometimento com a validade dos resultados obtidos.
- Utilização dos algoritmos RT desenvolvidos associados a meta-heurísticas para otimização do posicionamento de antenas em ambientes interiores.
- Disponibilização de todas as ferramentas implementadas no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), para aproveitamento destas em futuros trabalhos a serem desenvolvidos, como forma de continuidade das pesquisas relacionadas aos assuntos e aplicações aqui apresentados.

Observa-se que, no caso dos algoritmos de otimização utilizados neste trabalho, foram adotados métodos já amplamente difundidos e confiáveis nas aplicações em eletromagnetismo. Portanto, com relação a tais algoritmos de otimização, as contribuições referem-se às aplicações destas meta-heurísticas em associação aos algoritmos de Traçado de Raios desenvolvidos, possibilitando assim a otimização do posicionamento de antenas em ambientes interiores.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho organiza-se em sete capítulos, conforme descrito a seguir:

- O primeiro capítulo apresenta uma introdução, incluindo as motivações e contribuições do trabalho.
- O segundo capítulo versa sobre aspectos e modelos de propagação empíricos e semiempíricos, bem como modelos de propagação determinísticos.
- No capítulo terceiro, apresenta-se a Técnica de Traçado de Raios, com ênfase no Método das Imagens, utilizado no algoritmo implementado.

➤ No quarto capítulo, propõe-se a extensão da Técnica de Traçado de raios bidimensional para um algoritmo “quase 3D”, aplicável a ambientes interiores.

➤ O quinto capítulo apresenta as meta-heurísticas utilizadas para otimização, quais sejam: Algoritmos Genéticos e Otimização por Enxame de Partículas, com a apresentação da proposta de associação de tais meta-heurísticas à Técnica de Traçado de Raios, na forma de ferramentas que tem como objetivo a otimização do posicionamento de antenas em ambientes interiores.

➤ O sexto capítulo apresenta diversos estudos de casos, com aplicações mono-objetivo e multiobjetivo, mostrando-se os resultados de simulações obtidos a partir das metodologias propostas.

➤ Por fim, no sétimo e último capítulo são expostos comentários finais sobre o trabalho.

2 ASPECTOS E MODELOS DE PROPAGAÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

As telecomunicações encontram-se inseridas em um ambiente de crescentes inovações com destaques para a expansão e popularização dos sistemas sem fio (*wireless*). Neste cenário, há uma elevada demanda por soluções que possibilitem a convivência de múltiplos usuários concentrados em uma mesma área geográfica e utilizando faixas do espectro de radiofrequências de forma compartilhada, com serviços e tecnologias convergentes.

Em consonância com a popularização das redes sem fio, no mundo e no Brasil, os sistemas *wireless* tendem a ser regulamentados e padronizados de forma apropriada, abrangendo, assim, uma série de serviços e/ou tecnologias como, por exemplo, o Serviço Móvel Pessoal (SMP) de terceira e quarta geração, as redes de Serviço de Comunicação Multimídia (SCM) que utilizam tecnologias como *WiMax* (Padrão IEEE 802,16) e redes locais *Wi-Fi* (Padrão IEEE 802,11), os novos sistemas de radiodifusão (TV digital e rádio digital), além da existência de novos paradigmas como o de redes *ad-hoc*, o de *rádio cognitivo* e o de femtocélulas (*femtocells*).

Nesse contexto, todos esses sistemas são passíveis de um planejamento adequado para que os custos de implantação e operação sejam os menores possíveis, e para que diversas operadoras e usuários possam conviver utilizando o mesmo recurso escasso envolvido (o espectro de radiofrequências).

Uma das soluções utilizadas para um planejamento mais adequado desses sistemas é a utilização de metodologias para a predição de cobertura, ou seja, o uso de modelos de propagação por meio de ferramentas computacionais que visam prever a distribuição de campos eletromagnéticos radiados na região de operação de um dado sistema sem fio.

Na fase de planejamento, a utilização de um modelo preciso possibilita, por exemplo, analisar os fenômenos de multipercorso, avaliar interferências cocanais e localizar o posicionamento ótimo da antena transmissora. Além disso, utilizando tais modelos, antes mesmo da instalação do sistema, pode-se identificar a presença de eventuais intensidades de campos que excedam os limites máximos permitidos para a exposição humana. No Brasil, tais limites são também regulamentados [5], nos mesmos moldes do preconizado pela Organização Mundial da Saúde (OMS), por meio da Comissão

Internacional de Proteção Contra as Radiações Não Ionizantes (ICNIRP – *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) [6].

Para caracterizar e analisar a propagação em sistemas sem fio, existem modelos empíricos e semiempíricos consagrados, amplamente utilizados principalmente para aplicações em ambientes rurais, semiurbanos e urbanos. Alguns desses modelos são citados na seção 2.3.

No entanto, a eficácia dos modelos que utilizam estratégias empíricas nem sempre é observada em células menores (p. ex., em ambientes interiores), onde a quantidade de obstáculos e suas alturas possuem ordem de grandeza igual ou maior que a das antenas das Estações Rádio Base (ERB). Assim, diversos modelos determinísticos (teóricos) são propostos na literatura para atenderem a esta necessidade no planejamento de sistemas. Dentre os modelos teóricos, o método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD – *Finite Difference in Time Domain*) [7] e a Técnica de Traçado de Raios (RT – *Ray-Tracing*) são os mais populares para predições de campos em ambientes interiores (*indoor*) [2]. Na seção 2.4, são citados alguns dos modelos determinísticos mais utilizados.

Tendo em vista que a Técnica de Traçado de Raios foi o modelo adotado neste trabalho para a predição de cobertura, os Capítulos 3 e 4 são dedicados a uma apresentação mais detalhada, tanto no tratamento geométrico como no que se refere ao tratamento eletromagnético adotado por este método.

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CANAL RADIOMÓVEL

Quando a propagação ocorre no “espaço livre”, a condutividade elétrica é considerada nula ($\sigma = 0$), sendo que a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética são praticamente iguais às do vácuo ($\epsilon = \epsilon_0$ e $\mu = \mu_0$). Usualmente, estas são as condições adotadas para propagação no ar, válidas para ambientes em que as alterações no ar/atmosfera são menos importantes, como ocorre na análise de ambientes interiores. Nessas condições (ambiente sem perdas e livre de obstáculos), a potência total radiada pela antena é conservada. Deste modo, para uma distância r do ponto de referência, a energia total na superfície de uma esfera imaginária de raio r é a própria energia total radiada pela antena. Ou seja, toda a energia radiada pela antena é propagada pelo espaço livre. Com isso, a densidade superficial de potência \mathcal{P}_s , em W/m^2 , é dada por:

$$\mathcal{P}_s = \frac{G_T P_T}{4\pi r^2} \quad (\text{W/m}^2), \quad (2.1)$$

onde G_T é o ganho da antena transmissora e P_T é a potência radiada.

Por outro lado, a abertura efetiva da antena receptora é dada por:

$$A_e = \frac{G_R \cdot \lambda^2}{4\pi} \quad (\text{m}^2), \quad (2.2)$$

onde G_R é o ganho da antena receptora e λ é o comprimento de onda. Assim, em uma propagação livre de obstáculos, a potência P_R recebida por uma antena receptora, a uma distância r da antena transmissora é dada por:

$$P_R = \mathcal{P}_s \cdot A_e \quad (\text{W}) \quad (2.3)$$

Com isso, para antenas alinhadas e orientadas, tem-se a equação fundamental para o cálculo de radioenlaces, também conhecida como fórmula de Friis para o espaço livre:

$$P_R = G_T G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 P_T \quad (\text{Fórmula de Friis}) \quad (2.4)$$

A partir dessas equações, válidas para a região de campos distantes, observa-se que a potência recebida decai com o quadrado da distância. Nessa região, as intensidades dos campos elétrico \mathbf{E} e magnético \mathbf{H} decaem com a distância e são localmente perpendiculares entre si, sendo ambos perpendiculares à direção de propagação. Portanto, a onda é do tipo TEM (transverso-eletromagnética). Além disso, os campos elétrico e magnético estão em fase, não havendo potência reativa nessa região de campos distantes. A relação entre os campos E e H nessas condições é dada por (2.5) e corresponde à impedância intrínseca do ar η_0 .

$$\eta_0 = \frac{E_\theta}{H_\phi} \cong 120\pi \Omega \cong 377\Omega \quad (2.5)$$

A densidade superficial de potência média nessa região pode ser expressa por:

$$\mathcal{P}_s = \frac{|E_{rms}|^2}{\eta_0} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.6)$$

Muitas vezes, o que se pretende na prática é conhecer a perda de percurso de propagação (L) de um dado canal, que é definida como a razão entre potência transmitida (P_T) e a potência recebida (P_R). Esta razão em decibéis (dB) é expressa da seguinte forma:

$$L_{dB} = 10 \log \left(\frac{P_T}{P_R} \right) \quad (2.7)$$

A fórmula de Friis permite, de maneira simplificada, descrever o comportamento da potência recebida em função do distanciamento da antena transmissora. Adicionado a tal comportamento, em sistemas de comunicações móveis, observam-se fenômenos relevantes, provenientes das características de multipercurso, bem como da mobilidade das estações. Um gráfico com os níveis típicos de sinal recebido por uma estação em um sistema radiomóvel de um cenário urbano microcelular é apresentado na Figura 2.1 [8].

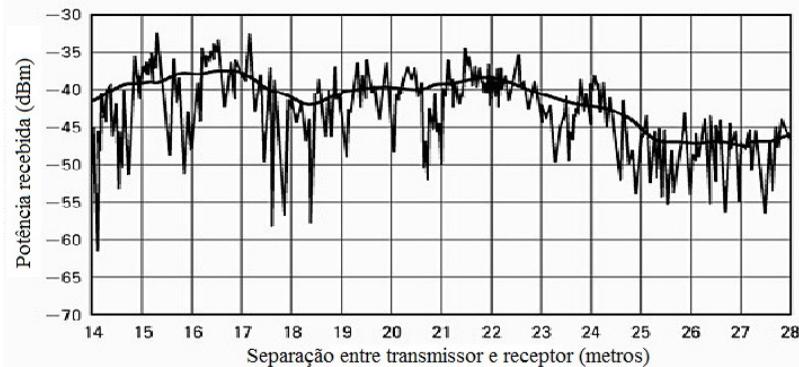


Figura 2.1 – Características de um canal radiomóvel típico [8].

Na Figura 2.1, é possível visualizar dois comportamentos distintos presentes no sinal recebido. As flutuações rápidas são denominadas de desvanecimento em pequena escala e são associadas, sobretudo, ao multipercurso. Já as variações mais suaves (representadas no gráfico pela linha mais espessa) são conhecidas como desvanecimento de larga escala, o qual está associado ao distanciamento do transmissor e ao sombreamento por obstáculos [9]. Observa-se, com isso, que ambos os desvanecimentos são importantes para descrever o canal radiomóvel neste tipo de cenário.

O multipercurso nos sistemas de comunicações sem fio deve-se ao grande número de caminhos distintos percorridos pelas ondas eletromagnéticas entre o transmissor e o receptor. Esses percursos resultam de diversas interações das ondas com os obstáculos. Assim, uma estação móvel recebe sinais de inúmeras direções, sendo, em geral, os raios refletidos nos obstáculos os principais responsáveis pelo fenômeno conhecido como multipercurso.

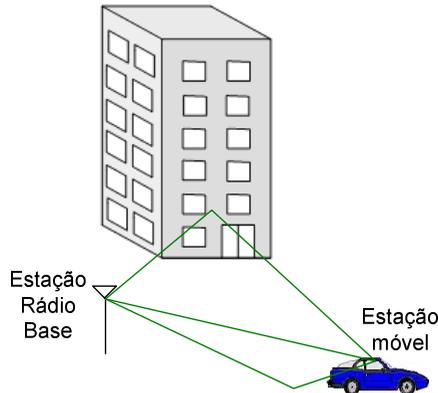


Figura 2.2 – Ilustração simplificada de multipercurso em um canal radiomóvel.

O multipercurso provoca desvanecimentos de pequena escala devido à interferência entre duas ou mais versões do sinal que partem do transmissor e chegam ao receptor em tempos ligeiramente diferentes. Os três principais efeitos do multipercurso são [8]:

- mudanças rápidas na intensidade do sinal ao longo de pequenos deslocamentos no espaço e/ou em pequenos intervalos de tempo;
- “modulação” aleatória da frequência devido à variação do deslocamento Doppler em diferentes sinais de multipercurso;
- dispersões no tempo (“ecos”) causadas pelos atrasos da propagação.

A Técnica de Traçado de Raios apresenta-se como uma boa solução para a predição em cenários específicos, casos em que modelos empíricos tendem a não fornecer bons resultados. No entanto, a modelagem da mobilidade do canal (tanto do receptor como dos obstáculos) ainda é objeto de estudos, sendo que a inclusão de uma abordagem estatística, em muitos casos, pode ser a solução desse

problema [10, 11]. Porém, este tipo de análise estatística está fora do escopo deste trabalho.

2.3 MODELOS DE PROPAGAÇÃO EMPÍRICOS E SEMIEMPÍRICOS

Os modelos de propagação empíricos e semiempíricos são mais amplamente utilizados em ambientes rurais, semiurbanos e urbanos. No entanto, na literatura são encontrados [1] esses tipos de modelos também para ambientes microcelulares e *indoor* [12].

De um modo geral, os cenários onde se propõe a utilização de modelos empíricos e semiempíricos apresentam características que obedecem a certos padrões. Embora cada ambiente possua sua peculiaridade, é possível aproveitar-se dessas semelhanças utilizando modelos de predição que, fazendo-se os devidos ajustes em seus parâmetros, proporcionam resultados satisfatórios nesses cenários. Sendo práticos e por apresentarem baixo custo computacional, os modelos empíricos e semiempíricos ainda são os mais utilizados na predição de cobertura dos mais variados cenários.

Estes modelos, em geral, são obtidos por meio de uma bateria de medições feitas em campo ou, alternativamente, por meio de simulações a partir de modelos determinísticos. Os valores obtidos nas medições são utilizados apropriadamente nas formulações para os ambientes em questão.

Diversos modelos empíricos e semiempíricos, utilizados especialmente em ambientes abertos (*outdoor*), são encontrados na literatura. O Quadro 2.1 apresenta alguns dos modelos mais utilizados [1]:

Quadro 2.1 - Exemplos de Modelos Empíricos e Semiempíricos ([1] adaptado).

Modelo	Metodologia de Criação	Faixa de Frequência (MHz)
Allsebrook [13,14]	Medições em cidades Inglesas.	75 a 450
Okumura-Hata [15, 16]	Medições na cidade de Tóquio, Japão.	150, 450 e 900
COST 231-Hata [17]	Adaptação ao Okumura-Hata original.	1500-2000
Lee [18]	Medições em diversas cidades com características diferentes.	Diversas frequências.
Ibrahim e Parsons [19, 20]	Medições em Londres.	168, 445 e 900.

McGeehan e Griffiths [21]	Obtido de uma modificação da equação de plano de terra.	Diversas frequências.
Atefi e Parsons [22]	Extraí empiricamente a perda de percurso média em um ambiente urbano.	Diversas frequências.
Sakagami-Kuboi [23]	Semelhante ao anterior, porém, exige informações mais detalhadas do ambiente em questão.	450-2.200
Ikegami [24]	Derivado de simulações utilizando traçado de raios (GTD/GO), em uma cidade modelo com prédios de altura uniforme.	>300
Walfisch e Bertoni [25]	Derivado de uma cidade modelo com prédios de altura e distância uniformes.	>300
Xia e Bertoni [26-27]	Estendido para possibilitar simulações com transmissor posicionado tanto abaixo como acima dos telhados.	>300
COST 231-Walfisch-Ikegami [1]	Baseado no modelo Walfisch e Bertoni e Ikegami, incluindo algumas correções empíricas para a características de cidades europeias.	800-2.000
<i>Stanford University Interim (SUI) modificado</i> [28]	Adotado para faixa de 3,5 GHz (redes padrão IEEE 802.16).	3,5 GHz

Além destes tipos de modelos, é comum o uso de diversas Recomendações do Setor de Radiocomunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU-R) [29], que disponibilizam curvas estatísticas (empíricas) obtidas a partir de uma base de dados oriunda de medições em campo. Entretanto, tais recomendações são mais comumente utilizadas em aplicações de radiodifusão.

Apesar das vantagens apresentadas pelos modelos empíricos e semiempíricos, existem cenários específicos em que tais métodos não apresentam bons resultados. Em geral, isto ocorre principalmente em ambientes interiores e, no caso de ambientes exteriores, quando as alturas dos obstáculos são maiores que a altura da antena transmissora. Nestes casos, modelos determinísticos (teóricos) são recomendados.

2.4 MODELOS DE PROPAGAÇÃO DETERMINÍSTICOS

Todos os modelos de predição determinísticos (também conhecidos como teóricos, ou modelos físicos), direta ou indiretamente, pautam-se nas Equações de Maxwell, que descrevem de forma completa o comportamento da propagação de ondas eletromagnéticas e da interação destas com o ambiente.

Na prática, os modelos de predição denominados determinísticos referem-se a métodos computacionais utilizados na resolução de problemas de eletromagnetismo em altas frequências (análises de antenas, propagação de ondas, etc.). Em [30], tais algoritmos são denominados CEM (*Computational Electromagnetics*), sendo a proposta de classificação desses métodos resumida na Figura 2.3, com alguns exemplos de métodos dentro da classificação adotada.

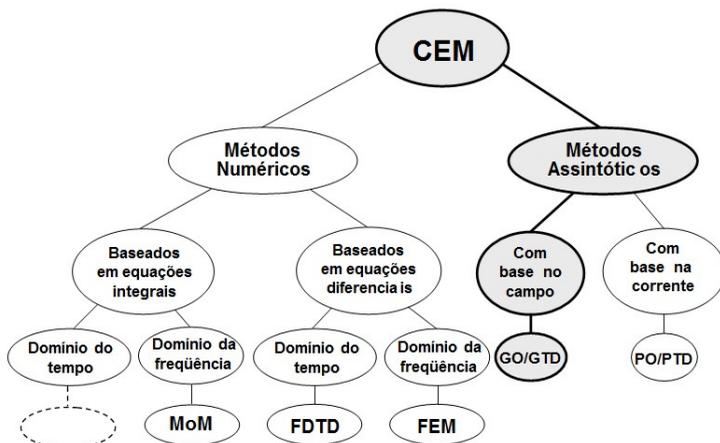


Figura 2.3 – Categorias computacionais para resolução de problemas eletromagnéticos de altas frequências ([30] adaptado).

Em geral, os métodos numéricos são utilizados em problemas envolvendo cenários de dimensões limitadas em termos de λ (comprimento de onda). Por outro lado, os métodos assintóticos servem melhor para os cenários que consideram obstáculos com muitos comprimentos de onda de extensão [30]. O fato é que, na utilização dos CEM, uma descrição fiel dos obstáculos, tanto do ponto de vista morfológico (geométrico) como de modelagem eletromagnética dos materiais, torna-se uma preocupação importante.

Alguns dos métodos numéricos mais utilizados em problemas de altas frequências são o FDTD (*Finite Difference in Time Domain*) [31] e o FEM (*Finite Element Method*) [32], baseados nas Equações de Maxwell na forma de equações diferenciais, e o MoM (*Moment Method*) [33], baseado nas Equações de Maxwell na forma de equações integrais. Alternativamente, existem métodos numéricos menos populares na análise de propagação, porém, também eficientes, como é o caso do TLM (*Transmission Line Method*) [34].

Existem cenários em que tanto a utilização dos chamados métodos numéricos como a dos métodos assintóticos são plausíveis. A predição de campos em ambientes *indoor*, por exemplo, tem como métodos mais populares o FDTD e a Técnica de Traçado de Raios (RT), que utiliza a Ótica Geométrica Moderna e a Teoria Uniforme da Difração (GO/UTD) para o cálculo dos campos [2]. Em ambientes maiores, no entanto, a utilização do método FDTD torna-se inviável devido à necessidade de discretizar o espaço e/ou os obstáculos. Nestes casos, os métodos assintóticos, como é o caso da RT, apresentam a vantagem de não necessitarem dessa discretização do ambiente, além de não necessitarem de definições de condições de contorno, diminuindo consideravelmente o tempo de execução.

Portanto, o cálculo dos campos com a Técnica de Traçado de Raios, utilizando a Ótica Geométrica e, alternativamente, a Teoria Uniforme da Difração, apresenta melhores resultados (em relação aos modelos empíricos) em cenários com peculiaridades muito específicas (p. ex., micro e picocélulas). Além disso, tem-se um menor custo computacional (em relação aos métodos numéricos, como o FDTD) em ambientes inviáveis de serem discretizados.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados conceitos sobre modelos de propagação empíricos e semiempíricos, bem como os determinísticos. Se, por um lado, os modelos que adotam estratégias empíricas ainda são os mais utilizados em ambientes rurais, semiurbanos e urbanos, modelos determinísticos normalmente são mais fidedignos para aplicações em cenários específicos, como ocorre em ambientes interiores.

Por outro lado, conforme apresentado neste capítulo, algumas desvantagens no que se refere aos métodos numéricos que exigem a discretização do cenário podem ser decisivas na escolha do modelo de propagação. A exemplo do que ocorre em métodos como MoM, MEF,

FDTD e TLM, torna-se computacionalmente custoso avaliar ambientes de dimensões muito grandes (em relação ao comprimento de onda).

Desta forma, a Técnica de Traçado de Raios (RT), é uma das metodologias mais utilizadas na análise de propagação em ambientes interiores. Sendo a RT o método escolhido para ser utilizado neste trabalho de Doutorado, o próximo capítulo apresenta detalhes sobre esta metodologia de traçado de raios e de cálculo de campos. Adicionalmente, no Capítulo 4, é apresentada uma contribuição referente à abordagem quase 3D da Técnica de Traçado de Raios aplicável a ambientes interiores.

3 TÉCNICA DE TRAÇADO DE RAIOS

3.1 INTRODUÇÃO

Os modelos determinísticos (teóricos), com o aumento da capacidade de processamento dos computadores, estão assumindo um papel fundamental na caracterização eletromagnética dos sistemas sem fio. Conforme mencionado, grande parte dos modelos teóricos usa métodos assintóticos (válidos para altas frequências) [30], como a Técnica de Traçado de Raios (RT), que pode utilizar no cálculo de campos a Ótica Geométrica (GO), a Teoria Geométrica da Difração (GTD – *Geometrical Theory of Diffraction*) ou sua versão uniforme, a Teoria Uniforme da Difração (UTD – *Uniform Theory of Diffraction*). Já em análises de dispositivos radiantes (antenas), a Ótica Física (PO – *Physical Optics*) é um dos métodos mais utilizados.

Como será apresentado adiante, nos ambientes interiores os fenômenos da reflexão e da transmissão através de obstáculos são considerados os mais importantes mecanismos de propagação. Em muitos desses casos, um modelo de propagação que adota um algoritmo de Traçado de Raios bidimensional ou, alternativamente, o quase 3D utilizando-se apenas a GO (sem o uso da GTD/UTD) consiste em uma forma válida e computacionalmente menos custosa para avaliação da propagação em tais cenários.

Especificamente, os modelos de propagação adotados neste trabalho utilizam, para análises bidimensionais, o algoritmo proposto em [35], baseado na Técnica de Traçado de Raios. Neste algoritmo foi utilizada a abordagem do Método das Imagens (MI), para a determinação dos percursos das ondas eletromagnéticas entre o(s) transmissor(es) e o(s) receptor(es), sendo a Ótica Geométrica Moderna (GO) o método adotado para o cálculo dos campos. No capítulo seguinte, será apresentada uma proposta de expansão do RT bidimensional para um algoritmo quase 3D, que permite a análise de cenários *indoor* reais de forma mais confiável.

Levando-se em conta as limitações práticas inerentes ao método assintótico utilizado, considera-se que os algoritmos de Traçado de Raios implementados sejam mais confiáveis para avaliação da cobertura (distribuição de campos) em cenários interiores e nas faixas de frequência mais elevadas, aplicados, usualmente, em UHF (300 MHz a 3000 MHz) ou em faixas superiores.

3.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A Técnica de Traçado de Raios é um método assintótico (válido em altas frequências) que combina técnicas de computação gráfica com cálculo eletromagnético de campos [36]. Este método realiza a análise da propagação de ondas de radiofrequência através de um cenário que represente, com razoável fidelidade, um ambiente onde se deseja realizar a predição de campos, levando-se em consideração as diversas interações (p. ex: reflexão e refração) dos raios com os obstáculos do ambiente.

Estes raios representam os caminhos percorridos pelas ondas eletromagnéticas radiadas por uma antena transmissora. O cálculo do campo total é então obtido pelo somatório vetorial dos campos provenientes dos diversos percursos, por meio das formulações da Ótica Geométrica Moderna (GO) e, alternativamente, da Teoria Uniforme da Difração (UTD). Ressalta-se que nas aplicações que fazem parte do escopo deste trabalho, os sinais são considerados como estando em regime harmônico sinusoidal, possibilitando um tratamento fasorial do problema (no domínio da frequência).

Existem dois métodos de traçado de raios encontrados na literatura: o Método SBR (*Shooting and Bouncing Rays*) [37]-[40], também conhecido como Método da “Força Bruta”; e o Método das Imagens (MI) [1],[41]-[44]. O Método das Imagens foi o escolhido para ser utilizado neste trabalho por apresentar vantagens na precisão, além de possibilitar o cálculo dos campos apenas em regiões de interesse. Além disso, a precisão do método SBR pode ser afetada, já que o percurso é determinado de forma aproximada, ou seja, um raio pode não atingir efetivamente o receptor, mas apenas a esfera de recepção. Para aumento de precisão deve-se lançar um número maior de raios, com espaçamento angular menor entre eles. Este tipo de imprecisão não ocorre no Método das Imagens, já que a geração da imagem permite obter um percurso teórico exato do transmissor até o receptor.

Modelos determinísticos baseados na Técnica de Traçado de Raios possuem algumas variações, como, por exemplo, na consideração e no tratamento da difração e da transmissão através de obstáculos. O tratamento eletromagnético para o cálculo dos campos nos algoritmos RT utilizados neste trabalho foi baseado na Ótica Geométrica Moderna (GO – *Modern Geometrical Optics*). Assim, nas aplicações apresentadas neste trabalho não foram consideradas as difrações.

Para problemas específicos em que a difração especular é um mecanismo de propagação bem mais relevante (p. ex., ambientes

exteriores urbanos), sugere-se o uso da Teoria Uniforme da Difração (UTD – *Uniform Theory of Diffraction*) acrescido à formulação da GO para o cálculo dos campos.

Ressalta-se que a teoria da Ótica Geométrica Clássica, embora eficiente na análise de muitos problemas, é insuficiente para a explicação de inúmeros fenômenos que ocorrem em eletromagnetismo. Diversos estudos mostraram a necessidade de uma teoria ondulatória para explicar tais fenômenos [45]. A comprovação feita por James Clerk Maxwell de que a luz é uma onda eletromagnética motivou o estudo de novas teorias que mantivessem a praticidade da Ótica Geométrica Clássica e, ao mesmo tempo, que respeitassem o comportamento eletromagnético (ondulatório) dos raios óticos. Surgiram, assim, a Ótica Geométrica Moderna (conhecida simplesmente como GO – *Geometrical Optics*) e a Teoria Geométrica da Difração (GTD – *Geometrical Theory of Diffraction*) [45].

A aplicação da GO é restrita a problemas de alta frequência, em que a variação das propriedades do meio de propagação e/ou dos obstáculos é desprezível ao longo de uma certa distância (em torno de um comprimento de onda [45]). Por isso, técnicas como a GO, aplicadas a problemas de alta frequência, são denominadas métodos assintóticos.

Na GO, um raio determina a direção de propagação (trajetória) de uma onda e os campos de alta frequência apresentam a propriedade de onda “localmente plana” ao longo de sua trajetória. Ao contrário da Ótica Geométrica Clássica, a GO (i. e, a versão “moderna” da Ótica Geométrica Clássica) considera os efeitos da amplitude, fase e polarização do campo, ficando em concordância com as equações de Maxwell.

A Figura 3.1 ilustra a representação da propagação da onda utilizando a GO, ou seja, representação através de raios que levam em conta não apenas a amplitude, mas também atrasos (mudança de fase) ao longo da propagação.

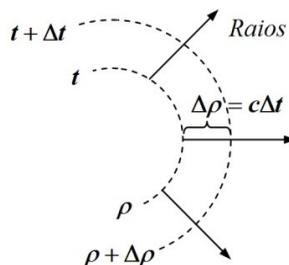


Figura 3.1 – Representação da propagação da onda utilizando a GO.

O trabalho proposto por J. B. Keller [46], serviu de base para a formulação da GTD – Teoria Geométrica da Difração. Esta teoria possibilita a resolução de problemas envolvendo difrações por arestas. A GTD, no entanto, apresenta resultados errôneos nas chamadas “fronteiras de sombra”, ou seja, a uniformidade dos campos nessas regiões não é corretamente descrita pela GTD. Diante deste problema, foi proposta por R. G. Kouyoumjian e P. H. Pathak [47] a UTD, que modifica os coeficientes de difração (propostos por Keller), mantendo a confiabilidade no cálculo dos campos também no entorno das fronteiras de sombra.

A utilização da UTD em conjunto com a GO, portanto, possibilita a contemplação dos efeitos relevantes da propagação de ondas (raios diretos, transmitidos, refletidos e difratados) para o cálculo dos campos de alta frequência nos mais diversos ambientes.

Conforme a definição de Kouyoumjian [47]:

Do ponto de vista matemático, métodos assintóticos são métodos para expandir funções, avaliar integrais e resolver equações diferenciais, aumentando sua precisão quando determinado parâmetro se aproxima de um valor limite. Aqui, estamos interessados em soluções de problemas eletromagnéticos válidas quando a constante de fase no espaço β (ou a frequência angular ω) tende ao infinito.

Isto equivale a ter o comprimento de onda tendendo a zero. Assim, para problemas de altas frequências, quando se faz referência a um raio, na realidade, está se considerando um tubo infinitesimal no entorno do raio, possibilitando trabalhar com o raio de forma quantitativa. Com isso, valores de campos são associados aos diversos pontos da propagação, conforme a divergência ou convergência do tubo de raios. A forma geral para o cálculo dos campos de uma onda (representada por um raio), propagando-se no espaço livre é dada por [45]:

$$\vec{E}(s) = \vec{E}_o \sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}} \exp(-j\beta s), \quad (3.1)$$

onde $\vec{E}(s)$ é o campo elétrico a uma distância s do ponto de referência, \vec{E}_o é o campo elétrico no ponto de referência, ρ_1 e ρ_2 são, conforme a

Figura 3.2, os raios principais de curvatura da frente de onda associada ao raio no ponto de referência, e β é a constante de fase no espaço livre (também conhecida como número de onda) dada por:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\text{rad/m}), \quad (3.2)$$

onde λ é o comprimento de onda no espaço livre, dado por:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (\text{m}), \quad (3.3)$$

sendo $c \cong 3 \cdot 10^8$ (m/s), definido como a velocidade da onda no espaço livre (velocidade da luz no vácuo) e f a frequência da onda, em Hertz (Hz).

O termo $\sqrt{\frac{\rho_1 \rho_2}{(\rho_1 + s)(\rho_2 + s)}}$, para o caso geral, é conhecido como

fator de espalhamento A_s , que é responsável pela diminuição da amplitude dos campos ao longo da trajetória, ocasionada devido ao espalhamento da energia.

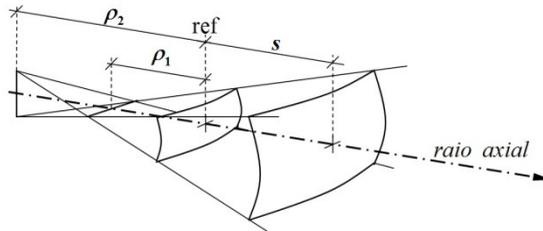


Figura 3.2 – Representação de frentes de onda associadas a um raio.

Sabe-se que as antenas transmissoras radiam a energia de acordo com suas características (diagrama de radiação). Adicionalmente, nas regiões de campos distantes (ou de Fraunhofer), a propagação da onda tem comportamento esférico (ondas esféricas), independente do tipo de antena utilizado. Desta maneira, o fator de espalhamento em problemas reais assume o caso particular descrito por (3.4), sendo o módulo do campo inversamente proporcional à distância da fonte, com $\rho_1 = \rho_2 = \rho$.

$$A_s = \left(\frac{\rho}{\rho + s} \right) \quad (3.4)$$

Percebe-se que a equação (3.4) está de acordo com a Fórmula de Friis (2.4), onde r representa a distância entre a antena transmissora e o ponto de observação (onde se deseja calcular o campo), ou seja, $r = \rho + s$. Assim, de acordo com a relação entre a potência e o campo elétrico (2.6), a potência é inversamente proporcional ao quadrado da distância (ou proporcional a A_s^2). Portanto, a magnitude do produto $|rE|$ ou $|r^2 \cdot P_R|$ é constante em qualquer ponto no espaço quando se tem uma radiação do tipo esférica (na região de campos distantes). Deste modo, o fator de espalhamento dado em (3.4) é usado em problemas 3D, podendo também ser adotado em problemas que consideram apenas um plano de análise (2D).

O Método das Imagens (MI) e o Método SBR, como já mencionado, são as duas abordagens existentes para a determinação dos percursos na Técnica de Traçados de Raios. Ambos os métodos são amplamente utilizados, possuindo vantagens e desvantagens um em relação ao outro.

3.3 MÉTODO SBR

O Método SBR consiste no lançamento dos raios, a partir da antena transmissora, com espaçamento angular (α) pré-determinado entre eles, conforme mostrado na Figura 3.3. Assim, cada raio é acompanhado, sendo que, ao atravessar uma região próxima a um receptor (dentro da esfera de recepção), adiciona-se a contribuição desse raio no campo total recebido. O raio continua seu percurso até atingir um determinado número de interações com os obstáculos ou até atingir um limiar mínimo de campo, quando sua contribuição torna-se desprezível.

A Figura 3.3 ilustra a forma como são lançados os raios a partir do transmissor (T_x) e computados quando passam pela região de um receptor (R_x).

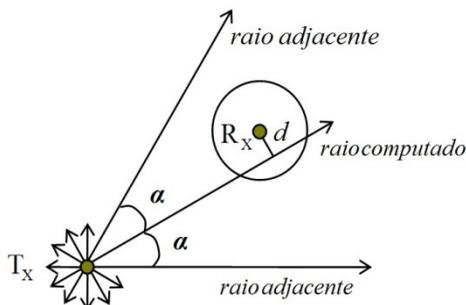


Figura 3.3 – Ilustração da RT utilizando o método SBR.

No método SBR, portanto, todos os raios devem necessariamente ser lançados, pois, mesmo quando se deseja calcular os campos em apenas algumas regiões pontuais, não se sabe a priori o destino dos raios, podendo qualquer um destes contribuir para o campo no ponto onde se deseja calculá-lo. Essa “obrigatoriedade” do lançamento de todos os raios faz o método ser conhecido também como método da “força bruta”.

