

IPL

escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria

Politécnico de Leiria

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Eletrónica e

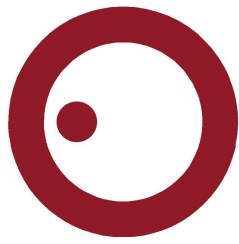
Telecomunicações

**FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DO
DESEMPENHO ELECTROMAGNÉTICO DE
EDIFÍCIOS USANDO BIM**

JOÃO SANTOS LOURO

Leiria, Novembro 2020

Esta página foi propositadamente deixada em branco.



IPL

escola superior de tecnologia e gestão
instituto politécnico de leiria

Politécnico de Leiria

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Eletrónica e

Telecomunicações

**FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DO
DESEMPENHO ELECTROMAGNÉTICO DE
EDIFÍCIOS USANDO BIM**

JOÃO SANTOS LOURO

Number: 2182427

Dissertação realizada sob a orientação do Professor Doutor Rafael F. S. Caldeirinha (rafael.caldeirinha@ipleiria.pt), do Professor Doutor Hugo F. P. Rodrigues (hrodrigues@ua.pt) e do Professor Doutor Telmo R. C. C. Fernandes (telmo.fernandes@ipleiria.pt).

Leiria, Novembro 2020

Esta página foi propositadamente deixada em branco.

ORIGINALIDADE E DIREITOS DE AUTOR

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizada, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Eletrónica e Telecomunicações, no ano letivo 2019/2020, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Esta página foi propositadamente deixada em branco.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho de dissertação é um processo algo solitário, porém os resultados obtidos devem-se também a um conjunto de pessoas que me rodearam durante este período e às quais quero agradecer.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Rafael Caldeirinha, pela dedicação, orientação, apoio ao longo de todas as fases deste projeto, sugestões propostas, conhecimentos transmitidos e prontidão no esclarecimento de toda e qualquer dúvida.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Hugo Rodrigues, pela pronta disponibilidade na preparação de projetos Revit, para toda e qualquer simulação efetuada neste trabalho de dissertação.

Ao meu orientador Prof. Doutor Telmo Fernandes, pelo apoio e pelas revisões efetuadas a esta dissertação.

Ao meu colega de projeto de investigação *Hybrid Log Shield* (HLS), Bruno Tribovane, pela pronta colaboração no tratamento de resultados e outras tarefas adjacentes, pela calma perante qualquer situação e pelo silêncio durante o trabalho.

Aos restantes colegas do grupo de investigação pelo bom tom de trabalho que se faz padecer e pela prontidão em facultar conhecimentos, ferramentas e até alguns períodos de aconselhamento textual.

A todos, sem exceção, um grande agradecimento.

Esta página foi propositadamente deixada em branco.

RESUMO

Esta dissertação apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta que permite a simulação de cobertura rádio nos mais diferenciados cenários, nomeadamente, perante barreiras eletromagnéticas genéricas, interior de edifícios e áreas adjacentes.

A ferramenta desenvolvida, permite importar informação presente em qualquer modelo do tipo *Building Information Modelling* (BIM) para o ambiente de simulação elaborado em MatLab. Esta importação utiliza a biblioteca *IfcOpenShell* através da linguagem *Python* como ferramenta de conversão de informação BIM para ficheiros CSV.

Cada elemento construtivo presente nos modelos BIM é simulado através do módulo de simulação de propagação em elementos multicamada, o que permite fazer uma grande aproximação ao comportamento real de elementos que apresentem este tipo de configuração.

O algoritmo traçado de raios que permite a simulação de cobertura em 3D, tem como base o método das imagens para o cálculo de trajetórias. Este permite a simulação da componente direta e de reflexões de primeira, segunda e terceira ordens.

De forma a validar a ferramenta de simulação foram efetuadas medições de cobertura rádio em dois cenários distintos. O cenário A é composto por duas paredes exteriores e uma laje (chão) e o cenário B é composto por uma caixa quadrangular de madeira em toda a sua constituição. A gama de frequências utilizada nesta medições está compreendida entre 680 MHz e 6 GHz, representando assim medições de banda larga. A frequência utilizada na simulação é a frequência do meio da banda, sendo o valor 3.34 GHz.

Esta página foi propositadamente deixada em branco.

ABSTRACT

This dissertation presents the development of a tool that allows simulation of radio coverage in the most diverse scenarios, specially, through generic electromagnetic barriers, inside of buildings and in adjacent areas.

The developed tool allows to import data that is present in any BIM model for the simulated environment created in MatLab. This input data uses the library IfcOpenShell through the python language as a information cover tool from BIM to CSV files and import to MatLab structures.

Every constructive element present in BIM models is simulated using the propagation module in multilayered elements, which allows the approximation to real behaviour of the elements that are present in this type of configuration.

The ray tracing algorithm that enable the 3D covered simulation uses the image method for trajectory calculation. This allows the simulation of the direct component and the reflections of up to third order.

In order to validate the simulation tool, radio measurements were carried out in two different scenarios. Scenario A is constituted of two exterior walls and one slab (floor), and scenario B is one quadrangular box, entirely made of wood. The frequency band established in these measurements is between 680 MHz and 6 GHz, characterizing wideband measurements. The frequency considered in the simulation is in the middle of the range, which value is 3,34 GHz.

Esta página foi propositadamente deixada em branco.

ÍNDICE

Originalidade e Direitos de Autor	i
Agradecimentos	iii
Resumo	v
Abstract	vii
Índice	ix
Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xvii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Âmbito e Objetivos	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 Introdução	5
2.2 Conceito de BIM	5
2.3 Formato IFC	8
2.4 Mecanismos de Rádio Propagação	9
2.5 Métodos de Traçado de Raios	10
2.5.1 Método das Imagens	11
2.5.2 Método de Shooting and Bouncing Ray (SBR)	11
2.5.3 Método Híbrido	12
2.5.4 <i>Minimum Ray Launching Maximum Accuracy</i> (MRLMA)	12
2.5.5 Smart 3D Traçado de raios	13
2.5.6 Método da força bruta	13
2.5.7 Triangulação	14
2.6 Métodos de Aceleração	15
2.6.1 Gráfico de Visibilidade	15
2.6.2 Método Binary Space Partitioning (BSP)	16
2.6.3 Método <i>Angular Z-Buffer</i> (AZB)	18

2.6.4	Space Volumetric Partitioning (SVP)	19
2.6.5	AZB e SVP (Híbrido)	20
2.7	Análise e Comparação	20
3	MÓDULO DE CONVERSÃO IFC	25
3.1	Introdução	25
3.2	Sub-módulo em Python	26
3.3	Sub-módulo em MatLab	32
3.4	Conclusões	34
4	SIMULADOR DE ELEMENTOS MULTICAMADA	35
4.1	Introdução	35
4.2	Descrição da Ferramenta de Simulação	36
4.3	Adaptações Efetuadas	39
4.4	Conclusões	41
5	TRAÇADO DE RAIOS	43
5.1	Introdução	43
5.2	Método das Imagens	44
5.3	Cenário de Simulação	45
5.4	Conceitos Base do Traçado	47
5.5	Antenas	49
5.6	Transmissão direta e indireta	52
5.7	Reflexão de Raios	55
5.8	Pré-validação da ferramenta - Barreira de troncos	59
5.9	Conclusões	64
6	VALIDAÇÃO E RESULTADOS	65
6.1	Introdução	65
6.2	Câmara Anecoica	65
6.3	Caraterização do sistema de medição	66
6.4	Calibração e Normalização	69
6.5	Cálculo do centro de fase das antenas	70
6.6	Resolução Temporal/Espacial	73
6.7	Cenário A	74

6.7.1	Resultados de simulação	77
6.7.2	Comparação de resultados (Medidos vs Simulados) . .	80
6.8	Cenário B	89
6.8.1	Cenário de Simulação	92
6.8.2	Resultados de simulação	93
6.8.3	Comparação de resultados (Medidos vs Simulados) . .	96
6.9	Conclusões	105
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	107
7.1	Introdução	107
7.2	Sumário do trabalho desenvolvido	107
7.3	Contribuição científica	109
7.4	Sugestões de trabalho futuro	109
	BIBLIOGRAFIA	111
	<i>Anexos</i>	
A	ANEXO A	122
B	ANEXO B	123
	DECLARAÇÃO	125

Esta página foi propositadamente deixada em branco.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	A disposição do BIM perante cada processo de produção [6].	6
Figura 2	Perda de valor no processo [6].	7
Figura 3	Excerto de ficheiro IFC 2x3.	9
Figura 4	Fenómenos de Rádio Propagação.	10
Figura 5	Método das Imagens (reflexão).	11
Figura 6	MRLMA - lançamento de raios (Pin Cushion).	12
Figura 7	Tubo de raios [22].	14
Figura 8	Triangulação de um ambiente de simulação [24].	15
Figura 9	Zonas de transmissão [25].	16
Figura 10	Gráfico de Visibilidade [25].	17
Figura 11	Divisão de um espaço (a) em subdivisões (b) [27].	18
Figura 12	SVP completo [32].	19
Figura 13	Diagrama de blocos global (Módulo de Conversão).	26
Figura 14	Fluxograma simplificado de importação de ficheiro IFC.	28
Figura 15	Fluxograma detalhado da importação de dados.	30
Figura 16	Exemplo de um edifício básico após triangulação.	32
Figura 17	Diagrama de blocos global (Simulador Multicamada).	36
Figura 18	Interface gráfica da ferramenta de simulação de multi-dielétricos.	37
Figura 19	Estrutura multicamada (homogéneas) [45].	38
Figura 20	Resultados da simulação exemplificativa	38
Figura 21	Janela de simulação de elementos multicamada	40
Figura 22	Camadas de cada elemento construtivo	41
Figura 23	Diagrama de blocos global (Traçado de Raios).	44
Figura 24	Edifício importado para o MatLab.	46
Figura 25	Faces de relevância dos elementos perante o Tx.	47
Figura 26	Diagramas de radiação planares.	50
Figura 27	Diagrama de Radiação 3D (dB).	51
Figura 28	Refração (disposição angular).	53

Figura 29	Resultado de simulação exemplificativa - Componente principal.	54
Figura 30	Simulação da reflexão de 1 ^a ordem.	57
Figura 31	Árvore de Imagens de reflexões.	57
Figura 33	Barreira na Câmara Anecóica.	60
Figura 32	Modelo de Simulação em CST MICROWAVE STUDIO®.	60
Figura 34	Resultados de medições e simulação CST (1 camada).	61
Figura 35	Resultados de simulação (1 camada) - Visualização 3D.	61
Figura 36	Resultados de simulação (1 camada) - Visualização de topo.	62
Figura 37	Resultados de simulação (3 camadas) - Visualização 3D.	62
Figura 38	Resultados de simulação (3 camadas) - Visualização de topo.	63
Figura 39	Resultados de simulação CST - barreira com 3 camadas.	63
Figura 40	Diagrama representativo de esquema de medição. . . .	66
Figura 41	Sistema de medição no interior da Camara Anecóica. .	67
Figura 42	Diagramas de radiação planares - Antena Emissora. .	68
Figura 43	Diagramas de radiação planares - Antena Recetora. .	68
Figura 44	Medições na câmara anecóica (1, 2, 3 e 4 metros). . .	71
Figura 45	Esquema para determinação de centro de fase.	71
Figura 46	Cenário de Medição Outdoor.	74
Figura 47	Dimensões Cenário A.	75
Figura 48	Modelo BIM (Revit).	75
Figura 49	Posição física do recetor para cada medição (Cenário A).	76
Figura 50	Resultado de Simulação - RSSI (Cenário A).	77
Figura 51	Resultado de Simulação - Componente Principal (Cenário A).	78
Figura 52	Resultado de Simulação - 1 ^a Reflexão (Cenário A). . .	78
Figura 53	Resultado de Simulação - 2 ^a Reflexão (Cenário A). . .	79
Figura 54	Resultado de Simulação - 3 ^a Reflexão (Cenário A). . .	79
Figura 55	Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto A.	81
Figura 56	Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto A.	82

Figura 57	Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto B.	83
Figura 58	Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto B.	84
Figura 59	Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto C.	85
Figura 60	Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto C.	86
Figura 61	Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto D.	86
Figura 62	Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto D.	87
Figura 63	Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto E.	88
Figura 64	Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto E.	89
Figura 65	Cenário de Medição (exterior)	90
Figura 66	Cenário de Medição (interior)	90
Figura 67	Dimensões Verticais (Cenário B).	91
Figura 68	Dimensões Horizontais (Cenário B).	91
Figura 69	Cenário de Medição Outdoor	92
Figura 70	Modelo BIM (Cenário B).	92
Figura 71	Modelo BIM com ambiente envolvente.	93
Figura 72	Resultado de Simulação - RSSI	94
Figura 73	Resultado de Simulação - Componente Principal	95
Figura 74	Resultado de Simulação - 1 ^a Reflexão	95
Figura 75	Resultado de Simulação - 2 ^a Reflexão	96
Figura 76	Resultado de Simulação - 3 ^a Reflexão	96
Figura 77	Pontos de Medição e Comparação (A, B e C)	97
Figura 78	Comparação entre medição e simulação - Cenário B, Ponto A.	98
Figura 79	Representação de componentes chegadas - Cenário B, Ponto A.	100
Figura 80	Comparação entre medição e simulação - Cenário B, Ponto B.	101

LISTA DE FIGURAS

Figura 81	Representação de componentes chegadas - Cenário B, Ponto B.	103
Figura 82	Comparação entre medição e simulação - Cenário B, Ponto C.	104
Figura 83	Representação de componentes chegadas - Cenário B, Ponto C.	105
Figura 84	Janela de importação e conversão BIM	123
Figura 85	Janela de simulação	123
Figura 86	Janela de visualização de resultados	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Métodos de traçado de raios (resumo).	22
Tabela 2	Permitividade Relativa dos Materiais - Cenário A . . .	76
Tabela 3	Informação detalhada - Cenário A, Ponto A.	81
Tabela 4	Informação detalhada - Cenário A, Ponto B.	83
Tabela 5	Informação detalhada - Cenário A, Ponto C.	85
Tabela 6	Informação detalhada - Cenário A, Ponto D.	87
Tabela 7	Informação detalhada - Cenário A, Ponto E.	88
Tabela 8	Permitividade Relativa dos Materiais - Cenário B . . .	93
Tabela 9	Informação detalhada - Cenário B, Ponto A.	99
Tabela 10	Informação detalhada - Cenário B, Ponto B.	102
Tabela 11	Informação detalhada - Cenário B, Ponto C.	104
Tabela 12	API's de manipulação de ficheiros IFC (BIM).	122

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

O BIM, que vem do inglês *Building Information Modeling* é uma metodologia chave, que permite aumentar a produtividade e integração entre várias disciplinas, tais como: Arquitetura, Engenharia e toda a componente de Construção e Manutenção (AECO) [1]. O BIM visa a partilha de informações que são geradas e mantidas ao longo do ciclo de vida de um edifício, ou seja, o modelo BIM criado é o repositório virtual de todas as características de um edifício [2], que vai para além da representação gráfica disponibilizada pelo desenho auxiliado por computador (CAD) [3]. Este repositório concentra e gere toda a informação. Portanto, desenvolver uma solução capaz de combinar o mundo real com um modelo computadorizado é um trabalho com bastante relevo científico no que toca a operações de construção, manutenção e gestão de construções [4].

Um dos formatos mais utilizados para a partilha de informação de modelos BIM, com os demais intervenientes de um processo construtivo, é o formato aberto e gratuito de nome IFC (*Industry Foundation Classes*). Apesar de ser o formato mais capaz para tal função, ainda não possibilita o grau de interoperabilidade suficiente que permita a inexistência de lacunas na transferência de modelos entre *softwares*, porém o número de lacunas é cada vez menor, o que torna o seu nível de aplicabilidade cada vez maior.

Nos últimos anos têm sido adicionadas muitas informações a tais bancos de dados, porém ainda não estão disponíveis informações detalhadas sobre as características de propagação de ondas de rádio tanto nos edifícios como nos materiais que constituem os edifícios. Com a implantação de um número cada vez maior de serviços baseados em rádio, como o 5G, espera-se que essas informações sejam extremamente importantes no futuro, tanto para o

planeamento de redes móveis no interior de edifícios, como para o estudo e avaliação da exposição humana à radiação eletromagnética. Para superar a falta de informação existente, é proposta a elaboração de uma ferramenta capaz de ler dados de geometria e de elementos de construção presentes em modelos BIM. Como funcionalidade adjacente, é proposta a integração de uma ferramenta de simulação de traçado de raios capaz de prever a cobertura de rádio em ambientes interiores. A ferramenta de traçado de raios leva em consideração não só a componente direta, mas também reflexões e tem em consideração a natureza dielétrica multicamada das paredes e outros elementos presentes em edifícios típicos para uma ampla gama de frequências.

Esta ferramenta será importante na conceção de novas construções de edifícios, definindo as melhores soluções construtivas para cada caso de estudo e unificando as várias vertentes, tais como, arquitetura, construção tradicional e ferramentas digitais. Será possível projetar edifícios com comportamento controlado face à propagação de ondas rádio, permitindo por exemplo, aumentar a transparência eletromagnética em frequências rádio utilizadas em comunicações de emergência e blindagem nas restantes frequências, diminuindo assim a exposição humana a radiação.

1.2 ÂMBITO E OBJETIVOS

Grande parte das ferramentas de simulação de cobertura rádio em edifícios presentes no mercado, são pagas e apresentam pouca abrangência no que concerne à importação de dados de diferentes tipos de fontes. Destas ferramentas existentes, nenhuma até hoje permite a importação de modelos BIM de forma direta e rápida.

Nas ferramentas de modelação e gestão de dados BIM, verifica-se também que a maioria são ferramentas pagas, ainda que sejam apenas para tratamento de ficheiros exportados por estes *softwares*, nomeadamente, o formato IFC aqui abordado.

Perante as condições apresentadas, o objetivo deste trabalho de dissertação é desenvolver e validar uma ferramenta de simulação de cobertura rádio em edifícios e também em quaisquer outras barreiras eletromagnéticas genéricas.

Assim, esta ferramenta deve seguir a abordagem gratuita, dinâmica e de código aberto, sendo por isso necessário utilizar na sua globalidade ferramentas de suporte também gratuito e ferramentas já desenvolvidas cujo o seu caráter permita a sua implementação e alteração.

O objetivo principal é, para além dos anteriores, o desenvolvimento de uma aplicação que possibilite a simulação de cobertura rádio em cenários descritos por modelos BIM, sendo por isso imprescindível a fácil manipulação e importação destes cenários. A aplicação deve permitir alterar todos os parâmetros de simulação, tais como, polarização, frequência de propagação, diagramas de radiação das antenas, resolução do espaço de simulação e outros parâmetros de relevância. A aplicação desenvolvida visa a junção e melhoria de várias ferramentas previamente desenvolvidas, tais como, uma ferramenta de simulação eletromagnética em elementos multicamada e uma ferramenta de traçado de raios.

Para validar a ferramenta desenvolvida, o objetivo é efetuar várias medições em diversos cenários, de modo a poder efetuar métricas de comparação e apresentar possíveis melhorias.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No que concerne à estrutura e organização desta dissertação, a mesma é dividida em 7 capítulos. O presente capítulo é referente à Introdução, onde são tecidas algumas considerações sobre o enquadramento e motivação do tema, indicando também o âmbito e objetivos.

O capítulo 2 é referente ao estudo do estado de arte e neste são apresentados os conceitos BIM e IFC definindo os aspetos mais importantes destes. Também é tratada a informação referente aos mecanismos de rádio propagação, algoritmos de traçado de raios existentes, bem como, métodos de aceleração destes.

No capítulo 3 é descrita a metodologia utilizada para a construção do módulo de conversão IFC, bem como as ferramentas utilizadas neste.

No capítulo 4 é feita a descrição detalhada da ferramenta de simulação eletromagnética em elementos multicamada já desenvolvida e são expostas as alterações efetuadas.

O capítulo 5 expõe a matéria do método de traçado de raios utilizado, mostrando as suas características e funcionalidades. São abordados conceitos como os cenários de simulação, antenas e fenômenos de propagação passíveis de simulação. É também apresentada uma pré-validação da ferramenta, com base em informação presente na literatura.

No capítulo 6, são apresentadas as características do sistema de medição utilizado para os aquisição de resultados experimentais, com o objetivo de validar a ferramenta desenvolvida. Assim, são apresentados os cenários de medição experimental, os resultados obtidos e a comparação com as simulações efetuadas para os mesmos cenários.

No capítulo 7 é apresentado um sumário do trabalho desenvolvido, as contribuições científicas e sugestões de trabalho futuro.

ESTADO DA ARTE

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o estudo do estado da arte e introdução de conceitos de pertinência para esta dissertação. Durante o estudo aprofundado das tecnologias e conhecimentos existentes, adquire-se as bases para uma correta e orientada execução do trabalho. Assim, primeiramente são expostos os conceitos BIM e IFC definindo os aspetos mais importantes destes e, depois, é tratada a informação referente aos mecanismos de rádio propagação, algoritmos de traçado de raios existentes, bem como métodos de aceleração destes.

2.2 CONCEITO DE BIM

O BIM, do inglês *Building Information Modelling*, é o conceito de partilha de informação entre vários profissionais para a melhoria de processos colaborativos no projeto, construção e manutenção de edifícios, enquanto que *Building Information Model* é o modelo virtual que contém todas as informações acerca de um edifício [5]. Deste modo, o primeiro refere-se a um processo e o segundo refere-se a um resultado do processo. Sendo que o BIM é uma das principais inovações da atualidade para a Arquitetura, Engenharia, Construção e Gestão de Edifícios (AECO), através do qual se torna possível a criação de modelos computacionais de edifícios de forma precisa e completa [5]. De tal modo, permite apoiar todas as fases de vida de um edifício, ou seja, desde o desenho conceptual até à remodelação/reabilitação e/ou demolição, como se pode verificar na Figura 1.

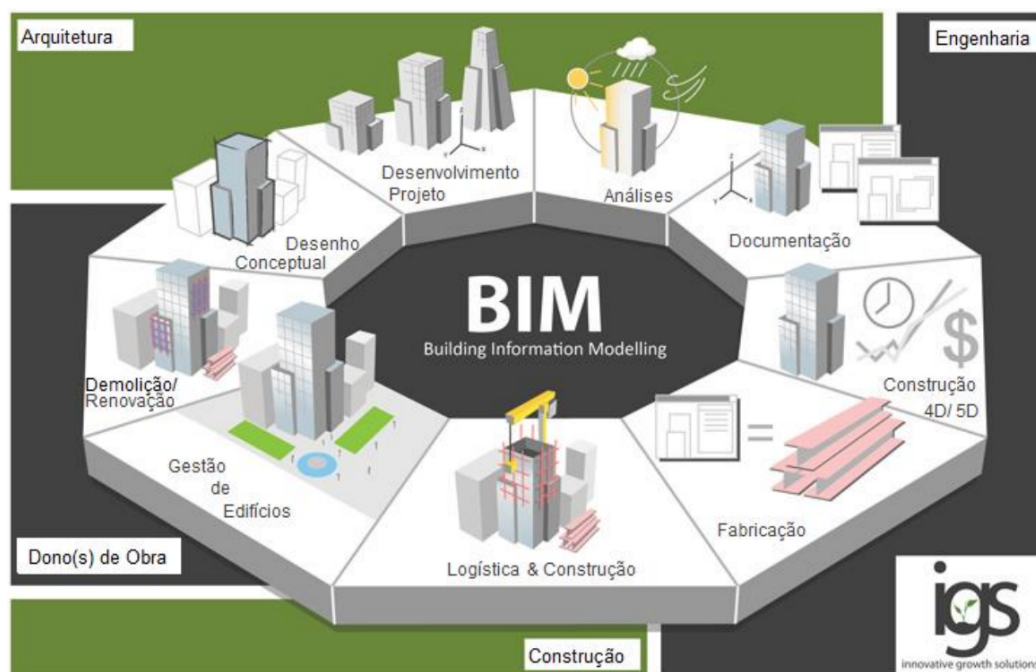


Figura 1: A disposição do BIM perante cada processo de produção [6].

Resumidamente, o BIM é um aglomerado de tecnologias e processos que visam a integração de toda a informação referente a um ou vários edifícios, o que permite para além de uma metodologia de partilha de informação e de comunicação entre os demais intervenientes no processo, facilita a renderização e visualização durante as diferentes fases do projecto, construção e gestão do edifício. Sabendo que oferece um novo paradigma de trabalho no que concerne à conceção e construção, o BIM em Portugal está a ser revolucionário. Neste país, a arquitetura urbanística está ainda bastante ligada a métodos de desenho CAD com modelações em 3D. Porém, já se encontra um início de modernização e alteração do paradigma para a nova abordagem BIM [7].

Através dos processos tradicionais é normal ocorrer perda de informação na transição entre as várias fases de um processo colaborativo, como se pode visualizar na Figura 2, enquanto que no BIM a transição entre fases é suavizada, o que diminui o tempo de trabalho e os custos associados, dado que torna o processo mais transparente. Esta centralização de informação que o BIM propõe, evidencia uma forma de trabalhar diferente que poderá ser uma barreira difícil de transpor, dado que os profissionais estão habituados a um regime de trabalho e por isso é necessário um período de adaptação [8]. Esta centralização possibilita o acesso facilitado à última versão existente, ou seja, impede a problemática confusão de várias versões existentes para o

mesmo modelo. A adoção e promoção do BIM enquanto doutrina de trabalho, refere-se à introdução de novos fluxos de trabalho, integrando o planeamento e ambiente colaborativo em todas as fases de vida de um edifício.

O BIM para além de todas as vantagens já mencionadas, apresenta também vantagens no que concerne à visualização e padronização do modo de trabalho, existindo uma vasta gama de *softwares* que permitem interagir com o modelo. Segundo o estudo efetuado em 2012 no Brasil [9], os *softwares* mais utilizados na modelação em arquitetura, são por ordem decrescente, Revit Architecture® seguido do ArchiCAD®.

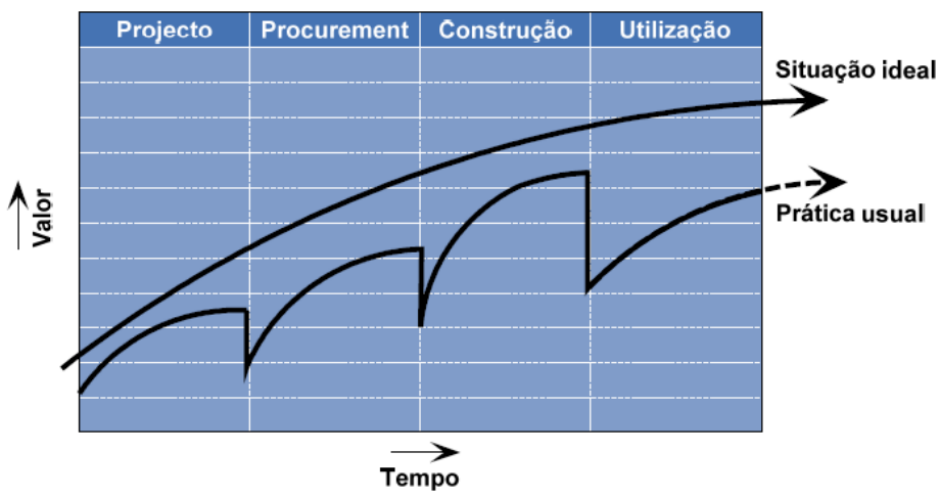


Figura 2: Perda de valor no processo [6].

O modelo BIM pode apresentar várias dimensões para além das grandezas físicas, nomeadamente, 4D, 5D, 6D e nD que podem representar respetivamente, custo estimado, gestão de edifícios e informações relativas à segurança e sustentabilidade. Nas seguintes dimensões espera-se que com este trabalho de dissertação e o seguimento do mesmo, futuramente, sejam incluídas características elétricas dos materiais, que permitirão calcular a resposta eletromagnética de um determinado edifício ou elemento construtivo quando irradiado por sinais rádio, como já é existente para cálculos de eficiência energética, por exemplo.

2.3 FORMATO IFC

O formato IFC do inglês *Industry Foundation Classes* é uma extensão standard internacional para a partilha de informação BIM. É aberto, neutro e com um padrão de especificações bem deliniado para o BIM, dado que permite a permuta de informação acerca das propriedades dos objetos e das suas relações, transporta propriedades alfanuméricas e propriedades dos objetos propriamente ditos, tais como, a composição materialística dos mesmos. O objetivo deste formato é promover e garantir a interoperabilidade entre aplicações, aumentando assim a produtividade e melhorando a comunicação, diminuindo o tempo de laboração e o custo, e aumentando a qualidade de um qualquer processo presente no ciclo de vida de um edifício [10, 11].

O IFC permite a transposição neutra da informação contida nos modelos BIM, em todas as dimensões neles existentes, incluindo as suas interdependências. Deste modo, o IFC permite fornecer o meio de comunicação para o desenvolvimento de modelos BIM através de diferentes *softwares*.

Existem diversos tipos de formatos de ficheiros IFC, sendo que, este estudo incide sobre o formato IFC-SPF e pode ser identificado pela extensão "*.ifc". A base conceptual deste formato específico pode ser consultada na Norma ISO 10303-21. Através desta instituem-se procedimentos padrão para a interpretação, representação e troca de informações em linguagem EXPRESS, sendo esta uma linguagem orientada a objetos co-relacionados [12]. Esta norma é vastamente conhecida por "STEP", do inglês "*Standard for the Exchange of Product model data*" e está dividida em partes distintas, sendo que cada parte tem o seu setor industrial a que mais se direciona. A estrutura protocolar que é aqui abordada é o número 21 (IFC-SPF). A sua estrutura é do tipo "STEP-FILE", ou seja, todos os ficheiros IFC utilizados neste trabalho de dissertação, são ficheiros "STEP", onde cada linha presente no ficheiro é uma instância em caracteres ASCII [13], como se pode verificar na Figura 3.

```

#255= IFCSHAPEREPRESENTATION(#102,'Body','SweptSolid',(#245));
#257= IFCPRODUCTDEFINITIONSHAPE($,$,#255);
#259= IFCSLAB('3npfg$tm0Y86sFo9qaQM7',#41,'Floor:Concrete-Commercial 362mm:345981',$
#262= IFCSLABTYPE('3098Cq8xiHrPCo0026FpEz',#41,'Floor:Concrete-Commercial 362mm',$,$,
#263= IFCMATERIAL('Concrete, Cast In Situ');
#264= IFCCOLOURRGB($,0.752941176470588,0.752941176470588,0.752941176470588);
#265= IFCSURFACESTYLERENDERING(#264,0.,$,$,$,IFCNORMALISEDRAIOMEASURE(0.5),IFCSPEC
#266= IFCSURFACESTYLE('Concrete, Cast In Situ',.BOTH.,(#265));
#268= IFCPRESENTATIONSTYLEASSIGNMENT(#266);
#270= IFCSTYLEDITEM($,#268,$);
#272= IFCSTYLEDREPRESENTATION(#97,'Style','Material',(#270));
#274= IFCMATERIALDEFINITIONREPRESENTATION($,$,#272),#263);
#277= IFCMATERIAL('Sand');
#278= IFCCOLOURRGB($,0.749019607843137,0.717647058823529,0.698039215686274);
#279= IFCSURFACESTYLERENDERING(#278,0.,$,$,$,IFCNORMALISEDRAIOMEASURE(0.5),IFCSPEC

```

Figura 3: Excerto de ficheiro IFC 2x3.

Dentro do formato IFC-SPF existem algumas versões, sendo a mais recente versão é a 4.2 lançada em 2019 [14]. Porém, a versão predominante no mercado e que mais *softwares* são compatíveis, é a versão IFC 2x3, pelo que é esta a utilizada neste trabalho.

2.4 MECANISMOS DE RÁDIO PROPAGAÇÃO

A propagação de ondas rádio, efetuada num determinado meio de propagação, sendo este caracterizado por três parâmetros elétricos: permeabilidade, condutividade e permitividade [15]. Em termos dos fenómenos de propagação eletromagnética que levam às perdas de percurso, os mais importantes e evidentes são: difração, reflexão, refração e dispersão [16]. Existindo uma trajetória direta entre um transmissor e um recetor, esta é chamada de linha de vista (LOS) e o raio que percorre esta trajetória é um raio direto. A difração é um fenómeno de propagação e pode ser explicado pelo principio de Huygen [17], evidenciando a existência de sinal em zonas de sombra, ocorrendo assim a partir de zonas limítrofes de obstáculos, como se pode verificar na Figura 4. Neste fenómeno, um raio pode separar-se em diversos raios difratados, o que aumenta a complexidade de simulações que incluam este fenómeno. A reflexão e refração são fenómenos de propagação que ocorrem na transição de um meio com determinadas características elétricas, para outro meio com características elétricas diferentes. Ambas as ondas refletidas e refratadas são provenientes da onda incidente e por isso têm a mesma frequência, sendo as suas direções definidas pela lei de Snell.

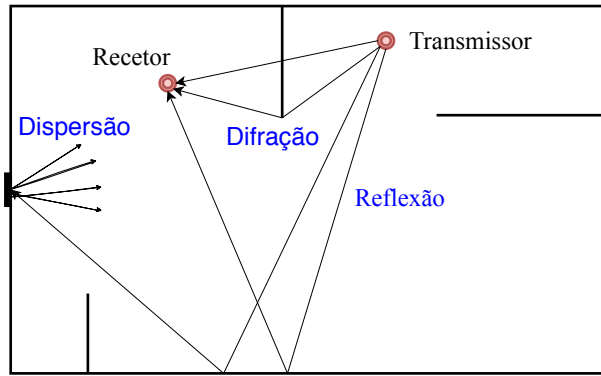


Figura 4: Fenómenos de Rádio Propagação.

No interior de edifícios existem diversos tipos de superfícies, sejam paredes ou mesmo mobiliário existente. Estas superfícies são por vezes bastante irregulares contendo, assim, algum nível de rugosidade, nomeadamente, as paredes com reboco rugoso. Estas rugosidades provocam o fenómeno de dispersão de raios, ou seja, tal como na difração, o raio incidente transforma-se numa grande quantidade de raios, que no caso da dispersão são refletidos na superfície rugosa.

2.5 MÉTODOS DE TRAÇADO DE RAIOS

Os métodos de traçado de raios baseiam-se essencialmente na determinação de raios (caminhos) entre o transmissor e um determinado recetor. No caso mais simples, e não existindo nenhum obstáculo entre estes dois pontos, o procedimento é mais rápido e fácil, dado que, é uma linha reta entre os pontos. Num cenário urbano ou dentro de um edifício, existem diversos obstáculos e superfícies, que promovem a existência de múltiplos percursos originados pelos fenómenos de reflexão, refração e difração. A determinação de todos os percursos possíveis não é um processo trivial, e é neste aspeto que são necessários algoritmos rápidos e com pouco peso computacional. Existem diversas técnicas de traçado de raios, tais como, método das Imagens, *Shooting and Bouncin Rays* (SBR), *Minimum Ray Launching Maximum Accuracy* (MRLMA), métodos híbridos, entre outros. Nesta secção são abordados cada um dos métodos mais relevantes.

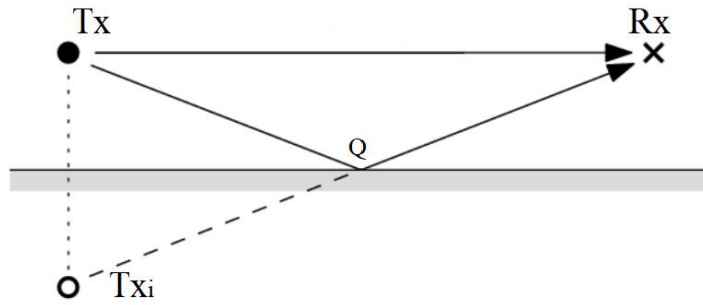


Figura 5: Método das Imagens (reflexão).

2.5.1 Método das Imagens

O método das imagens é utilizado para determinar a trajetória de um raio a iniciar em T_x e com término em R_x , refletindo numa superfície, como se pode verificar na Figura 5. Este método consiste no espelhamento de T_x em relação à superfície de reflexão, criando assim um ponto de transmissão virtual (T_{xi}). Unindo o ponto T_{xi} com o ponto R_x , é possível calcular a distância de percurso e consequentemente é também possível determinar o ponto de reflexão (Q). O método das imagens pode ser estendido para múltiplas e sucessivas reflexões, mantendo o procedimento, dado que é um método recursivo.

2.5.2 Método de Shooting and Bouncing Ray (SBR)

O traçado de todos os raios a partir do ponto transmissor é o fundamento base deste método. Este traçado é distribuído uniformemente em todas as direções, tal como seria com uma fonte isotrópica. Pode ser ilustrada através de uma esfera com centro no ponto de transmissão, onde esta é dividida em pequenas zonas chamadas *cross-sections*. Quanto maior a quantidade destas zonas também maior é o número de raios hipotéticos e por isso maior será a precisão do resultado. Um raio pode ser traçado diretamente do ponto de transmissão para o ponto de receção, ou pode ser refletido e difratado várias vezes até chegar ao ponto de receção. Deste modo, para cenários no interior de edifícios, torna-se impreterível a verificação de interseção de objetos. Este é um processo relativamente pesado e por norma ocupa mais do que 90% do tempo de processamento em aplicações básicas de traçado de raios [18]. Quando um raio é recebido, este é recebido na esfera de receção, deste modo,

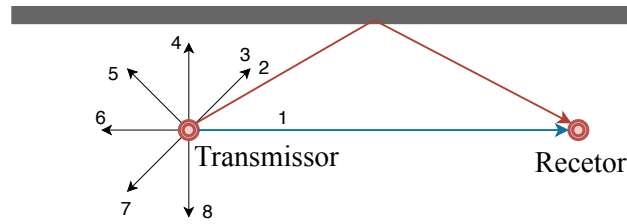


Figura 6: MRLMA - lançamento de raios (Pin Cushion).

a receção pode não ser feita no ponto exato (centro da esfera), pelo que faz deste um método com precisão limitada.

