

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

MAERNI - MÓDULO DE AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO NÃO
IONIZANTE PROVENIENTE DAS ANTENAS DE TRANSMISSÃO DE TV DIGITAL E
RÁDIO FM PARA UMA FERRAMENTA COM O AMBIENTE VIRTUAL 3D

CHARLENE DE SOUSA GUERREIRO

DM: 36/2018

UFPA / ITEC / PPGEE
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ
BELÉM – PA

2018

MAERNI - MÓDULO DE AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO NÃO
IONIZANTE PROVENIENTE DAS ANTENAS DE TRANSMISSÃO DE TV
DIGITAL E RÁDIO FM PARA UMA FERRAMENTA COM O AMBIENTE
VIRTUAL 3D

CHARLLENE DE SOUSA GUERREIRO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Telecomunicações sob a orientação do Prof. Dr. Gervásio Protásio dos Santos Cavalcante

DM: 36/2018

UFPA / ITEC / PPGEE
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ
BELÉM – PA
2018

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

**MAERNI - MÓDULO DE AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO NÃO
IONIZANTE PROVENIENTE DAS ANTENAS DE TRANSMISSÃO DE TV
DIGITAL E RÁDIO FM PARA UMA FERRAMENTA COM O AMBIENTE
VIRTUAL 3D**

AUTOR: CHARLLENE DE SOUSA GUERREIRO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO
DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE
COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Gervásio P.S. Cavalcante
(Orientador – PPGEE/UFPA)

Profa. Dra. Jasmine P.L. Araújo
(Membro – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr Bianchi Serique Meiguins
(Membro Externo – PPGCC/UFPA)

VISTO:

Profa. Dra. Maria Emília de Lima Tostes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G934m Guerreiro, Charlene.
MAERNI - MÓDULO DE AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO À RADIAÇÃO NÃO IONIZANTE
PROVENIENTE DAS ANTENAS DE TRANSMISSÃO DE TV DIGITAL E RÁDIO FM PARA UMA
FERRAMENTA COM O AMBIENTE VIRTUAL 3D / Charlene Guerreiro. — 2018.
75 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Gervásio Cavalcante
Dissertação (Mestrado) - 1, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.

1. Radiação Não-ionizante. 2. Simulador Tridimensional. 3. Realidade Virtual. 4. Níveis de exposição. 5. Campo Elétrico Distante. I. Título.

CDD 001.642

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer a Deus por ter abençoado o meu caminho na vida, e ter me dado forças e sabedoria para chegar até aqui para concluir esta dissertação.

Agradeço também aos meus pais, Maria Iracema e Roberto, pelo amor, carinho, educação, compreensão e por terem me dado à oportunidade de chegar até aqui, ao meu irmão e cunhada, Paulo Roberto e Márcia, pelo apoio para que eu sempre pudesse ter tempo para dedicar aos meus estudos e aos meus sobrinhos Eduarda, Pablo e Enzo que sempre enchem minha vida de alegria.

Aos meus tios e tias que sempre me deram apoio e torceram pela conclusão desta etapa em minha vida.

Agradeço aos amigos que tenho desde a época do ensino fundamental, e que cresceram comigo, e aos que fiz nesta instituição ao longo da graduação e mestrado. Obrigado por me ajudar a superar obstáculos, desafios e pelo companheirismo não só na faculdade como também em minha vida.

Agradeço especialmente ao Diego Pinheiro, que me deu todo suporte necessário não só no desenvolvimento da dissertação como na minha vida, sempre me incentivando e acreditando na minha capacidade. Obrigada por todo carinho, amizade, pelos momentos de felicidade e companheirismo.

Agradeço especialmente também Nathalia Isabelle, Márcia Fontes, André Carvalho, Luanna Saraiva, Luana Oliveira, Rita de Cássia e Hewerton Nunes amigos que ganhei durante a graduação e que ganharam um grande significado na minha vida, muito obrigada pela amizade, e por todo o apoio que vocês me deram ao longo desses anos de amizade.

Também agradeço ao orientador Prof. Dr. Gervásio P.S. Cavalcante que me deu a oportunidade de desenvolver este trabalho confiando no meu conhecimento e capacidade de concluir esta dissertação.

Agradeço a Prof. Dra. Jasmine Araújo por ter acreditado na contribuição científica deste trabalho dando todo o suporte necessário para o cumprimento das tarefas que possibilitaram a defesa desta dissertação.

A todos muito obrigada.

Charllene de Sousa Guerreiro.

*Dedico a conclusão deste trabalho ao meu falecido pai,
Roberto de Lima Guerreiro*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. Regiões de campo de uma antena (BALANIS, 2008)	5
Figura 2. 2. Representação em coordenadas polares (FERREIRA , 2012).....	7
Figura 2. 3. Representação em coordenadas retangulares (FERREIRA , 2012).....	7
Figura 2. 4. Condutividade específica do sangue em função da frequência (ELBERN, 2003). 10	
Figura 3. 1. Representação do nível de potência para <i>downlink</i> de 850 MHz e 950 MHz (PRADO e MANUEL, 2015).....	18
Figura 3. 2. Comparação entre Níveis Médios e de Pico (RODRIGUES, 2016).....	19
Figura 3. 3. Visão geral da interface do SwImax (NEGRÃO, 2012).....	20
Figura 3. 4. Elipsóide nos modelos <i>Smooth Shading e Ware Frame</i> (TAVARES JÚNIOR, CANDEIAS e FRERY, 2006).....	21
Figura 4. 1. Ativação do modo criação (PINHEIRO, 2014).	25
Figura 4. 2. Exemplo de cenário criado (PINHEIRO, 2014)	26
Figura 4. 3. Ativação do modo simulação (PINHEIRO, 2014).....	26
Figura 4. 4. Seleção do modelo de propagação (PINHEIRO, 2014).....	27
Figura 4. 5. Configuração da antena transmissora (PINHEIRO, 2014)	27
Figura 4. 6.. Configuração da antena receptora (PINHEIRO, 2014)	28
Figura 5. 1. Etapas para de desenvolvimento do Módulo de Avaliação a Exposição à Radiação - Não Ionizante.	30
Figura 5. 2. Antenas dipolo adicionadas ao ambiente virtual.....	33
Figura 5. 3 Acesso ao módulo através do menu de navegação	34
Figura 5. 4. Descrição sobre o módulo de avaliação a exposição à radiação não-ionizante	34
Figura 5. 5. Simulação do módulo em pausa e em execução.	34
Figura 5. 6. Intervalo de altura fora do limite do modelo de propagação	37
Figura 5. 7. Altura de acordo com o modelo de propagação e área considerada livre de radiação	37
Figura 5. 8. Altura fora do limite e área sendo considerada exposta.....	38
Figura 5. 9 - Arquitetura SIMPLARCOM com a adição do MAERNI.....	39
Figura 6. 1 . Figura 1. Configurações da antena receptora.....	42
Figura 6. 2. Escolha do modelo de propagação.....	42
Figura 6. 3. Área livre de radiação para faixa de 10MHz a 400MHz	43
Figura 6. 4. Área recebendo radiação para faixa de 10MHz a 400MHz	43
Figura 6. 5. Área recebendo radiação para faixa de 0,15 MHz a 1 MHz	44
Figura 6. 6. Área livre de radiação para faixa de 0,15 MHz a 1 MHz	45
Figura 6. 7.. Área livre de radiação segundo o modelo Lyra-Castro-UFPA	45
Figura 6. 8. Área recebendo radiação segundo o modelo Lyra-Castro-UFPA.....	46
Figura 6. 9. Área recebendo radiação para a faixa de 400Mhz e 2000MHz	47
Figura 6. 10. Área livre de radiação para a faixa de 400Mhz e 2000MHz.....	47
Figura 6. 11. Área livre de radiação segundo o modelo Okumura-Hata	48
Figura 6. 12. Área recebendo radiação de acordo com as configurações da antena de transmissão da rede de televisão RECORD.	49
Figura 6. 13. Área livre de exposição de acordo com as configurações da antena de transmissão da rede de televisão RECORD.	49
Figura 6. 14. Área exposta a radiação de acordo com as configurações de Televisão Independente de São José do Rio Preto	50

Figura 6. 15. Área livre de radiação de acordo com as configurações de Televisão Independente de São José do Rio Preto	51
Figura 6. 16. Área recebendo radiação de acordo com as configurações da antena de transmissão da Carajás FM LTDA.....	52
Figura 6. 17. Área livre de radiação de acordo com as configurações da antena de transmissão da Carajás FM LTDA.....	52
Figura 6. 18. Área recebendo radiação de acordo com as configurações da antena de transmissão da Fundação Nazaré de Comunicação	53
Figura 6. 19. Área livre de radiação de acordo com a configuração da antena e transmissão da Fundação Nazaré de Comunicação	53
Figura 7. 1 – Avaliação didática SIMPLARCOM (PINHEIRO, 2014).	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1. Efeitos das microondas e radiofrequências em cobaias.....	12
Tabela 3. 1. Resultados das Taxas de Exposição	16
Tabela 3. 2. Verificação da condição em relação ao art.19 resolução 303/02 (2/3 do limite).....	17
Tabela 3. 3 - Comparação das contribuições entre os correlatos e o MERNI	22
Tabela 5. 1. Limites para população em geral a CEMRF na faixa de radiofrequência entre 9 KHz e 300 GHz (valores eficazes e não perturbados	36
Tabela 6. 1. Configurações para o segundo teste de simulação	44
Tabela 6. 2. Resultados das simulações	54

LISTA DE ACRÔNIMOS

ERB	Estação Rádio Base
OMS	Organização Mundial de Saúde
IRPA	<i>International Radiation Protection Association</i>
INIRC	<i>International Non-Ionizing Committee</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CEMF	Campo Eletromagnético de Radiofrequência.
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
EIRP	Potência Efetivamente Radiada
RNI	Radiação Não Ionizante
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>
MPL	<i>Maximum Permissible Limits</i>
RF	Radiofrequência
SIMPLARCOM	Simulador para Planejamento de Redes de Comunicação Móveis
MDS	Modelo Digital de Superfície
RV	Realidade Virtual
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i>
MAERNI	Módulo de Exposição à Radiação Não-Ionizante

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
LISTA DE FIGURAS	III
LISTA DE TABELAS	V
LISTA DE ACRÔNIMOS	VI
SUMÁRIO.....	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	X
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Definição da Problema e Motivação.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Estrutura da Dissertação	4
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1 Considerações Iniciais	5
2.2 Parâmetros Fundamentais das Antenas.....	5
2.2.1 Regiões de Campo	5
2.2.2 Diagrama de Radiação.....	6
2.2.3 Intensidade de Radiação	7
2.2.4 Diretividade e Ganho.....	8
2.3 Os Efeitos da Radiação Não-ionizante na Saúde Humana.	9
2.3.1 Oque é a Radiação Não-Ionizante	9
2.3.2 Interação da Radiação Não–Ionizante com a Matéria.....	9
2.3.3 Taxa de Absorção Específica	10
2.3.4 Efeitos Biológicos das Radiações Eletromagnéticas Não- Ionizantes.....	11
2.3.5 Exposição a Campos de Radiofrequência entre 300 kHz a 300 GHz	11
2.4 Realidade Virtual	12

2.4.1	Tipos de Realidade Virtual	12
2.4.2	Imersão, Interação e Desenvolvimento	13
2.5	Considerações Finais	14
3	TRABALHOS CORRELATOS	15
3.1	Considerações iniciais.....	15
3.2	Estudos para a avaliação de radiação não-ionizante.....	15
3.3	Estudos de Radiopropagação Utilizando Realidade Virtual.....	19
3.4	Considerações Finais	22
4	SIMULADOR PARA PLANEJAMENTO DE REDES DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS.....	23
4.1	Considerações Iniciais	23
4.2	Como Funciona o SIMPLARCOM	23
4.3	Considerações Finais	28
5	METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO.....	29
5.1	Considerações Iniciais	29
5.2	Etapas do Desenvolvimento.....	29
5.2.1	Atualização	30
5.2.2	Desativação.....	30
5.2.3	Reestruturação	31
5.2.4	Criação.....	32
5.3	Considerações Finais	40
6	RESULTADOS	41
6.1	Considerações Iniciais	41
6.2	Configuração e Simulação	41
6.3	Considerações Finais	54
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	56
7.1	Publicações Geradas	58
	REFERÊNCIAS	59

RESUMO

Nos últimos anos dado o avanço tecnológico dos meios de comunicação, e o aumento da demanda de usuários que primam pela qualidade destes serviços oferecido a eles, as operadoras tem aumentado o número de Estações Rádio Base nas cidades, onde muitas destas estão localizadas em ambientes de alta densidade habitacional. Considerando que cada antena ou conjunto de antenas presentes nessas estações possuem um campo eletromagnético de radiofrequência e transmitem radiação, a preocupação com a população que mora nas adjacência da antena transmissora é pauta de órgãos que regulam o serviços que oferecem serviços de radiofrequência bem como, é alvo de estudos que visam não somente descobrir os efeitos do contato com a radiação ionizante e não-ionizante presente nestes campos, como também descobrir se a norma criada para a regulamentação dos serviços está sendo cumprida. Neste trabalho apresenta as etapas de desenvolvimento de um módulo que consiste em uma extensão adicionada ao Simulador para Planejamento de Redes de Comunicação Móveis (SIMPLARCOM). O módulo proposto permite, através de ambiente de Realidade Virtual (RV), construir e configurar diferentes cenários, bem como os parâmetros da antena de transmissão, a fim de propiciar um ambiente para testes não invasivos de avaliação de exposição à Radiação Não-Ionizante; e identificar potenciais áreas inseguras para habitações, propiciando informações para auxílio na tomada de decisão quanto à realocação da localização de antenas transmissoras e visando diminuir a EIRP (Potência Efetivamente Radiada) irradiada por essas antenas. O módulo considera as diretrizes presentes na resolução nº 303, publicada pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Nos resultados obtidos é possível, navegar pelo cenário construído e verificar o valor da potência recebida, a intensidade de campo, a frequência de operação, a antena que está sendo analisada e se um determinado ponto no cenário está ou não recebendo radiação de acordo com o limiar permitido pela ANATEL.

Palavras-chave: Radiação Não-ionizante; Simulador Tridimensional; Realidade Virtual; Níveis de exposição; Campo Elétrico Distante.

ABSTRACT

In recent years given the technological advancement of the communication media, and the increasing of users demand who wants a high quality of these services offered to them, the companies have increased the number of Radio Base Stations in cities, where many of these are located in environments with high housing density. Considering that each antenna or set of antennas present in these stations have an electromagnetic field of radiofrequency and transmit radiation, the concern with the population living in the adjacency of the transmitting antenna is the studies object of systems than regulate the companies that offer radiofrequency services, as well as, is the object of studies that aim not only to discover the effects of the contact with the ionizing and non-ionizing radiation present in these fields, but also to find out if the standard established for the regulation of services is being fulfilled. In this work presents the stages of development of a module, which consists of an extension added to the simulator for planning mobile communication networks (SIMPLARCOM). The module proposed allows, through the Virtual Reality environment (VR), to build and configure different scenarios, as well as the parameters of the transmission antenna, to provide an environment for non-invasive tests to evaluate non-ionizing radiation exposure; and identify potential insecure areas for housing, providing information for aid in decision-making regarding the relocation of transmitter antennas and aiming to decrease the ERP (effectively radiated Power) radiated by these Antennas. The module considers the guidelines present in resolution N°. 303, published by the National Telecommunications Agency (ANATEL). In the results obtained is possible, navigate through the constructed scenario and check the value of the received power, the field intensity, the operation frequency, the antenna being analyzed and whether a certain point in the scenario is or is not receiving radiation at according to the threshold permitted by ANATEL.

Keywords: Non-ionizing radiation; Three-dimensional simulator; Virtual reality; exposure levels; Electric Distant Field

1 INTRODUÇÃO

1.1 Definição da Problema e Motivação

Com o avanço da tecnologia e a busca pelo conhecimento, a disseminação da informação tornou-se um dos fatores indispensáveis no dia a dia da população moderna, que prima por serviços mais eficientes, menos custosos e com maior grau de confiança. Para conseguir suprir a demanda crescente de usuários com qualidade, as emissoras de rádio e televisão bem como, prestadoras de serviço de telefonia móvel, têm aumentado o número de Estações Rádio Base (ERB) e mudado a sua tecnologia de transmissão (de analógico para digital).

Com base neste avanço, alguns fatores devem ser levados em consideração dentre eles, é que atualmente as grandes cidades não possuem espaços inabitados em quantidade suficiente para abrigar as novas ERB's, sendo assim a maioria destas acabam dividindo os espaços com habitações como casas, prédios, etc. Essas antenas de transmissão emitem radiação provenientes dos seus campos eletromagnéticos, que pode ser prejudicial à população que habita na adjacência destas antenas e aos trabalhadores na área.

A radiação pode ser dividida em duas classes: ionizante e não-ionizante, de acordo com a interação da mesma com a matéria. Os raios alfa, beta e gama são classificados como radiação ionizante, enquanto as radiações eletromagnéticas nas faixas de frequência do infravermelho, micro-ondas e ondas de rádio são classificadas como radiação não-ionizante.

A radiação ionizante possui energia suficiente para retirar um elétron de sua órbita em um átomo qualquer. Esta reação de ionização pode formar íons e radicais livres nos organismos vivos. Estas partículas podem alterar moléculas dos organismos, por exemplo, o DNA (TERADA, MENEZES e CARVALHO, 2005).

A energia liberada na faixa de radiofrequência é classificada como não-ionizante, nos limites de potência permitidos e estabelecidos em normas pela própria ANATEL. Dentre estes níveis, a exposição à Radiação Não-Ionizante (RNI) é segura, porém para exposição em níveis elevados, podem ocorrer efeitos nos tecidos biológicos, decorrentes do aquecimento das células, como cataratas, queimaduras de pele e insolação

(WANDERLEY, 2009).