Ao atingir a região de um receptor (em 2D – uma região circular em torno do ponto de recepção), o raio é computado. Portanto, o raio dificilmente atingirá o ponto exato onde o campo será calculado. Assim, a projeção perpendicular d , mostrada na Figura 3.3, indica o deslocamento existente entre o raio e o ponto de interesse para o cálculo. Este deslocamento gera um erro no cálculo não só da amplitude do campo, mas principalmente da fase. Em um ambiente (interior, por exemplo), onde diversos raios chegam ao receptor, os erros devidos ao deslocamento de cada raio, somados, podem comprometer a confiabilidade no cálculo do campo total. Para diminuir esse erro (ou seja, para diminuir a distância d), o espaçamento angular α deve ser decrescido. Essa diminuição de α , no entanto, aumenta o número de raios, elevando significativamente o tempo computacional.

Apesar das limitações relacionadas ao tempo de processamento e à precisão do método, a implementação do algoritmo é menos complexa [9], em comparação ao Método das Imagens.

3.4 MÉTODO DAS IMAGENS

O Método das Imagens (MI) [41, 44] utilizado na Técnica de Traçado de Raios (RT) foi o método aplicado no algoritmo RT implementado para as aplicações apresentadas neste trabalho. O MI

consiste em encontrar as imagens (árvore de imagens) geradas por fontes transmissoras em relação a cada superfície refletora e, a partir daí, determinar os pontos de reflexão nessas superfícies, traçando o percurso exato entre a antena transmissora e a antena receptora. Quando a difração é considerada no cálculo, os raios difratados por arestas são diretamente traçados, representando também um percurso exato da onda.

Neste método, há, no entanto, um difícil tratamento do raio transmitido através de obstáculos, pois este sofre um desvio devido à dupla refração considerada ao atravessar um obstáculo. Porém, como será visto, os algoritmos RT implantados para as aplicações deste trabalho adotam um procedimento [48-50] específico para considerar os raios refletidos através de obstáculos.

Em muitos cenários, como em ambientes exteriores (*outdoor*), podem ser considerados apenas os raios diretos, refletidos e difratados, obtendo-se excelentes resultados com a utilização da Técnica de Traçado de Raios (utilizando o MI). Por outro lado, em ambientes interiores, é possível obter uma boa predição de cobertura considerando-se os raios diretos, refletidos e transmitidos através de obstáculos [1, 39]. A Figura 3.4 mostra um exemplo dos percursos mais relevantes identificados entre transmissor e receptor por meio do Método das Imagens em um ambiente interior, desconsiderando-se as difrações.

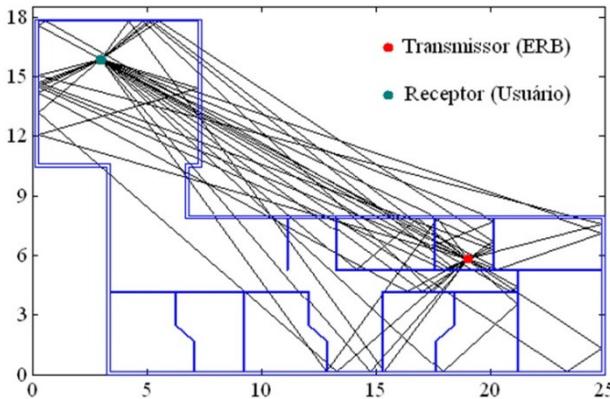


Figura 3.4 – Ilustração do traçado de usando o Método das Imagens.

Em cenários com elevado número de superfícies refletoras e/ou considerando um elevado número de reflexões, o MI possui uma árvore de imagens de tal tamanho que pode aumentar muito a carga computacional, embora existam técnicas que permitem acelerar o

processo. Em contrapartida, ao contrário do método SBR, não é necessário lançar raios em todas as direções. Apenas os raios considerados mais relevantes são traçados, sendo estes necessários para o cálculo do campo apenas nos pontos de recepção desejados.

Conforme mencionado, os algoritmos implementados para as aplicações apresentadas neste trabalho são baseados no MI. As seções seguintes deste capítulo apresentam detalhes do algoritmo RT com enfoque 2D. Em seguida, apresenta-se, no próximo capítulo, o algoritmo quase 3D, implementado a partir da expansão do Traçado de Raios bidimensional.

3.4.1 Campo devido ao raio direto

A utilização do cálculo do campo devido a raios diretos corresponde às componentes de campo devido aos raios que partem da antena transmissora e são calculados em determinado ponto de observação (sem reflexões ao longo do caminho), por meio da GO. Este ponto de observação pode ser tanto um ponto de recepção como um ponto de incidência de uma onda em um obstáculo (p. ex, ponto de reflexão).

O campo elétrico pode ser representado usando um sistema de coordenadas esféricas, ou seja, sistema de coordenadas fixo ao raio. A Ótica Geométrica, assim como outros métodos, no cálculo dos campos considera as ondas como sendo localmente planas [45]. Como o sistema de coordenadas esféricas é considerado e a onda diverge da antena transmissora (considerada na origem desse sistema de coordenadas), a componente radial \vec{a}_r do campo é nula, sendo que as componentes \vec{a}_θ e \vec{a}_ϕ são, respectivamente, as componentes de campo paralela e perpendicular ao plano em análise.

Para antenas lineares posicionadas paralelamente ou perpendicularmente aos planos de análise, por exemplo, considera-se apenas uma das componentes, polarização horizontal (paralela ao plano de análise: $\vec{a}_\theta \neq 0$ e $\vec{a}_\phi = 0$) ou polarização vertical (perpendicular ao plano de análise: $\vec{a}_\theta = 0$ e $\vec{a}_\phi \neq 0$). Assim, considerando a equação (3.1), pode-se calcular cada componente de campo (direto) a uma distância d do transmissor, com $d = s + \rho$, utilizando o campo E_o (campo a uma distância $d_o = \rho$ da antena transmissora) como referência:

$$E_{\theta,\phi} = \left| E_{o_{\theta,\phi}} \right| A_s D(\theta, \phi) \exp(-j\beta d), \quad (3.5)$$

com $A_s = (d_o/d)$ para onda esférica. O módulo do campo E_o é dado por (3.6); $D(\theta, \phi)$ é um termo adicional à equação (3.1), e leva em consideração a diretividade normalizada (ganho diretivo) da antena transmissora em função dos ângulos θ e ϕ .

$$|E_{o_{\theta,\phi}}| = \sqrt{\frac{\eta_o P_t G_t}{2\pi(d_o)^2}} \quad (3.6)$$

Diferentemente da equação (3.1), apenas o módulo de E_o aparece na equação (3.5), pois a fase desse campo já é levada em consideração na exponencial $\exp(-j\beta d)$, já que $d = s + d_o$.

Como a formulação da GO utilizada é válida na região de campos distantes, o ponto de referência é escolhido no limite inferior desta região, considerando-se, na prática, $d_o = 2D^2/\lambda$ [35], com D sendo a maior dimensão da antena transmissora. Para distâncias menores que d_o (região de campos próximos), o cálculo dos campos usando (3.5) não deve ser considerado, uma vez que levaria a resultados inexatos. No entanto, conforme mencionado, a RT é válida apenas para frequências mais elevadas. Assim, na prática, as posições onde os campos não são calculados ($d < d_o$) no cenário representam apenas um pequeno espaço em torno da antena transmissora.

3.4.2 Campo devido aos raios refletidos

A Técnica de Traçado de Raios utilizando o Método das Imagens (MI) tem como princípio a determinação dos pontos imagem em relação aos segmentos (ou às faces, em 3D), definindo os percursos exatos de raios refletidos entre o transmissor e o receptor. O MI apresenta-se, portanto, eficiente quando os obstáculos são representados, em 2D, por segmentos de reta (obstáculos retilíneos). As trajetórias encontradas ficam de acordo com a Lei de Snell (3.7) para a reflexão. Esta lei determina que o ângulo de reflexão θ_r (formado pelo raio incidente com o vetor normal à face refletora) é igual ao ângulo de incidência θ_i .

$$\theta_r = \theta_i \quad (\text{Lei de Snell}) \quad (3.7)$$

A Figura 3.5 mostra como é criada uma imagem T_i , em relação a um obstáculo S_i , encontrando-se o ponto de reflexão e o percurso da onda entre transmissor e receptor. Esta imagem é encontrada por meio de um traçado perpendicular ao segmento. A distância d entre a fonte e o segmento deve ser igual à distância entre a imagem e o segmento.

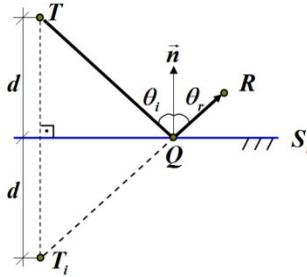


Figura 3.5 – Ilustração do fenômeno da reflexão representado pelo MI.

A imagem T_i , portanto, comporta-se como uma fonte virtual. Traçando-se uma linha da fonte virtual T_i até o ponto de recepção R , determina-se o ponto de reflexão Q , que é o ponto de interseção entre o segmento S_i e a reta T_iR . Uma vez obtido o ponto de reflexão, o percurso exato da onda refletida na superfície S_i é facilmente determinado por meio do traçado dos raios incidente (TQ) e refletido (QR).

Um obstáculo, representado por um segmento de reta, possui um lado externo refletor e um lado interno opaco (onde não há reflexão). Assim, na busca das imagens é preciso verificar se a fonte apresenta-se do lado externo do segmento em questão, caso contrário a imagem não deve ser armazenada. O teste para verificar o “lado” do obstáculo em relação ao raio incidente é conhecido como *backface culling* [9, 51]. O Anexo A apresenta detalhes da construção da árvore, bem como de regiões de iluminação que são consideradas no traçado dos raios.

O cálculo do campo devido a raios refletidos corresponde aos raios provenientes de um ponto de reflexão para então ser calculado em um ponto de observação qualquer. Neste cálculo, a GO é aplicada considerando as superfícies planas (obstáculos onde ocorrem as reflexões) e a antena transmissora distante da superfície refletora.

O campo devido a um raio refletido é calculado em um ponto de observação qualquer segundo a equação:

$$\vec{E}(O) = \vec{E}_r(Q) A_s \exp(-j\beta s), \quad (3.8)$$

com $E_r(Q)$ sendo o campo no ponto de reflexão (imediatamente após a reflexão) dado por (3.9) e $A_s = \rho / (s + \rho)$ é o fator de espalhamento (no caso de onda esférica).

$$\vec{E}_r(Q) = \|\Gamma\| \cdot \vec{E}_i(Q) \quad (3.9)$$

O campo $E_i(Q)$ (campo no ponto Q , antes da reflexão) é o campo elétrico da onda incidente na superfície, sendo que $\|\Gamma\|$ é a matriz do coeficiente de reflexão.

Para os casos particulares aplicados neste trabalho (ondas esféricas), apenas um raio de curvatura (ρ) é de interesse, sendo este a própria distância da imagem I até o ponto de reflexão Q , conforme Figura 3.6.

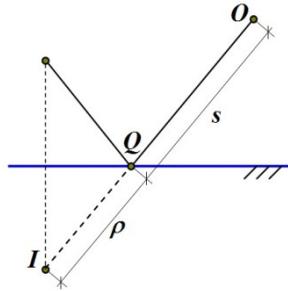


Figura 3.6 – Representação do percurso da onda refletida.

3.4.2.1 Coeficiente de Reflexão de Fresnel

Num caso geral – independentemente da polarização da onda – o campo elétrico pode ser decomposto em duas componentes perpendiculares entre si, sendo ambas perpendiculares à direção de propagação (sistema de coordenadas fixo ao raio). Essas componentes do campo elétrico são, conforme a Figura 3.7, as componentes perpendicular (E_ϕ) e paralela (E_θ) ao plano de reflexão (plano formado pelo raio incidente e o raio refletido). O vetor normal ao obstáculo também é paralelo a este plano, que, no caso 2D, corresponde ao próprio plano em análise.

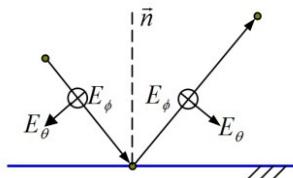


Figura 3.7 – Decomposição dos campos no sistema de coordenadas fixo ao raio.

O coeficiente de reflexão de Fresnel depende da polarização da onda incidente. Tal componente é decomposta em duas componentes,

representadas pela diagonal principal da matriz $\|\Gamma\|$: a componente perpendicular Γ_{\perp} (também conhecida como *soft*) e a componente paralela Γ_{\parallel} (também conhecida como *hard*). Com isso, os termos da equação (3.10) são descritos por matrizes, conforme abaixo:

$$\begin{bmatrix} Er_{\theta}(Q) \\ Er_{\phi}(Q) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_{\perp} & 0 \\ 0 & \Gamma_{\parallel} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Ei_{\theta}(Q) \\ Ei_{\phi}(Q) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Em uma análise bidimensional e considerando apenas polarização vertical ou horizontal, o campo elétrico refletido terá, respectivamente, apenas a componente perpendicular ou paralela ao plano de reflexão e apenas uma componente do coeficiente de reflexão (Γ_{\perp} ou Γ_{\parallel}) é utilizada. Isto ocorre porque as superfícies são consideradas planas, mantendo a polarização da onda refletida igual à da onda incidente.

Além da polarização, o coeficiente de reflexão depende das características do plano de incidência e do ângulo de incidência θ_i . Assim, a geometria (profundidade do obstáculo) e as características elétricas (ϵ , μ , σ) da superfície, juntamente com a frequência e a polarização, definem o perfil do coeficiente de reflexão $\|\Gamma\|$, que irá alterar a amplitude e a fase de uma onda incidente, resultando em uma onda refletida atenuada e defasada, dependente do ângulo de incidência.

Em geral, nas modelagens dos cenários são usados dois tipos de estruturas, ambas simulando materiais homogêneos e isotrópicos. A primeira modela um obstáculo com espessura considerada infinita (válida, por exemplo, para modelar o solo), que possui as componentes do coeficiente de reflexão (Γ_{\perp} e Γ_{\parallel}) dadas pelas equações (3.11a) e (3.11b). Na Figura 3.8 tem-se o comportamento do módulo de tais coeficientes em função do ângulo de incidência, a uma frequência de 1 GHz, com $\mu_c = \mu_o$, e $\epsilon_c = \epsilon_r \epsilon_o$, onde $\epsilon_r = 7 - j0,85$ é a “permissividade relativa complexa” do material, definida como $\epsilon_r = \frac{\epsilon - j\frac{\sigma}{\omega}}{\epsilon_o}$. Esta

estrutura (concreto [10]) possibilita, por exemplo, a simulação de edificações, em ambientes exteriores (*outdoor*).

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i}} \quad (3.11a)$$

$$\Gamma_{//} = \frac{\varepsilon_r \cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}}{\varepsilon_r \cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}}, \quad (3.11b)$$

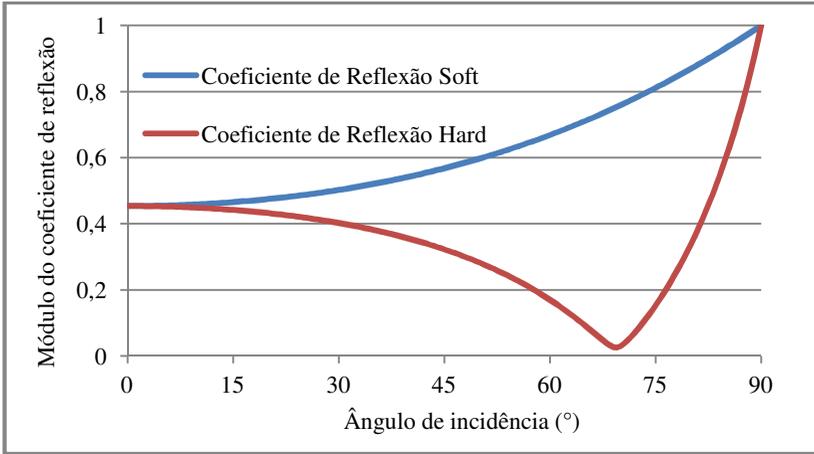


Figura 3.8 – Módulos dos Coeficientes de Reflexão em função do ângulo de incidência modelando um obstáculo de concreto muito espesso ($d \rightarrow \infty$).

Nas aplicações existentes neste trabalho (ambientes interiores), foi considerado o segundo tipo de estrutura homogênea e isotrópica, que considera espessuras finitas para representar, por exemplo, paredes, portas, janelas ou outros obstáculos. Neste tipo de representação, as componentes do coeficiente de reflexão de Fresnel (Γ_{\perp} e $\Gamma_{//}$), são descritas por (3.12a) e (3.12b) [1].

$$\Gamma_{\perp} = \frac{(1 - \varepsilon_r)[\exp(2jd\beta_0\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}) - 1]}{\exp(2jd\beta_0\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i})(\cos \theta_i + \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i})^2 - (\cos \theta_i - \sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i})^2} \quad (3.12a)$$

$$\Gamma_{//} = \frac{(\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i - \varepsilon_r^2 \cos^2 \theta_i)[\exp(2jd\beta_0\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i}) - 1]}{\exp(2jd\beta_0\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i})(\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i} + \varepsilon_r \cos \theta_i)^2 - (\sqrt{\varepsilon_r - \sin^2 \theta_i} - \varepsilon_r \cos \theta_i)^2} \quad (3.12b)$$

Na Figura 3.9, tem-se exemplos do comportamento do módulo do coeficiente de reflexão perpendicular (*soft*) Γ_{\perp} , em função do ângulo de incidência, para três tipos de materiais [52] com características e espessuras d diferentes, conforme Tabela 3.1, considerando a frequência de operação de 1.800 MHz.

Tabela 3.1: Exemplos de características de materiais/obstáculos válidas para frequência de 1800 MHz [52].

Material	Tijolo	Madeira	Vidro
Espessura (cm)	15	5	0,6
ϵ_r	5,2-j0,28	3,0	5,0

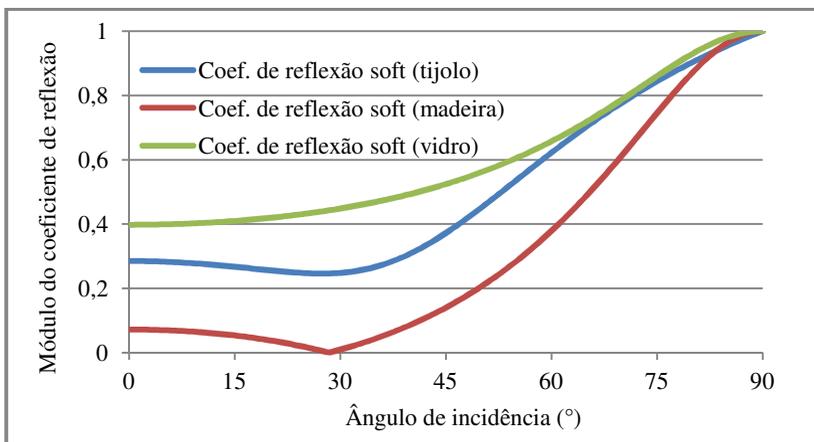


Figura 3.9 – Exemplos de coeficientes de reflexão *soft*, para três tipos de materiais diferentes (conforme Tabela 3.1).

Para os mesmos tipos de materiais/espessuras, a Figura 3.10 apresenta o comportamento do coeficiente de reflexão paralelo (*hard*) $\Gamma_{//}$.

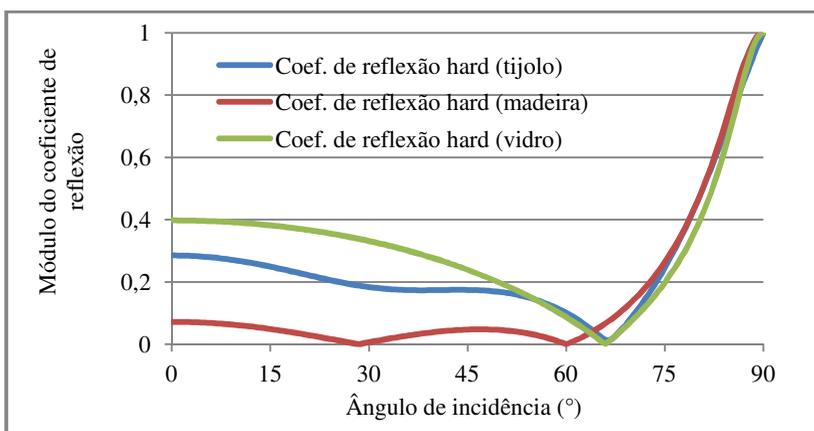


Figura 3.10 – Exemplos de coeficientes de reflexão *hard*, para três tipos de materiais diferentes (conforme Tabela 3.1).

3.4.3 Campo devido aos raios difratados

Sabe-se que uma onda, ao incidir numa aresta (em 3D: encontro de duas faces), é “espalhada”. O tratamento ótico desse fenômeno é apresentado na Figura 3.11, representando a difração especular.

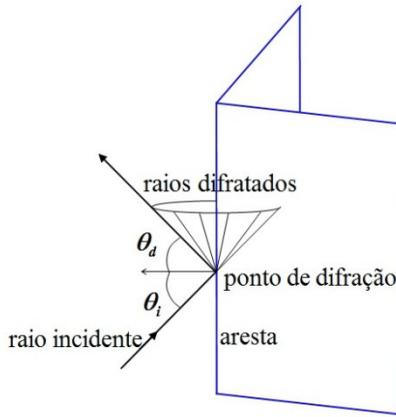


Figura 3.11 – Ilustração da difração de um raio incidindo em uma aresta.

As trajetórias dos raios difratados são determinadas pela Lei da Difração [45]:

Um raio difratado e o raio incidente correspondente formam ângulos iguais com a aresta no ponto de difração, desde que eles estejam no mesmo meio. Esses raios (incidente e difratado) estão em lados opostos do plano normal à aresta [45].

A incidência oblíqua de um raio óptico, formando um ângulo θ_i com o vetor normal à aresta, provoca um espalhamento, gerando infinitos raios distribuídos no cone representado na Figura 3.11 (conhecido como cone de Keller). O ângulo θ_d é igual ao ângulo θ_i .

Numa análise bidimensional, pode considerar-se uma incidência normal à aresta, ou ainda uma projeção dos raios em um plano perpendicular à aresta. A Figura 3.12 mostra a análise em 2D de um raio ótico difratado, onde as faces são representadas por segmentos, sendo que as arestas reduzem-se a pontos.

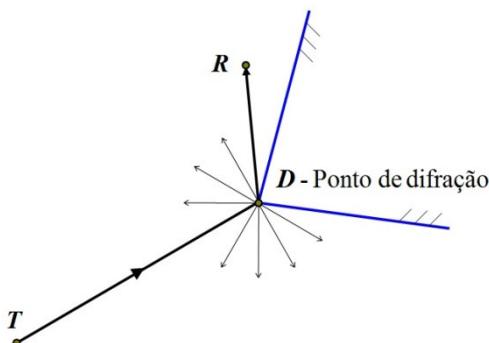


Figura 3.12 – Representação bidimensional da difração de um raio incidindo em uma aresta.

Embora haja o espalhamento da onda ao incidir em uma aresta, na Técnica de Traçado de Raios usando o Método das Imagens, apenas o percurso válido (aquele que efetivamente atingirá o ponto de recepção) é considerado. Para obtê-lo, basta realizar uma busca por pontos de difração e, posteriormente, fazer o traçado dos raios TD e DR , como mostrado na Figura 3.12.

Na análise bidimensional, um vértice, que representa uma aresta em um ambiente real (3D), comporta-se como uma nova fonte transmissora posicionada no ponto de difração. Os raios gerados podem atingir qualquer ponto de recepção posicionado no plano de análise (ambiente 2D). Deste modo, para o ponto de difração, deve-se proceder da mesma forma que para uma fonte transmissora, gerando uma árvore de imagens. Porém, o primeiro nível da árvore não deve considerar as superfícies adjacentes ao vértice em que está posicionado o ponto de difração.

Uma vez encontradas as trajetórias dos raios difratados, aplica-se a UTD para o cálculo dos campos difratados. Assim, quando os raios difratados são considerados na análise, o somatório coerente dos campos calculados pela GO (devido aos raios direto, refletidos e transmitidos), adicionado ao campo calculado pela UTD (devido aos raios difratados) forma o campo total.

Ao contrário da UTD, a formulação GTD não é válida no entorno das fronteiras de sombra. Nestas fronteiras, de acordo com a Figura 3.13, o campo da GO (direto e refletido) cai abruptamente e o campo difratado pela GTD se torna infinito sobre essas linhas [45]. A UTD, no entanto, fornece uma solução contínua em todo o espaço.

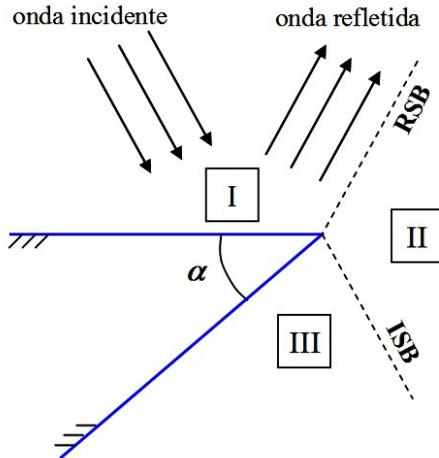


Figura 3.13 – Ilustração das diversas regiões formadas pela interação de uma onda com uma aresta.

A fronteira de sombra formada por uma aresta (junção de duas faces) depende da inclinação do raio incidente, conforme ilustrado na Figura 3.13. Três regiões podem ser definidas. A região I (região de reflexão) é formada por raios diretos, refletidos e difratados. Na região II, os raios direto e difratado contribuem para o campo. Já na região III (região de sombra), a contribuição é dada apenas pelos raios difratados e transmitidos através do obstáculo. Desta forma, obtêm-se as fronteiras de sombra entre as regiões I e II, conhecida como RSB (*Reflection Shadow Boundary*), e entre as regiões II e III, conhecida como ISB (*Incident Shadow Boundary*).

Assim como no cálculo dos campos direto e refletido, o campo $E_d(O)$ devido a um raio difratado, calculado em um ponto de observação O , é decomposto nas componentes perpendicular (Ed_θ) e paralela (Ed_ϕ) ao plano de incidência, num sistema de coordenadas fixo ao raio. O campo difratado $E_d(O)$ é dado pela equação (3.13), que utiliza o campo $E_d(Q_d)$ como referência, onde s é a distância entre os pontos Q_d e O , conforme ilustrado na Figura 3.14.

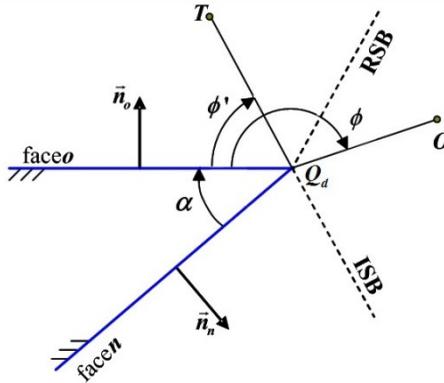


Figura 3.14 – Ilustração dos parâmetros relevantes para o cálculo dos campos difratados.

$$\vec{E}_d(O) = \vec{E}_d(Q_d) A_s \exp(-j\beta s) \quad (3.13)$$

O campo $E_d(Q_d)$ no ponto de difração (imediatamente após a difração) é dado por:

$$\vec{E}_d(Q_d) = \|D\| \cdot \vec{E}_i(Q_d), \quad (3.14)$$

onde $E_i(Q_d)$ (campo no ponto Q_d , antes da difração) é o campo elétrico da onda incidente no ponto de difração, e $\|D\|$ é o coeficiente de difração.

Neste trabalho, os cenários analisados restringiram-se a ambientes interiores. Para tais ambientes os efeitos dos raios diretos, refletidos e transmitidos através dos obstáculos formam os mais importantes mecanismos de propagação. Assim, os efeitos da difração não foram considerados nos algoritmos RT implementados.

Conforme mencionado, quando a difração é considerada no Método das Imagens, cada ponto de difração é definido como uma nova fonte, sendo necessária a construção de uma nova árvore de imagens para cada um desses pontos. Com isso, a desconsideração dos raios difratados permite um grande aumento na velocidade das análises sem perda significativa na precisão do método (nos casos de cenários *indoor*), como será demonstrado na seção 3.5.1. Desta forma, por não fazerem parte do escopo deste trabalho, as formulações dos coeficientes de difração e dos campos nas regiões de transição não serão aqui apresentadas.

3.4.4 Campo devido aos raios transmitidos

A Técnica de Traçado de Raios aplicada em ambientes interiores, na maior dos problemas encontrados na literatura, utiliza a abordagem SBR [37-40]. Um dos principais motivos da utilização do método da força bruta em tais ambientes está na facilidade do tratamento dos raios transmitidos através dos obstáculos.

Na prática, os principais obstáculos de ambientes interiores são as paredes, vigas, portas e janelas. Uma onda eletromagnética, ao incidir em um desses obstáculos produz uma parcela refletida e outra transmitida dessa onda. Não há interesse prático, no entanto, conhecer os níveis de campo no interior das paredes. Porém, é preciso “acompanhar” o percurso da trajetória refratada, pois ao sair do interior da parede, a onda passa novamente a ser relevante na análise dos campos do ambiente. Muitas vezes, esta transmissão através das paredes é a única forma de atender a cobertura em determinados setores do ambiente interior.

O “acompanhamento” dos raios no método SBR é natural, inerente à sua metodologia. Um raio que incide numa parede gera dois novos raios (refletido e refratado). O raio refratado é acompanhado e, após sua segunda refração (ao sair da parede), é chamado de raio transmitido. Esse raio tem o mesmo tratamento de outro raio qualquer, sendo fácil de ser determinado e acompanhado pelo método SBR.

Por outro lado, conforme mencionado, o tratamento do raio transmitido não é trivial quando o método das imagens é utilizado, devido ao desvio ocasionado pela dupla refração. Com isso, o procedimento proposto em [35, 48-50], que está descrito no Anexo B, é utilizado nos algoritmos de Traçado de Raios propostos no presente trabalho, sendo esta uma forma precisa de se considerar os raios transmitidos de forma compatível ao Método das Imagens. Posteriormente, observou-se que foi proposto em [53] uma outra metodologia, igualmente eficiente, para considerar os raios transmitidos (com os desvios).

O cálculo do campo devido aos raios transmitidos através de obstáculos que possuam espessura finita é feito, em um dado ponto de observação O , analogamente ao cálculo do campo refletido, utilizando-se a GO , a partir do ponto de saída da parede S (Figura 3.15). Conforme abordado, o tratamento geométrico para determinação do ponto de observação O , assim como todo o percurso percorrido pelo raio transmitido, é obtido através do procedimento descrito no Anexo B. Assim, sempre que houver uma parede no caminho de um raio, esse

procedimento é acionado e o cálculo do campo transmitido é efetuado. Com a equação (3.15), obtém-se o campo no ponto O a partir do campo no ponto S .

$$\vec{E}_t(O) = \vec{E}_t(S) A_s \exp(-j\beta s), \quad (3.15)$$

com $E_t(S)$ sendo o campo no ponto S (imediatamente após a saída do raio da parede), dado por:

$$\vec{E}_t(S) = \|T\| \cdot \vec{E}_i(I), \quad (3.16)$$

onde E_i é o campo elétrico incidente na parede (imediatamente antes de entrar na parede – ponto I) e $\|T\|$ é o coeficiente de transmissão resultante. Assim como nos casos da reflexão e da difração, os campos são decompostos nas componentes perpendicular e paralela ao plano de análise (sistema de coordenadas fixo ao raio).

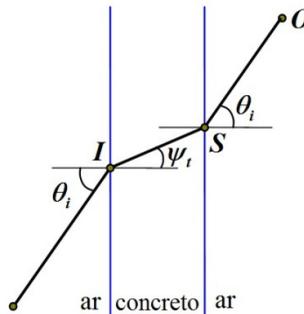


Figura 3.15 – Ilustração do percurso de um raio transmitido através de uma parede.

O coeficiente de transmissão $\|T\|$, como será visto a seguir, leva em conta o percurso que antecede o ponto S , ou seja, a atenuação e a defasagem devido à primeira refração (no ponto I), a atenuação e a defasagem devido à propagação no trecho dentro da parede, e a atenuação e a defasagem devido à segunda refração (no ponto S).

3.4.4.1 Coeficiente de transmissão de Fresnel

Assim como os coeficientes de reflexão e de difração, o coeficiente de transmissão de Fresnel também pode ser representado por duas componentes, contidas na diagonal principal de $\|T\|$. Assim, a equação (3.15) é escrita como:

$$\begin{bmatrix} Et_\theta(S) \\ Et_\phi(S) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_\perp & 0 \\ 0 & T_\parallel \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Ei_\theta(I) \\ Ei_\phi(I) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

O campo $E_i(S)$ a ser calculado não se encontra no mesmo ponto do raio incidente. Portanto, além das atenuações devido às duas refrações, a atenuação e a defasagem no percurso dentro da parede são consideradas no coeficiente de transmissão.

Com isso, os coeficientes de transmissão de Fresnel (T_\perp e T_\parallel), que contemplam tais atenuações e defasagens são dados por [1]:

$$T_\perp = \frac{4\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} \cos \theta_i \exp[jd\beta_0(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} + \cos \theta_i)]}{\exp(2jd\beta_0\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i})(\cos \theta_i + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i})^2 - (\cos \theta_i - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i})^2} \quad (3.18a)$$

$$T_\parallel = \frac{4\epsilon_r \sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} \cos \theta_i \exp[jd\beta_0(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} + \cos \theta_i)]}{\exp(2jd\beta_0\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i})(\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} + \epsilon_r \cos \theta_i)^2 - (\sqrt{\epsilon_r - \sin^2 \theta_i} - \epsilon_r \cos \theta_i)^2} \quad (3.18b)$$

onde T_\perp e T_\parallel levam em conta a atenuação e a defasagem devido à primeira refração (passagem ar-obstáculo), a atenuação e a defasagem no percurso dentro do obstáculo, bem como a atenuação e a defasagem devido à segunda refração (passagem obstáculo-ar).

A Figura 3.16 apresenta os módulos dos coeficientes de transmissão perpendiculares (*soft*) T_\perp em função do ângulo de incidência, para três tipos de materiais [52] com características e espessuras d diferentes, considerando uma frequência de 1.800 MHz.

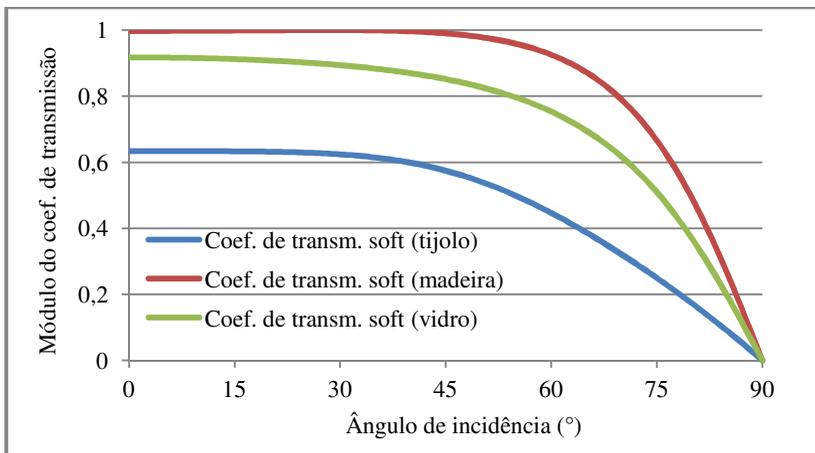


Figura 3.16 – Exemplos de coeficientes de transmissão *soft*, para três tipos de materiais diferentes (conforme Tabela 3.1).