2.5.3 Método Híbrido

Comparativamente, o método das imagens apresenta maior precisão do que o método SBR. Deste modo, foi proposto um método híbrido, composto pelos dois anteriores [19]. O método base é o SBR, para determinar trajetórias válidas entre o Tx e o Rx. Após o conhecimento da trajetória e quais as superfícies de reflexão, é aplicado o método das imagens para calcular a trajetória exata com base na sequência de superfícies adquirida no processo anterior (reflexões, refrações e difrações). Assim, é possível tornar o algoritmo bastante mais rápido através da rapidez de procura em grande escala do SBR (ajuste grosso) e mantendo o preciosismo do método das imagens (ajuste fino).

2.5.4 Minimum Ray Launching Maximum Accuracy (MRLMA)

O algoritmo MRLMA [20] consiste no lançamento de vários raios em todas as direções a partir do Tx (Ray Launching) até ao receptor, recebendo assim o caminho direto (LOS) e o primeiro caminho indireto (NLOS). Considerando o cenário da Figura 6, o número de raios pode ser substancialmente reduzido a cada iteração.

Na zona angular do raio 1 e 2, em torno de Tx, são protagonizados raios com maior resolução angular, de modo a aumentar a precisão no que toca à esfera do Rx. Esta esfera é virtual e o seu tamanho faz variar a precisão do algoritmo, dado que quanto mais pequena for a esfera, maior será a exigência a nível computacional. O isolamento desta zona angular permite poupar muito tempo

de processamento no que toca às iterações de ajuste angular. Este processo de isolamento de zonas angulares é recursivo e a área isolada é diminuída substancialmente a cada iteração, até alcançar a precisão definida.

2.5.5 *Smart 3D Traçado de raios*

Este é um algoritmo utilizado para obter, matematicamente, o caminho entre um Tx e um Rx, reproduzindo os caminhos válidos seguindo o conceito da luz, mas no sentido inverso, ou seja, do Rx para o Tx [21]. É uma técnica idêntica ao MRMLA, porém apresenta algumas características diferenciadoras. O Tx envia raios espaçados horizontalmente $\frac{\pi}{60}$ radianos e, para cada um destes, envia raios espaçados verticalmente $\frac{\pi}{180}$ radianos. Estes raios permitem identificar a zona angular que corresponde aos raios que alcançam a zona do Rx, tanto por LOS como por reflexões. No segundo passo são enviados raios nas potenciais direções de Rx, com um espaçamento angular menor, o que permite uma melhor precisão. Após ter conhecimento do caminho mais aproximado, é calculado o caminho exato aplicando a lei de Snell.

2.5.6 *Método da força bruta*

Este método é mais indicado para ambientes de simulação bastante complexos [22]. Um diagrama de antena desejável é um diagrama que inclui os efeitos de elevação e azimute, estes são divididos em passos de ângulo iguais em redor do ponto central, que permitem que cada tubo de raio (ray tube) ocupe o mesmo espaço angular e permitem que todas as frentes de onda tenham a mesma forma a 1 metro do transmissor. Assim sendo cada tubo de raio é composto por 4 raios definidos por incrementos de θ e φ , formando assim células quadriláteras com resolução angular fixa $\Delta\theta$, onde θ é o ângulo de azimute, $\Delta\varphi$, onde φ é o ângulo em elevação de qualquer raio de cada tubo de raio [22], como se pode verificar na Figura 7.

O algoritmo primeiramente verifica as possibilidades de linha de vista (LOS), calculando a potência do sinal recebido para cada tubo de raio recebido. Após este primeiro passo, são traçados todos os tubos de raios nas suas respetivas

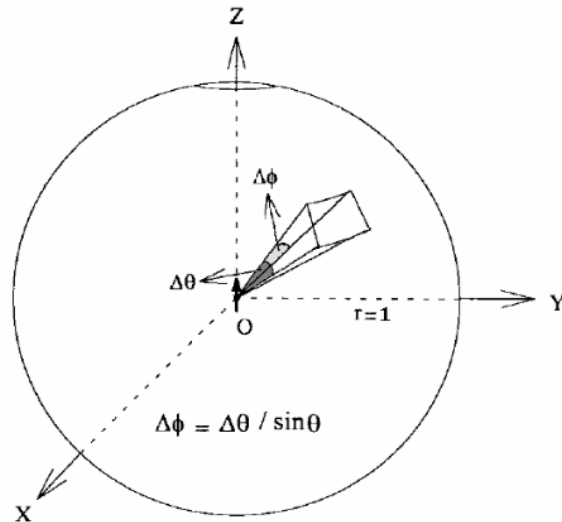


Figura 7: Tubo de raios [22].

direções a fim de detetar possíveis interseções com as faces da estrutura ou edifício presente no ambiente de simulação. Se não for detetada interseção, a pesquisa de interseção continua para os seguintes tubos de raio. Uma vez encontrada uma interseção, é efetuado o cálculo do tubo de raio transmitido e refletido. Os tubos de raio transmitidos e refletidos são memorizados para cálculo da mesma forma que os mesmos foram calculados até atingir a ordem de reflexões pretendida, ou até a intensidade do sinal estar abaixo de um determinado limite.

2.5.7 Triangulação

Esta técnica baseia-se na divisão do espaço de propagação em triângulos, não necessitando o conhecimento da informação de posicionamento do Tx e Rx. A triangulação é efetuada em ambiente 2D mas pode ser escalável para 3D [23]. O número de triângulos é decidido através do número de vértices das estruturas inseridas no ambiente de simulação, esquecendo assim as suas dimensões propriamente ditas, e focando-se na complexidade da estrutura em termos de forma. Na Figura 8 está representada a triangulação de um ambiente de simulação 2D com dois edifícios representados pelas linhas a cheio: quadrado e triângulo. Para definir os segmentos de reta que compõem estas estruturas e já que se trata de um processo de triangulação, os restantes lados dos triângulos estão definidos a tracejado.

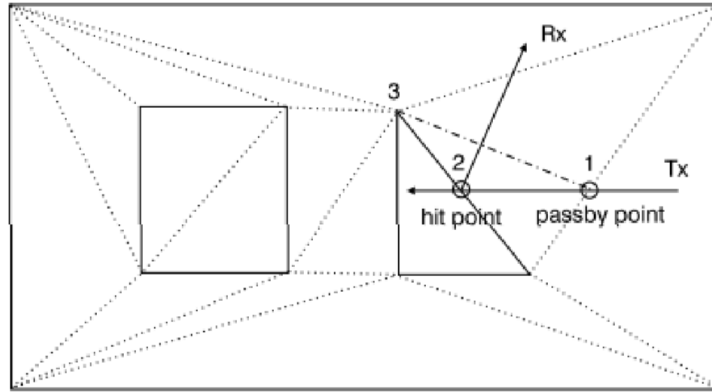


Figura 8: Triangulação de um ambiente de simulação [24].

O raio transmitido pelo Tx não apresenta nenhuma interação com as linhas a tracejado, mas quando chega a uma linha de definição de estrutura, são criadas, uma componente refletiva e uma componente transmitida que trespassa a parede (ponto 2). Após a interseção entre o edifício e o raio, apenas é necessário analisar as outras duas arestas do triângulo, para verificar qual será interseccionada pelo raio de saída do ponto 2 da Figura 8. A determinação das interseções é efetuada através de cálculo vetorial, definindo cada aresta como um vetor.

2.6 MÉTODOS DE ACELERAÇÃO

A simulação de rádio propagação num edifício é extremamente complexa. Deste modo, qualquer técnica de traçado de raios utilizada numa ferramenta de simulação, torna-se num sistema extremamente pesado computacionalmente. Assim, é impreterível a existência de técnicas que permitam a aceleração deste tipo de algoritmos. A principal vantagem da utilização destes métodos é o aumento da velocidade de processamento sem perdas de precisão de cálculo. São métodos utilizados essencialmente em sistemas gráficos, que permitem o cálculo de trajetória dos raios e dos objetos que os interseccionam.

2.6.1 *Gráfico de Visibilidade*

Este método é utilizado para diminuir o tempo de processamento para ferramentas de traçado de raios que utilizem o Método das Imagens como base de cálculo de trajetórias [25]. Esta técnica aumenta a rapidez de processamento

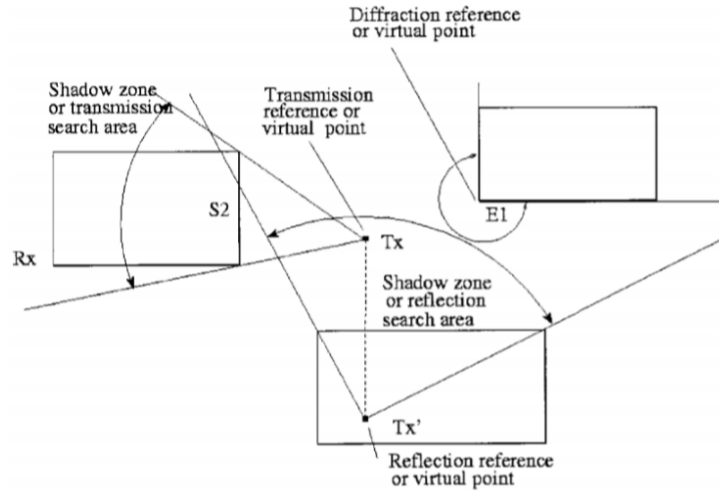


Figura 9: Zonas de transmissão [25].

nas situações em que exista cruzamento entre raios e objetos. O cruzamento permite delimitar uma zona de sombra onde não existem raios provenientes deste cruzamento, ou como é possível visualizar na Figura 9, existem zonas de procura específicas para cada superfície de cruzamento. Diminuindo a área de procura, é evidente que é possível diminuir consideravelmente o tempo de processamento.

A descrição das zonas de visibilidade (zonas de pesquisa) entre objetos é mencionada num gráfico de visibilidade, Figura 10. Esta figura descreve as séries de transmissão entre objetos, ou seja, desde a referência até à primeira camada, está descrita a ligação entre o transmissor e os diferentes objetos, apenas tendo em conta a componente direta. Da primeira camada para a segunda camada está descrita a ligação entre objetos representando a reflexão de primeira ordem e o procedimento é o mesmo até ao fim da árvore de visibilidade.

2.6.2 Método Binary Space Partitioning (BSP)

O *Binary Space Partitioning* (BSP) é uma estrutura de dados utilizada para dividir espaço antes do traçado de raios na computação gráfica [26]. Este modo, consiste na divisão recursiva do espaço de simulação, que permite obter um determinado número de subdivisões e com um determinado tamanho. Este é um método de aceleração utilizado em traçado de raios com o Método das Imagens como base de cálculo [27]. Como é descrito na secção 2.5.1, o método

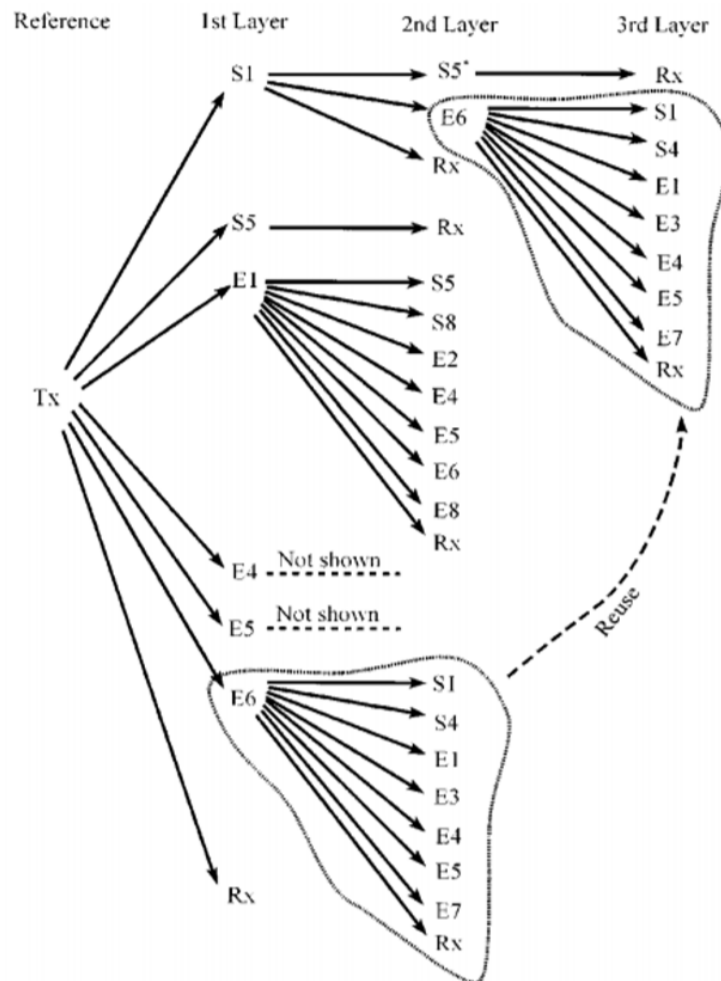


Figura 10: Gráfico de Visibilidade [25].

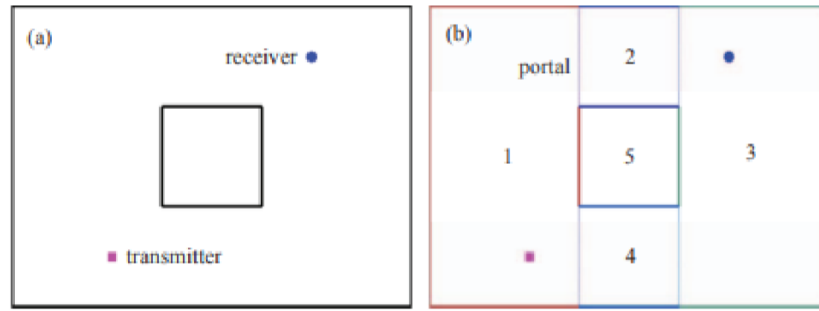


Figura 11: Divisão de um espaço (a) em subdivisões (b) [27].

das imagens deteta o fenómeno de reflexão com base em pesquisa de interseções. Esta pesquisa de interseções entre um determinado raio e todos os objetos que compõem um ambiente de simulação, é um processo que ocupa a maior parte do tempo de processamento. Com o BSP este processo é minimizado, dado que, apenas são considerados os limites das divisões adjacentes, considerados como portais de transição de uma divisão para outra. Dentro das divisões propriamente ditas, a pesquisa de interseções não é efetuada, dado que uma das premissas destas divisões é apresentarem apenas um tipo de conteúdo, objeto ou espaço vazio no seu interior, como é possível verificar na Figura 11.

2.6.3 Método Angular Z-Buffer (AZB)

O algoritmo AZB é utilizado para reduzir o tempo de processamento evitando o cálculo de interseção com todas as superfícies do ambiente de simulação. Para cada direção a avaliar, apenas as superfícies que estão atribuídas à direção em causa é que são testadas [28, 29]. O tempo de cálculo é proporcional ao número de regiões consideradas e este número é limitado pelo tamanho de memória disponível. O AZB é baseado na técnica do buffer de luz [30] usada no desenho gráfico por computador. Este consiste em dividir o espaço visto do Tx para o Rx em divisões angulares. Cada divisão é a representação de profundidade numa imagem 2D. Esta representação é efetuada através da coordenada Z do objeto de cena (pixel a pixel) [18]. Deste modo, é possível registar pontos de vista a partir de cada pixel do cenário de simulação. Cada vez que o ponto de vista é alterado, o valor de Z é processado novamente para cada pixel dentro do cenário na vista em causa. Se o valor de Z calculado for inferior ao valor de Z armazenado, então esse objeto está mais próximo de

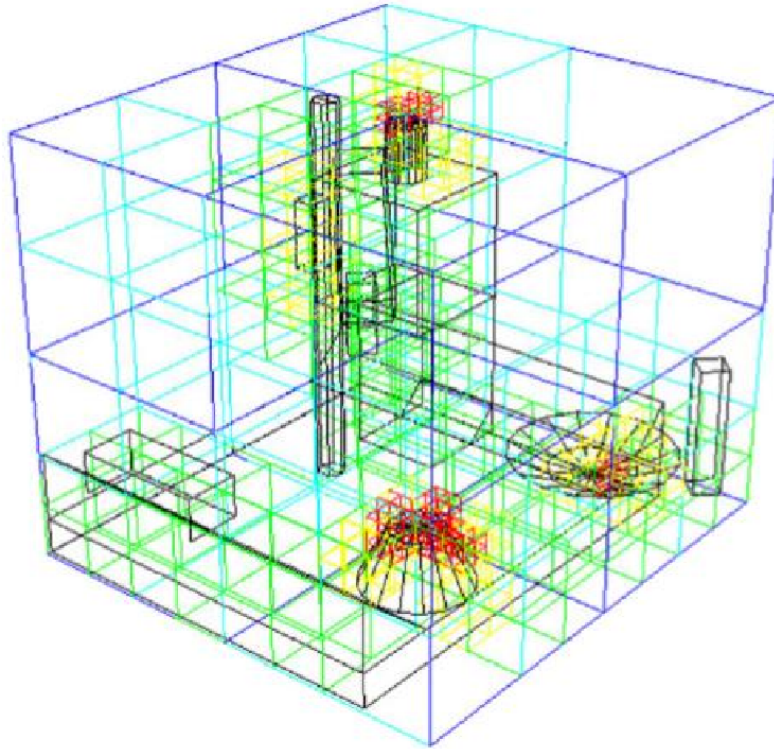


Figura 12: SVP completo [32].

algum objeto anteriormente renderizado naquela posição e vai ocultar aquele objeto. Isto é, procede-se à substituição do valor de Z para o pixel em causa. O AZB é então uma técnica de aceleração dado que, o traçado de raios vai ser calculado com base nos mapas de profundidade adquiridos o que diminui bastante o tempo de processamento [31], em que apenas é necessário analisar uma subdivisão para cada raio [29].

2.6.4 *Space Volumetric Partitioning (SVP)*

O SVP é baseado na divisão recursiva de zonas de interesse em cubos cada vez mais pequenos. Como é possível verificar na Figura 12, estas divisórias são denominadas *voxels* e cada uma tem uma matriz associada (matriz SVP) [32, 33]. A matriz contém a informação relativa às superfícies e pontos presentes no *voxel* permitindo verificar a informação relativa às superfícies desejadas quando é necessário averiguar a interseção destas com um raio.

A densidade de *voxels* é maior nas zonas onde existem superfícies mais complexas, de modo a dar primazia à informação mais relevante, ou seja, como

se pode observar na Figura 12, a primeira sub-divisão é efetuada através dos cubos a roxo. Cada um destes volta a ser dividido em oito novos cubos, a azul, e assim sucessivamente até atingir o limite de definição pretendido, que neste caso são os voxels a vermelho. Este algoritmo é utilizado para reduzir o tempo de processamento de teste de zonas de sombra, porque apenas as superfícies localizadas em alguns voxels são testadas como potenciais superfícies de oclusão [34]. Quando o ambiente de simulação é bastante complexo, este algoritmo é aplicado mais do que uma vez, para que existam mais voxels e a precisão do traçado de raios não decaia com o aumento de complexidade.

2.6.5 AZB e SVP (Híbrido)

Raramente se verifica a utilização dos métodos AZB e SVP em separado, pelo que o mais usual é a utilização híbrida destes [32]. O principal objetivo é a redução do número testes de interseção em superfícies e, utilizando o AZB e o SVP em harmonia é possível reduzir este número significativamente diminuindo também o tempo de processamento deste processo [35, 36]. Primeiramente é aplicado o SVP para criar partições de volume (*voxels*), estas são de um tamanho tão reduzido quanto o cenário é de complexo, ou seja, aumentando a complexidade do cenário, diminui-se o volume considerado num *voxel*. Na segunda fase é criada a matriz AZB com base na informação criada pelo SVP, ou seja, para cada superfície o AZB apenas calcula com base nas superfícies presentes no *voxel* em causa. Por outras palavras, os *axels* do AZB contêm a informação das superfícies, enquanto que os *voxels* contêm a informação angular das margens destas. Durante o processo de traçado de raios, se o *voxel* não estiver dentro da área de vista do raio, não é necessário testar todas as superfícies dentro do *voxel*, reduzindo significativamente o tempo de processamento.

2.7 ANÁLISE E COMPARAÇÃO

A análise do estudo desenvolvido remete para uma grande diversidade de algoritmos de traçado de raios. Deste modo, pretende-se efetuar uma comparação

direta entre estes algoritmos, averiguando as vantagens e desvantagens de cada método.

O método das imagens tem uma excelente precisão de cálculo, dado que as únicas aproximações que podem existir, eventualmente, são as aproximações de cálculo numérico. Este é um algoritmo que pode ser utilizado recursivamente, podendo assim calcular todas as ordens de reflexão necessárias, com a desvantagem que para cada ordem de reflexão todas as paredes são verificadas para cada raio.

O SBR, o MRMLA e o Smart 3D, são ambos idênticos na sua base de funcionamento, dado que, utilizam todos o princípio de Ray Launching. No caso do Smart 3D o lançamento de raios é efetuado do Rx para o Tx, executando aproximações sucessivas e calculando o caminho exato após ter conhecimento do caminho. Este pode ser um método bastante eficaz em ambientes de simulação relativamente simples, que promovam um número baixo de aproximações. O SBR é bastante pesado computacionalmente dado que ocupa grande parte do tempo de processamento, aproximadamente 90%, a validar interseções entre os raios e as superfícies [37]. No método Híbrido verifica-se que a utilização do método SBR inicialmente e o cálculo exato da trajetória com a utilização do método das imagens, permite reduzir em 40% o tempo de simulação e permite diminuir 57.77% do número de raios traçados para alguns cenários [19]. O método de força bruta é um método que resulta bem para ambientes pequenos e pouco complexos, dado que, o tubo de raios utilizado na base de funcionamento deste, aumenta com a distância e por isso faz aumentar a quantidade de possíveis superfícies nele presentes e, deste modo, diminui a precisão de cálculo. A triangulação como técnica de traçado de raios é uma ótima abordagem para ambientes 2D que sejam totalmente compostos por superfícies retas (sem superfícies redondas), dado que, não é possível definir com exatidão uma superfície redonda através de triângulos. O funcionamento 3D desta técnica não está ainda desenvolvido.

No que concerne aos métodos de traçado de raios aqui apresentados, a Tabela 1 apresenta uma comparação sucinta de modo a afirmar o desempenho de cada um. Esta tabela apresenta três indicadores de desempenho subjetivos, tendo como base o nível de precisão dos resultados de cada método, bem como, o peso computacional (PC) e o tempo computacional (TP). O peso

Método	Precisão	PC ¹	TP ²	Observações
Imagens	Alta	Alto	Alto	Método com menor erro e maior impacto computacional.
SBR	Baixa	Baixo	Baixo	A precisão do resultado obtido pode ser alterado através do número de raios hipotéticos utilizados.
Híbrido	Alto	Baixo	Médio	Possui a precisão do método das imagens com um aumento de rapidez pelo método SBR.
MRLMA	Variável	Médio	Médio	Precisão alterável através do tamanho da esfera do Rx.
Smart 3D Traçado de Raios	Alta	Baixo	Médio	Incrementação do nível de precisão a cada iteração recursiva deste método.
Força Bruta	Média	Alto	Médio	Mais indicado para ambientes de simulação bastante complexos.

¹ Peso Computacional, ² Tempo de Processamento

Tabela 1: Métodos de traçado de raios (resumo).

computacional evidencia a ocupação de memória, enquanto que o tempo computacional evidencia o tempo de simulação de cada método.

Verifica-se que grande parte das técnicas de traçado de raios são baseadas no método convencional de lançamento de raios, do inglês *Ray Launching*, porém, esta é uma técnica muito ineficiente se não forem empregues algoritmos de aceleração [24]. Vários algoritmos têm sido desenvolvidos nesse âmbito, porém muitos apresentam vantagens no que toca à diminuição do tempo de processamento e tamanho de memória utilizada, mas apresentam desvantagens na diminuição de precisão dos algoritmos de cálculo [38]. Os algoritmos de aceleração aqui abordados são o Gráfico de Visibilidade, o BSP, o AZB, o SVP e o híbrido destes dois últimos.

O gráfico de visibilidade descreve as rotas de ligação entre superfícies através de um gráfico dividido em camadas. Este é um algoritmo dedicado ao método das imagens [25]. Neste, a aceleração é efetuada pela diminuição da área de pesquisa.

O BSP traduz uma divisão do espaço 2D. Estas divisões são efetuadas sem que nenhum elemento esteja no seu interior, ou seja, a delimitação dos elementos deve ser a delimitação das divisões, de modo a que no interior de cada divisão o comportamento do raio seja igual e este só se altere quando se

transita para outra divisão. As desvantagens é que apenas está comprovado o funcionamento em 2D e é dedicado a ambientes de simulação simples e constituídos essencialmente por segmentos de reta.

O AZB é utilizado para acelerar simulações de radio propagação em ambiente *Outdoor* e *Indoor* considerando as várias componentes de propagação: LOS, ordens de reflexão mais relevantes (1^a, 2^a e 3^a) e difração. Contudo quando a complexidade dos fenômenos aumenta, nomeadamente a ordem de reflexão, e quando o cenário de simulação é bastante complexo, o AZB torna-se impraticável, dado que o espaço de memória que armazena as matrizes AZB sobe com o aumento de complexidade do cenário. Tem a desvantagem que o espaço de memória cresce significativamente com o aumento de complexidade do cenário de simulação. Deste modo, torna-se necessário acoplar o algoritmo SVP [39].

O SVP é baseado na partição de volume em *voxels*, que permitem definir superfícies em determinadas zonas. Este é um algoritmo de aceleração bastante eficaz, dado que, dá ênfase às zonas mais complexas do cenário de simulação, evitando assim gastar memória e tempo de processamento em zonas mais simples.

Em relação ao método Híbrido de AZB e SVP, verifica-se que este integra as vantagens de cada um dos métodos base, sendo este uma das melhores opções entre os anteriores. Quando o cenário tem poucas superfícies (abaixo de 200), o número de voxels está perto deste número, porém quando a complexidade do cenário sobe, o número de voxels é muito pequeno comparado com o número de faces, deste modo, para ambientes complexos existe uma grande redução de tempo na criação da matriz AZB [32].

Esta página foi propositadamente deixada em branco.

MÓDULO DE CONVERSÃO IFC

3.1 INTRODUÇÃO

A elaboração do módulo de conversão IFC é uma tarefa de alto relevo e de diferenciação deste trabalho, dado que, a importação automática de toda a geometria do edifício e a constituição dos seus elementos (paredes interiores e exteriores e lajes) é a característica inovadora deste estudo. Assim torna-se impreterível a elaboração deste módulo através de uma linguagem de programação, que permita a obtenção detalhada das características necessárias para uma correta simulação eletromagnética, de forma automática e o mais eficiente possível. A inserção manual de todas estas características poderia demorar horas e até dias, proporcionalmente à complexidade do edifício, o que aumentaria o custo de cada estudo eletromagnético ou estudo de cobertura e com a possibilidade de ocorrência de erro humano.

É evidente que grande parte das ferramentas de criação e edição BIM, apresentam todas as características dos edifícios. Porém, não há ainda nenhuma forma de conseguir extrair em formato padronizado para que, efetivamente, todas as extrações de informação de cada BIM sigam o mesmo padrão. O mais próximo que existe como padrão é o formato IFC, como mostrado na secção [2.3](#).

O módulo de conversão é efetuado para a versão IFC 2x3, dado que é a versão mais utilizada até à atualidade, e dado que é esta versão que apresenta mais documentação e trabalho desenvolvido. Este está dividido em duas partes: o sub-módulo em linguagem Python, utilizando o *IfcOpenShell*; e o sub-módulo em MatLab, que permite a importação para ambiente MatLab da informação previamente tratada e armazenada pelo primeiro sub-módulo.

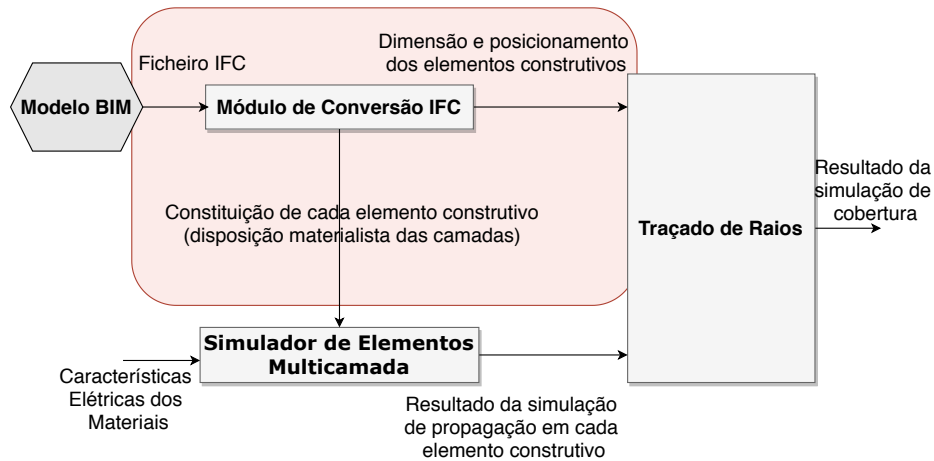


Figura 13: Diagrama de blocos global (Módulo de Conversão).

Na Figura 13 é possível verificar a posição deste módulo de conversão no diagrama de blocos geral do algoritmo desenvolvido, com sua ênfase a vermelho.

3.2 SUB-MÓDULO EM PYTHON

Para o desenvolvimento deste módulo, foi efetuado um levantamento das API's existentes na literatura que permitem o tratamento e organização de informação proveniente de ficheiros IFC, de modo a que o desenvolvimento de um módulo de conversão partisse de com algumas bases já desenvolvidas. As API's estudadas apresentam a funcionalidade de leitura e manipulação de informação orientada a objetos, visto que os ficheiros IFC têm uma organização semelhante quando é retirada informação de cada elemento construtivo.

No anexo A são apresentadas algumas das API's existentes para tratamento de dados no formato IFC, o que permite fazer uma escolha da melhor API para o objetivo no presente trabalho. A API utilizada para a construção deste módulo de conversão tem o nome de *IfcOpenShell* [40], que tem caráter gratuito, código aberto e pode ser utilizada através da linguagem *Python*. Esta API apresenta várias versões, dado que, a mesma é escrita na linguagem C++, porém a utilizada é a compilação para a utilização através da linguagem interpretada *Python*. Esta compilação pode ser efetuada através de várias ferramentas e pode ser efetuada com diferentes parameterizações. De modo a utilizar uma versão fixa, de igual e mais simples acesso a todos, optou-se por

utilizar a versão disponibilizada pelo *Anaconda*, presente em [41]. O *Anaconda* é nada mais do que uma distribuição de código aberto que tem como objetivo simplificar a implementação e gestão de pacotes, dedicados às linguagens de programação *R* e *Python*. Assim, a instalação através desta distribuição é um processo relativamente mais simples, rápido e uniforme para todos os utilizadores.

Para a utilização desta API *python*, desenvolveu-se um *script* em linguagem *Python*, que permite executar todas as tarefas de manipulação e tratamento da informação desejada. Na Figura 14 está presente o fluxograma simplificado do *script* desenvolvido. Mais à frente serão explicadas todas as etapas de forma detalhada, com auxílio de outros diagramas mais permonorizados, sendo que o fluxograma completo e detalhado está presente no Anexo A. Refere-se que todo o código e comentários são concebidos utilizando a língua inglesa de modo a abranger um público maior, no que toca a possíveis utilizadores e/ou programadores.

Como dito anteriormente, este *script* foi desenvolvido para permitir a manipulação de ficheiros IFC, assim, possibilita funcionamento através de qualquer outra aplicação ou pode até funcionar a solo, sendo que a aplicação desenvolvida cuja interface está presente nas figuras do Anexo B, incorpora todo o módulo de conversão. Por outras palavras, pode funcionar sem nenhuma aplicação subordinante. Para o primeiro modo, a aplicação mãe terá de fornecer a este script dois parâmetros de entrada *argv[1]* e *argv[2]*, que são respetivamente, nome do ficheiro IFC e nome da pasta onde serão guardadas as informações de saída, como se pode verificar no excerto de código 3.1. Nestas informações estão inseridas as coordenadas e dimensões dos elementos construtivos (ficheiros .csv) e a composição materialista de cada elemento (ficheiro .json). A alternância entre os dois modos é feita pela constante **SIMPLE_USE**, na linha 8 do excerto de código 3.1.

```

1 # simple_use = True : use only this file
2 SIMPLE_USE = False
3
4 PRINT_INFORMATIONS = False
5
6 # Change names of argvs if you put SIMPLE_USE = TRUE
7 if SIMPLE_USE:
8     sys.argv[1] = "ParedesParalelas.ifc" # input file

```

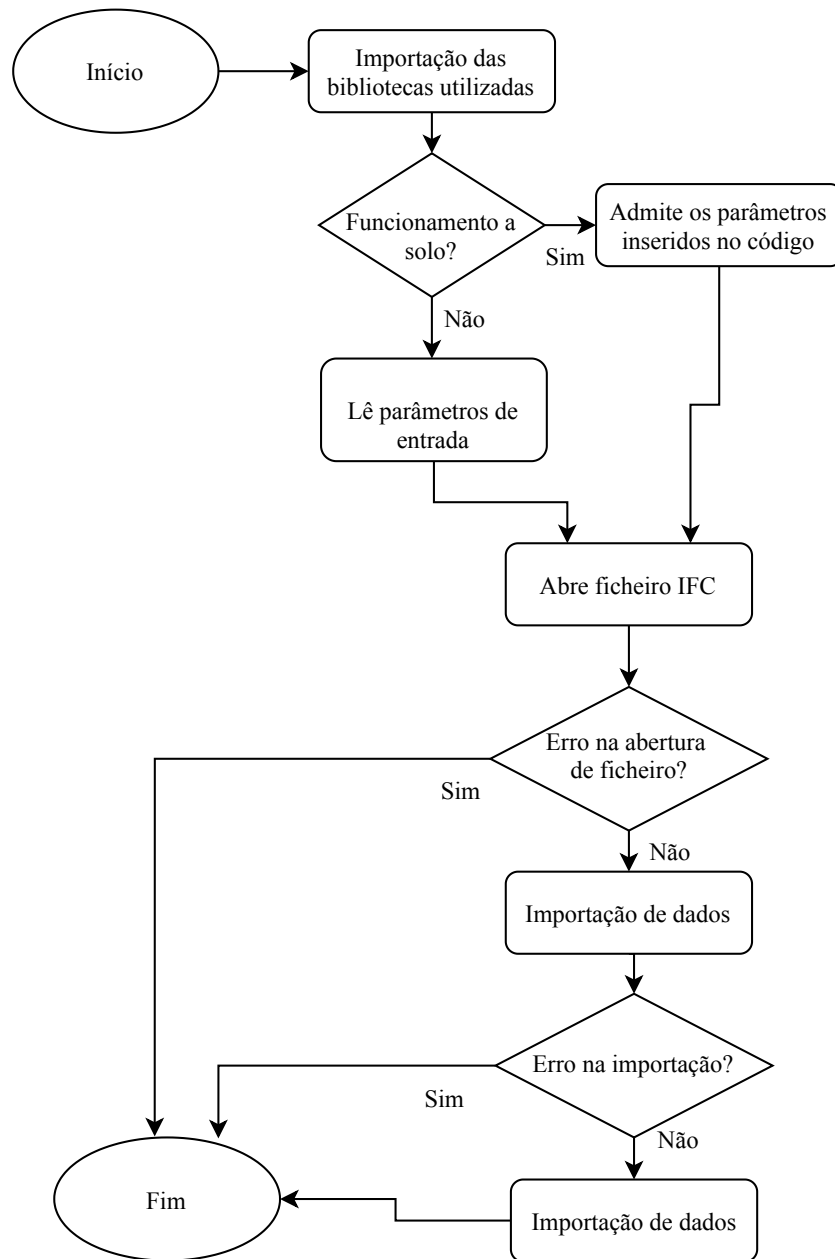


Figura 14: Fluxograma simplificado de importação de ficheiro IFC.

```
9 sys.argv[2] = "paralelas" # output folder
```

Excerto de código 3.1: Modo de funcionamento do Módulo de Conversão.

Apenas se o caminho para o ficheiro IFC for válido é que é possível a passagem à etapa seguinte, porque no caso de o caminho não ser válido é despoletada uma exceção, que irá devolver o código de erro respetivo.

A abertura do ficheiro IFC é feita através da utilização do próprio método *open* da biblioteca *IfcOpenShell* (linha 2, excerto 3.3). Aqui está especificado que o ficheiro estará dentro da pasta *ifcFiles*, por uma questão de organização, no entanto esta premissa pode ser alterada se necessário.

```
1 # Open IFC file using IfcOpenShell in ifcFiles folder
2 ifc_file = ifcopenshell.open('ifcFiles/'+ ifcFileName)
3 # Get default settings to allows change that
4 settings = ifcopenshell.geom.settings()
5 #settings.WELD_VERTICES = 0
6
7 # Get IFC Products
8 products = ifc_file.by_type('IfcProduct')
```

Excerto de código 3.2: Abertura do ficheiro IFC (*IfcOpenShell*).

Através do método *.by_type* é possível isolar o tipo de informação pretendido, neste caso são isolados todos os elementos construtivos da categoria *IfcProduct*. Dentro desta categoria estão presentes vários tipos de elementos que são desejados, tais como: paredes, placas, tetos e chão, ou seja, os elementos que causam maior impacto na cobertura rádio. Por outro lado existem também outros elementos que não são desejados para o estudo em causa, nomeadamente, delimitações de zonas do edifício, janelas e portas. Estas poderão efetivamente fazer parte da contribuição de possível trabalho futuro, elevando assim a exatidão da ferramenta.

O fluxograma presente na Figura 15 ilustra, com mais detalhe, o processo de importação propriamente dito, assim este não apresenta na sua constituição o bloco **Início** já que o fluxo advém do bloco **Importação de dados** do fluxograma simplificado presente na Figura 14.