Desde 1974, vários países têm desenvolvido pesquisas para criar padrões de proteção a exposição de campos eletromagnéticos. A divisão de saúde ambiental da Organização Mundial de Saúde (OMS) e IRPA (*International Radiation Protection Association*)/ INIRC (*International Non-Ionizing Radiation Committee*), tem desenvolvido um conjunto de vários documentos que fazem parte dos critérios de saúde ambiental da OMS, promovido pelo Programa de Meio Ambiente das Nações Unidas (*United Nations Programme Environmental - UNEP*) (ANATEL, 1999).

No Brasil a ANATEL- Agência Nacional de Telecomunicações é o órgão responsável por limitar e fiscalizar a exposição a campos eletromagnéticos. Em dezembro de 1999 foi lançado o primeiro documento, tomando como referência os limites propostos pela ICNIRP - *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*, sucessora da IRPA/INIRC, para avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos de radiofrequência, para antenas operando em uma frequência de até 300 GHz provenientes de estações transmissoras de serviços de telecomunicações (ANATEL, 1999). Neste documento consta as diretrizes utilizadas para a limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variáveis no tempo.

Em julho de 2002 foi lançada a resolução 303 (ANATEL, 2002), que regulamenta a limitação da exposição de campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequência de 9 KHz a 300 GHz.

Os limites de exposição indicados nesta resolução são estabelecidos em termos de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência da onda plana equivalente e foram obtidos a partir das Restrições Básicas para Exposição a Campos Eletromagnéticos de Radiofrequência (CEMRF), na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 10 GHz e para densidade de potência, para radiofrequências entre 10 GHz e 300 GHz. Estes limites são equivalentes aos Níveis de Referência indicados nas diretrizes da ICNIRP.

A quantidade de energia RF que o público ou os trabalhadores podem ser expostos, como um resultado de antenas de difusão, depende de vários fatores: tipo de estação, características da estação, características de concepção da antena a ser utilizada, potência transmitida para a antena, altura da antena e a distância a partir da antena, frequência e intensidade do sinal.

Atualmente grande parte dos estudos sobre a avaliação a exposição à radiação não ionizante são feitos através da coleta de dados a partir de uma determinada emissora e análise 2D dos resultados. Desta forma, não é possível uma interação com o usuário no qual possa alterar as configurações das antenas transmissoras e as configurações do cenário em tempo real, de forma que possibilite achar o melhor caso em que a população não seja exposta a RNI e o serviço oferecido pela operadora não seja comprometido.

Neste trabalho, portanto, a principal motivação criar um módulo, foi permitir através de RV a interação com o usuário não só através de configurações com dados reais, como também através de testes de diferentes cenários para a obtenção de um melhor resultado em relação a minimização da exposição dos usuários a RNI. Ou seja, diferente do que é feito atualmente onde um cenário para análise de exposição à RNI é obtido através da coleta de dados, o usuário poderá simular cenários com diferentes características, alterar a configuração da antena transmissora em tempo real, não sendo atrelado somente a configuração real/inicial obtida através da empresa responsável pela transmissão; além de poder navegar no cenário e a qualquer momento ver, as áreas consideradas perigosas ou seguras para habitações e se as emissoras estão operando de acordo com as normas da ANATEL e desta forma, sugerir ou não uma reformulação para agente regulador de serviços de transmissão de TV Digital e Rádio FM no Brasil a fim de recomendar a diminuição da EIRP irradiada por essas antenas ou removê-las dos centros urbanos das cidades, caso seja necessário.

1.2 Objetivos

O objetivo geral apresentado neste trabalho é proporcionar um estudo avaliativo que é capaz de utilizar conceitos presentes no estudo de Telecomunicações e técnicas de Realidade Virtual.

Como objetivos específicos tem-se de avaliar os níveis de RNI que a população que habita nas adjacências das antenas de transmissão e os trabalhadores das áreas afins são expostos, de modo a evitar níveis acima do permitido; e mostrar através do módulo criado, utilizando realidade virtual e conceitos de radiopropagação, os níveis de radiação ao redor da antena de transmissão analisada, baseado nos dados referente à mesma. Desta forma, pode ser feita a comparação com as normas da ANATEL, bem como mostrar as

regiões de campo próximo e campo distante, o que permitirá visualização da área de segurança ao redor da antena.

1.3 Estrutura da Dissertação

A dissertação está dividida da seguinte forma: no capítulo 2 é apresentado o referencial teórico que serviu com o base para o desenvolvimento deste trabalho; no capítulo 3 os trabalhos desenvolvidos para a avaliação a exposição à radiação não – ionizante, bem como trabalhos desenvolvidos que utilizam a união de realidade virtual e radiopropagação; no capítulo 4 é abordado Sobre o Simulador para Redes de Comunicações Móveis; no capítulo 5 é mostrado a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho; no capítulo 6 os resultados obtidos neste trabalho são apresentados e no capítulo 7 é apresentado a conclusão e trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações Iniciais

O Módulo de Avaliação a Exposição à Radiação Não-ionizante foi desenvolvido através da integração dos conhecimentos de propagação de sinais de antenas, dos conceitos de realidade virtual e do estudo acerca do parâmetros e impactos da exposição à RNI. Neste capítulo serão descritos os conceitos principais que embasaram o desenvolvimento deste trabalho.

2.2 Parâmetros Fundamentais das Antenas

2.2.1 Regiões de Campo

As linhas de fluxo ao redor da antena, concêntricas e em forma de ondas, transportam energia causando um deslocamento que é definido como propagação, esta que perdura ao longo do campo irradiado pela antena.

O campo circundante ao redor de uma antena é onde se analisa a formação das ondas eletromagnéticas, determinando e caracterizando as propriedades de radiação da antena. Normalmente é subdividido em três regiões como mostrado na Figura 2.1.

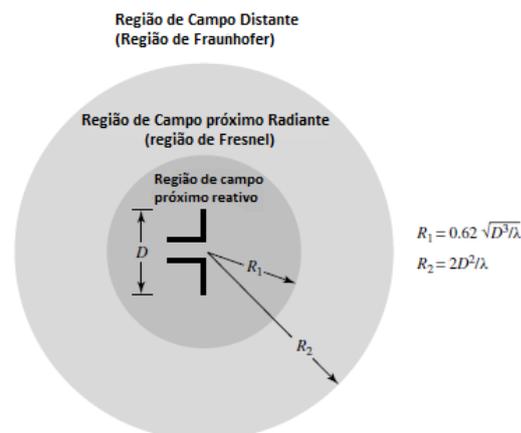


Figura 2. 1. Regiões de campo de uma antena (BALANIS, 2008)

- a. **Região de campo próximo reativo:** parte da região de campo imediatamente próximo da antena. Nesta região os campos elétricos e magnéticos não são ortogonais ou seja, não é possível verificar as propriedades de radiação da atena.

- b. Região de campo próximo radiante (Fresnel):** região de transição entre a região de campo próximo reativo e de campo distante, onde predomina os campos de radiação. Porém, os campos elétricos e magnéticos da onda transmitida também não são ortogonais logo, não é possível a verificação das propriedades de radiação da antena .

- c. Região campo distante (Fraunhofer):** é a região onde a distribuição do campo angular é essencialmente independente da distância da antena, e onde determinamos as propriedades de radiação emitidas pela antena. No campo distante os vetores do campo elétrico e magnético são ortogonais, ou seja, através deles as ondas eletromagnéticas conduzem a energia do sinal no espaço.

Uma observação importante que deve ser salientada é que não há mudanças abruptas nas configurações de campo, são adotadas como os limites, mas existem diferenças distintas entre eles e, muitas vezes a avaliação quanto a exposição à RNI são feitas na região de campo distante da antena de transmissão.

2.2.2 Diagrama de Radiação

O diagrama de radiação é uma representação tridimensional da distribuição da energia radiada em função da direção de observação e da maior distância comparada entre o transmissor e o receptor. Representa graficamente o comportamento da antena quanto a sua irradiação. Através dele é possível ver e analisar onde a emissão de energia é maior bem como, onde a energia é nula ou quase nula.

De uma maneira geral o diagrama de radiação é formado pelos lóbulos de radiação dos quais o principal é o que contém a direção de intensidade de radiação máxima.

Na maioria dos casos é determinado pela região de campo distante e é representado como uma função de coordenadas direcionais. As propriedades de radiação incluem a densidade de fluxo de potência, intensidade de radiação, intensidade de campo, diretividade, fase ou polarização (BALANIS, 2008). A Figura 2.2 e a Figura 2.3 mostram a representação do diagrama de radiação em coordenadas polares e coordenadas retangulares respectivamente.

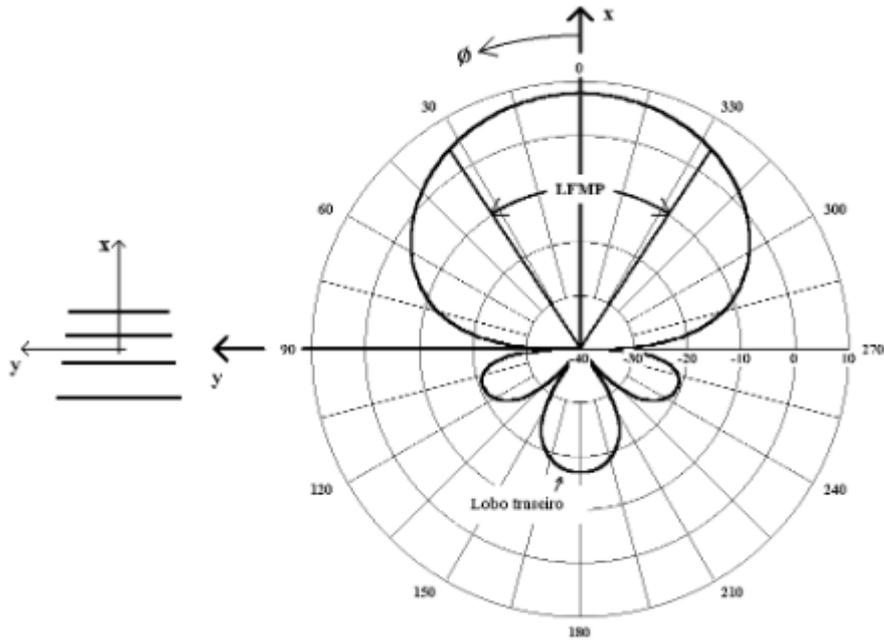


Figura 2. 2. Representação em coordenadas polares (FERREIRA , 2012).

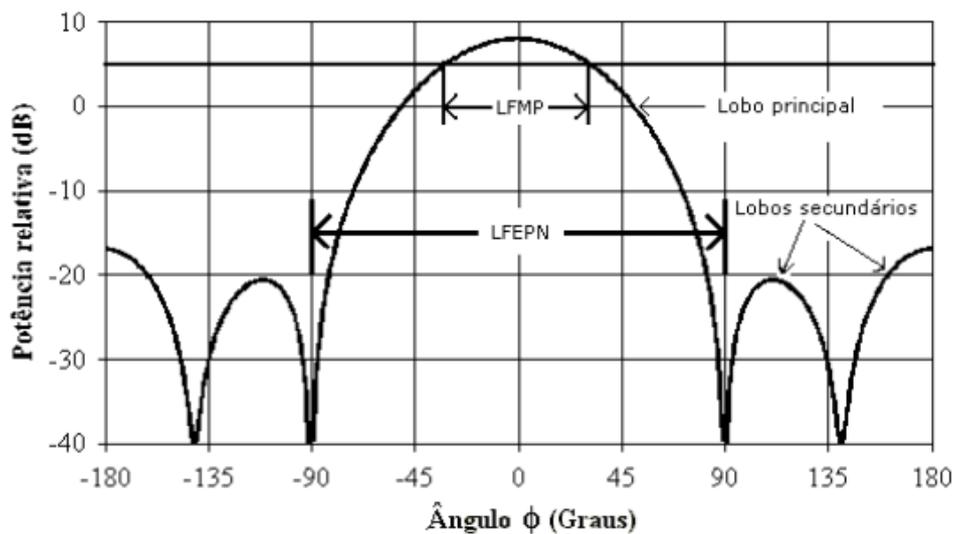


Figura 2. 3. Representação em coordenadas retangulares (FERREIRA , 2012).

É importante ter conhecimento do diagrama de radiação de uma antena uma vez que dependendo do tipo analisado o diagrama terá um formato diferente. No caso da antena dipolo, implementada e analisada neste trabalho o nível de intensidade de campo será maior no lóbulos principal antena sendo assim, o nível de exposição será maior neste ponto.

2.2.3 Intensidade de Radiação

Intensidade de radiação é definida como potência diferencial emitida em um ângulo sólido. A intensidade de radiação é um parâmetro de campo distante que pode ser obtido multiplicando densidade de radiação pelo quadrado da distância como apresentado na

equação (2.1). Com o resultado obtido é possível determinar a potência de radiação de uma antena como mostrado na equação (2.2) (BALANIS, 2008).

$$U = r^2 W_{rad} \quad (2.1)$$

$$P_{rad} = \iint U(\theta, \phi) d\Omega(W) \quad (2.2)$$

Onde U é intensidade de radiação (W/ unidade de ângulo sólido), W_{rad} é densidade de radiação (W/m²), Ω é o angulo sólido no qual se faz a integração e $d\Omega$ é o angulo elementar (FERREIRA, 2012).

Na diretriz nº 303 da ANATEL o controle e avaliação é feito através da faixa de frequência e da intensidade de campo correspondente que foi representava em V/m ou em A/m.

2.2.4 Diretividade e Ganho

A diretividade de uma antena é uma medida de direcionalidade referenciando a antena isotrópica. Definida como a região entre a intensidade de radiação em uma dada direção e a intensidade de radiação média, ou seja, considerando uma fonte não – isotrópica, é igual a razão entre as intensidades de radiação na direção de máxima radiação e da fonte isotrópica.

Quanto mais agudo o angulo de propagação formado pelo lóbulo principal, maior é a diretividade da antena. A equação (2.3) corresponde ao cálculo da diretividade.

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}} \quad (2.3)$$

Onde, D = diretividade (adimensional)

U = Intensidade de radiação (W/unidade de ângulo sólido)

U_0 = intensidade de radiação de uma fonte isotrópica (w/unidade de ângulo sólido)

P_{rad} = potência radiada total (W)

Essencialmente a diretividade descreve a forma como a antena irradia energia que lhe é fornecida uma vez que, há perdas durante a propagação do sinal, e estas últimas

determinam a eficiência de uma antena. Com base neste conceito, utilizar a diretividade para caracterizar o desempenho de uma antena nem sempre é suficiente então, para tal, comumente utiliza-se o ganho.

Considerando o ganho e a diretividade, quanto maior a diretividade de uma antena com relação a antena de referência, que neste caso é isotrópica, maior será o ganho da antena, assumindo que a mesma potência é fornecida a ambas antenas.

O ganho de uma antena é definido como a razão entre a intensidade de radiação em uma dada direção, e a intensidade de radiação que seria obtida se a potência aceita pela antena fosse radiada isotropicamente, equação (2.4).

$$Ganho = 4\pi \frac{\text{intensidade de radiação}}{\text{entrada total de energia (aceita)}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{in}} \quad (\text{adimensional}) \quad (2.4)$$

2.3 Os Efeitos da Radiação Não-ionizante na Saúde Humana.

2.3.1 O que é a Radiação Não-Ionizante

Radiações não ionizantes, incluem todas as radiações do espectro eletromagnético, que não têm energia suficiente para ionizar a matéria. Caracterizam-se por apresentarem energia, por fóton, inferior a cerca de 12 eV, comprimentos de onda maiores do que 100 nanômetros e frequências inferiores a 3×10^{15} Hz (ANATEL, 2002).

2.3.2 Interação da Radiação Não-Ionizante com a Matéria

Para que a radiação eletromagnética possa produzir algum efeito, em um tecido ou em qualquer outra substância é necessário que haja transferência de energia desta radiação para o meio, e que esta energia seja absorvida. Os fatores mais importantes, para a absorção das ondas são: constante dielétrica, condutividade, geometria, e conteúdo de água do meio (ELBERN, 2003).

A condutividade dos tecidos varia significativamente com a frequência para valores acima de 1GHz, por exemplo, em tecidos gordurosos existe uma dependência linear entre o conteúdo de água e a condutividade. Tecidos com 6% de água tem uma condutividade de 4mS/cm a uma frequência de 900MHz enquanto que para outro com 60% de água a condutividade é de 40 mS/cm.

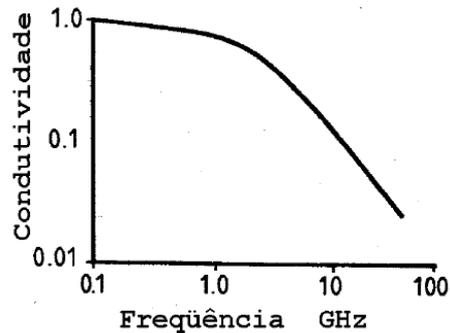


Figura 2. 4. Condutividade específica do sangue em função da frequência (ELBERN, 2003).

2.3.3 Taxa de Absorção Específica

Uma das grandezas físicas de maior interesse na quantificação de limites básicos de exposição às radiações eletromagnéticas é a taxa de absorção específica **SAR** (*Specific Absorption Rate*).

Essa grandeza representa a taxa de potência absorvida por unidade de massa (W/kg) e representa a média espacial sobre toda a massa exposta às radiações de frequência maiores que 10MHz.

A SAR é também considerada como sendo a variação no tempo do aumento da energia absorvida, dW num elemento de volume dV de massa dm , e densidade ρ , e é dado por:

$$\text{SAR} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{dm} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{dW}{\rho dV} \right) \text{ ou } \text{SAR} = \left(\frac{\sigma}{2\rho} \right) |E|^2 \quad (2.5)$$

Onde σ é a condutividade da massa do corpo onde é absorvida a radiação.