Para os mesmos tipos de materiais e espessuras indicados na Tabela 3.1, a Figura 3.17 apresenta o comportamento do coeficiente de transmissão paralelo (*hard*) $T_{||}$.

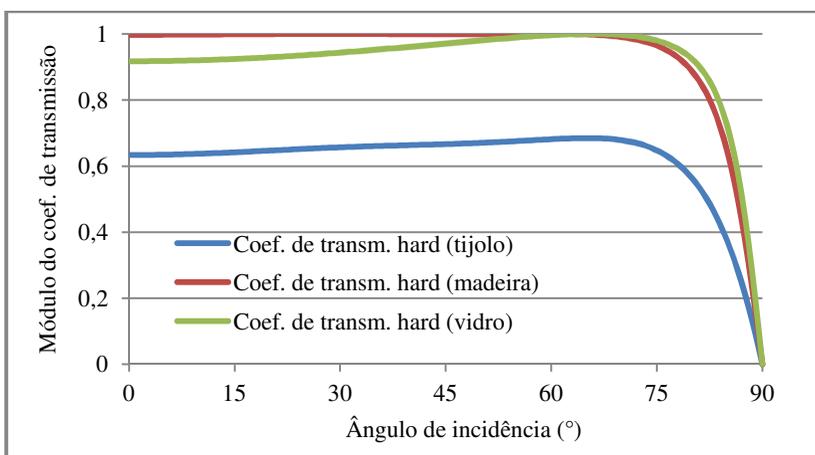


Figura 3.17 – Exemplos de coeficientes de transmissão *hard*, para três tipos de materiais diferentes (conforme Tabela 3.1).

3.4.5 Representação bidimensional dos cenários

A descrição de um cenário em que se deseja realizar uma predição de cobertura por meio de modelos determinísticos deve, em princípio, ser fielmente reproduzida para que o cálculo dos campos seja confiável. Nas simulações, tanto a geometria como as características eletromagnéticas dos materiais encontrados no ambiente devem ser o mais próximo possível da realidade.

Não é possível, no entanto, uma representação exata, pois ambientes reais são complexos, possuindo obstáculos das mais variadas formas e com diversos tipos de materiais envolvidos. Um modelo tridimensional deveria ser utilizado para reproduzir fielmente o ambiente. Entretanto, aproximações para duas dimensões podem garantir bons resultados, diminuindo consideravelmente o tempo computacional.

A Técnica de Traçado de Raios possui ainda a possibilidade de considerar raios refletidos no solo e/ou no teto (em ambientes *indoor*). Essa consideração é conhecida na literatura como uma passagem de 2D para um modelo quase 3D [54, 55]. Uma proposta de RT quase 3D para aplicações *indoor* será apresentada no próximo capítulo.

Para representações bidimensionais de um ambiente real, os obstáculos simulam estruturas infinitas na direção transversal ao plano no qual os campos são calculados.

A Figura 3.18 mostra o exemplo de um ambiente com sua forma real em 3D e a passagem para um cenário 2D a ser simulado. O cenário bidimensional representa um plano paralelo ao solo do ambiente tridimensional.

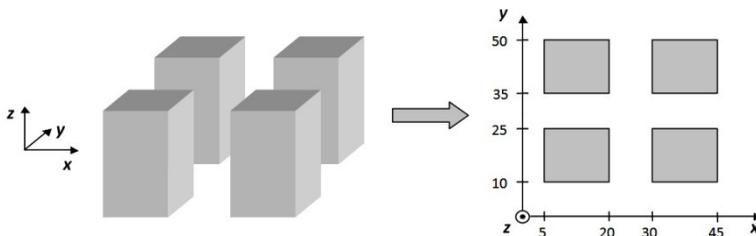


Figura 3.18 – Representação bidimensional de um cenário real (3D).

Ao representar um ambiente 3D em um plano, os obstáculos volumétricos (poliedros) passam a ser representados por obstáculos planares (polígonos). A face dos poliedros passa a ser representada por

segmentos, sendo que as arestas (junção de duas faces) reduzem-se a pontos (junção de dois segmentos).

Além da forma geométrica dos obstáculos, faz-se necessária a consideração das características eletromagnéticas dos materiais envolvidos. Essas características são, para fins práticos, obtidas por simplificações, modelando os materiais como sendo homogêneos. Porém, sabe-se que uma parede de concreto, por exemplo, é uma mistura de materiais. Nas simulações, no entanto, materiais como concreto, tijolo, madeira e vidro são considerados como sendo homogêneos [1] com características eletromagnéticas específicas.

3.4.6 Técnicas de aceleração

Conforme destacado, a Técnica de Traçado de Raios utiliza conceitos originados da Computação Gráfica. Da mesma forma, algumas das técnicas de aceleração adotadas no mundo da Computação Gráfica [1] são aplicáveis aos algoritmos de Traçado de Raios quando utilizados para solução de problemas de propagação de ondas eletromagnéticas.

Um dos objetivos das técnicas de aceleração quando aplicadas em computação gráfica é, na fase de pré-processamento do ambiente em análise, reduzir o número total de testes de interseção dos raios com os obstáculos, já que estes tendem a ser exaustivamente realizados durante o procedimento de traçado de raios. A busca por este objetivo é perfeitamente válida também nas aplicações de propagação de ondas.

Um teste de interseção de um raio com um obstáculo, embora seja de baixo custo computacional, é realizado inúmeras vezes, sendo que em ambientes complexos (com elevado número de obstáculos), a repetição de tal procedimento torna-se o maior desafio das técnicas de traçado de raios em termos de custo computacional.

Ressalta-se que mesmo usando técnicas de aceleração, em muitos ambientes complexos, o tempo consumido por um algoritmo RT em testes de interseção pode ser superior a 90% do tempo total de execução [1, 40].

Nesse contexto, o uso das técnicas de aceleração em cenários complexos, mais especificamente, o uso de Técnicas de Partição do Ambiente, permite eliminar grande parte destes testes de interseção. Para isso, antes da realização do teste de interseção raio-obstáculo, o ambiente em análise é dividido em subespaços (volumes, no caso tridimensional, ou áreas, em 2D) e, assim, verifica-se por quais células (subespaços) o raio atravessa. O teste de interseção é então realizado

considerando apenas os obstáculos contidos total ou parcialmente na(s) célula(s) por onde o raio atravessa.

Os tipos de técnicas de aceleração que buscam atingir este objetivo se diferenciam na forma como o espaço total é subdividido em espaços menores (células). A seguir são listadas algumas das técnicas de partição do ambiente mais comuns [1, 55] e que são aplicáveis ao Método das Imagens:

- Árvore BSP (*Binary Space Partitioning*);
- Matriz SVP (*Space Volumetric Partitioning*);
- Angular Z-Buffer (AZB – *Angular Z-Buffer*).

É importante destacar que alguns algoritmos e procedimentos que também visam a aumentar a velocidade nas simulações podem igualmente ser classificados como técnicas de aceleração. Por exemplo, o teste *backface culling*, mencionado no capítulo 3, reduz aproximadamente pela metade o número de superfícies a serem testadas. Outro exemplo de procedimento utilizado para acelerar o tempo de execução é o teste de iluminação, utilizado para diminuir os testes realizados na fase de construção da árvore de imagem, conforme descrito no Anexo A.

Da mesma forma, as estratégias de paralelização computacional [40] utilizadas na Técnica de Traçado de Raios aceleram consideravelmente as análises de propagação em ambientes complexos. Entretanto, as estratégias de processamento paralelo não fizeram parte do escopo deste trabalho.

No que se refere às técnicas de partição do ambiente, utilizadas para a diminuição dos testes de interseção por meio da divisão do espaço em sub-regiões, nos algoritmos RT implementados neste trabalho foi adotada a matriz SVP, por ser eficaz e relativamente de fácil implementação. Ressalta-se, entretanto, que estudos [51] apontam que a utilização, por exemplo, da técnica *kd-trees* (variante da BSP) mostra-se mais adequada para cenários em que há uma falta de uniformidade na distribuição dos obstáculos ao longo do ambiente. Isto porque, ao contrário das demais técnicas de aceleração, a *kd-trees* concentra uma maior subdivisão nas regiões em que há um maior número de obstáculos.

3.4.6.1 Matriz SVP

A Matriz SVP, também conhecida como *subdivisão espacial uniforme* [1], foi implementada no algoritmo de Traçado de Raios adotado nas aplicações deste trabalho. Trata-se de uma técnica de partição do ambiente que subdivide uniformemente o cenário em regiões com dimensões predefinidas. Esta matriz é obtida apenas uma vez, no início do Traçado de Raios e, a partir daí, no procedimento de teste de interseção dos raios, verifica-se primeiramente qual(is) célula(s) o raio intercepta. Com isso, apenas as superfícies contidas total ou parcialmente nestas células serão objetos do teste de interseção raio-obstáculo.

A Figura 3.19 [1] ilustra um cenário 2D que foi dividido em nove células com dimensões iguais. Cada uma dessas células têm definidas quais as superfícies que devem ser testadas quando o raio intercepta tal célula.

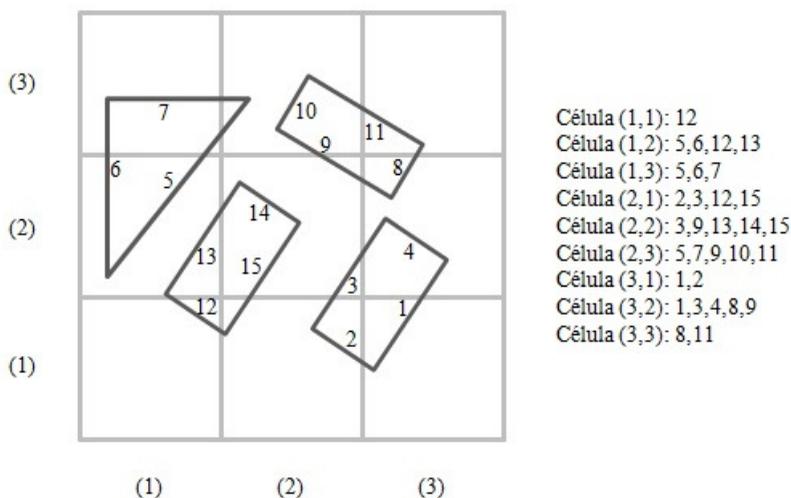


Figura 3.19 – Divisão do cenário em células com obstáculos armazenados para um cenário outdoor 2D simples [1].

3.4.7 Validação do algoritmo RT bidimensional

O algoritmo de Traçado de Raios bidimensional utilizado neste trabalho já havia sido validado em [35], demonstrando-se sua eficácia

em problemas 2D. Entretanto, pretende-se no exemplo a seguir demonstrar dois aspectos:

- a consideração de um número máximo de reflexões (NR) igual a dois demonstra-se adequada em problemas reais, mesmo em ambientes confinados, como no caso deste exemplo;
- a validação num cenário contendo campos devidos simultaneamente a raios refletidos e transmitidos, demonstrando a eficácia da metodologia adotada de consideração no desvio dos raios transmitidos.

Para as aplicações de otimização em que o algoritmo RT é utilizado, necessita-se de uma ferramenta veloz, já que o RT é executado a cada avaliação do otimizador. Por outro lado, sabe-se que para aumentar a precisão do algoritmo, um número maior de reflexões é sugerido. No entanto, nos cenários práticos, os obstáculos geralmente não são condutores perfeitos e, com isso, as reflexões de maior ordem tornam-se menos importantes.

O exemplo a seguir procura modelar justamente as características de um material comumente encontrado na prática, a saber, paredes de concreto. Trata-se de um cenário 3 m x 3 m envolvido por quatro paredes e com uma parede no meio.

A comparação foi efetuada com um algoritmo FDTD bidimensional [56]. A Figura 3.19 apresenta os mapeamentos obtidos por ambas as ferramentas, RT e FDTD. Para esta análise bidimensional, utilizou-se uma excitação cilíndrica no ponto (1,5 m; 0,6 m). Uma malha com espaçamento de 1 cm entre os pontos de avaliação foi considerada em ambos os algoritmos.

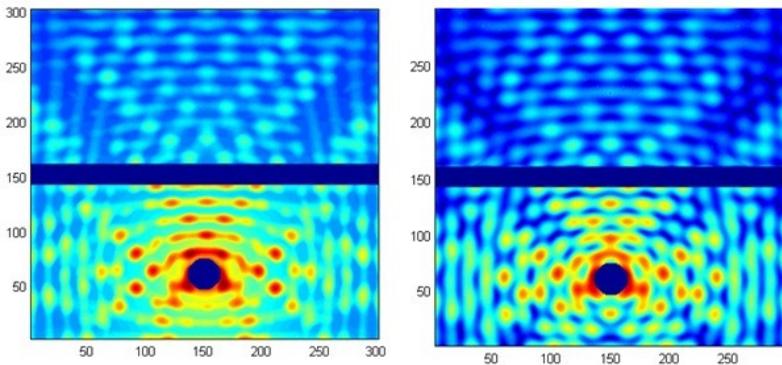


Figura 3.19 – Mapeamentos dos campos: a) Obtido por meio do método FDTD 2D; b) Obtido por meio do algoritmo RT 2D.

Observa-se pela Figura 3.19 que os pontos de interferência são coincidentes, o que demonstra uma boa conformidade entre os dois resultados.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados conceitos sobre a Técnica de Traçado de Raios. O detalhamento da RT foi focado num algoritmo bidimensional baseado no Método das Imagens. Tal algoritmo considera, ainda, os raios transmitidos através de obstáculos por meio de uma metodologia que possibilita o cálculo de campos em ambientes interiores de forma precisa.

Nas aplicações de otimização em que se propõe a adoção do algoritmo RT, deve-se dispor de uma ferramenta que permita rápidas avaliações da propagação no ambiente interior em questão. Nesse contexto, para aceleração do algoritmo RT bidimensional, foi implementada a técnica de partição do ambiente do tipo matriz SVP.

Além disso, para diminuir ainda mais o tempo de execução do algoritmo, propôs-se levar em conta os efeitos de propagação mais importantes que ocorrem em ambientes interiores, desconsiderando-se os efeitos das difrações e as reflexões de maior ordem. Por meio de uma comparação com o método FDTD 2D, pôde-se demonstrar que o algoritmo RT 2D apresentou bons resultados quando considerado o número máximo de reflexões igual a dois. No Capítulo 4 e no Capítulo 6, serão apresentados estudos adicionais, que reforçam a afirmação de que um número máximo de reflexões igual a dois é suficiente para se manter um comprometimento com a validade nos cálculos de campos em cenário *indoor* típicos.

O algoritmo de traçado de raios bidimensional, entretanto, pode não ser adequado para avaliação da distribuição de campos em grande parte dos problemas reais. Assim, o capítulo seguinte propõe a expansão do algoritmo RT 2D para um algoritmo quase tridimensional aplicável a ambientes interiores (RTQ3D-*indoor*).

4 TRAÇADO DE RAIOS QUASE 3D PARA APLICAÇÃO EM AMBIENTES INTERIORES

4.1 INTRODUÇÃO

A Técnica de Traçado de Raios permite efetuar análises tridimensionais utilizando-se o algoritmo 2D. Para isso, considera-se a excitação da fonte (transmissor) uma onda esférica, sendo que a análise da propagação ocorre restrita a um plano de análise. No entanto, há simplificações implícitas neste tipo de análise, como, por exemplo, o fato de todos os obstáculos serem considerados de alturas infinitas. Além disso, efeitos de terceira dimensão, como o do diagrama de radiação da antena em um dos planos, não podem ser levados em conta na análise 2D. Entretanto, o diagrama de radiação no plano de análise é levado em conta.

Em alguns casos, uma análise bidimensional pode ser válida. Por exemplo, em cálculo de radioenlaces, em que reflexão no solo e difrações são os mecanismos mais importantes. Neste caso, pode-se considerar apenas um plano perpendicular ao solo (plano vertical) para o cálculo dos campos por meio da técnica de traçado dos raios 2D. Também, em ambientes urbanos ou até mesmo em alguns cenários *indoor*, existem casos em que bons resultados podem ser obtidos limitando-se a análise a um plano xy , paralelo ao solo (plano horizontal), e desprezando-se, assim, os efeitos da dimensão z , como a diferença de altura entre transmissor e receptor, assim como reflexões no solo/teto. Porém, em geral, estes efeitos de uma terceira dimensão são relevantes e não devem ser desprezados, já que uma análise considerando três dimensões garante maior confiabilidade ao método para todas as situações e não apenas em casos específicos.

Assim, algoritmos totalmente tridimensionais (*full 3D*) costumam ser usados [1, 40] para análises detalhadas de cenários reais. No entanto, o tempo necessário para se efetuar uma simulação utilizando um algoritmo RT *full 3D* pode inviabilizar seu uso em ambientes complexos e/ou, por exemplo, em casos que demandam diversas execuções do algoritmo, como ocorre nos problemas de otimização estudados neste trabalho.

Neste contexto, conforme mencionado, uma das contribuições deste trabalho refere-se à implementação de um algoritmo quase 3D, válido para aplicações em ambientes interiores. Com isso, mantêm-se as vantagens de custo computacional do algoritmo 2D e, simultaneamente, consideram-se no cálculo dos campos os mais importantes efeitos de

uma terceira dimensão, como as reflexões no teto e no solo. Além disso, ao contrário do modelo bidimensional, o método quase 3D permite considerar simultaneamente os diagramas de radiação nos planos vertical e horizontal das antenas, o que também representa efeitos práticos importantes na obtenção de resultados válidos.

4.2 CONVERSÃO DE RAIOS 2D EM PERCURSOS QUASE 3D

Existem propostas de procedimentos *quase 3D* (conhecidas também como 2,5D) usando o método das imagens, válidos para ambientes exteriores [54, 55], em que um algoritmo de Traçado de Raios bidimensional é utilizado para a definição dos percursos no plano horizontal (xy) e, posteriormente, cada raio 2D é convertido em dois percursos, conforme ilustrado na Figura 4.1 [54]. Com isso, a diferença de altura entre transmissor e receptor é levada em consideração, assim como a reflexão no solo e a possibilidade de se considerar os diagramas de radiação vertical das antenas transmissora e receptora.

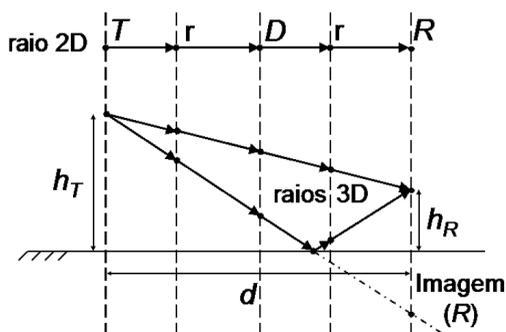


Figura 4.1 – Conversão de um raio 2D em dois raios 3D [54].

Entretanto, este algoritmo tende a não ser adequado para aplicação em ambientes interiores, já que as reflexões no teto são tão importantes quanto as no solo. Por outro lado, em [57], são utilizados os paradigmas do método 2,5D aplicável a ambientes interiores, porém, adotando-se o método SBR.

Para estender a ideia de análises quase 3D usando o método das imagens para ambientes interiores, foi implementado neste trabalho um algoritmo denominado RTQ3D-*indoor*, válido para esse tipo de ambiente.

Como o objetivo são aplicações em ambientes interiores e dadas as considerações de altura da antena transmissora, altura da antena receptora, e altura do teto em relação ao solo, no algoritmo implementado, buscou-se contemplar não apenas a existência de reflexão de primeira ordem no solo, como também no teto. Adicionalmente, ainda do ponto de vista do plano vertical, a proposta é que sejam consideradas também reflexões de segunda ordem, quais sejam: teto-solo e solo-teto.

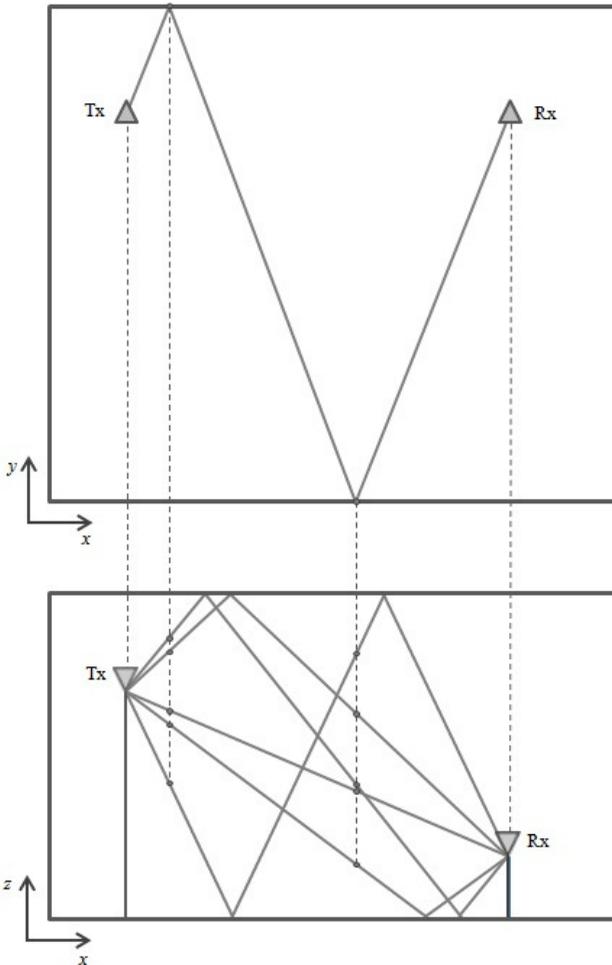


Figura 4.2 – Ilustração dos raios (no plano vertical) considerados no algoritmo RTQ3D-*indoor*.

Com isso, conforme exemplo ilustrado na Figura 4.2, o algoritmo de Traçado de Raios quase tridimensional aplicável a ambientes interiores (RTQ3D-*indoor*) converte um dado raio inicialmente obtido pelo algoritmo RT 2D, em cinco raios:

- Raio direto (do ponto de vista do plano vertical);
- Raio refletido no solo;
- Raio refletido no teto;
- Raio refletido primeiro no solo e depois no teto;
- Raio refletido primeiro no teto e depois no solo.

É importante destacar que os percursos obtidos por meio do algoritmo bidimensional são a projeção, no plano horizontal, dos percursos reais (3D). Com isso, todos os ângulos de reflexão que são obtidos por meio do algoritmo 2D devem ser convertidos adequadamente, considerando os ângulos de inclinação de cada um dos novos cinco raios.

Como a ideia é reduzir o tempo computacional sem comprometimento significativo dos resultados (em relação a um algoritmo *Full 3D*), a proposta busca considerar apenas os mecanismos de propagação mais importantes que se manifestam nos ambientes interiores. Para atingir tal objetivo, não são considerados os efeitos das difrações em arestas. Com isso, a Ótica Geométrica Moderna (GO) contempla o tratamento eletromagnético necessário para o cálculo dos campos por meio do algoritmo RTQ3D-*indoor*.

Observa-se, conforme já ressaltado, que para ambientes exteriores os efeitos da difração são relevantes, especialmente em áreas de sombra. Por outro lado, como será visto na sessão seguinte, para ambientes interiores, em geral, obtêm-se bons resultados mesmo desconsiderando-se tal efeito. Contudo, nos ambientes *indoor*, o RT deve possuir um tratamento adequado para a consideração de raios transmitidos através de obstáculos. Para contemplar esta necessidade, o RTQ3D-*indoor* utiliza o procedimento proposto em [35] e apresentado no Apêndice B, adaptado para considerar também as diferenças de alturas entre fonte e observador.

Verifica-se que uma desvantagem em relação aos algoritmos de Traçado de Raios *full 3D*, é com relação à impossibilidade de se considerar obstáculos com alturas diferentes das do teto. Isto não foi contemplado no algoritmo RTQ3D-*indoor*. Por exemplo, uma mobília existente no cenário *indoor*, incluída como dado de entrada, será

interpretada pelo algoritmo como tendo a mesma altura do teto. Adicionalmente, outra limitação do algoritmo RTQ3D-*indoor* em relação a um algoritmo *Full* 3D é o fato de não ser possível modelar objetos com “faces” inclinadas, ou seja, no método quase 3D todas as faces são consideradas paralelas ao eixo z . No entanto, ressalta-se que os principais efeitos de propagação de um ambiente interior são ocasionados pela própria estrutura da edificação (paredes, vigas, portas, janelas, etc), podendo esta ser muito bem representada na forma quase 3D.

Como será visto na sessão seguinte, nos cenários analisados, os resultados obtidos com o algoritmo RTQ3D-*indoor* apresenta boa conformidade em relação às medições. Isto demonstra que os desvios dos resultados em relação às medidas quando utilizado o RTQ3D-*indoor* são tão bons quanto aqueles obtidos por meio de algoritmos RT *full* 3D.

4.3 VALIDAÇÃO DO ALGORITMO RT QUASE 3D EM AMBIENTES INTERIORES

Para fins de validação do algoritmo RT quase 3D desenvolvido, o cenário [39] apresentado na Figura 4.3 foi utilizado na simulação. O problema foi executado utilizando-se um dipolo de meia onda polarizado verticalmente, tanto para a antena transmissora (estação base), posicionada a 1,96 m do solo, como para a antena receptora (estação móvel), posicionada sempre a uma altura de 1,3 m.

Na simulação foi considerada uma potência de transmissão de 0,92 W, em 900 MHz, sendo que a rota (percurso) de avaliação indicada na Figura 4.3 foi escolhida para que os resultados fossem comparados com as medições publicadas em [39]. Adicionalmente, efetuou-se a comparação com os resultados obtidos em [40], que utilizou um algoritmo de Traçado de Raios SBR *Full* 3D para realizar a simulação no mesmo cenário.

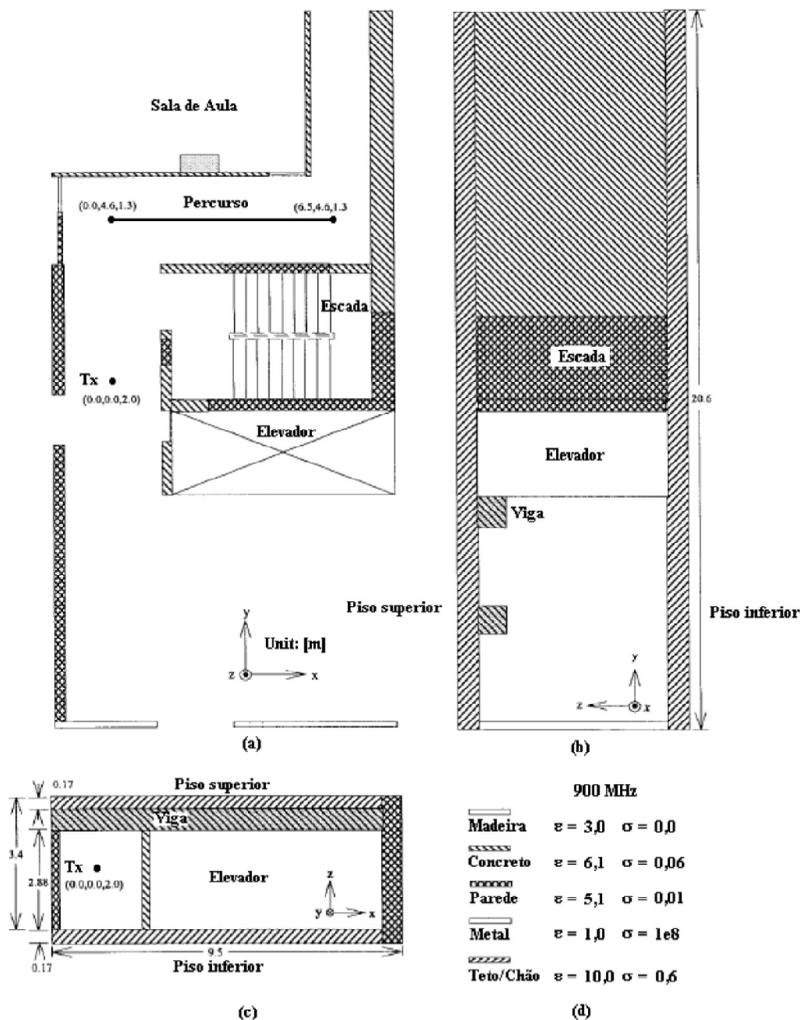


Figura 4.3 – Descrição do cenário *indoor* [39,40] utilizado na simulação com a respectiva rota de avaliação dos campos. (a) Vista superior. (b) Vista Lateral (ao longo do eixo x). (c) Vista lateral (ao longo do eixo y). (d) Parâmetros elétricos dos materiais (em 900 MHz).

A Figura 4.4 apresenta a comparação dos resultados. Conforme observado nesta figura, os valores obtidos com o algoritmo RTQ3D-*indoor* desenvolvido foram satisfatórios, sendo os desvios semelhantes aos obtidos com o RT SBR *Full 3D*.

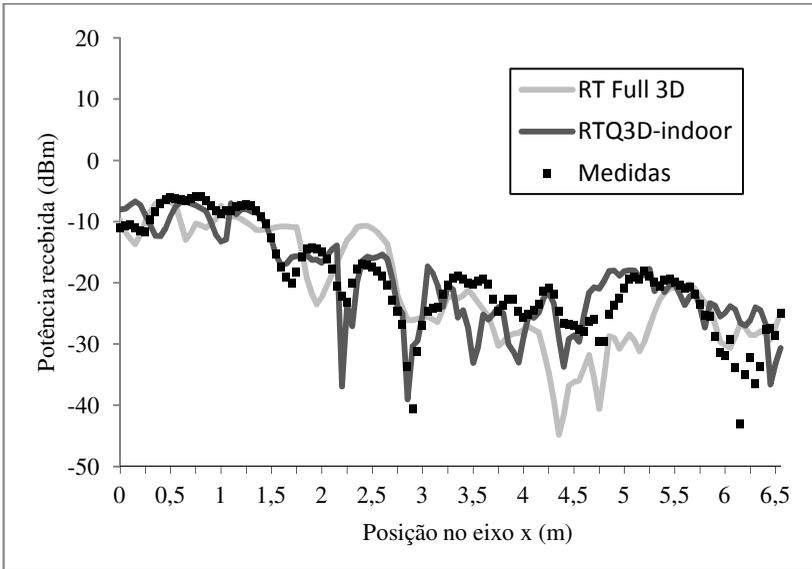


Figura 4.4 – Comparação dos resultados relacionados à rota de avaliação dos campos indicada na Figura 4.3.

Tabela 4.1: Erro médio e desvio padrão.

Modelo	Erro médio (dB)	Desvio Padrão (dB)
RT Full 3D SBR [40]	4,80	6,29
RTQ3D- <i>indoor</i>	0,01	4,79

A Tabela 4.1 apresenta o erro médio e o desvio padrão, nos mesmos moldes do que foi apresentado em [40]. Com esses resultados numéricos, fica quantitativamente confirmado que o algoritmo RTQ3D-*indoor* apresenta resultados igualmente válidos, sendo uma alternativa de aplicação em substituição ao RT SBR *Full* 3D. Conforme destacado em [40], mesmo que o modelo SBR *Full* 3D não consiga reproduzir detalhadamente todos os desvanecimentos apresentados pelas medidas, a concordância geral é considerada boa, tendo em vista a imprecisão das informações sobre as localizações das paredes e de sua espessura [40]. Da mesma forma, a concordância geral dos resultados obtidos por meio do algoritmo RTQ3D-*indoor* pode ser considerada boa.

Em uma segunda aplicação considerada para fins de validação do algoritmo RTQ3D-*indoor*, foi utilizada a referência [1], em que há a

publicação de uma bateria de medições, em um cenário *indoor*, realizadas pela companhia *TELEFONICA* na Espanha.

A geometria e as características eletromagnéticas do cenário foram reproduzidas como dados de entrada para o algoritmo *RTQ3D-indoor*. Assim, de acordo com o publicado em [1], todas as paredes possuem as mesmas propriedades ($\epsilon_r = 4,44$; $\sigma = 0,08$ S/m; e $\mu_r = 1,0$), sendo que a altura do teto em relação ao solo é de 2,9 m.

A visualização tridimensional do cenário está apresentada na Figura 4.5, sendo que a Figura 4.6 apresenta as respectivas rotas de medição/avaliação que foram adotadas para efetuar as comparações. Observa-se que tais rotas foram adequadamente distribuídas de modo a possibilitar uma avaliação de propagação sob condições de visibilidade (*LOS – line-of-sight*) e de propagação sem condições de visibilidade (*NLOS – non-line-of-sight*). Portanto, é possível avaliar, neste caso, também a validade dos campos devidos a raios transmitidos através de obstáculos.

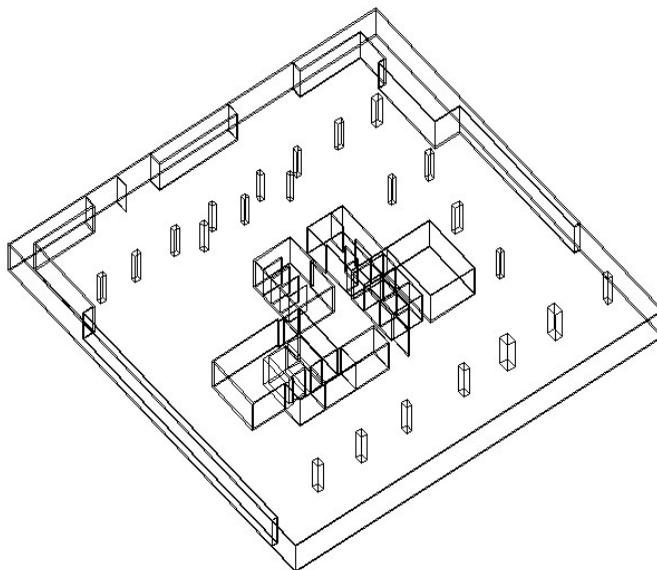


Figura 4.5 – Visualização tridimensional do cenário [1] utilizado nas simulações.

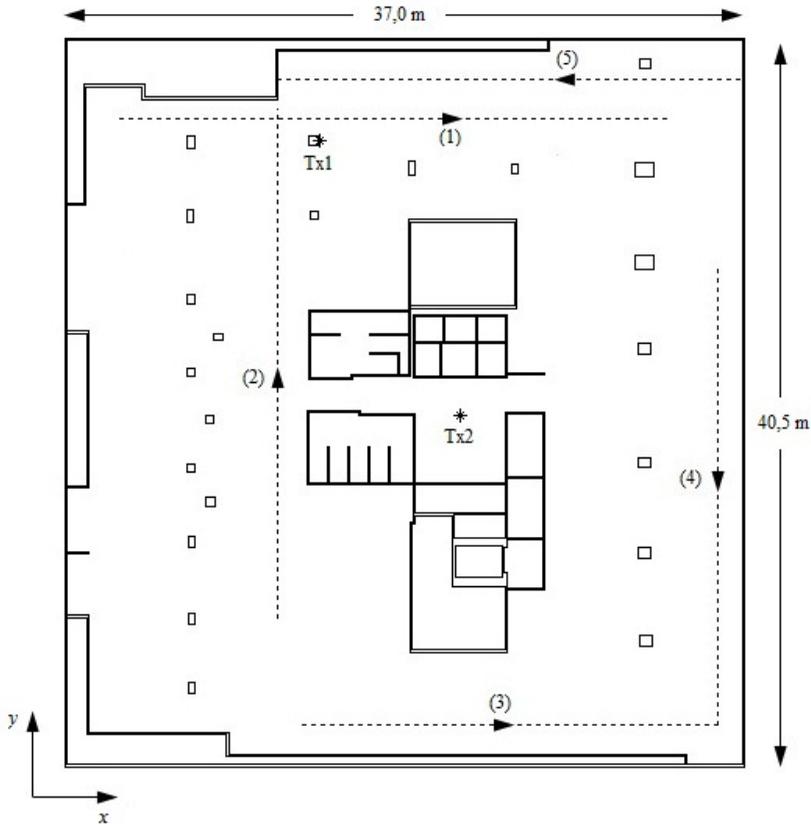


Figura 4.6 – Descrição do cenário *indoor* [1] utilizado na simulação com as respectivas rotas de avaliação dos campos.

