



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
E DE COMPUTAÇÃO



Estratégia Aprimorada para Avaliações da Exposição a Campos Eletromagnéticos de Radiofrequência em Prédios Próximos à Infraestrutura de Telecomunicações

Ricardo Queiroz de Farias Henrique Silva

Orientador: Prof. Dr. Vicente A. de Sousa Jr.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFRN (área de concentração: Telecomunicações) como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Computação.

Número de Ordem do PPgEEC: M0693
Natal, RN, Julho de 2025

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Silva, Ricardo Queiroz de Farias Henrique.

Estratégia aprimorada para avaliações da exposição a campos eletromagnéticos de radiofrequência em prédios próximos à infraestrutura de telecomunicações / Ricardo Queiroz de Farias Henrique Silva. - 2025.

57 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2025.

Orientação: Prof. Dr. Vicente Angelo de Sousa Junior.

1. Radiação não ionizante - Dissertação. 2. Campos eletromagnéticos - Dissertação. 3. Medições - Dissertação. 4. Prédios - Dissertação. 5. Estações Rádio Base - Dissertação. 6. Redes Móveis. I. Sousa Junior, Vicente Angelo de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

Elaborado por Jackeline dos Santos Pinheiro da Silva Maia
Cavalcanti - CRB-15/317

*Para o Ricardo que outrora sonhou
em alcançar esse objetivo.*

Agradecimentos

Ao professor Vicente, meu orientador e amigo, sou grato pela orientação, pelo apoio constante na execução do trabalho, pelas oportunidades e conhecimentos compartilhados e, principalmente, pela paciência.

À minha família, Marcelo, Socorro e Gabriel, por entenderem minha ausência e por buscarem sempre estar ao meu lado, oferecendo apoio e motivando cada passo da minha caminhada.

A Daniel e Luciana, pelo apoio emocional, conselhos e incentivos ao longo de todos esses anos, eles foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

A todos a quem agradecidamente posso chamar de amigos, pela companhia de vida. Sem a presença de vocês, desenvolver esse trabalho teria sido um processo muito menos feliz.

Aos professores Márcio, Fred e Gutemberg, assim como à Marília, Leonardo e aos demais participantes do projeto de extensão de medições de RNI da UFRN, agradeço pelo enriquecimento do trabalho com suas contribuições e opiniões, como também pelo auxílio na execução deste.

Aos colegas do LANCE e do GppCom, agradeço profundamente pela parceria nas disciplinas e nas experiências compartilhadas, vocês foram essenciais para minha jornada nesse mestrado.

À ANATEL e ao engenheiro Halysson pela parceria e disponibilização dos equipamentos que viabilizaram as medições aqui apresentadas.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Resumo

Este estudo propõe complementar a atual metodologia das agências reguladoras para avaliação de exposição a Campos Eletromagnéticos de Radiofrequência (CEMRF) em prédios sob incidência direta de emissões de antenas de Estações Rádio Base (ERBs). A principal contribuição é o refinamento da seleção dos pontos de medição dentro dos prédios, garantindo que as avaliações capturem os níveis de exposição com mais precisão. A abordagem emprega critérios técnicos para selecionar prédios-alvo, considerando a localização das ERBs e a configuração das estruturas de antenas circunvizinhas. A abordagem proposta foi aplicada a medições em cinco prédios da cidade de Natal, capital do Rio Grande do Norte, localizada na região Nordeste do Brasil. Os resultados demonstraram picos de intensidade de campo elétrico até 30,53 vezes superiores e médias até 16,51 vezes maiores do que valores obtidos em medições realizadas no nível do solo, posição na qual as avaliações são tipicamente conduzidas. As maiores taxas de exposição atingiram 39,19% e 20,44% dos limites estabelecidos pela Comissão Internacional de Proteção contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP) para as faixas de frequência usadas em serviços de radiodifusão e na telefonia móvel, respectivamente. A abordagem proposta pode aprimorar e complementar as diretrizes normativas para avaliação da exposição a CEMRF, fornecendo avaliações mais representativas da exposição em ambientes internos de prédios próximos a infraestruturas modernas de telecomunicações.

Palavras-chave: Radiação Não Ionizante; Campos Eletromagnéticos; Medições; Ambiente Interno; Prédios, Estações Rádio Base, Redes Móveis.