Observa-se que a SAR é diretamente proporcional ao aumento local de temperatura, responsável pelos efeitos térmicos, ou seja:

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{1}{C_p} \right) \text{SAR} \quad [^\circ\text{C/s}] \quad (2.6)$$

Onde T é a temperatura e C_p é o calor específico do tecido [J/Kg. $^\circ\text{C}$].

Na região de ressonância, entre 30 MHz e 400 MHz, o tamanho do corpo e o comprimento de onda são da mesma ordem de grandeza e por isso a absorção da radiação é maior e os efeitos térmicos predominam.

Nas regiões de maiores frequências, (> 400 MHz), λ é menor, a penetração da radiação é menor, e pode ocorrer a produção de locais sobre aquecidos em regiões do corpo, como por exemplo, na cabeça.

2.3.4 Efeitos Biológicos das Radiações Eletromagnéticas Não- Ionizantes.

Podemos dividir os efeitos biológicos das ondas eletromagnéticas não-ionizantes em dois grupos: Efeitos Térmicos e Efeitos não Térmicos.

- **Efeitos térmicos:** Esses efeitos são causados por um aquecimento direto dos tecidos biológicos como resultado da absorção da energia eletromagnética num meio dissipativo, como são os tecidos vivos.
- **Efeitos não – térmicos:** Os efeitos não-térmicos são efeitos bioquímicos ou eletrofísicos causados pelos campos eletromagnéticos induzidos, e não indiretamente por um aumento localizado ou distribuído de temperatura. Alguns efeitos não-térmicos reportados na literatura incluem efeitos nos sistemas nervoso, cardiovascular e imunológico, bem como no metabolismo e em fatores hereditários (SALLES, 1997).

2.3.5 Exposição a Campos de Radiofrequência entre 300 kHz a 300 GHz

Como vimos a radiação eletromagnética não-ionizante pode produzir danos entre os quais o efeito térmico é o mais significativo. Como já foi mencionado, quando uma radiação de radiofrequência (RF) ou microonda é absorvida pelo corpo, é gerado calor. Em circunstâncias normais, os vasos sanguíneos dilatam, e o calor é removido pelo suprimento de sangue.

Na faixa de 300 KHz a 300GHz de frequência diversos efeitos da RF e Microonda foram estudados em animais, e um resumo é dado pela Tabela I. Nesta tabela, encontram-se estudos dos efeitos da radiação sobre os órgãos formadores de sangue (hematopoese), onde o stress térmico é predominante.

Tabela 2. 1. Efeitos das microondas e radiofrequências em cobaias

Cobaia	Frequência GHz	Dens. Potência mW/cm²	Duração	Efeito
Ratos	24	20	7h	Alteração nos leucócitos
Coelhos	3,0	3,5	3h/dia, 90 dias	Contagem alta de linfócitos
	2,45	5,10,25	2h	Varição signif. do sangue
	2,4	5	1h/dia, 90 dias	Nenhum efeito
	2,73	24,4	5d/sem, 7 semanas	Redução dos Leucócitos
Ratos			8h/dia,	Nenhum efeito Significante
	0,915	5	5d/sem, 16 semanas	Alterações no sangue em diversos parâmetros

Fonte: (MOSELEY, 1988)

2.4 Realidade Virtual

A literatura reporta várias definições para o conceito de Realidade Virtual, mas, de forma geral, trata-se de uma experiência interativa e imersiva utilizando imagens gráfica em 3D geradas em um computador em tempo real, propiciando a interação com um mundo criado a partir de um cenário real ou imaginário, gerado por um computador.

Outra definição é o uso de computadores e interfaces com o usuário para criar o efeito de mundos tridimensionais que incluem objetos interativos com uma forte sensação de presença tridimensional (BRYSON, 1996).

2.4.1 Tipos de Realidade Virtual

Considerando o nível de imersão e interatividade com o usuário, os dispositivos de entrada e saída de dados, a velocidade e potência do computador que suporta o sistema

RV e a finalidade do sistema; podemos classificar a RV como: RV de Simulação, RV de Projeção e RV de Mesa (MACHADO, 1995).

- a. RV de Simulação:** o tipo mais antigo de RV que consiste na utilização de dispositivos que permitem que o usuário sinta que está imerso no ambiente virtual quando na verdade não está.

- b. RV de Projeção:** surgiu na década de 1970 e nele apesar do usuário estar fora do ambiente virtual é capaz de interagir com personagens e objetos que estão dentro deste.

- c. RV de Mesa:** Neste modelo de Realidade virtual é utilizado um conjunto de dispositivos que permitem a interação com o usuário como um monitor e óculos conjuntamente com um projetor.

No caso do SIMPLARCOM e conseqüentemente o Módulo de Avaliação à Exposição à Radiação Não-Ionizante (MAERNI) desenvolvido e adicionado a ele, utilizam técnicas de realidade virtual de projeção.

2.4.2 Imersão, Interação e Desenvolvimento

A imersão, interação e desenvolvimento são três conceitos básicos muito utilizados para caracterizar a Realidade virtual.

A concepção de imersão está ligada ao objetivo de mostrar o quão imerso o usuário pode ficar em um ambiente virtual, causando a sensação de, de fato pertencer a este.

A interação é a capacidade de o computador ser capaz de detectar a entrada de usuários diferente e modificar o ambiente virtual, em tempo real, de acordo com a interação de cada um.

Por sua vez, o envolvimento ao grau de estimulação do usuário com uma determinada atividade

2.5 Considerações Finais

A exposição à RNI causa efeitos a saúde que ainda são pouco disseminados e conhecidos pela população geral. Para uma análise completa sobre o nível de exposição é necessária fazer uma análise quanto ao campo eletromagnético emitido pela antena, bem como os parâmetros que influenciam diretamente no mesmo.

Para a criação do módulo capaz de avaliar a exposição à RNI foi necessário fazer um estudo teórico sobre os parâmetros de funcionamento das antenas e de radiopropagação, sobre os efeitos e conceitos de RNI, bem como, o estudo realidade virtual e suas particularidades.

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos teóricos que embasaram desenvolvimento deste projeto quanto ao funcionamento de antenas, radiopropagação, RNI e RV.

3 TRABALHOS CORRELATOS

3.1 Considerações iniciais

Muitos trabalhos já foram realizados e publicados com o intuito de analisar se os serviços de comunicação estão atendendo as normas quanto a emissão de RNI bem como, propor novas formas de avaliação diversificando assim a análise de dados e a fiscalização segundo as normas mundiais ou nacionais. Enquanto outros propõe a utilização de realidade virtual no estudo e análise radiopropagação. Neste capítulo será apresentado alguns trabalhos que fizeram parte da base de dados de conhecimento para o desenvolvimento desta dissertação

3.2 Estudos para a avaliação de radiação não-ionizante

Em (RODRIGUES, PINHEIRO, *et al.*, 2013), mostram uma análise da exposição humana à RNI, feita em dados obtidos em uma campanha de medição realizada na cidade de Natal, Rio Grande do Norte – Brasil, nas bandas de VHF e UHF, na qual foi utilizado um analisador de espectro Rohde & Schwarz FSH6 conectado a uma sonda de campo elétrico isotrópico, com altura de 1,65 metros de altura a partir do solo, com faixa de frequência de 30 MHz a 3000 MHz.

Para avaliar a contribuição de cada serviço na exposição total, houveram pontos mais próximos de estações de transmissão de TV e rádio FM e outros mais próximos de estação de comunicações móveis. Na Tabela 3.1 é apresentado o resultado deste correlato no qual, o conjunto de estações analisadas apresentaram um nível de exposição à RNI abaixo ou igual ao limite permitido, sendo que, os valores mais elevados foram para os serviços de TV seguido pela Transmissão de rádio FM.

Tabela 3. 1. Resultados das Taxas de Exposição

Serviço	Média Considerando Todos os Pontos	Média Considerando Apenas Pontos perto das Estações de Transmissão	Média Considerando Apenas Pontos Próximos das Estações de Telefonia Móvel	Valores mais elevados no geral
Taxa de exposição (Absoluta)				
Transmissão de TV	4,22e-4	8,30e-4	3,20e-4	38,92e-4 @P22
Transmissão de Rádio FM	1,83e-4	6,78e-4	1,18e-4	18,85e-4 @P24
Telefonia Móvel (2G e 3G)	6,38e-4	6,30e-5	6,54e-5	5,37e-4 @p26
WLAN (IEEE 802.11bg)	1,08e-5	1,05e-5	1,06e-5	1,28e-5 @P21
Total	6,89e-4	15,82e-4	5,14e-4	56,46e-4 @P22
Taxa de Exposição (Influência relativa em %)				
Transmissão de TV	75,3	57,0	72,0	89,2 @P21
Transmissão de Rádio FM	12,8	33,6	15,2	73,2 @P11
Telefonia Móvel (2G e 3G)	9,5	7,2	10,4	42,1 @P9
WLAN (IEEE 802.11bg)	2,4	2,2	2,4	3,1 @P94

Fonte: (RODRIGUES, PINHEIRO, *et al.*, 2013)

No MAERNI é permitido a configuração de várias antenas de acordo com o serviço prestado, televisão, rádio e telefonia celular, bem como identifica qual antena está sendo analisada, ou seja, em tempo real o usuário pode verificar se um determinado ponto está ou não recebendo radiação e qual ERB é responsável por esta emissão.

Em (VIEIRA, 2015), foi apresentado um trabalho que analisou fontes de RNI ativas no meio corporativo de provedores de Internet. Para tal, foi realizado um estudo de caso em antenas atuante no sudoeste do Paraná, Curitiba-Brasil, no qual foram medidos campo elétrico (V/m), campo magnético (A/m), densidade de potência equivalente (W/m²) e distância no local (m). Como resultado constataram que as distâncias mínimas para o trabalho ideal são boas de conseguir, Na Tabela 3.2 mostra, que e em três das quatro estações analisadas os campos elétricos e magnéticos estavam em conformidade com a resolução da ANATEL, enquanto que a última se mostrou 2/3 acima dos limites determinados. Com o módulo MAERNI em caso de uma avaliação positiva para exposição é possível pausar a simulação e ajustar os valores de transmissão de maneira a evitar a exposição bem como encontrar a configuração ideal que atenda todas as partes envolvidas na avaliação.

Tabela 3. 2. Verificação da condição em relação ao art.19 resolução 303/02 (2/3 do limite)

	Campo Elétrico – Ocupacional (V/m)	Campo Elétrico – População (V/m)	Campo Magnético – Ocupacional (A/m)	Campo Magnético – População (A/m)	Condição
Limites (2/3)	91,33	40,67	0,24	0,11	
Estação 1	89,55	9,95	0,24	0,026	Dispensado
Estação 2	29,99	3,33	0,079	0,0083	Dispensado
Estação 3	80,58	8,95	0,21	0,024	Dispensado
Estação 4	122,98	8,20	0,33	0,022	NECESSÁRIO

Fonte: (VIEIRA, 2015)

Em (PRADO e MANUEL, 2015) foi apresentado um projeto e a implementação de um sistema para medir a RNI de antenas de telefones celulares no Peru, uma vez que há informalidade por parte de algumas empresas de telefonia móvel que não respeitam os limites determinados. O projeto foi executado nas bandas de *downlink* nas faixas de 850 MHz e 1900 MHz, e os testes de medição consistiram em duas etapas: a nível do solo e através de um UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) voando em torno de uma antena de telefonia celular. Os resultados obtidos mostraram que os níveis de densidade de potência estão abaixo do MPL (*Maximum Permissible Limits*), onde o nível máximo de densidade de potência no nível do solo é de 0,362% do MPL, $1,75 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$, e um máximo de 3,41% do MPL, $164,69 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$, para os testes de voo com o *drone*. A Figura 3.1 mostra a representação do nível de potência da banda de *downlink* de 850 MHz e 950 MHz respectivamente.



Figura 3. 1. Representação do nível de potência para *downlink* de 850 MHz e 950 MHz (PRADO e MANUEL, 2015)

Como o Módulo de Avaliação a Exposição à Radiação Não-Ionizante é uma extensão do SIMPLARCOM é possível avaliar não somente os serviços referentes a rádio e televisão, como também serviços de telefonia móvel, com a possibilidade de adição e remoção das antenas setoriais de uma determinada ERB com o intuito de garantir a cobertura celular sem prejudicar a população que mora nas adjacências das antenas de transmissão.

Em (RODRIGUES, 2016), divulgou uma melhoria quanto a questão da visualização dos dados de aferição dos níveis da RNI através da representação das informações destes no espaço. Os dados analisados foram obtidos na cidade de Porto Alegre- Brasil, utilizando o equipamento Saltec modelo URCA, a técnica utilizada para representação dos valores foi a pseudocoloração, no qual foi utilizado o amarelo para valores mais baixos até o vermelho para o limite de exposição máxima e para implementação da solução foi utilizada a ferramenta Tableau (<http://www.tableau.com>). A ferramenta finalizada foi disponibilizada em <https://public.tableau.com/profile/publish/RNI/Painel1#!/publish-confirm>, para testes com o público e obteve resultado de acertos superiores a 93%, e quanto à capacidade de usuário ser capaz de distinguir entre os níveis mínimo e máximo o índice de acerto de 75%. Na Figura 3.2 é mostrado uma comparação entre os níveis médio e de pico no qual, o detalhamento da medida no ponto permite verificar um valor de pico de 14 V/m.

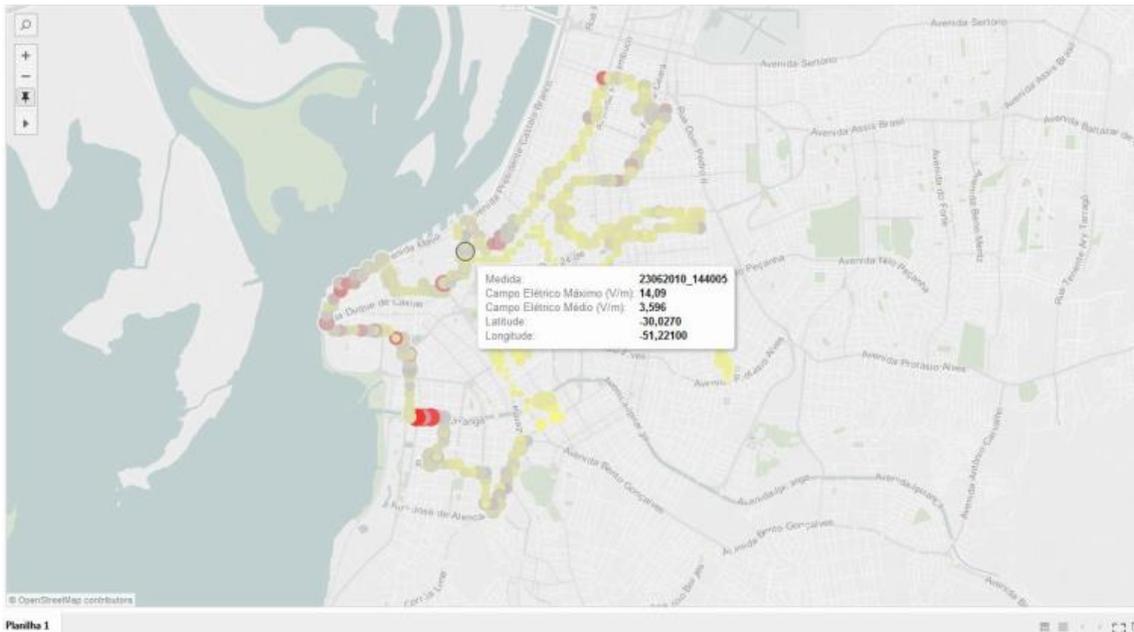


Figura 3. 2. Comparação entre Níveis Médios e de Pico (RODRIGUES, 2016)

No trabalho desenvolvido nesta dissertação o usuário recebe uma mensagem durante a simulação informando se uma determinada área está ou não exposta a radiação. Caso o ponto analisado esteja com a intensidade de campo acima do limite permitido pela ANATEL o simulador informa através do módulo o limiar permitido pela Agencia Nacional de Telecomunicações.

3.3 Estudos de Radiopropagação Utilizando Realidade Virtual

Quanto a pesquisas envolvendo radiopropagação e ambiente 3D foi desenvolvido o trabalho SwImax (NEGRÃO, 2012), para auxiliar o ensino do padrão de comunicação sem fio WiMax. O simulador é uma aplicação web desenvolvida no UNITY3D (UNITY 3D). Nele, o aluno é capaz de navegar pelo ambiente para descobrir como funcionam determinadas características do WiMAX. Para avaliação, a ferramenta foi submetida a testes com alunos de graduação do curso de Engenharia da Computação e da pós-graduação em Engenharia Elétrica, no qual o simulador foi avaliado de maneira positiva quanto ao que se propôs. A Figura 3.3 mostra a visão geral da *interface* do SwImax.



Figura 3. 3. Visão geral da interface do SwImax (NEGRÃO, 2012).

Apesar de possuir uma avaliação positiva o programa não é completamente fiel no que se diz respeito ao estudo de radiopropagação e simulação pois, leva apenas a distância entre as antenas receptora e transmissora em consideração, para determinar a potência recebida. No caso do módulo desenvolvido o usuário pode configurar a potência de transmissão, a frequência de operação bem como outras variáveis que influenciam diretamente na potência recebida e na intensidade de campo.

Em (TAVARES JÚNIOR, CANDEIAS e FRERY, 2006) descreve uma aplicação de linguagem de modelagem de realidade virtual não-imersiva em uma visualização e análise de modelo de terreno digital, e para tal, utilizou uma metodologia apoiada em realidade virtual não imersiva, radiopropagação e cartografia divididas em: entrada, processamento, interface e dados de saída.