Para as rotas 1 a 3, o transmissor foi posicionado na posição Tx_1 , sendo que para as rotas 4 e 5, o transmissor foi posicionado em Tx_2 . Conforme indicado em [1], nessas simulações foi considerada para o transmissor uma antena direcional com as características de diretividade indicadas na Figura 4.7, sendo que as antenas nos pontos de recepção foram consideradas como dipolos curtos polarizados verticalmente. Em ambas as posições, a antena transmissora (estação base) foi posicionada a uma altura de 1,7 m do solo, sendo que a antena receptora (ao longo das rotas de avaliação) foi posicionada sempre a uma altura de 0,6 m.

Para as simulações em que o transmissor foi posicionado no ponto Tx_1 a antena transmissora foi apontada com a direção de máxima radiação para $+x$, sendo que para as simulações em que o transmissor foi

posicionado em Tx_2 , a antena foi apontada para a direção $-z$, conforme também indicado em [1]. Tais características foram todas incluídas como dados de entrada para a simulação com o algoritmo RTQ3D-*indoor*.

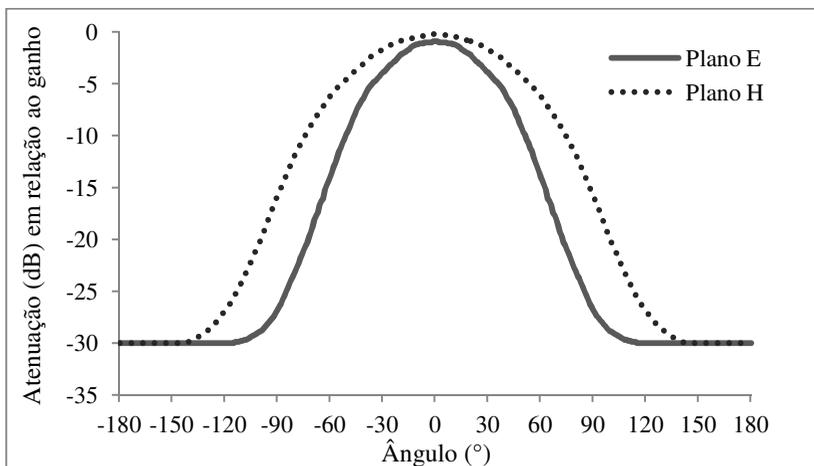


Figura 4.7 – Diagrama de radiação da antena transmissora.

Os resultados para cada rota de medição estão apresentados nas Figuras 4.8 a 4.12. Nessas figuras, é possível visualizar as comparações dos resultados obtidos das medições, das simulações usando um modelo RT *Full* 3D desenvolvido pelos autores de [1], e das simulações usando o algoritmo RTQ3D-*indoor* desenvolvido no presente trabalho.

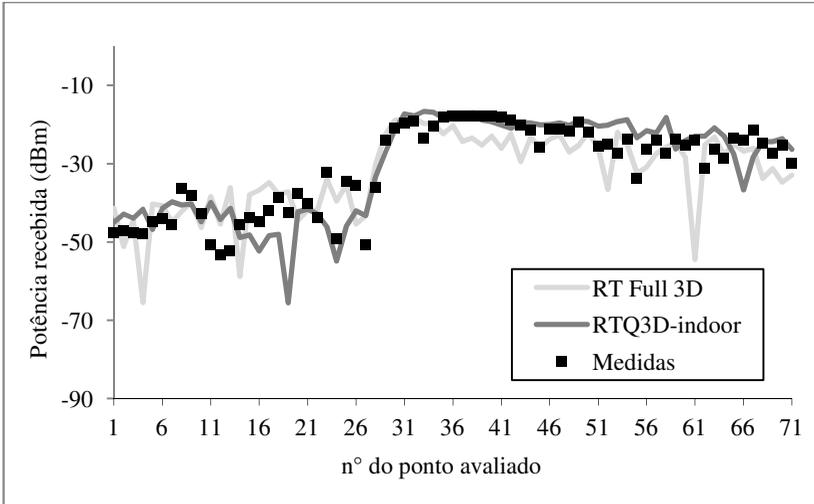


Figura 4.8 – Comparação dos resultados relacionados à rota de avaliação n.º 1.

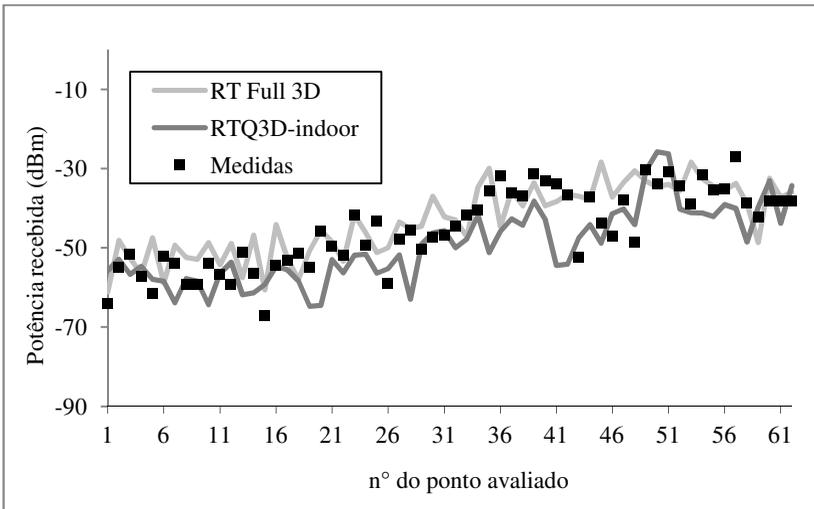


Figura 4.9 – Comparação dos resultados relacionados à rota de avaliação n.º 2.

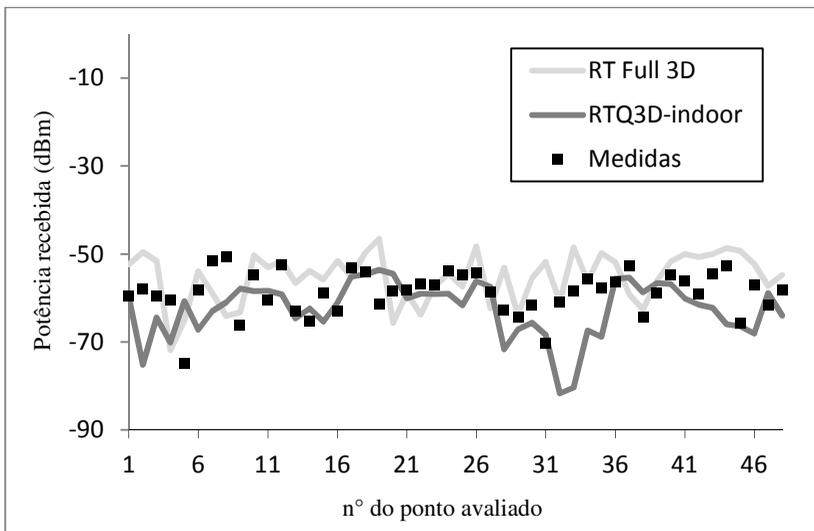


Figura 4.10 – Comparação dos resultados relacionados à rota de avaliação n.º 3.

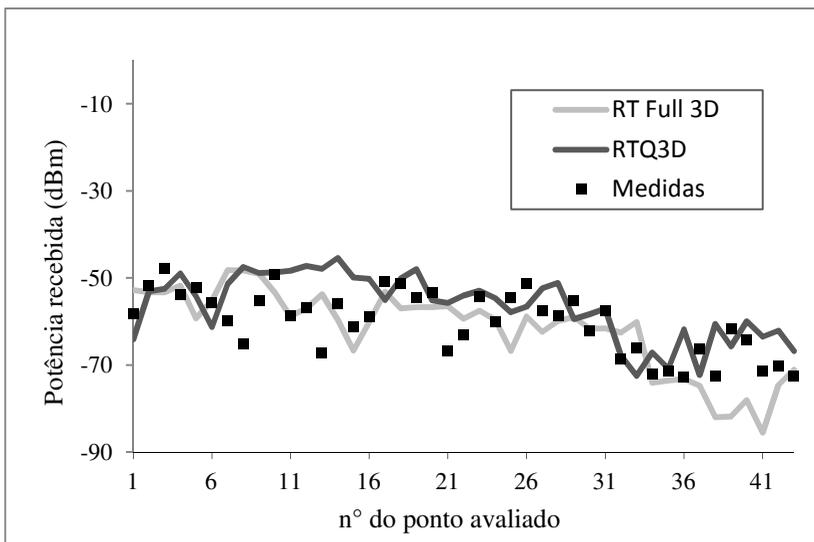


Figura 4.11 – Comparação dos resultados relacionados à rota de avaliação n.º 4.

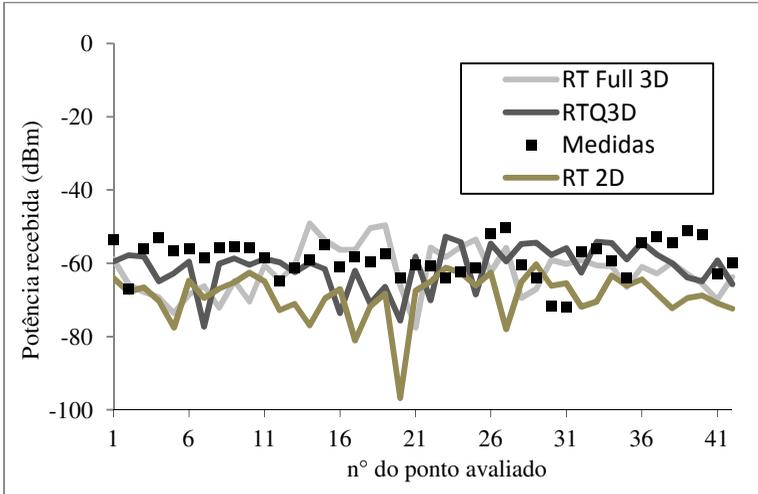


Figura 4.12 – Comparação dos resultados relacionados à rota de avaliação n.º 5.

Portanto, os gráficos acima demonstram a validade da ferramenta desenvolvida, já que os resultados obtidos por meio do algoritmo RTQ3D-*indoor* são equivalentes aos obtidos pelo RT *Full* 3D.

Para ilustrar o erro que pode ser gerado ao não se considerar os efeitos da terceira dimensão, a Figura 4.12 (referente a rota n.º 5) ilustra, ainda, os valores obtidos utilizando o algoritmo RT 2D. Percebe-se que, o uso deste algoritmo bidimensional apresenta desvios maiores em relação às medidas.

A Tabela 4.2, apresenta os valores numéricos comparativos, confirmando a validade do algoritmo RTQ3D-*indoor*. Observa-se que esta tabela adota os valores conforme padrão utilizado pela referência [1]: erro médio (em dB) e desvio padrão (em dB). No que se refere à simulação utilizando-se o RT 2D, realizada apenas na rota 5 como forma de ilustração, os valores obtidos de erro médio e desvio padrão foram 10,23 dB e 8,18 dB, respectivamente.

Tabela 4.2: Erro médio e desvio padrão para as diversas rotas.

Rota	RT <i>Full</i> 3D [1]		RTQ3D- <i>indoor</i>	
	Erro (dB)	DP (dB)	Erro (dB)	DP (dB)
1	-1,37	7,04	0,35	6,02
2	1,65	7,96	-3,96	7,01
3	3,38	6,79	-3,84	7,04
4	-1,66	7,29	3,67	6,57
5	-3,59	8,33	-2,44	7,91

4.4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO EM UM CENÁRIO PRÁTICO

Uma aplicação em um cenário prático apresentado na Figura 4.13 foi utilizada para demonstrar a capacidade do algoritmo quase 3D desenvolvido.

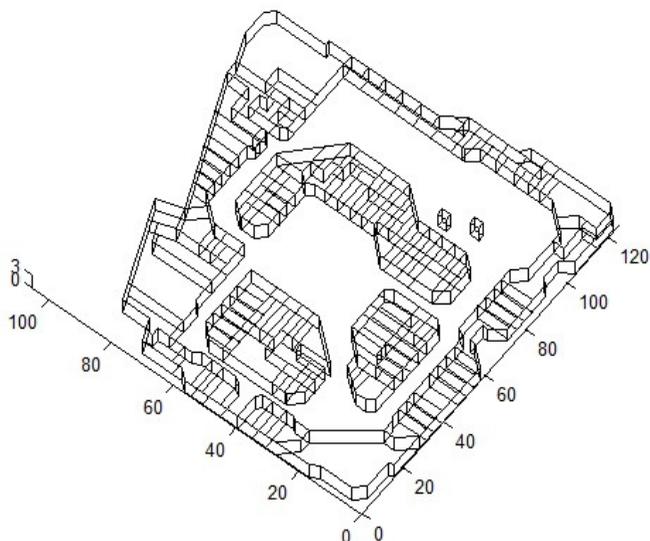


Figura 4.13 – Visualização tridimensional de um cenário prático *indoor*.

Este cenário representa, de forma aproximada, o terceiro piso de um grande centro comercial existente no município de Florianópolis. A análise foi realizada considerando-se um único andar, que possui cerca de 10.000 m^2 . Como resultado das simulações, obtiveram-se os mapeamentos dos campos para as frequências de 900 MHz e de 2.100 MHz, conforme apresentado nas Figuras 4.14 e 4.15, respectivamente.



Figura 4.14 – Mapeamento dos campos para a frequência de 900 MHz.



Figura 4.15 – Mapeamento dos campos para a frequência de 2.100 MHz.

Sabe-se que as operadoras de telefonia móvel têm interesse em cobrir adequadamente uma área comercial como esta. Isto as leva a adotarem, na prática, diversas antenas *indoor*, espalhadas ao longo do cenário. Especificamente no caso em tela, foram utilizadas nas simulações sete antenas instaladas no mesmo andar analisado, de modo a fornecer uma distribuição de campos relativamente uniforme. Nestas simulações, antenas transmissoras foram consideradas como sendo do tipo monopolos de quarto de onda polarizadas verticalmente, sendo todas elas posicionadas a uma altura de 3 m (afixadas no teto – com o plano de terra sendo o próprio teto). A potência de cada ponto de transmissão foi considerada 2 mW (33 dBm).

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o algoritmo de Traçado de Raios quase 3D aplicável a ambientes interiores (RTQ3D-*indoor*). O procedimento propõe o traçado de raios obtido por meio do algoritmo bidimensional que utiliza o Método das Imagens, com a posterior conversão de cada raio 2D em cinco raios 3D. Além das reflexões detectadas por meio do algoritmo 2D, o algoritmo RTQ3D-*indoor* permite levar em consideração reflexões no solo e no teto (até segunda ordem), além de observar a diferença de altura entre transmissor e receptor.

Por buscar considerar apenas os mecanismos de propagação mais relevantes para ambientes interiores, o algoritmo RTQ3D-*indoor* desconsidera os efeitos das difrações em arestas. Tal algoritmo, por outro lado, considera um procedimento para levar em conta, de forma precisa, os raios transmitidos através dos obstáculos. Tal procedimento é baseado no método apresentado no Anexo B com adaptações para a proposta 2.5D.

O algoritmo quase 3D foi avaliado por meio de comparações com medidas [1, 39], bem como com algoritmos plenamente tridimensionais (*Full 3D*) [1, 40]. Os resultados obtidos demonstram que o algoritmo RTQ3D-*indoor* apresentou erros médios e desvios padrões equivalentes aos algoritmos *Full 3D*. Com isso, sugere-se que o algoritmo proposto seja uma alternativa eficiente para substituir os algoritmos tridimensionais nesses tipos de cenários, sem perda significativa de precisão e com a vantagem de permitir uma avaliação de cobertura com maior velocidade.

5 META-HEURÍSTICAS POPULACIONAIS APLICADAS À OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE ANTENAS EM AMBIENTES INTERIORES

5.1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos problemas em engenharia demandam ferramentas que auxiliam na obtenção das soluções. Nesse contexto, os métodos de otimização apresentam-se como procedimentos práticos para encontrar soluções dos mais diversos problemas.

Em geral, a otimização de um dado problema pode ser vista como “uma tentativa de maximizar as propriedades desejáveis do sistema e, simultaneamente, minimizar aquelas que são indesejáveis” [58]. Para isto, existem diversos métodos de otimização, cada qual com peculiaridades que podem ser mais ou menos adequadas ao problema que se deseja solucionar.

De uma forma ampla, os algoritmos de otimização podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. Neste trabalho foram adotado dois tipos de algoritmos de otimização estocásticos: o Algoritmo Genético (*Genetic Algorithm* – GA) e o algoritmo de otimização por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO). Estes métodos de otimização são classificadas também como algoritmos bioinspirados ou algoritmos naturais [59].

Em uma classificação mais restrita, ambos os métodos pertencem à categoria de *meta-heurísticas populacionais* [60], a exemplo da classificação dada aos algoritmos de otimização inspirados em Redes Imunológicas Artificiais (RIA). Segundo [60]:

A principal vantagem destas meta-heurísticas populacionais está no fato de, como o próprio nome diz, trabalharem com uma população de soluções candidatas ao problema, o que permite que tais ferramentas tenham uma menor susceptibilidade à presença de ótimos locais e também sejam capazes de obter múltiplos ótimos em uma única execução [60].

Sabe-se que estes tipos de otimizadores não determinísticos nem sempre são os melhores caminhos para se encontrar a solução de problemas. Os métodos de otimização determinísticos tradicionais, como aqueles baseados no gradiente da função, em geral, encontram de forma mais rápida os mínimos (ou máximos) de funções analíticas

convexas (ou côncavas) bem condicionadas e que possuam um relativo baixo número de variáveis. Entretanto, muitos problemas reais não apresentam tais características, tratando-se de funções multimodais, com descontinuidades e/ou com regiões de alta sensibilidade. Nestes casos, os otimizadores determinísticos tendem a encontrar soluções prematuras, que podem corresponder a mínimos ou máximos locais. Além disso, em muitas aplicações, não se tem a informação analítica da função, nem de seu gradiente, o que torna impraticável o uso de algoritmos determinísticos.

Para se encontrar a solução em problemas de otimização reais, primeiramente, deve-se modelar o problema por meio de uma função-objetivo. Esta função deve ser maximizada ou minimizada e depende das variáveis que serão modificadas ao longo do procedimento de otimização até que a aptidão desejada seja atingida. Além disso, deve-se levar em consideração eventuais restrições associadas ao problema.

Nas aplicações apresentada neste trabalho, o algoritmo de traçado de raios será usado pelo otimizador para a avaliação da função-objetivo, a ser calculada para cada conjunto de variáveis de entrada definido. Tais variáveis, nas aplicações aqui abordadas, em geral são as coordenadas cartesianas das posições das antenas.

Ressalta-se que o escopo deste trabalho não abrange contribuições relacionadas ao estado da arte dos algoritmos de otimização. Desta forma, neste capítulo serão apresentados apenas alguns conceitos restritos aos dois tipos de otimizadores, o GA e o PSO, adotados nas aplicações que serão apresentadas no Capítulo 6.

Por fim, serão apresentadas neste capítulo as propostas de associação do GA e do PSO ao RT. Tais associações foram utilizadas para aplicações na otimização do posicionamento de antenas em ambientes interiores, conforme estudos de casos apresentados no Capítulo 6. Com isso, em ambas as propostas de associação (GA e PSO), a função objetivo será avaliada usando um algoritmo de Traçado de Raios, podendo este ser: RT 2D ou RTQ3D-*indoor*. Assim, cada “indivíduo” da população é avaliado por meio da execução do algoritmo RT (2D ou quase 3D), que retorna uma aptidão que reflete a distribuição de campos para dado(s) posicionamento(s) da(s) antena(s).

É importante salientar que a escolha destes algoritmos de otimização para as aplicações propostas neste trabalho deve-se ao fato de serem, tanto o GA como o PSO, ferramentas eficientes e amplamente utilizadas em problemas de eletromagnetismo [4]. Além disso, ambos os métodos foram ou estão sendo objetos de pesquisa no GRUCAD. No caso das aplicações multiobjetivo, optou-se somente pelo uso do PSO,

por ser um algoritmo simples [61] e eficiente para solução deste tipo de problema.

Entretanto, ressalta-se que outros trabalhos desenvolvidos no GRUCAD [62, 63], que adotam uma extensão multiobjetivo dos Algoritmos Genéticos, poderão ser utilizados em aplicações de trabalhos futuros, já que também se apresentaram como ferramentas eficientes para aplicações em eletromagnetismo.

Além disso, outras meta-heurísticas que ficaram fora do escopo de aplicações deste trabalho podem se mostrar igualmente eficientes em problemas mono-objetivo e multiobjetivo, como, por exemplo, as Redes Imunológicas Artificiais (RIA) [60].

5.2 ALGORITMOS GENÉTICOS

Os algoritmos genéticos são baseados nos conceitos de Genética e Evolução das Espécies, dos quais o pesquisador Charles Darwin, a partir de meados do século XIX, teve suas teorias reconhecidas como as mais importantes da área.

A partir da década de 1960 [59], os estudos envolvendo os conceitos de genética e evolução passaram a ser propostos também como método de otimização de problemas, por meio de Algoritmos Genéticos. Especialmente, a partir de 1989 [64], a utilização dos GA passou a ser mais popular na solução de problemas de engenharia.

Na literatura, observa-se uma vasta utilização de GA em problemas de eletromagnetismo, como por exemplo, na determinação de parâmetros de modelos [65], otimização da geometria de antenas refletoras [63, 66] e projeto de conjunto de antenas [67].

Os Algoritmos Genéticos são meta-heurísticas populacionais que por meio de regras análogas à genética natural possibilitam, de forma estocástico-orientada, a otimização de problemas. Desta forma, por meio da criação de uma população aleatória (início do processo), as interações entre os indivíduos (cruzamento) desta população permite permutação de “material genético” além de haver a possibilidade de inserção ocasional de novo material genético (mutação) em alguns indivíduos da população.

Tais regras aplicadas durante o processo de otimização são extraídas da teoria da evolução, onde os novos e mais aptos indivíduos (gerados) possuem maior probabilidade de “sobreviver” e de dar continuidade ao processo por meio do procedimento de seleção, até que um critério de parada (convergência) seja atingido.

Para julgar a aptidão de cada indivíduo, é necessária a definição de um mérito (*fitness*), isto é, de uma função-objetivo ou função de custo, compatível com a aptidão que se busca maximizar.

Em uma das propostas de aplicação apresentada neste trabalho, foi utilizado como ferramenta de otimização um Algoritmo Genético de codificação real mono-objetivo, que fora implementado em um trabalho de mestrado [66] também desenvolvido no GRUCAD.

A codificação real, por trabalhar diretamente com números reais, torna o processo de otimização prático em problemas nos quais as variáveis envolvidas são grandezas representadas por números reais. Por outro lado, tal codificação torna os métodos de troca de informações genéticas mais complexos [66]. Entretanto, este tipo de codificação (real) foi considerado mais adequado para os problemas tratados neste trabalho, em comparação com as codificações binária ou Gray.

Um indivíduo é representado por um vetor possuindo dimensão n (número de elementos ou variáveis), sendo cada elemento um número real para o caso da codificação real. Assim, um indivíduo pode ser representado da seguinte forma:

$$X = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n] \quad (5.1)$$

Um indivíduo é considerado como uma possível solução do problema, ou seja, é um “ponto” contido no universo de busca da solução ótima, com tal espaço tendo dimensão n . Genericamente, em uma dada geração, o conjunto de indivíduos que forma uma população pode ser representado da seguinte forma:

$$POP = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 \\ x_1^{it,2} & x_2^2 & \dots & x_n^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ x_1^{npop} & x_2^{npop} & \dots & x_n^{npop} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

onde $npop$ é o número de indivíduos em uma dada população. O número de indivíduos a ser definido depende de um compromisso que leva em consideração o tempo computacional e a complexidade do problema a ser resolvido.

5.2.1 Operadores Genéticos

O objetivo da aplicação dos operadores genéticos na população é imprimir uma diversificação aleatório-orientada aos novos indivíduos de modo que haja uma evolução ao longo das sucessivas gerações. Na maior parte dos casos, os AG utilizam três operadores: seleção, cruzamento e mutação [66].

Seleção

A seleção é a operação genética que consiste em priorizar os indivíduos mais aptos para darem continuidade ao procedimento, por meio da realização de operações de cruzamento e mutação, atribuindo-se uma probabilidade de escolha maior a tais indivíduos mais aptos. Esse processo de escolha impõe ao GA o caráter de competição e evolução intrínseco ao algoritmo.

Os métodos utilizados para a seleção são [68]: roleta, torneio, amostragem residual determinística, amostragem universal determinística e amostragem estatística.

No AG adotado nas aplicações propostas neste trabalho, utiliza-se o método da roleta para a seleção dos indivíduos. Este método consiste em atribuir a cada indivíduo uma área maior da roleta, proporcional ao seu grau de aptidão. A Figura 5.1 [66] mostra um exemplo de roleta obtida a partir de indivíduos e de seus respectivos méritos, para uma dada população.

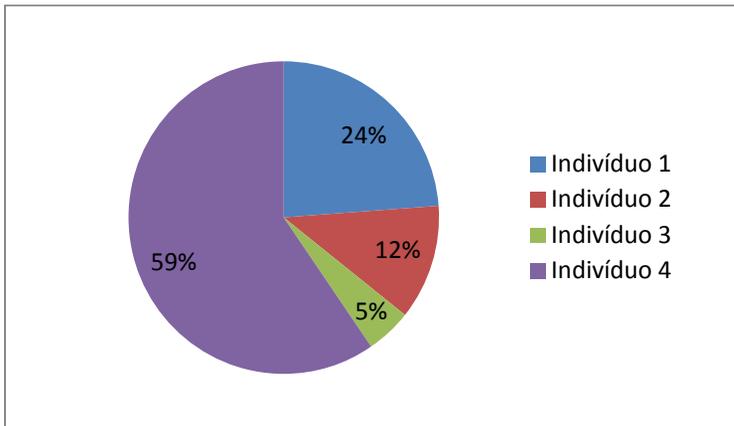


Figura 5.1: Distribuição dos indivíduos na roleta ([66] modificada).

Para obter o número de indivíduos desejados, a roleta é girada tantas vezes quanto necessário para a formação dos pares e prosseguindo-se para as próximas operações. O número de indivíduos a ser selecionado depende das variações do método.

Cruzamento

Após a seleção dos indivíduos, os pares formados podem ou não sofrer cruzamento (ou recombinação) de acordo com uma dada probabilidade p_{cross} . A exemplo do que ocorre na natureza, esta probabilidade é alta (usualmente entre 70% e 100% [66]). Assim, o cruzamento é o principal responsável pela diversidade dos novos indivíduos, criados a partir da permutação de material genético entre os pares. A Figura 5.2 apresenta uma ilustração de cruzamento em codificação real, podendo cada cor ser representada em escalas de número reais. No caso apresentado nesta ilustração, o cruzamento consiste na permutação das posições 3, 4, 5 e 6 do quadro de cores, gerando filhos com características de ambos os pais.

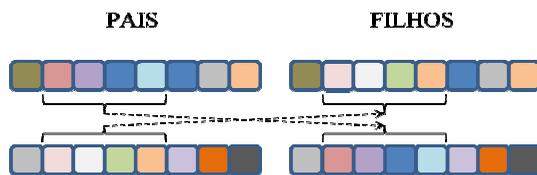


Figura 5.2: Ilustração da mutação.

Em geral, para se extrair mais vantagens da codificação real (em relação à binária ou Gray), métodos para cruzamento mais avançados podem ser utilizados [67].

Mutação

A mutação, como ocorre na natureza, sob condições normais, é implementada de modo a possuir baixa probabilidade de ocorrência (em geral, $p_{mut} < 10\%$). Com a mutação, é possível uma maior exploração do espaço de busca. Quanto maior a probabilidade de mutação, maior é o caráter aleatório no processo de evolução.

5.2.2 Convergência

Conforme mencionado, o processo de criação de novos indivíduos (nova geração) é interrompido quando um dado critério de convergência é atingido. Os principais métodos de convergência utilizados em problemas práticos são: a diversidade genética da população e a limitação do processo definindo-se um número máximo de gerações.

Se por um lado a convergência utilizando-se a verossimilhança entre os indivíduos pode levar a uma convergência prematura (p. ex., a um mínimo local), o número máximo de gerações pode não ser o suficiente para uma exploração adequada do espaço de busca. Desta forma, para cada aplicação, o critério de convergência deve ser escolhido levando-se em consideração as peculiaridades do problema.

5.3 OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS (PSO)

A Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization* – PSO) é uma meta-heurística populacional que vem sendo muito utilizada para a resolução de problemas práticos de otimização [61]. Da mesma forma que o GA, o algoritmo PSO é uma técnica de computação estocástica baseada em fenômenos observados na natureza que envolvem populações. A diferença é que o PSO não conta com operadores naturalmente evolutivos (como cruzamento e mutação), mas trata-se de uma meta-heurística inspirada no comportamento “social” dos indivíduos que compõem a população.

Os conceitos e formulações básicas utilizados no método PSO foram propostos inicialmente em 1995 por Kennedy e Eberhart [69]. No referido trabalho, foi extraída uma analogia do comportamento social de pássaros, que, quando agrupados em bando, possuem uma maior “inteligência” para encontrar alimento. Ou seja, quando um pássaro encontra um alimento, todos os demais passam a encontrá-lo também, mais rapidamente [70]. Portanto, de uma forma prática, os autores propuseram uma formulação simples para modelar a “inteligência social” que pode ser observada na natureza, como ocorre em bandos de pássaros, cardumes de peixes, rebanhos de ovelhas, manadas de elefantes, enxames de abelhas, etc.

A ideia básica pode ser resumida da seguinte forma [71]:

Cada partícula é tratada como um ponto dentro do espaço de busca, que ajusta seu próprio “voo” de acordo com sua própria experiência, bem como a experiência do “voo” de outras partículas [71].

O PSO tem se destacado na literatura por ser um método eficiente para solução de problemas em Eletromagnetismo [4], o que o torna adequado para ser utilizado em aplicações propostas neste trabalho. Os algoritmos PSO utilizados nas aplicações que serão apresentadas no Capítulo 6 foram implementados no GRUCAD, ao longo dos anos 2009 e 2010 por alunos do curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFSC, em atividades de Iniciação Científica complementares a este trabalho de doutorado. Em um dos algoritmos implementados [72], foi utilizada a formulação básica proposta por Kennedy e Eberhart [69] com adaptações propostas por [73]. Numa outra versão implementada, foi adotada a formulação proposta em [74]. Por fim, para solução de aplicações multiobjetivo, foi adotada a formulação apresentada em [61]. Tais formulações e mais detalhes sobre o algoritmo serão apresentados nas seções seguintes.

5.3.1 Formulação

Similarmente ao GA, o PSO é geralmente inicializado com uma população aleatória, composta por indivíduos representados na forma de partículas “posicionadas” no espaço de busca de um dado problema de dimensão D . A cada partícula potencial (x_{id}), de dimensão D , está associado um vetor velocidade aleatória (v_{id}). Já a partir da primeira iteração, efetua-se a avaliação da função objetivo (mérito ou *fitness*) associada a cada partícula, com o algoritmo armazenando a posição (no espaço de busca) de cada partícula (p_{id}) que corresponde à solução de melhor *fitness* individual. A melhor entre as melhores soluções e as suas respectivas coordenadas (p_{gd}) também são armazenadas durante o processo. Esses dados armazenados são iterativamente atualizados por meio de um processo de busca que possui a seguinte formulação [73]:

$$v_{id} = w v_{id} + c_1 \text{rand}(\cdot) (p_{id} - x_{id}) + c_2 \text{rand}(\cdot) (p_{gd} - x_{id}) \quad (5.3)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (5.4)$$

onde x_{id} é a posição da partícula, v_{id} é a velocidade da partícula, com p_{id} sendo a melhor posição da partícula obtida até a iteração id e p_{gd} é a melhor posição do grupo até a iteração id , $\text{rand}(\cdot)$ é um número real

aleatório entre zero e um, sendo w denominado o peso de inércia, c_1 e c_2 são constantes positivas conhecidas, respectivamente, como cognitiva e social [73].

A Figura 5.3 ilustra o comportamento extraído da natureza e que se busca implementar nos algoritmos PSO.

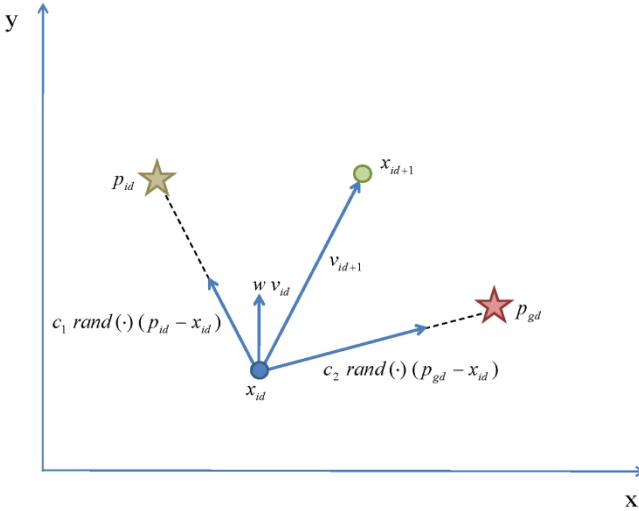


Figura 5.3: Ilustração da mutação.

Em uma segunda versão implementada para aplicação na associação PSO/RT, foi utilizado no otimizador uma formulação proposta por [74], conforme descrito pela equação (5.5), sendo esta uma extensão da primeira, descrita pela equação (5.3), mas utilizando parâmetros dinâmicos. Tais parâmetros variam linearmente ao longo das iterações, e inclui-se um terceiro termo à equação original, denominado de centroide, que permite imprimir maior eficiência ao processo de otimização.

$$\begin{aligned}
 v_{id} = & w v_{id} + c_1 \text{rand}(\cdot) (p_{id} - x_{id}) + c_2 \text{rand}(\cdot) (p_{gd} - x_{id}) \\
 & + c_3 \text{rand}(\cdot) \left(\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i - x_{id} \right)
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

onde m é o número de partículas da população, c_3 o coeficiente do centroide, sendo que os parâmetros w , c_1 , c_2 , c_3 variam linearmente conforme a seguir:

$$c_n = (c_n^f - c_n^i) (it / itMax) + c_n^i \quad (5.6)$$

onde c_n^i é o coeficiente na primeira iteração e c_n^f é o coeficiente na última iteração.