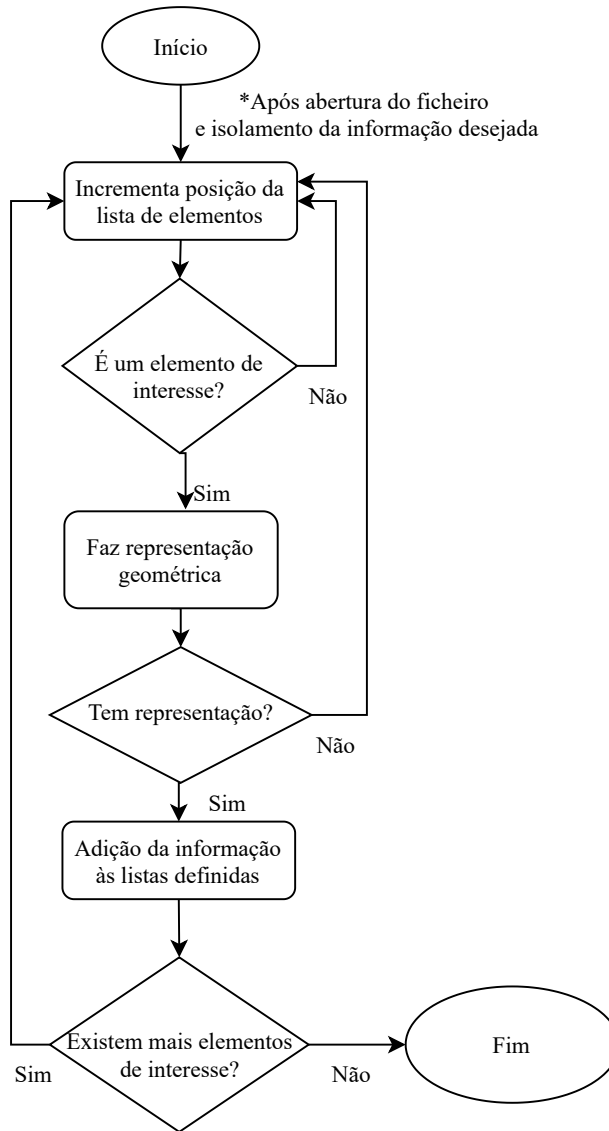


Figura 15: Fluxograma detalhado da importação de dados.

Em cada iteração do ciclo demonstrado na Figura 15 é tratado um elemento construtivo dentro da categoria *IfcProduct*. Destes são verificados quais são dos tipos: *IfcWallStandardCase*, *IfcWall*, *IfcSlab* e *IfcFloor*. Esta verificação é efetuada através da utilização do método `ifc_entidade.is_a`. Os que de facto forem destes tipos, são submetidos à elaboração de uma representação geométrica através do método `ifc_entidade.Representation`. Aqui é feita uma verificação de existência de representação, já que poderão existir alguns elementos que podem eventualmente ser formados de forma enganosa durante a criação do modelo BIM e os mesmo não terem representação geométrica possível, o que se traduz em erros nas etapas seguintes.

Verificada a existência da representação, é criada uma forma geométrica dos elementos, através do método `geom.create_shape(settings, ifc_entity)`. Este método recebe como parâmetros de entrada as configurações da criação da forma (`settings`), que são definidas pelo próprio `IfcOpenShell` e que podem ser alteradas pelo utilizador. Porém, para o objetivo final, não é necessário executar alterações nestas configurações, e recebe também o próprio elemento construtivo ou identidade como o próprio nome indica, `ifc_entity`, que é o objeto que reúne as todas as informações deste. Como parâmetros de saída este método fornece as características físicas e posicionais do elemento, nomeadamente, vértices, arestas, faces, coordenadas de localização, ângulos de rotação e identificadores (Id's).

```

1 # create shape of element
2 shape = geom.create_shape(settings, ifc_entity)
3 # ios stands for IfcOpenShell
4 ios_vertices = shape.geometry.verts
5 ios_edges = shape.geometry.edges
6 ios_faces = shape.geometry.faces
7 # Store the transformation matrix oh the wall (shift and
   rotation)
8 transformations.append(shape.transformation.matrix.data)
9 # Store Id's of walls
10 all_ids.append(np.full(len(ios_vertices), shape.id))

```

Excerto de código 3.3: Conversão da informação geométrica.

Os vértices são definidos pelas coordenadas cartesianas 3D, em relação ao referencial do elemento em causa, o que torna possível construir o elemento no MatLab como é pretendido neste trabalho, apenas utilizando os vértices, arestas e faces. Sabendo que as arestas são definidas pelos números dos vértices a que pertencem, tal como as faces, uma aresta pode ser definida, por exemplo, pelo vértice 1 e 2, ou 1 e 3, ou qualquer outra sequência de dois vértices. As faces seguem a mesma lógica mas com três vértices em vez de dois. Esta definição de cada elemento utilizando a sua forma geométrica, é efetuada através da triangulação das faces do elemento e, deste modo, uma só face real do elemento, normamente dá lugar a mais do que uma face virtual pela técnica da triangulação. Esta técnica é utilizada de modo a tornar possível definir qualquer tipo de face dos elementos, mesmo que estas apresentem

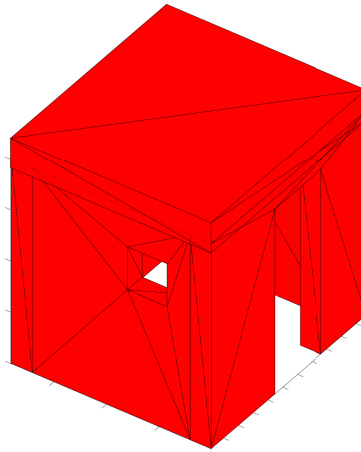


Figura 16: Exemplo de um edifício básico após triangulação.

diversos formatos ou que apresentem janelas e/ou portas, como se pode ver na Figura 16.

3.3 SUB-MÓDULO EM MATLAB

Este sub-módulo surge da necessidade de transposição de dados do sub-módulo *Python* (anterior), para ambiente MatLab, onde se encontram os módulos de simulação em elementos multicamada e o traçado de raios.

A informação de entrada deste algoritmo está disposta em ficheiros *.csv* e ficheiros *.json*, existindo assim um ficheiro para cada tipo de informação. Existe portanto, o ficheiro que contém a informação relativamente à posição cartesiana dos vértices da estrutura, o ficheiro que contém a informação acerca das arestas, expondo estas através da conjugação de vértices dois a dois e existe também o ficheiro que permite definir as faces (superfícies).

Sabendo que os vértices apenas definem a localização relativamente ao referencial cartesiano de cada elemento, verifica-se que é necessária a existência de mais informação, nomeadamente, acerca da posição absoluta. Esta informação está presente no ficheiro denominado ***Transformations***. Este tem na sua constituição vetores de transformação que permitem efetuar translações e rotações dos elementos. O conjunto de vetores de todos os elementos presentes

num ficheiro IFC forma uma matriz de transformação, como se pode verificar na matriz abaixo.

$$\text{Transformations} = \begin{bmatrix} | & | & | & & | & | & | \\ t_1 & t_2 & t_3 & \dots & t_{10} & t_{11} & t_{12} \\ | & | & | & & | & | & | \end{bmatrix} \quad (1)$$

Cada vetor de transformação diz respeito apenas a um e só um elemento, deste modo é necessário ter em conta os Id's dos elementos em causa para poder identificar quais as transformações a efetuar para cada elemento. As transformações que efetuam o movimento de rotação são adicionados às coordenadas de localização dos vértices segundo (2), enquanto que o movimento de translação é efetuado segundo (3).

$$\begin{cases} x_{\text{vertice}_{\text{rodado}}} = \text{vert}_x \cdot t_1 - \text{vert}_y \cdot t_2 \\ y_{\text{vertice}_{\text{rodado}}} = \text{vert}_x \cdot t_2 + \text{vert}_y \cdot t_1 \end{cases} \quad (2)$$

Os movimentos de rotação apenas são efetuados nas coordenadas \mathbf{X} e \mathbf{Y} , obedecendo às regras trigonométricas, sendo que t_1 e t_2 correspondem respetivamente ao cosseno e seno dos ângulos de rotação e vert_x e vert_y correspondem às coordenadas dos vértices relativamente ao seu referencial.

$$\begin{cases} x_{\text{vertice}} = x_{\text{vertice}_{\text{rodado}}} + t_{10} \\ y_{\text{vertice}} = y_{\text{vertice}_{\text{rodada}}} + t_{11} \\ z_{\text{vertice}} = \text{vert}_z + t_{12} \end{cases} \quad (3)$$

A translação dos elementos é efetuada através da adição de deslocamentos a cada coordenada relativa. Os deslocamentos estão definidos no vector de transformações e estão representados na equação, através de t_{10} , t_{11} e t_{12} , que representam a translação em X, Y e Z respetivamente. De referir que o processo de rotação é sempre efetuado antes do processo de translação, dado que, para o último são necessárias as coordenadas rodadas presentes na equação 3.

Para além da representação gráfica que este sub-módulo fornece (figura 16), é também necessário colocar a informação já processada, no formato desejado, para os processos posteriores, tal como o traçado de raios. Assim, cada segmento de parede ou cada triângulo definido pelo processo de triangulação é identificado pelo seu identificador de elemento (Id) e pelas posições absolutas dos seus vértices. Esta é a única informação de saída do módulo de importação e vai organizada através de três matrizes que aglomeram todos os vértices de todo o conjunto de elementos constituintes do modelo BIM. Cada linha da matriz define então um vértice de um segmento de face (triangulação), sendo que o conjunto das linhas com o mesmo índice, presentes nas três matrizes, define os três vértices do triângulo. Esta é a abordagem de tratamento de dados do traçado de raios.

Para auxiliar no processo de simulação e na descrição dos segmentos de face, no que concerne à abordagem multicamada, este módulo exporta também uma discriminação de quais os vértices pertencentes a cada elemento e qual é o tipo de cada elemento. Nos capítulos 4 e 5 esta questão é abordada com maior detalhe.

3.4 CONCLUSÕES

O módulo de conversão de informação BIM proveniente de ficheiros IFC é uma das características chave deste trabalho de dissertação, dado que permite a importação da informação BIM para ambiente MatLab, algo que até hoje ainda não foi desenvolvido nem está presente na literatura.

Este é um algoritmo que depende diretamente da utilização da biblioteca IFCOpenShell, já mencionada, sendo dividido em dois sub-módulos que cooperam para o resultado final.

Esta importação permite que uma simulação de cobertura de rádio ocupe muito menos tempo ao utilizador, dado que, grande parte do tempo gasto num processo de simulação de traçado de raios é muitas das vezes a inserção do cenário de simulação. Esta ferramenta permite assim importar o cenário de simulação de forma automática, sem que seja necessária a intervenção direta do utilizador neste processo.

SIMULADOR DE ELEMENTOS MULTICAMADA

4.1 INTRODUÇÃO

Um dos objectivos da indústria de construção é o desenvolvimento de produtos que consigam colmatar as necessidades/funcionalidades requeridas pelos donos de obra [42][43]. Durante todo o ciclo de vida destes produtos, é necessário considerar vários aspectos, tais como, características de durabilidade que influenciam diretamente a sua deterioração, características de segurança face aos efeitos das ações naturais e humanas, os aspetos económicos, bem como o impacto ambiental e estético. O alinhamento destes 6 aspetos, permite a concretização de construções que preenchem as necessidades humanas do presente e do futuro. Porém, verifica-se uma grande tendência para menosprezar o impacto ambiental das construções e por vezes até a própria qualidade da construção, sempre que o fator económico se possa sobrepor [44].

A análise da realidade construtiva permite observar a existência de uma vasta diversidade de soluções de construção, quer a nível estrutural, quer ao nível dos elementos não estruturais de compartimentação. Nestas diferentes soluções existem diversos materiais, com características muito específicas e que podem ser combinados entre si de formas distintas, o que tem como consequência, uma grande diversidade de elementos tipo. Na Figura 17 é possível verificar a posição deste simulador no diagrama de blocos geral do algoritmo desenvolvido, com destaque a vermelho.

De modo a que seja possível simular com exatidão a cobertura de sinal dentro de um edifício, é importante ter conhecimento da resposta em frequência de cada elemento construtivo, sejam paredes ou lajes, incluindo a contribuição das suas diferentes camadas internas e revestimentos ou acabamentos. Seria incomportável a medição da resposta em frequência de todos os tipos de paredes e todos os tipos de lajes ou coberturas, num ambiente controlado

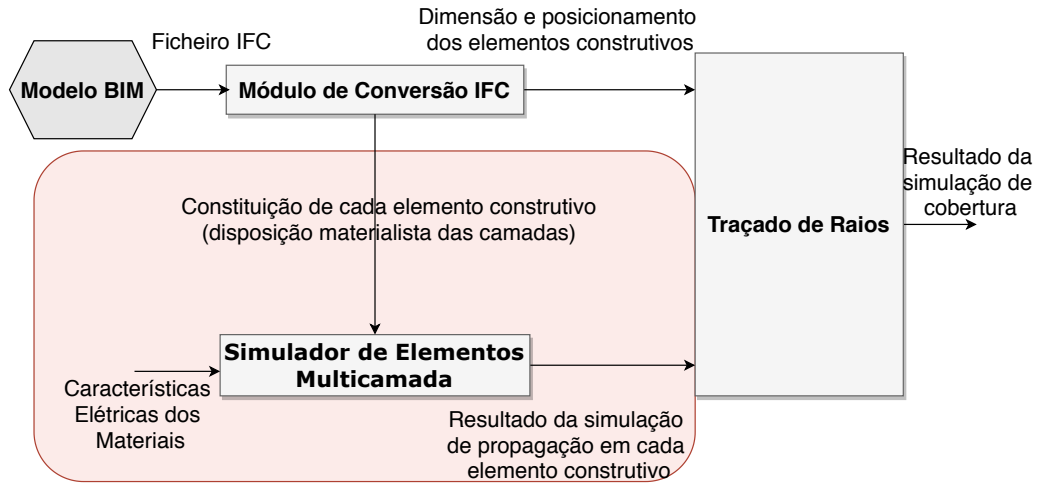


Figura 17: Diagrama de blocos global (Simulador Multicamada).

como uma câmara anecoica. Deste modo, surge a ferramenta de simulação, apresentada neste capítulo, como forma solucionadora para este problema.

4.2 DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

A ferramenta de simulação permite calcular o impacto eletromagnético de cada elemento construtivo multicamada, desde que se disponha, como ponto de partida, os parâmetros elétricos de cada material constituinte. Esta ferramenta foi desenvolvida no passado por elementos do grupo de investigação a que este trabalho de dissertação está associado, sendo por isso gratuita e de código aberto. Desenvolvida em MatLab, esta fornece um interface de trabalho, do Inglês *Graphical User Interface* (GUI), presente na Figura 18, que permite a inserção manual de todos os parâmetros de simulação desejados e permite a simulação de elementos construtivos com até 10 camadas [45, 46].

4.2 DESCRIÇÃO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

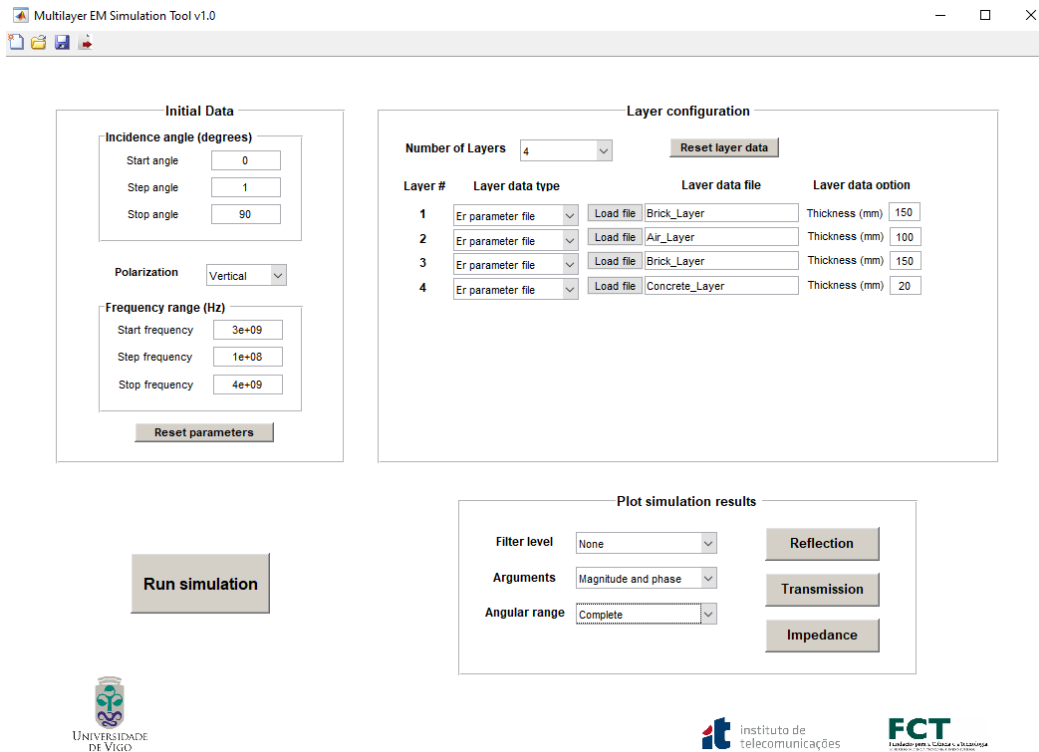


Figura 18: Interface gráfica da ferramenta de simulação de multidielétricos.

Na Figura 18, está presente um exemplo dos parâmetros de simulação de uma parede de construção tradicional portuguesa com duas camadas de tijolo de 15 cm e uma caixa de ar de 10cm. Para cada camada é possível definir a espessura e o ficheiro de entrada. Este pode conter a permitividade eletromagnética ou os parâmetros S do material. Para esta execução é necessário escolher a gama angular de incidência, (de 0° a 90°), a resolução de uma unidade angular e a gama de frequências de simulação (3 a 4 GHz), com um passo de 100MHz.

Este simulador fornece como parâmetros de saída: a impedância do elemento simulado e os coeficientes de reflexão e transmissão para cada unidade angular ou para apenas um ângulo específico, conforme a escolha do utilizador. É também possível apresentar graficamente, apenas a magnitude, a magnitude e fase correspondente ou apenas fase dos coeficientes calculados.

A abordagem utilizada neste simulador, para simular múltiplas camadas homogéneas ou heterogéneas, é baseada na teoria da matriz transferência descrita em [47, 48]. A Figura 19 apresenta um diagrama de uma parede constituída por múltiplas camadas homogéneas, o que traduz N camadas e $N + 1$ transições inter camadas.

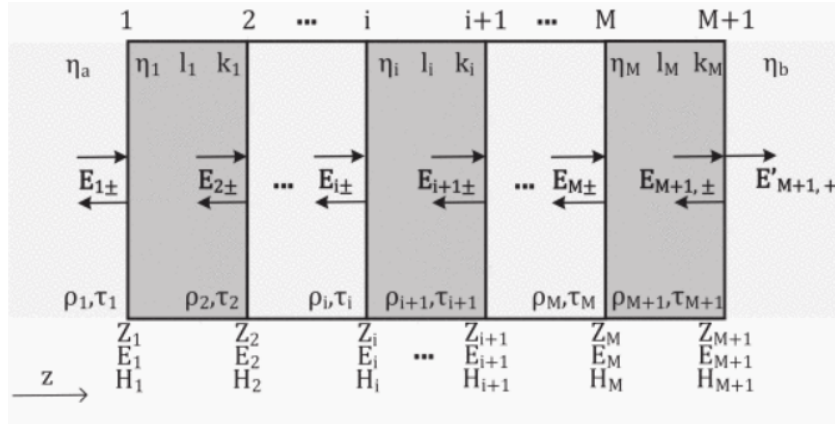


Figura 19: Estrutura multicamada (homogêneas) [45].

A ferramenta de simulação eletromagnética foi validada através de uma larga campanha de medições efetuadas no interior da câmara anecoica do Politécnico de Leiria, para uma vasta gama de frequências e diversos conjuntos de elementos construtivos combinados entre si [49, 46]. Toda a formulação matemática utilizada na ferramenta está descrita em [45, 46].

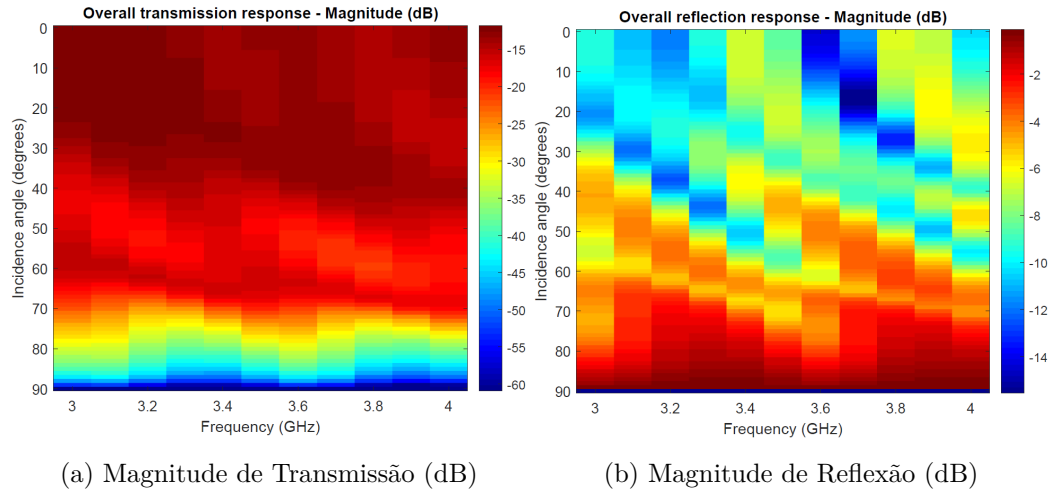


Figura 20: Resultados da simulação exemplificativa

Como resultado da simulação exemplificativa, com base nos dados da Figura 18, apresenta-se a Figura 20, onde é possível verificar a magnitude dos coeficientes de transmissão e reflexão, referente a cada passo de frequência dentro da gama escolhida (3GHz a 4GHz) em função do ângulo de incidência. Esta magnitude está dividida na componente transmitida pela parede multicamada e pela componente refletida, apresentadas nas Figuras 20a e 20b, respetivamente. Em suma, verifica-se que, quanto maior o ângulo de incidência face à normal da superfície da parede, menor é a componente transmitida e

maior é a refletida, ou seja, menor é a quantidade de sinal que atravessa a parede e maior é a refletida, o que está de acordo com a Lei de *Snell* [50], no que concerne à incidência oblíqua.

4.3 ADAPTAÇÕES EFETUADAS

A simulação de cobertura no interior de edifícios necessita de um conhecimento aprofundado sobre a estrutura do mesmo, ou seja, carece do conhecimento da resposta em frequência dos principais elementos relevantes para a simulação de cobertura. No entanto, são as paredes os elementos construtivos que mais atenuação e reflexão de sinal provocam, dado que, estão presentes em toda a envolvente de qualquer divisão de um edifício, bem como as placas inter-andares (lajes) que provocam os mesmos fenómenos no estudo da cobertura entre vários pisos.

A ferramenta de simulação em meios multidieléticos já desenvolvida, fornece o conteúdo necessário para ser possível a simulação de cobertura no interior de edifícios. Porém, esta é uma ferramenta muito manual, ou seja, para adquirir o resultado final é necessário inserir manualmente cada camada, as respetivas espessuras e os respetivos ficheiros de entrada que contêm as características elétricas. Este processo torna-se incomportável para a utilização intensiva, até mesmo porque é necessário guardar os resultados manualmente. Assim, e de modo a inserir esta ferramenta de simulação no trabalho de dissertação, são necessárias algumas alterações de forma a automatizar o processo.

De modo a enquadrar a ferramenta de simulação em dielétricos na aplicação desenvolvida, foram efetuadas alterações estruturais, dado que já passaram alguns anos desde o desenvolvimento desta, e deste modo, verificou-se a necessidade de implementar o algoritmo de simulação no `AppDesigner` do `MatLab` ao invés de utilizar a `GUI` já desenvolvida em [49]. Na Figura 21 apresenta-se a janela da aplicação desenvolvida no trabalho de dissertação. Em termos de algoritmo apenas foram efetuadas alterações no modo simulação numa gama de frequências, dado que a aplicação desenvolvida apenas utiliza uma frequência para cada simulação. Assim, o tempo de processamento referente aos multidielétricos é diminuído.

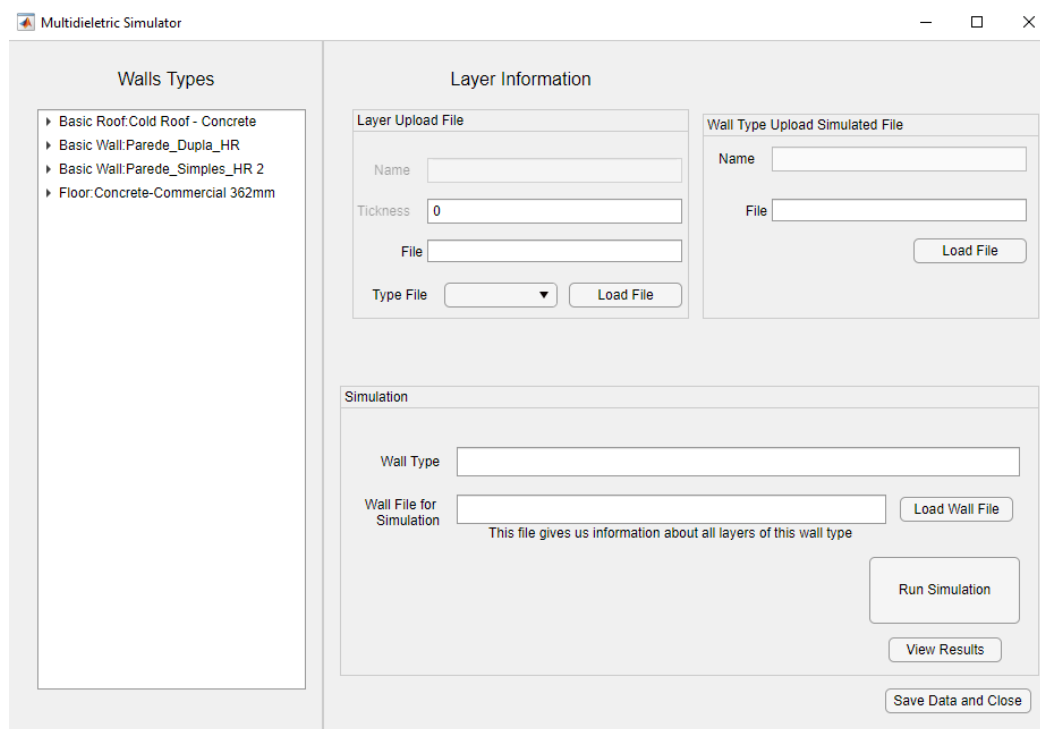


Figura 21: Janela de simulação de elementos multicamada

Através da interface desenvolvida é possível verificar todos os tipos de elementos construtivos presentes no edifício em causa. É igualmente possível guardar o arranjo de camadas de cada elemento num ficheiro, que permite a utilização futura para outras frequências. Por último, é possível simular e guardar o resultado da simulação para cada elemento construtivo. Em cada etapa é possível inserir ficheiros previamente guardados para que o tempo de inserção de dados manual seja o menor possível. Assim, se existir por exemplo uma parede, cujo o seu arranjo de camadas é igual a algum já guardado, este, pode ser carregado diretamente, o que evita a inserção manual de todos os ficheiros referentes a cada camada. O mesmo, ocorre com paredes previamente simuladas, onde é possível carregar ficheiros de resultados de simulação, desde que a frequência de trabalho seja a mesma. Se a frequência não for a mesma, torna-se necessário simular novamente o arranjo de camadas.

Em termos de visualização é possível verificar todos os tipos de elementos construtivos em *Wall Types* e os tipos de materiais associados a cada camada, como se pode visualizar na Figura 22. Primindo com o rato em cada material, torna-se visível a espessura da camada em *Thickness*, bem como, o nome do ficheiro inserido com os parâmetros elétricos do material em causa.

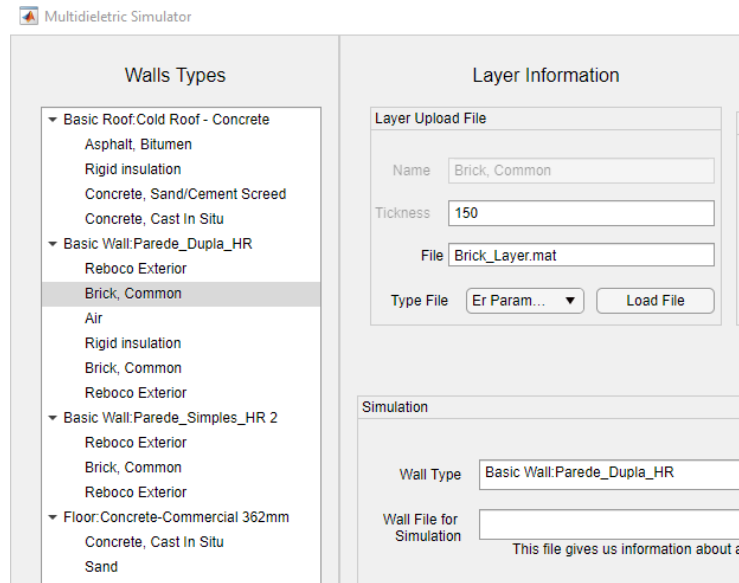


Figura 22: Camadas de cada elemento construtivo

Foi considerada a transformação desta inserção, numa inserção automática em vez de manual, dado que é uma tarefa que irá ocupar algum tempo do utilizador, porém a hipótese mostrou-se inviável. Esta inviabilidade deve-se ao facto de que não existe nenhuma base de dados suficientemente completa que permita a existência de todos os materiais utilizados na construção e por isso, por vezes, pode ser necessário adicionar novas características elétricas de materiais ainda por definir e/ou optar por um material idêntico eletricamente, quando seja impossível de obter estas características seja por desconhecimento científico ou por impossibilidade de medição experimental dos mesmos. Outro entrave para execução automática desta tarefa, prende-se pela inexistência de nomenclatura normativa de definição das bases de dados, ou seja, não existindo um *standard* para definição dos parâmetros elétricos, nomes dos materiais e outras características organizativas. Assim, é impossível, ou no mínimo difícil, de implementar um algoritmo que consiga incluir todas as normas ou modos de funcionamentos de todas as bases de dados existentes.

4.4 CONCLUSÕES

O capítulo introduz a ferramenta de simulação em multidielétricos anteriormente desenvolvida, que constitui uma mais valia para a aplicação final, dado que possibilita o estudo aprofundado de cada elemento construtivo, dado que,

a maior parte destes elementos são multicamada e o seu comportamento eletromagnético é bastante diferente do comportamento de um elemento composto por apenas uma camada [51].

Conclui-se que a principal desvantagem da inserção desta ferramenta é o aumento de tempo de trabalho manual do utilizador, aquando a inserção dos respetivos ficheiros de caracterização dos materiais para posterior simulação, porém este é um trabalho necessário e intransponível na atualidade.

Como trabalho futuro, referente a este capítulo, afigura-se que a primeira necessidade será encontrar uma base de dados suficientemente completa para satisfazer todas as necessidades, ou encontrar várias bases de dados que tenham compatibilidade em termos estruturais para que todas estas, em conjunto, consigam colmatar as necessidades, utilizando um algoritmo o mais simples possível para importação e interpretação destes dados. Nesta impossibilidade, poderá eventualmente justificar-se a criação de uma base de dados própria, através da junção das já existentes, e através de uma teste laboratoriais exaustivos aos materiais predominantes na construção de edifícios. De qualquer modo, a aplicação terá de ser dinâmica ao ponto de possibilitar a inserção de características de algum tipo de material inexistente na base de dados.

TRAÇADO DE RAIOS

5.1 INTRODUÇÃO

A técnica de traçado de raios (*Ray Tracing*) é vulgarmente utilizada na análise da propagação de ondas de rádio em diversos tipos de cenários, sejam estes mais ou menos complexos. Como o próprio nome indica, é uma técnica que é utilizada para executar rastreamento das trajetórias percorridas pelas ondas eletromagnéticas (OEM).

Na maioria das comunicações sem fios *outdoor*, a propagação é efetuada em meios homogéneos, lineares e sem dispersão, o que provoca uma trajetória linear retilinea das OEM. No entanto, nas comunicações *indoor* esta realidade não é normalmente aplicável, dado que existem diversas estruturas e objetos dotados de grande heterogeneidade no percurso rádio, desde as estruturas dos edifícios a todos os elementos construtivos que os constituem.

Segundo a revisão da literatura apresentada na Secção 2.5, verifica-se que os principais algoritmos utilizados em traçados de raios são o SBR (*Shooting and Bouncing Rays*) e o Método das Imagens. Neste trabalho é utilizado o Método das Imagens como base de todo o traçado de raios.

Na Figura 23 está presente o diagrama de blocos do sistema desenvolvido, de modo a contextualizar o leitor, dando ênfase (a vermelho) ao bloco de traçado de raios que é abordado neste capítulo.

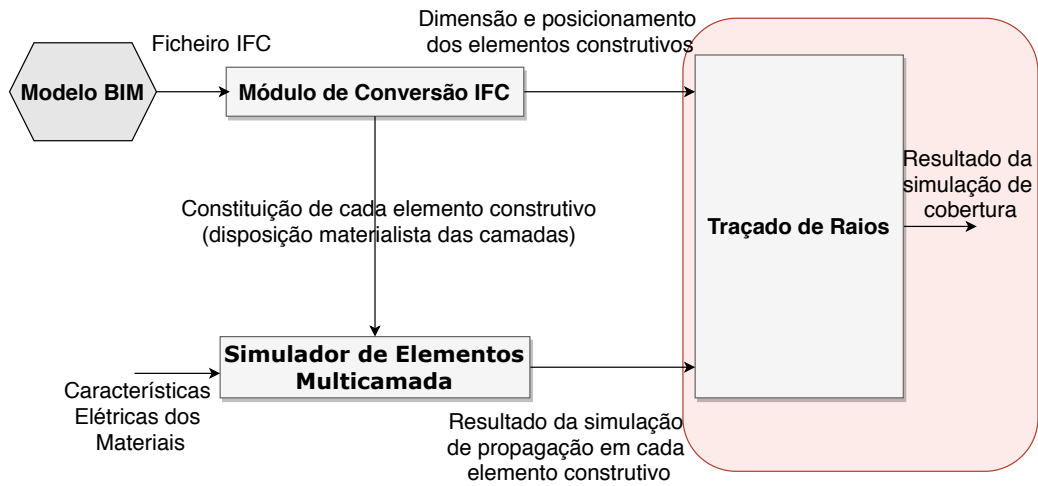


Figura 23: Diagrama de blocos global (Traçado de Raios).

Neste capítulo é portanto apresentado o método de Traçado de Raios utilizado no desenvolvimento da ferramenta alvo deste trabalho de dissertação, sendo que primeiramente é apresentado o Método das Imagens como base do Traçado, de seguida é feita uma explicação do funcionamento base do Traçado perante os cenários de simulação e depois é apresentado o modo de funcionamento para os vários fenómenos de propagação considerados.

Para finalizar o capítulo, são tecidas breves comparações de resultados de modo a pré-validar a ferramenta de um modo rápido e utilizando informação já processada e presente na literatura.

5.2 MÉTODO DAS IMAGENS

O Método das Imagens consiste basicamente na criação de transmissores virtuais (imagens), que permitem determinar com exatidão os pontos de reflexão nas superfícies, traçando assim o percurso entre o transmissor real e o recetor, sem erro associado. Este método tem como principal dificuldade a definição do fenómeno de refração, dado que, os raios alteram a sua trajetória aquando a alteração de meio de propagação. Deste modo, optou-se por não considerar a refração neste trabalho.

5.3 CENÁRIO DE SIMULAÇÃO

A ferramenta desenvolvida permite a importação de cenários de simulação através de um processo automático, que possibilita o tratamento de informação BIM presente em ficheiros IFC, como foi apresentado no capítulo 3. Esta é sem dúvida uma funcionalidade inovadora desta ferramenta. Esta importação automática permite reproduzir cenários com elevada precisão, o que é uma mais valia para o processo, dado que a simulação de cobertura através de meios determinísticos é tanto mais precisa quanto maior e exaustiva for a descrição do cenário.

Na simulação, a geometria, o posicionamento e as características elétricas dos elementos construtivos, devem ser o mais próximos possível da realidade. No interior de edifícios esta necessidade é ainda mais importante, dado que, grande parte da propagação é influenciada pela própria construção, ou seja, a utilização de um determinado tipo de material na construção de uma parede pode alterar significativamente a atenuação de sinal rádio no seu atravessamento.

Além das formas geométricas dos obstáculos, é necessário, não só o conhecimento do seu posicionamento absoluto, mas também, as características elétricas dos materiais que os constituem. Ao contrário de grande parte das ferramentas encontradas na literatura, que tratam os elementos construtivos como elementos homogêneos, esta ferramenta distingue-se pelo tratamento mais aproximado ao ambiente real, ao permitir a simulação de elementos multicamada. Esta informação é fornecida pelo Simulador de Elementos Multicamada presente na ferramenta desenvolvida e apresentado no capítulo 4. Deste modo, o traçado de raios é efetuado com base nos coeficientes de transmissão e reflexão calculados para cada ângulo unitário de incidência.

Neste trabalho, a modelação dos elementos é feita em três dimensões e efetua-se através da técnica de triangulação, dado que esta permite definir diversos tipos de superfícies, sejam elas quadrangulares, retangulares, ou com diversos orifícios, nomeadamente janelas e portas. Esta técnica está bem visível na Figura 24.