A área utilizada para testes de validação está localizada em Recife-PE com dimensão aproximada de 7000 m x 4000, baixa declividade, com poucos prédios e árvores com altura de mais de 30m. O comprimento do rádio enlace é de aproximadamente 4,6km com o sinal de frequência de 23Ghz. Como resultado foi possível confirmar a coerência das coordenadas dos objetos utilizados na construção do MDS – Modelo Digital de Superfície; porém, as coordenadas da torre ou altura da antena não corresponderam a

realidade, e foi possível visualizar bloqueio do elipsóide de Fresnel por prédios ou árvores. Na Figura 3.4 mostra o MDT com elipsóide nos modelos *Smooth Shading e Wire Frame*.

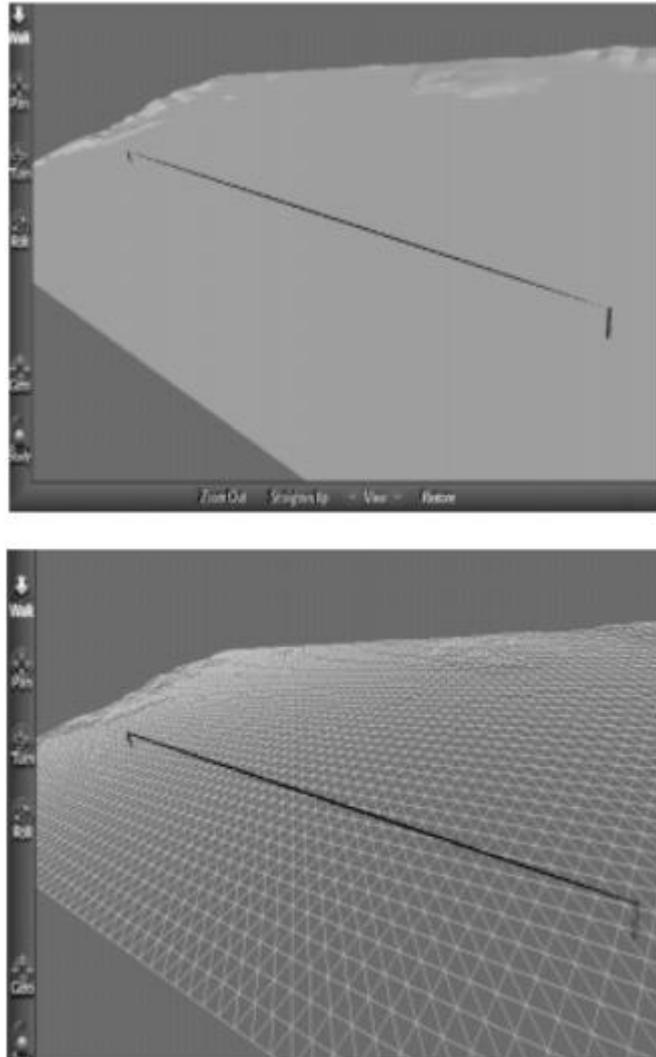


Figura 3. 4. Elipsóide nos modelos *Smooth Shading e Wire Frame* (TAVARES JÚNIOR, CANDEIAS e FRERY, 2006).

Quanto ao módulo desenvolvido, mostrou correspondência entre o ambiente real e virtual, o comprimento de radioenlace e dinâmico variando de acordo com a navegação do usuário no ambiente 3D, bem como durante a simulação é possível verificar a atenuação do sinal de acordo com a altura, distância ou os obstáculos presentes no cenário.

Na Tabela 3.3 é feita uma comparação das contribuições dos correlatos apresentados neste capítulo e a contribuições do MAERNI.

Tabela 3. 3 - Comparação das contribuições entre os correlatos e o MERNI

	Coleta de Dados	Ajuste da Antena em Tempo Real	Ajuste d Cenário em Tempo Real	Análise da Exposição	Análise da Exposição em Tempo real	Correspondência entre Real e Virtual
(RODRIGUES, PINHEIRO, <i>et al.</i> , 2013)	X			X		
VIEIRA, 2015	X			X		
PRADO e MANUEL, 2015	X			X		
(RODRIGUES, 2016)	X			X		
(NEGRÃO, 2012)	X					
(TAVARES JÚNIOR, CANDEIAS e FRERY, 2006)	X					
MERNI	X	X	X	X	X	X

3.4 Considerações Finais

Os trabalhos apresentados possuem diversas formas de avaliar os níveis de radiação não-ionizante bem como, técnicas diferentes para integrar realidade virtual ao estudo e análise de radiopropagação.

As análises da exposição à RNI basearam-se em medições em campo, análise e comparação com as normas presentes na ANATEL, mostrando quais áreas estavam expostas. Quanto a integração de realidade virtual e radiopropagação o trabalhos apresentados tiveram resultados positivos quanto ao que se propôs porém, em (NEGRÃO, 2012) foi levada em consideração apenas a distância entre as antenas para determinar potência, sem ser possível configurar as demais variáveis como potência de transmissão, altura, etc; já em (TAVARES JÚNIOR, CANDEIAS e FRERY, 2006), houve problema quanto a correspondência entre virtual e real.

O módulo a ser descrito neste trabalho é uma extensão do Simulador para Planejamento de redes de Comunicação Móveis – SIMPLARCOM. Sendo assim, é possível customizar tanto as configurações das antenas como o ambiente que será analisado, tornando possível não só a verificação quanto a exposição à radiação não-ionizante, mas também o ajuste para tornar seguro a utilização da antena sem comprometer o serviço oferecido pela operadora que a instalou. A coleta e análise de dados simulados é em tempo real. Desta forma enquanto o usuário navega no ambiente é possível verificar se o ambiente está ou não acima dos limites de RNI permitidos pela ANATEL.

4 SIMULADOR PARA PLANEJAMENTO DE REDES DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS

4.1 Considerações Iniciais

O Simulador para Planejamento de Redes de Comunicação Móveis foi proposto por Pinheiro (2014) e é uma ferramenta que utiliza técnicas de Realidade Virtual que proporcionam a análise do rádio enlace em sistemas de comunicações móveis em um cenário pré-definido ou criado pelo usuário (PINHEIRO, 2014). O Módulo de Avaliação a Exposição à Radiação Não-Ionizante proposto neste trabalho é uma extensão adicionada ao SIMPLARCOM. Neste capítulo será abordado de maneira sucinta a arquitetura do SIMPLARCOM.

4.2 Como Funciona o SIMPLARCOM

A ferramenta apresenta modelos empíricos de propagação de rádio enlace, que é um sistema que consiste na transmissão de dados por ondas de radiofrequência. As equações desses modelos descrevem a atenuação da potência do sinal, ao longo do seu percurso no espaço considerando os parâmetros de transmissão e o cenário analisado.

Os modelos clássicos de propagação do sinal implementados no simulador são:

- a. Okumura –Hata para áreas urbanas em cidade pequena ou média

$$L = 68,75 + 0,7h_r + (27,72 - 1,1h_r) \log(f) - 13,82 \log(h_t) + [44,9 - 6,55 \log(h_t)] \log(d) \quad (4.1)$$

- b. Okumura-Hata para área urbana em cidade grande com frequência de transmissão menor que 300 MHz

$$L = 70,65 + 8,29[\log(1,54h_r)]^2 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_t) + [44,9 - 6,55 \log(h_t)] \log(d) \quad (4.2)$$

- c. Okumura-Hata para área urbana em cidade grande com frequência de transmissão igual ou maior que 300 MHz.

$$L = 74,52 - 3,2[\log(11,75h_r)]^2 + 26,16 \log(f) - 13,82 \log(h_t) \quad (4.3)$$

$$+ [44,9 - 6,55 \log(h_t)] \log(d)$$

- d. Okumura-Hata para área Suburbana

$$L = 64,15 + 26,16 \log(f) - 2 \left[\log\left(\frac{f}{28}\right) \right]^2 - 13,82 \log(h_t) \quad (4.4)$$

$$+ [44,9 - 6,55 \log(h_t)] \log(d)$$

- e. Okumura-Hata para área rural

$$L = 28,61 + [44,49 - 4,78 \log(f)] \log(f) - 13,82 \log(h_t) \quad (4.5)$$

$$+ [44,9 - 6,55 \log(h_t)] \log(d)$$

- f. Modelo Lyra-Castro-UFPA para a região Amazônica (CASTRO, 2010)

$$L = 42,5 - 22784,226808 \frac{h_t + h_r}{h_o f} + 14,2 \log(f) + 16,5 \log(d) \quad (4.6)$$

No qual, h_r = altura da antena receptora (m),

h_t = altura da antena transmissora (m),

f = frequência de operação (MHz),

d = distância entre transmissor e receptor (Okumura-Hata em Km; Lyra- Castro-UFPA em m),

h_o = média das alturas das obstruções entre receptor e transmissor.

O sistema do simulador é composto por dois modos de operação: modo criação, onde é permitido ao usuário a edição de um ambiente que pode conter diversos objetos como árvores, prédios, casas, carros, asfalto, grama, além de torres de diferentes alturas (em metros); e o modo simulação onde é possível a configuração dos parâmetros do transmissor: potência (em W), frequência (em MHz), tipo de antenas com seus ganhos e polarização. Pode-se também selecionar o modelo de propagação a ser empregado durante a execução da simulação, as potências máxima e mínima (em dB) para o receptor e a opção de clima ensolarado ou chuvoso.

Com os parâmetros editados, e caso todos estes estejam de acordo com o modelo de propagação selecionado, o aplicativo permite que o usuário execute a simulação da propagação do sinal. Como resultado da simulação são mostrados os principais parâmetros de interesse no planejamento do sistema como a área de cobertura, a intensidade do sinal recebido pelo usuário em um determinado ponto do cenário e notificações de *handoff* quando ocorrerem.

Na Figura 4.1 mostra a ativação do modo de criação e a Figura 4.2 mostra o exemplo de cenário criado; na Figura 4.3 é mostrado a ativação do modo simulação, a Figura 4.4 mostra a seleção do modelo de propagação, na Figura 4.5 consta os parâmetros de configuração da antena transmissora e na Figura 4.6 pode-se ver os parâmetros de configuração da antena receptora.

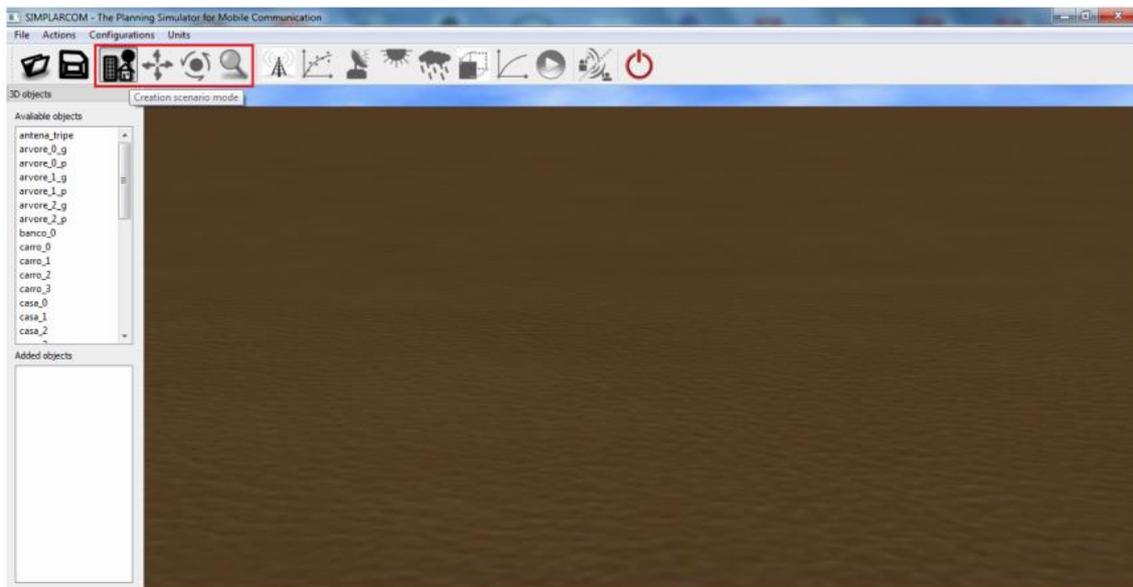


Figura 4. 1. Ativação do modo criação (PINHEIRO, 2014).

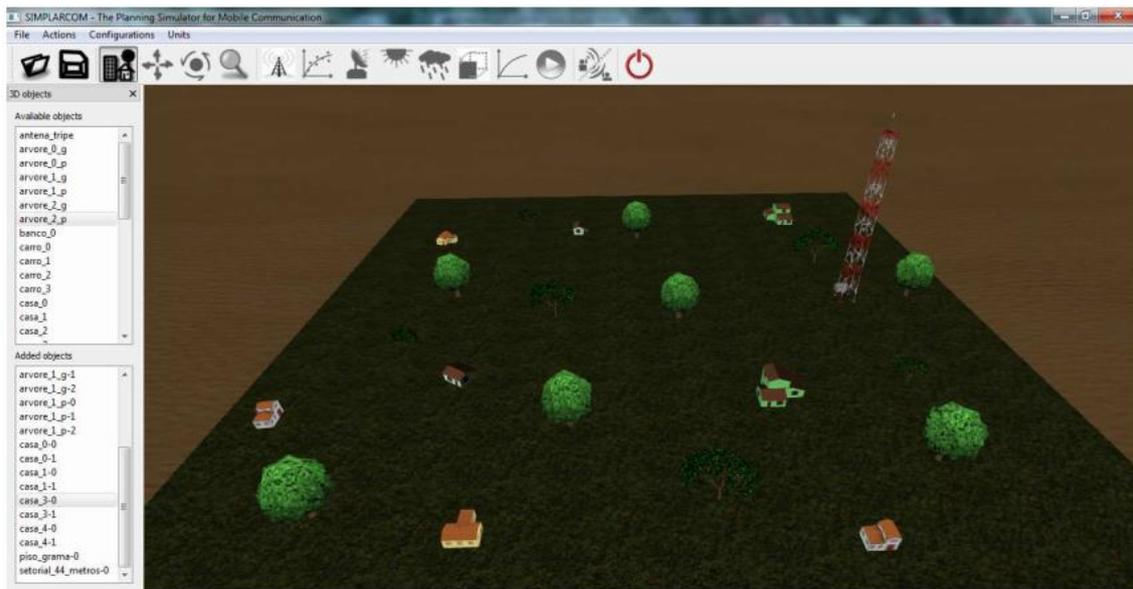


Figura 4. 2. Exemplo de cenário criado (PINHEIRO, 2014)

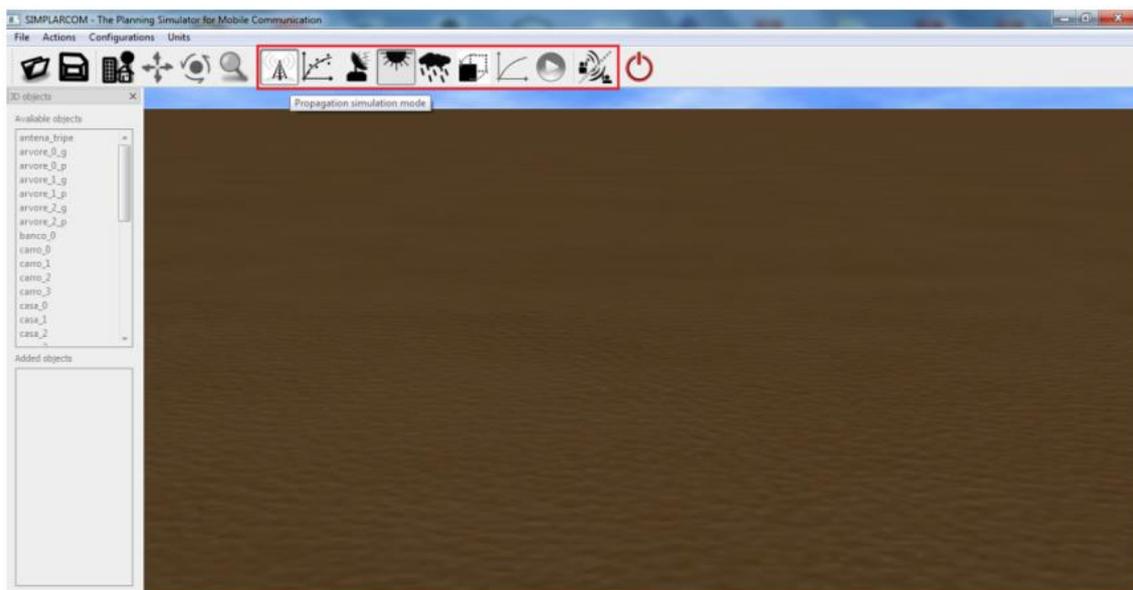


Figura 4. 3. Ativação do modo simulação (PINHEIRO, 2014)