A estratégia empregada nesta segunda formulação permite uma melhor exploração do espaço de busca, o que é mais interessante em problemas de maior dimensão e/ou quando se trata de funções com maior número de mínimos locais.

5.3.2 Convergência

No PSO, a convergência é tratada de forma semelhante ao GA, quando um critério de parada (como o número de iterações ou um valor de distância média entre os indivíduos) é atingido. Entretanto, quando comparado com o GA, o PSO apresenta uma maior robustez quanto a estratégias de evitar convergência prematura (a mínimos locais) [75].

5.3.3 Extensão do algoritmo PSO para resolução de problemas multiobjetivo – MOPSO

Os problemas de otimização multiobjetivo são aqueles em que se utilizam dois ou mais critérios a serem alcançados no final do processo de otimização. Em geral, os múltiplos objetivos a serem otimizados são conflitantes e não podem ser combinados. Neste caso, não existe uma única solução para o problema e, assim, um conjunto de soluções é obtido. Tais soluções, ditas como não-dominadas, formam a fronteira Pareto-ótima. A princípio, nenhuma dessas soluções é considerada melhor do que as demais, sendo necessário, ao final do processo de otimização, utilizar um critério adicional quando se deseja optar por uma solução final única.

Para solucionar problemas multiobjetivo utilizando-se o algoritmo PSO, a extensão do algoritmo original em um PSO multiobjetivo (MOPSO – *Multiobjective Particle Swarm Optimization*) foi proposta por [76].

Utilizando-se esta estratégia, o algoritmo PSO adotado no presente trabalho para resolver problemas mono-objetivo foi estendido para tratamento de problemas multiobjetivo por meio da implementação de um otimizador MOPSO. Com isso, o conceito de dominância de Pareto é aplicado e, ao final do processo de otimização, um conjunto de

soluções não dominadas é obtido, como será visto nas aplicações apresentadas no Capítulo 6.

A título de ilustração, a Figura 5.4 apresenta a aplicação deste algoritmo MOPSO em uma função de teste conhecida. Trata-se de uma função da família ZDT [77], mais especificamente, a função ZDT3, que possui características específicas de descontinuidades, permitindo-se uma demonstração do algoritmo MOPSO que será adotado no Capítulo 6.

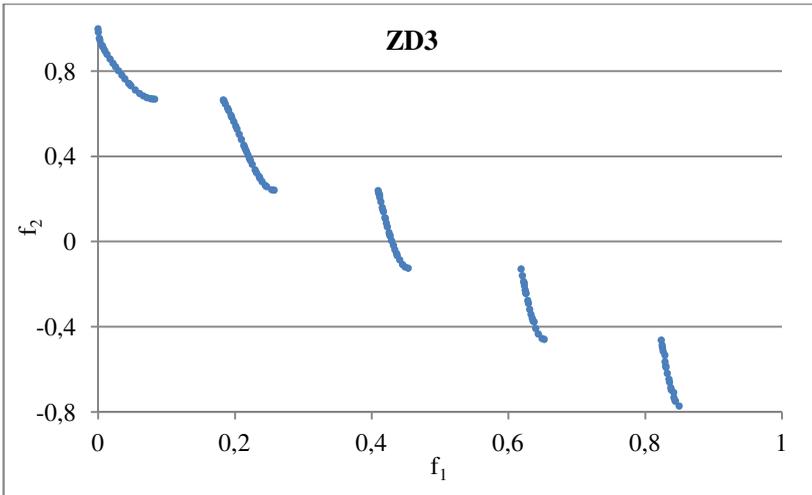


Figura 5.4: Fronteira Pareto-ótima da função ZDT3 - Demonstração do algoritmo MOPSO.

5.4 APLICAÇÃO DE META-HEURÍSTICAS PARA OTIMIZAÇÃO DO POSICIONAMENTO DE ANTENAS EM AMBIENTES INTERIORES

Para a otimização do posicionamento de antenas em ambientes interiores, foi adotada a aplicação associada de uma meta-heurística (otimizador GA ou PSO) com o Traçado de Raios (RT 2D ou RTQ3D-*indoor*). Assim, para ambas as opções de otimizadores, a função de mérito será avaliada usando um algoritmo baseado na técnica de traçado bidimensional ou quase 3D, para o rastreamento das trajetórias e a predição de cobertura, obtidos para uma dada posição da antena (indivíduo).

No capítulo 6, serão apresentadas algumas aplicações de posicionamento de antenas utilizando o Algoritmo Genético [66] como otimizador, além de outras aplicações utilizando-se o otimizador PSO.

No caso do PSO, este foi adotado na maior parte das aplicações dos problemas mono-objetivo, além de ter sido aplicado a problemas multiobjetivo.

5.4.1 RT associado ao AG

Num primeiro grupo de aplicações, foi utilizado um algoritmo implementado com a associação do método de Traçado de Raios bidimensional e um otimizador GA real mono-objetivo (i.e., associação RT/GA).

A Figura 5.4 apresenta o fluxograma simplificado da proposta de associação RT/AG.

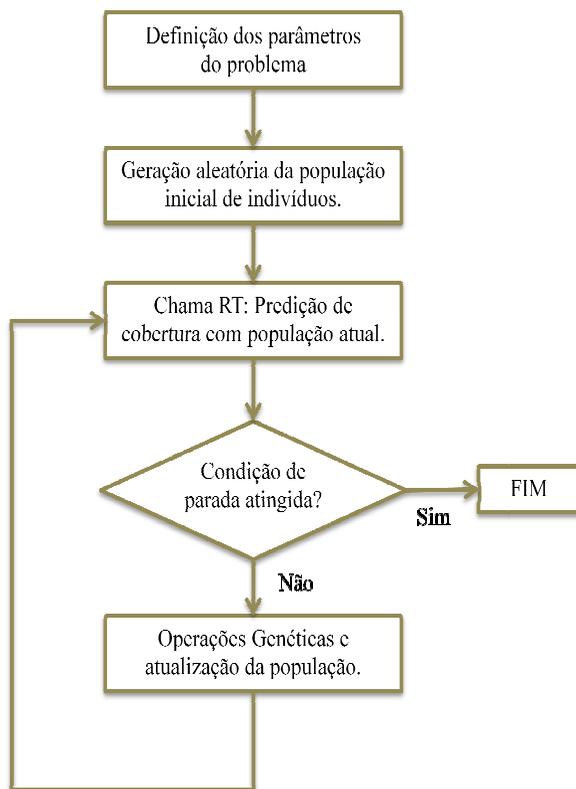


Figura 5.4 Fluxograma simplificado do modelo GA/RT.

O algoritmo é iniciado com um conjunto de possíveis “soluções”, que constituem a população inicial. Cada indivíduo da população representa uma posição da antena e seu mérito é avaliado pelo algoritmo RT. Caso o critério de parada não seja atendido, a partir desse conjunto de indivíduos são realizadas operações genéticas (seleção, cruzamento, mutação) que dão origem a uma nova população. O procedimento é repetido até que o critério de parada seja atendido.

Conforme mencionado, a função-objetivo (mérito) é determinada com base na distribuição de campos gerada pelo algoritmo RT. Embora o Traçado de Raios seja um método determinístico preciso para o cálculo de campos em ambientes interiores, para que haja confiabilidade nos resultados retornados pelo RT, é necessário que a distribuição de receptores no ambiente seja adequada para o problema em questão. Isso é feito na fase de definição de parâmetros do problema.

Alguns exemplos expostos no Capítulo 6 apresentam aplicações e resultados utilizando o modelo GA/RT.

5.4.2 RT associado ao PSO

A segunda proposta de associação de métodos, da mesma forma que a apresentada na seção anterior, utiliza o algoritmo de Traçado de Raios na avaliação de campos em ambientes interiores. Entretanto, agora, o RT é associado ao algoritmo PSO para a otimização do posicionamento da(s) antena(s).

A Figura 5.5 apresenta o fluxograma simplificado desta proposta de associação RT/PSO.

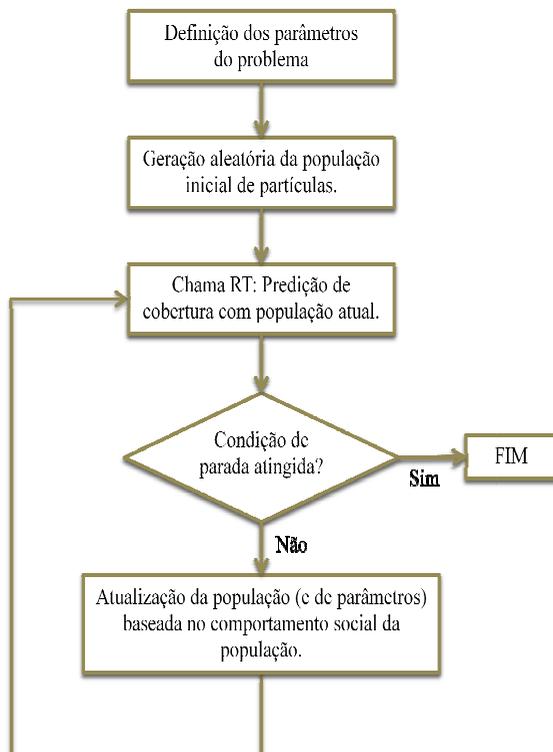


Figura 5.5 Fluxograma simplificado do modelo PSO/RT.

Conforme mencionado, nesta proposta, foram adotados algoritmos implementados em trabalhos de iniciação científica (desenvolvidos no GRUCAD ao longo do ano 2009 e 2010), complementares ao presente trabalho de doutorado.

Com relação à eficiência do Otimizador por Enxame de Partículas associado ao Traçado de Raios para solucionar problemas de otimização de antenas em ambientes interiores, a primeira versão do modelo PSO/RT desenvolvida foi avaliada por meio de comparações com o GA/RT, conforme será apresentado no Capítulo 6.

Serão apresentados, também no Capítulo 6, os resultados obtidos em problemas mais complexos, em que o objetivo é otimizar simultaneamente o posicionamento de duas antenas transmissoras em um ambiente interior, além de problemas com múltiplos objetivos. Nestes casos, dada a maior complexidade do problema, em vez do PSO clássico, foram adotados otimizadores PSO expandidos para um

algoritmo baseado no conceito de coeficientes linearmente variáveis no tempo [74]. Esta estratégia possibilita uma maior robustez da ferramenta de otimização, permitindo uma exploração mais adequada do espaço de busca. Especificamente no que se refere à variação linear dos coeficientes, esta está descrita pela equação (5.6). Foi também adotada em algumas aplicações a contribuição do centroide, descrito pelo quarto termo da equação (5.5).

Com relação ao uso do algoritmo PSO Multiobjetivo - MOPSO [78-80], trata-se de uma versão do otimizador por enxame de partículas adaptada, que possibilita a solução de problemas com múltiplos objetivos. Foi incorporado ao PSO original o conceito de dominância de Pareto. Com isso, utiliza-se um arquivo externo que salva e controla as novas soluções não dominadas ao longo das iterações. A diversidade na fronteira é mantida através de uma técnica de divisão espacial baseada nos valores da função objetivo dos membros do arquivo [79]. As equações de atualização de posição e velocidade são as mesmas da versão mono-objetivo, com exceção da seleção do líder feita a cada iteração.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentados, de forma sucinta, alguns conceitos dos dois métodos de otimização, GA e PSO, que foram adotados nas aplicações de posicionamento de antenas em ambientes interiores. Para os problemas de otimização multiobjetivo, foi adotado um algoritmo MOPSO, que utiliza a extensão do PSO mono-objetivo, adicionando-se estratégias de preservação das soluções não-dominadas, visando a busca pela fronteira Pareto-ótima. Os parâmetros que são utilizados em tais otimizadores assim como suas formulações foram brevemente expostos, não fazendo parte do escopo deste trabalho aprofundar-se no assunto sobre tais métodos de otimização.

6 ESTUDOS DE CASOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentadas as aplicações de associações dos algoritmos de otimização (que utilizam meta-heurísticas populacionais) com os algoritmos de Traçado de Raios propostos neste trabalho.

Foram realizados oito estudos de caso, divididos em quatro categorias de associações:

- i) Estudos de casos com RT 2D associado a otimizadores GA e PSO mono-objetivo;
- ii) Estudo de caso com RT 2D e otimizador PSO multiobjetivo;
- iii) Estudos de casos com RTQ3D-*indoor* e otimizador PSO mono-objetivo;
- iv) Estudos de casos com RTQ3D-*indoor* e otimizador PSO multiobjetivo

Todas as aplicações referem-se a ambientes interiores (*indoor*), em que se pretendem encontrar os melhores posicionamentos das antenas transmissoras.

6.1.1 Considerações gerais acerca das aplicações

Como toda aplicação de problemas de otimização, a “função objetivo” $F(X)$ (também conhecida como *fitness*, ou mérito) deve estar disponível na forma analítica ou de modo a ser avaliada para um dado conjunto de variáveis de entrada. Nos algoritmos de otimização aplicados nos estudos de caso, as variáveis de entrada são representadas por um único vetor X , com D elementos, sendo D a dimensão do problema.

Nos estudos de caso aqui apresentados, pretendem-se avaliar cenários específicos, em que é praticamente inviável a definição de uma função analítica que descreva, com exatidão, os fenômenos de propagação em um dado ambiente.

Com isso, faz-se necessária a avaliação da função objetivo $F(X)$ para cada X (indivíduo) que compõe a população de uma dada iteração do otimizador. O valor desta função $F(X)$, no caso, é obtido por meio de um algoritmo baseado na Técnica de Traçado de Raios. Ou seja, para cada vez que se pretende obter o valor da função objetivo (*fitness*)

associado a um dado indivíduo (X), deve-se executar o algoritmo de Traçado de Raios.

Para todos os problemas apresentados neste capítulo, tal variável X é um vetor que contém as coordenadas cartesianas do(s) posicionamento(s) da(s) antena(s) transmissora(s). Conforme mencionado, optou-se pela utilização dos métodos de otimização GA e PSO, que são meta-heurísticas populacionais e, assim, não necessitam conhecer a função na forma analítica nem o gradiente desta para o procedimento de otimização.

Os algoritmos de Traçado de Raios utilizados nessas aplicações baseiam-se no Método das Imagens, o que permite a predição de cobertura apenas em pontos/regiões de interesse. Além disso, conforme descrito nos Capítulos 3 e 4, os algoritmos RT implementados, tanto na versão 2D como na quase 3D, têm a possibilidade de calcular os campos nos ambientes interiores com maior exatidão, visto que adotam um número suficiente (limitado) de reflexões, além de utilizarem uma metodologia precisa para a determinação dos raios transmitidos através dos obstáculos.

Assim, conforme já destacado, a exemplo de outros modelos de Traçado de Raios utilizados em aplicações *indoor*, os algoritmos aqui adotados utilizam a Ótica Geométrica (GO) para o tratamento eletromagnético e desconsideram as difrações (isto é, sem uso da GTD/UTD) no cálculo dos campos. Isto, aliado às técnicas de aceleração implementadas na versão mais avançada do algoritmo RT, resulta numa diminuição significativa do tempo necessário para cada avaliação RT durante o processo de otimização.

Faz-se necessário ressaltar que as estações base, assim como as estações de usuário em sistemas de comunicação sem fio, são transceptores, ou seja, podem tanto transmitir como receber sinais de informação. No entanto, para fins de análise de cobertura, é usual tratar as estações base apenas como “transmissores”, sendo os terminais dos usuários os “receptores”, sendo estas as considerações feitas em todas as aplicações aqui apresentadas.

Nos estudos de caso apresentados neste capítulo, o objetivo (ou, um dos objetivos, no caso dos problemas multiobjetivo) é encontrar o posicionamento da(s) antena(s) transmissora(s) que resulte em uma distribuição de campos adequadamente uniforme no ambiente de interesse. Observa-se que, mesmo nas análises tridimensionais aqui efetuadas, a altura da antena transmissora foi sempre considerada fixa, ou seja, a posição varia apenas no plano xy . Dentre as alternativas

possíveis para considerar a uniformidade na distribuição de campos num dado cenário, foram estudadas as seguintes possibilidades:

- Maximização da média dos campos nos diversos pontos de recepção;
- Maximização da “área de cobertura”, por meio da minimização de número de pontos de recepção que estejam abaixo de um determinado limiar predeterminado;
- Maximização do menor campo dentre os diversos pontos de recepção.

Evitou-se o uso do critério de maximização da média. Isto porque, em algumas simulações preliminares, foram encontradas posições de transmissores que forneciam a média maximizada, porém, com possibilidades de ocorrência de um número muito grande de pontos de recepção com níveis considerados baixos (ou seja, sem a cobertura adequada), compensados por pontos com níveis elevados.

A opção de se estabelecer um limiar mínimo é utilizada no conceito de cobertura móvel celular [8], na qual um limiar é ajustado como valor mínimo de potência para que os terminais dos usuários consigam se comunicar com a estação base. Nesse caso, pretende-se minimizar o número de pontos de recepção cujos valores de potência recebida estejam abaixo de tal limiar e, conseqüentemente, maximizar a área de cobertura. Esse critério foi adotado em alguns dos estudos de caso aplicados, conforme será visto.

Nas demais aplicações de ambientes interiores com antena instalada internamente, em que se podem considerar regiões de interesse como sendo plenamente cobertas pela estação base, o último critério foi adotado. Para tais situações, não há que se falar em maximização da área de cobertura, sabendo que toda a região de interesse do ambiente interior poderá estar acima de um limiar que possibilite a comunicação. Nesses casos, a maximização do menor campo garante que qualquer estação posicionada nas regiões de interesse tenha um campo adequado. Desta forma, uma vez que a região é considerada “de interesse”, pretende-se garantir um nível de campo apropriado, mesmo para o pior caso (menor campo da “malha de recepção”, justamente o que se pretende maximizar).

Para todos os exemplos aplicados, foram utilizados ambientes interiores onde os obstáculos possuam características eletromagnéticas realistas (obtidas de referências [10, 81-83]). Nestas análises não foram utilizados materiais magnéticos, ou seja, as características eletromagnéticas destes eram plenamente descritas pelos valores da

permissividade elétrica (ϵ) e da condutividade elétrica (σ), sendo a permeabilidade magnética considerada igual a do vácuo ($\mu = \mu_0$) para estes tipos de materiais.

Conforme já demonstrado nos Capítulos 3 e 4, nestes cenários, a consideração de reflexões até segunda ordem garante bons resultados. Efetuou-se, entretanto, uma análise adicional [84], para se avaliar o custo-benefício de se, eventualmente, considerar reflexões de maior ordem. Para isso, foi escolhida uma situação em que a influência (contribuição) dos campos refletidos é significativa. Efetuou-se um estudo posicionando uma “rota de avaliação de campos” em um corredor de um dos ambientes analisados (e que possui características semelhantes às dos demais ambientes estudados), conforme indicado na Figura 6.1. O material considerado nos obstáculos foi o concreto [10], para um frequência de 1GHz, o qual é um material com perdas.

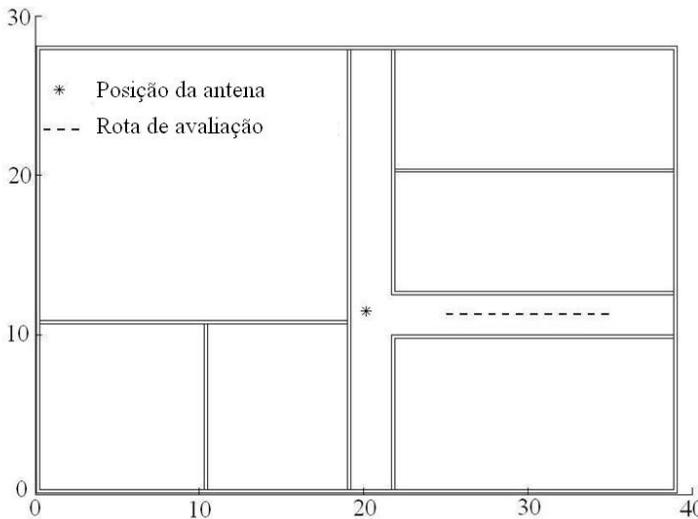


Figura 6.1 – Cenário simulado com detalhe da rota de avaliação dos campos.

Como o tempo computacional nas simulações utilizando a associação dos métodos GA/RT e PSO/RT está concentrado nas diversas avaliações do RT, esta análise propõe avaliar o impacto de considerar um número máximo de reflexões ainda maior. A Figura 6.2 e a Tabela 6.1 apresentam tal análise.

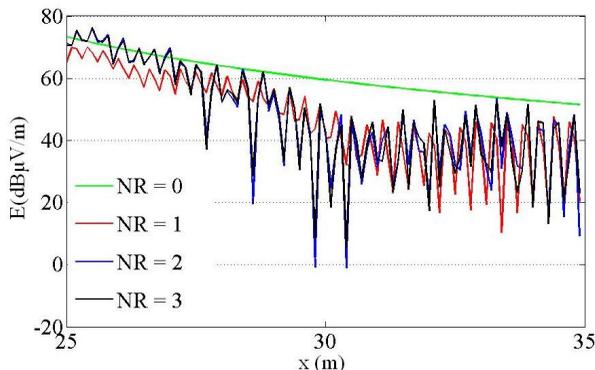


Figura 6.2 – Comparação entre os campos avaliados considerando número máximo de reflexões NR=0, 1, 2 e 3 [84].

Tabela 6.1: Comparações computacionais [84].

NR	EQM (%)	Tempo de cálculo (s)
0	693,25	0,18
1	64,19	3,23
2	2,79	17,67
3	0	441,89

A Tabela 6.1 apresenta o erro quadrático médio (EQM) quando considerados os valores obtidos na rota de avaliações de campo, tendo como referência o número máximo de reflexões igual a três (NR = 3). Foi realizada simulação adicional considerando um número máximo de reflexões igual a 4 (NR = 4), tendo sido observado que a diferença de valores (“EQM”) entre NR = 3 e NR = 4 é menor que 1%. Por este motivo, a tabela apresentou apenas até NR = 3 e este foi adotado como referência.

Ressalta-se que esta análise foi realizada antes de se implementar algumas técnicas de aceleração no algoritmo de Traçado de Raios. No entanto, a proporção entre os tempos computacionais tendem a permanecer as mesmas, mesmo com a implementação destas técnicas.

Verifica-se que mesmo para o “caso crítico” de um corredor, o EQM apresentado na consideração NR = 2 é de 2,79%, sendo que o cálculo é cerca de 25 vezes mais rápido em relação a NR = 3. Por outro lado, observa-se que seria inadequado considerar o número máximo de reflexões igual a um (NR = 1), já que o EQM extrapola os 60% em relação ao valor de referência. Com base em tal análise, para o ambiente analisado, o número máximo de reflexões utilizado para todos os

estudos de caso que serão apresentados adiante foi igual a dois ($NR = 2$). Isto confirma o que já havia sido observado nas avaliações apresentadas nos Capítulos 3 e 4, válidas para ambientes interiores com características realistas de materiais (concreto, madeira, tijolo, etc.).

Nos casos de análises considerando ambientes hipotéticos contendo materiais perfeitamente condutores, é possível concluir que um número maior de reflexões deve ser considerado nos cálculos, uma vez que não há perdas no momento da reflexão em condutores perfeitos, e, assim, as reflexões de maior ordem representariam uma contribuição importante no cálculo dos campos.

6.2 ESTUDOS DE CASOS COM RT 2D ASSOCIADO A OTIMIZADORES GA E PSO MONO-OBJETIVO

6.2.1 Primeiro estudo de caso

Tanto o Algoritmo Genético como o PSO usados no presente trabalho foram validados nos trabalhos de seus autores [66, 72, 78, 85]. No entanto, os testes de algoritmos de otimização são geralmente realizados utilizando-se funções clássicas, sendo testados os seus desempenhos nessas condições.

Com a associação de tais ferramentas de otimização a algoritmos de Traçado de Raios especificamente desenvolvidos neste trabalho, criam-se novas propostas de aplicação. Neste sentido, como primeiro exemplo de aplicação, pretende-se ratificar o bom desempenho dos otimizadores também nas aplicações pretendidas, quando associados ao algoritmo RT.

Nesta seção, será apresentado um estudo de caso de um cenário simples, descrito na Figura 6.3, composto por quatro paredes contendo uma região interna e uma externa. O intuito deste estudo de caso é comparar as associações propostas GA/RT e PSO/RT com os resultados apresentados em [34], em que um Algoritmo Genético é associado a uma técnica para cálculo de campos baseada no método TLM (*Transmission Line Method*), que também foi desenvolvida em um trabalho de doutorado da Universidade Federal de Santa Catarina [34].

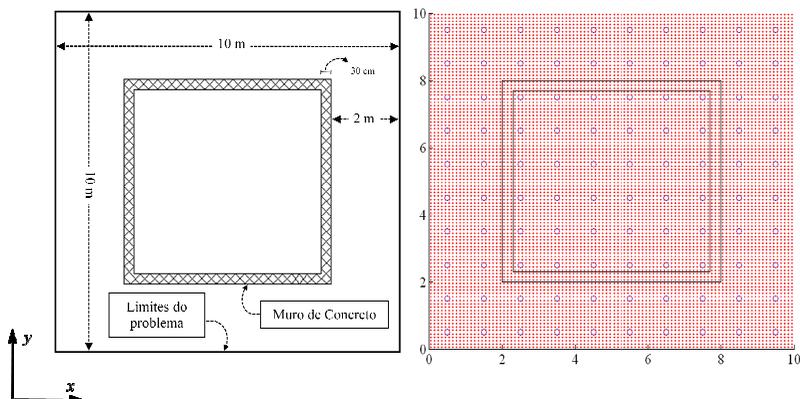


Figura 6.3 (a) Descrição básica do cenário; (b) Distribuição dos receptores com detalhe da região obtida de posicionamento “ótimo” dos transmissores.

Neste ambiente, o objetivo é encontrar o posicionamento ótimo da antena transmissora (omnidirecional) de modo que a distribuição de campos fique o mais uniforme possível. Aproveitou-se a vantagem do RT de não necessitar efetuar os cálculos dos campos em toda a área do cenário, e sim distribuir os pontos uniformemente em quantitativo adequado ao que se pretende.

No caso do TLM, por se tratar de um método numérico, para qualquer ambiente, uma malha suficientemente fina (pelo menos 10 células por comprimento de onda) é utilizada para garantir a confiabilidade no cálculo dos campos. A Figura 6.3b apresenta a distribuição dos receptores utilizados no RT (círculos azuis) e no TLM (pontos em vermelho).

O exemplo [34] utiliza como fonte uma excitação sinusoidal com frequência de 300 MHz. Neste ponto, é interessante observar novamente que, para frequências mais baixas, nas quais o comprimento de onda é grande em relação aos obstáculos, os métodos assintóticos (como é o caso da Ótica Geométrica, utilizada para o cálculo dos campos no RT) são menos confiáveis. Por outro lado, métodos numéricos como o TLM tornam-se computacionalmente custosos (e muitas vezes inviáveis) quando a frequência é alta e o ambiente a ser analisado é grande. Já no exemplo em questão, ambos os métodos podem ser adotados, sem maiores comprometimentos quanto à exatidão e ao tempo de processamento.

A tabela 6.2 apresenta os parâmetros de simulação utilizados, assim como as posições encontradas em cada associação.

Tabela 6.2: Comparações computacionais.

Modelo	Nº de indivíduos ou partículas	Nº de total de gerações ou iterações	Nº para chegar ao ótimo	Ponto ótimo (x; y)
GA/TLM [34]	42	100	43	(5,5; 5,6)
GA/RT	42	100	29	(5,5; 4,8)
PSO/RT	21	200	80	(5,0; 5,5)

De acordo com algumas simulações preliminares, percebeu-se que seria mais adequado, para o problema em análise, reduzir pela metade o tamanho da população no PSO/RT, aumentando, em contrapartida, o número de iterações para 200. Com isso, optou-se em utilizar tais parâmetros, mantendo o número de avaliações RT equivalente.

O objetivo geral que é utilizado nesses problemas é o mesmo: encontrar o posicionamento do transmissor de modo a suprir a cobertura radioelétrica da melhor forma possível. Em ambas as associações propostas, GA/RT e PSO/RT, os posicionamentos do transmissor obtidos encontravam-se, como esperado, na região central do cenário.

6.2.2 Segundo estudo de caso

Um algoritmo utilizando a associação GA/RT foi inicialmente aplicado [85, 86] no ambiente *indoor* apresentado na Figura 6.4. Foi considerado uma antena omnidirecional de um sistema de comunicação sem fio hipotético operando na frequência de 1 GHz, sendo que a “região de interesse” era toda a área do ambiente. Uma “malha” de recepção foi distribuída uniformemente em todo o ambiente, com 36 pontos por metro quadrado.

Com isso, e considerando-se que ainda não havia sido implementada a técnica de aceleração SVP no algoritmo de Traçado de Raios, o tempo computacional exigido limitou o número de avaliações a ser utilizada nas simulações em 100, com o número de indivíduos igual a vinte ($n_{indiv} = 20$) e o número de gerações igual a cinco ($n_{gen} = 5$).

Para o GA, foi adotada uma probabilidade de cruzamento igual a 100% e uma probabilidade de mutação igual a 5%.

A Figura 6.4 apresenta a melhor posição da estação base encontrada após as 100 avaliações RT, com o mapeamento dos campos nos diversos pontos de recepção.

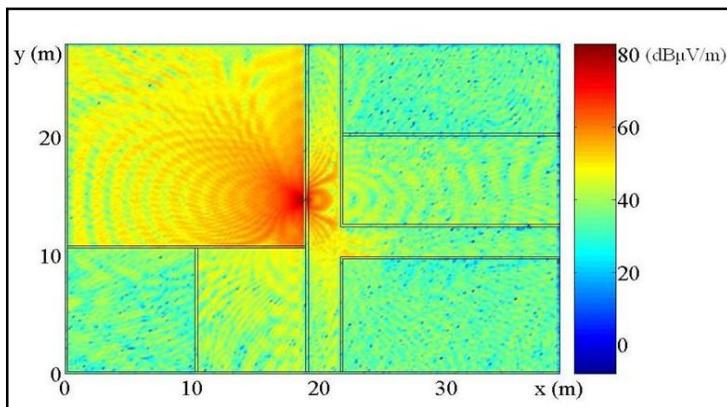


Figura 6.4 – Mapeamento da distribuição de campos considerando a melhor posição da ERB encontrada após as 100 avaliações RT.

O tempo computacional para se chegar a este resultado foi de 49h 47min e 58 s, utilizando-se um microcomputador com processador Intel Dual-Core of 1,6 GHz, com 1 GB de memória RAM e disco rígido de 40 GB.

Posteriormente à publicação de artigos contendo estes resultados obtidos [85, 86], houve a publicação [87], em que os autores referenciam o artigo original, sendo que tais autores chegaram aos mesmos resultados, porém, utilizando-se um otimizador PSO (em vez de GA) associado a um algoritmo de Traçado de Raios.

6.2.3 Terceiro estudo de caso

Neste exemplo, o algoritmo utilizando a associação GA/RT foi aplicado considerando um cenário real, onde se pretende encontrar o posicionamento adequado de um transceptor de radiação restrita (*Access Point* – AP). Trata-se de uma rede local de computadores (*Wireless Local Area Network* – WLAN) que utiliza a tecnologia padronizada IEEE 802.11b/g/n. Os equipamentos que utilizam tal padrão operam na faixa de 2,4 GHz, sendo esta a frequência considerada nas simulações. Foram consideradas as especificações técnicas de um AP real, com potência de 104 mW e antena (acoplada ao equipamento) com ganho de 2,0 dBi (omnidirecional no plano de análise).

Embora haja outros aspectos que influenciam no desempenho do sistema, como o tipo de modulação e o número de usuários que utilizam simultaneamente a WLAN, estes não foram considerados na análise.

Outros aspectos que influenciam na Qualidade de Serviço (*Quality of Service – QoS*) dos sistemas digitais seriam, por exemplo, o perfil de retardos, proveniente do típico canal com características de multipercurso, e a razão Sinal/Interferência, que tem influência significativa sobretudo em sistemas que utilizam compartilhamento de frequências.

A função objetivo (mérito) considerada neste exemplo avalia os níveis de campo nos diversos pontos de recepção, ou, equivalentemente, a distribuição de campos na região de interesse, por ser este o principal parâmetro no quesito “cobertura radioelétrica” na maioria dos sistemas sem fio.

O ambiente *indoor* (modelado em duas dimensões) escolhido para a avaliação refere-se às instalações do GRUCAD, onde a WLAN encontra-se atualmente instalada. Na representação do cenário, foram considerados como obstáculos apenas as paredes, portas e janelas localizadas no próprio ambiente, sendo desprezadas as influências da mobília bem como dos obstáculos existentes fora da referida edificação.

A Figura 6.5 apresenta o cenário avaliado, com o delineamento das regiões de interesse, que são os locais onde os computadores portáteis que utilizam a rede são habitualmente posicionados.

Como restrição das variáveis do problema de otimização em análise, foi considerada toda a região compreendida dentro do GRUCAD como sendo a área “permitida” para o posicionamento da antena.

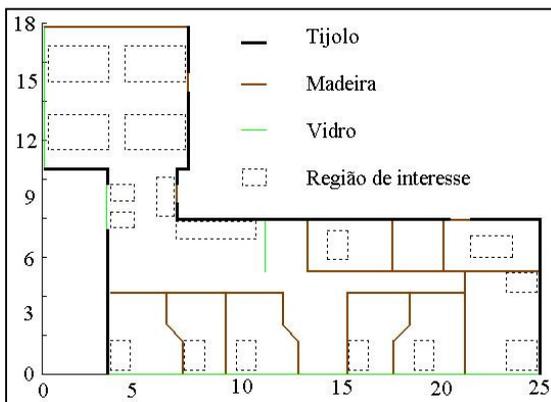


Figura 6.5 – Ambiente 2D avaliado – Instalações do GRUCAD.

Para modelar os materiais considerados no ambiente, foram utilizados os parâmetros adotados em [10, 81] para obter as características eletromagnéticas destes materiais, válidas para a faixa de 2,4 GHz. A forma de levar em consideração as perdas dos materiais por meio de uma permissividade relativa complexa foi utilizada conforme a equação abaixo:

$$\varepsilon_{rc} = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} \quad (6.1)$$

onde ε_r é a permissividade relativa do material, σ é a condutividade do material, ε_0 é a permissividade do ar ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m), e $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular, sendo f a frequência de operação.

A Tabela 6.3 apresenta as características dos materiais considerados neste estudo de caso.

Tabela 6.3: Tipos de Materiais Utilizados no Modelo

Material	ε_r	Espessura (cm)
Ar	1,0	∞
Tijolo	8,5 - j0,9	15
Madeira	3,0	5
Vidro	2,3	0,5

Foram consideradas até duas reflexões no algoritmo de Traçado de Raios utilizado para o cálculo de campos. Para cada avaliação do RT, foi adotada uma resolução de 36 pontos de recepção por metro quadrado [85, 86], considerando-se apenas as regiões de interesse, delimitadas por linhas pontilhadas, conforme indicado na Figura 6.5. Isso significa que durante o procedimento de otimização não foi necessário o cálculo de campos em regiões onde a WLAN não é utilizada.