Abstract

This study proposes to complement the current regulatory agencies' methodology for evaluating exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields (RF-EMF) in buildings under the direct incidence of emissions from Base Station (BS) antennas. The key contribution is the refinement of measurement point selection within buildings, ensuring that assessments more accurately capture exposure levels. The approach employs technical criteria for selecting target buildings, considering the location of the BSs and the configuration of the surrounding antenna structures. The proposed approach was applied to measurements in five buildings in Natal, the capital of Rio Grande do Norte, located in the Northeastern region of Brazil. The results show electric field intensity peaks up to 30.53 times higher and averages up to 16.51 times higher than values obtained from measurements conducted at ground level, the position where the evaluations are typically conducted. The highest exposure rates reached 39.19% and 20.44% of the limits established by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) for the frequency bands used in broadcasting services and mobile telephony, respectively. The proposed approach can improve and complement the normative guidelines for RF-EMF exposure assessment, providing more representative evaluations of exposure in indoor building environments near modern telecommunication infrastructure.

Keywords: Non-Ionizing Radiation; Electromagnetic Fields; Measurements; Indoor Environment; Buildings; Base Stations; Mobile Networks.

Sumário

Sumário	i
Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
1 Introdução	1
1.1 Escopo de Realização do Trabalho	2
1.2 Hipótese Científica e Objetivo Geral da Dissertação	3
1.3 Objetivos Específicos	3
1.4 Organização da Dissertação	4
2 Pesquisa Bibliográfica	5
2.1 Metodologia de Pesquisa da Bibliografia	5
2.2 Trabalhos Relacionados	6
2.3 Contribuições do Trabalho Proposto	9
3 Legislação sobre CEMRF e Metodologia de Referência	11
3.1 Legislação de Telecomunicações sobre CEMRF	11
3.2 Metodologia de Referência	12
3.2.1 Limites de Exposição	12
3.2.2 Métodos para Medição	14
3.2.3 Descrição do Equipamento de Medição	16
3.2.4 Determinação dos Locais de Medição	16
4 Abordagem Proposta	18
4.1 Seleção das ERBs-alvo	18
4.2 Seleção dos Prédios-alvo	18
4.3 Estimação dos Andares-alvo	19
4.4 Determinação das Fachadas-alvo	20
4.5 Determinação dos Pontos de Medição	21
5 Aplicação da Abordagem Proposta	22
6 Metodologia de Avaliação da Abordagem Proposta	27
6.1 Procedimento de Medição nos Prédios-alvo	27
6.1.1 Configuração do Arranjo de Medição	27

6.1.2	Posicionamento do Arranjo de Medição	27
6.1.3	Procedimentos Adicionais de Medição	29
6.1.4	Determinação do Limite de Exposição	29
6.2	Manual de Medição	30
6.3	Descrição das Campanhas de Medição	31
7	Resultados e Discussões	33
7.1	Medições de Exposição a CEMRF nos Prédios-alvo	33
7.2	Investigação do Ponto de Pior Exposição	34
7.3	Comparação com os Trabalhos Relacionados	37
8	Conclusão	39
8.1	Perspectivas de Continuidade do Trabalho	40
8.2	Produção Acadêmica	41
	Referências Bibliográficas	43

Lista de Figuras

Figura 1.1	Número de domicílios particulares permanentes do tipo apartamento nos anos 2000, 2010 e 2022.	2
Figura 1.2	Ilustração de situações de exposição avaliadas no objeto de estudo do trabalho.	4
Figura 2.1	Número acumulado de publicações entre os anos de 2005 e 2025. .	6
Figura 3.1	Ilustração do processo de coleta da média espacial nos locais onde há a excedência de 50% do limite de exposição.	15
Figura 4.1	Exemplos de diagramas de zona de interesse horizontal das ERBs.	19
Figura 4.2	Exemplo de seleção de prédios-alvo a partir de um diagrama de zonas de interesse horizontais de um sítio compartilhado.	19
Figura 4.3	Exemplo de estimação de andares-alvo.	20
Figura 4.4	Exemplo de categorização da fachada-alvo de um prédio.	21
Figura 4.5	Ilustração dos pontos de medição nos prédios-alvo.	21
Figura 5.1	Distribuição das ERBs de Natal em 2025.	22
Figura 5.2	Visualização das informações de uma ERB pela aplicação desenvolvida em Python.	23
Figura 5.3	Ilustração dos ângulos de meia potência verticais utilizados.	24
Figura 5.4	Exemplo de inserção de uma ERB instalada em infraestrutura dedicada na visualização do mapa 3D da cidade.	25
Figura 5.5	Exemplo de prédio sob incidência direta de uma emissão.	26
Figura 5.6	Distribuição dos prédios-alvo.	26
Figura 6.1	Narda NBM-520 e sonda EF 0691.	28
Figura 6.2	Posicionamento do arranjo de medição nos pontos de medição de cada prédio-alvo.	28
Figura 6.3	Fluxograma de execução da medição.	30
Figura 7.1	Comparação da intensidade de campo elétrico nos pontos P1 e P2 de cada prédio-alvo.	34
Figura 7.2	Situação do cenário de pior exposição (Prédio 5).	35
Figura 7.3	Arranjo de medição posicionado no 11º andar do prédio-alvo. . . .	36
Figura 7.4	Disposição da intensidade de campo elétrico nos andares com maiores valores registrados.	36