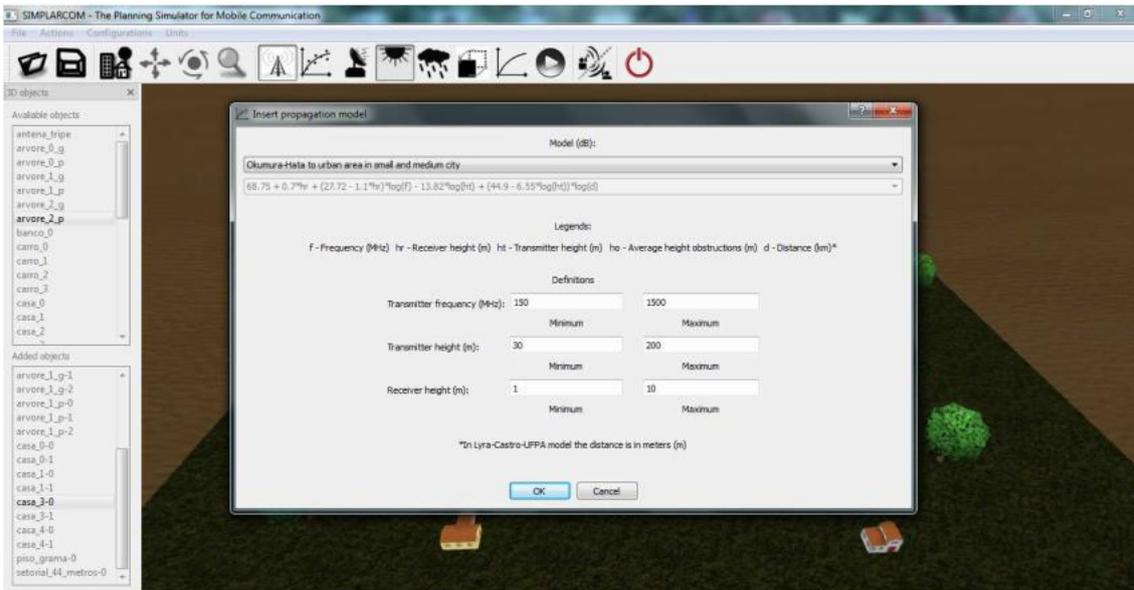


Figura 4. 4. Seleção do modelo de propagação (PINHEIRO, 2014)

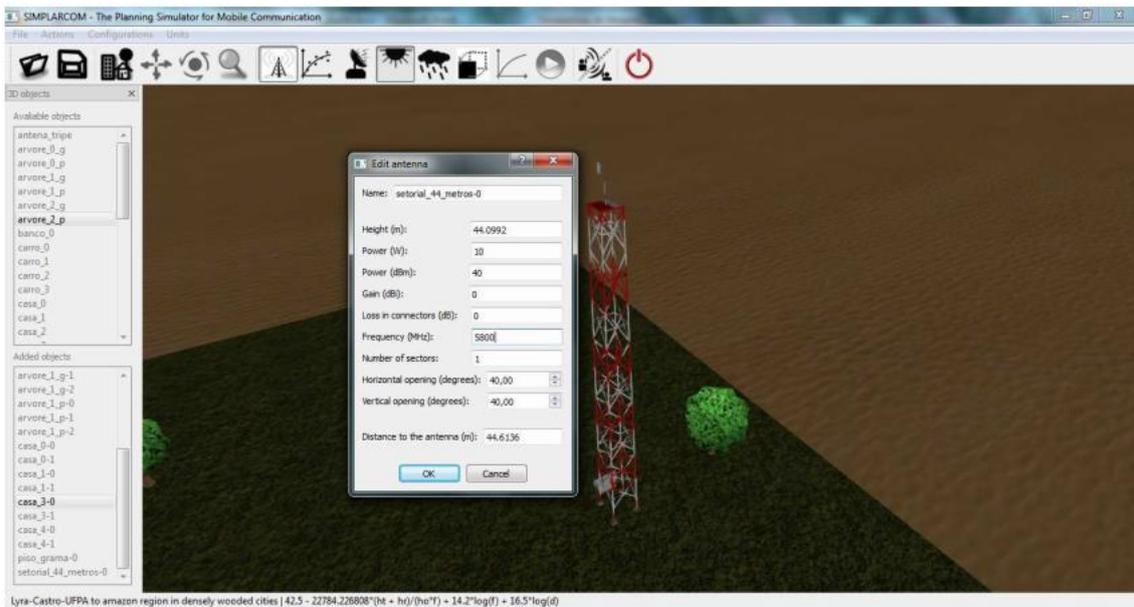


Figura 4. 5. Configuração da antena transmissora (PINHEIRO, 2014)

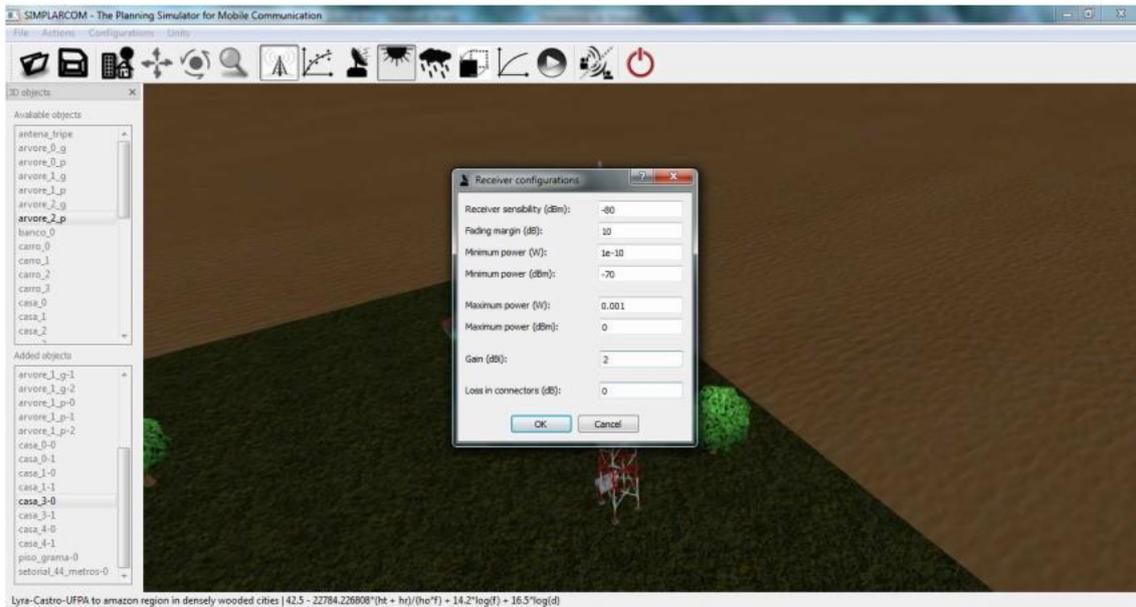


Figura 4. 6.. Configuração da antena receptora (PINHEIRO, 2014)

4.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi abordado as características e funcionamento do SIMPLARCOM desenvolvida no ano de 2014, e do qual o código original foi utilizado como base pra o desenvolvimento do MAERNI.

5 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo serão mostradas as etapas de desenvolvimento do Módulo de Avaliação da Exposição à Radiação Não-Ionizante, uma extensão adicionada ao SIMPLARCOM. O objetivo é mostrar a reestruturação e ajuste do código original, e a criação do novo módulo através da adição de novas antenas para o ambiente virtual e do modelo de propagação utilizado para os testes, e a criação do filtro que avalia a exposição à radiação segundo as diretrizes presentes na resolução nº 303, publicada pela Agencia Nacional de Telecomunicações – Anatel, em julho de 2002.

5.2 Etapas do Desenvolvimento

O Módulo de Avaliação a Exposição à Radiação Não Ionizante é uma extensão desenvolvida para ser adicionada ao Simulador para Planejamento de Redes de Comunicação Móveis.

No início da implementação do simulador foi concebido com pouco conhecimento de padrões de projeto de desenvolvimento, desta forma qualquer mudança de requisito solicitado ou identificado era custoso para ser realizada. Então, para que a adição do módulo fosse possível, o SIMPLARCOM precisou passar por ajustes e adaptações que serão descritos ao longo deste item,

Após a análise do código original da ferramenta SIMPLARCOM, verificou-se a necessidade de refatoração e atualização das bibliotecas utilizadas no SIMPLARCOM, para tal, estabeleceu-se as seguintes etapas de desenvolvimento mostradas na Figura 5.1.



Figura 5. 1. Etapas para de desenvolvimento do Módulo de Avaliação a Exposição à Radiação -Não Ionizante.

5.2.1 Atualização

O SIMPLARCOM foi desenvolvido na linguagem de programação C++, utilizando as versões de código aberto do framework Qt (QT - Software development made smarter), para o gerenciamento da interface gráfica com o usuário, e da engine gráfica Ogre3D (Ogre), para o gerenciamento do ambiente virtual (PINHEIRO, COSTA, *et al.*, 2013).

Em 2017, ano de início de desenvolvimento deste projeto, a versão utilizada na criação do simulador, em seu ano de confecção, havia sido descontinuada. Assim, foi necessário atualizar as plataformas para que a ferramenta funcionasse de maneira mais otimizada, uma vez que as versões anteriores não possibilitavam a implementação de novas estruturas

Através dos programas TortoiseHG (TortoiseHG) e CMake (CMake AMA (Ask Me Anything)), foi feita a atualização, configuração instalação da versão 2.0 do Ogre3D, e através do *prompt* de comando do programa Microsoft Visual Studio foi feito o *build* e instalação da versão 4.8.6 do QT *Framework*.

5.2.2 Desativação

O funcionamento do Simulador precisa primeiramente que haja comunicação entre o QT e o Ogre3D, porém esta é ajustada conforme a versão utilizada no desenvolvimento.

No início do projeto de desenvolvimento do módulo as versões 4.8.6 do Qt e 2.0 do Ogre eram as mais recentes e estáveis. Então umas das dificuldades encontradas foi realizar a comunicação entre as plataformas então, para que esta fosse possível foi necessário realizar a desativação do Simulador.

A desativação consiste no fato tornar a ferramenta em “não funcional” apesar de o código permanecer estável, ou seja, apesar de o código original permanecer sem modificações neste primeiro momento a utilização do simulador não era possível por conta da necessidade de estabilizar a comunicação entre o QT e Ogre3D.

5.2.3 Reestruturação

O projeto SIMPLARCOM foi concebido para prototipar a viabilidade da realização de simulação da propagação de sinal de antenas em tempo real, dentro de um ambiente de Realidade Virtual, emulando assim o que seria um cenário real, porém, qualquer mudança de requisito solicitada ou identificada era custoso para ser realizada. Por exemplo, a adição de um modelo de propagação implicava em alteração de código em diversas partes do projeto.

Após as etapas de atualização e durante a desativação, foi iniciado a reestruturação, a qual consistiu em uma refatoração de todo o código, onde iniciou a implementação de padrões de projetos para estabilizar toda a arquitetura do simulador. Alguns dos padrões utilizados foram:

- *Singleton*: O padrão Singleton permite criar objetos únicos para os quais há apenas uma instância oferecendo um ponto de acesso global, assim como uma variável global, ou seja, é o padrão de projeto de software que caracteriza a necessidade de apenas uma instância de determinada entidade em todo o projeto.
- *Factory*: é um padrão utilizado para criar objetos por isso, é considerado um padrão criacional. Basicamente, a lógica criacional é encapsulada dentro do *factory*, ou é fornecido um método que retorna um novo objeto criado ou delega-se a criação do objeto para uma. Frequentemente o *Factory* é implementado como um *Singleton* ou uma classe estática, pois normalmente apenas uma única instância é necessária. Com isso, tem-se uma centralização na criação do objeto *Factory*, o que permite uma maior organização e melhor manutenção do código, além da redução dos erros quando alterações ou atualização são realizadas.
- *Template*: oferece um método que define um algoritmo que pode, por sua vez, ser definido como abstrato para posteriormente ser implementado por uma subclasse ou seja, são utilizados para reaproveitamento de estruturas. Caso exista uma sequência

de código que se repita em mais de uma situação, mudando, por exemplo, o tipo de dado em que a opção ocorre, é possível o uso de *template*.

As plataformas utilizadas no desenvolvimento do SIMPLARCOM são ferramentas robustas, e permitem não só a expansão para outros estudos de radiopropagação como também para outras plataformas.

Visando a criação de novos módulos para o SIMPLARCOM e a utilização em plataformas, foram introduzidas, ao longo da reestruturação, alterações que permitiram e permitirão modificações, tais como:

- *Multiplataforma*: desde o início do projeto, todas as ferramentas usadas têm a característica de serem multiplataforma, contudo o código que integrava a ferramenta não suportava este requisito. Logo, alterações foram implementadas.
- *Especializações de classes*: uma das boas práticas para ajudar na manutenção dos códigos de projeto de engenharia de software e para ajudar na redução do mesmo, é o polimorfismo. Uma técnica de programação orientada a objetos adicionada ao código original do SIMPLARCOM
- *Estrutura de módulos*: é a estrutura de módulo, onde o usuário poderá “estender” o núcleo do projeto e adicionar suas funcionalidades, seus cálculos, para serem simulados no ambiente virtual.
- *Separação em código de configuração e código de projeto*: com o início do desenvolvimento do projeto desta dissertação visou-se expandir o SIMPLARCOM sendo assim, foi necessário criar uma estrutura base e discretizar em código fonte de configuração e código fonte de projeto. Em outras palavras, foi dividido o que é código genérico do que o SIMPLARCOM deve fazer de maneira direta. Esta é uma das etapas que é constantemente avaliada e que implica diretamente na manutenção e escalabilidade do projeto.

5.2.4 Criação

A última etapa de desenvolvimento deste trabalho consiste na criação do módulo proposto, no qual foram adicionados novos tipos de antenas, modelo de propagação e também a conversão de algumas unidades para que a análise de exposição à radiação não ionizante fosse possível.

Como o SIMPLARCOM dispunha apenas de antenas setoriais, foi necessário a modelagem de novos modelos para serem adicionadas ao ambiente virtual e neste caso, duas antenas dipolo. O programa utilizado para a modelagem foi o *Blender* (Blender), no qual foram gerados os arquivos de extensão .scene, .material e .mesh, que são responsáveis pela estrutura, formate e aparência do objeto 3D. Foi criada duas torres dipolo, a primeira em uma torre estaiada e outra com modelo acoplado a um prédio de controle; ambas com 127 m de altura. Na Figura 5.9 pode-se visualizar as novas antenas modeladas.



Figura 5. 2. Antenas dipolo adicionadas ao ambiente virtual.

Outra modificação aplicada ao simulador foi quanto a interface gráfica com o usuário. Neste caso foi adicionado ao menu de navegação a opção de acessar de maneira direta o módulo de avaliação a exposição à radiação não-ionizante, nele consta uma breve descrição sobre o módulo e a possibilidade de pausar ou executar a simulação do módulo. Na Figura 5.10 é possível ver o acesso direto o módulo bem como as opções “pausar” e “executar, na Figura 5.11 mostra a descrição apresentada no simulador, e na Figura 5.12 é possível ver a simulação geral com a simulação específica do módulo em pausa ou executando respectivamente.



Figura 5. 3 Acesso ao módulo através do menu de navegação

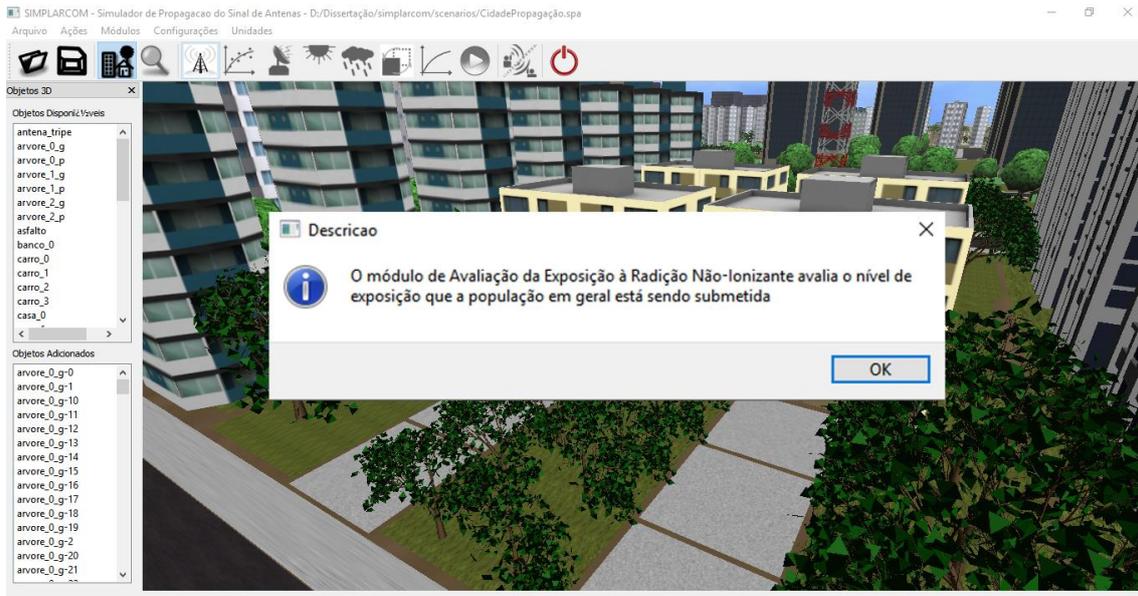


Figura 5. 4. Descrição sobre o módulo de avaliação a exposição à radiação não-ionizante

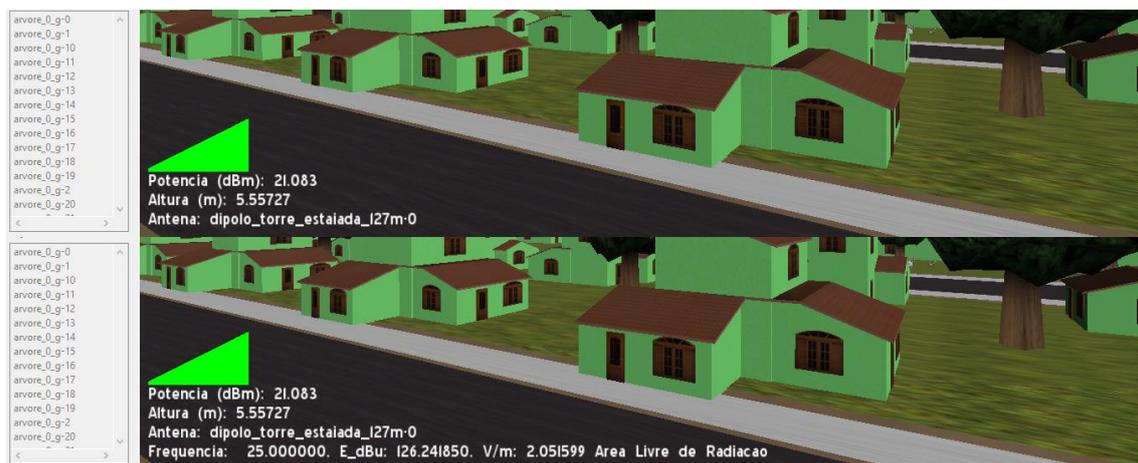


Figura 5. 5. Simulação do módulo em pausa e em execução.