No procedimento de otimização, para o GA, foi utilizada a variável $X = [x, y]$ para representar um indivíduo, que é uma posição do AP dentro do cenário 2D considerado. Foi utilizada uma população inicial aleatória de 20 indivíduos. Cada indivíduo representa uma solução candidata e possui um valor da função objetivo $F(X)$ (mérito) associado. A função objetivo $F(X)$ para uma dada posição/indivíduo X é obtida por meio do Algoritmo de Traçado de Raios bidimensional, $F(X) = RT2D(X)$. Ou seja, tal algoritmo retorna o valor do *fitness* (mérito) para uma dada variável/indivíduo X . Assim, o *fitness*, que se pretende maximizar, é o nível de campo no pior ponto de recepção da malha considerada para a posição X do transmissor. O número de

gerações utilizado foi 5. A probabilidade de cruzamento escolhida foi 100%, sendo que a probabilidade de mutação foi 5%.

A Figura 6.6 apresenta os indivíduos das populações das três últimas gerações, bem como a indicação do ponto (indivíduo) que obteve o melhor *fitness*, ou seja, o melhor valor retornado da função objetivo obtido pelo algoritmo de Traçado de Raios. Este ponto foi encontrado na 3ª geração. Este fato sugere que o algoritmo “convergiu” já nas primeiras gerações. Por meio da técnica de elitismo global, o algoritmo preservou o melhor indivíduo até a última geração.

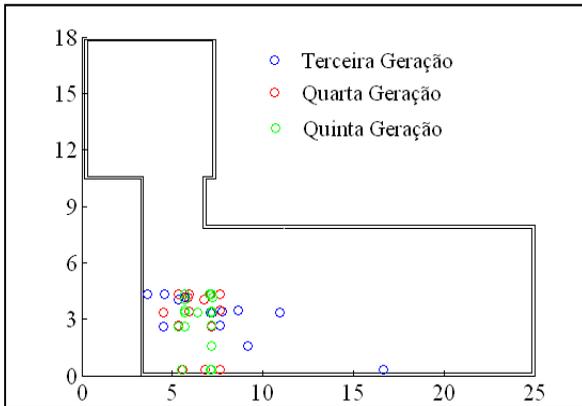


Figura 6.6 – Populações de indivíduos obtidos nas três últimas gerações.

Durante as 5 gerações, o tempo total de processamento foi de 22h 02min 20seg, utilizando-se um microcomputador com processador Intel Dual-Core 1.6 GHz, com memória RAM de 1 GB e *Hard Disk* de 40 GB.

A posição do AP que apresentou o melhor valor da função objetivo (mérito) foi em $X^* = [5,3118 \ 4,0579]$ (m). Para esta posição, utilizou-se o algoritmo RT isoladamente para se obter a cobertura, considerando-se, desta vez, toda a região e não apenas as de interesse. A ilustração desta distribuição dos campos está apresentada na Figura 6.7, na qual o campo elétrico, em $\text{dB}\mu\text{V/m}$, é representado pelo mapeamento de cores. Neste mapeamento é possível ter uma noção qualitativa da distribuição de campos, mostrando-se que o modelo convergiu para um posicionamento do AP tal que as áreas de interesse não ficam em “regiões de sobra” críticas.

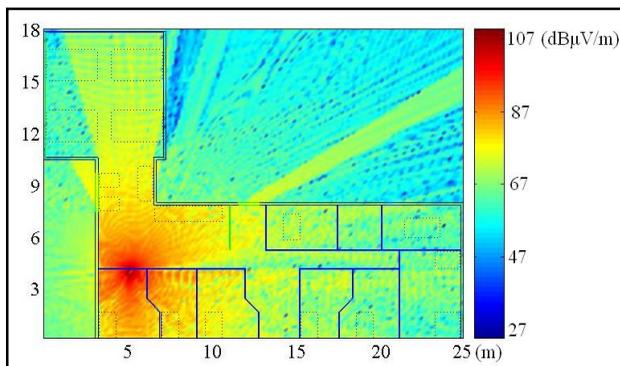


Figura 6.7 – Distribuição de campos com o AP posicionado no melhor ponto encontrado.

Neste mesmo cenário, efetuou-se uma segunda análise, desta vez aplicando-se também a combinação PSO/RT, ou seja, o otimizador por enxame de partículas (PSO) associado ao mesmo algoritmo do Traçado de Raios bidimensional (RT 2D). No otimizador PSO, foram adotadas as equações (5.3) e (5.4) com a aplicação de coeficientes de aceleração clássicos, constantes e iguais a dois ($c_1 = c_2 = 2$), sendo que o peso de inércia foi fixado em zero ($w = 0$).

Para fins de comparações desta associação PSO/RT com o GA/RT, em ambos os casos foi utilizado um número menor de pontos de recepção (dentro das regiões de interesse), visando diminuir o tempo de cada avaliação RT. Isso permitiu um número mais adequado de iterações/gerações nas simulações. Para o GA/RT, foi utilizada uma probabilidade de cruzamento igual a 90% e uma probabilidade de mutação igual a 5%.

Com o objetivo de efetuar uma comparação equânime entre os otimizadores, foi estabelecido nas simulações o mesmo número de indivíduos (igual a 20) e o mesmo número de iterações/gerações (igual a 70) para cada algoritmo.

Assim, para cada processo de otimização, realizaram-se 1400 avaliações da função objetivo, ou seja, 1400 execuções do algoritmo RT 2D. Conforme já observado, nestes estudos de caso, a maior parte do tempo computacional é gasta durante as avaliações do RT. Desta forma, um mesmo número de avaliações RT implica em, aproximadamente, o mesmo tempo de processamento para ambas as associações PSO/RT ou GA/RT.

A Figura 6.8 apresenta o mérito (*fitness*) em função das avaliações RT. Os dados foram obtidos por meio de uma média de cinco processos de otimização independentes realizados utilizando cada algoritmo.

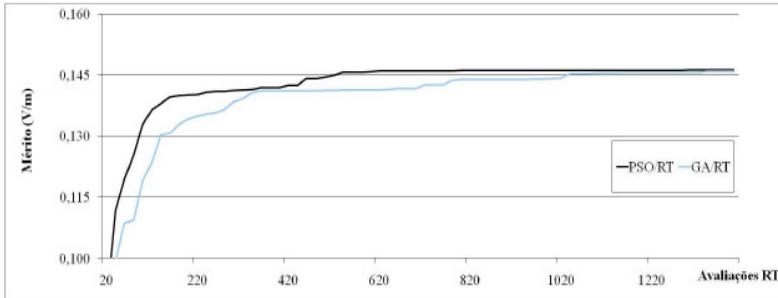


Figura 6.8 – Mérito em função do número de avaliações RT durante os processos de otimização PSO/RT e GA/RT.

Mediante tais resultados, percebe-se que, no problema analisado, a convergência da associação PSO/RT foi um pouco mais rápida em relação à GA/RT.

A Figura 6.9 apresenta o mapeamento do campo elétrico para a posição da antena transmissora posicionada no melhor ponto encontrado, que foi o mesmo para ambas as associações. Embora o ambiente seja o mesmo que o apresentado na Figura 6.5, há uma diferença no melhor ponto da antena encontrado em virtude, essencialmente, de dois fatores:

- A distribuição de receptores é distinta (mais restrita) nas regiões de interesse;
- Na última simulação utilizando os otimizadores, foram introduzidas restrições (por meio de penalizações) para posições do transmissor próximas aos obstáculos, haja vista que a formulação RT não garante confiabilidade de campos próximos, que, no caso da frequência 2.4 GHz, representa poucos centímetros de distância.

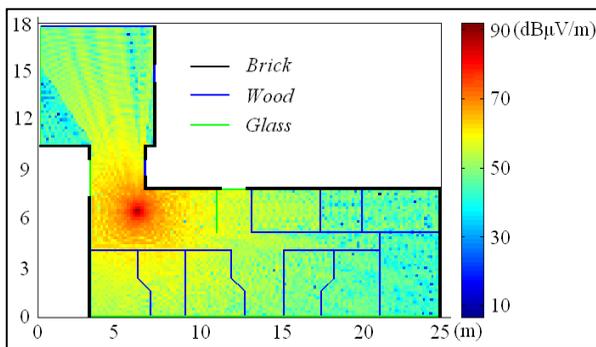


Figura 6.9 – Distribuição de campos com o AP posicionado no melhor ponto encontrado.

Ainda para o mesmo cenário, foi utilizada uma segunda versão implementada do algoritmo PSO [88] associado ao RT 2D, em que o otimizador adota as equações (5.5) e (5.6), na qual os coeficientes de aceleração (incluindo um terceiro coeficiente correspondente ao “centroide”), bem como o peso de inércia variam linearmente ao longo do processo de otimização. Os valores iniciais e finais destes coeficientes foram atribuídos conforme Tabela 6.4. Tais valores foram obtidos com base em testes realizados em diversas funções clássicas.

Tabela 6.4: Limites dos parâmetros

Parâmetro	Inicial	Final
c_1	3,8	0,21
c_2	0,51	1,4
c_3	1,2	1,5
w	0,95	0,24

Embora tenha sido utilizado o mesmo cenário para esta simulação, desta vez o objetivo foi encontrar o posicionamento de duas antenas transmissoras, referentes aos APs a serem posicionados no ambiente. Assim, a variável da função objetivo agora é um vetor com 4 elementos $X = [x_{t1}, x_{t2}, y_{t1}, y_{t2}]$, que representam as coordenadas cartesianas das antenas transmissoras. Por se tratar de uma WLAN, com APs funcionando independentemente, cada receptor posicionado em alguma das regiões de interesse definidas na Figura 6.5 irá optar pelo transceptor que fornece maior nível. Com isso, a distribuição de campos nos pontos de recepção avaliada pelo RT retorna um vetor contendo o conjunto de valores/elemento definidos pelo transceptor que fornece o

maior dos níveis, ou seja, em cada ponto o receptor “escolhe” o transmissor mais adequado para atender ao respectivo ponto, formando um elemento do vetor. Por sua vez, o valor retornado pelo RT 2D ao PSO após cada avaliação $F(X) = RT2D(X)$ é o campo obtido no pior ponto de recepção (isto é, elemento do vetor que contém o menor módulo). Da mesma forma que nos outros exemplos, o otimizador encontra as posições das duas antenas transmissoras (em conjunto) pelas quais tal mérito é maximizado, ou seja, posições de antenas que fornecem o melhor *fitness*.

A Figura 6.10 apresenta a convergência das posições das antenas durante o processo de otimização.

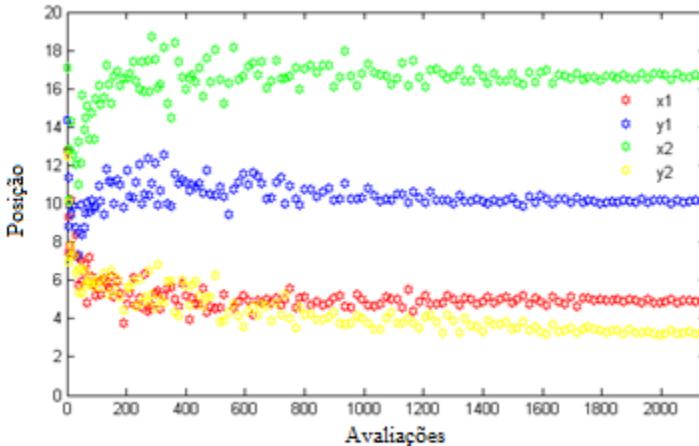


Figura 6.10 – Convergência da melhor partícula (*gbest*) para as posições ótimas.

Na Figura 6.11, apresenta-se o mapeamento dos campos em todo o cenário com as antenas posicionadas nos pontos que retornaram o maior valor da função objetivo (melhor mérito).

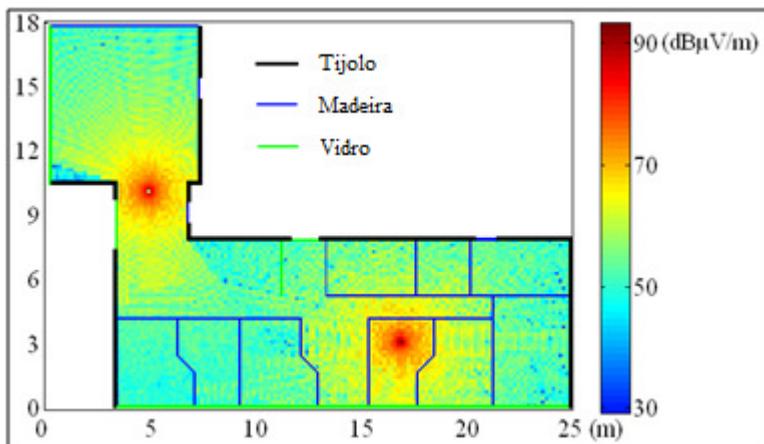


Figura 6.11 – Distribuição de campos com os APs posicionados nos melhores pontos encontrados.

Nesta última análise, foi realizada ainda uma avaliação estatística para se verificar a confiabilidade dos pontos encontrados. Foi utilizado o conceito de Intervalo de Confiança (IC). Para tal estimativa do intervalo de confiança, a equação (6.2) [88] foi utilizada.

$$CI(x, 90\%) = \bar{x} \pm t_{90\%} * \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.2)$$

onde \bar{x} é um elemento do vetor X , que representa a média das posições obtidas após n simulações independentes, s é o desvio padrão e $t_{90\%} = 2,093$ [88] é o valor crítico do intervalo de confiança de 90% para uma distribuição de probabilidade t .

Foram realizadas 20 simulações independentes para a determinação do intervalo de confiança. Para cada simulação, a população era composta por 20 partículas e o número máximo de iterações, definido como critério de parada, foi estipulado em cem ($it_Max = 100$). Assim, foi determinado o intervalo de confiança (90%) do posicionamento das antenas como sendo: $CI(\vec{X}, 90\%) = (4,84; 10,19; 16,77; 3,18) + (\pm 0,01; \pm 0,02; \pm 0,03; \pm 0,03)$.

O tempo de processamento para cada simulação foi de 6h50min, usando um computador com processador Intel Core 2 Due E7400 @ 2,8 GHz, 4GB de memória RAM e disco rígido de 500 GB.

6.3 ESTUDO DE CASO COM RT 2D E OTIMIZADOR PSO MULTIOBJETIVO

6.3.1 Quarto estudo de caso

Neste estudo de caso, pretende-se otimizar o posicionamento de um *bloqueador de sinais de radiocomunicações* em um presídio, definido como sendo um ambiente *indoor*.

De acordo o Anexo à Resolução n.º 308/02 [89] um bloqueador de sinais de radiocomunicações (BSR) é um “Equipamento de Radiação Restrita destinado a bloquear sinais de radiocomunicações”. Em Sistemas Móveis Pessoais - SMP (celular), o BSR é um dispositivo que, intencionalmente, busca interferir e desabilitar a operação normal de estações móveis em uma determinada área, entretanto, sem causar interferência no sistema celular nas vizinhanças desta área.

Optou-se por utilizar uma situação real desafiadora. Trata-se de um complexo Penitenciário localizado em Florianópolis, em uma região densamente habitada, onde a instalação de um BSR poderia gerar transtornos aos usuários do SMP posicionados no entorno deste presídio. Apesar do caráter prático observado, devido às simplificações consideradas, este estudo não tem a pretensão de fornecer uma solução para o exemplo em análise.

Pode-se caracterizar o planejamento de BSR como um problema de dois objetivos conflitantes. No estudo de caso em tela, o problema consiste em otimizar a posição de quatro antenas de um sistema bloqueador de celulares. Para solucionar este problema, utilizou-se um algoritmo que combina um otimizador por enxame de partículas multiobjetivo (MOPSO) clássico [76] com o algoritmo de Traçado de Raios bidimensional (RT 2D). Cada indivíduo da população corrente no MOPSO é composto por posições cartesianas relativas às antenas que devem ser posicionadas no cenário em análise [79].

A Figura 6.12 apresenta a imagem de satélite com indicação do local da Estação Rádio Base (ERB), posicionada a cerca de 430 m do presídio. Nesta figura foi delineada a área de estudo, contendo delimitações das regiões de interesse – em vermelho o local em que se deseja degradar o sinal com o BSR, sendo as áreas indicadas em azul e amarelo aquelas em que se pretende preservar o sinal fornecido pela ERB.

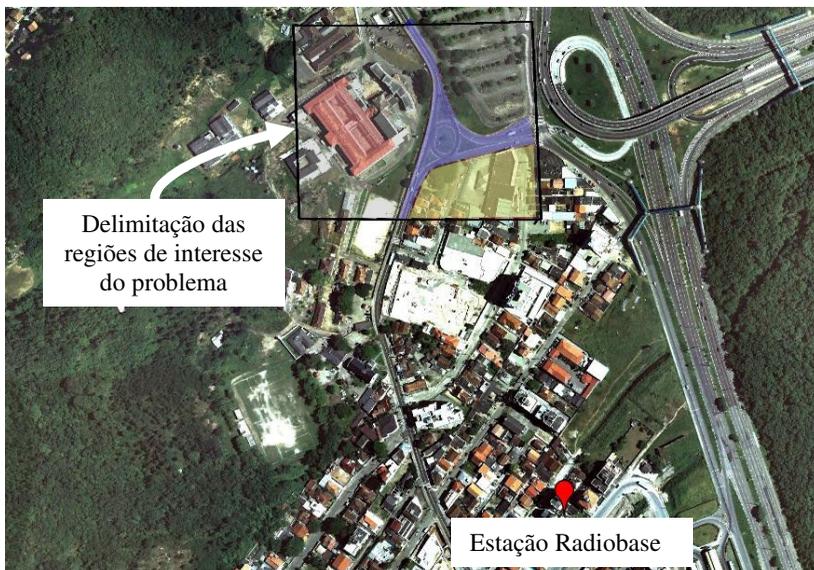


Figura 6.12 – Imagem de satélite com indicação do local da ERB e delimitação da área de estudo e das regiões de interesse.

A Figura 6.13 apresenta a distribuição dos pontos de recepção dentro nas áreas de interesse.

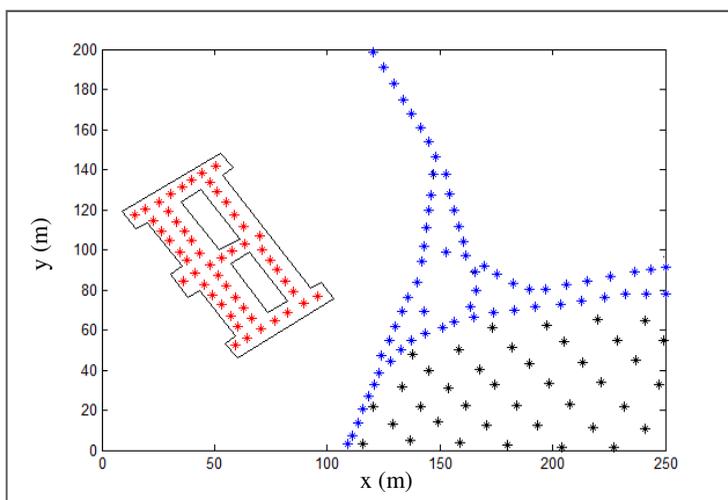


Figura 6.13 – Simplificação do problema com indicação de pontos a serem bloqueados (em vermelho) e não bloqueados (em azul e preto).

Assim como ocorre nas aplicações mono-objetivo, o algoritmo de Traçado de Raios é chamado para a avaliação de mérito dos indivíduos. Entretanto, neste estudo de caso, o RT 2D calcula os valores da razão sinal/interferência, ou portadora/interferência (*Carrier/Interference - C/I*), para cada receptor posicionado no cenário.

Sabe-se que em um sistema celular, níveis de interferência incidem nos receptores, provenientes de diversas fontes, tais como células cocanais. Por exemplo, no caso de sistemas que utilizam técnicas de espalhamento espectral (p. ex.: W-CDMA), a quantidade de usuários conectados simultaneamente influencia diretamente no nível de interferência percebida por cada receptor. Entretanto, na presente análise, apenas o BSR será considerado para compor o nível de interferência ou ruído. Com isso, em alguns pontos deste problema hipotético, serão observados níveis de razão sinal/interferência muito acima dos encontrados na prática, especialmente nas regiões afastadas das antenas do BSR.

A média aritmética dos valores da razão sinal/interferência (*C/I*) é determinada para regiões de interesse específicas, de forma que dois objetivos foram definidos: minimizar a média das *C/I* das regiões onde o sinal deve ser bloqueado e maximizar a média das *C/I* das regiões onde o sinal deve ser preservado. O segundo objetivo é transformado em um problema de minimização através de uma simples troca de sinal.

Para a verificação do desempenho da associação do MOPSO/RT2D, a representação simplificada, descrita na Figura 6.13 foi adotada para análise. Assim conforme mencionado, pretende-se posicionar quatro antenas do sistema bloqueador, de forma que o sinal seja interferido nas regiões internas do presídio e simultaneamente preservado nas regiões externas.

O sinal a ser bloqueado é gerado pela Estação Radiobase – ERB indicada na Figura 6.12, operando em 1800 MHz, cuja cobertura é estimada utilizando o simulador RT2D uma única vez no início do processo. Para a simplificação do problema, não foram considerados obstáculos exteriores no percurso da ERB até o ambiente *indoor*. Como bloqueador, considerou-se um sistema também operando em 1800MHz, com antenas de ganho igual a 2,15 dBi (omnidirecionais no plano de análise), com 500 mW de potência de transmissão cada. No algoritmo MOPSO, a população foi composta por 40 partículas e com 750 iterações estabelecidas como critério de parada.

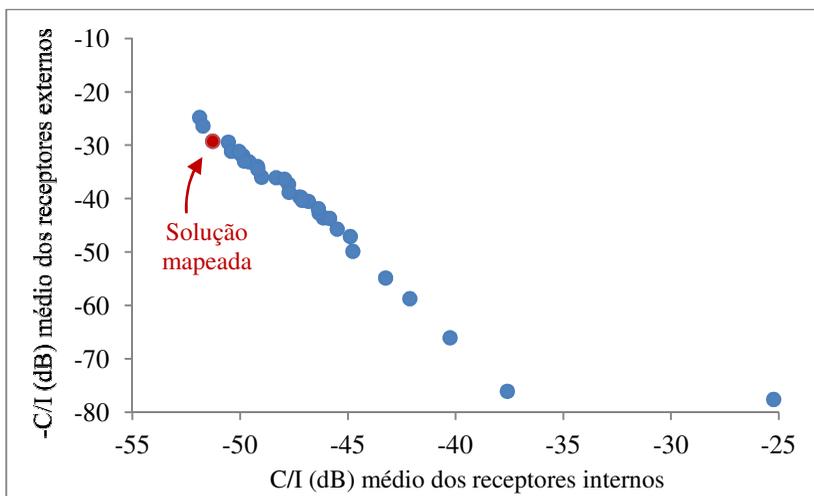


Figura 6.14 – Soluções não dominadas.

A Figura 6.14 mostra a melhor fronteira de Pareto estimada pelo MOPSO ao longo dos testes realizados, constituída por 33 soluções não dominadas. Utilizando a configuração disposta pela solução indicada em vermelho, obteve-se o mapeamento apresentado na Figura 6.15. Este mapa de cores representa os valores da razão Sinal/Interferência, em dB, de pontos de recepção agora espalhados uniformemente no cenário.

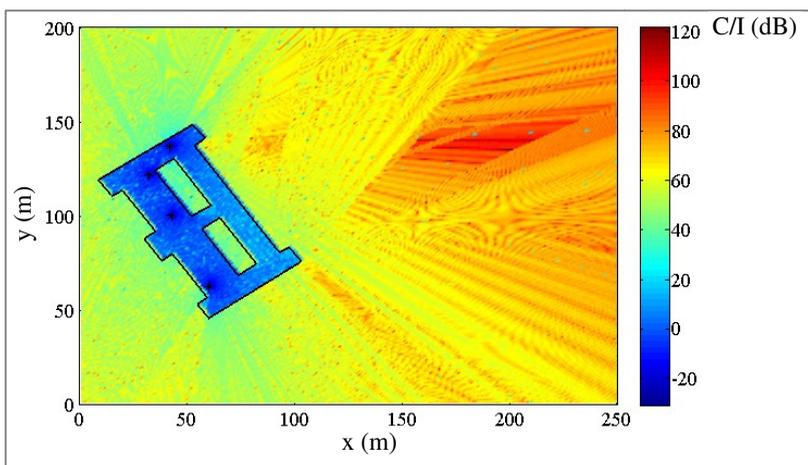


Figura 6.15 – Distribuição de valores da razão C/I em todo cenário.

Com a solução escolhida, percebe-se visualmente que a razão Sinal/Interferência é baixa nas áreas onde se pretende efetuar o bloqueio do sistema, sendo alta nas áreas externa ao ambiente.

6.4 ESTUDOS DE CASOS COM RTQ3D-*INDOOR* E O OTIMIZADOR PSO MONO-OBJETIVO

6.4.1 Quinto estudo de caso

Neste estudo de caso, foi utilizado o otimizador por enxame de partículas (PSO) dinâmico, com coeficientes que variam linearmente e adotando-se o componente “centroide”.

Para função objetivo (mérito) a ser avaliada para cada partícula, introduziu-se o algoritmo de Traçado de Raios quase 3D para aplicações em ambientes interiores e que foi desenvolvido neste trabalho (RTQ3D-*indoor*). Com a associação PSO/RTQ3D-*indoor*, foi possível prever a distribuição de potências recebidas em cada avaliação da função objetivo, considerando efeitos tridimensionais e, assim, encontrando-se com maior exatidão o posicionamento da antena transmissora no ambiente.

Foi escolhido para este estudo de caso o cenário cuja planta baixa encontra-se apresentada na Figura 6.16. Este cenário possui 60 m por 45 m, com 3 m de altura do teto em relação ao solo.

Trata-se de um ambiente *indoor* já analisado em [82]. Porém, o estudo apresentado em tal referência utilizava um número finito de posições possíveis para alocação dos transmissores, ou seja, o problema era reduzido a um espaço discreto. Naquele caso, os autores utilizaram um Algoritmo Genético binário integrado a um algoritmo de Traçado de Raios SBR.

O presente estudo de caso, entretanto, refere-se a um problema com espaço de busca contínuo (real), em que é permitida a alocação da antena transmissora em qualquer posição dentro do ambiente e não apenas em pontos específicos. Para os pontos de recepção, foi utilizado o mesmo conjunto de receptores, distribuídos em todos os cômodos do ambiente em análise, conforme círculos indicados na Figura 6.16. As antenas de todos os receptores foram consideradas como estando a 1,5 m de altura do solo.

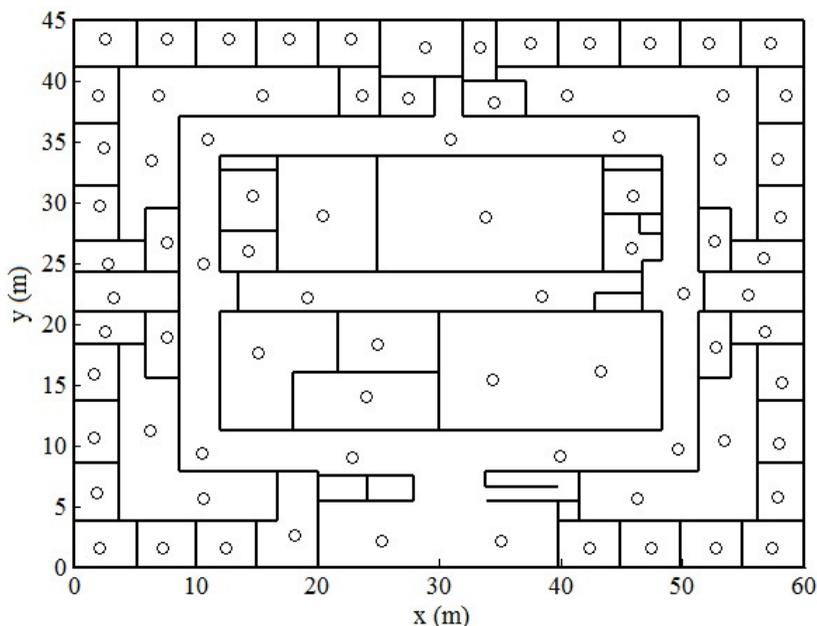


Figura 6.16 – Planta baixa do cenário tridimensional avaliado, com detalhes dos pontos de recepção considerados.

As variáveis do problema foram assumidas como sendo as coordenadas x , y , ou seja, permitindo variações da antena transmissora em um espaço contínuo compreendido em todo plano horizontal dentro do ambiente. Para o ponto de transmissão, foi utilizada nas simulações uma antena omnidirecional do tipo monopolo de quarto de onda verticalmente polarizada e afixada ao teto (3 m em relação ao solo). Ou seja, a altura da antena transmissora foi considerada fixa.

Ao contrário dos estudos de caso iniciais, em que os campos nos pontos de recepção eram avaliados, no presente estudo, foi calculada a potência recebida por um dipolo de meia-onda verticalmente polarizado posicionado em cada ponto de recepção. Neste caso, por estar sendo utilizado um algoritmo de traçado de raios quase 3D, considera-se não só o diagrama horizontal, mas também o diagrama vertical das antenas, bem como os raios refletidos (até segunda ordem) no teto e no solo, evitando-se, assim, erros significativos que poderiam ser gerados se um método 2D fosse utilizado.

A frequência de operação utilizada na análise foi de 1800 MHz, sendo que a potência de transmissão foi de 2 W, com o objetivo de

simular uma femtocélula de um Sistema Móvel Pessoal, atendendo ao ambiente *indoor* em questão. Da mesma forma que em [82], as propriedades eletromagnéticas dos obstáculos (paredes) foram: $\epsilon_r = 2$, $\sigma = 1,95 \times 10^{-3}$ S/m, com a espessura das paredes sendo de 4,1667 cm. Estas características eletromagnéticas também foram consideradas para modelar o teto e do solo, porém, com espessura de 35 cm.

Foram realizados 10 processos de otimização independentes, com 140 iterações e uma população de 20 partículas, chegando-se, em oito casos, ao ponto $X^* = [29,86 ; 22,45]$, com variações menores que 5 centímetros de diferença entre os oito casos que convergiram para este ponto. Nas outras duas simulações, foram encontrados pontos diferentes, com valores de *fitness* (mérito) piores, o que pode representar a existência de mínimos locais.

O resultado (referente ao ponto X^*) foi diverso do alcançado em [82], já que a posição encontrada não coincide com nenhum dos pontos no espaço discreto definido nesta referência. Além disso, o critério utilizado para a função objetivo em [82] foi o de minimização do número de receptores que estivessem abaixo de um dado limiar de recepção. Por outro lado, no presente estudo de caso, adotou-se a premissa de que todos os receptores dentro do ambiente poderiam estar acima deste limiar considerado adequado, sendo que a maximização do pior nível de recepção dentre todos os receptores foi o critério escolhido para a função objetivo. Apesar dessas diferenças, ambos os critérios estão relacionados ao objetivo geral de se obter uma cobertura o mais uniforme possível.

O melhor ponto encontrado em [82], dentro do espaço discreto definido, foi em $X = [19,1 ; 22,2]$. Para tal posição, efetuou-se avaliação utilizando-se o RTQ3D-*indoor* e foi verificado que o pior nível de potência (dentre os receptores considerados) foi de -145,2 dBm. Por outro lado, com o transmissor alocado na posição (considerada “ótima”) encontrada no presente estudo de caso, o pior nível de potência dentre os receptores foi de -125,6 dBm, demonstrando que a utilização de um espaço de busca contínuo permite encontrar resultados melhores do que aqueles obtidos quando o problema é reduzido a um espaço discreto.

A Figura 6.17 apresenta a distribuição de níveis de potências recebidas ao longo de todo ambiente com a antena transmissora posicionada no melhor ponto encontrado.

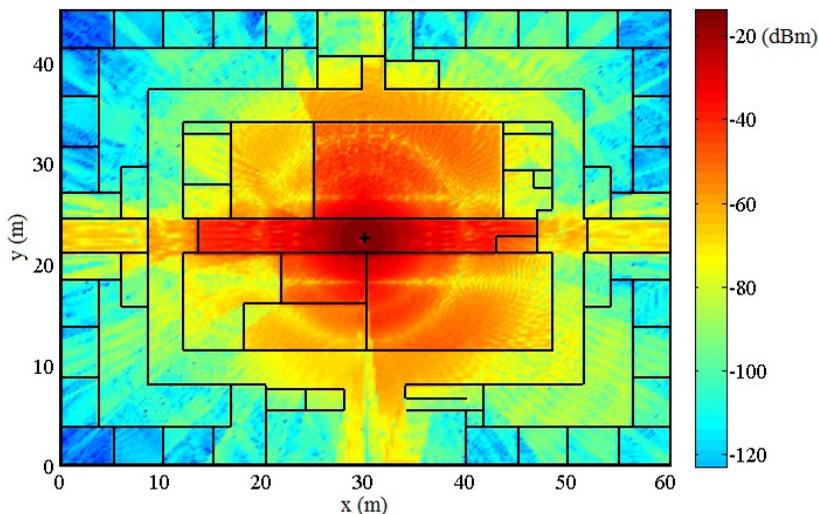


Figura 6.17 – Mapeamento das potências recebidas.

A Figura 6.18, apresenta a evolução do melhor mérito, que é o valor da função objetivo associado à melhor partícula, ao longo das diversas avaliações.

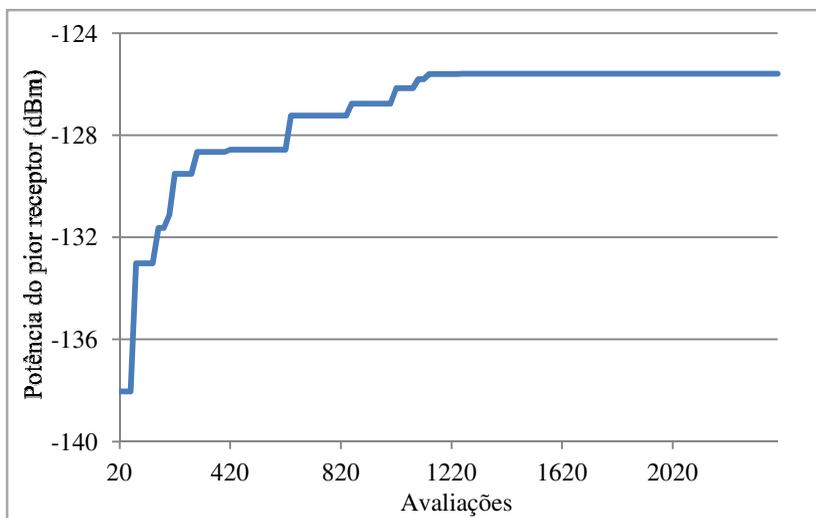


Figura 6.18 – Mérito ao longo das avaliações.

6.4.2 Sexto estudo de caso

Este estudo de caso trata do ambiente *indoor*, de 40 m por 28 m, cuja planta baixa encontra-se descrita na Figura 6.19. Neste cenário, a altura do teto em relação ao solo é de 3 m.