Como referido, os elementos são definidos através da técnica de triangulação, e esta técnica é aplicada a todas as faces de cada elemento. Como se pode

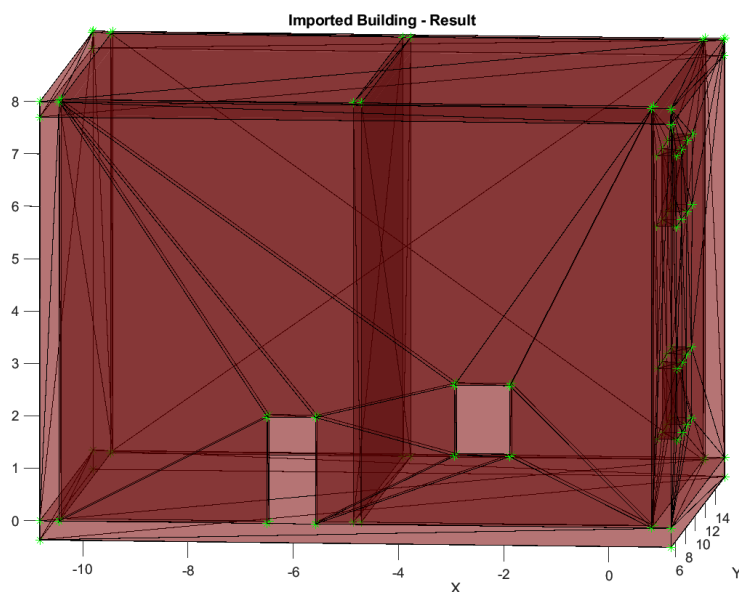


Figura 24: Edifício importado para o MatLab.

verificar na Figura 24, as paredes que não contemplam janelas nem portas, são os elementos mais simples, ou seja, possuem apenas 6 faces e cada face apenas carece de 2 triângulos para a sua correta definição. Porém, as paredes que apresentam janelas podem ser definidas por um grande número de triângulos, o que aumenta consideravelmente a complexidade computacional da simulação.

O traçado de raios efetuado tendo em consideração todas as faces de cada elemento é algo de elevada complexidade, dado que, é necessário ter em consideração quais são as faces de entrada e saída dos raios, diferenciando estas para cada raio. Não esquecendo que cada janela e cada porta impõe, respetivamente 4 e 3 faces (correspondentes às cantarias). Deste modo, foi desenvolvido um algoritmo que permite a utilização apenas de uma das faces de cada elemento construtivo, para efeitos de simulação.

O algoritmo desenvolvido tem em conta o posicionamento do transmissor para averiguar qual a face de cada elemento que está mais próxima e a qual produz um efeito mais próximo com o efeito real, como se pode verificar na Figura 25.

Esta funcionalidade permite diminuir consideravelmente a complexidade do cenário, e por isso estima-se uma otimização do processo de simulação de aproximadamente 75% do tempo de processamento. Como se verifica na Figura 25, os elementos construtivos são tratados como elementos sem espessura, isto

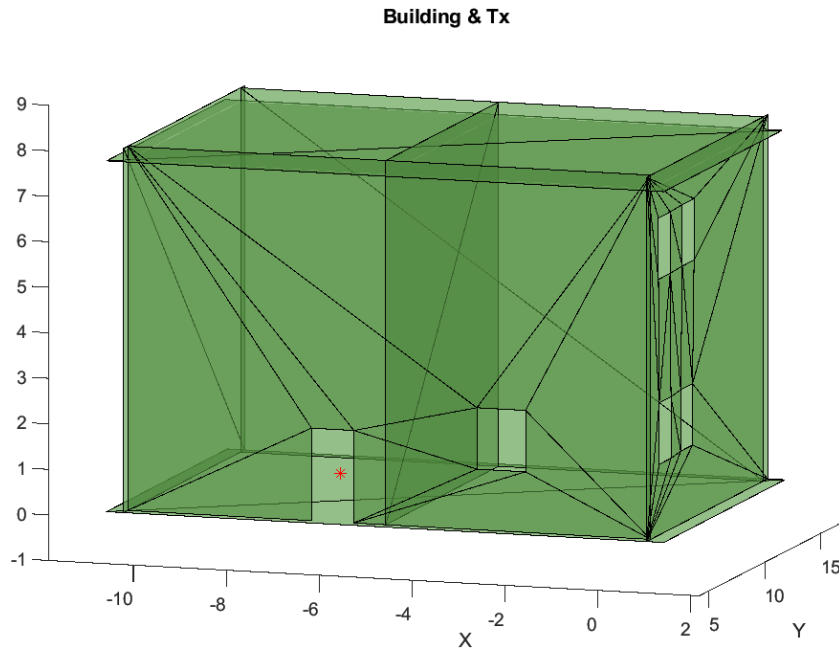


Figura 25: Faces de relevância dos elementos perante o Tx.

é apenas com caráter geométrico, que não influencia o comportamento elétrico simulado através do módulo de simulação multi camada.

5.4 CONCEITOS BASE DO TRAÇADO

O conceito intrínseco de simulação 3D deste traçado de raios, advém de que é possível com este simulador prever a potência de sinal em qualquer ponto do cenário de simulação.

O algoritmo utilizado divide o espaço tridimensional em células matriciais, que por sua vez são agrupadas em camadas. Portanto, todo o espaço de simulação é caracterizado numa matriz tri-dimensional, onde cada célula corresponde a uma unidade volúmica, e dentro dessa unidade, todos os pontos espaciais são tratados de igual forma, ou seja, todos os pontos infinitesimais dentro da célula apresentam a mesma potência de sinal calculada.

Em termos de organização computacional, o processo é dividido em diversas iterações, destas distinguem-se iterações espaciais e iterações entre fenômenos de propagação. O processamento é portanto efetuado através de camadas, que resultam da divisão da matriz tri-dimensional em matrizes bi-dimensionais. Estas camadas, estão definidas no plano \mathbf{XY} e representam uma determinada

cota (eixo ZZ). O tamanho da matriz tri-dimensional é estático, mas pode ser definido pelo utilizador antes do processo de simulação propriamente dito. Alterando a dimensão da matriz, é possível alterar a área de simulação mantendo a resolução espacial e vice-versa. Esta é uma das capacidades importantes da ferramenta desenvolvida, dado que é possível simular diferentes cenários com diferentes graus de detalhe, o que torna esta uma ferramenta com um espectro bastante alargado no que toca à gama de cenários e situações passíveis de simulação.

Como dito anteriormente, o processamento é dividido por camadas horizontais, cada célula processada como um recetor independente e sendo calculados os vários fenómenos possíveis nesta ferramenta, nomeadamente, componente direta e indireta, e reflexões. Para definição dos limites de simulação existe um algoritmo intrínseco da ferramenta que limita o volume computacional, com base na localização e dimensão do edifício ou obstáculos presentes no ambiente de simulação. Deste modo, o espaço matricial corresponde exatamente aos limites inferiores e superiores da globalidade de elementos presentes. Como em muitas das ocasiões se pretende fazer o estudo de cobertura para além dos elementos, nomeadamente, no que concerne de comunicações de *Indoor* para *Outdoor* e vice versa, a ferramenta possibilita ajuste manual do espaço de simulação para além dos limites definidos pelos elementos constituintes.

Os diferentes fenómenos de propagação são executados sob a mesma ordem cronológica para todas as células, sendo que o primeiro processo é o de componente direta e indireta e só depois o cálculo das reflexões, pela sua ordem. A ferramenta não carece do cálculo das reflexões de ordem inferior para calcular as de ordem superior, dado que estes são processos independentes, que apenas carecem de alguns dados provenientes de cálculos iniciais. Estes cálculos adicionais são essencialmente cálculos de vetores normais às superfícies e outros cálculos auxiliares.

Em termos de tempo de processamento, é perceptível que quanto maior é a resolução espacial definida pelo utilizador, ou seja, quanto maior é o tamanho da matriz tri-dimensional, também maior é o tempo de processamento. Deste modo, deve existir um equilíbrio entre a resolução necessária para cada cenário e o tempo de processamento, ou seja, um cenário relativamente pequeno (ex:

apenas uma parede) terá uma maior resolução espacial do que um cenário maior (ex: edifício), para o mesmo tamanho matricial.

Nesta ferramenta está implementado um método de interpolação, cujo objetivo é melhorar a apresentação dos resultados obtidos, aumentando o número de pontos espaciais de representação. A interpolação utilizada é cúbica, dado que, a informação é simulada em forma de matriz cúbica, como já referido. Embora o fator de interpolação possa ser alterado dinamicamente, para os exemplos de simulações apresentados neste capítulo utilizou-se um fator de cinco. Assim, a matriz inicial de dimensões 40x40x40 adquire as dimensões 200x200x200, o que permite uma melhor visualização dos resultados face à resolução espacial existente. Visto que um dos objetivos desta ferramenta é ter um carácter dinâmico, este fator de interpolação permite adaptar a capacidade de processamento disponível ao cenário e à resolução espacial pretendida.

Tomando um cenário hipotético de forma cúbica e com 1,20 metros de largura, verifica-se que para uma matriz de 40 células, a cada célula representa 3 cm de largura. Simulando numa frequência de 3.34 GHz o comprimento de onda (λ) é 8,98 cm, o que se traduz numa resolução de $\frac{\lambda}{3}$. Este é um valor de resolução efetivo da simulação, porém com o método de interpolação implementado é possível aumentar a resolução após a simulação. O factor de escala da interpolação pode ser definido pelo utilizador, e admitindo um factor de 5, obtém-se $40 \times 5 = 200$ células. O mesmo cenário hipotético com este método apresenta $\frac{1.20\text{metros}}{200} = 0.6$ cm de largura de célula, o que se traduz em aproximadamente $\frac{\lambda}{15}$. Deste modo, verifica-se que a resolução espacial é mais do que suficiente para o cenário em causa.

5.5 ANTENAS

A forma mais simples de representar uma antena em ambiente de simulação é admitir que a antena é isotrópica e por isso não carece de uma discriminação angular do seu comportamento, ou seja, não carece de um diagrama de radiação. Porém, esta situação não representa corretamente o comportamento das antenas no mundo real, ou seja, a grande maioria das antenas, senão todas, são antenas que não apresentam um diagrama de radiação isotrópico.

Para aumentar a precisão de uma ferramenta de simulação, é necessário ter em consideração o diagrama de radiação, o ganho absoluto e a direção de apontamento das antenas de transmissão e receção. Contudo, é necessário o diagrama de radiação das antenas em 3D, o que muitas das vezes esta é informação que não está disponível, ou nem sequer é fornecida pelos fabricantes de antenas. Maioritariamente, a informação fornecida é apenas referente aos planos principais, nomeadamente, horizontal e vertical. Deste modo, existe a necessidade de construir os diagramas em 3D necessários para a correta simulação de cobertura através do traçado de raios [52].

A ferramenta desenvolvida permite escolher e definir o tipo de antena a utilizar, tanto para o transmissor como para o recetor e permite definir o ganho e a orientação destas antenas. Se a antena a utilizar na simulação não estiver disponível na ferramenta (por omissão), é permitida a utilização de outras antenas através da inserção das mesmas na ferramenta de simulação.

Esta secção apresenta também um método de interpolação implementado na ferramenta de simulação desenvolvida, que permite obter diagramas de radiação 3D, através dos dois planos principais do diagrama de radiação da antena (horizontal e vertical). Este é um método implementado no grupo de investigação em que este trabalho de dissertação está inserido, com base em [52].

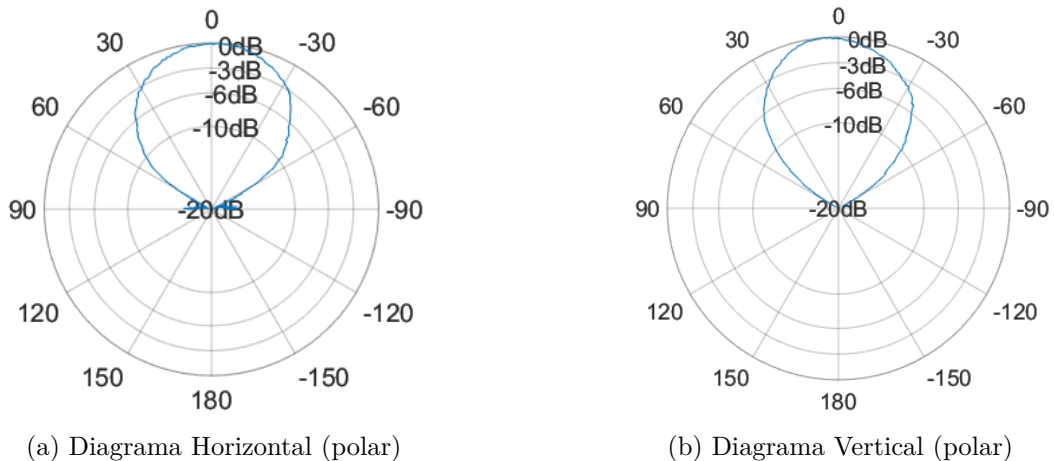


Figura 26: Diagramas de radiação planares.

Através da aquisição de diagramas 2D (Figura 26), denominados por $G_{\theta_1}(\phi)$, $G_{\theta_2}(\phi)$, $G_{\phi_1}(\phi)$ e $G_{\phi_2}(\phi)$, é possível criar o diagrama de radiação em 3D, baseando-se no método de soma ponderada [52]. Neste método, ϕ e θ são as

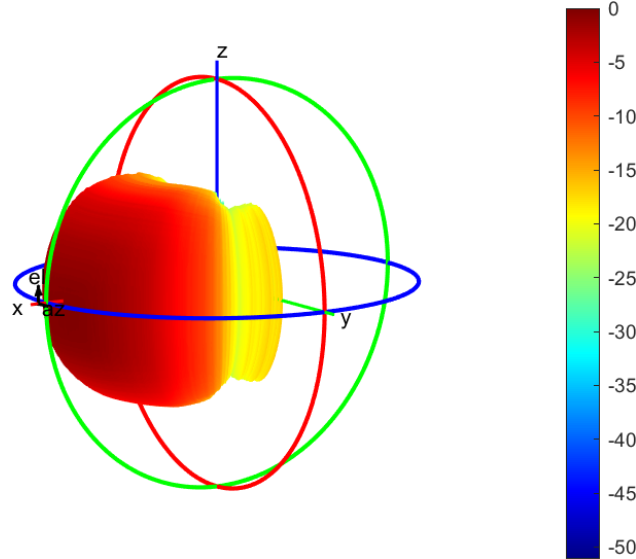


Figura 27: Diagrama de Radiação 3D (dB).

unidades angulares que dizem respeito à definição de planos horizontais e planos verticais, respetivamente. Os diagramas 2D são fornecidos por alguns fabricantes, no entanto, na ausência total destes ou na ausência destes diagramas para a frequência desejável, facilmente se procede à medição das antenas nos planos principais de radiação e, desta forma, já é possível a simulação em 3D. Portanto, os parâmetros de entrada deste método de interpolação, são os diagramas de radiação 2D dos planos principais normalizados ao seu valor máximo, presentes na Figura 26, e como saída este método fornece o diagrama de radiação 3D da antena também ele normalizado (máximo 0dB), presente na Figura 27. A criação do diagrama em 3D, definido por $\hat{G}(\theta, \phi)$ é efetuada em dois processos paralelos. O primeiro está definido na equação 4, que calcula a contribuição de cada plano principal, e o segundo está presente na equação 5 que calcula os pesos de cada contribuição tendo em conta os ângulos ϕ e θ .

$$\begin{cases} \hat{G}_{H_m}(\theta, \phi) = G_{\theta_1}(\phi) \cdot W_1(\theta) + G_{\theta_2}(\phi) \cdot [1 - W_1(\theta)] \\ \hat{G}_{V_m}(\theta, \phi) = G_{\phi_1}(\theta) \cdot W_2(\phi) + G_{\phi_2}(\theta) \cdot [1 - W_2(\phi)] \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{W}_1(\theta) = 1 - \frac{2 \cdot |\theta|}{\pi} \\ \mathbf{W}_2(\phi) = 1 - \frac{|\phi|}{\pi} \\ \mathbf{W}_3(\phi, \theta) = \frac{2}{\pi} \left| \left[\frac{\pi}{4} - |\theta| + \frac{\pi}{2} - \left| \left(\frac{\pi}{2} - |\phi| \right) \right| \right] \right| \end{cases} \quad (5)$$

Para finalizar, este método combina as contribuições calculadas anteriormente $\widehat{\mathbf{G}}_{\mathbf{H}_m}(\theta, \phi)$ e $\widehat{\mathbf{G}}_{\mathbf{V}_m}(\theta, \phi)$, através do factor $\mathbf{W}_3(\theta, \phi)$.

$$\widehat{\mathbf{G}}(\theta, \phi) = \widehat{\mathbf{G}}_{\mathbf{H}_m}(\theta, \phi) \cdot \mathbf{W}_3(\theta, \phi) + \widehat{\mathbf{G}}_{\mathbf{V}_m}(\theta, \phi) \cdot [1 - \mathbf{W}_3(\theta, \phi)] \quad (6)$$

Cada fabricante de antenas fornece os diagramas de radiação sob formas distintas e com resoluções angulares diferentes. Para além deste facto, há também a questão de duração temporal de cada medição, ou seja, pode existir limitações de tempo para efetuar a medição em ambientes controlados, e por isso efetua-se por exemplo, uma diminuição de resolução angular que irá permitir reduzir o tempo de medição. Para acomodar todas estas diferenças, que poderão eventualmente existir, criou-se a possibilidade de modificação da resolução angular para cada antena, ou seja, é possível admitir diagramas de radiação com várias resoluções angulares, tanto em azimute como em elevação.

O diagrama de radiação 3D é utilizado pela ferramenta desenvolvida, durante o traçado de raios aquando o cálculo do nível de sinal em cada célula de receção. Para cada trajetória o cálculo do nível de sinal é efetuado tendo em conta os ângulos de partida e ângulos de chegada, seja ângulos em azimute ou em elevação, dado que se trata de espaço tri-dimensional. O diagrama da antena está definido numa matrix bidimensional e, deste modo, o espaço angular entre duas células corresponde à resolução angular. Quanto maior esta resolução também menor é o erro provocado pelos arredondamento inerentes a este processo.

5.6 TRANSMISSÃO DIRETA E INDIRETA

A transmissão direta ocorre quando não existem obstáculos entre Tx e o Rx. Deste modo, o raio propagado é apenas sujeito à atenuação em espaço livre.

Pelo contrário, temos a transmissão indireta que pressupõe a interseção entre o raio e obstáculos.

Para a transmissão direta e indireta, a trajetória dos raios é definida pela análise vetorial entre os pontos Tx e Rx. Este é o método escolhido dado que a refração não é tida em consideração neste traçado de raios, pela elevada complexidade computacional que iria acrescentar à ferramenta desenvolvida, visto que, os elementos construtivos são tratados como elementos heterogéneos. Na literatura estudada verificou-se que, todas as ferramentas de simulação de traçado de raios que têm em conta a refração exercida pelas mudanças entre meios de propagação, apenas utilizam ou abordam os obstáculos como meios homogéneos. Isto torna mais simples a simulação deste fenómeno, dado que o ângulo de saída é igual ao ângulo de entrada para um dado meio homogéneo envolvido por outro meio homogéneo em ambos os lados transversais à propagação. Na Figura 28, verifica-se que um dado meio homogéneo com espessura (h) e permitividade (ε), apresenta um ângulo de incidência (θ_i) igual ao ângulo de transmissão ou saída (θ_t), assumindo que se trata por exemplo de uma parede com apenas uma camada de material homogéneo e que os meios envolventes são compostos por ar.

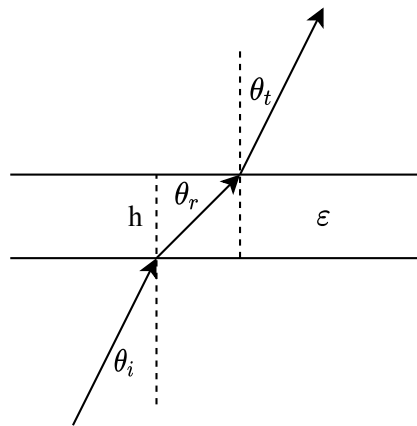


Figura 28: Refração (disposição angular).

Em conformidade com a Lei de Snell para a refração, a interseção de um raio e uma superfície provoca um desvio angular à entrada, igual ao desvio angular à saída do elemento, frisando que este facto apenas se comprova para meios homogéneos. Sabendo que a esmagadora maioria dos elementos construtivos dos edifícios são heterogéneos, pretendeu-se dar primazia à correta simulação deste meios de propagação, obtendo os seus coeficientes de transmissão e reflexão

através do Simulador de Elementos Multicamada inserido na ferramenta desenvolvida. No caso de o obstáculo presente na Figura 28 ser um objeto heterogêneo e que a sua constituição em matéria de multicamada não seja simétrica face ao seu ponto mediano, o comportamento descrito no parágrafo anterior não é aplicável. Assim, e dependendo da constituição do obstáculo, este produz um θ_t diferente de θ_i , e é por esta razão que a complexidade da ferramenta de simulação aumentaria bastante, optando-se assim pela não inserção do fenómeno de refração na ferramenta desenvolvida.

Através da simulação da componente direta e indireta, verifica-se apenas a atenuação em espaço livre e a atenuação provocada pelos elementos construtivos, sejam eles paredes, teto ou chão. Deste modo, é possível visualizar esta atenuação no edifício presente na Figura 29.

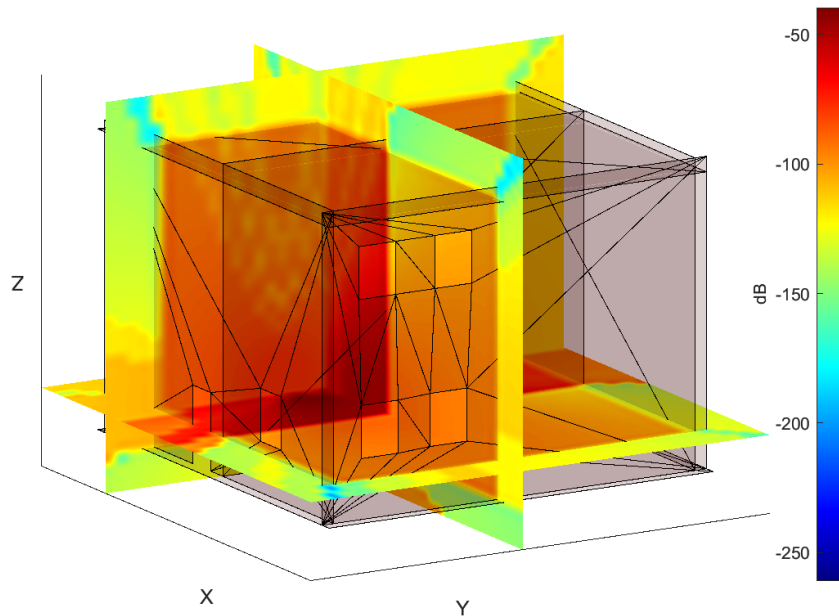


Figura 29: Resultado de simulação exemplificativa - Componente principal.

O simulador de elementos multicamada fornece os coeficientes de reflexão e transmissão para cada elemento construtivo simulado. Estes coeficientes, estão também divididos em Transversal Elétrico (**TE**) e Transversal Magnético (**TM**). Na simulação de propagação com a existência de obstáculos, os coeficientes TE e TM são utilizados consoante a disposição e tendo em conta a polarização das ondas propagadas.

Os coeficientes fornecidos pelo Simulador de Elementos Multicamada apresentam uma resolução angular igual a 1° . Deste modo o tratamento dos mesmos

é efetuado com base em arredondamentos à unidade. Depois de verificado qual o ângulo de incidência, procede-se ao arredondamento do ângulo e o cálculo da potência transmitida pelo obstáculo para um dado raio incidente, obedecendo à proporção protagonizada pelo coeficiente respectivo ao ângulo em causa, tal como no cálculo da potência refletida (secção 5.7).

Em suma, na transmissão direta e indireta, este traçado de raios simula as perdas de percurso pela aproximação à atenuação em espaço livre e simula também as perdas de potência através da atenuação provocada por obstáculos.

5.7 REFLEXÃO DE RAIOS

O Método das Imagens tem como principal objetivo a determinação dos pontos imagem de Tx em relação aos elementos construtivos (faces), deste modo, é possível determinar a trajetória exata de cada raio refletido entre o Tx e o Rx. Este processo é repetido tantas vezes quanto o número de reflexões a simular.

Neste caso em concreto o Método das Imagens é utilizado em ambiente 3D e comprova o correto funcionamento do mesmo através de planos não curvos, ou seja, os planos circulares têm de ser sujeitos a aproximações através da junção de planos retos (tão pequenos quanto possível). Assim, as trajetórias calculadas entre o Tx e o Rx estão de acordo com a Lei de Snell para a reflexão [53], seja a primeira, segunda ou terceira reflexão. O ângulo de incidência formado entre o raio incidente e a normal à superfície é igual ao ângulo de reflexão.

Por este ser um método recursivo, é utilizado para simular o comportamento de três ordens de reflexão: primeira, segunda e terceira. De acordo com a Figura 5, o ponto imagem Tx_i é um Tx virtual, que permite o traçado deste ponto até ao ponto de receção Rx , determinando-se assim o ponto de reflexão Q , que é o ponto de interseção entre a superfície e o segmento de reta Tx_i-Rx . Deste modo, é possível obter a trajetória exata do raio com origem em Tx , passagem pelo ponto de reflexão Q e chegada ao ponto de receção Rx . Tanto o Tx como o Rx podem ser pontos de reflexão anterior e posterior respetivamente, ou seja, dada a recursividade do método, pode eventualmente existir vários pontos de

reflexão de um determinado raio, em que cada processo de cada reflexão o ponto anterior é o ponto Tx e o ponto posterior é o ponto Rx .

Para a determinação dos percursos de todos os raios refletidos, é imprescindível o conhecimento de todos os pontos de transmissão imagem perante todas as superfícies existentes no cenário de simulação. Estes pontos de imagem são armazenados em forma de estrutura para permitir o cálculo das trajetórias dos raios, qualquer que seja a ordem de reflexões desejada, desde que inferior ou igual a três.

Durante o cálculo da trajetória de raios refletidos, é também calculada a potência refletida em cada superfície, dado que as superfícies não apresentam todas os mesmo coeficientes de reflexão, e deste modo é necessário o conhecimento discriminado do comportamento elétrico de cada elemento construtivo. Estes coeficientes de reflexão inseridos no conjunto de dados que resultam das simulações efetuadas pelo simulador de propagação em elementos multicamada, tal como os coeficientes de transmissão que são tidos em conta no cálculo da trajetória da componente direta.

No cálculo da potência refletida em cada superfície, é tido em consideração a atenuação exercida pelos elementos que intersejam as trajetórias antes e depois do ponto de reflexão (atravessamento). Portanto, dentro do cálculo de reflexões, é necessário também existir cálculos de componentes diretas. Este processo fica exponencialmente mais pesado a cada ordem de reflexão adicionada, dado o aumento do número de verificações que é necessário efetivar. É possível verificar a simulação destes fenómenos na Figura 30 onde está apresentada a primeira reflexão, como exemplo demonstrativo de comparação com a Figura 29.

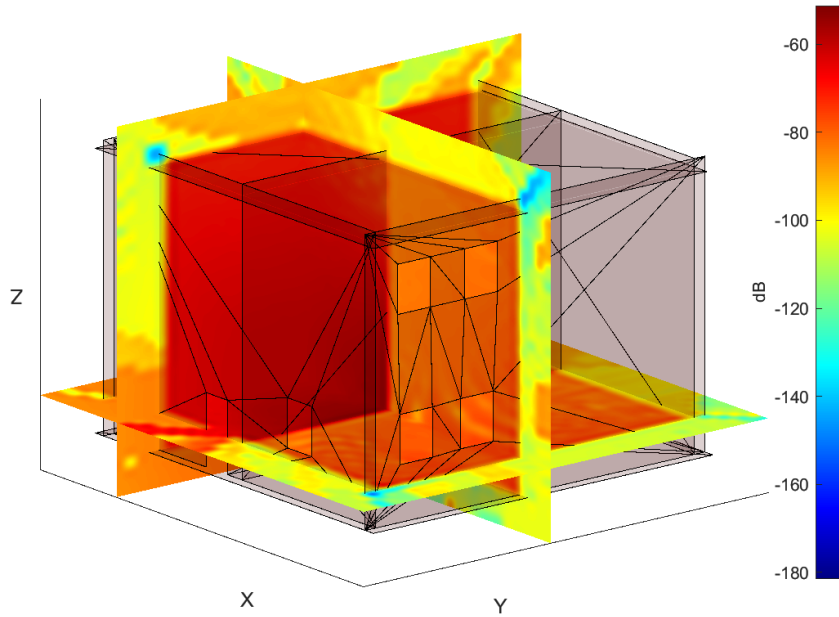


Figura 30: Simulação da reflexão de 1ª ordem.

As combinações de pontos de imagem sucessivas sugerem a formação de um conjunto organizado que pode ser tratado por "árvore de imagens", que pode descrever as combinações de pontos de imagem desde o Tx até ao Rx . A Figura 31 evidencia o que esquema de combinações em forma de árvore para ajudar ao entendimento do leitor, considerando o número máximo de reflexões que a ferramenta desenvolvida permite.

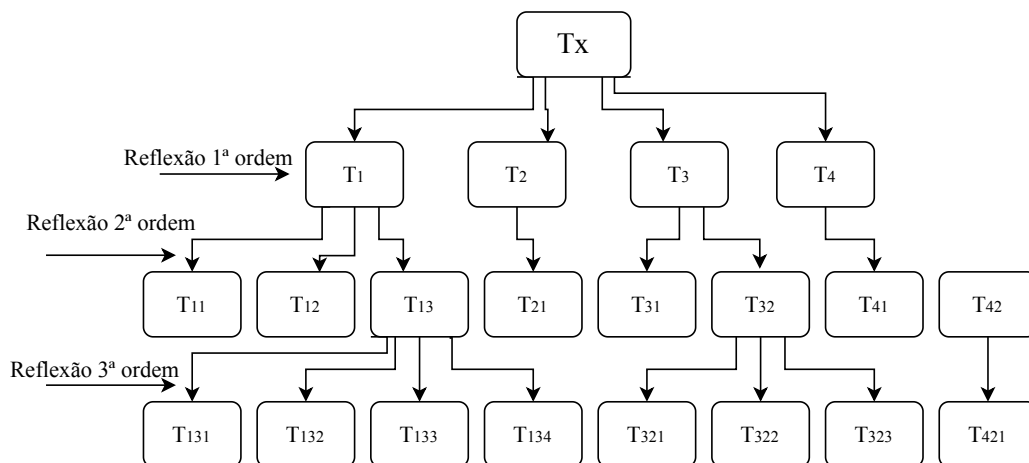


Figura 31: Árvore de Imagens de reflexões.

Na Figura 31, o Tx é o ponto de origem (nível 0) para a criação dos pontos imagem, que advêm do espelhamento centrado em cada superfície presente no cenário de simulação. Partindo de Tx são gerados os pontos imagem referentes à primeira reflexão, dado origem ao primeiro nível da árvore representado pelos

pontos $T1$, $T2$, $T3$ e $T4$. Sabendo que este é apenas um caso exemplificativo e que visa apenas à explicação concetual, verifica-se a existência de quatro superfícies no cenário. No segundo nível da árvore estão presentes os pontos imagem referentes às reflexões de segunda ordem, onde é possível verificar que no cenário hipotético representado na árvore, apenas algumas superfícies apresentam contribuições para esta ordem de reflexão, tal como é de esperar num cenário real. Este argumento é utilizado também na formação do terceiro nível da árvore.

Para a construção hipotética da árvore, o conhecimento da posição de eventuais recetores não é importante, dado que esta apenas carece do conhecimento da posição do transmissor. Para um Tx com uma posição fixa e definida, o algoritmo de definição das primeiras reflexões é apenas utilizado uma vez, tal como a estrutura da árvore o sugere. Deste modo, o que pode porventura ser alterável com a modificação da posição física de um dado Rx , é o ponto de reflexão e conseqüentemente o ponto de imagem. Os pontos de reflexão devem ser calculados para cada ponto recetor e logo após este procedimento, é possível obter a trajetória referente à primeira reflexão, sendo estes os pontos (reflexão) que efetivamente determinam o caminho dos raios. Como dito anteriormente, a determinação do ponto de reflexão é efetivada através da interseção entre uma superfície e o segmento de reta que une o ponto de imagem e o recetor.

Sendo um processo recursivo, a explicação fornecida para a primeira reflexão serve também para as sucessivas reflexões, sendo que, as reflexões sucessivas são efetuadas tendo em conta os pontos imagem das reflexões anteriores até ao nível 0 da árvore, onde se encontra a origem. Por exemplo, para a determinação da trajetória referente a uma qualquer terceira reflexão, verifica-se a existência desta reflexão, determinando o ponto de reflexão. Após esta determinação, é efetivado o segmento entre o recetor e este ponto. De seguida ocorre a procura pelo segundo ponto de reflexão que permite a determinação do segundo segmento da trajetória, que por sua vez dá lugar à procura do primeiro ponto de reflexão e depois a ligação ao transmissor, completando assim a trajetória. É importante frisar que a interseção entre um ponto imagem e a superfície que lhe deu origem, pode não existir, assim verifica-se que não existe ponto de reflexão e o estudo da reflexão em causa é extinto. Em cada ponto de reflexão

da trajetória, é aplicado o coeficiente de reflexão do elemento refletivo em causa e perante o ângulo de incidência, sabendo que este coeficiente altera para cada unidade angular.

Em termos de desempenho e armazenamento, verifica-se que quanto maior é o número de superfícies também maior será a árvore de imagens originada, o que pode criar dificuldades de armazenamento e também dificuldades de processamento. Isto comprova-se através da Figura 31, que evidencia um crescimento exponencial do número de reflexões com o aumento do número de superfícies, dado que o número de pontos imagem cresce também exponencialmente.

$$(NS - 1)^{NR} \tag{7}$$

Numa análise aproximada e de forma a quantificar o número de pontos imagem, pode afirmar-se que este número traduz-se na equação 7, onde NS é o número de superfícies e NR é o número de reflexões consideradas. Esta permissa verifica-se, sabendo que, cada elemento construtivo é apenas considerado como uma e só uma superfície para o traçado de raios.

5.8 PRÉ-VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA - BARREIRA DE TRONCOS

O desenvolvimento da ferramenta de simulação de traçado de raios, cria a necessidade de uma validação prévia e superficial para averiguar o correto funcionamento e o nível de precisão dos resultados obtidos. Assim, esta secção apresenta uma pré-validação da ferramenta através de uma comparação entre os resultados obtidos em simulação utilizando esta ferramenta, os resultados de simulação no *software* CST MICROWAVE STUDIO® (Figura 32) e medições práticas (Figura 33).

O cenário utilizado, consiste em barreiras eletromagnéticas altamente sustentáveis, sugeridas pelo projeto Hybrid Log Shield (HLS) ao qual estou afeto. Este é um cenário que apresenta várias configurações lineares de troncos de árvores, sendo que, neste caso, são apresentados duas configurações. A primeira é constituída apenas por uma camada linear e a segunda é constituída por 3 camadas lineares de troncos. A orientação dos troncos segue a disposição apresentada na Figura 33.



Figura 33: Barreira na Câmara Anecóica.

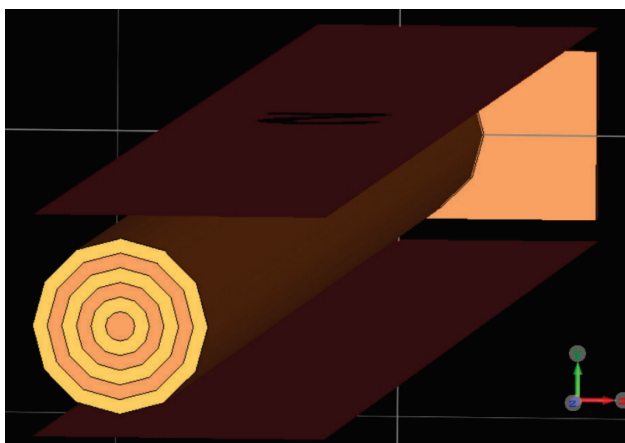


Figura 32: Modelo de Simulação em CST MICROWAVE STUDIO®.

As condições de simulação e medição de resultados, utilizados na comparação com os resultados de simulação obtidos nesta dissertação, estão descritos com detalhe em [54]. Referindo apenas que os resultados aqui apresentados provenientes da ferramenta desenvolvida, foram simulados com recurso a um modelo BIM da barreira à escala real e a frequência utilizada foi 3.34 GHz, para haver concordância na frequência utilizada no Capítulo 6, tal como a polarização das antenas.

Na Figura 34, verifica-se que, para a frequência 3.34 GHz o valor de atenuação da barreira para polarização horizontal é de aproximadamente **11dB** e **6dB**, para componente simulada no CST e componente medida, respetivamente.

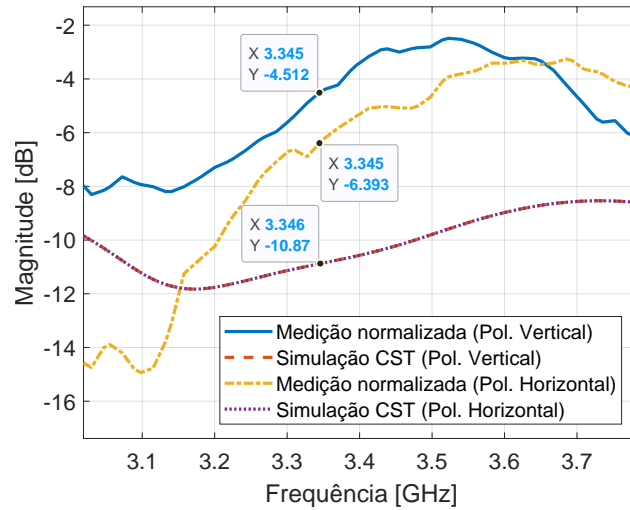


Figura 34: Resultados de medições e simulação CST (1 camada).

Em termos de resultados de simulação na ferramenta desenvolvida, verifica-se através das Figuras 35 e 36, que a barreira apresenta uma atenuação de aproximadamente **7dB**, analisando apenas a potência de sinal imediatamente antes (ponto **A**) e depois da barreira (ponto **B**), na direção horizontal e no sentido do máximo de radiação de Tx. Este sentido descreve uma trajetória linear e perpendicular à barreira.