O programa Ogre3D não trabalha com unidades como metro, quilômetro, pois, os valores da unidade de distância são definidos durante a modelagem do objeto. Desta forma é necessário fazer uma conversão equivalente entre o ambiente real e o virtual.

No SIMPLARCOM o valor de referência utilizado foi a torre de 70 m que para o ambiente virtual equivale 1473,99. Desta forma, através da equação 13, é possível determinar a distância em metros equivalente a unidade virtual do SIMPLARCOM (PINHEIRO, 2014).

$$d_{metros} = d_{virtual} \frac{70}{1473,99} \quad (5.1)$$

Quanto as demais unidades envolvidas no estudo de radioenlace presentes no SIMPLARCOM, temos a potência de transmissão e recepção que é convertida de W para dB - equação (5.2), e de dB para dBm – equação (5.3), e a intensidade de sinal recebida – equação (5.4) (PINHEIRO, 2014).

$$P_{dB} = 10 \log_{10}(P_W) \quad (5.2)$$

$$P_{dBm} = P_{dB} + 30 \quad (5.3)$$

$$P_r = P_t + G_t + G_r - L_t - L_r - L \quad (5.4)$$

Na qual P_t = potência transmitida em dBm,

G_t = ganho de transmissão em dBi,

G_r = o ganho de recepção em dBi,

L_t = perdas de alimentação do transmissor em dB,

L_r = perdas de alimentação do receptor em dB,

L = perda referente ao modelo de propagação em dB,

P_r = potência recebida em dBm.

Originalmente o SIMPALCOM analisava dados da potência recebida pelo receptor dentro do ambiente virtual, desta forma, para identificar se uma determinada área está ou não recebendo radiação, primeiramente foi realizada a conversão de potência recebida para intensidade de campo através das equações (5.5) e (5.6).

$$E(\text{dB}\mu) = Pr(\text{dBm}) + 20 \log f(\text{MHz}) + 77,2 - G_{iso} \quad (5.5)$$

$$V/m = 10^{\left(\frac{\text{dB}\mu - 120}{20}\right)} \quad (5.6)$$

Na qual, P_r é a potência recebida, f a frequência de operação e G o ganho da antena.

Tendo conhecimento da frequência e da intensidade de campo, é o momento de avaliar o nível de exposição segundo as normas da ANATEL disposta na resolução 303 (ANATEL, 2002). Para tal, foi implementado um filtro que teve como base a Tabela 5.1, que contém os limites de exposição a CEMRF (Campo Eletromagnético de Radiofrequência), que a população em geral pode ser submetida.

Tabela 5. 1. Limites para população em geral a CEMRF na faixa de radiofrequência entre 9 KHz e 300 GHz (valores eficazes e não perturbados)

Faixa de Radiofrequência	Intensidade de Campo E (V/m)	Intensidade de Campo H (A/m)	Densidade de Potência da onda plana equivalente, S_{eq} (W/m ²)
9 KHz a 150 KHz	87	5	—
0,15 MHz a 1MHz	87	$0,73/f$	—
1MHz a 10 MHz	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	—
10 MHz a 400 MHz	28	0,073	2
400 MHz a 2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$f/200$
2 GHz a 300 GHz	61	0,16	10

Fonte: (ANATEL, 2002)

Outro ajuste que foi feito no simulador referente ao módulo refere-se ao modelo de propagação. Os modelos até então implementados na ferramenta possuem um limite quanto a altura máxima do receptor e desde a sua primeira versão o SIMPLARCOM leva em consideração essa condição, ou seja, ao alcançar este limite o SIMPLARCOM faz a coleta de dados, porém não filtra nem avalia os mesmos, na Figura 5.2 mostra o momento que a altura está fora do intervalo do modelo de propagação.

A Figura 5.13 e a Figura 5.14, mostram outro problema encontrado quando o limite máximo da altura do receptor é ultrapassado. Neste caso o mesmo ponto recebe a avaliação de está exposto a radiação em um caso, quanto em outro está livre de radiação, sendo que, as configurações de frequência e potência não foram alteradas. Ou seja, quando há coleta de dados, porém não há tratamento dos mesmos, pode ocorrer de o simulador mostrar resultados errados.

Levando em consideração as limitações apresentadas pelos modelos de propagação até então presentes na ferramenta e o impacto negativo quando a avaliação e coleta de dados, foi necessário a adição do modelo de propagação no espaço livre ao simulador.

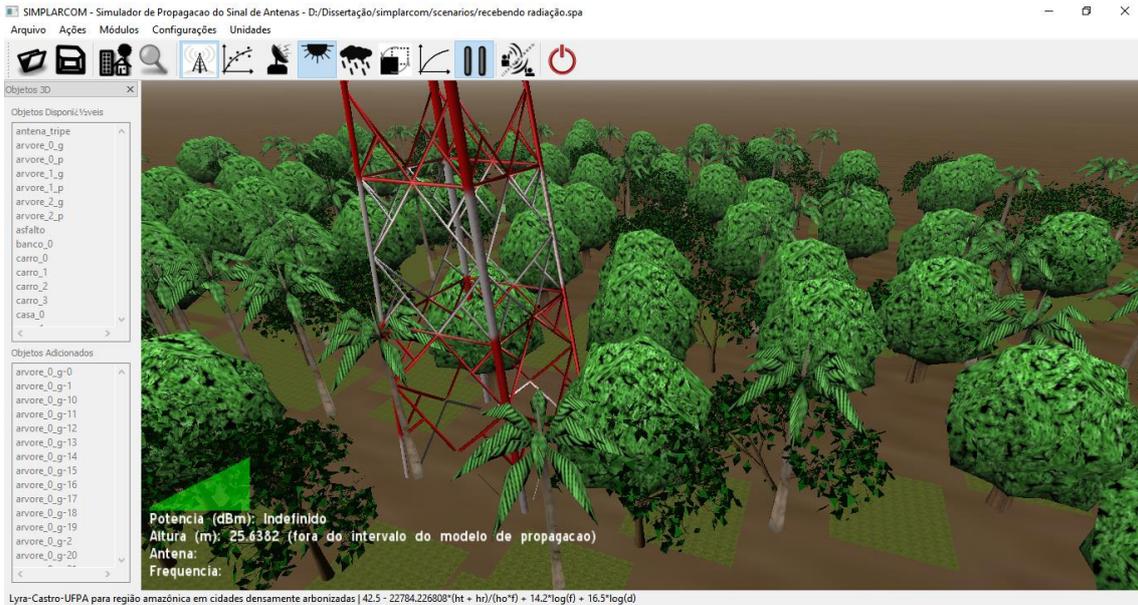


Figura 5. 6. Intervalo de altura fora do limite do modelo de propagação



Figura 5. 7. Altura de acordo com o modelo de propagação e área considerada livre de radiação



Figura 5. 8. Altura fora do limite e área sendo considerada exposta

O modelo de propagação no espaço livre equação (5.7), prediz o nível de sinal recebido em função da distância de separação entre o transmissor e o receptor dada uma certa potência.

$$L_{0[dB]} = 32,44 + 20 \log(d_{[km]}) + 2 \log(f_{MHz}) \quad (5.7)$$

Onde d é a distância entre o transmissor e o receptor e f a frequência de operação.

A Figura 5.9 mostra a arquitetura do SIMPLARCOM com destaque para as partes que sofreram alteração com a adição do MAERNI.

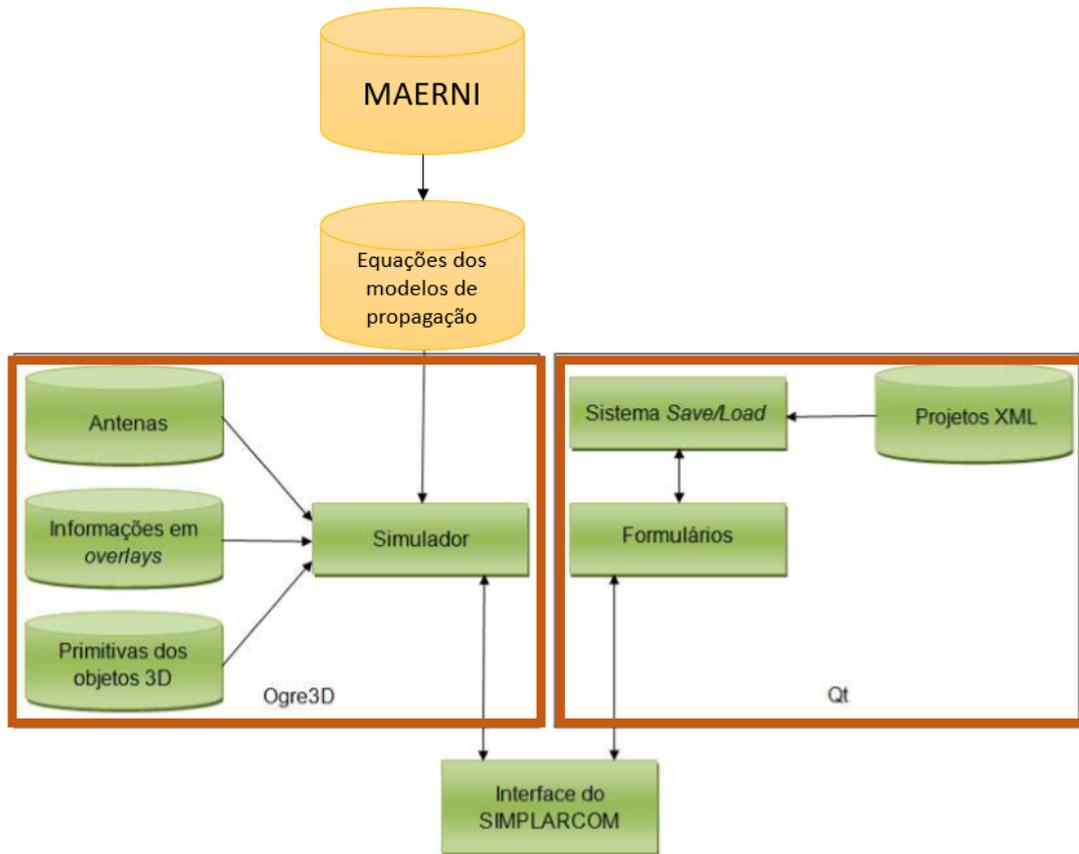


Figura 5. 9 - Arquitetura SIMPLARCOM com a adição do MAERNI

- **MAERNI:** Módulo de exposição à RNI, que irá importar as equações presentes no simulador bem como a estrutura 3D presentes no simulador.
- **Equações dos Modelos de Propagação:** Contém os modelos de propagação com suas respectivas características.
- **Ogre3D:** Responsável pela renderização do ambiente virtual.
- **Antenas:** Armazena e manipula os parâmetros de antenas relativa ao processo de transmissão de sinal.
- **Informações em Overlay:** Responsável pelas informações durante a simulação, como parâmetros das antenas entrada na área de cobertura de uma determinada ERB, etc.
- **Primitivas dos objetos 3D:** objetos pertencentes ao cenário que são utilizados para a composição destes e conseqüentemente na simulação no ambiente virtual.
- **Simulador:** Contém as informações dos objetos contidos na cena, gerencia a navegação no ambiente virtual, realiza o processo de propagação do sinal considerando os parâmetros de cada antena, o cenário e o modelo de propagação.

- **QT:** Fornece a criação e o gerenciamento da interface gráfica.
- **Projetos Xml:** Arquivos de projeto do SIMPLARCOM.
- **Sistema *Save/Load*:** realiza o gerenciamento de um projeto salvo no SIMPLARCOM.
- **Formulários:** Edição dos parâmetros de simulação como nome do objeto 3D, dados da antena, seleção do modelo de propagação, etc.
- **Interface do SIMPLARCOM:** Gerencia todas as janelas utilizadas no SIMPLARCOM e como o usuário interage com o mundo do ambiente virtual.

5.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi apresentado as etapas para a criação e ajuste que o Simulador para Planejamento de Redes de Comunicação Móveis sofreu, para que a criação e adição do módulo de avaliação de exposição à radiação não ionizante fosse possível.

Todas as modificações realizadas mantiveram os conceitos utilizados e apresentados pelo SIMPLARCOM, alterando somente, a estrutura do código para permitir a criação do Módulo desenvolvido neste trabalho, a criação futura de outras extensões referentes a radioenlace bem como, a expansão multiplataforma do simulador.

6 RESULTADOS

6.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo será apresentado os resultados obtidos através do módulo 3D proposto. Foram diferentes faixas de frequências de acordo com a Tabela 5.1 presente no capítulo 5, para realizar teste no qual o módulo consegue identificar se o ambiente em análise está ou não recebendo radiação segundo as normas da ANATEL.

6.2 Configuração e Simulação

Para a simulação foram criados três cenários nos quais: 1) um continha vários prédios, casas e árvores e uma distribuição de antenas, tanto setorial quanto dipolo, 2) Contendo apenas árvores e algumas casas e 3) Um cenário com poucas casas e prédios (cidade pequena ou média).

Outra etapa que precedeu a simulação foi a configuração da antena transmissora e a escolha do modelo de propagação que neste caso, foi o do espaço livre para todas as simulações e alguns casos, o Okumura–Hata para áreas urbanas em cidade pequena ou média e o modelo Lyra-Castro-UFPA.

Vale salientar que a implementação do modelo de propagação no espaço livre não ocorreu em virtude de não utilizar os modelos já presentes na ferramenta, mas, para evita que o limite máximo da altura do receptor afete a coleta de dados e consequentemente e os resultados obtidos.

Na Figura 6.1 é apresentado a configuração da antena transmissora presentes na ferramenta e na Figura 6.2 mostra a janela com as opções dos modelos de propagação que podem ser selecionados.

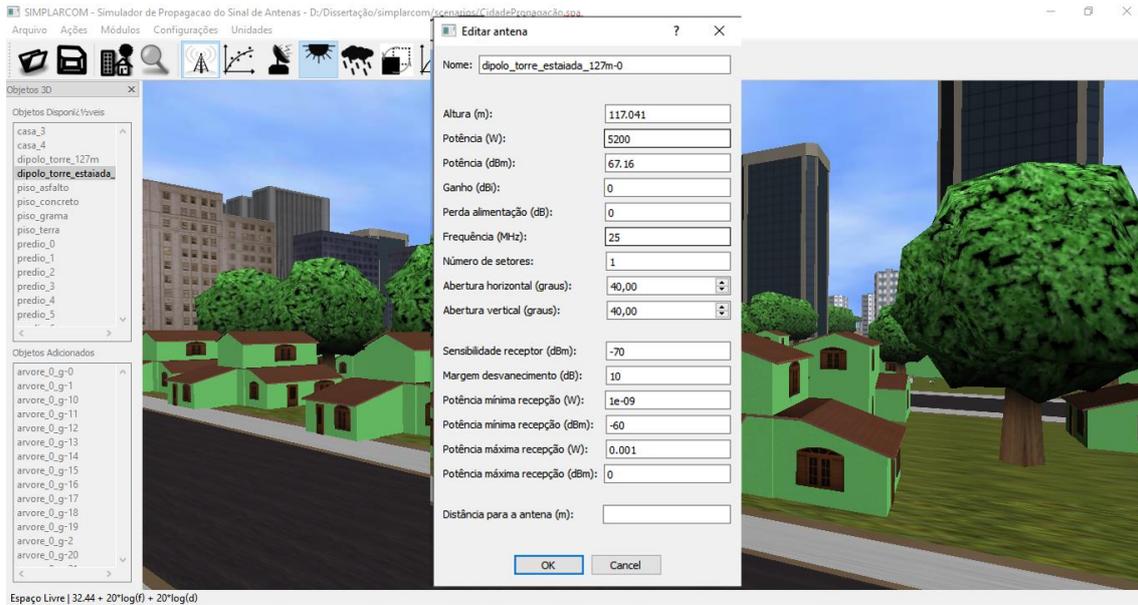


Figura 6. 1 . Figura 1. Configurações da antena receptora

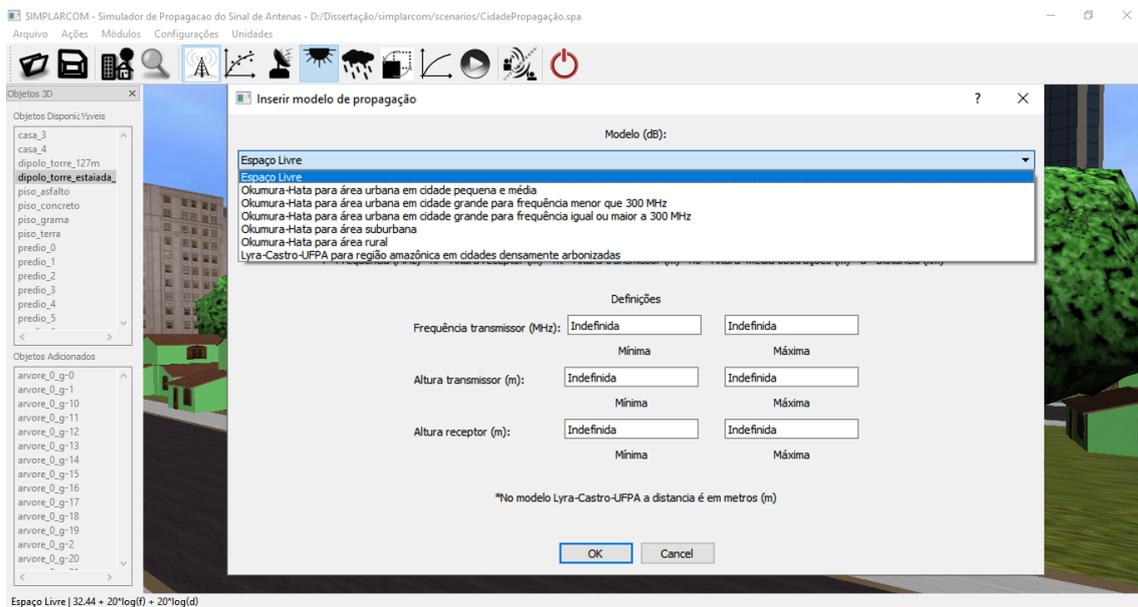


Figura 6. 2. Escolha do modelo de propagação

Na primeira simulação foi aplicado ao cenário urbano que contém casas, prédios de diferentes alturas, árvores e uma distribuição de antenas setoriais e dipolo. A faixa de frequência utilizada foi de 10 MHz a 400 MHz, uma potência de transmissão de 68 dBm, e o modelo de propagação no espaço livre. Na Figura 6.3 e na Figura 6.4, consta o resultado da simulação para este primeiro caso.