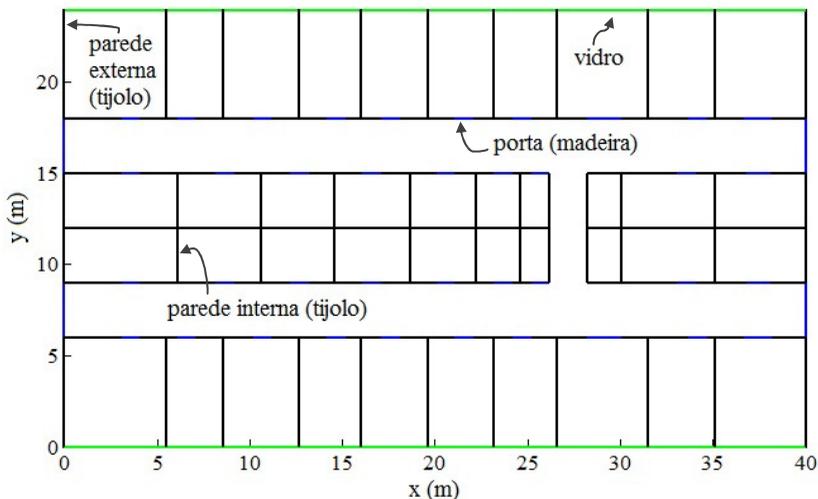


Figura 6.19 – Planta baixa do cenário tridimensional avaliado, com detalhes dos materiais dos obstáculos.

Este ambiente foi analisado em [83]. Porém, o estudo apresentado em tal referência utilizava um número finito de posições para os transmissores e, assim, o problema também era restrito a um espaço discreto. Um Algoritmo Genético binário integrado a um algoritmo de Traçado de Raios SBR bidimensional foi utilizado pelos autores para os problemas de otimização propostos na referência citada.

O presente estudo de caso, entretanto, refere-se a um problema com espaço de busca contínuo (real), em que é permitida a alocação das antenas transmissoras em qualquer posição dentro do ambiente e não apenas em pontos específicos.

Foi definida uma malha de 160 receptores uniformemente espalhados dentro do ambiente. As antenas de todos os receptores foram consideradas como estando a 1,5 m de altura em relação ao solo.

Assim como no estudo de caso anterior, no presente exemplo utilizou-se o otimizador por enxame de partículas (PSO) dinâmico [75], com coeficientes variando linearmente ao longo das avaliações e

adotando-se o componente “centroide”. Para função objetivo a ser avaliada, também foi utilizado o algoritmo de Traçado de Raios quase tridimensional proposto neste trabalho (RTQ3D-*indoor*). Entretanto, considerando que foi adotada uma quantidade maior de receptores nesta análise, o critério foi o de minimização do número de receptores que estejam abaixo de um dado limiar de potência recebida. No caso, o limiar adotado foi -110 dBm, valor mínimo hipoteticamente considerado como sendo adequado para que o terminal do usuário (receptor) consiga estabelecer uma comunicação com a estação base (transmissor).

Assim como nos demais estudos de caso, a variável do problema foi assumida como sendo um vetor formado pelas coordenadas (x, y) das antenas, ou seja, permitindo variações das antenas transmissoras em todo plano horizontal contido no cenário. Com relação à altura destes transmissores, esta foi assumida como fixa (3 m), simulando-se antenas omnidirecionais, monopolos de quarto de onda verticalmente polarizadas e afixadas ao teto. Neste estudo de caso, duas antenas transmissoras foram consideradas no problema. Portanto, a variável do problema é um vetor contendo a posição de cada antena transmissora $X = [x_{t1}, x_{t2}, y_{t1}, y_{t2}]$.

A frequência de operação utilizada na análise foi de 2,4 GHz, sendo que a potência de transmissão efetivamente irradiada (EIRP) das antenas transmissoras foi de 400 mW, simulando-se uma WLAN, com duas estações base que devem servir para atender o ambiente *indoor* em questão.

Da mesma forma que em [83], as propriedades dos materiais utilizados foram as seguintes: teto, solo e paredes externas de tijolo com 35 cm de espessura, $\epsilon_r = 4,4$ e $\sigma = 0,018$ S/m; paredes internas com as mesmas características eletromagnéticas (tijolo), porém, com 15 cm de espessura; portas de madeira com 5 cm de espessura, $\epsilon_r = 1,9$ e $\sigma = 0,008$ S/m; e janelas de vidro com 1 cm de espessura, $\epsilon_r = 5,2$ e $\sigma = 0,0035$ S/m. As cores das figuras relacionadas a este cenário indicam os materiais utilizados nos obstáculos (tijolo: em preto, madeira: em azul e vidro: em verde).

Executando-se um processo de otimização com 120 iterações e uma população de 20 partículas, totalizando 2400 avaliações, as melhores posições das antenas transmissoras encontravam-se em $X^* = [21,2; 16,82; 24,12; 8,12]$ (m). O melhor *fitness* encontrado foi 5, que representa o número de receptores (dos 160 considerados) que ficaram abaixo do limiar de -110 dBm. Isto significa que 96,9 % dos pontos de recepção do ambiente podem estabelecer uma comunicação

com as estações base (transmissores), quando posicionadas nos pontos encontrados.

A Figura 6.20 apresenta as posições médias das partículas, em função das avaliações ao longo do processo de otimização.

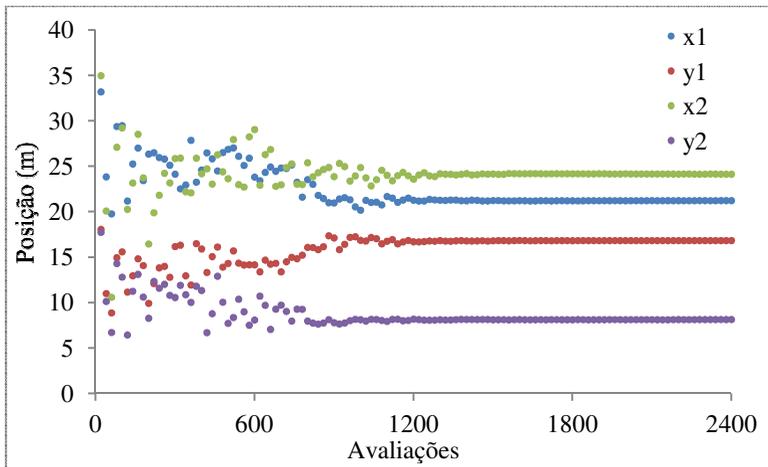


Figura 6.20 – Convergência das posições das antenas.

A Figura 6.21 apresenta a distribuição de níveis de potência recebida em todo ambiente (mapeamento de potências recebidas) considerando o melhor par de posições das antenas transmissoras encontrado.

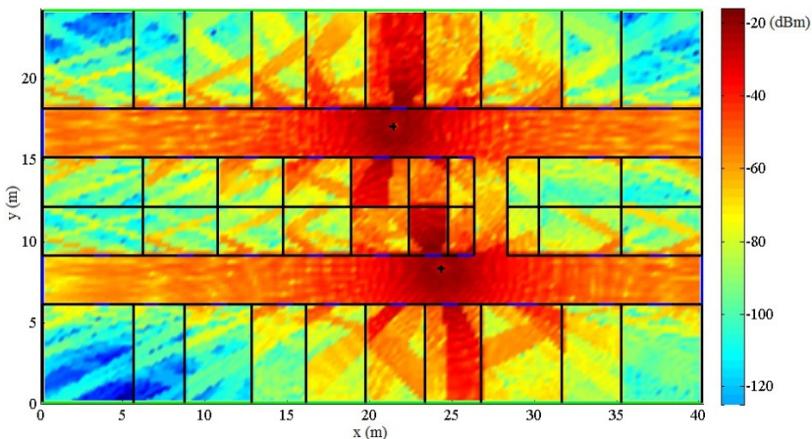


Figura 6.21 – Mapeamento de potências recebidas.

Como neste exemplo a função objetivo retorna um número natural, é fácil perceber que há outras soluções que também produzem 5 receptores (não necessariamente os mesmos) com potência abaixo do limiar. De fato, o mesmo processo de otimização foi executado (de forma independente) outras duas vezes e, em ambos os casos, também foram encontradas posições com a mesma aptidão, ou seja, com 5 receptores cujas potências de recepção estavam abaixo do limiar de -110 dBm, porém, obtendo-se outras soluções (outras posições das antenas).

Na Seção 6.5.2, será apresentado um estudo de caso envolvendo o mesmo cenário, porém utilizando-se mais de um critério para determinar os posicionamentos das antenas transmissoras, tratando-se, portanto, de um problema de otimização multiobjetivo.

6.5 ESTUDOS DE CASOS COM RTQ3D-INDOOR E O OTIMIZADOR PSO MULTIOBJETIVO (MOPSO)

6.5.1 Sétimo estudo de caso

Este estudo de caso trata do mesmo ambiente *indoor* apresentado na seção 6.4.1 (quinto estudo de caso). Porém, no presente estudo de caso, associado ao algoritmo RTQ3D-*indoor*, foi aplicada uma extensão do otimizador PSO utilizada para resolução de problemas multiobjetivo – trata-se do algoritmo MOPSO.

Na associação dos algoritmos MOPSO/RTQ3D-*indoor*, utiliza-se o conceito de dominância de Pareto para a obtenção do conjunto de soluções não dominadas.

Um otimizador multiobjetivo foi adotado, pois se pretende posicionar antenas transmissoras no ambiente de modo a atingir, simultaneamente, dois objetivos:

- i) Maximizar o menor valor de potência recebida dentre todos os receptores distribuídos no cenário;
- ii) Minimizar a potência total transmitida pelo sistema.

Com isso, além das coordenadas x , y (variação no plano horizontal) das antenas, as potências de transmissão de cada uma das antenas também entram no conjunto de variáveis do problema.

Como o estudo se refere a uma rede operando em 1800 MHz, simulando-se o posicionamento de antenas de uma femtocélula em um ambiente interior, trata-se de uma frequência (licenciada) que será

reutilizada pela mesma operadora em outro ambiente (fora do cenário em análise). Portanto, as estações base analisadas nesta femtocélula representam uma potencial fonte de interferência para outras células que se encontram em ambientes próximos ao local, fora do cenário em análise.

Assim, deve-se buscar uma solução que não somente melhore a cobertura do sinal dentro do cenário em análise, mas que também diminua a potência total transmitida, como forma de diminuir a interferência em outras células que utilizam a mesma frequência.

Estes, portanto, são dois objetivos conflitantes, já que a potência transmitida influencia diretamente na cobertura do ambiente em análise. Observa-se que a primeira função objetivo $F_1(X)$ é obtida a partir do algoritmo de Traçado de Raios, ou seja, $F_1(X) = RTQ3D-indoor(X)$. Portanto, a variável desta função é um vetor composto pelas posições das antenas e de suas potências $X = [x_{t1}, x_{t2}, y_{t1}, y_{t2}, Pt_1, Pt_2]$. Já na segunda função objetivo, das componentes do vetor (variável) X , apenas as potências de transmissão influenciam na modificação da função, pois $F_2(X) = Pt_1 + Pt_2$. Em ambos os transmissores, admitiu-se que as potências podem variar de 10 mW a 2 W.

O MOPSO foi ajustado para efetuar 3000 avaliações, com 20 partículas e 150 iterações. Com isso, foi obtido o conjunto de soluções não dominadas apresentado na Figura 6.22.

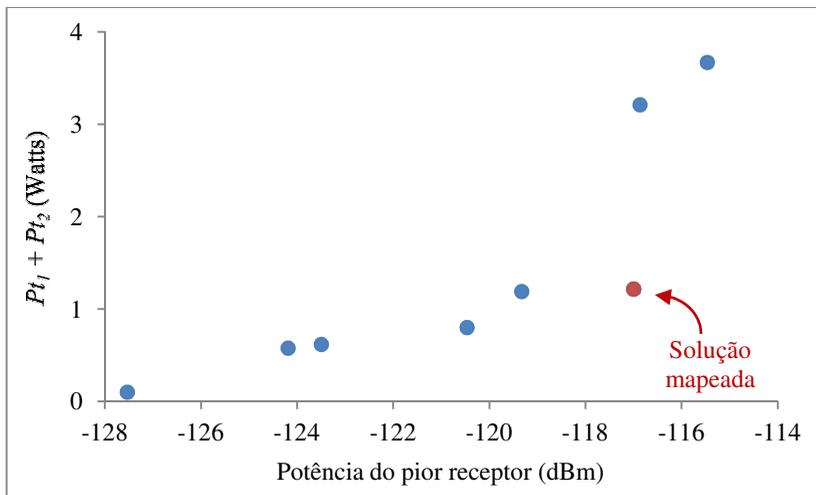


Figura 6.22 – Soluções não-dominadas.

Percebe-se, na Figura 6.22, que há um compromisso entre a potência total transmitida e a pior potência recebida dentre todos os receptores. Levando-se em conta tal compromisso, um projetista pode escolher a solução indicada em vermelho na Figura 6.22. Esta solução escolhida foi obtida para os seguintes parâmetros $X = [30,0; 6,5; 27,7; 28,4; 0,278; 0,938]$.

A Figura 6.23 apresenta o mapeamento das potências recebidas utilizando-se a solução escolhida.

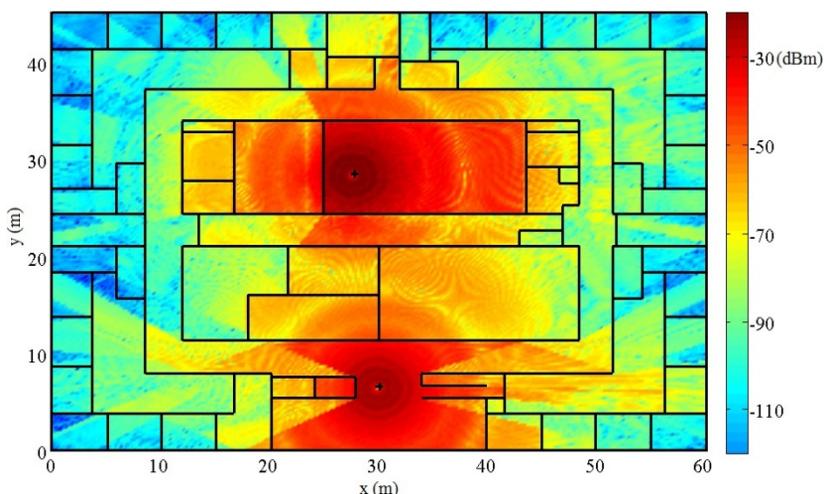


Figura 6.23 – Mapeamento de potências recebidas.

Para esta solução, como foram utilizadas duas antenas transmissoras, já era de se esperar uma distribuição mais uniforme dos campos no ambiente. Este fato é refletido no valor de potência recebida pelo pior receptor $F_I(X)$, que foi de -117,0 dBm, com as potências dos transmissores 1 e 2 sendo, respectivamente, 278 mW e 938 mW (isto é, com potência total transmitida pela femtocélula de 1216 mW). Assim, quando apenas uma antena transmissora foi utilizada (ainda que de forma otimizada), mesmo utilizando-se uma potência total de 2 W, obteve-se um valor para o pior receptor de -125,6 dBm, bem inferior ao obtido com duas antenas. Este estudo de caso demonstra que o uso de mais antenas (com potências mais baixas) para atendimento de uma dada área de cobertura permite uma cobertura mais uniforme além de possibilitar uma diminuição da potência total utilizada pelo sistema, diminuindo a potencialidade de interferência cocanal.

6.5.2 Oitavo estudo de caso

Este estudo de caso trata do mesmo ambiente *indoor* apresentado na seção 6.5.2 (sexto estudo de caso). Porém, na presente análise, associado ao algoritmo *RTQ3D-indoor*, foi aplicado o algoritmo *MOPSO*.

Da mesma forma que no estudo de caso apresentado na seção anterior, pretende-se posicionar duas antenas transmissoras na busca por dois objetivos. Entretanto, neste estudo de caso, os objetivos são os seguintes:

- i) Minimizar o número de receptores que estejam abaixo de um dado limiar considerado adequado. Isto seria o mesmo que maximizar a “área” de cobertura;
- ii) Minimizar a exposição a campos eletromagnéticos média nas áreas 1 e 2 (indicadas na Figura 6.24).

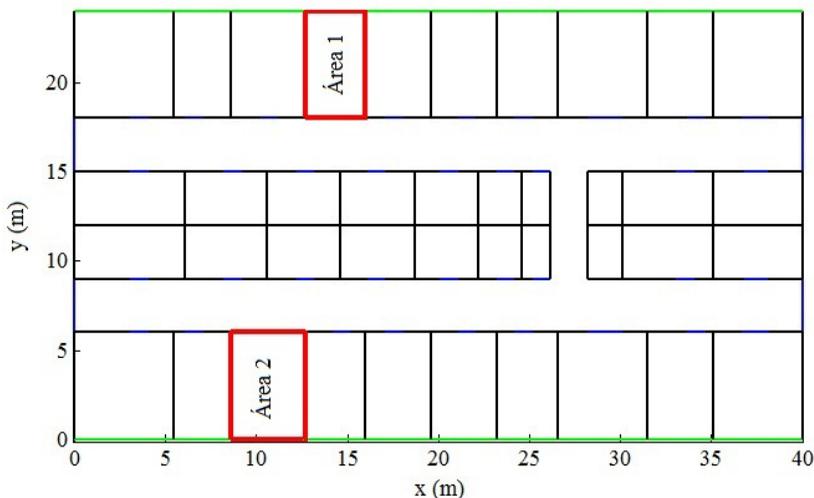


Figura 6.24 – Descrição do cenário com detalhes das áreas 1 e 2.

Considerou-se, neste estudo, as potências dos transceptores com valor fixo de 400 mW (EIRP). Com isso, a variável X do problema, assim como no sexto estudo de caso, é um vetor composto apenas pelas coordenadas x , y das duas antenas transmissoras, o que possibilita variações em todo no plano horizontal restrito ao ambiente em análise.

Trata-se de uma rede operando em 2,4 GHz, simulando-se o posicionamento de antenas de uma WLAN em um ambiente interior.

Em um dos problemas apresentados em [83], em que o mesmo ambiente *indoor* é considerado nas análises, foram utilizados objetivos semelhantes. No entanto, num dos casos estudados nesta referência, os autores propuseram melhorar a cobertura no ambiente em análise e, ao mesmo tempo, minimizar a exposição nas áreas 1 e 2, utilizando um problema mono-objetivo, por meio de algumas restrições, dentre elas, a garantia de cobertura em 95% nos receptores.

Outra diferença, conforme já mencionado na seção 6.4.2, é que foi utilizado em [83] um Algoritmo Genético binário integrado a um algoritmo de Traçado de Raios SBR bidimensional, sendo que os transmissores podem ser posicionados apenas em determinados pontos específicos. Portanto, esta referência trata de um espaço de busca discreto, ou seja, com um número finito de posições permitidas para alocação das antenas transmissoras, não sendo possível, com isso, efetuar uma comparação equânime entre os problemas.

Por outro lado, no estudo de caso aqui apresentado, o algoritmo de otimização utiliza um processo de busca por soluções em todo o espaço de busca (contínuo) que não somente melhore a cobertura do sinal dentro do cenário em análise, mas que também diminua a exposição média nas áreas 1 e 2. Isto é feito guardando-se as soluções não-dominadas ao longo das diversas avaliações com a obtenção de uma fronteira de Pareto ao final do processo.

Observa-se que a primeira função objetivo $F_1(X)$ é obtida a partir do algoritmo de Traçado de Raios, ou seja, $F_1(X) = RTQ3D_1-indoor(X)$. Conforme já mencionado, a variável desta função é um vetor composto pelas posições das antenas $X = [x_{t1}, x_{t2}, y_{t1}, y_{t2}]$. A segunda função objetivo também é obtida por meio do algoritmo de traçado de raios quase 3D, com o mesmo vetor/variável considerado como dado de entrada, e sendo representada como: $F_2(X) = RTQ3D_2-indoor(X)$. Na avaliação desta segunda função, para um dado conjunto de posições X das antenas transmissoras, o algoritmo calcula a exposição total (SI) em cada ponto das áreas 1 e 2 da seguinte forma [83]:

$$SI_{total} = \sum_{j=1}^N \left(\frac{S_{jf_j}}{S_{jf_j}^{lim\ it}} \right) \quad (6.3)$$

onde, S_{jf_j} é a densidade de potência devido à j -ésima estação base transmitindo na frequência f_j e $S_{jf_j}^{lim\ it}$ é o limite da densidade de potência para a frequência considerada. Observa-se que em [83] foram consideradas também a transmissão dos terminais dos usuários no

cálculo da exposição total. No presente estudo de caso, entretanto, foram consideradas apenas as emissões mais importantes, provenientes dos dois transmissores, ambos operando em uma única faixa de frequência (2400 MHz), sendo, portanto, $N = 2$.

Com isso, por meio da equação (6.3), obtém-se a exposição (devido às estações base) em cada ponto de recepção, sendo, a partir daí, calculada a média das exposições no conjunto de receptores distribuídos nas áreas 1 e 2, o que deve ser minimizado ao longo do processo. Para a frequência em questão, o limite de “densidade de potência da onda plana equivalente” considerado foi de 10 W/m^2 , sendo este o limite para a “exposição da população em geral”, conforme previsto no anexo à Resolução 303/01 da Anatel [5]. Observa-se que este regulamento utiliza o mesmo valor estipulado pela Comissão Internacional de Proteção Contra as Radiações Não Ionizantes (ICNIRP) [6] e adotado pela Organização Mundial da Saúde.

As áreas 1 e 2 podem representar, por exemplo, salas de aula em uma escola ou enfermarias em um hospital, onde baixos níveis de exposição são requeridos tanto para questões de saúde como de compatibilidade eletromagnética [83]. Por isso, a intenção de se minimizar a exposição nestas regiões.

De forma semelhante ao observado em [83], a título de análise da exposição aos campos eletromagnéticos nestas áreas, considerou-se uma situação extrema, em que os transceptores estariam continuamente transmitindo com as potências máximas, o que não ocorre na prática em se tratando de equipamentos utilizados neste tipo de sistema *WiFi*. Ainda assim, a análise é válida para se buscar a consideração de uma situação extrema.

Com a associação *MOPSO/RTQ3D-indoor*, foram efetuadas 3000 avaliações do algoritmo *RTQ3D-indoor*, por meio de 150 iterações do *MOPSO* com uma população de 30 partículas. A Figura 6.25 apresenta o conjunto de soluções não dominadas encontradas durante o processo de otimização. É possível observar nesta figura que há um compromisso entre a “área e cobertura” e a exposição aos campos eletromagnéticos nas áreas 1 e 2.

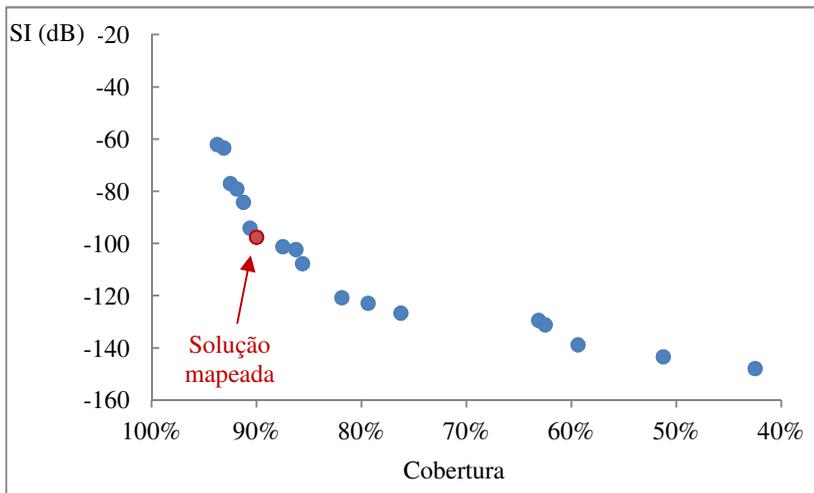


Figura 6.25 – Soluções não-dominadas.

Supondo-se que, numa dada situação prática, o projetista opte pela solução indicada em vermelho na Figura 6.25, observa-se uma cobertura razoável no cenário em questão e, ao mesmo tempo, obtendo-se uma exposição média nas áreas 1 e 2 extremamente atenuada em relação ao limite estipulado.

A Figura 6.26 apresenta a distribuição de potências para a solução escolhida.

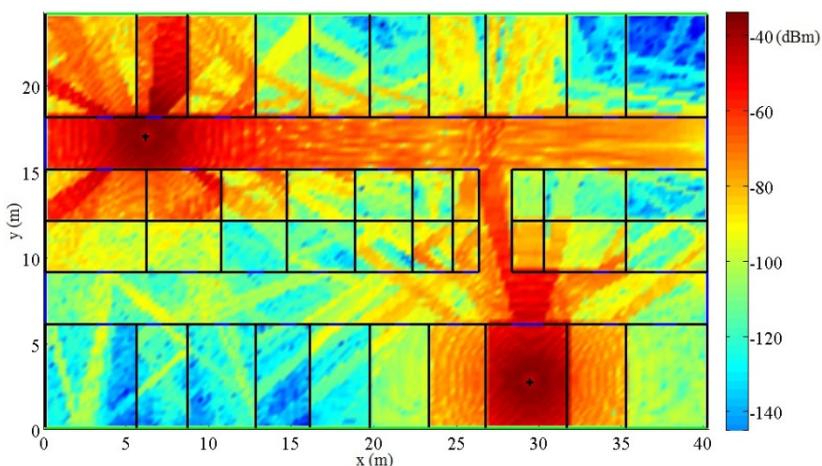


Figura 6.26 – Mapeamento das potências recebidas.

6.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram apresentadas algumas aplicações utilizando-se a integração dos algoritmos de Traçado de Raios especificamente implementados neste trabalho, com meta-heurísticas populacionais, visando a resolução de problemas de otimização existentes em sistemas de comunicação sem fio confinados em ambientes interiores.

Estas aplicações foram ilustradas em oito estudos de caso, todos eles envolvendo o posicionamento de antenas em cenários *indoor*. Nos quatro primeiros estudos de caso, um algoritmo de Traçado de Raios bidimensional (RT 2D) foi adotado para a obtenção da função objetivo, que retornavam os valores relacionados aos critérios de otimização. Foram usados tanto um Algoritmo Genético (GA), como um algoritmo PSO para os problemas mono-objetivo. Numa dessas aplicações 2D, um problema com múltiplos objetivos foi proposto, tendo sido resolvido com a associação do algoritmo RT 2D com uma ferramenta MOPSO.

Nos outros quatro estudos de caso, buscou-se introduzir o algoritmo de Traçado de Raios quase tridimensional desenvolvido neste trabalho (RTQ3D-*indoor*). Os problemas de otimização envolviam cenários realísticos, sendo que a associação de um PSO com o RTQ3D-*indoor* foi utilizada para os problemas mono-objetivo. Já para os problemas multiobjetivo, o algoritmo RTQ3D-*indoor* foi associado a uma ferramenta MOPSO.

Com este conjunto de estudos de caso, puderam-se observar algumas das inúmeras possibilidades de aplicação no âmbito do planejamento de sistemas de comunicação sem fio *indoor*. As associações de ferramentas de otimização com algoritmos de Traçado de Raios especificamente adotadas neste trabalho possibilitam resoluções de diversos problemas mono e multiobjetivo, sendo uma boa alternativa mesmo para cenários considerando efeitos tridimensionais, conforme demonstrado neste capítulo.

7 COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho, foram apresentados algoritmos meta-heurísticos, associados à Técnica de Traçado de Raios visando a otimização do posicionamento de antenas em sistemas de comunicação sem fio para aplicações em ambientes interiores (*indoor*). Para isto, o trabalho foi inicialmente dividido em duas frentes:

- i) Estudos e aplicações de duas modalidades de meta-heurísticas populacionais como otimizadores, quais sejam: Algoritmo Genético (GA) e Otimização por Enxame de Partículas (PSO);
- ii) Aplicações de algoritmo de Traçado de Raios bidimensional. Algoritmo de Traçado de Raios quase tridimensional para ambientes interiores (RTQ3D-*indoor*): estudos, proposta, implementação, validação e aplicações em problemas de otimização.

Assim, durante a evolução do trabalho foi possível realizar uma série de aplicações de associação destes dois conjuntos de ferramentas.

Inicialmente, utilizando-se otimizadores que já haviam sido desenvolvidos [66] ou que foram implementados em trabalhos de iniciação científica complementares a este trabalho de doutorado [72, 88], associados ao algoritmo de Traçado de Raios bidimensional [35], foram realizados estudos de caso de resolução de problemas mono-objetivo envolvendo posicionamento de antenas em ambientes interiores, conforme apresentado no segundo e no terceiro estudos de caso apresentados no Capítulo 6.

Adicionalmente, foram efetuadas simulações utilizando-se um otimizador multiobjetivo, o MOPSO [76, 78], que é uma extensão do PSO, mas aplicando-se o conceito de fronteira de Pareto, para guardar as soluções não dominadas ao longo do processo de otimização com mais de um objetivo envolvido. De acordo com o quarto estudo de caso apresentado no Capítulo 6, este otimizador MOPSO foi associado ao algoritmo de Traçado de Raios bidimensional para resolução de um problema envolvendo um bloqueador de sinais de radiocomunicações, em que havia dois objetivos conflitantes a serem atendidos [78-80].

Na sequência do trabalho, conforme previsto na ocasião do Exame de Qualificação, foi estudado e implementado um algoritmo de Traçado de Raios baseado no Método das Imagens, que propõe a conversão de cada trajetória contida no plano horizontal, obtida com o RT 2D, em cinco percursos contidos no plano vertical, inserindo-se, assim, uma terceira dimensão no cenário. Com isso, o algoritmo

desenvolvido, denominado RTQ3D-*indoor*, leva em consideração efeitos tridimensionais, como reflexões no teto e no solo e considerações de diferenças de alturas entre transmissores e receptores nos ambientes interiores, o que permite o cálculo dos campos com maior exatidão, por meio da Ótica Geométrica Moderna (GO). Adicionalmente, esta ferramenta mantém a proposta do algoritmo de traçado de raios bidimensional de considerar os desvios nas trajetórias dos raios transmitidos através de paredes, procedimento este detalhado em [35, 48-50] e no Anexo B.

Dadas as características dos ambientes *indoor*, o algoritmo RTQ3D-*indoor* considera um número máximo de reflexões igual a dois, além de desconsiderar as difrações. Estas características, aliadas à adoção da técnica de aceleração de subdivisão espacial uniforme (Matriz-SVP), possibilita uma diminuição significativa do tempo computacional, fator importante nas aplicações em problemas de otimização em que a função objetivo (algoritmo RTQ3D-*indoor*) é executada milhares de vezes durante o processo.

Foram realizadas diversas avaliações, apresentadas no Capítulo 4, mostrando que o algoritmo RTQ3D-*indoor* proposto obteve resultados equivalentemente válidos quando comparados com algoritmos de Traçado de Raios plenamente tridimensionais (*full 3D*). Isto porque, de acordo com as médias e os valores de desvios padrões em relação a medições, o algoritmo RTQ3D-*indoor* apresentou resultados satisfatórios para ambientes interiores típicos. Diante destas avaliações, pode-se concluir que o algoritmo proposto permite preservar a validade de resultados obtidos com modelos plenamente tridimensionais, mantendo as vantagens das ferramentas bidimensionais em termos de custo computacional na avaliação de ambientes interiores complexos.

Com a implementação desta ferramenta, foi possível realizar novos estudos de caso, passando-se a utilizar a associação PSO/RTQ3D-*indoor*. Como exemplo destas aplicações, o quinto e o sexto estudos de caso, apresentados no Capítulo 6, tratam de problemas mono-objetivos, em que se pretende otimizar o posicionamento de antenas de modo a maximizar a área de cobertura, utilizando-se critérios adequados para atingir este objetivo. Ambos os casos foram obtidos a partir de cenários apresentados na literatura [82, 83]. Porém, nestas referências foram estudados problemas limitados a espaços de busca discretos, ou seja, só era permitido que as antenas transmissoras fossem posicionadas em pontos específicos. Já no quinto e no sexto estudos de caso, o algoritmo PSO real, ao longo do processo de otimização gerava possíveis soluções

candidatas em um espaço de busca contínuo, contido dentro dos respectivos cenários em análise.

Por fim, o algoritmo RTQ3D-*indoor* foi aplicado também em problemas de otimização multiobjetivo, em associação com o otimizador MOPSO. O sétimo e o oitavo estudos de caso, também apresentados no Capítulo 6, expõem problemas práticos nos quais se pretendiam atingir dois objetivos conflitantes. No sétimo estudo de caso, a associação MOPSO/ RTQ3D-*indoor* foi aplicada a um cenário *indoor* (o mesmo do quinto estudo de caso), no qual se pretendia buscar o posicionamento de uma femtocélula com duas antenas que permitissem cobrir adequadamente o ambiente, mas com a menor potência total possível. Já no oitavo estudo de caso, o mesmo cenário apresentado no sexto estudo de caso foi avaliado. Porém, além de se pretender otimizar a área de cobertura, foi adicionado um segundo objetivo que era o de minimizar a exposição média a campos eletromagnéticos (*SI*) em duas áreas específicas do cenário.

Observa-se que todas as ferramentas implementadas, inclusive o algoritmo RTQ3D-*indoor*, serão plenamente disponibilizadas para aproveitamento em futuros trabalhos a serem desenvolvidos no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), como forma de continuidade das pesquisas relacionadas aos assuntos e aplicações aqui apresentados.

Com isso, considerando a grande possibilidade de expansão das pesquisas tanto na área de predição de cobertura utilizando Traçado de Raios, como no que se refere às ferramentas de otimização, propõe-se as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Aplicações dos algoritmos RTQ3D-*indoor* para avaliação de outros parâmetros importantes em sistemas de comunicação sem fio, como a análise de perfil de retardos, razão sinal/interferência, além de aplicação de características estatísticas ao algoritmo, para melhor descrever outros comportamentos típicos de canais radiomóveis;

- Implementação e aprimoramento de técnicas de aceleração, de paralelização do processamento e de outras estratégias que busquem diminuir o tempo computacional envolvido nas simulações relacionadas às aplicações apresentadas neste trabalho;

- Expansão dos algoritmos de Traçado de Raios para validade em ambientes exteriores e/ou utilização de outros modelos válidos para estes cenários, possibilitando um vasto conjunto de aplicações envolvendo otimização no posicionamento de antenas;

- Utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA) e outros metamodelos para que, de forma integrada aos otimizadores e ao algoritmo RTQ3D-*indoor*, possibilite estratégias para diminuir o tempo computacional envolvido, permitindo análises em ambientes ainda mais complexos;
- Aprofundamento na pesquisa e aprimoramento na implementação de meta-heurísticas populacionais (otimizadores) aplicadas aos problemas de posicionamento de antenas, incluindo as estratégias multiobjetivo além de análises de sensibilidade.

ANEXO A

A.1 CONSTRUÇÃO DA ÁRVORE DE IMAGENS

Para determinar os percursos das ondas refletidas, é necessário conhecer as imagens (fontes virtuais) devido a todas as superfícies. Além disso, apesar da redução de amplitude sofrida após uma reflexão (já que os obstáculos, na prática, não são puramente condutores), os percursos devidos a mais de uma reflexão também devem ser considerados. Para isso, o armazenamento das imagens até NR (número máximo de reflexões consideradas) deve ser feito por meio da construção da árvore de imagens.

A Figura A.1 mostra um exemplo, no qual três segmentos (S_1 , S_2 , S_3) são considerados para o armazenamento das imagens. Os raios devidos a uma única reflexão são traçados com o auxílio das imagens de primeira ordem (T_1 , T_2 , T_3). De modo a facilitar a compreensão do procedimento, na Figura A.1, somente a imagem T_1 está ilustrada. Para traçar percursos com dupla reflexão, as fontes virtuais de segunda ordem são necessárias. Assim, para encontrar a imagem T_{13} , por exemplo, é necessário determinar, primeiramente, a fonte T_1 (imagem de T em relação à superfície S_1) e, em seguida, a fonte T_{13} (imagem T_1 em relação à superfície S_3).