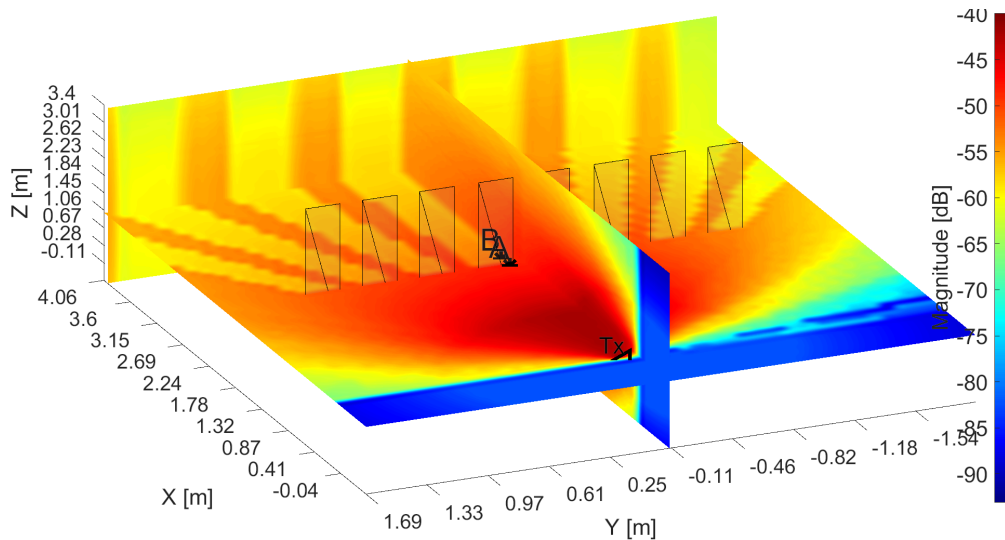


Figura 35: Resultados de simulação (1 camada) - Visualização 3D.

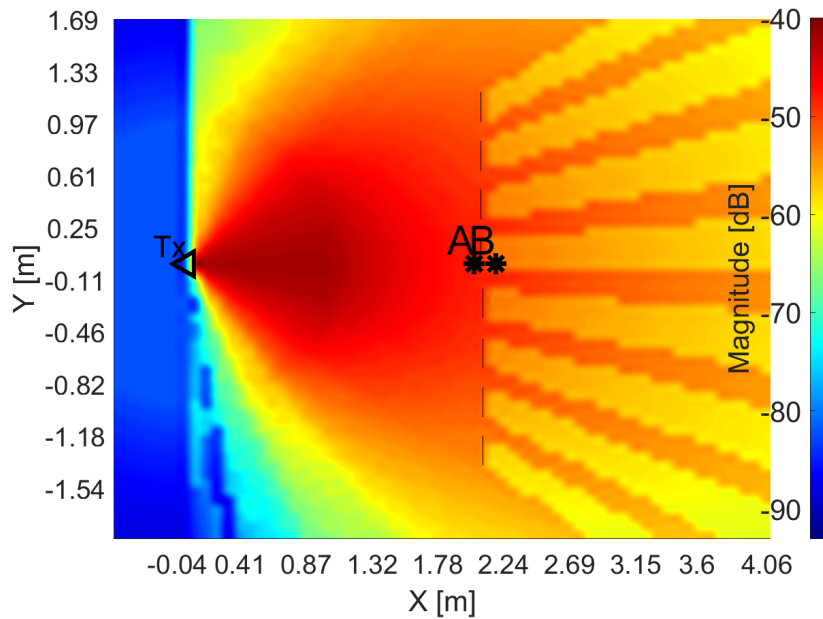


Figura 36: Resultados de simulação (1 camada) - Visualização de topo.

Através da comparação dos resultados mencionados, verifica-se que o erro da ferramenta de simulação é aproximadamente **-1 dB** face aos resultados das medições, e aproximadamente **+4 dB** face aos resultados das simulações efetuadas no CST.

De modo a tornar esta pré-validação mais robusta efetuou-se outra simulação com uma configuração da barreira já presente na literatura, em [55]. Nesta configuração, a barreira é composta por 3 camadas de troncos e de acordo com [55], o valor de atenuação para 3.34 GHz é aproximadamente 8 dB.

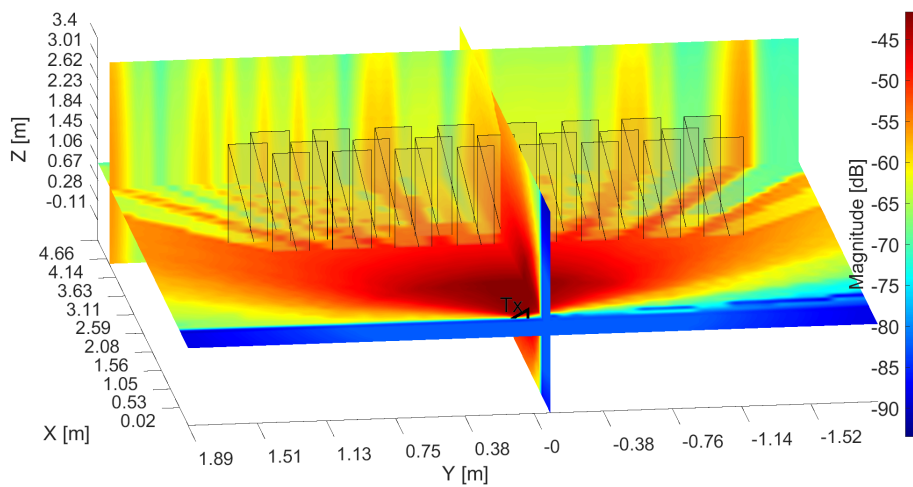


Figura 37: Resultados de simulação (3 camadas) - Visualização 3D.

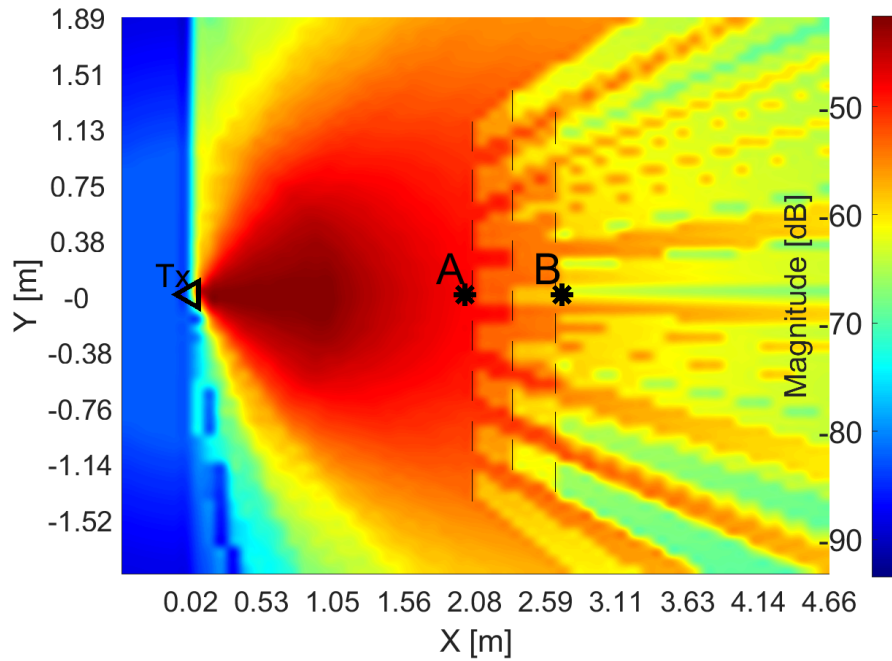


Figura 38: Resultados de simulação (3 camadas) - Visualização de topo.

Na simulação efetuada através da ferramenta desenvolvida, cujos resultados estão presentes nas Figuras 37 e 38, verifica-se que a diferença entre os pontos **A** e **B**, respetivamente, posicionados antes e depois da barreira, apresentam uma diferença de aproximadamente 10 dB. Este é portanto o valor simulado de atenuação da barreira no sentido de Tx à normal da barreira. Verifica-se um erro de aproximadamente 2 dB, face ao resultado da simulação efetuada em CST e apresentado na Figura 39.

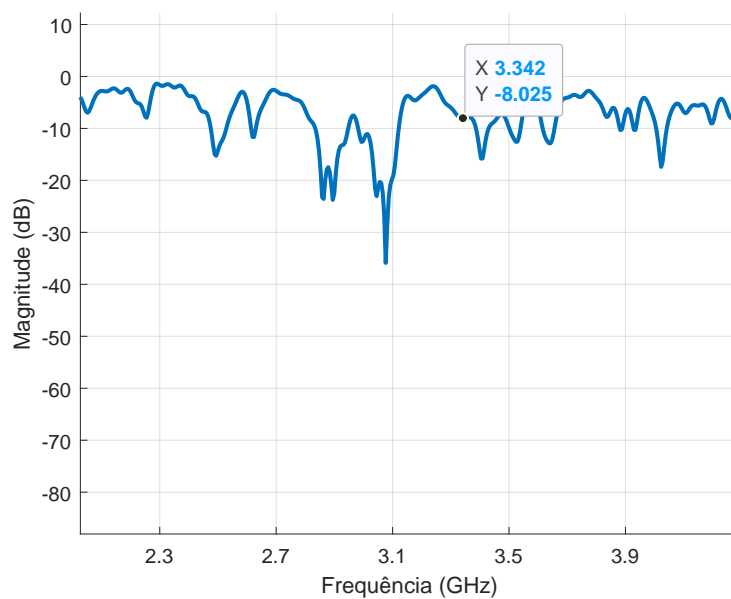


Figura 39: Resultados de simulação CST - barreira com 3 camadas.

5.9 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta o módulo de traçado de raios presente na ferramenta desenvolvida. Que foi baseado no trabalho disponibilizado em [56].

O traçado de raios utilizando cálculo vetorial e o métodos das imagens, permite encontrar as trajetórias exatas dos raios presentes num cenário de simulação, o que possibilita por sua vez simulações de cobertura rádio com elevada precisão.

Os cenários de simulação são importados diretamente para este módulo e são calculadas as componentes direta, indireta e refletida, tal como mencionado anteriormente. É permitida a inserção de qualquer tipo de antena e de diferentes modos, tal como, a inserção apenas dos diagramas de radiação dos planos principais da antena e permite a inserção de diagramas de radiação com diferentes resoluções angulares.

Verifica-se que em termos de tempo de processamento, este módulo é bastante rápido para as componentes direta, indireta e reflexões de primeira ordem, mas mostra-se um pouco mais lento para as reflexões de segunda e terceira ordem.

Para concluir, é apresentada duas pré-validações da ferramenta desenvolvida. Estas são efetuadas recorrendo à comparação de resultados de simulações efetuadas também em CST e resultados de medições práticas perante um cenário conhecido.

VALIDAÇÃO E RESULTADOS

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações efetuadas através da ferramenta desenvolvida, os resultados das medições efetuadas para validação da ferramenta e são também apresentados os métodos e equipamentos de medição utilizados. Na ferramenta desenvolvida, é utilizado o Traçado de Raios descrito no capítulo 5 e este é baseado no Método das Imagens para determinação exata das trajetórias de raios.

Para a validação da ferramenta desenvolvida, foram comparados os resultados de simulação com resultados reais medidos através do sistema de medição apresentado neste capítulo. Para esta validação é utilizado um modelo BIM criado no programa Autodesk Revit, o mais próximo com a realidade quanto possível e necessário.

Aqui é também apresentado todo o método de medição e pós tratamento de dados, dado que, o método em causa carece de uma normalização através de medições em ambiente controlado, nomeadamente, em câmara anecóica.

6.2 CÂMARA ANECOICA

As medições de referência para normalização de resultados carecem de um ambiente de medição controlado, por isso, foram efetuadas dentro de uma câmara anecóica, do grupo de Antenas e Propagação do Instituto de Telecomunicações - Leiria, localizado no Politécnico de Leiria, Portugal.

Esta câmara tem dimensões 5.7 metros de comprimento, 4.8 metros de largura e 2.9 metros de altura, o que fornece aproximadamente 80 metros cúbicos de volume de medição. Possui dois acessos ao seu interior: uma porta

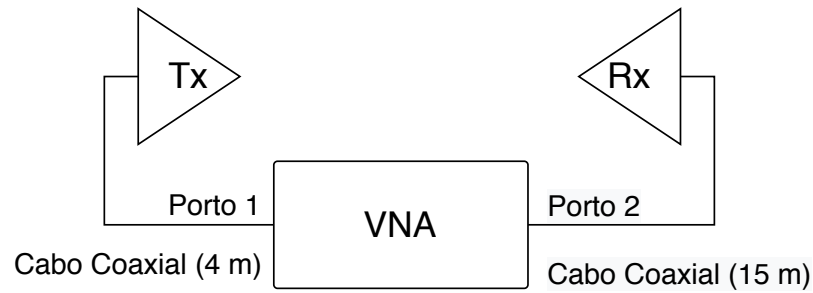


Figura 40: Diagrama representativo de esquema de medição.

com 2.15 metros de altura e 0.8m de largura, e uma porta tripla de abertura ao meio com 2.15 metros de altura e 3 metros de largura.

O interior da câmara anecoica é integralmente revestido com uma película de alumínio, de modo a proporcionar blindagem eletromagnética face a interferências exteriores. Por cima desta película, existe uma cobertura efetuada por absorventes do tipo Eccosorb VHP-8 e VHP-12 fabricados pela Emerson & Cumming, Inc, presentes na Figura 41. Estes absorventes apresentam coeficientes de reflexão na ordem dos -25dB para sinais rádio acima dos 500MHz [57] [58], o que permite trabalhar com as frequências utilizadas neste trabalho ($f > 680$ MHz).

6.3 CARATERIZAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Nesta secção é apresentado o sistema de medição utilizado nas medições práticas efetuadas, expondo os equipamentos e os parâmetros de medição.

As medições efetuadas na câmara anecóica e nos cenários *outdoor*, foram efetuadas utilizando um VNA do inglês *Vector Network Analyzer* da marca Rohde & Schwarz e modelo ZVM. Este é um aparelho de medição que permite medições de amplitude e fase em banda larga, fornecendo assim a possibilidade de análise temporal das componentes propagadas num canal. Sabendo que se pretende a medição do sinal de chegada através da emissão e receção entre duas antenas através de um qualquer canal, então a medição foi efetuada tendo em conta o S_{21} , como se pode verificar no diagrama representativo presente na Figura 40. As antenas utilizadas para emissão (Tx) e receção (Rx), são Aaronia HyperLOG 30100 e Aaronia HyperLOG 60100, respetivamente. Utilizou-se polarização horizontal, através do posicionamento destas na direção horizontal,

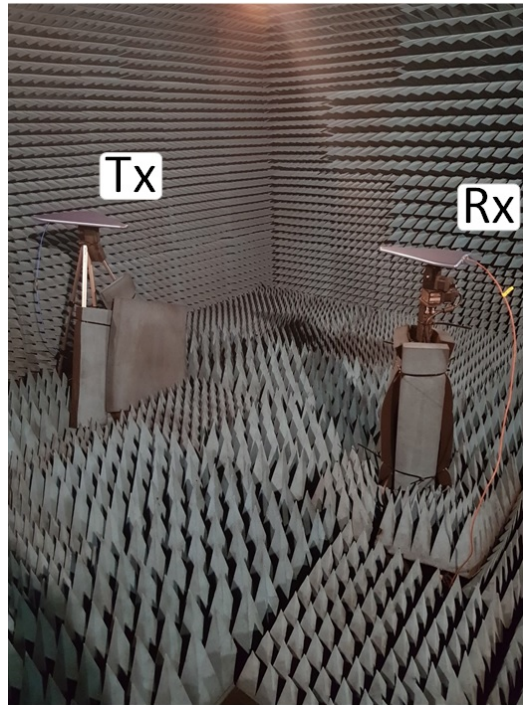


Figura 41: Sistema de medição no interior da Camara Anecóica.

como se pode verificar na Figura 41, e posicionadas a 1.13 metros de altura em relação ao pavimento. A banda de frequência utilizada (banda larga), tem início nos 680 MHz e fim nos 6 GHz. A frequência mínima foi escolhida tendo como fundamento a frequência mínima de trabalho das antenas e a frequência máxima foi escolhida com base na resposta em frequência dos cabos utilizados, dado que, apresentam grandes atenuações para valores de frequência mais altas.

Para completar a caracterização do sistema de medição e sabendo que os diagramas das antenas utilizadas, são necessários para efetuar e analisar a simulação, procedeu-se à medição prática destes diagramas na frequência de estudo (3.34 GHz), definida pelo centro da banda de medição. A medição destes diagramas foi efetuada de -90° a $+90^\circ$, e a representação destas está presente nas Figuras 42 e 43. O esquema de medição segue o mesmo paradigma que o sistema apresentado na Figura 41, com rotação da antena recetora protagonizada por um motor de passo com resolução angular igual a 1° .

A ferramenta de simulação utiliza diagramas de radiação em 3D, assim foi aplicado um método de interpolação, descrito na Secção 5.5. Este método permite a elaboração de um diagrama de radiação 3D através dos diagramas

de radiação dos planos principais da antena. Estes diagramas principais devem ser centrados na potência máxima da antena.

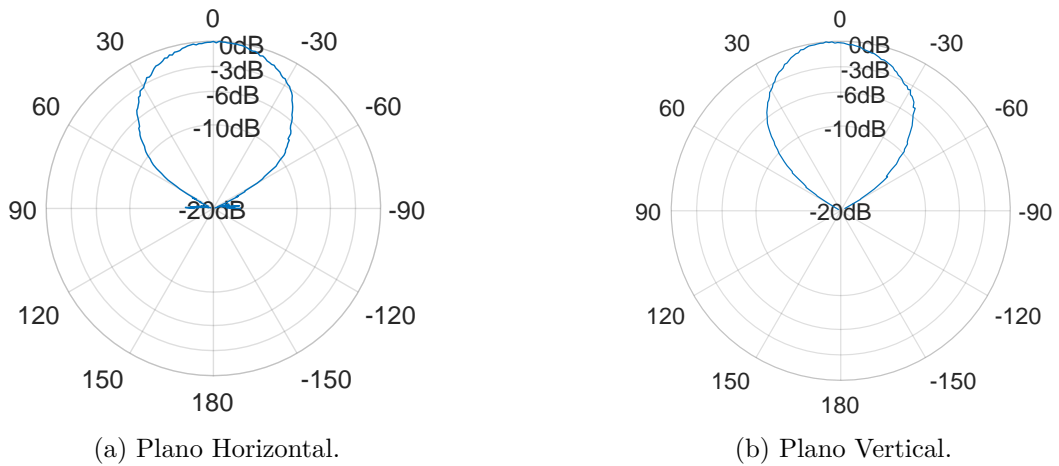


Figura 42: Diagramas de radiação planares - Antena Emissora.

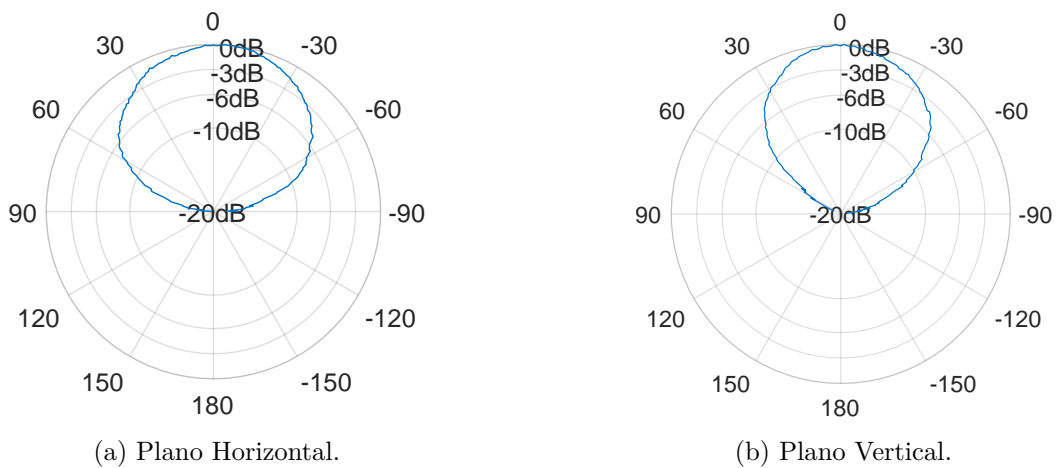


Figura 43: Diagramas de radiação planares - Antena Recetora.

Como dito anteriormente, os planos principais da antena adquiridos nestas medições devem ambos estar centrados na potência máxima, sendo este um ponto de coincidência entre eles. Assim, este processo é seguido de uma normalização em relação ao ponto de máxima potência, descartando qualquer efeito do sistema de medição como um todo, sejam eles, perdas no canal de transmissão e perdas nos cabos. Este procedimento permite também eliminar o ganho efetivo (dBi) de ambas as antenas, sabendo que para medir o diagrama de radiação de uma antena (posição Rx) é utilizada a antena par para emitir e vice versa.

Verifica-se que ambas as antenas apresentam uma largura de feixe a meia potência aproximadamente de 30° em qualquer uma das direções (horizontal e vertical), à exceção da antena receptora (HyperLOG60100) que apresenta uma largura de feixe a meia potência ligeiramente superior, como se pode ver na Figura 43a.

6.4 CALIBRAÇÃO E NORMALIZAÇÃO

O VNA apresenta uma fonte interna que não coincide exatamente com a impedância de 50Ω para todo o espectro da sua gama de frequência de funcionamento. Deste modo, é necessário eliminar o efeito de variação dependente da frequência de medição. Existem vários métodos de calibração para eliminar este tipo de efeitos, existe um método de calibração que consiste na conexão de cargas conhecidas nas pontas de prova do VNA, sejam elas circuito aberto, curto circuito ou *match*. Durante esta inserção de cargas, é memorizada a resposta em frequência de cada uma face à gama de frequências de medição previamente escolhida (680 MHz a 6 GHz). Esta técnica cobre as três fontes independentes de erro: diretividade finita, variação de impedância do gerador e função de transferência dos cabos de conexão. Efetuado este procedimento de calibração, o VNA está calibrado até às pontas de prova colocadas nos Portos 1 e 2 [59].

Em grosso modo, o processo de calibração referido acima deveria ser utilizado para cada sistema ligado aos Portos 1 e 2 do VNA, porém a atenuação provocada pelo comprimento elevado dos cabos coaxiais utilizados, não permite a calibração deste modo. Dado que, a esta atenuação ainda se adiciona o comportamento das antenas e a atenuação em espaço livre, implementou-se um método de normalização dos resultados. Este método consiste na normalização de qualquer medição, através da divisão complexa por uma medição de referência adquirida em ambiente controlado. Deste modo, a qualquer medição efetuada ser-lhe-á imposta uma normalização em relação à referência memorizada, como se pode ver na equação 8, para o S_{21} (números complexos).

$$S_{21\text{resp.cal.}} = \frac{S_{21\text{medido}}}{S_{21\text{referência}}} \quad (8)$$

Este simples método de normalização elimina apenas as perdas dependentes da frequência e as funções de transferência de fase dos cabos, o que torna necessária a calibração efetuada anteriormente. De referir, a necessidade de somar as perdas em espaço livre referentes ao espaço percorrido pelas ondas rádio desde a antena emissora até à antena recetora dada a distância de normalização de 1 metro, como se pode ver na equação 9.

$$S_{21\text{norm}} = \frac{S_{21\text{medido}}}{S_{21\text{referência}}} + \text{FSPL}_{\text{distanciaref.}} \quad (9)$$

Através desta normalização o efeito de perdas nos cabos a diferentes frequência, bem como o comportamento das antenas é integralmente ocultado dos resultados o que permite apresentar resultados com elevada precisão em qualquer ambiente, seja ele composto por objetos que possam contaminar o resultado através de reflexões (grande parte dos cenários práticos de medição) ou ambientes totalmente controlados (câmara anecóica).

6.5 CÁLCULO DO CENTRO DE FASE DAS ANTENAS

O estudo de traçado de raios tem precisão de centímetros, deste modo, todos os parâmetros que provoquem variações nas medições foram testados e modelados. Nesta secção apresenta-se o estudo do centro de fase para a banda de frequência utilizada nas medições.

Foram efetuadas medições experimentais para tornar possível o processo de normalização falado anteriormente, estas medições foram efetuadas dentro da câmara anecóica o que permite obter medições livres de interferências exteriores, e livres de reflexões. Na Figura 44 estão representadas as medições efetuadas para distâncias de 1, 2, 3 e 4 metros à extremidade traseira das antenas, onde é conectado o cabo coaxial. Foi assinalado o nível de potência na frequência centro da banda de medição, é ela 3.34 GHz.

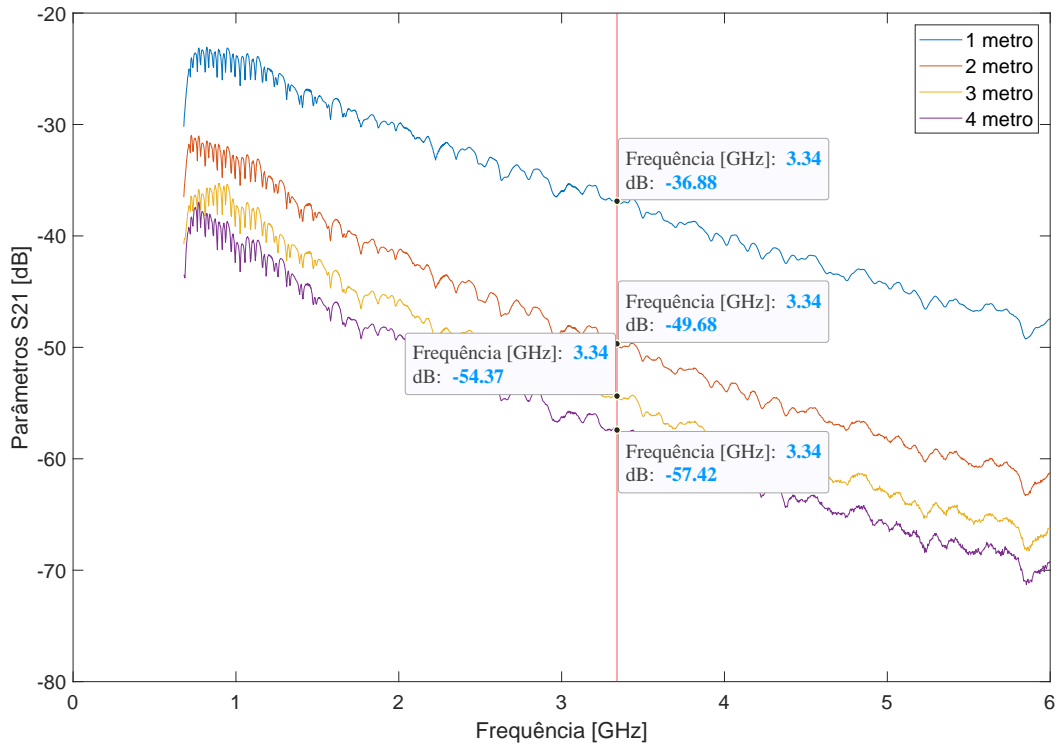


Figura 44: Medições na câmara anecóica (1, 2, 3 e 4 metros).

É importante referir que as medições aqui apresentadas têm distâncias físicas bem estabelecidas, face ao ponto de referência indicado anteriormente, porém nada garante que o centro de fase das antenas coincida com os pontos de referência física utilizados. Perante esta ambiguidade torna-se evidente a importância da determinação do centro de fase das antenas para utilização dessa referência nas medições efetuadas, esta distância está representada por d' na Figura 45.

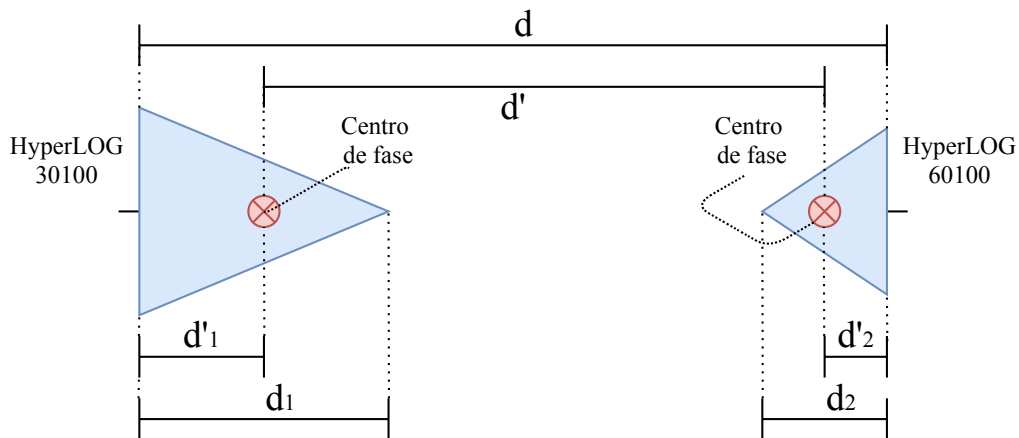


Figura 45: Esquema para determinação de centro de fase.

Pelo gráfico apresentado na Figura 44 e analisando a frequência central da banda de medição, para a medição com 1 metro de distância tem-se -36.88 dB e para a medição com 2 metros de distância tem-se -49.68 dB. Utilizando estes valores, é possível estimar o centro de fase das antenas utilizadas para esta gama de frequências. Na equação 10 é calculada a variação de potência existente na variação de distância de 1 para 2 metros, esta variação permite calcular a relação existente entre as distâncias utilizadas, através da equação 11. Esta relação é importante, dado que, permite o cálculo da distância entre os pontos de referência físicos utilizados (conector das antenas) e os centros de fase das antenas, distâncias estas definidas por d'_1 e d'_2 , respetivamente para Tx e Rx.

$$\Delta_{\text{dB}} = \text{dB}_{1\text{m}} - \text{dB}_{2\text{m}} = -36.88 \text{ dB} - (-49.68 \text{ dB}) = 12.8 \text{ dB} \quad (10)$$

$$20 \cdot \log_{10} \left(\frac{d_{2\text{m}}}{d_{1\text{m}}} \right) = \Delta_{\text{dB}} \Leftrightarrow \frac{d_{2\text{m}}}{d_{1\text{m}}} = 4.365 \quad (11)$$

Verifica-se que as distâncias entre os centros de fase das antenas segue a mesma relação de proporcionalidade auferida, deste modo, evidencia-se que a esta distância é igual à distância entre pontos de referência físicos (terminais das antenas) subtraindo $d'_1 + d'_2$, que define a distância entre os terminais físicos das antenas e os centros de fase, respetivos do Tx e Rx.

$$\frac{d'_{2\text{m}}}{d'_{1\text{m}}} = \frac{2 - (d'_1 + d'_2)}{1 - (d'_1 + d'_2)} = 4.365 \Leftrightarrow d'_1 + d'_2 = 0.7 \text{ m} \quad (12)$$

Determinando a diferença total dos dois centros de fase ($d'_1 + d'_2$) e os terminais das antenas é possível estimar cada um dos centros de fase, através da relação entre os comprimentos físicos das antenas.

$$\begin{cases} \frac{d_1}{d_2} = \frac{0.59}{0.34} = 1.74 \\ d'_1 + d'_2 = 0.7 \text{ m} \end{cases} = \begin{cases} d'_1 = 0.44 \text{ metros} \\ d'_2 = 0.26 \text{ metros} \end{cases} \quad (13)$$

As antenas utilizadas nas medições são antenas com alguma dimensão, sendo que a antena de maior (HyperLOG30100) dimensão apresenta 590 mm de comprimento no sentido de propagação, enquanto que a antena mais pequena (HyperLOG60100) apresenta 340 mm de comprimento. Deste modo, em medições de curta distância, nomeadamente, distâncias inferiores a 10 metros, verifica-se um erro de medição que pode ir de aproximadamente 10% para a distância máxima e aproximadamente 70% para medições à distância de 1 metro, dependendo da frequência de medição, sem a estimativa física do centro de fase das antenas.

6.6 RESOLUÇÃO TEMPORAL/ESPACIAL

O VNA utilizado nas medições práticas permite adquirir amostras com diferente número de pontos. Sabe-se que a resolução no domínio da frequência é tanto maior quanto maior o número de pontos adquiridos por amostra. Deste modo, utilizou-se o máximo de pontos que este equipamento disponibiliza, que no caso do VNA utilizado é 1601 pontos.

Como dito anteriormente a aquisição é efetuada no domínio da frequência, porém a análise de diferentes componentes chegadas a um determinado Rx deve ser efetuada no domínio do tempo, para assim tornar possível a discriminação temporal de cada uma. Para esta conversão é utilizada a Transformada Rápida de Fourier Inversa, onde o número de pontos adquiridos no domínio da frequência passa a ter impacto na resolução temporal do sinal transformado. Quanto maior esta resolução temporal também melhor será a discriminação e correta interpretação do valor de potência de cada chegada.

$$\mathcal{T}_{\text{res}} = \frac{1}{\text{BW}} \quad (14)$$

A resolução temporal é dada pela equação 14, que traduz o inverso da largura de banda (BW) utilizada na medição. A resolução espacial, presente na equação 15, que irá permitir distinguir as chegadas através da distância percorrida versus FSPL, é dada pela multiplicação entre a resolução temporal e a velocidade da luz (C).

$$\gamma_{\text{res}} = \mathcal{T}_{\text{res}} \times C \quad (15)$$

Cada ponto no domínio do tempo está separado em \mathcal{T}_{res} segundos do ponto anterior e do próximo ponto.

6.7 CENÁRIO A

O cenário aqui utilizado para efetuar medições práticas, de modo a validar a ferramenta desenvolvida está apresentado na Figura 46. O mesmo tem localização no Edifício A da ESTG - Politécnico de Leiria (Campus 2), mais precisamente no exterior do laboratório da câmara anecóica. No cenário utilizado para simulação foi ocultado o canteiro que se encontra nas Figuras, tomando-se todo o piso como uma única laje.



Figura 46: Cenário de Medição Outdoor.

Em termos de posicionamento físico das antenas e para o leitor conseguir ter uma ideia da configuração utilizada, na Figura 69 o Tx está representado pela antena mais próxima, enquanto que na Figura 69b é o Rx que está mais próximo.

Este cenário é constituído por duas paredes duplas de tijolo, com reboco apenas na face interior, e as medições foram apenas efetuadas no exterior, de modo a validar o funcionamento da ferramenta para transmissão direta (componente principal) e reflexões. Não foram efetuadas medições no interior do edifício, analisando a transmissão através das paredes, dado que o interior possui diversos objetos e obstáculos que impedem a discriminação temporal das componentes recebidas. Para este tipo de validação apresenta-se o cenário B na secção seguinte.

As dimensões deste cenário estão presentes nas Figuras 47a e 47b, onde se verifica a presença de duas paredes em formato de canto com espessura de 0.42 metros e comprimento 5.38 e 5.02 metros. No pavimento é considerada uma laje de betão com espessura 0.20 metros.

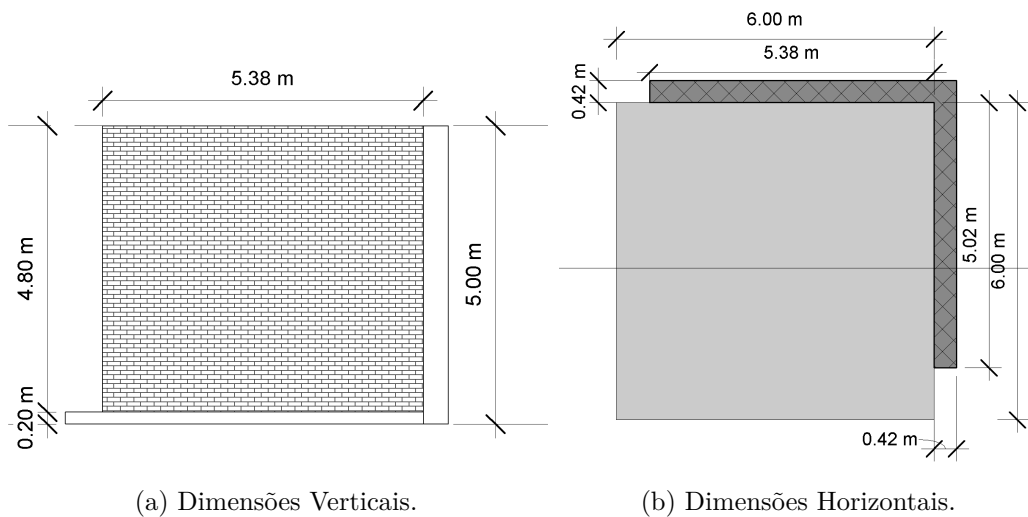


Figura 47: Dimensões Cenário A.

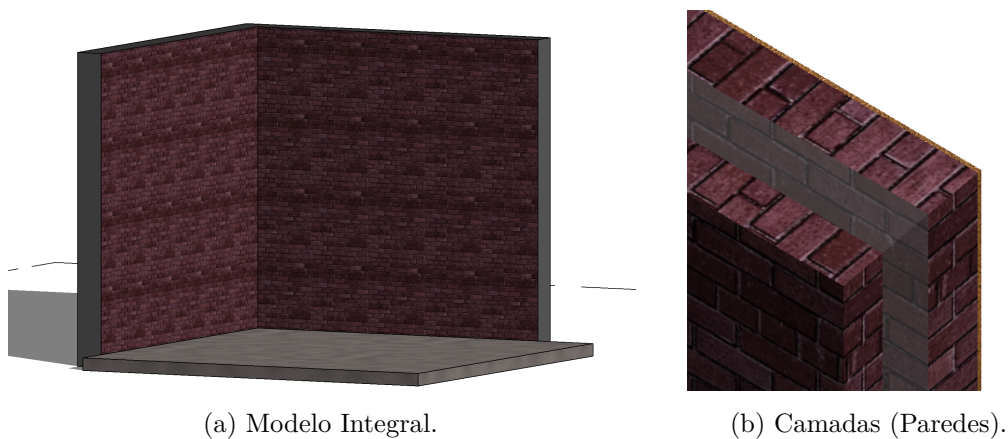


Figura 48: Modelo BIM (Revit).