Figura 6. 3. Área livre de radiação para faixa de 10MHz a 400MHz

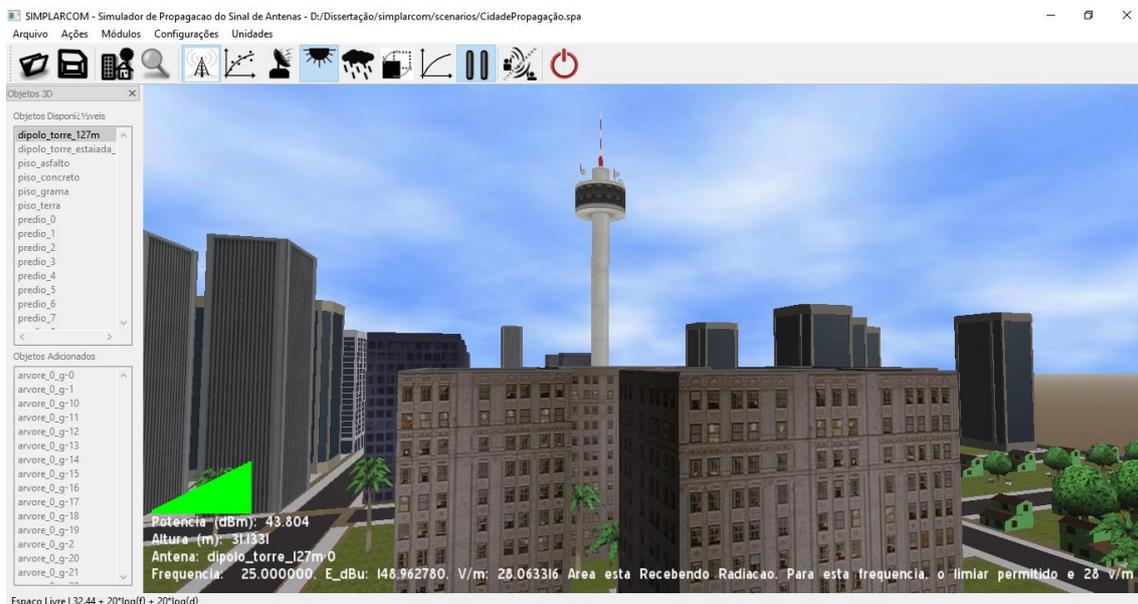


Figura 6. 4. Área recebendo radiação para faixa de 10MHz a 400MHz

Na Figura 6.2 o receptor está em um ponto seguro no qual, a intensidade de campo era de 2,03 V/m a uma altura de 4,05m. Na Figura 6.4 é possível ver que o simulador através do módulo capitou uma intensidade de campo de 28,06 V/m a uma altura de 31,13 m, e informa que a região está sendo exposta a radiação não-ionizante uma vez que para a faixa de frequência configurada, o limite máximo de intensidade de campo é de 28 v/m.

Para a segunda simulação foram utilizadas duas configurações como pode ser visto na Tabela 6.1. A primeira com a faixa de frequência entre 0,15 MHz a 1 MHz e uma potência de transmissão de 83 dBm e a segunda, com uma faixa de frequência de 5725

MHz a 5850 MHz e a potência de 83 dBm aplicados em um cenário densamente arborizado. Esta última configuração é referente ao modelo de propagação Lyra-Castro-UFPA. Na Figura 6.5 e na Figura 6.6 temos os resultados obtidos através da primeira configuração aplicadas ao modelo de propagação no espaço livre, e na Figura 6.7 e na Figura 6.8 os resultados referentes a segunda configuração aplicadas ao modelo de propagação Lyra-Castro-UFPA, no qual vale salientar que foi respeitado a faixa de altura do receptor de 1m a 15m, definida no modelo de propagação.

Tabela 6. 1. Configurações para o segundo teste de simulação

Simulação Para Ambiente Densamente Arborizado			
	Modelo de Propagação	Frequência de Operação	Potência de Transmissão
1ª CONFIGURAÇÃO	Espaço Livre	0,15 MHz a 1 MHz	83 dBm
2ª CONFIGURAÇÃO	Lyra-Castro-UFPA	5725 MHz a 5850 MHz	83 dBm



Figura 6. 5. Área recebendo radiação para faixa de 0,15 MHz a 1 MHz

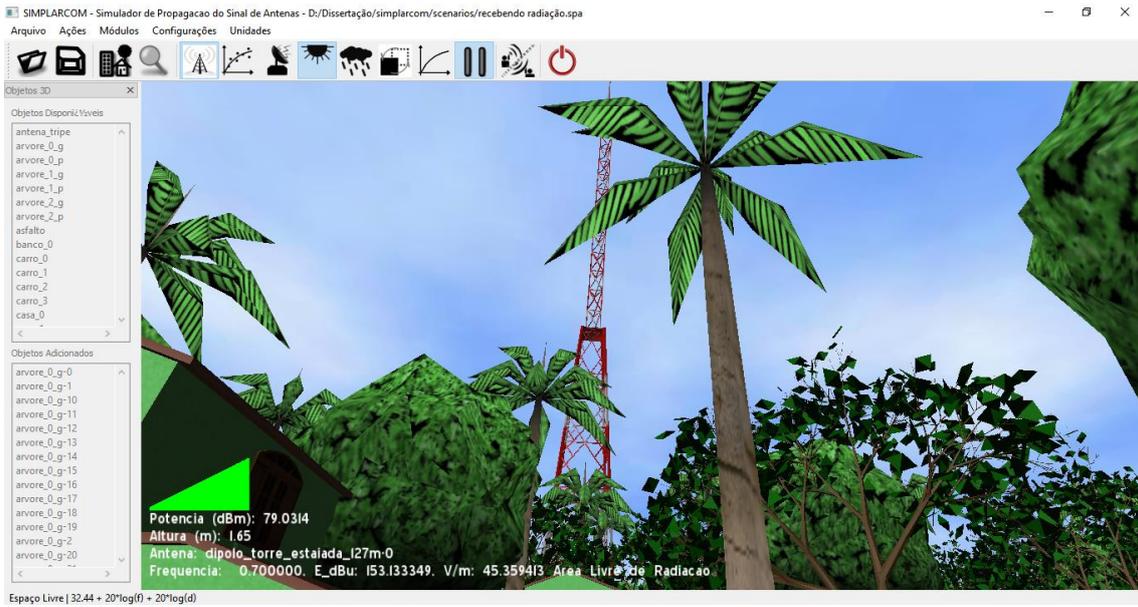


Figura 6. 6. Área livre de radiação para faixa de 0,15 MHz a 1 MHz



Figura 6. 7.. Área livre de radiação segundo o modelo Lyra-Castro-UFPA

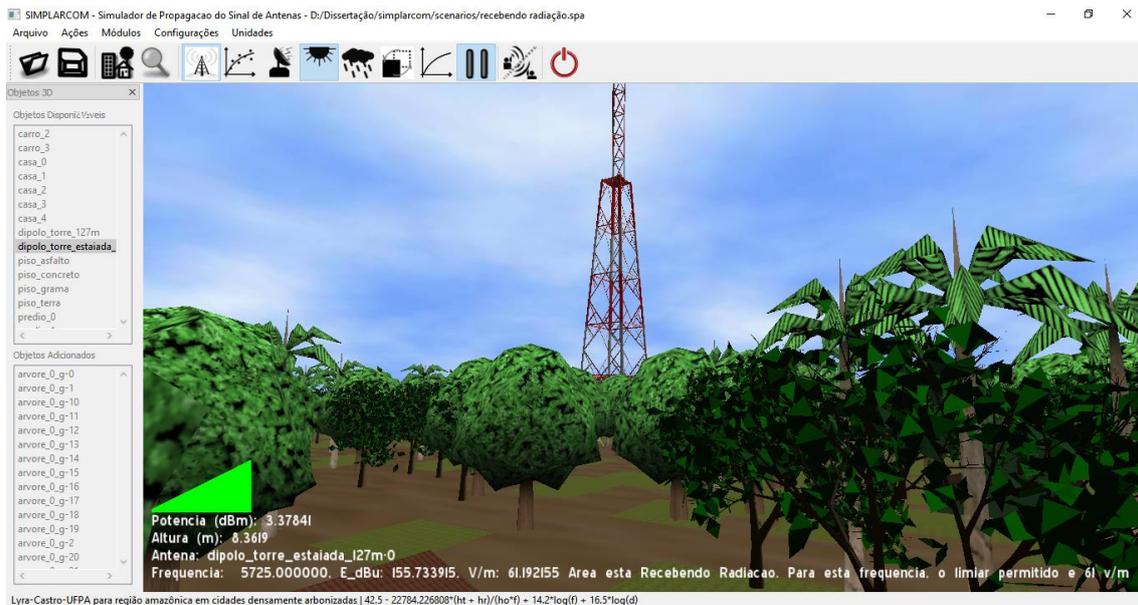


Figura 6. 8. Área recebendo radiação segundo o modelo Lyra-Castro-UFPA

Na Figura 6.6 e na Figura 6.7 os pontos analisados no ambiente durante a simulação estavam livres de radiação nos quais, o valor de intensidade de campo foi de 45,35 V/m a 1,65 m de altura, e 42,73 V/m a 4,06 m de altura respectivamente e para um limiar de intensidade de campo de 87 V/m e 61 V/m.

Na Figura 6.5 e na Figura 6.8 o nível de intensidade de campo foi de 87,06 V/m a uma altura de 10,59 m, e de 61,19 V/m a uma altura de 8,36 m. Conforme a Tabela 5.1, para o ambiente simulado da Figura 6.5, na faixa de frequência configurada, o limiar de intensidade de campo permitido é de 87 V/m enquanto que, o ambiente simulado na Figura 6.8 o limiar de intensidade de campo permitido, para a faixa de frequência utilizada, é de 61 V/m. Desta forma o simulador acusou que em ambos os caso, houve exposição à RNI uma vez que os valores de intensidade de campo ultrapassaram o limite permitido pela ANATEL.

Na terceira simulação foi feito no cenário que simula uma área urbana, que pode ser classificada como pequena ou média. Para teste foi utilizada a faixa de frequência de 400 MHz a 2000 MHz uma potência de transmissão de 67 dBm. Os modelos de propagação utilizados foram o modelo do espaço livre e Okumura-Hata para cidades pequenas e médias.

Na Figura 6.9 e na Figura 6.10 são apresentados os resultados para o modelo de propagação no espaço livre, e na Figura 6.11 resultado para o modelo Okumura-Hata.



Figura 6. 9. Área recebendo radiação para a faixa de 400Mhz e 2000MHz



Figura 6. 10. Área livre de radiação para a faixa de 400Mhz e 2000MHz



Figura 6. 11. Área livre de radiação segundo o modelo Okumura-Hata

Na Figura 6.9 podemos observar que o simulador conseguiu detectar através do módulo, uma intensidade de campo igual a 31,84 v/m a uma altura de 15,58 m, e de acordo com a Tabela 5.1, o limiar seria de 31,65v/m logo, acusou que a área em questão está recebendo radiação. Na Figura 6.10 a intensidade de campo foi de 3,44 V/m a uma altura de 3m, para um limiar de 31,65 V/m sendo assim, a área foi considerada livre de radiação.

Quanto ao ambiente simulado na Figura 6.11, não houve exposição em nenhum dos pontos analisados. Vale salientar que durante a simulação a altura do receptor ficou dentro da faixa do modelo de propagação utilizado que neste caso era de 1m a 10m de altura. A intensidade de campo encontrada foi de 1,8 V/m a 6,75 m de altura, para um limiar de 31,65 V/m

Na quarta simulação o cenário foi utilizado as configurações de uma emissora de televisão RECORD da cidade Belém-PA-Br e o modelo de propagação no Espaço Livre. Neste caso a frequência de configuração é de 521 MHz enquanto que a potência de transmissão é de 67,78 dBm (6 Kw).

Na Figura 6.12 mostra o resultado positivo para a exposição à RNI no qual o valor de intensidade de campo foi de 32,15 V/m a uma altura de 11,1 m, para um limiar de 31,38 V/m, enquanto que, a Figura 6.13 mostra um cenário livre de exposição, com um valor de intensidade de campo 2,54 V/m a uma altura 1,65 m.



Figura 6. 12. Área recebendo radiação de acordo com as configurações da antena de transmissão da rede de televisão RECORD.



Figura 6. 13. Área livre de exposição de acordo com as configurações da antena de transmissão da rede de televisão RECORD.

No caso do cenário simulado e apresentado na Figura 6.12, vale ressaltar que durante a simulação somente as áreas adjacentes ou mesmo ao logo da torre de transmissão houve exposição à radiação além dos limites recomendados.

A quinta simulação também apresenta configurações reais da antena de transmissão. Neste caso foi utilizado as configurações da rede de Televisão Independente de São José do Rio Preto, frequência de 500 MHz a 506 MHz, e uma potência de

transmissão de 76,17 dBm (41406 w) e o modelo de propagação no espaço livre selecionado para simulação.

Na Figura 6.14 podemos ver o ponto no qual o cenário está exposto a RNI com uma intensidade de campo de 32,47 V/m a uma altura de 25,75 m enquanto que na Figura 6.15 é possível ver o ponto o qual o cenário encontra-se livre exposição com intensidade de campo igual a 4,2 V/m a uma altura de 4 m. Em ambos os casos o limiar permitido pela ANATEL é de 30,77 V/m.

Vale salientar que assim como o quarto teste de simulação a antena apresentou exposição apenas em áreas próximas a antena, porém, dada uma potência de transmissão maior o campo nas proximidades também se tornou maior.



Figura 6. 14. Área exposta a radiação de acordo com as configurações de Televisão Independente de São José do Rio Preto



Figura 6. 15. Área livre de radiação de acordo com as configurações de Televisão Independente de São José do Rio Preto

Na sexta simulação, o cenário foi configurado utilizando as configurações da antena de transmissão da FM Radio Broadcast – Carajás FM LTDA. A frequência de operação foi de 99,9 MHz e a potência de transmissão de 80 dBm (10.000 w) com o modelo de propagação do espaço livre selecionado para simulação.

Na Figura 6.16 o simulador detectou um intensidade e campo de 32,48 V/m a uma altura de 33,78m, acusando a exposição uma vez que, para esta faixa de frequência o limite é de 28 V/m. Na Figura 6.17 é apresentado um ponto no cenário livre de exposição para as mesmas configurações de frequência e potência de transmissão no qual a intensidade de campo foi de 10,50 V/m a uma altura 1,8 m.



Figura 6. 16. Área recebendo radiação de acordo com as configurações da antena de transmissão da Carajás FM LTDA



Figura 6. 17. Área livre de radiação de acordo com as configurações da antena de transmissão da Carajás FM LTDA

Na sétima simulação o cenário foi configurado utilizando as configurações utilizadas foram da Fundação Nazaré de Comunicação no qual, a frequência de operação vai de 566 a 572 MHz e a potência de transmissão de 76,75 dBm (37675 W).