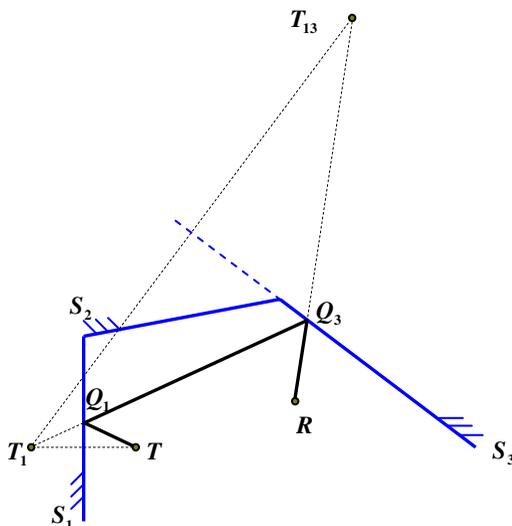


Figura A.1 – Exemplo de determinação de imagens (até 2ª ordem).

Essas combinações de imagens sucessivas formam a “árvore de imagens”. A Figura A.2 mostra a árvore de imagens construída para o exemplo apresentado na figura anterior (Figura A.1), considerando no máximo duas reflexões ($NR = 2$).

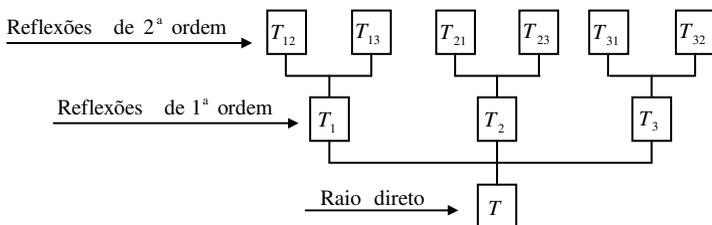


Figura A.2 – Representação da árvore de imagens.

A fonte “real” T , portanto, é a fonte que dará origem às demais fontes (virtuais). Partindo-se da fonte T , tem-se a geração das imagens de primeira ordem. Nesse estágio, apenas raios refletidos uma única vez podem ser encontrados. Para determinar raios duplamente refletidos, como no exemplo da Figura A.2, a fonte geradora do raio de segunda ordem T_{13} , por exemplo, é a imagem T_1 , que por sua vez foi gerada pela fonte T . Esse procedimento de geração de imagens é feito até o número desejado de reflexões.

O procedimento de construção da árvore de imagens, para uma antena transmissora posicionada em uma posição fixa, é feito uma única vez. Assim, para diferentes posições das antenas receptoras, a árvore de imagens não se altera. O que muda são, obviamente, os pontos de reflexão (Q), devendo estes ser calculados para cada receptor. Os pontos de reflexão são os pontos que efetivamente determinam o percurso do raio refletido. Como mostrado na Figura A.2, os raios são facilmente traçados (raios TQ_1 , Q_1Q_3 e Q_3R) após a obtenção do ponto de reflexão.

A determinação de um ponto de reflexão é feita identificando-se o ponto de intersecção entre o segmento em questão e a reta que liga a imagem ao destino do raio (o destino não necessariamente é o receptor; pode ser, por exemplo, outro ponto de reflexão). Para determinar os pontos de reflexão, parte-se do receptor, como mostrado no exemplo da Figura A.2, determinando-se primeiramente o ponto de reflexão Q_3 por meio da intersecção entre o segmento S_3 e a reta $T_{13}R$. Encontrado o ponto Q_3 , determina-se o ponto de reflexão Q_1 , que é a intersecção entre o segmento S_1 e a reta T_1Q_3 .

Importante observar que a intersecção pode não ocorrer, ou seja, pode existir um ponto de intersecção entre as retas, porém fora do segmento que representa o obstáculo. Neste caso, o percurso não existirá.

Muitas vezes, o excessivo número de superfícies pode gerar uma árvore de imagens muito grande, dificultando o seu armazenamento. Como mostrado na Figura A.2, percebe-se que, com o aumento do número de superfícies e/ou número de reflexões, o número de imagens cresce exponencialmente. Numa análise quantitativa aproximada, uma árvore de imagens pode ter até $(NS - 1)NR$ elementos, onde NS é o número de superfícies e NR é o número máximo de reflexões consideradas. Na prática, o limite superior é aproximadamente $(NS/2)*NR$, pois cerca de metade dos segmentos não é capaz de gerar a imagem de um determinado ponto, já que só um lado da face reflete os raios [1].

Para amenizar o problema do excessivo número de imagens, é importante conhecer as superfícies que efetivamente contribuem para os percursos válidos. Assim, algumas imagens podem não produzir uma trajetória válida. Como mencionado, apenas um lado de cada face é considerado refletor. Além disso, existem algumas técnicas que conseguem reduzir significativamente o número de imagens por meio do descarte a priori de fontes de percursos que não alcançarão o receptor [1]. A seguir será apresentada uma técnica para reduzir o número de imagens por meio da determinação da região de iluminação de uma fonte virtual.

A.2 REGIÃO DE ILUMINAÇÃO

Como dito anteriormente, um ponto de reflexão pode não estar contido no segmento da reta, impedindo assim que o raio seja refletido. Uma fonte real “ilumina” por toda a sua volta (360°). O mesmo não ocorre com uma imagem (fonte virtual). A Figura A.3 ilustra a região de iluminação de uma imagem I . Pode-se notar que um observador (antena receptora) posicionado fora da região de iluminação da imagem não será atingido por raios refletidos (devido à fonte F) nessa superfície.

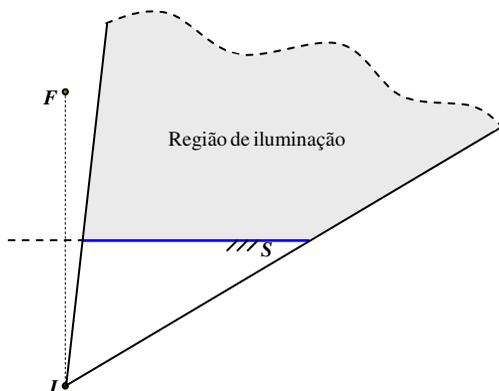


Figura A.3 – Ilustração da região de iluminação a partir de uma imagem e de um obstáculo

Essa região de iluminação é explorada para a realização de um teste que consiste em reduzir o número de imagens por meio da determinação da “região de iluminação” de uma fonte virtual (ou área de visibilidade dessa fonte) [1]. Para isso é necessário delimitar a região do espaço com base na fonte virtual e na face do obstáculo (segmento) que a gerou. A partir daí, calcula-se apenas as imagens de ordem superior dessa fonte em relação às superfícies (ou segmentos, em 2D) que estão inteira ou parcialmente contidas nessa região (superfícies “iluminadas” pela fonte). Em uma análise bidimensional, a região de iluminação corresponde ao espaço delimitado pelas semiretas que unem a fonte às extremidades da superfície geradora da fonte virtual.

ANEXO B

B.1 PROCEDIMENTO PARA DETERMINAR O PERCURSO DOS RAIOS TRANSMITIDOS [35]

A Figura B.1 mostra a trajetória de um raio transmitido através de um obstáculo (p. ex., uma parede). Esta configuração apresenta-se como um caso padrão, pois em problemas de predição de campos em ambientes interiores, o *meio 1* é o ar, sendo o obstáculo (*meio 2*) geralmente representado como um material homogêneo (p. ex., característica do concreto a 1GHz: $\epsilon_r = 7$ e $\sigma = 47,3$ mS/m [10]).

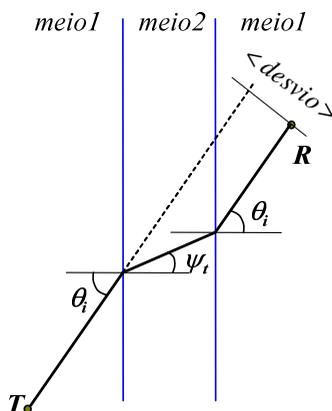


Figura B.1 – Trajetória de um raio transmitido através de uma parede.

Sabe-se que apenas os raios relevantes são traçados quando o Método das Imagens é utilizado. Para os raios transmitidos através de obstáculos, no entanto, há um desvio do percurso que dificulta sua determinação com exatidão. Isto ocorre devido à dupla refração existente quando o raio atravessa a parede. Segundo a Lei de Snell da Refração (B.1), o ângulo real de refração (ψ_i) depende do ângulo de incidência (θ_i) e das características dos materiais (constantes de propagação γ_1 e γ_2).

$$\gamma_1 \sin \theta_i = \gamma_2 \sin \theta_r \quad (\text{Lei de Snell da Refração}) \quad (\text{B.1})$$

Conhecendo-se o ponto de transmissão e o ponto de recepção (onde se deseja calcular o campo) e havendo um obstáculo (p. ex., uma parede de espessura d) entre esses dois pontos, não é trivial, a priori, traçar o raio de forma exata como acontece, no Método das Imagens,

para a determinação dos raios direto, refletido e difratado. O seguinte procedimento foi então proposto [35, 48-50] para a determinação do raio que, como será visto, é a trajetória “quase exata” do raio transmitido (detalhamento ilustrado na *Figura B.1*):

➤ Arbitra-se um sistema de coordenadas cartesianas 2D (xy) com sua origem coincidindo com o ponto de transmissão ($x_t = 0$ e $y_t = 0$), de tal forma que o ponto de recepção fique posicionado no primeiro quadrante desse sistema ($x_r > 0$ e $y_r > 0$) e que o eixo y seja paralelo à parede;

➤ Traça-se um raio em linha reta (sem o desvio) entre os pontos de transmissão $(0,0)$ e recepção (x_r, y_r) e determina-se o ponto de intersecção $I_1 = (x_{s1}, y_{s1})$ do raio com a parede;

➤ Utilizando o “ângulo de incidência” θ_{i1} , ângulo entre o raio traçado e o vetor normal à superfície (normal à parede), pela Lei de Snell da refração (equação (B.1)), encontra-se o “ângulo de refração” θ_{r1} da primeira refração (obs.: na segunda refração, o ângulo será idêntico ao ângulo de incidência θ_{i1} , já que o meio é considerado homogêneo e uniforme;

➤ Traça-se o raio, partindo do transmissor e respeitando as mudanças de direção (nas passagens ar-parede e parede-ar, de acordo com os ângulos calculados), acompanhando este traçado até atingir um ponto R' , onde $x'_r = x_r$. Nesse ponto, determina-se a distância entre os pontos R e R' ($Y = y_r - y'_r$) – que é a mesma entre T e T' .

➤ Determina-se a distância ($X_1 = x_{s1}$) perpendicular do ponto de transmissão até a parede e a distância ($X_2 = x_r - x_{s2}$), do ponto de recepção até a parede.

➤ Utiliza-se a relação (B.2) para encontrar o ponto de incidência I, “quase exato” da onda na parede (ilustrado na *Figura B.2*):

$$\begin{array}{l} X_1 + X_2 \rightarrow Y \quad \therefore \\ X_1 \rightarrow \Delta y_i \end{array} \quad \boxed{\Delta y_i = \frac{Y \cdot X_1}{X_1 + X_2}}; \quad (\text{B.2})$$

➤ O ponto de incidência I é então determinado com suas coordenadas sendo $x_i = x_{s1}$ e $y_i = y_{s1} + \Delta y_i$;

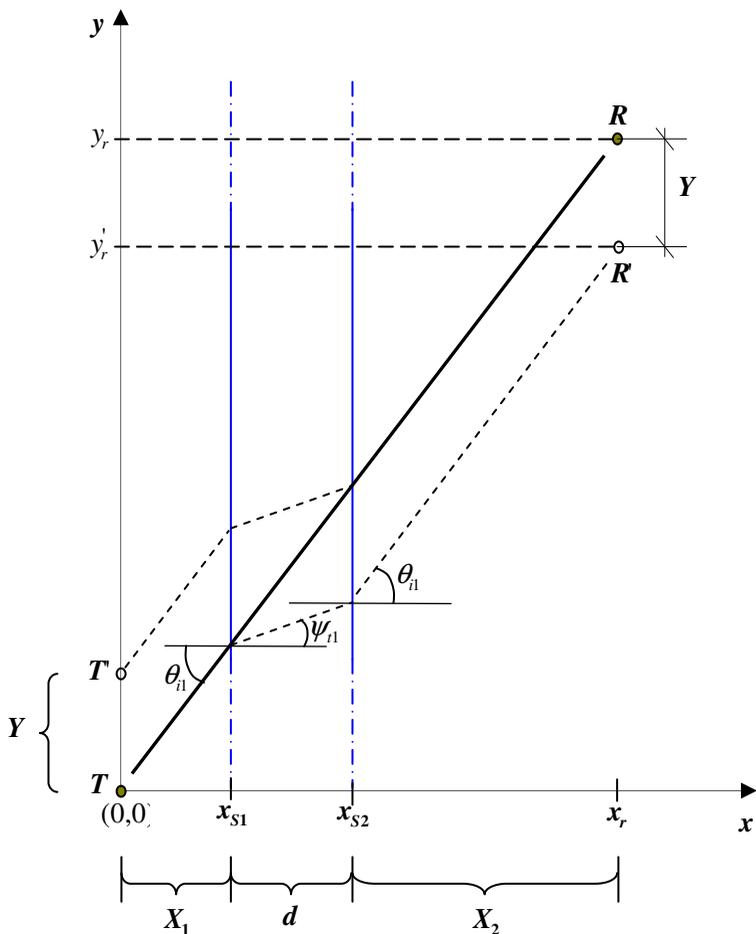


Figura B.2 – Ilustração dos parâmetros geométricos utilizados no procedimento para a determinação do raio transmitido.

➤ Encontrado o ponto de intersecção I (ilustrado na Figura B.3), determina-se o ângulo de incidência θ_i (entre o raio incidente e o vetor normal à superfície) e calcula-se o ângulo de refração θ_t , sendo que o ângulo da segunda refração é o próprio ângulo θ_t .

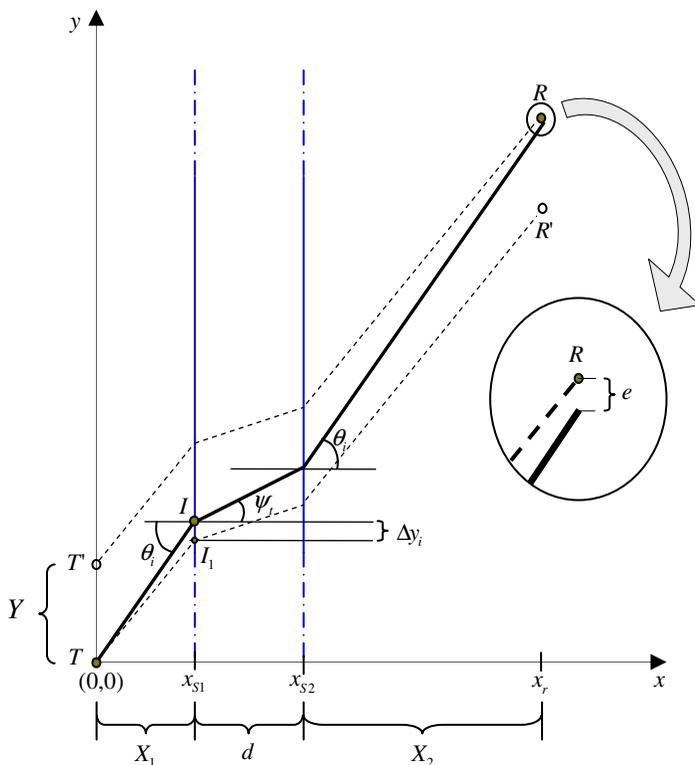


Figura B.3 – Ilustração do percurso encontrado e detalhamento do erro e .

Observa-se que, quando o percurso é acompanhado a partir da saída da parede, o raio não atinge o ponto exato do receptor. No entanto, em [35, 49] foi demonstrado que é praticamente nulo o erro existente devido ao fato de o raio não atingir o ponto exato. Com isso, este procedimento é perfeitamente válido para a consideração dos raios transmitidos através de obstáculos, além de ser aderente ao Método das Imagens, inclusive nas aplicações quase 3D.

REFERÊNCIAS

- [1] CÁTEDRA, M. F.; ARRIAGA, J. P. *Cell Planning for Wireless Communications*. Mobile Communications Series, 1ª Edição, Norwood. Artech House, 1999.
- [2] NESKOVIC, A. Modern Approaches in Modeling of Mobile Radio Systems Propagation Environment. *IEEE Communications Surveys*, v. 3, n° 3, p. 2-12, 2000.
- [3] RAHMAT-SAMII, Y; MICHIELSEN, E. *Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithm*, John Willey & Sons Inc., New York, 1999.
- [4] RAHMAT-SAMII, Y. Genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) in engineering electromagnetic. 17th IEEE International Conference on Applied Electromagnetics and Communications – ICECom 2003, 2003
- [5] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. *Regulamento Sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz*, Anexo à Resolução n° 303, Brasil, 2002.
- [6] ICNIRP, *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*, Health Physics 74 (4), p. 494-522, 1998
- [7] TAFLOVE, A.; HAGNESS, S. C. *Computation Electrodynamics: the Finite-Difference Time-Domain Method*. 2ª Edição, Artech House, 2000.
- [8] RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*, (tradução Daniel Vieira, revisão técnica Luiz Carlos Pessoa Albini). 2ª Edição. São Paulo, Pearson Prentice Hall, 2009.
- [9] RODRIGES, M. E. C. *Técnica de Traçado de Raios em Três Dimensões para Cálculo de Campos em Ambientes Interiores e Exteriores*. Rio de Janeiro, 2000. Dissertação de Mestrado, PUC-RJ.

- [10] SAUNDERS, S. R. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. 1^a Edição, Wiley & Sons, 1999.
- [11] MARTINS, R. A. *Modelagem e Medições de Ondas de Rádio para Predição de Perda de Propagação em Ambientes Urbanos*. Rio de Janeiro, 2006. Tese de Doutorado – UFRN.
- [12] ZARKOVIC, J.; STOJKOVIC, P.; NESKOVIC, N. 3D Statistical Propagation Model for Indoor WLAN Radio Coverage. In: 19th Telecommunications Forum (TELFOR 2011), 2011, p. 461-464.
- [13] ALLSEBROOK, K; PARSON, J. D. Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in VHF and UHF Bands. *IEEE Proc.*, v. 124, p. 95-102, 1977.
- [14] ALLSEBROOK, K; PARSON, J. D. Mobile Radio Propagation in British Cities at Frequencies in VHF and UHF Bands. *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, v. 26, p. 313-322, 1977.
- [15] OKUMURA, et al. Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land-Mobile Radio Service. *Rev. Electrical Communication Lab.*, Vol. 16, p. 825-873, 1968.
- [16] HATA, M. Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services. *IEEE Trans. On Vehicular Technology*, v. 29, p. 317-325, Agosto 1980.
- [17] EURO-COST 231, Urban Transmission Loss Models for Small-Cell and Micro-Cell Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz Bands, *Propagation Models Report*, n° COST231 TD(90) 119, revisão 1, 1991.
- [18] LEE, W. C. Y. *Mobile Communication Design Fundamentals*, 2^a Edição, Nova Iorque, John & Wiley, 1993.
- [19] IBRAHIM, M. F.; PARSONS, J. D. Signal Strength Prediction in Built-Up Areas. Part 1: Median Signal Strength. *IEE Proc. Communications, Radar and Signal Processing*, v. 130, Part F, n° 5, p. 377-384, 1983.
- [20] PARSON, J. D. *The Mobile Radio Propagation Channel*, Londres. Pentech Press, 1992.
- [21] MCGEEHAN, J. P; GRIFFITHS, J. Normalized Prediction Chart for Mobile Radio Reception. *Proc. 4th International*

- Conf. on Antennas and Propagation 1985, IEE Conference Publication*, n° 248, p. 395-399, 1985.
- [22] ATEFI, A.; PARSONS, J. D. Urban Radio Propagation in Mobile Radio Frequency Bands. *Proc. Comms 86, Birmingham, IEE Conference Publication*, n° 262, p. 13-18, 1986.
- [23] RÁBANOS, H. J. M. *Comunicaciones Móviles*. Centro de Estudios Ramón Areces, Madrid, 1997
- [24] IKEGAMI, F; et al. Propagation Factors Controlling Mean Field Strength on Urban Streets. *IEEE Trans. On Antennas and Propagation*, v. 32, p. 822-829, 1984.
- [25] WALFISCH, J; BERTONI, H. L. A Theoretical Model of UHF Propagation in Urban Environments. *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, v. 36, p. 1788-1796, 1988.
- [26] MACIEL, L. R.; BERTONI, H. L.; XIA, H. H. Unified approach to prediction of propagation over buildings for all ranges of base station antenna height. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 42, n° 1, p. 41-45, 1993.
- [27] BERTONI, H; et al. UHF Propagation Prediction for Wireless Personal Communication. *Proc. IEEE*, v. 82, n° 9, p. 1333-1356, Setembro 1994.
- [28] ERCEG, V.; HARI, K.S.; et al., Channel models for fixed wireless applications. *Tech. rep., IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*. Jan. 2001.
- [29] UNIÃO INTERNACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Setor de Radiocomunicações), *Recomendações ITU-R*. Disponível em: <http://www.itu.int/rec/R-REC-P/en>
- [30] STUTZMAN, W. L.; THIELE, G. A. *Antenna Theory and Design*, 2ª Edição, Wiley, 1998.
- [31] YEE, K. S. Numerical Solution of Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's Equations in Isotropic Media. *IEEE Trans. Antenna and Propagation*, v. AP-4, n° 3, p. 302-307, Maio 1966.
- [32] CARPES, W. P. *Modèle Tridimensionnel par éléments finis destiné aux analyses de Compatibilité Electromagnétique et de*

- propagation d'ondes*. Paris, 2000. Tese de Doutorado – Universite de Paris XI (Paris-Sud).
- [33] FARRAR, A.; ADAMS, A. T. Characteristic Impedance of Microstrip by the Method of Moments, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, v. 18, n° 1, p. 65-66, Janeiro 1970.
- [34] DALLA'ROSA, A. *Modelagem e Otimização da Localização de Transmissores em Ambientes Interiores de Comunicação Sem Fio*. Florianópolis, 2007. Tese de Doutorado – UFSC.
- [35] GRUBISIC, S. *Predição de Campos em Ambientes Interiores utilizando a Técnica de Traçado de Raios*. Florianópolis, 2005. Dissertação de Mestrado – UFSC.
- [36] ZHU, H.; et al. A random-phase-assisted ray-tracing technique for wireless channel modeling. *Aces Journal*, v. 15, n° 3, p.126-133, Nov. 2000.
- [37] SEIDEL, S. Y.; RAPPAPORT, T. S. Site-specific Propagation Prediction for Wireless In-Building Personal Communication System Design. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, v. 43, p. 879-891, Nov. 1994.
- [38] ZHONG, J.; BIN-HONG, L.; WANG, H. X. Efficient ray-tracing methods for propagation prediction for indoor wireless communications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, v. 43, n° 2, p. 41-49, Abril 2001.
- [39] YANG, C. F.; WU, B. C., KO, C. J. A Ray-Tracing Method for Modeling Indoor Wave Propagation and Penetration. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, v. 46, p. 907-919, Junho 1998.
- [40] CAVALCANTE, A. M. *Estratégias Computacionais Aplicadas em Técnicas de Traçado de Raios 3D para o Aumento da Eficiência na Caracterização de Canais de Propagação de Redes Sem Fio*. Belém, 2007. Tese de Doutorado – UFPA.
- [41] TORRES, R. P. et al. CINDOOR: An Engineering Toll for Planning and Design of Wireless Systems in Enclosed Spaces, *IEEE Antennas Propagation Magazine*, v. 41, p. 11-22, Aug. 1999.
- [42] GRZONKA, M.; WTODZIMIERI; ZIENIUTYCZ. Two dimensional indoor ray tracing including geometrical theory of

- diffraction, *IEEE14th MIKON-2002*, v. 2, p. 437-440, Maio 2002.
- [43] SCHETTINO, D. N.; MOREIRA, F. J. S. A ray-tracing algorithm based on a double-tree image theory, *IEEE, IMOC 2001*, v. 1, p.199-202, 2001.
- [44] ZHENGQING, Y; ISKANDER, M. F.; ZHIJUN, Z. Outdoor/indoor propagation prediction for complex wall and window structures using ray-tracing models, *58th IEEE Vehicular Technology Conference VTC 2003*, v. 1, p. 154-157, Outubro 2003.
- [45] McNAMARA, D.A., PISTORIUS, C. W. I.; MALHERBE, J. A. *Intoduction to the Uniform Theory of Diffraction*. Boston, Artech House, 1990.
- [46] KELLER, J. B. Geometrical theory of diffraction. *J. Opt. Soc. Amer.*, v. 52, n° 2, pp. 116-130, Fevereiro 1962.
- [47] KOUYOUMJIAN, R. G.; PATHAK, P. H. A UTD of Diffraction for an Edge in a Perfectly Conducting Surface, *Proc. IEEE*, v. 62, n° 11, Novembro 1974, pp. 1448-1461.
- [48] GRUBISIC, S.; CARPES, W. P.Jr.; Lima, C. B.; Kuo-Peng, P. Ray-Tracing propagation model using Image Theory with an accurate approximation for transmission rays through walls. In: 15th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields - COMPUMAG 2005, 2005, Shenyang/China. *Anais de Congresso 2005*. v. 3. p. 208-209.
- [49] GRUBISIC, S.; CARPES, W. P. Jr.; BASTOS, J. P. A. Novo tratamento para raios transmitidos na Técnica de Traçado de Raios utilizando a Teoria das Imagens. In: XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT'05 (04 a 08 de setembro), 2005, Campinas/SP. *Anais de Congresso 2005*. v. 1. p. 910-915.
- [50] GRUBISIC, S.; CARPES, W. P. Jr.; LIMA, C. B.; KUO-PENG, P. Ray-Tracing Propagation Model Using Image Theory With a New Accurate Approximation for Transmitted Rays Through Walls. *IEEE Transactions on Magnetics*, USA, v. 42, n. 4, p. 835-838, 2006.

- [51] SCHETTINO, D. N. *Métodos Assintóticos para Predição Banda Larga da Cobertura Radioelétrica em Ambientes Urbanos*. Belo Horizonte, 2009. Tese de Doutorado – UFMG.
- [52] YANG, C.-F.; KO, C.-J., WU, B.-C. A free space approach for extracting the equivalent dielectric constants of the walls in buildings. In: *IEEE AP-S Int. Symp. URSI Radio Sci. Meet., Baltimore*, Julho 1996, pp. 1036–1039.
- [53] AHMED, Y.; HAO, Y. Finding the Incidence Angle for Rays Refracted Through Multiple Dielectric Layers. In: *The Second European Conference on Antennas and Propagation EuCAP 2007*, 11-16 Nov. 2007.
- [54] SON, H. W.; MYUNG, N. H. A Deterministic Ray Tube Method for Microcellular Wave Propagation Prediction Model. *IEEE Trans. Antennas Propagation*, v. 47, p. 1344-1350, Agosto 1999.
- [55] SCHETTINO, D. N. *Técnica Assintótica para a Predição de Cobertura Radioelétrica*. Belo Horizonte, 2002. Dissertação de Mestrado – UFMG.
- [56] LIMA, C. B. *Análise de dispositivos eletromagnéticos para hipertermia usando o método FDTD*. Florianópolis, 2006. Tese de Doutorado – UFSC.
- [57] ALVES, F. A. *Modelo 2,5D de Predição de Propagação para Ambientes Interiores Utilizando o Método de Traçado de Raios*, *Dissertação de Mestrado*. Natal, 2005. Dissertação de Mestrado – UFRN.
- [58] PRICE, K. V., STORN, R. M., LAMPINEN, J. A. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization*. Natural Computing Series. Springer-Verlag, 2005.
- [59] CASTRO, L. N. *Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications*. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, 2006.
- [60] COELHO, G. P. *Redes Imunológicas Artificiais para Otimização em Espaços Contínuos: Uma Proposta Baseada em Concentração de Anticorpos*. Campinas, 2011. Tese de Doutorado – UNICAMP.

- [61] SIERRA, M. R.; COELLO, C. A. C. Multi-objective particle swarm optimizers: a survey of the state-of-the-art. *International Journal of Computational Intelligence Research*, v. 2, n° 3, p. 287-308, 2006.
- [62] TAVARES, A. A., OTIMIZAÇÃO DE UM MOTOR DE RELUTÂNCIA SÍNCRONO COM BARREIRAS DE FLUXO, Dissertação de Mestrado, UFSC, 2005.
- [63] ÁVILA, S. L., Otimização Multiobjetivo e Análise de Sensibilidade para Concepção de Dispositivos. Florianópolis, 2006. Tese de Doutorado – UFSC.
- [64] GOLDBERG, D. E.; PARKER, J. K. KHOOGAR, A. R. Inverse Kinematics of Redundant Robots using Genetic Algorithms. *IEEE Proc.*, p. 271-276, 1989.
- [65] LEITE, J. V.; et al. Real Coding Genetic Algorithm for Jiles-Atherton Model Parameters Identification. *IEEE – Transactions on Magnetics*, v. 40, n° 2, p. 888-891, 2004.
- [66] ÁVILA S. L. *Algoritmos Genéticos Aplicados na Otimização de Antenas Refletoras*. Florianópolis, 2002. Dissertação de Mestrado – UFSC.
- [67] CHEN, C. H.; et al. A Novel Indoor UWB Antenna Array Design by GA. *IEEE International Conference on Future Computer and Communication*, p. 291-295, 2009.
- [68] VASCONCELOS, J. A.; TAKAHASHI, R. H. C.; SALDANHA, R. R.; RAMIREZ, J. A. Improvements in genetic algorithms. *IEEE – Transactions on Magnetics*, v. 37, n° 5, p. 3414–3417, Setembro 2001.
- [69] KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks*, v. 4, pp. 1942-1948, 1995.
- [70] MÜLLER, V. *Otimização de Layouts Industriais Através do Método Enxame de Partículas*. Santa Cruz do Sul, 2007. Dissertação de Mestrado – UNISC..
- [71] PARSOPOULOS, K.E.; VRAHATIS, M.N. Computing periodic orbits of nondifferentiable/discontinuous mappings through particle swarm optimization, *IEEE Swarm Intelligence Symposium, SIS '03*, pp. 34-41, 2003.

- [72] CABRAL, E.; GRUBISIC, S.; CARPES, W. P. Posicionamento Ótimo de Antenas Usando Ray-Tracing e PSO. *XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações SBrT 2009*, Anais de Congresso, 2009.
- [73] EBERHART, R. C.; SHI, Y. Particle Swarm Optimization: Developments, Applications and Resources. *Congress on Evolutionary Computation*, 2001, vol. 1, pp. 81-86, 2001.
- [74] RATNAWEERA, A.; HALGAMUGE, S. K.; WATSON, H. C. Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration coefficients, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 8, pp. 240-255, 2004.
- [75] DUAN, Y.; HARLEY, R. G.; HABETLER, T.G. Comparison of Particle Swarm Optimization and Genetic Algorithm in the Design of Permanent Magnet Motors. *IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference 2009, IPEMC '09*, Wuhan. Anais de Congresso, p. 822-825.
- [76] COELLO COELLO C. A.; LECHUGA, M. S. MOPSO: A proposal for multiple objective particle swarm optimization. In: *Congress on Evolutionary Computation (CEC'2002)*, v. 2, p. 1051–1056, Piscataway, New Jersey, May 2002. IEEE Service Center.
- [77] ZITZLER, E., DEB, K., THIELE, L. Comparison of multiobjective evolutionary algorithms: Empirical results. Massachusetts Institute of Technology. *Evolutionary Computation*, v. 8, n° 2, 173–195, 2000.
- [78] SANTOS, G.; CARPES W.P. Jr.; BASTOS, J.P.A.; GRUBISIC S. Study of a jamming system positioning using 2D Ray-Tracing technique associated with a Multi-Objective Particle Swarm Optimizer. In: *The 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation – CEFC 2010*, 9 à 12 de maio de 2010, Chicago, Illinois, USA.
- [79] SANTOS, G.; GRUBISIC, S.; CARPES, W. P. Jr. Planejamento de sistemas bloqueadores de celular em ambientes interiores utilizando traçado de raios e otimização estocástica multi-objetivo, MOMAG2010, Anais de Congresso, 2010.

- [80] SANTOS, G. GRUBISIC, S. CARPES W. P. Jr., Design of jamming systems through a multi-criterion approach: Assessing the optimal antenna positioning oh high complexity indoor environments, *18th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields – COMPUMAG 2011*, vol.1, p. 1 a 2, 12 a 15 de Julho de 2011, Sydney/Austrália.
- [81] JEMAI, J; et all. Calibration of an Indoor Radio Propagation Prediction Model at 2.4 GHz by Measurements of the IEEE 802.11b, *IEEE. Veic. Tech. Conf.*, vol. 1, pp 2000 743-754, Jun 2005.
- [82] YUN Z. An Integrated Method of Ray Tracing and Genetic Algorithm for Optimizing Coverage in Indoor Wireless Networks, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, VOL. 7, 2008.
- [83] KOUTITAS, G.; SAMARAS, T., Exposure Minimization in Indoor Wireless Networks. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2010.
- [84] GRUBISIC, S.; CARPES, W. P. Jr.; BASTOS, J. P. A. Aplicação de um Modelo de Posicionamento Ótimo de Antenas utilizando Traçado de Raios Associado a Algoritmo Genético. *MOMAG 2008* (13°. SBMO Simpósio de Microondas e Optoeletrônica/8°. CBMAG Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo), 2008, Florianópolis/SC. Anais de Congresso, 2008. v. 1. p. 1089-1092.
- [85] GRUBISIC, S.; CARPES, W. P. Jr. Optimization Model for the Antenna Position in Indoor Environment Using 2D Ray-Tracing Technique With a Real Coded Genetic Algorithm. In: *The 13th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation CEFC 2008*, 2008, Atenas/Grécia. Anais de Congresso, 2008. v. 1. p. 54-54.
- [86] GRUBISIC, S.; CARPES, W. P. Jr.; BASTOS, J. P. A. Optimization Model for Antenna Positioning in Indoor Environments Using 2-D Ray-Tracing Technique Associated to a Real-Coded Genetic Algotithm. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 45, p. 1626-1629, 2009.
- [87] YANG, S.-Y.; SEO, D.-W.; MYUNG, N.-H. Optimal Location and Number of Access Points based on Ray-Tracing and

Particle Swarm Optimization. In: 2010 International Symposium on Antennas and Propagation, Macau, China, Novembro 2010.

- [88] GRUBISIC, S. SANTOS, G. CABRAL, E. CARPES W.P. Jr., Model for antenna Positioning in Indoor Environments Using 2-D Ray-Tracing Technique Associated to a Particle Swarm Optimizer, *17th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields – COMPUMAG 2009*, vol.1, p. 486-487, 22 à 26 de novembro de 2009, Florianópolis/Santa Catarina/Brazil – (resumo expandido).
- [89] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES, *Norma de Uso do Bloqueador de Sinais de Radiocomunicações*, Anexo à Resolução n° 308, Brasil, Setembro 2002.