O cenário foi modelado no *software* Revit e o resultado desta modelação está presente na Figura 48a. Neste modelo são definidas todas as características dos elementos construtivos utilizados, nomeadamente os materiais que constituem cada camada das paredes (Figura 48b) e da laje (pavimento), cujos valores de permitividade relativa estão presentes na Tabela 2.

Material	Permitividade Relativa
Tijolo	3.75 - 0.2046i
Ar	1.0006
Reboco	5.31 - 0.4658i
Betão	2 - 0.5i

Tabela 2: Permitividade Relativa dos Materiais - Cenário A

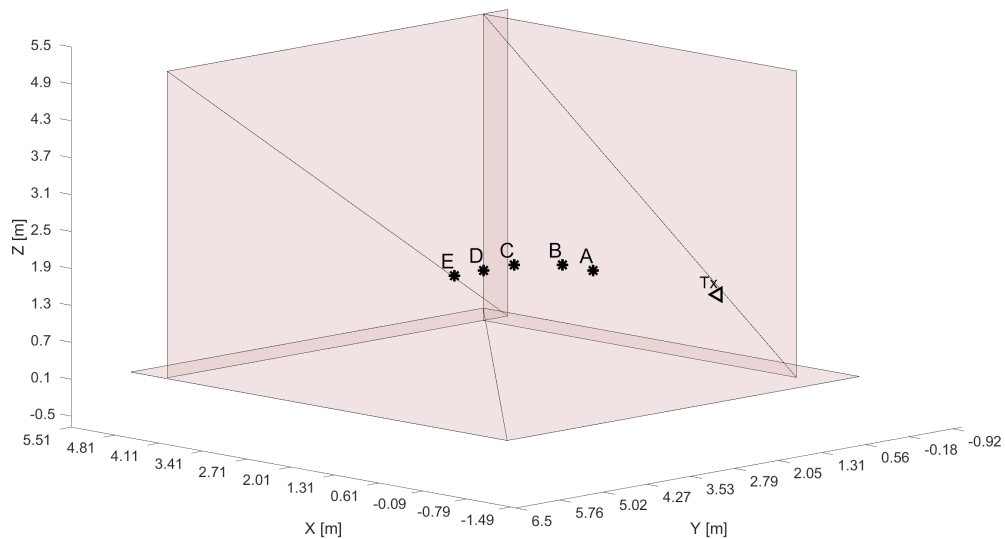


Figura 49: Posição física do recetor para cada medição (Cenário A).

Neste cenário foram efetuadas cinco medições, procurando sempre evidenciar e protagonizar reflexões relativamente fáceis de avaliar, atendendo à gama dinâmica disponível no sistema de medição utilizado. Deste modo, as medições efetuadas surgem nas posições físicas apresentadas na Figura 49, definidos pelas letras de **A** a **E**. A posição do emissor é fixa para todas as medições efetuadas e encontra-se representado pelo triângulo a preto, junto da parede à direita, a mesma informação pode ser coadjuvada pela Figura 46.

As posições dos pontos de medição **A** e **B**, estão alinhadas com o transmissor no eixo XX , apenas se distanciam em YY . Ao contrário dos restantes pontos, que estão fixos no eixo YY e distribuídos ao longo do eixo XX .

6.7.1 Resultados de simulação

As simulações apresentadas nesta secção são referentes à simulação do cenário A e os resultados são apresentados em formato 3D através da inserção de planos (*slices*), nos três eixos, estes planos são definidos pelas coordenadas cartesianas da posição do emissor, de modo a evidenciar as alterações de potência efetuadas pelos elementos construtivos.

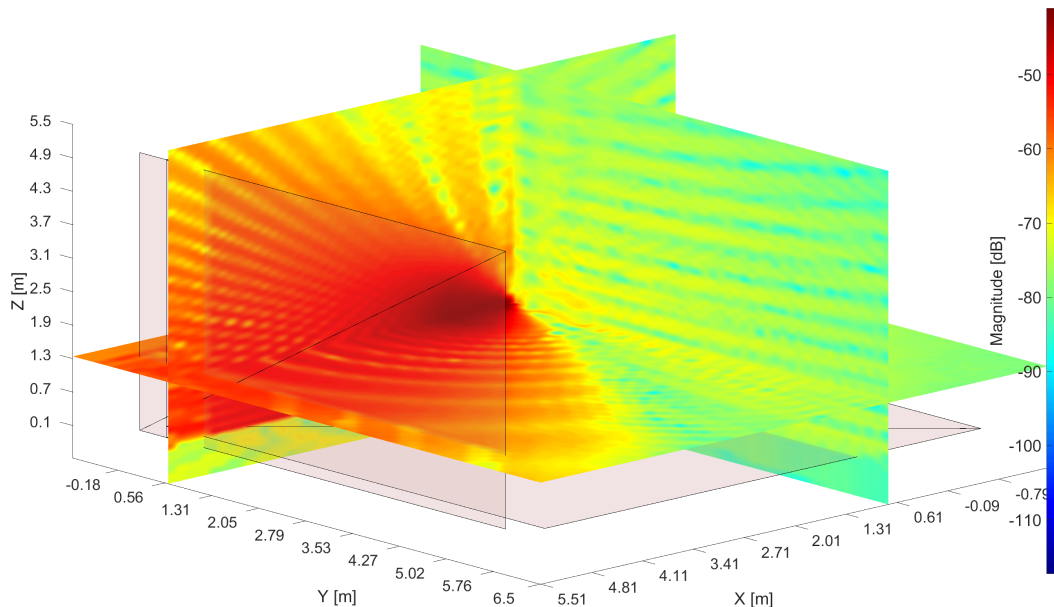


Figura 50: Resultado de Simulação - RSSI (Cenário A).

Na Figura 50, está presente o resultado da simulação na forma de RSSI, o mesmo é a soma de todas as componentes chegadas. Estas componentes são a componente principal e a 1^a, 2^a e 3^a reflexão, representadas nas Figuras 51, 52, 53 e 54, respetivamente.

Nas figuras aqui apresentadas verifica-se a influência de cada elemento construtivo presente no cenário, sendo que é possível ter uma perceção visual das atenuações e reflexões provocadas, as mesmas são abordadas em detalhe na secção seguinte.

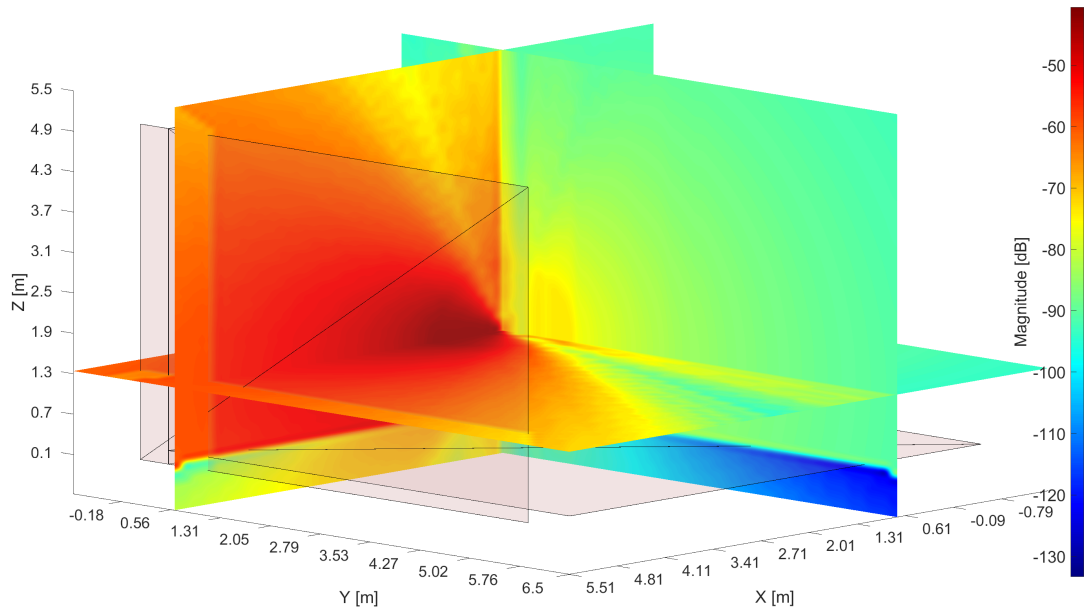


Figura 51: Resultado de Simulação - Componente Principal (Cenário A).

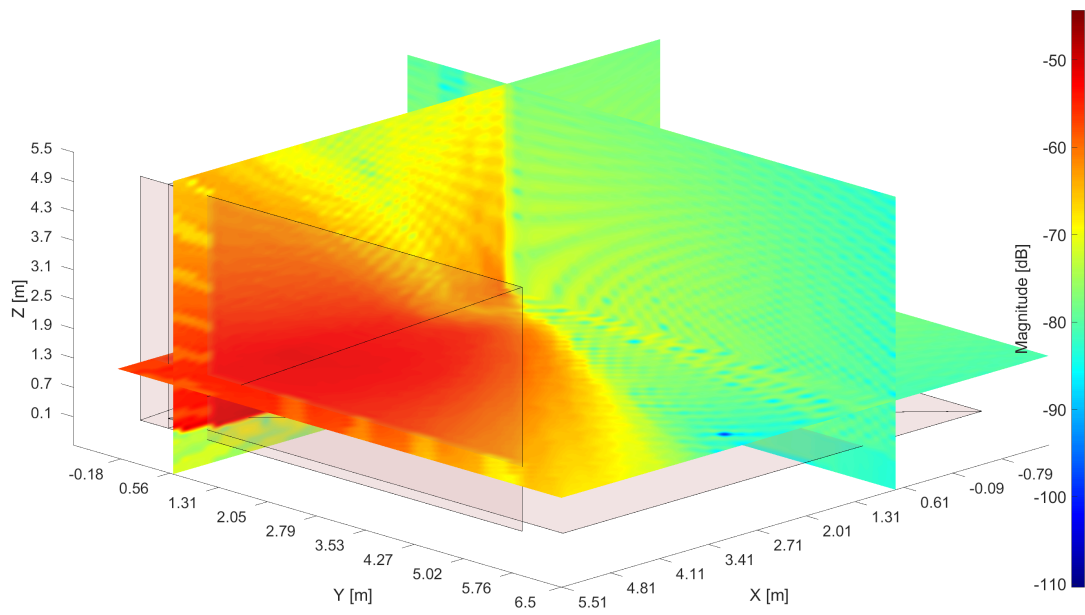


Figura 52: Resultado de Simulação - 1ª Reflexão (Cenário A).

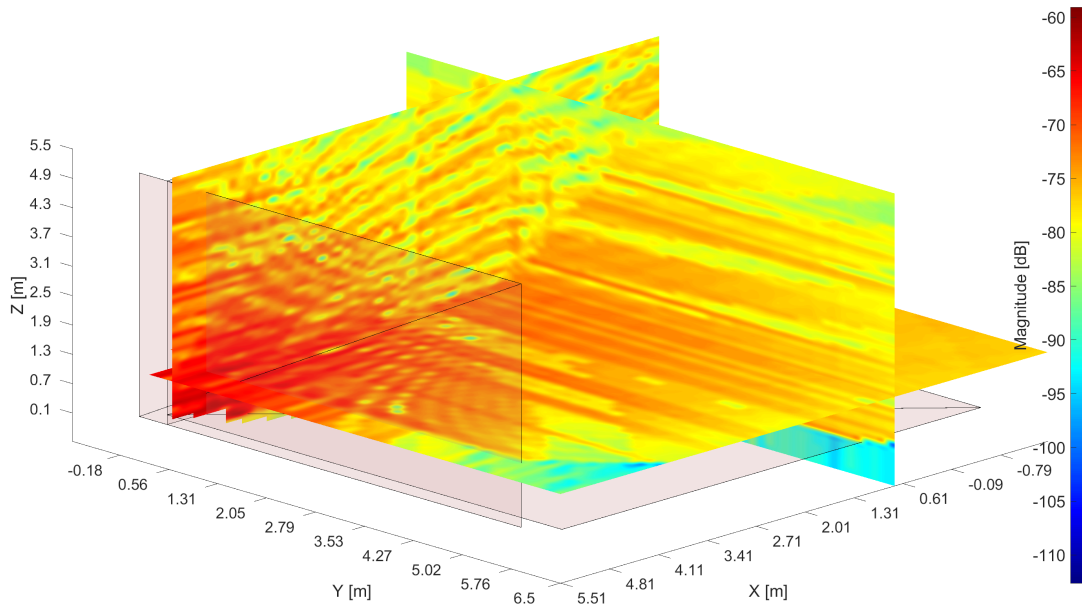


Figura 53: Resultado de Simulação - 2ª Reflexão (Cenário A).

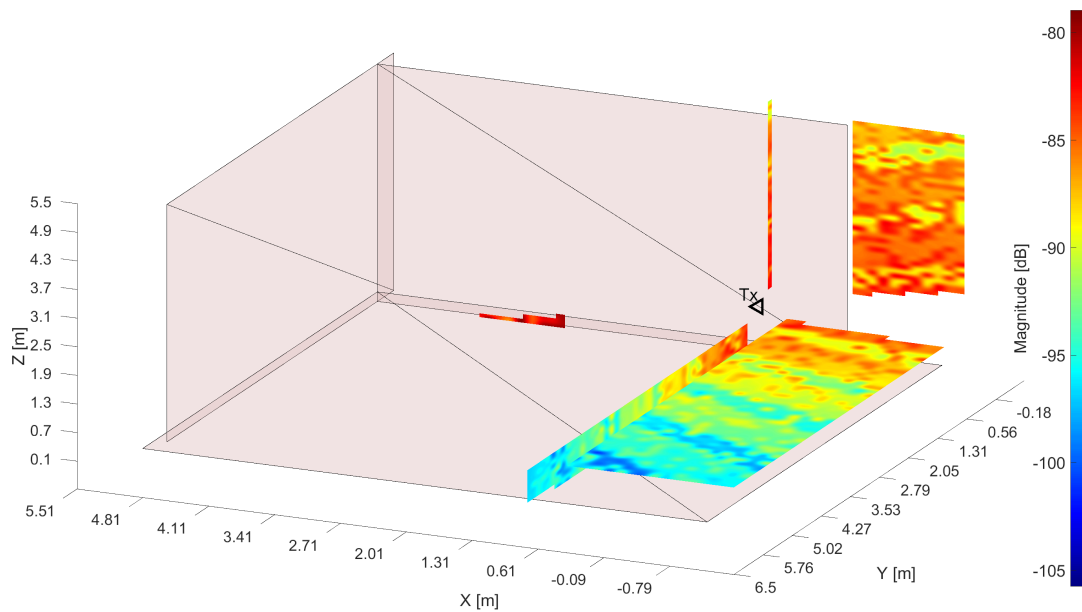


Figura 54: Resultado de Simulação - 3ª Reflexão (Cenário A).

Na representação da reflexão de terceira ordem presente na Figura 54, verifica-se que esta tipo de reflexões não existe em todo volume de simulação, tal como é de esperar num ambiente com apenas duas paredes perpendiculares e uma laje também perpendicular às duas paredes.

Quanto à atenuação dos elementos construtivos, também se verifica muito mais atenuação por parte da laje que representa o pavimento, do que das paredes, como seria de esperar. Na componente principal a atenuação da parede é aproximadamente 6dB, enquanto que a laje fornece uma atenuação

de aproximadamente 25dB, para incidências perpendiculares, ou seja, com ângulo igual à normal.

6.7.2 Comparação de resultados (*Medidos vs Simulados*)

Nesta secção são descritos e comparados os resultados da simulação e das medições efetuadas neste cenário. O objetivo desta secção, é apresentar uma validação da ferramenta desenvolvida, através da comparação dos resultados práticos e simulados para a posição física de cada medição.

A explanação da validação segue a ordem alfabética, deste modo, nesta secção são apresentados os resultados de cada posição física do recetor, começando assim pela posição **A** e terminando na posição **E**. Para cada posição de Rx são apresentados os resultados de simulação sob a forma de gráficos comparativos, e de seguida apresenta-se uma tabela com toda a informação detalhada medida e simulada, bem como um gráfico de representação de cada componente chegada ao recetor.

Na Figura 55, estão representadas as medições efetuadas para o ponto A, sendo que a antena está direcionada no sentido negativo do eixo XX. Os resultados das medições práticas aqui apresentados são já normalizados, seguindo o processo de normalização descrito na secção 6.4, contendo assim o devido acréscimo de potência e distância, face ao resultados cru de cada medição. As linhas verticais verdes e vermelhas representam respetivamente a potência simulada caso fosse uma antena isotrópica e a potência simulada com a antena utilizada nas medições. É importante a representação destas duas potências, sobretudo nas componentes recebidas na parte de trás da antena (reflexões), dado que aqui o ganho da antena é bastante baixo (aproximadamente -40dB) e pode não ser coincidente com o valor real. Isto deve-se ao facto de que na medição dos diagramas das antenas apenas foi medido de -90° a $+90^\circ$, as restantes unidades angulares foram truncadas ao valor mínimo verificado na faixa angular medida.

Para facilitar a perceção das componentes chegadas ao recetor, no que concerne à simulação efetuada, apresenta-se para cada ponto simulado um gráfico de representação angular destas. Como se pode verificar na Figura 56, a

representação das componentes é efetuada por tipo de componente, dividindo estas em componente principal (cor preta), primeira reflexão (cor vermelha), segunda reflexão (cor verde) e por último, terceira reflexão (cor azul).

É importante referir que, a informação relativamente aos ângulos de chegada e partida presente nas tabelas apresentadas nesta secção, seguem a ordem presente nos diagramas de radiação das Figuras 42 e 43, na Secção 5.5.

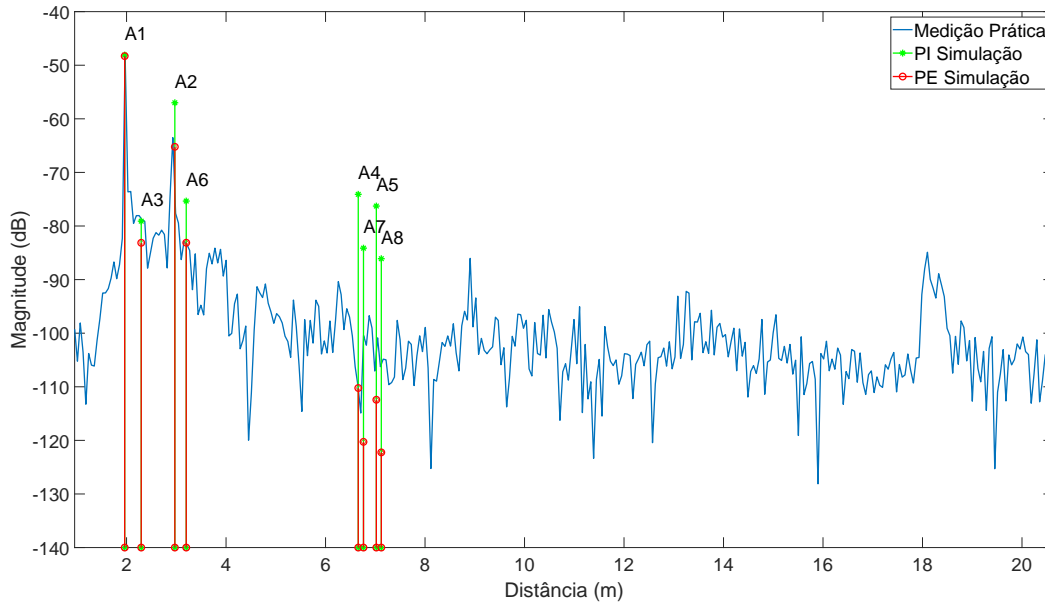


Figura 55: Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto A.

ID	Raio	PM (dB)	PEF (dB)	PI (dB)	CA (°)	CE (°)	PA (°)	PE (°)	Dist. (m)
A1	Princip	-48.3	-48.3	-48.1	-1.3	0.9	-0.3	-0.9	1.96
A2	1ºRefle	-63.5	-65.2	-57.0	-1.3	-48.6	-0.3	-48.6	2.97
A3	1ºRefle	-79	-83.1	-79.1	31.2	0.7	-31.2	-0.7	2.29
A4	1ºRefle	-109.8	-110.2	-74.1	-180.9	0.3	-0.1	-0.3	6.66
A5	2ºRefle	-107.1	-112.4	-76.3	-180.9	-18.5	-0.1	-18.5	7.02
A6	2ºRefle	-83.1	-83.1	-75.3	31.2	-44.2	-31.2	-44.2	3.20
A7	2ºRefle	-114.9	-120.3	-84.1	169.9	0.3	-10.1	-0.3	6.76
A8	3ºRefle	-106.3	-122.2	-86.1	169.9	-18.2	-10.1	-18.2	7.12

Tabela 3: Informação detalhada - Cenário A, Ponto A.

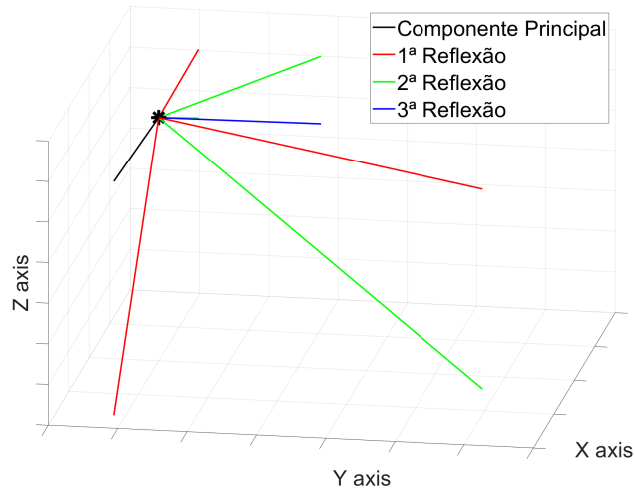


Figura 56: Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto A.

As tabelas aqui expostas apresentam a informação na forma de linhas para cada componente chegada ao recetor, e na forma de colunas descritas da seguinte forma:

- **ID** - Identificação da componente no gráfico comparativo;
- **Raio** - Tipo de componente chegada;
- **PM** - Magnitude medida em dB;
- **PEF** - Magnitude simulada efetiva em dB (antena utilizada na prática);
- **PI** - Magnitude simulada isotrópica em dB (antena isotrópica);
- **CA** - Ângulo de chegada em azimute (graus);
- **CE** - Ângulo de chegada em elevação (graus);
- **PA** - Ângulo de partida em azimute (graus);
- **PE** - Ângulo de partida em elevação (graus);
- **Dist.** - Distância percorrida pela componente (metros);

Os resultados de simulação, no ponto A apresentados na Figura 55, definem todas as componentes chegadas à antena recetora. Estas componentes são representadas pelas linhas verticas de cor vermelha e verde, que correspondem respetivamente à potência efetivamente recebida pela antena utilizada e à potência recebida no caso de utilização de uma antena recetora isotrópica. Esta discriminação entre estes dois tipos de antenas, permite inferir algum

desvio angular não detetado a olho nu durante as medições e que porventura pode provocar discrepâncias no valor de potência medida.

A representação gráfica das componentes chegadas ao ponto recetor A presente na Figura 56, confirma a informação apresentada na tabela 3, no que concerne ao número de reflexões calculadas e orientação angular das mesmas.

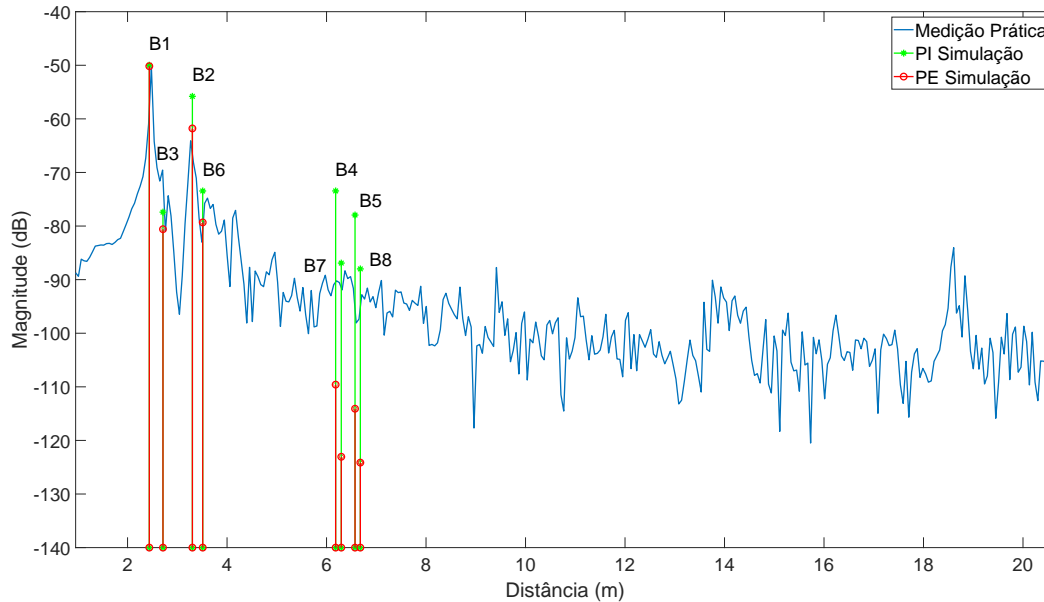


Figura 57: Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto B.

ID	Raio	PM (dB)	PEF (dB)	PI (dB)	CA (°)	CE (°)	PA (°)	PE (°)	Dist. (m)
B1	Princip	-50	-50.2	-50.0	-1.3	0.7	-0.3	-0.7	2.44
B2	1ºRefle	-64	-61.8	-55.8	-1.3	-42.5	-0.3	-42.5	3.30
B3	1ºRefle	-80	-80.6	-77.4	26.0	0.6	-26.0	-0.6	2.71
B4	1ºRefle	-90.9	-109.6	-73.4	-180.9	0.3	-0.1	-0.3	6.18
B5	2ºRefle	-98.1	-114.1	-77.9	-180.9	-19.8	-0.1	-19.8	6.57
B6	2ºRefle	-79.3	-79.3	-73.5	26.0	-39.4	-26.0	-39.4	3.51
B7	2ºRefle	-92	-123.1	-86.9	169.1	0.3	-10.9	-0.3	6.30
B8	3ºRefle	-94.1	-124.1	-88.0	169.1	-19.5	-10.9	-19.5	6.68

Tabela 4: Informação detalhada - Cenário A, Ponto B.

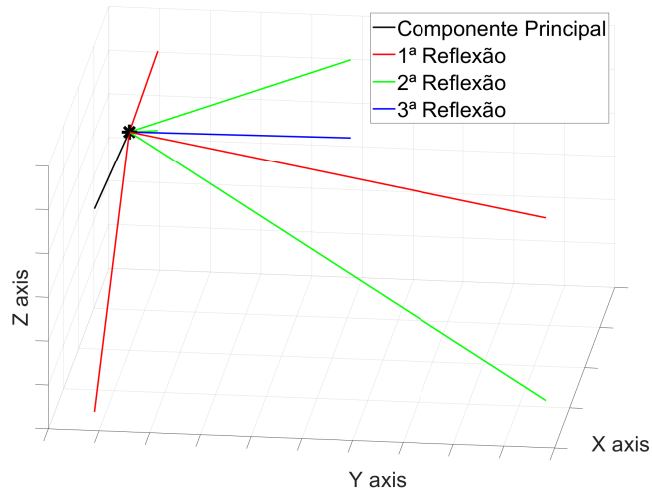


Figura 58: Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto B.

Na Figura 57, está apresentado o resultado da medição e simulação para o ponto B da Figura 49. Fisicamente, este ponto está distânciado 2.5 metros do centro de fase do emissor, em que as antenas estão ambas direcionadas para o máximo da antena par (frente a frente).

Como se pode verificar e é espectável, o ponto B apresenta aproximadamente o mesmo número de reflexões que o ponto A, dado que, o alinhamento entre antenas é o mesmo, apenas difere na distância ao emissor. Verifica-se um aumento da potência recebida nas reflexões de primeira ordem, protagonizadas pelo pavimento e pela parede lateral, dado que o ângulo de incidência nestes elementos construtivos aumenta com a distância entre antenas.

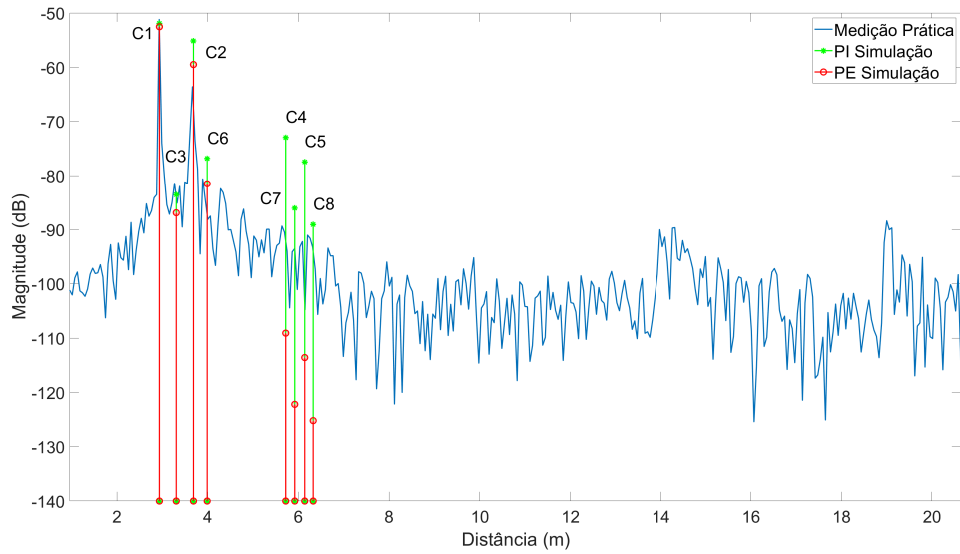


Figura 59: Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto C.

ID	Raio	PM (dB)	PEF (dB)	PI (dB)	CA (°)	CE (°)	PA (°)	PE (°)	Dist. (m)
C1	Princip	-52.5	-52.5	-52.0	7.2	0.6	7.2	-0.6	2.93
C2	1ºRefle	-63.6	-59.5	-55.2	7.2	-37.2	7.2	-37.2	3.69
C3	1ºRefle	-83.6	-86.9	-83.6	28.3	0.5	-28.3	-0.5	3.31
C4	1ºRefle	-90.5	-109.1	-73.0	176.3	0.3	3.7	-0.3	5.72
C5	2ºRefle	-104	-113.6	-77.5	176.3	-21.3	3.7	-21.3	6.14
C6	2ºRefle	-80	-81.5	-76.9	28.3	-34.0	-28.3	-34.0	3.99
C7	2ºRefle	-93	-122.2	-86.1	164.7	0.3	-15.3	-0.3	5.92
C8	3ºRefle	-91.6	-125.2	-89.1	164.7	-20.6	-15.3	-20.6	6.33

Tabela 5: Informação detalhada - Cenário A, Ponto C.

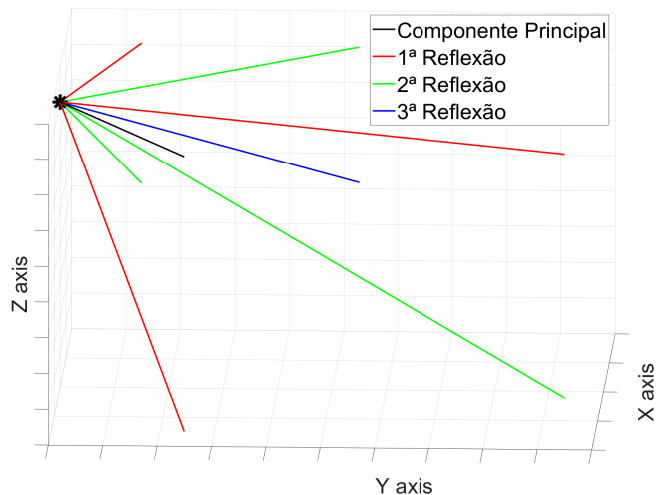


Figura 60: Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto C.

Nas Figuras 61 e 63 estão apresentados os resultados das medições e simulações nos pontos **D** e **E**, sendo que a apresentação detalhada desta informação está descrita nas Tabelas 6 e 7, respetivamente. Tal como nos pontos descritos anteriormente, também nestes é apresentada a representação das componentes chegadas nas Figuras 62 e 64, onde é possível confirmar a disposição angular presente nas tabelas.

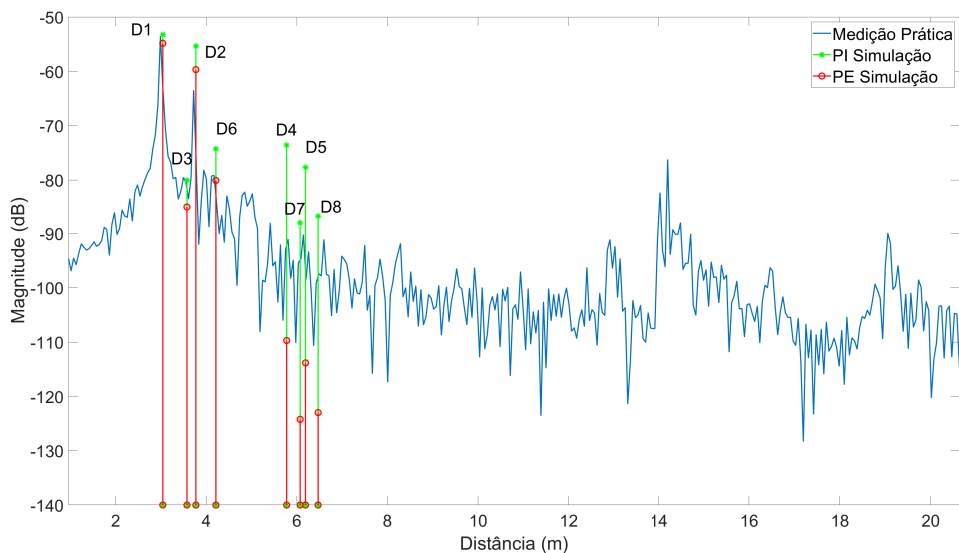


Figura 61: Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto D.

ID	Raio	PM (dB)	PEF (dB)	PI (dB)	CA (°)	CE (°)	PA (°)	PE (°)	Dist. (m)
D1	Princip	-54.9	-54.9	-53.2	16.6	0.6	16.6	-0.6	3.04
D2	1ºRefle	-63.5	-59.7	-55.4	16.6	-36.3	16.6	-36.3	3.77
D3	1ºRefle	-83.7	-85.2	-80.1	35.4	0.5	-35.4	-0.5	3.57
D4	1ºRefle	-91.1	-109.7	-73.6	171.3	0.3	8.7	-0.3	5.77
D5	2ºRefle	-90.3	-113.8	-77.7	171.3	-21.1	8.7	-21.1	6.19
D6	2ºRefle	-80.1	-80.1	-74.3	35.4	-32.0	-35.4	-32.0	4.21
D7	2ºRefle	-95.5	-124.2	-88.1	160.1	0.3	-19.9	-0.3	6.07
D8	3ºRefle	-97.8	-123.0	-86.8	160.1	-20.2	-19.9	-20.2	6.47

Tabela 6: Informação detalhada - Cenário A, Ponto D.

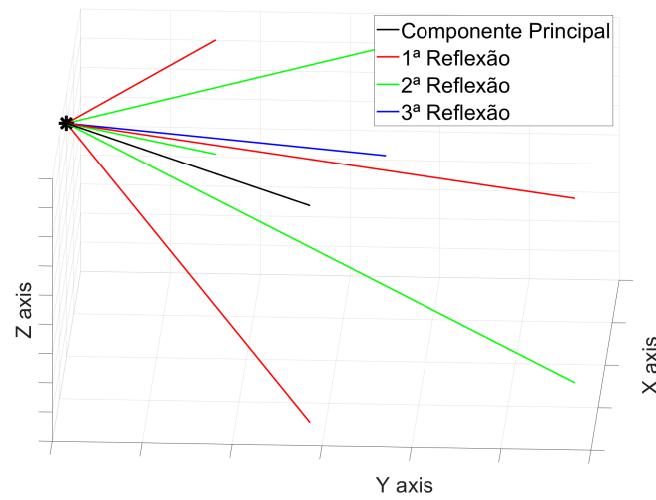


Figura 62: Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto D.

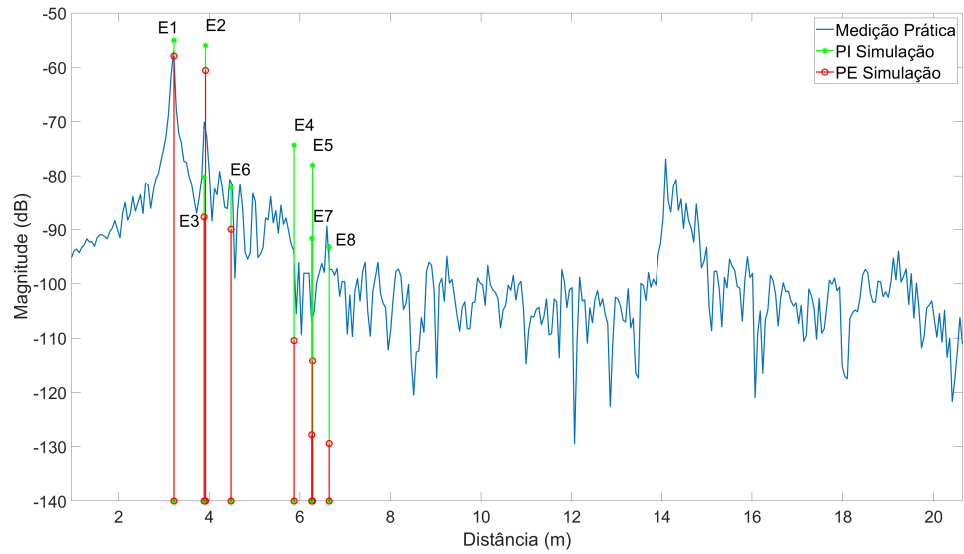


Figura 63: Comparação entre medição e simulação - Cenário A, Ponto E.