Através da Figura 6.18 é mostra uma intensidade de campo de 33,78 V/m a uma altura de 17m enquanto que, na Figura 6.19 é mostrado um ponto no cenário livre de radiação, com uma intensidade de campo de 8,1 V/m a uma altura de 3,16 m. Para ambos os casos o limiar é de 32,77 V/m segundo as normas da ANATEL



Figura 6. 18. Área recebendo radiação de acordo com as configurações da antena de transmissão da Fundação Nazaré de Comunicação

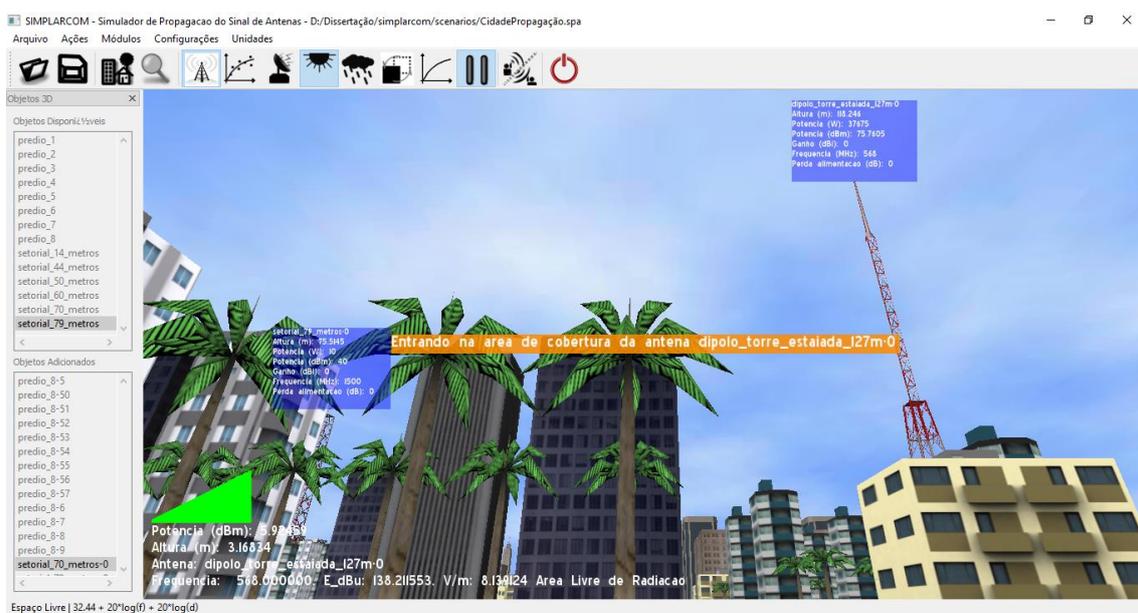


Figura 6. 19. Área livre de radiação de acordo com a configuração da antena e transmissão da Fundação Nazaré de Comunicação

A Tabela 6.2 mostra o conjunto de configurações utilizadas para as simulações apresentadas neste trabalho conjuntamente com os resultados de intensidade de campo e nível de exposição apresentados em cada caso.

Tabela 6. 2. Resultados das simulações

Configuração de resultados das Simulações									
	Potência de Transmissão	Frequência de Operação	Modelo de Propagação	Intensidade de Campo	Altura	Limiar segundo a ANATEL	Exposição a RNI		
1ª Simulação	68 dBm	10 MHz a 400 MHz	Espaço Livre	2,03 V/m	4,05 m	28 V/m	Livre		
				28,06 V/m	31,13 m		Exposto		
2ª Simulação	83 dBm	0,15 MHz a 1MHz	Espaço Livre	87,06 V/m	10,59 m	87 V/m	Exposto		
				45,35 V/m	1,65 m		Livre		
				Lyra-Castro-UFPA	5725 MHz a 5850 MHz	61,19 V/m	8,36 m	61 V/m	Exposto
						42,73 V/m	4 m		Livre
3ª Simulação	67 dBm	400 MHz a 2000 MHz	Espaço Livre	31,84 V/m	15,58 m	31,65 V/m	Exposto		
				3,44 V/m	3 m		Livre		
4ª Simulação	67,78 dBm	521 MHz	Espaço Livre	1,8 V/m	6,75 m	31,38 V/m	Livre		
				32,15 V/m	11,1 m		Exposto		
5ª Simulação	76, 17 dBm	500 MHz a 506 MHz	Espaço Livre	2, 54 V/m	1,65 m	30,77 V/m	Livre		
				32,47 V/m	25,75 m		Exposto		
6ª Simulação	80 dBm	99,9 MHz	Espaço Livre	4,2 V/m	4 m	28 V/m	Livre		
				32,48 V/m	33,78 m		Exposto		
7ª Simulação	76, 75 dBm	566 MHz a 572 MHz	Espaço Livre	10,50 V/m	1,8 m	32,77 V/m	Livre		
				33,78 V/m	17 m		Exposto		
				8,1 V/m	3,16 m		Livre		

6.3 Considerações Finais

Neste capítulo foi mostrado os testes realizados no SIMPLARCOM através do módulo criado. Para tal foram utilizadas diferentes faixas de frequência e potência de transmissão tanto com dados fictícios, quanto com dados reais. Quanto aos modelos de propagação optou-se por utilizar 3 modelos, dois que estão desde a primeira versão do simulador, e o novo, implementado durante o processo e criação do módulo.

Através dos resultados obtidos é possível afirmar que o simulador conseguiu utilizar toda estrutura presente no simulador sendo assim, é possível a criação de cenários com características diferentes, desde aqueles que representam ambientes densamente arborizados, até aqueles que simbolizam cidades urbanas classificados em pequenas, médias ou grandes.

Quanto a interatividade com o usuário é permitida não somente a criação do ambiente como a configuração da antena, escolha do modelo de propagação, ativar e desativar o Módulo de Avaliação a Exposição à Radiação não ionizante conforme a sua necessidade.

Quanto a simulação e coleta de dados o módulo se mostrou fiel quanto a correspondência entre o mundo real o virtual. As conversões de unidades foram coerentes

matematicamente. Durante a simulação o módulo mostrou-se sensível a alterações mínimas quanto a intensidade de campo. Desta forma, o usuário é capaz de ver em tempo real quando um determinado ponto está ou não sendo exposto à RNI.

Quanto a contribuição deste trabalho, o Módulo trouxe a integração de RV, radiopropagação e análise da exposição à RNI segundo as normas da ANATEL. É possível simular para valores diferentes de potência e frequência, utilizando diferentes modelos de antenas, o que possibilita o estudo e a análise para diferentes serviços como televisão, rádio, telefonia celular, etc. O módulo analisa cada caso de acordo com os parâmetros da antena previamente configurados, e de acordo com o ambiente estimado, sendo possível a visualização da atenuação tanto da potência recebida quanto o nível de exposição, estas que são coletados dinamicamente de acordo com a navegação do usuário no ambiente.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O estudo e a avaliação acerca da exposição à RNI são importantes uma vez que, a exposição em níveis elevados, podem ocorrer efeitos nos tecidos biológicos, decorrentes do aquecimento das células, como cataratas, queimaduras de pele e insolação.

Este trabalho foi desenvolvido de forma a contribuir e diversificar a forma de avaliação, propondo em uma única ferramenta, a avaliação de diversos serviços que utilizam radiofrequência como televisão, rádio, telefonia móvel, etc.

Para que fosse possível a criação do módulo apresentado neste trabalho foi necessário realizar ajustes na arquitetura do Simulador para Planejamento de Redes de Comunicação Móvel, estes que também irão possibilitar a criação de novas extensões bem como a expansão da ferramenta para outras plataformas.

Todas as modificações realizadas mantiveram a funcionalidade proposta originalmente e os testes realizados em cenários propostos mostraram resultados satisfatórios e a viabilidade de utilização para avaliação de RNI.

O módulo apresentou um resultado satisfatório sendo capaz de utilizar os benefícios já implementados no SIMPLARCOM para a criação dos ambientes, coleta de dados e avaliação à exposição à radiação não-ionizante, seguindo as normas determinadas pela Agência Nacional de Telecomunicações. Sua análise foi sensível e capaz de detectar uma pequena alteração quanto a intensidade de campo, mesmo com modelos de propagação já presentes na ferramenta desde a sua primeira versão, quanto para o modelo de propagação no espaço livre.

Outro resultado positivo quanto as simulações é que foi possível ver as mudanças ocorridas com relação ao campo de radiação da antena transmissora, este que foi diminuindo ou aumentando de acordo com a potência e frequência configurada.

Como trabalho futuro pretende-se expandir o Módulo Para Avaliação a Exposição à Radiação Não Ionizante, para análises internas em prédios e casas, assim será possível saber quais cômodos ou andares, em caso de edifícios e prédios, estão recebendo radiação.

Outra implementação que pode ser futuramente realizada é a criação de novos módulos como por exemplo, para a avaliação da transmissão de sinal nos ambientes indoor.

Como o SIMPLARCOM possuiu uma avaliação positiva quanto a sua aplicação no ensino de redes móveis e áreas afins- Figura 7.1 (PINHEIRO, 2014), o novo módulo será submetido a uma avaliação didática para testar sua viabilidade dentro da sala de aula.

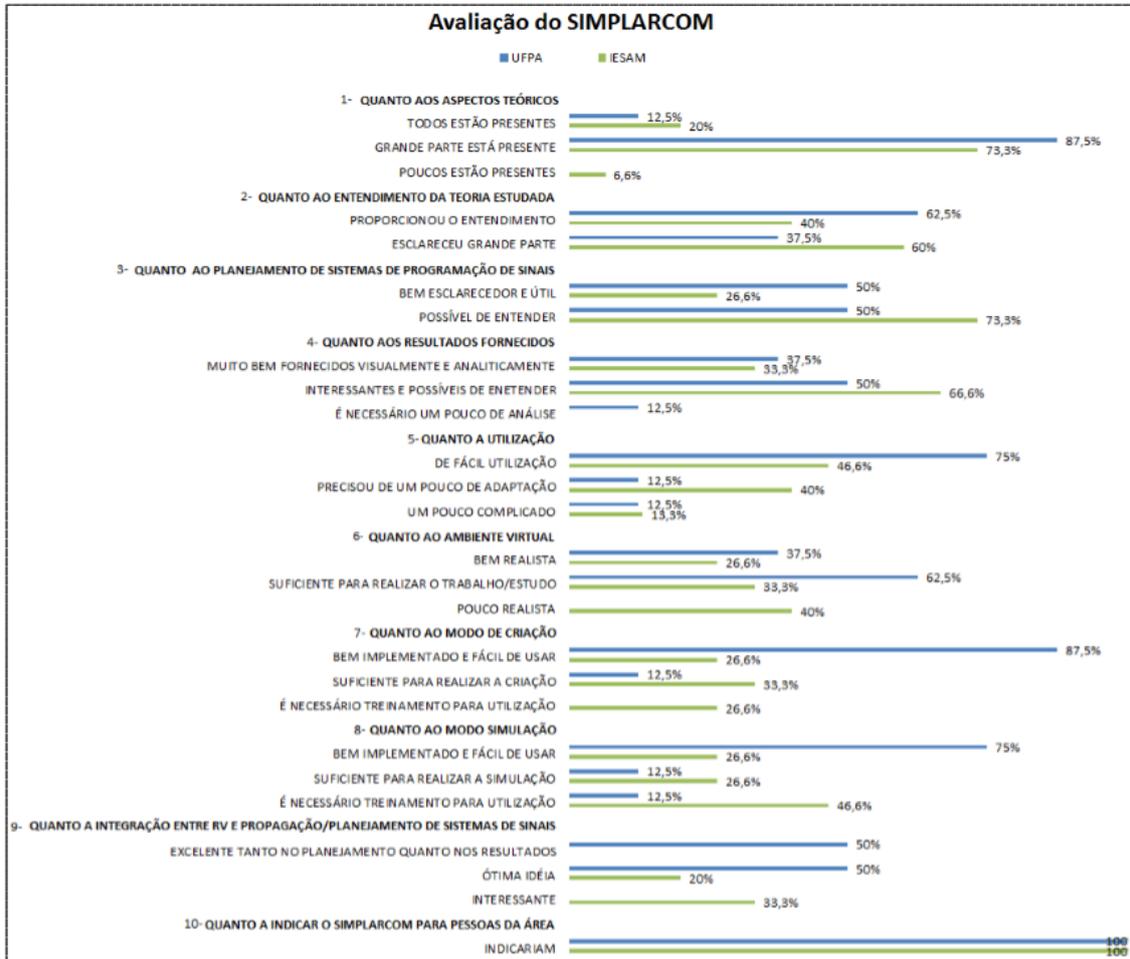


Figura 7. 1 – Avaliação didática SIMPLARCOM (PINHEIRO, 2014).

Conforme ocorre a evolução do projeto novas possibilidades vão sendo identificadas, o que torna possível o levantamento de novos requisitos que o projeto SIMPLARCOM irá atender e fornecer aos seus usuários. Como exemplos, temos:

- Melhorias na criação de cenários,
- Adição de *feedbacks* ao usuário
- Carregamento de diferentes tipos de formatos de arquivos de modelos 3D,
- Opção para adição, edição e remoção de modelo de propagação
- Carregamento de base de medições e geração do modelo de propagação equivalente,

- Simulação do cenário de propagação do ambiente virtual em rede de computadores.

7.1 Publicações Geradas

- Guerreiro. C, Pinheiro D.C., Brito J. Araújo J. Cavalcante G., **Módulo de Avaliação à Radiação Não Ionizante para uma Ferramenta com Ambiente Virtual 3D**, Sociedade Brasileira de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO) e pela Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo (SBMag) - MOMAG 2018 – INATEL, Santa Rita do Sapucaí – MG, 2018.
- Guerreiro. C, Araújo J., Cavalcante G. **3D Virtual Environment Tool for Non-Ionizing Radiation Evaluation**. International Conference on Alive Engineering Education (ICAEEd), Puerto Iguazú, Argentina. 2018.
- Guerreiro. C, Pinheiro D.C., Brito J. Araújo J. Cavalcante G., **Avaliação de Exposição à Radiação Não Ionizante Através de Um Módulo Desenvolvido para uma Ferramenta com Ambiente Virtual 3D**. XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBRT. Campina Grande-PB, 2018.

REFERÊNCIAS

ANATEL, A. N. D. T.-. Resolução nº 303 de julho de 2002, 2 Julho 2002. Disponível em: <<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/17-2002/128-resolucao-303>>. Acesso em: maio 2018.

ANATEL, A. N. E. T.-. Resolução da ANATEL de 1999, 15 julho 1999. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documento.asp?numeroPublicacao=12999&assuntoPublicacao=null&caminhoRel=null&filtro=1&documentoPath=biblioteca/publicacao/diretriz_radiacao.pdf>. Acesso em: novembro 2017.

BALANIS, A. **Teoria de Antenas: Análise e Síntese**. 3. ed. [S.l.]: LTC, v. 2, 2008. ISBN 978-8521616535.

BLENDER. **Blender Open Data - The beta release of the official Blender Benchmark is out**. Disponível em: <<https://www.blender.org/>>. Acesso em: junho 2017.

BRYSON, S. Virtual reality in scientific visualization. **Communications of the ACM**, New York, v. 39, p. 62-71, Maio 1996. ISSN 10.1145/229459.229467.

CASTRO, B. S. L. **Modelo de propagação para redes sem fio fixas na banda de 5,8 GHz em cidades típicas da região amazônica**. 45f. ed. Belém: Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, 2010.

CMAKE AMA (Ask Me Anything). Disponível em: <<https://cmake.org/>>. Acesso em: março 2017.

ELBERN, A. Radiações Não-Ionizantes: Conceitos, Riscos e Normas, 2003. Disponível em: <http://www.portaldoeletrodomestico.com.br/cursos/microondas/Radiacoes_ao_ionizantes.pdf>. Acesso em: 08/2018.

FERREIRA, J. **Antenas De Rádio Frequência para o VORSat**. [S.l.]: Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, 2012.

FERREIRA, C. **Antenas de Rádio Frenquência para o VORSat**. [S.l.]: Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2012.

MACHADO, L. D. S. Conceitos Básicos da Realidade Virtual. **Ministério da Ciência e Tecnologia, Instituto Nacioal de Pesquisas Espaciais**, São José dos Campos, Novembro 1995.

MOSELEY, H. **Medical Physics Handbooks 18: Non-ionising Radiation**. [S.l.]: Bristol: Adam Hilge, 1988.

NEGRÃO, N. M.. **SwImax**: um simulador em realidade virtual para auxiliar o ensino do padrão WiMAX. [S.l.]: 71 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2012.

OGRE. Disponível em: <<https://www.ogre3d.org/>>. Acesso em: maio 2018.

PINHEIRO, D. C. **SIMPLARCOM**: simulador para planejamento de redes de comunicação sem fio utilizando realidade virtual e modelos de propagação. 54 f. ed. Belém: Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2014. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2014.

PINHEIRO, D. C. et al. FERRAMENTA DE MODELAGEM DE PROPAGAÇÃO PARA AUXILIAR NO PROJETO DE REDES DE COMUNICAÇÕES SEM FIO. **XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia- COBENGE**, Gramado, 2013.

PRADO, G. V.; MANUEL, M. A. Y. Design and Implementation of a Non-ionizing Radiation Measuring System Evaluated with an Unmanned Aerial Vehicle. **Computer Aided System Engineering (APCASE), 2015 Asia-Pacific Conference on. IEEE**, Julho 2015. 52-57.

QT - Software development made smarter. Disponível em: <<https://www.qt.io/>>. Acesso em: junho 2018.

RODRIGUES, L. F. **Uma abordagem para monitoração, análise e controle de medições de radiação não ionizante**. [S.l.]: Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Informática. Curso de Ciência da Computação: Ênfase em Ciência da Computação: Bacharelado., 2016.

RODRIGUES, M. E. C. et al. Measurements of non-ionizing radiation on urban environment and preliminary assessment of relative contribution among different services. **International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)**, 28 outubro 2013.

SALLES, A. A. Riscos à Saúde Provocados pelos Telefones Celulares. **EGATEA, Revista da Escola de Engenharia**, Rio Grande do Sul, v. 1, p. 7-16, 1997.

TAVARES JÚNIOR, J. R.; CANDEIAS, A. L. B.; FRERY, A. C. O. MODELAGEM DE RÁDIO ENLACE: UMA ABORDAGEM USANDO REALIDADE VIRTUAL. **Revista Brasileira de Cartografia**, 2006.

TERADA, M. A.; MENEZES, L.; CARVALHO, P. Sistemas de telefonia celular: respondendo ao chamado da razão. **ACEL**, Universidade de Brasília – Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

TORTOISEHG. Disponível em: <<https://tortoisehg.bitbucket.io/>>. Acesso em: Março 2017.

UNITY 3D. Disponível em: <<http://www.unity3d.com>>. Acesso em: Outubro 2017.

VIEIRA, D. B. **Análise das radiações não ionizantes em antenas de provedor de serviços de internet**. [S.l.]: 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

WANDERLEY, P. H. S. **Análise da radiação não-ionizante emitida por estações rádio-base com perdas calculadas pelo modelo de Ikegami-Walfisch**. Brasília: Universidade de Brasília, v. 123 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), 2009.