ID	Raio	PM (dB)	PEF (dB)	PI (dB)	CA (°)	CE (°)	PA (°)	PE (°)	Dist. (m)
E1	Princip	-57	-57.9	-55.0	25.2	0.5	25.2	-0.5	3.22
E2	1ºRefle	-70.1	-60.6	-56.0	25.2	-34.7	25.2	-34.7	3.92
E3	1ºRefle	-70.1	-87.7	-80.3	41.5	0.4	-41.5	-0.4	3.89
E4	1ºRefle	-92.8	-110.5	-74.3	166.5	0.3	13.5	-0.3	5.87
E5	2ºRefle	-98	-114.2	-78.1	166.5	-20.8	13.5	-20.8	6.28
E6	2ºRefle	-80.7	-90.0	-82.3	41.5	-29.9	-41.5	-29.9	4.48
E7	2ºRefle	-98	-127.8	-91.7	155.7	0.3	-24.3	-0.3	6.26
E8	3ºRefle	-89.4	-129.4	-93.3	155.7	-19.6	-24.3	-19.6	6.65

Tabela 7: Informação detalhada - Cenário A, Ponto E.

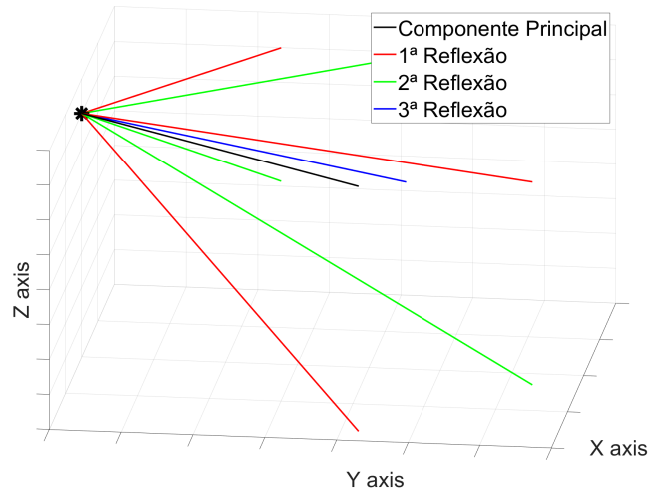
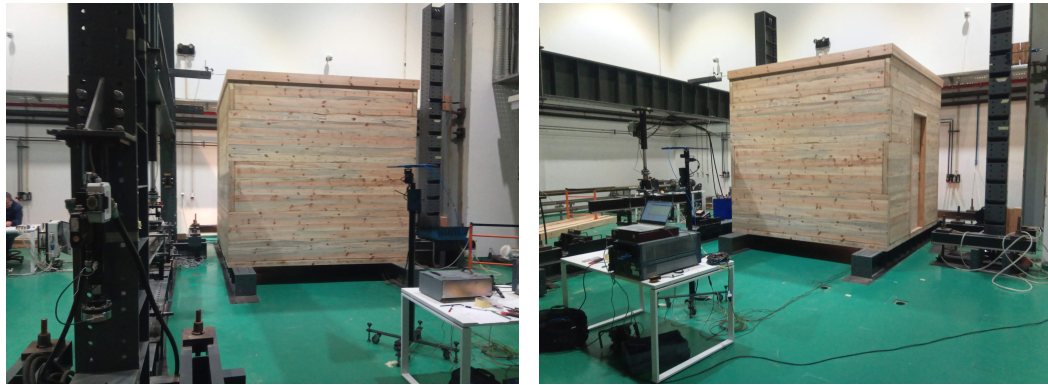


Figura 64: Representação de componentes chegadas - Cenário A, Ponto E.

No ponto de simulação **E**, verifica-se uma discrepância nas componentes **E1** e **E2**, que se devem ao efeito provocado por algum possível desvio angular da antena de receção face ao alinhamento ideal na medição prática. Sabendo que as antenas utilizadas são bastante diretivas, verifica-se que na zona angular de chegada destas componentes, o diagrama de radiação da antena possui uma grande variação de ganho para cada unidade angular.

6.8 CENÁRIO B

No decorrer deste trabalho de dissertação, houve a possibilidade de efetuar medições num cenário que foi também alvo de estudo de outros projetos, nomeadamente no que concerne a absorções sonoras e resistência dos físicos dos materiais. O cenário em causa estava presente no Centro de Inovação e Competências da Floresta (SerQ - Sertã), onde foram efetuadas as medições aqui apresentadas. Este cenário permite validar a ferramenta desenvolvida em vários aspetos, tais como, resiliência a ambientes com bastantes reflexões e baixas atenuações do sinal rádio da estrutura medida (casa de madeira). O cenário está apresentado nos registos fotográficos presentes nas Figuras 65a, 65b e 66.



(a)

(b)

Figura 65: Cenário de Medição (exterior)

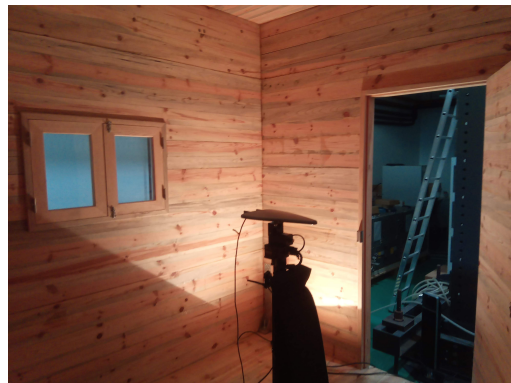


Figura 66: Cenário de Medição (interior)

Este cenário é constituído por quatro paredes e duas lajes, fabricadas em madeira de espessura 9 cm. Existe uma porta na parede lateral direita e uma janela na parede traseira, segundo a perspetiva da Figura 65b. As medições foram efetuadas no interior e no exterior, de modo a validar o funcionamento da ferramenta nos fenómenos de transmissão direta/indireta (componente principal) e reflexões.

As dimensões deste cenário estão presentes nas Figuras 67 e 68. Nesta última figura, a linha verde representa o lado e a distância do transmissor à parede de incidência.

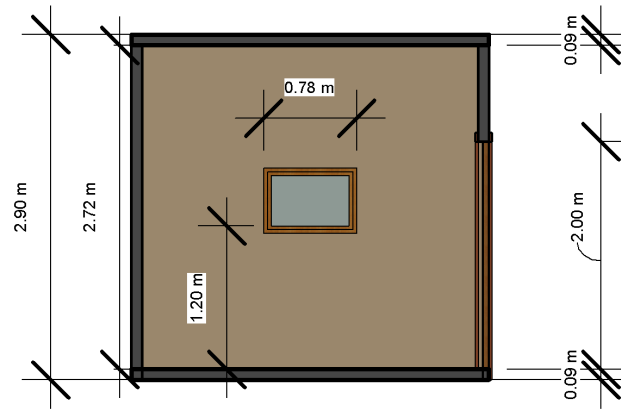


Figura 67: Dimensões Verticais (Cenário B).

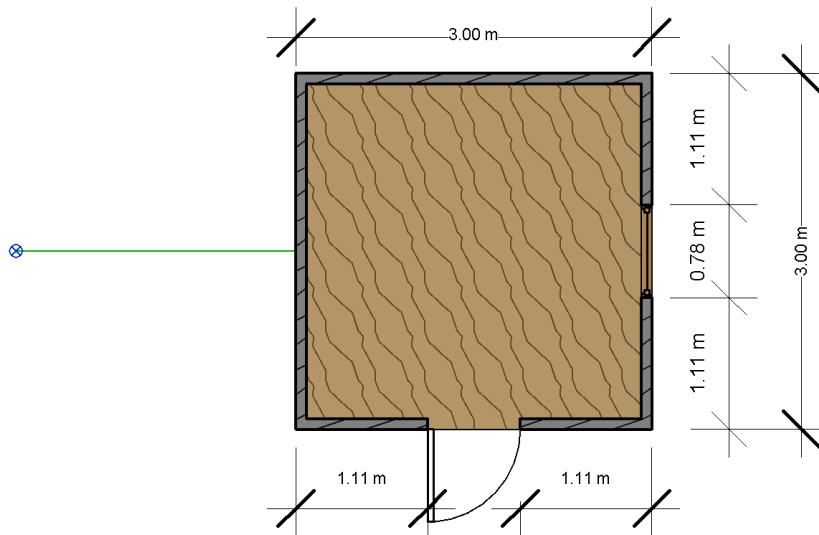


Figura 68: Dimensões Horizontais (Cenário B).

Para facilitar a visualização das posições físicas do transmissor e receptor, aconselha-se a visualização da Figura 69, sendo que, estes estão representados respectivamente nas Figuras 69a e 69b. O VNA, e o computador para armazenamento das medições foram colocados imediatamente atrás do emissor, de modo a causar a menor interferência possível, face ao tamanho dos cabos existentes para esta antena (3 metros).

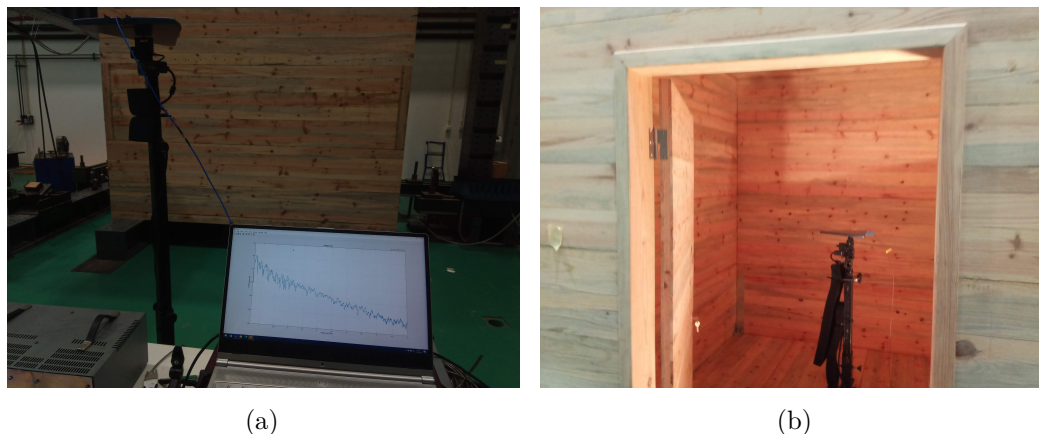


Figura 69: Cenário de Medição Outdoor

6.8.1 Cenário de Simulação

Este cenário foi modelado no *software* Revit e o resultado desta modelação está presente na Figura 70. Neste modelo são definidas todas as características dos elementos construtivos utilizados, nomeadamente os materiais que constituem o modelo, que neste caso é apenas madeira. O ponto azul visível nesta figura representa mais uma vez a posição do transmissor.

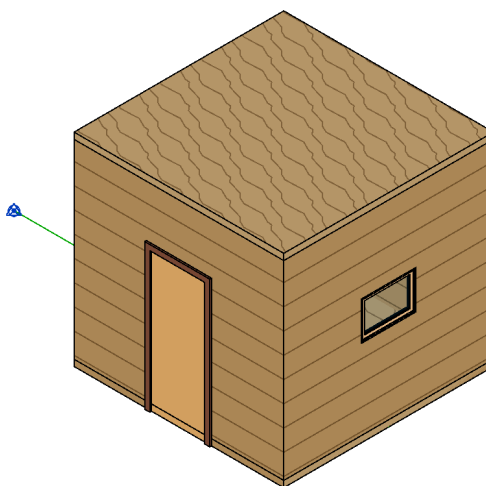


Figura 70: Modelo BIM (Cenário B).

Para tornar possível a visualização das reflexões provocadas pelo cenário presente ao redor da caixa de madeira (cenário de interesse), foi efetuado outro modelo BIM, presente na Figura 71 que possui uma laje e uma parede em betão que simulam o cenário envolvente. A laje está distânciada 0.40 metros

da base da caixa de madeira, enquanto que a parede está distânciada 1,40 metros da face traseira (face da janela).

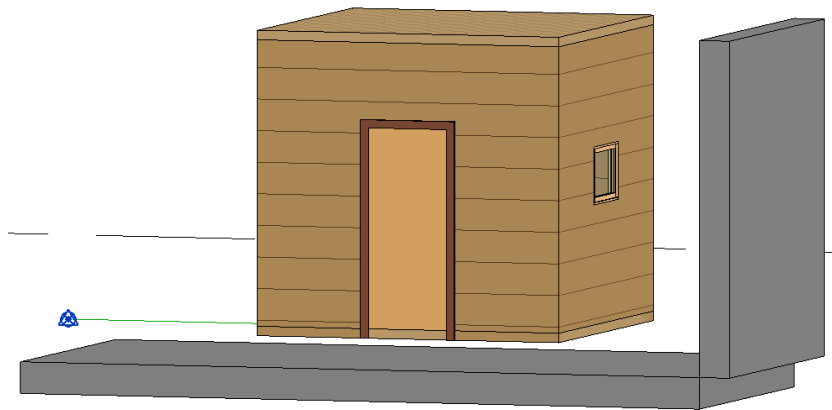


Figura 71: Modelo BIM com ambiente envolvente.

Os valores de permitividade relativa dos materiais utilizados em simulação estão presente na Tabela 8.

Material	Permitividade Relativa
Madeira	1.99 - 0.0921i
Ar	1.0006
Betão	5.31 - 0.4658i

Tabela 8: Permitividade Relativa dos Materiais - Cenário B

6.8.2 Resultados de simulação

Na ferramenta de simulação foi efetuada uma simulação para cada modelo BIM desenvolvido, de modo a evidenciar a diferença entre o cenário composto apenas pela caixa de madeira e o cenário composto pelas principais fontes de reflexão do cenário envolvente (pavimento e parede). Esta demonstração faz verificar uma das qualidades da ferramenta desenvolvida, que é a possibilidade de remoção e inserção de elementos construtivos interferentes, permitindo perceber e remover as suas contribuições em medições práticas, tal como é apresentado na secção seguinte.

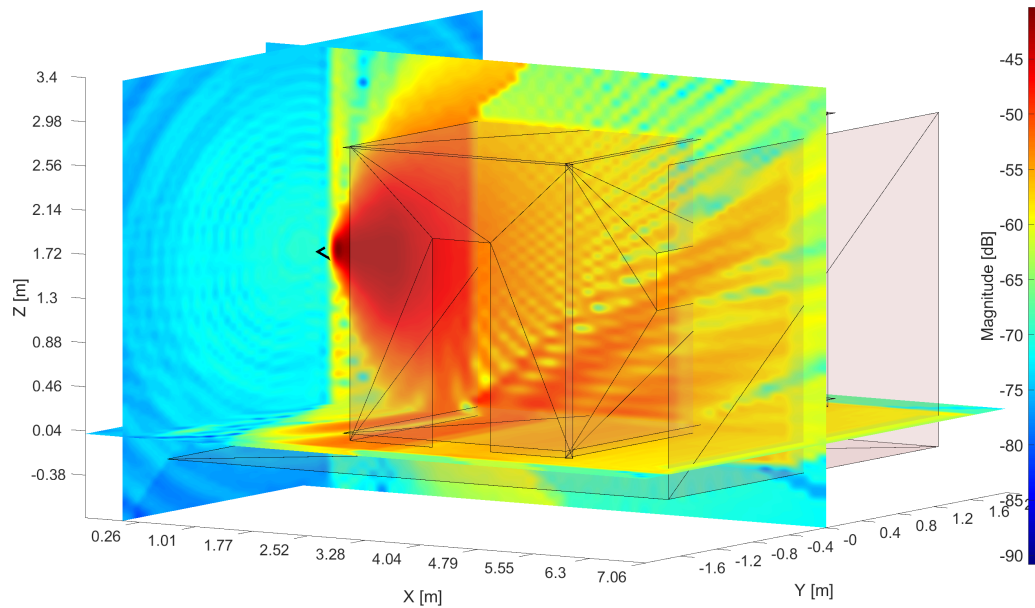


Figura 72: Resultado de Simulação - RSSI

As simulações apresentadas nesta secção são apenas referentes à simulação da caixa de madeira com o ambiente envolvente, dado que, esta é a mais importante no estudo em causa e nos resultados apresentados na próxima secção. Os resultados são apresentados em formato 3D através da inserção de planos (*slices*), nos três eixos, estes planos estão localizados na coordenada de origem de cada eixo.

Na Figura 72, está presente o resultado da simulação na forma de RSSI, o mesmo é a soma de todas as componentes chegadas. Estas componentes são a componente principal e a 1^a, 2^a e 3^a reflexão, representadas nas Figuras 73, 74, 75 e 76, respetivamente.

Nas figuras aqui apresentadas verifica-se claramente a influência de cada elemento construtivo presente no cenário, sendo que é possível ter uma perceção visual das atenuações e reflexões provocadas, as mesmas são abordadas em detalhe na secção seguinte.

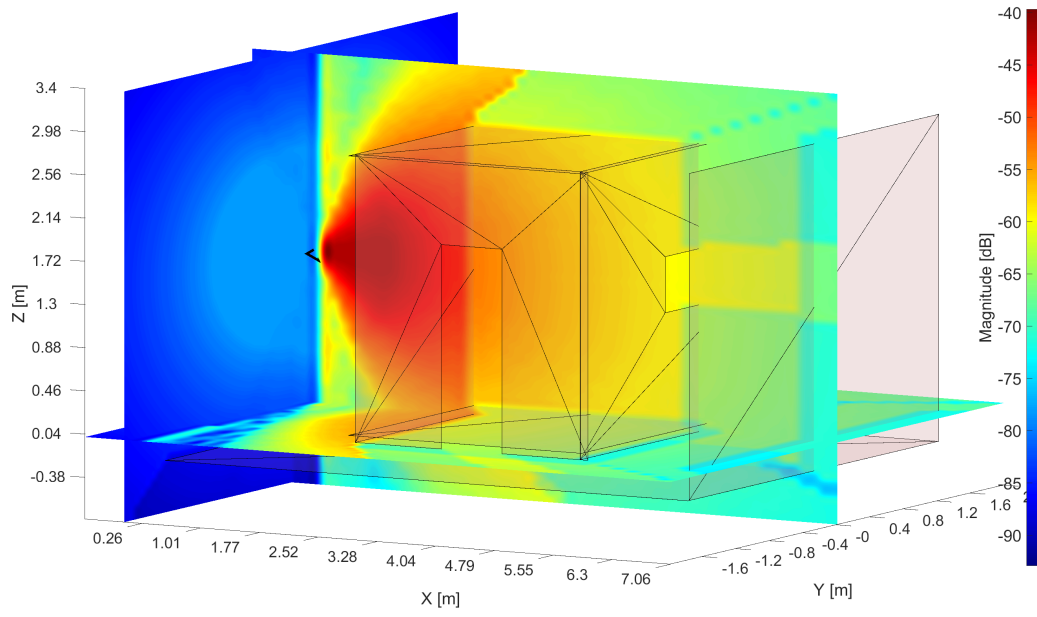


Figura 73: Resultado de Simulação - Componente Principal

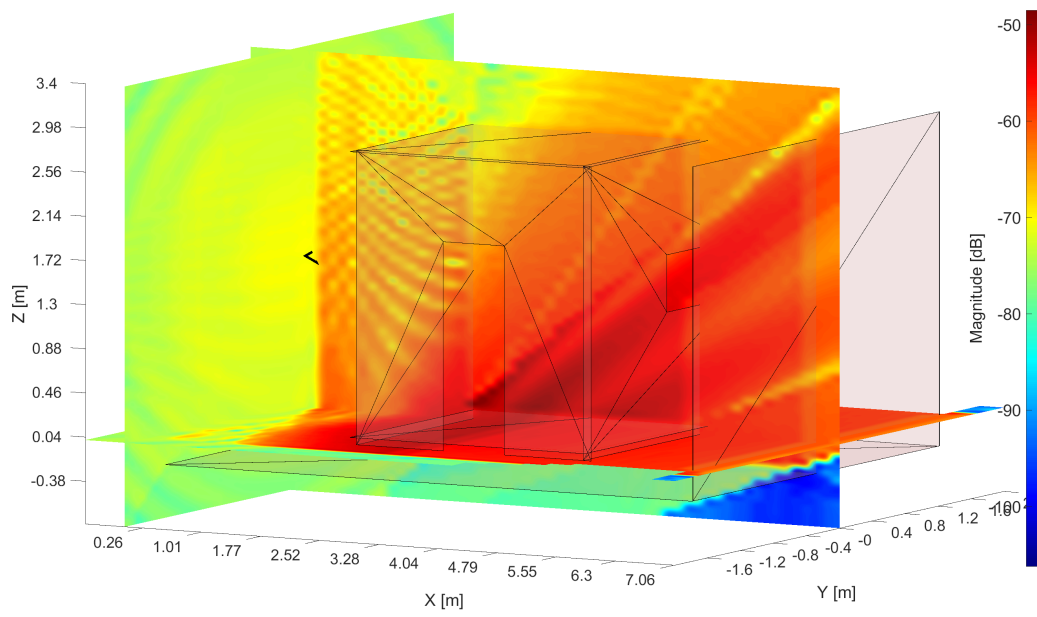


Figura 74: Resultado de Simulação - 1ª Reflexão

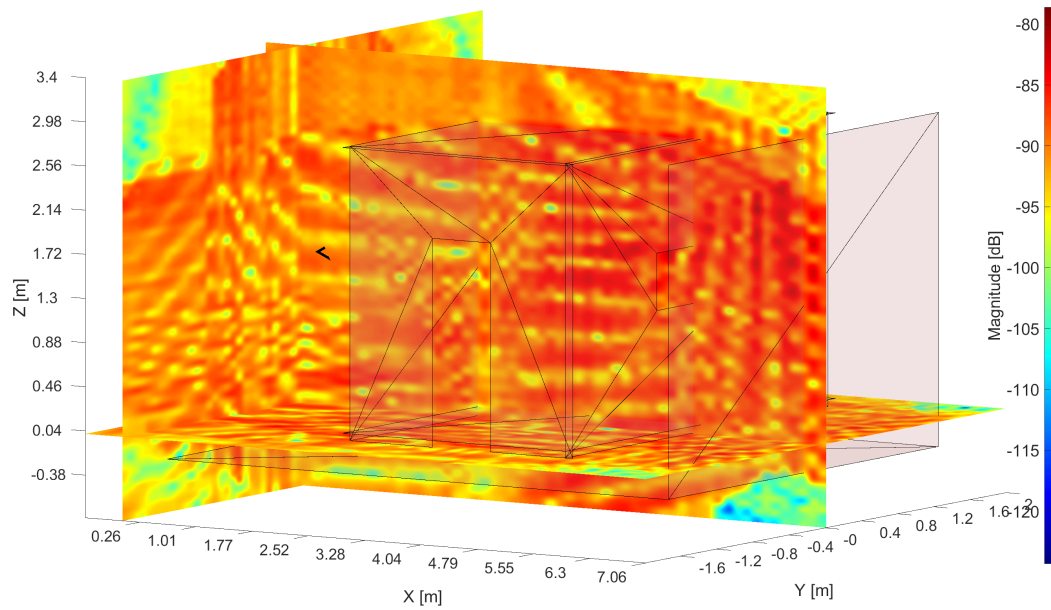


Figura 75: Resultado de Simulação - 2ª Reflexão

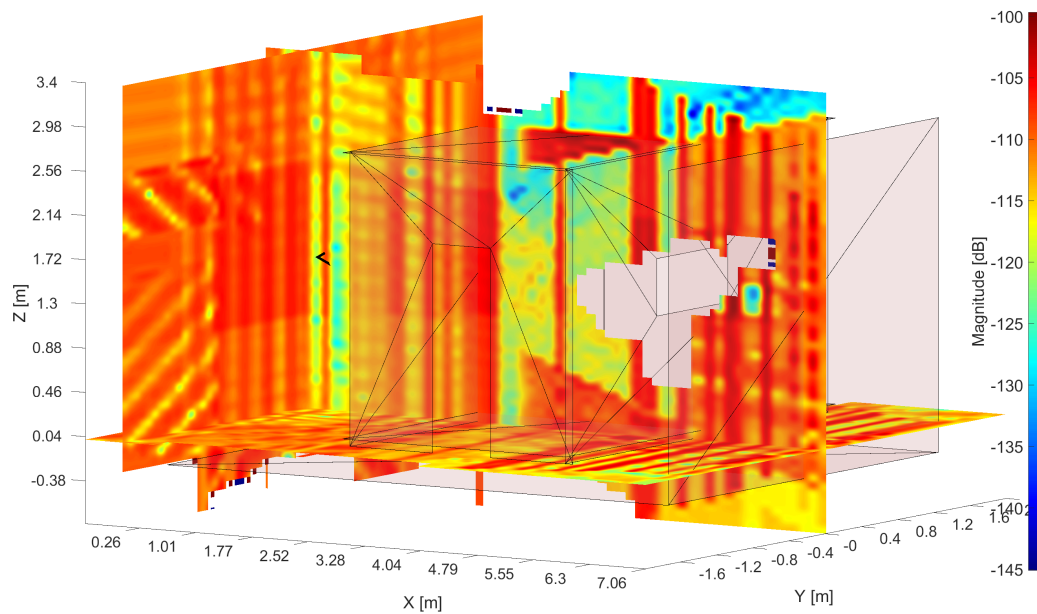


Figura 76: Resultado de Simulação - 3ª Reflexão

6.8.3 Comparação de resultados (Medidos vs Simulados)

Nesta secção, são apresentados os resultados das medições práticas e são efetuadas comparações com os resultados das simulações apresentados na secção anterior. As medições foram efetuadas segundo as condições já descritas anteriormente, e a posição física do recetor a cada medição (A, B e C) pode ser visualizado na Figura 77. A posição B é o centro do interior da caixa de

madeira (centro em XY), enquanto que a posição A e B são deslocamentos de -0.50 metros e 0.50 metros no eixo Y, mantendo a coordenada em X. Ambas as medições foram efetuadas com o transmissor (fixo) e recetor alinhados horizontalmente a uma altura de 1.35 metros da superfície interior do chão da caixa de madeira.

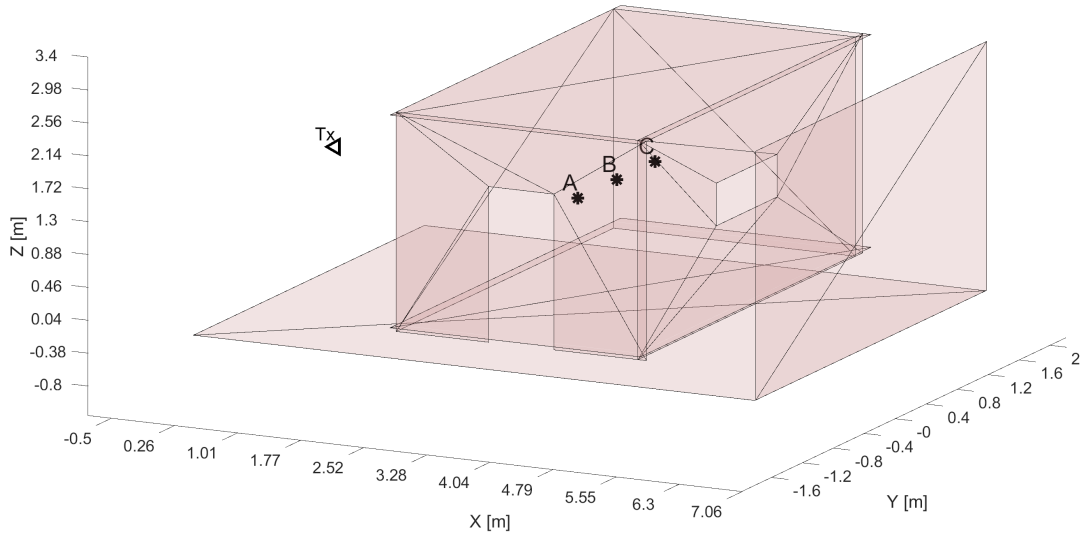


Figura 77: Pontos de Medição e Comparação (A, B e C)

Neste cenário, as medições práticas foram executadas numa modalidade diferente da utilizada no Cenário A. Foi utilizado um algoritmo que permite a rotação horizontal centrada no centro físico da antena, rotação esta efetuada com um passo de 30° , ao longo dos 360° em Azimute. Esta funcionalidade permite receber e interpretar melhor as reflexões provocadas pelo cenário, como será explicado mais à frente.

A explanação dos resultados é feita com base na apresentação de um gráfico de comparação entre sinal medido e simulado e uma tabela de informação detalhada acerca das componentes recebidas, para cada ponto de medição (A, B e C).

Na Figura 78, estão representadas as medições efetuadas para o ponto A, as quais estão dispostas de -180° a 180° , sendo que o 0° diz respeito ao ponto máximo do diagrama de radiação da antena. Estes são resultados normalizados, seguindo o processo de normalização descrito na secção 6.4, contendo já o devido acréscimo de potência e distância. As linhas verticais

verdes e vermelhas representam respetivamente a potência simulada caso fosse uma antena isotrópica e a potência simulada com a antena utilizada nas medições. É importante a representação destas duas potências, sobretudo nas componentes recebidas na parte de trás da antena (reflexões), dado que aqui o ganho da antena é bastante baixo (aproximadamente -40dB) e pode não ser coincidente com o valor real. Isto deve-se ao facto de que na medição dos diagramas das antenas apenas foi medido de -90° a $+90^\circ$, as restantes unidades angulares foram truncadas ao valor mínimo verificado na faixa angular medida.

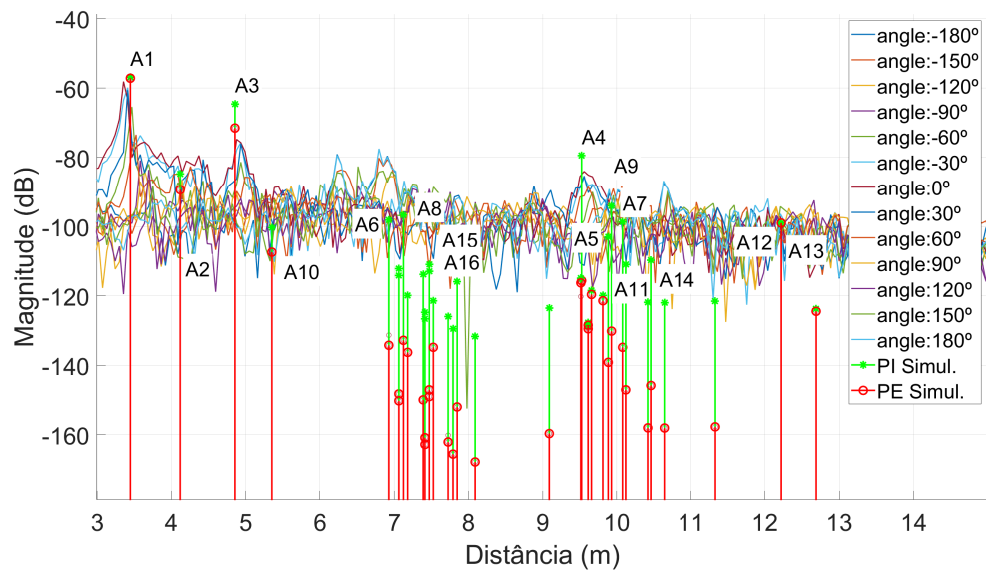


Figura 78: Comparação entre medição e simulação - Cenário B, Ponto A.

ID	Raio	PM (dB)	PEF (dB)	PI (dB)	CA (°)	CE (°)	PA (°)	PE (°)	Dist. (m)
A1	Princip	-58.1	-57.1	-56.9	-9.5	1.3	-8.5	-1.3	3.45
A2	1°Refle	-84.3	-89.3	-84.8	34.1	1.1	-34.1	-1.1	4.12
A3	1°Refle	-74.8	-71.5	-64.6	-9.5	-44.8	-8.5	-44.8	4.86
A4	1°Refle	-84	-115.6	-79.4	-177.9	0.5	-3.1	-0.5	9.53
A5	2°Refle	-92.7	-139.1	-103.0	-177.9	-15.5	-3.1	-15.5	9.88
A6	2°Refle	-79.85	-134.2	-98.1	160.5	0.7	-19.5	-0.7	6.93
A7	2°Refle	-89.15	-134.8	-98.7	-161.7	0.5	19.3	-0.5	10.08
A8	2°Refle	-90.22	-132.8	-96.6	-176.5	23.1	-4.5	23.1	7.12
A9	2°Refle	-89	-130.1	-94.0	-177.9	16.4	-3.1	16.4	9.93
A10	2°Refle	-90.8	-107.4	-100.3	34.1	-39.7	-34.1	-39.7	5.35
A11	2°Refle	-	-147.0	-110.9	-177.9	-19.8	-3.1	-19.8	10.12
A12	2°Refle	-97	-99.0	-98.9	-3.4	0.4	-2.4	-0.4	12.22
A13	2°Refle	-97	-99.0	-98.9	-3.4	0.4	-2.4	-0.4	12.22
A14	3°Refle	-	-145.8	-109.7	-161.7	15.5	19.3	15.5	10.46
A15	3°Refle	-	-147.0	-110.9	160.5	22.0	-19.5	22.0	7.47
A16	3°Refle	-	-147.0	-110.9	160.5	22.0	-19.5	22.0	7.47

Tabela 9: Informação detalhada - Cenário B, Ponto A.

Os resultados de simulação, no ponto A apresentados na Figura 78, definem todas as componentes chegadas à antena recetora. Estas componentes são representadas pelas linhas verticas de cor vermelha e verde. Optou-se pela análise das componentes acima dos -115 dB de potência isotrópica, dado que todos os outros valores já estão abaixo dos valores passíveis de comparação, ou seja, abaixo da gama dinâmica do sistema de medição. Assim, a tabela apenas apresenta as chegadas identificadas no gráfico da Figura 78, o que torna esta uma tabela menos extensa e por isso mais fácil de analisar.

Neste cenário foi simulado um modelo BIM, que modela apenas a caixa de madeira, e outro modelo BIM que modela parte do ambiente envolvente, com o objetivo de verificar e validar algumas das componentes verificadas nas medições práticas. Dentro das componentes resultantes da simulação, verificou-se através da subtração do resultado da simulação sem a parede e o pavimento de betao, que as componentes A2, A3, A4, A7, A9 e A10 são provenientes de reflexões protagonizadas por estes elementos construtivos, que

tal como seria de esperar são as componentes mais fortes, dado que, o betão apresenta maior coeficiente de reflexão do que a madeira.

As tabelas aqui expostas apresentam a mesma organização descrita no cenário anterior, onde as colunas estão identificadas da seguinte forma:

- **ID** - Identificação da componente no gráfico comparativo;
- **Raio** - Tipo de componente chegada;
- **PM** - Magnitude medida em dB;
- **PEF** - Magnitude simulada efetiva em dB (antena utilizada na prática);
- **PI** - Magnitude simulada isotrópica em dB (antena isotrópica);
- **CA** - Ângulo de chegada em azimute (graus);
- **CE** - Ângulo de chegada em elevação (graus);
- **PA** - Ângulo de partida em azimute (graus);
- **PE** - Ângulo de partida em elevação (graus);
- **Dist.** - Distância percorrida pela componente (metros);

Para facilitar a perceção das componentes chegadas ao recetor, no que concerne à simulação efetuada, apresenta-se para cada ponto simulado um gráfico de representação angular destas. Como se pode verificar na Figura 79, a representação das componentes é efetuada por tipo de componente, dividindo estas em componente principal (cor preta), primeira reflexão (cor vermelha), segunda reflexão (cor verde) e por último, terceira reflexão (cor azul).

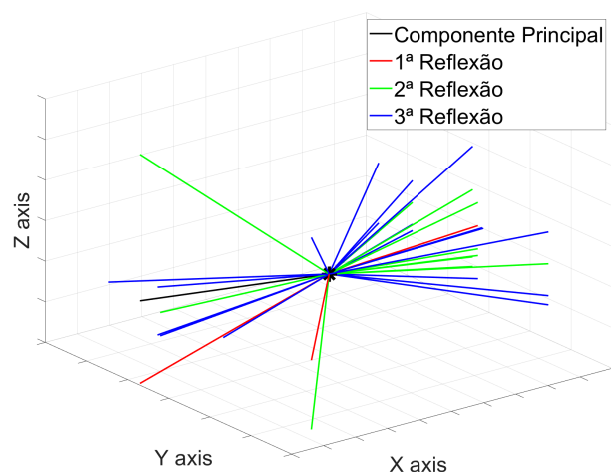


Figura 79: Representação de componentes chegadas - Cenário B, Ponto A.

A representação gráfica das componentes chegadas ao ponto recetor **A** presente na Figura 79, confirma a informação apresentada na Tabela 9, no que concerne ao número de reflexões calculadas, nomeadamente as reflexões de primeira ordem (a vermelho), na tabela são três e na figura também.

Após a análise da Tabela 9, verifica-se que não foi possível encontrar valores de potência válidos na medição para as reflexões de terceira ordem e para valores abaixo dos -100 dB. Deste modo, nos pontos seguintes apenas são analisadas e representadas na tabela, as componentes (simuladas) com potência isotrópica acima dos -100 dB.

Na Figura 80, está apresentado o resultado da medição e simulação para o ponto B da Figura 77. Fisicamente, este é ponto central da caixa de madeira ficando por isso alinhado com o centro da janela, situada na face traseira da caixa. Como se pode verificar, este ponto apresenta menos reflexões de primeira ordem, como seria de esperar já que não existe reflexão na face traseira da caixa.

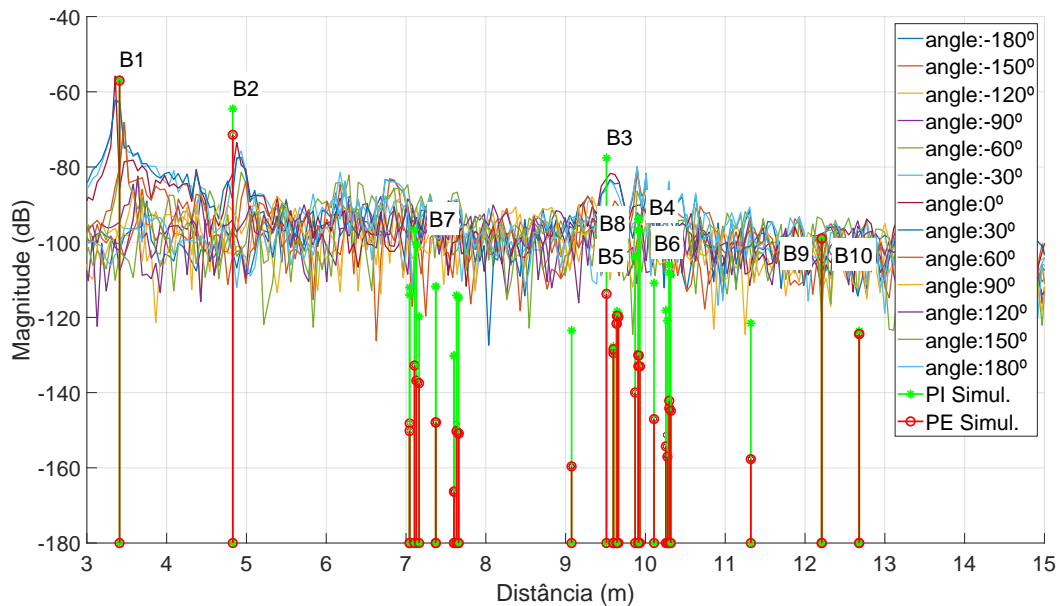


Figura 80: Comparação entre medição e simulação - Cenário B, Ponto B.

ID	Raio	PM (dB)	PEF (dB)	PI (dB)	CA (°)	CE (°)	PA (°)	PE (°)	Dist. (m)
B1	Princip	-55.8	-57.0	-56.8	-1.6	1.3	-0.6	-1.3	3.41
B2	1ºRefle	-73.4	-71.4	-64.5	-1.6	-45.1	-0.6	-45.1	4.83
B3	1ºRefle	-81.7	-113.7	-77.6	-180.8	0.5	-0.2	-0.5	9.51
B4	2ºRefle	-80.1	-133.0	-96.8	163.7	0.5	-16.3	-0.5	9.91
B5	2ºRefle	-80.1	-130.0	-93.8	163.7	0.5	-16.3	-0.5	9.91
B6	2ºRefle	-86.4	-133.0	-96.9	-164.3	0.5	16.7	-0.5	9.93
B7	2ºRefle	-90.5	-132.8	-96.7	-180.7	23.2	-0.3	23.2	7.11
B8	2ºRefle	-86.4	-130.2	-94.0	-180.8	16.4	-0.2	16.4	9.91
B9	2ºRefle	-93.9	-99.0	-98.9	-1.2	0.4	-0.2	-0.4	12.21
B10	2ºRefle	-93.9	-99.0	-98.9	-1.2	0.4	-0.2	-0.4	12.21

Tabela 10: Informação detalhada - Cenário B, Ponto B.

É de importância referir que, a limitação do número de componentes chegadas, na apresentação do gráfico ou da tabela através da imposição de um limite inferior de potência isotrópica recebida, não influencia o número de componentes representados no gráfico de representação angular desta componentes, presente na Figura 81. Como se pode verificar nesta figura, existem duas reflexões de primeira ordem, representadas a vermelho, uma das quais tem uma reflexão de terceira ordem sobreposta e por isso não é tão percetível. Estas duas reflexões estão também registadas na Tabela 10, onde se consegue confirmar os ângulos de chegada de cada uma destas componentes. Através desta análise angular, verifica-se que, uma destas reflexões de primeira ordem é protagonizada pelo pavimento de betão, enquanto que a outra é protagonizada pela parede traseira de betão também, dado que, naquela direção existe uma janela na caixa de madeira, como dito anteriormente. Caso a caixa de madeira não tivesse a janela na face traseira, então esta iria também produzir uma reflexão de primeira ordem.

Na Tabela 10, verifica-se que as componentes de **B3** a **B4** representam as chegadas à antena recetora pela parte de trás da antena, dado que, o ângulo de chegada é próximo de 180° e -180° . Nesta zona angular e como referido anteriormente, a medição do diagrama de radiação das antenas não foi efetuado, pelo que os valores utilizados resultam de uma truncagem do valor mínimo proveniente da medição do diagrama de radiação da parte frontal

da antena, compreendida entre -90° e 90° . Este facto permite evidenciar e justificar as diferenças obtidas e apresentadas na Figura 80.

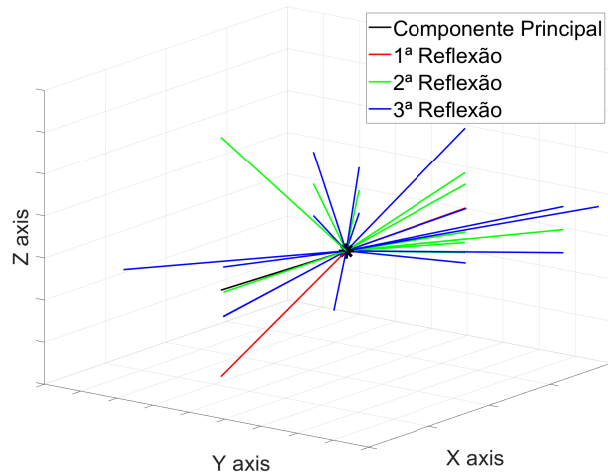


Figura 81: Representação de componentes chegadas - Cenário B, Ponto B.

Em termos comparativos entre o modelo com apenas a caixa de madeira e o modelo com a adição do ambiente envolvente (parede e pavimento), verificou-se através da subtração entre os resultados das duas simulações, que grande parte das compontes de maior potência são oriundas do ambiente envolvente introduzido. Destas componentes, distinguem-se para o ponto **B** as componentes B2, B3, B4, B6, B9 e B10 presentes na Figura 80. Para o ponto C, destacam-se as componentes C2, C3, C4, C8, C9 e C10 presentes na Figura 82

Na Figura 82, está apresentado o resultado da medição e simulação para o ponto C da Figura 77. Fisicamente, este ponto está alinhado com o ponto central (B) no eixo XX e distânciado 0.5 metros no sentido positivo do eixo YY, ficando por isso mais próximo da face esquerda da caixa de madeira, na perspetiva da posição do transmissor. Será expectável a semelhança com o ponto A dada a sua simetria física no que concerne à estrutura da caixa de madeira, denotando apenas a diferença na existência da porta na face do lado direito da caixa.

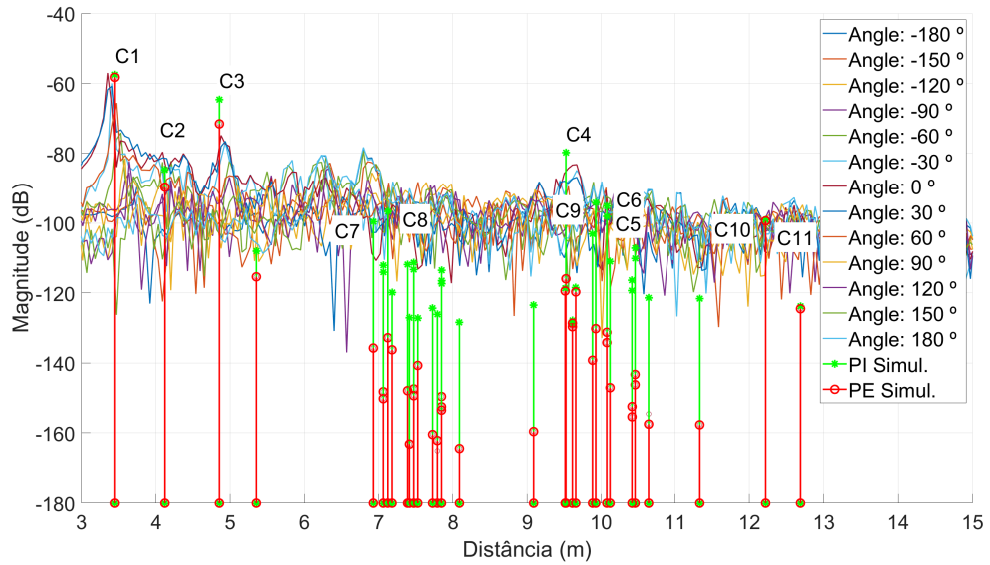


Figura 82: Comparação entre medição e simulação - Cenário B, Ponto C.

ID	Raio	PM (dB)	PEF (dB)	PI (dB)	CA (°)	CE (°)	PA (°)	PE (°)	Dist. (m)
C1	Princip	-57	-58.2	-57.4	8.5	1.3	8.5	-1.3	3.45
C2	1ºRefle	-81.5	-89.7	-84.7	-35.2	1.1	34.2	-1.1	4.12
C3	1ºRefle	-74.8	-71.5	-64.6	8.5	-44.8	8.5	-44.8	4.86
C4	1ºRefle	-83	-115.9	-79.8	176.9	0.5	3.1	-0.5	9.53
C5	2ºRefle	-90	-134.2	-98.1	160.7	0.5	-19.3	-0.5	10.08
C6	2ºRefle	-90	-131.3	-95.1	160.7	0.5	-19.3	-0.5	10.08
C7	2ºRefle	-81.7	-135.8	-99.6	-161.5	0.7	19.5	-0.7	6.93
C8	2ºRefle	-88.5	-132.8	-96.7	175.6	23.1	4.4	23.1	7.12
C9	2ºRefle	-89.3	-130.2	-94.1	176.9	16.4	3.1	16.4	9.93
C10	2ºRefle	-99.3	-99.3	-99.0	2.4	0.4	2.4	-0.4	12.22
C11	2ºRefle	-99.3	-99.3	-99.0	2.4	0.4	2.4	-0.4	12.22

Tabela 11: Informação detalhada - Cenário B, Ponto C.

Tal como no ponto B, apenas foram caracterizadas na Tabela 11 as componentes chegadas com potência isotrópica acima de -100 dB, dada a dificuldade de identificar devidamente as componentes através das medições práticas efetuadas.

Como se pode verificar e é espetável, este ponto apresenta aproximadamente o mesmo número de reflexões apresentadas na Figura 82, do que o ponto A (Figura 78). Para além deste número, também os níveis de potência e ângulos

de partida e chegada são aproximadamente iguais. A simetria angular das componentes chegadas, pode ser confirmada e visualizada mais facilmente, comparando as Figuras 79 e 83.

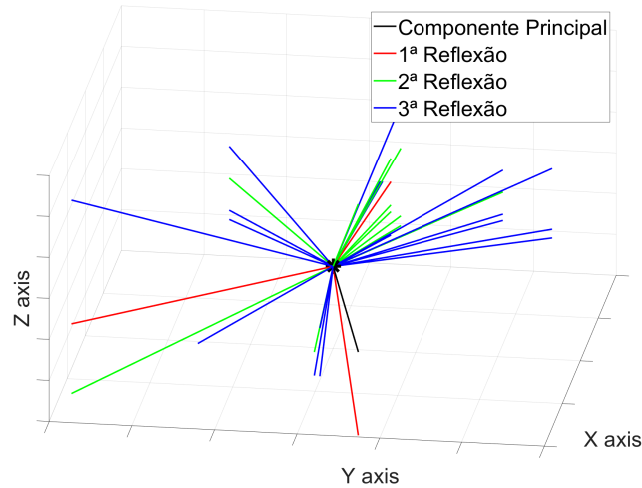


Figura 83: Representação de componentes chegadas - Cenário B, Ponto C.

6.9 CONCLUSÕES

Este capítulo reflete o trabalho efetuado para a validação da ferramenta desenvolvida, através da comparação entre resultados de simulação e medições práticas efetuadas. Deste modo, foram efetuados um conjunto de processos para tornar possível esta comparação.

Para as medições práticas foi utilizado um sistema de medição que carece de um processo de normalização. Este processo utiliza uma medição efetuada em ambiente controlado com uma distância entre antenas conhecida. Esta distância revelou ser um parâmetro carente de estudo prévio, dado que as antenas possuem uma dimensão relativamente grande, e deste modo torna-se impreterível o conhecimento entre que pontos é que se referenciava a distância entre antenas. Este ponto denominado de centro de fase foi então calculado com base na variação de distância entre duas medições na câmara anecóica.

Foram utilizados dois cenários diferentes para a validação, dado que, com estes a ferramenta demonstra-se dinâmica e capaz de funcionar em diversos ambientes. No cenário A apenas foi efetuada uma medição para cada ponto físico, enquanto que no cenário B foram efetuadas medições de 30° em 30° ,

para verificar a diferença no número de componentes refletidas detetadas. Esta última técnica revelou-se importante principalmente em ambientes com elementos construtivos de baixo coeficiente de reflexão.

Apesar de se conseguir identificar aproximadamente metade das componentes refletidas, quando comparado o resultado medido com o simulado, verifica-se que a baixa gama dinâmica do sistema de medição impediu a identificação da totalidade. A importância deste facto é baixa, dado que as componentes não detetadas estão abaixo dos -100 dB de potência isotrópica.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentadas conclusões do trabalho desenvolvido e relatado neste documento. Está dividido em três secções: sumário do trabalho desenvolvido e apresentado em cada capítulo; apresentação da contribuição científica para a comunidade que deste trabalho foi apurada; e por último são apresentadas sugestões para o seguimento do trabalho desenvolvido.

7.2 SUMÁRIO DO TRABALHO DESENVOLVIDO

O foco principal desta dissertação é o desenvolvimento e validação de uma aplicação versátil, dinâmica, eficaz e gratuita para a simulação de cobertura de rádio em diversos tipos de cenários, desde barreiras eletromagnéticas simples e genéricas, a interior de edifícios e áreas adjacente. Estas simulações são executadas através da importação de modelos BIM que permitem aumentar a velocidade de simulação para cenários já modelados, dado que, evita a inserção do cenário de simulação manualmente.

No Capítulo 1, são tecidas considerações no que diz respeito à motivação, enquadramento e utilidade do tema aqui abordado.

No Capítulo 2, é apresentado o conceito de BIM e IFC, definindo os seus fundamentos base e as suas principais características. São também apresentados os mecanismos de propagação básicos e é apresentado o estudo do estado da arte no que concerne a algoritmos de traçado de raios existentes, tal como, métodos de aceleração destes. Toda esta informação foi estudada antes de iniciar o desenvolvimento propriamente dito, pelo que, facilitou imensamente a percepção relativamente aos conceitos e técnicas existentes, ainda que no caso

dos aceleradores, não se tenha aplicado tal conhecimento, como se viria a pensar no início da dissertação.

O conteúdo do Capítulo 3, expõe as técnicas utilizadas para conversão de modelos BIM, que basicamente reflete a junção de dois módulos desenvolvidos em Python e MatLab, convergindo assim num único módulo de importação de informação BIM para ambiente MatLab. Dado o lado versátil deste módulo, verifica-se que o mesmo pode ser utilizado para qualquer outro tipo de utilização ou qualquer outra ferramenta, dado o seu comportamento genérico de conversão de informação BIM em informação CSV, presente em ficheiros Excel.

No Capítulo 4, é exposta a ferramenta de simulação de propagação de elementos multicamada anteriormente desenvolvida pelo grupo de investigação a que este trabalho de dissertação é pertencente. Foram efetuadas algumas alterações nesta ferramenta, pelo que, este Capítulo reflete também todas as alterações efetuadas, tal como, a justificação para tal. De todas as alterações efetuadas, destaca-se efetivamente, a introdução automática de alguns parâmetros de simulação, que anteriormente necessitavam de inserção manual. Esta característica veio poupar tempo de utilização e consequentemente tornar a ferramenta mais útil.

O Capítulo 5, expõe o conceito de traçado de raios utilizado, reportando as características e funcionalidades do mesmo. O traçado de raios aqui utilizado é baseado num algoritmo já desenvolvido e devidamente referenciado no capítulo, este utiliza o método das imagens como base de cálculo de trajetórias. A ferramenta desenvolvida neste trabalho de dissertação permite o traçado de raios em 3D, permitindo assim utilizar diagramas de radiação 3D de antenas, estes podem ser inseridos neste formato ou podem ser inseridos em formato de vectores representativos dos diagramas de radiação 2D (planos principais), dado que foi implementado um método de interpolação que permite a criação de diagramas 3D.

Ao nível de resultados obtidos e respetivas validações, é no Capítulo 6, que estas estão apresentadas. Começando pela apresentação do sistema de medição utilizado, tal como, todas as técnicas inerentes aos processos de medição e pós processamento efetuado. Assim são tecidas considerações acerca da comparação entre resultados obtidos através de medições *versus* resultados obtidos nas

simulações. De referir, que foram utilizados dois cenários diferentes para uma melhor validação e verificação da dinâmica da ferramenta desenvolvida.

7.3 CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA

O trabalho desenvolvido e apresentado nesta dissertação contribuiu com conhecimento para a sociedade científica, através de duas publicações em conferências. À data de submissão da presente dissertação, uma das publicações aqui referidas, foi entregue para revisão, encontrando-se assim em fase de aceitação.

Artigos aceites:

- J. S. Louro, T. Rui Fernandes, H. Rodrigues and R. F. S. Caldeirinha, "**3D Indoor Radio Coverage for 5G Planning: a Framework of Combining BIM with Ray-tracing**", 2020 12th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Porto, Portugal, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/CSNDSP49049.2020.9249503.
- J. S. Louro, T. Fernandes, H. Rodrigues and R. F. S. Caldeirinha, "**Building Information Modelling Conversion for Radiowave Propagation Studies**", 2021 Telecoms Conference (ConfTELE 2021), Leiria, Portugal, 2020.

Artigo em preparação:

- Artigo de revista - "**Experimental Validation of a Framework that combines 3D Ray Tracing with Building Information Modelling**".

7.4 SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

Em termos de trabalho futuro, é possível enumerar diversos aspetos que podem vir a ser melhorados ou acrescentados ao nível essencialmente da quantidade e

diversificação de informação eletromagnética de materiais construtivos. Deste modo, uma proposta de trabalho futuro fulcral é a aquisição desta informação experimentalmente, dado que grande parte dos materiais construtivos utilizados na atualidade não estão caracterizados na literatura.

Outra proposta é o melhoramento do desempenho computacional da ferramenta no que concerne à simulação da segunda e terceira reflexão, dado que são estas que consomem mais tempo de processamento.

Por fim, será de interesse avaliar a necessidade de melhorar e adicionar funcionalidades na interface gráfica desenvolvida, para tornar esta aplicação ainda mais fácil de utilizar.

BIBLIOGRAFIA

- [1] S. Azhar, M. Khalfan, and T. Maqsood, “Building information modeling (BIM): Now and beyond,” *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, vol. 12, no. 4, pp. 15–28, 2012.
- [2] J. R. Lin, Z. Z. Hu, J. P. Zhang, and F. Q. Yu, “A Natural-Language-Based Approach to Intelligent Data Retrieval and Representation for Cloud BIM,” *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 31, no. 1, pp. 18–33, jan 2016.
- [3] R. Sebastian, “Integrated design and engineering using building information modelling: A pilot project of small-scale housing development in The Netherlands,” *Architectural Engineering and Design Management*, vol. 6, no. 2, pp. 103–110, 2010. [Online]. Available: <https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=taem20>
- [4] T. Beach, I. Petri, Y. Rezgui, and O. Rana, “Management of Collaborative BIM Data by Federating Distributed BIM Models,” *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 31, no. 4, jul 2017.
- [5] “(99+) (PDF) BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors | Imran Saeed - Academia.edu.” [Online]. Available: https://www.academia.edu/3183272/BIM{}_handbook{__}
- [6] J. D. Pedro Morais Sá, P. Doutor João Pedro Poças Martins Co-Orientador, and P. Doutor João Filipe Meneses Espinheira Rio, “Modelação de Estruturas em BIM-Aplicação à Extração Automática de Quantidades Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL-ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES,” Tech. Rep. [Online]. Available: <http://www.fe.up.pt>
- [7] “O que é o BIM?” [Online]. Available: <http://www.ct197.pt/index.php/homepage/o-que-e-o-bim>

- [8] A. Joaquim and C. Marinho, “António Joaquim Coelho Marinho Aplicação do Building Information Modeling na gestão de projetos de construção Universidade do Minho Escola de Engenharia,” tese Braga, Tech. Rep.
- [9] B. Horizonte, “UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS ESCOLA DE ENGENHARIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL MIGUEL PEREIRA STEHLING A UTILIZAÇÃO DE MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO EM EMPRESAS DE ARQUITETURA E ENGENHARIA DE BELO HORIZONTE,” Tech. Rep., aug 2012. [Online]. Available: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ISMS-8Z4LWY>
- [10] J. Pedro and M. Romanhole, “Londrina 2018,” Tech. Rep.
- [11] V. Thein, “Industry Foundation Classes (IFC) BIM Interoperability Through a Vendor-Independent File Format A Bentley White Paper,” Tech. Rep., 2011. [Online]. Available: <http://www.bfrl.nist.gov/oea/publications/gcrs/04867.pdf>
- [12] “ISO - ISO 10303-21:2016 - Industrial automation systems and integration — Product data representation and exchange — Part 21: Implementation methods: Clear text encoding of the exchange structure.” [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/63141.html>
- [13] “STEP APPLICATION HANDBOOK ISO 10303 VERSION 3,” Tech. Rep., 2006. [Online]. Available: <http://www.tc184-sc4.org/>
- [14] J. Jones, “The importance of bim,” *Civil Engineering -New York then Reston-*, vol. 84, pp. 66–69, 05 2014.
- [15] R. A. Valenzuela, *Antennas and propagation for wireless communications*, 1996, vol. 1.
- [16] H. H. Xia, A. Lindsay-Stewart, R. Rowe, H. L. Bertoni, and L. R. Maciel, “Radio Propagation Characteristics for Line-of-Sight Microcellular and Personal Communications,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 41, no. 10, pp. 1439–1447, 1993.
- [17] P. Enders, “Huygens ’ Principle as Universal Model of Propagation,” *Lat. Am. J. Phys. Educ.*, vol. 3, no. 1, pp. 19–32, 2009. [Online]. Available: <http://www.journal.lapen.org.mx>

- [18] M. F. Cátedra, J. Pérez, F. Saez De Adana, and O. Gutierrez, “Efficient Ray-Tracing Techniques for Three-Dimensional Analyses of Propagation in Mobile Communications: Application to Picocell and Microcell Scenarios,” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 40, no. 2, pp. 15–27, apr 1998. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/683539/>
- [19] K. G. Lee, S. J. Oh, J. S. Woo, and K. T. Lee, “Propagation characteristics of suburban environments using hybrid ray-tracing simulation,” in *IEEE Vehicular Technology Conference*, vol. 0. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., jul 2016.
- [20] T. K. Geok, F. Hossain, and A. T. W. Chiat, “A novel 3D ray launching technique for radio propagation prediction in indoor environments,” *PLoS ONE*, vol. 13, no. 8, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201905>
- [21] F. Hossain, T. K. Geok, T. A. Rahman, M. N. Hindia, K. Dimiyati, C. P. Tso, and M. N. Kamaruddin, “A smart 3D RT method: Indoor radio wave propagation modelling at 28 GHz,” *Symmetry*, vol. 11, no. 4, pp. 1–12, 2019.
- [22] C. Saeidi, M. Kamyab, and A. Fard, “Fast ray tracing propagation prediction model for indoor environments,” *ISAPE 2006 - 2006 7th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory, Proceedings*, no. October, pp. 447–450, 2006.
- [23] Z. Yun, Z. Zhang, and M. F. Iskander, “A ray-tracing method based on the triangular grid approach and application to propagation prediction in urban environments,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 50, no. 5, pp. 750–758, may 2002.
- [24] Z. Zhang, Z. Yun, and M. F. Iskander, “Ray tracing method for propagation models in wireless communication systems,” *Electronics Letters*, vol. 36, no. 5, pp. 464–465, mar 2000. [Online]. Available: https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/el{}_20000345
- [25] F. A. Agelet, A. Formella, J. María, H. Rábanos, F. I. De Vicente, and F. P. Fontán, “Efficient ray-tracing acceleration techniques for radio propagation modeling,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*,

vol. 49, no. 6, pp. 2089–2104, nov 2000.

- [26] W. C. Thibault and B. F. Naylor, “Set operations on polyhedra using binary space partitioning trees,” in *Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH 1987*. New York, New York, USA: Association for Computing Machinery, Inc, aug 1987, pp. 153–162. [Online]. Available: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=37401.37421>
- [27] P. Lyu, X. Xu, S. Yan, and Z. Ren, “Acceleration of reflection in 2D ray tracing based on image by binary space partitioning,” in *IEEE CEFC 2016 - 17th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., jan 2017, pp. 1–1. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7815967/>
- [28] L. Lozano, M. I. Hernández, C. Romera, I. González, F. S. De Adana, and M. F. Cátedra, “Ray-tracing acceleration techniques to compute RCS of complex targets,” *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, vol. 4, pp. 4495–4498, 2004.
- [29] F. S. De Adana, O. G. Blanco, I. G. Diego, J. P. Arriaga, and M. F. Cátedra, “Propagation model based on ray tracing for the design of personal communication systems in indoor environments,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49, no. 6, pp. 2105–2112, nov 2000.
- [30] E. A. Haines and D. P. Greenberg, “The Light Buffer: A Shadow-Testing Accelerator,” *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 6, no. 9, pp. 6–16, 1986.
- [31] L. Lozano, M. J. Algar, E. García, I. González, and F. Cátedra, “Efficient combination of acceleration techniques applied to high frequency methods for solving radiation and scattering problems,” *Computer Physics Communications*, vol. 221, pp. 28–41, dec 2017.
- [32] —, “Efficient combination of acceleration techniques applied to high frequency methods for solving radiation and scattering problems,” *Computer Physics Communications*, vol. 221, pp. 28–41, 2017. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cpc.2017.07.014>
- [33] I. González, C. Delgado, F. Saez De Adana, O. Gutiérrez, and M. F. Cátedra, “A new 3D ray-tracing acceleration technique for the analysis

- of propagation and radiation in complex environments,” *Applied Computational Electromagnetics Society Journal*, vol. 22, no. 2, pp. 201–206, 2007.
- [34] L. Lozano, E. Ortega, F. Saéz De Adana, and M. F. Cátedra, “Improvements in ray-tracing acceleration techniques to compute diffraction effect and doubles and triples effects in the RCS prediction of complex targets,” in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, vol. 3 A, 2005, pp. 93–96.
- [35] L. Lozano, I. González, O. Gutiérrez, J. Gómez, and F. Cátedra, “Iterative method for computing N-reflections between flat surfaces in the RCS prediction of complex targets,” in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, 2007, pp. 2502–2505.
- [36] L. Lozano, M. J. Algar, M. Blanco, I. Gonzalez, and F. Cátedra, “Depth-limited search applied to compute N-order reflections in the analysis of the RCS in large and complex targets,” in *2008 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC/URSI National Radio Science Meeting, APSURSI*, 2008.
- [37] Z. Yun and M. F. Iskander, “Ray tracing for radio propagation modeling: Principles and applications,” *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1089–1100, 2015.
- [38] G. Liang and H. L. Bertoni, “A new approach to 3-D ray tracing for propagation prediction in cities,” *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 6, pp. 853–863, 1998.
- [39] M. F. Cátedra, J. M. Gomez, F. S. De Adana, I. González, and O. Gutiérrez, “Application of ray tracing accelerating techniques for the analysis of antennas on complex platforms modelled by Nurbs,” in *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, vol. 4 A, 2005, pp. 167–170.
- [40] “IfcOpenShell.” [Online]. Available: <http://ifcopenshell.org/>
- [41] “Anaconda | The World’s Most Popular Data Science Platform.” [Online]. Available: <https://www.anaconda.com/>
- [42] “IEEE Xplore Full-Text PDF:.” [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=6422966>

- [43] “IEEE Xplore Full-Text PDF:.” [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp={&}arnumber=8572231>
- [44] R. A. Bahamid, S. I. Doh, and M. A. Al-Sharaf, “Risk factors affecting the construction projects in the developing countries,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 244, no. 1. Institute of Physics Publishing, mar 2019.
- [45] D. Ferreira, I. Cuinas, R. F. Caldeirinha, and T. R. Fernandes, “Assessing Transparency Control of Southern European Building Wall Structures Using Frequency-Selective Surfaces [Wireless Corner],” *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 60, no. 5, oct 2018.
- [46] “RF transparency control of building wall structures | Request PDF.” [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/340793880{}_RF{}_transparency{}_control{}_of{}_building{}_wall\{}_structures
- [47] “Electromagnetic Waves and Antennas.” [Online]. Available: <https://www.ece.rutgers.edu/{~}orfanidi/ewa/>
- [48] “Antenna Theory: Analysis and Design - Constantine A. Balanis - Google Livros.” [Online]. Available: https://books.google.pt/books?id=v1PSZ48DnuEC{&}printsec=frontcover{&}hl=pt-BR{&}source=gbs{}_ge{}_summary{}_r{&}cad=0{#}v=onepage{&}q{&}f=false
- [49] R. F. Caldeirinha, D. Ferreira, T. R. Fernandes, and I. Cuiñas, “A Multilayer EM Simulation Tool to Assess RF Transparency Control of Building Wall Structures,” in *CEMi 2018 - International Workshop on Computing, Electromagnetics, and Machine Intelligence*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., jan 2019, pp. 89–90.
- [50] “Oblique Incidence 7.1 Oblique Incidence and Snel’s Laws,” Tech. Rep.
- [51] “8 Multilayer Film Applications 8.1 Multilayer Dielectric Structures at Oblique Incidence,” Tech. Rep.
- [52] N. R. Leonor, R. F. Caldeirinha, M. G. Sanchez, and T. R. Fernandes, “A Three-Dimensional Directive Antenna Pattern Interpolation Method,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 881–884, 2016.

- [53] “5 Reflection and Transmission 5.1 Propagation Matrices,” Tech. Rep.
- [54] “#82 (1570693341): Timber Log Based Barrier for Electromagnetic Site Shielding [ConfTELE 2021] EDAS (1765621 -):.” [Online]. Available: <https://edas.info/showPaper.php?m=1570693341>
- [55] B. A. Tribovane, W. Conniott, N. Leonor, and R. F. S. Caldeirinha, “Hybrid Log Shield,” Tech. Rep.
- [56] “3D Ray Tracing For Indoor Radio Propagation - File Exchange - MATLAB Central.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/64695-3d-ray-tracing-for-indoor-radio-propagation>
- [57] “EB-100,” Tech. Rep. [Online]. Available: www.ecanechoicchambers.com
- [58] E. Vhp-F1, “EB-105 FLOOR VERSION OF ECCOSORB VHP FOR WALKWAYS,” Tech. Rep. [Online]. Available: www.ecanechoicchambers.com
- [59] F. Caspers and P. Kowina, “RF Measurement Concepts.” [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5170/CERN-2014-009.101>

Esta página foi propositadamente deixada em branco.

ANEXOS

A

ANEXO A

API	Gratuito/Pago	Formato aberto	Linguagem	Formatos IFC	Comentários
IfcOpenShell	Gratuito	Sim	C++	IFC2x3 e IFC2x4	Transposição para linguagem Python
IFC Tools Project	Pago	Sim	Java	IFC2x3 e IFC4	Uso gratuito apenas para investigação
ST-Developer	Pago	Não	Java, C++ e C	IFC2x3 e IFC2x4	-
Ifc Engine DLL	Pago	Sim	C++	IFC2x3 IFC4	-
XBIM TollKit	Pago	Sim	C++	IFC2x3 e IFC2x4	Uso gratuito apenas para investigação
IfcPlusPlus	Gratuito	Sim	C++	IFC2x3 e IFC4	IFC4 ainda em desenvolvimento
BIM Vision	Gratuito	Sim	C, C++ e C#	IFC2x3	Interface Gráfica

Tabela 12: API's de manipulação de ficheiros IFC (BIM).

ANEXO B

Este anexo é constituído por imagens da interface da aplicação desenvolvida.

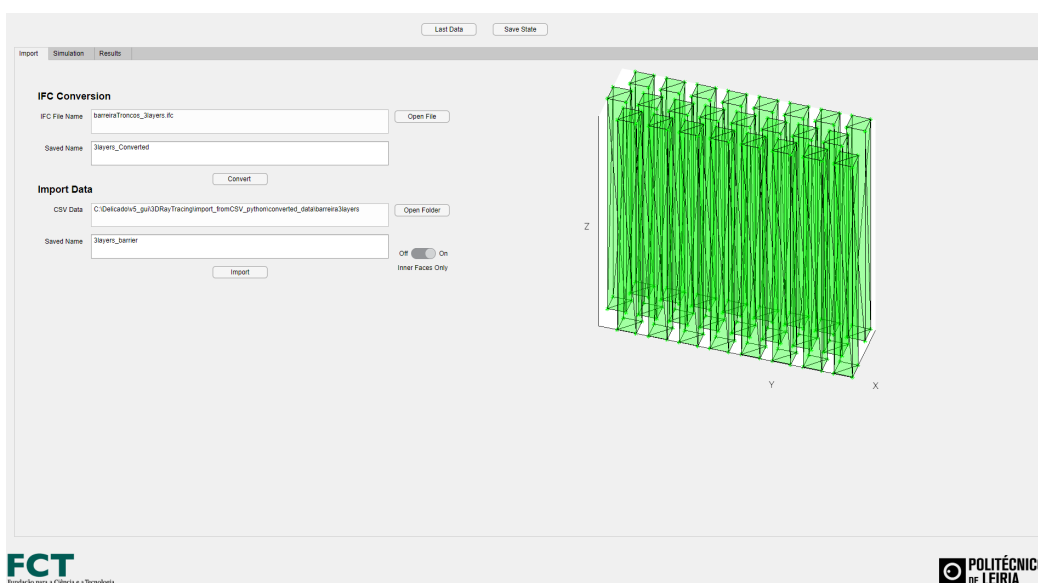


Figura 84: Janela de importação e conversão BIM

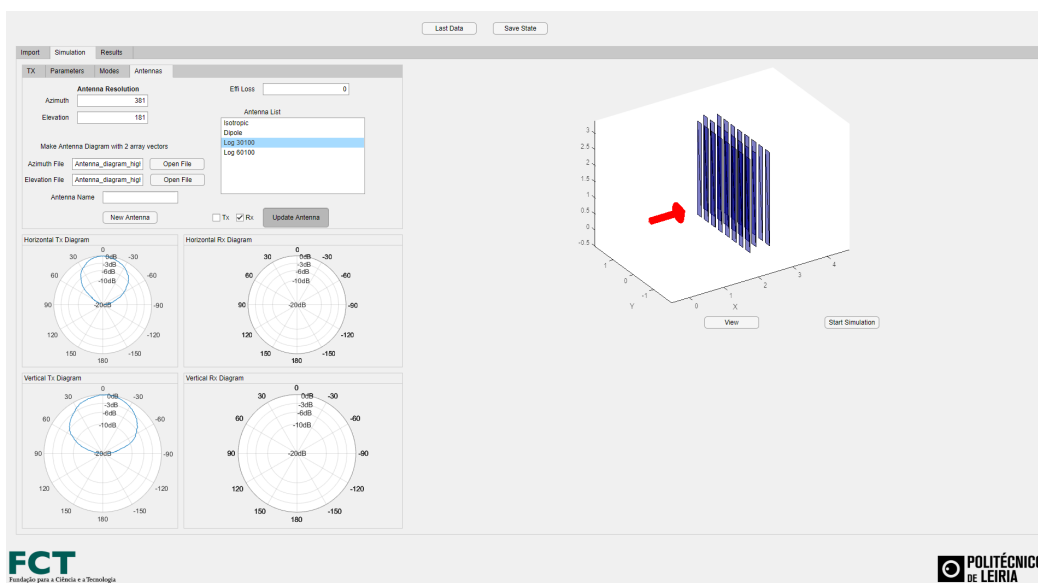


Figura 85: Janela de simulação

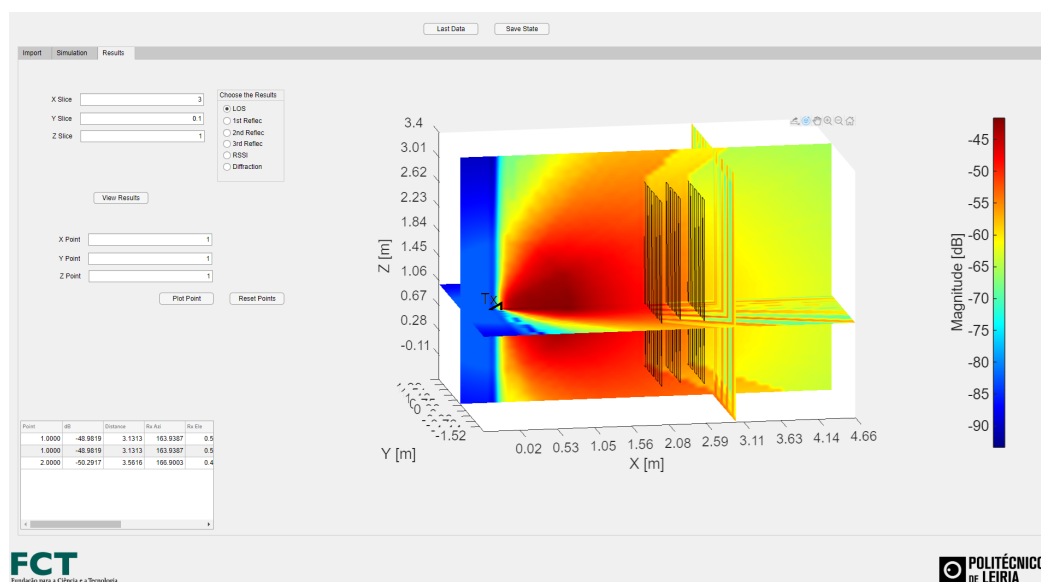


Figura 86: Janela de visualização de resultados

DECLARAÇÃO

Declaro, sob compromisso de honra, que o trabalho apresentado nesta dissertação, com o título “*Ferramenta de Simulação do Desempenho Electromagnético de Edifícios usando BIM*”, é original e foi realizado por João Santos Louro (2182427) sob orientação do Professor Doutor Rafael F. S. Caldeirinha (rafael.caldeirinha@ipleiria.pt), do Professor Doutor Hugo F. P. Rodrigues (hrodrigues@ua.pt) e do Professor Doutor Telmo R. C. C. Fernandes (telmo.fernandes@ipleiria.pt).

Leiria, Novembro 2020

Assinado por : **João Santos Louro**
Num. de Identificação: B114855503
Data: 2021.02.22 18:33:17 GMT Standard Time



João Santos Louro