Lista de Tabelas

Tabela 2.1	Número de artigos por conjunto de palavras-chave.	5
Tabela 2.2	Resumo dos principais trabalhos sobre medições de CEMRF em prédios.	9
Tabela 3.1	Limites de exposição adotados pela ANATEL referentes a campo elétrico, campo magnético e densidade de potência incidente . . .	13
Tabela 3.2	Limites de exposição adotados pela ANATEL referentes à SAR. .	14
Tabela 5.1	Informações sobre o andar-alvo e a fachada-alvo dos prédios-alvo.	25
Tabela 6.1	Limites para as faixas de frequências de <i>downlink</i> utilizadas nas ERBs de Natal.	29
Tabela 6.2	Informações da ERB referente a cada prédio-alvo.	31
Tabela 6.3	Informações das medições realizadas.	32
Tabela 7.1	Resultados das medições de exposição a CEMRF conduzidas nos prédios-alvo.	33
Tabela 7.2	Faixas de frequências de <i>downlink</i> usadas nas ERBs-alvo.	34
Tabela 7.3	Resultados das medições nos andares adjacentes ao andar-alvo encontrado com a abordagem proposta e no nível do solo.	36
Tabela 7.4	Comparação dos valores de pico de intensidade de campo elétrico e de pico de densidade de fluxo de potência entre o presente trabalho e o estado da arte.	37

Capítulo 1

Introdução

A crescente demanda por capacidade nas tecnologias de comunicação móvel levou à adoção de frequências mais altas, reduzindo a área de cobertura das Estações Rádio Base (ERBs) [1]. Essa tendência é mais visível com a introdução da quinta geração de redes móveis (5G), que intensificou o uso do espectro de micro-ondas e possibilitou o emprego da faixa de frequência de ondas milimétricas [2]. Como resultado, altas taxas de transmissão são obtidas utilizando um maior número de células, aumentando a quantidade de fontes de Campos Eletromagnéticos de Radiofrequência (CEMRF).

A necessidade de maior capacidade de transmissão e de expansão da cobertura é acompanhada de uma limitação de espaço para implantação de torres dedicadas. Em cidades densamente verticalizadas, as ERBs são comumente instaladas em telhados de prédios, tomando proveito da localização e altura dessas estruturas. Como consequência, as antenas dessas ERBs são instaladas mais próximas dos andares mais altos de prédios vizinhos.

Concomitantemente, ao longo dos anos houve um aumento da verticalização das cidades em todas as regiões do Brasil, conforme mostra a Figura 1.1, na qual é apresentado o número de domicílios particulares permanentes do tipo apartamento, obtidos nos censos demográficos de 2000 [3], de 2010 [4] e de 2022 [5]. A região Nordeste, onde a cidade de Natal se localiza, teve um crescimento de quase três vezes nesse período.

Esse contexto reforça uma preocupação global acerca dos efeitos da exposição a CEMRF no corpo humano, evidenciada por fontes como [6] e por estudos como [7] e [8], que estabelecem revisões sistemáticas de pesquisas recentes sobre exposição a CEMRF, conduzidas globalmente e especificamente na Europa, respectivamente. Paralelamente, a Comissão Internacional de Proteção Contra Radiações Não Ionizantes, do inglês *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP), também integra essa discussão, estabelecendo diretrizes de avaliação e limites de exposição à Radiação Não Ionizante (RNI) [9], que inclui os CEMRF. Os documentos produzidos por essa comissão são usados na legislação das telecomunicações de diversos países, como o Brasil, no qual a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) fiscaliza o cumprimento dessas diretrizes.

Embora a legislação brasileira especifique procedimentos de medição e adote limites de exposição a CEMRF reconhecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS), nenhuma das diretrizes estabelecidas define uma abordagem específica para analisar a

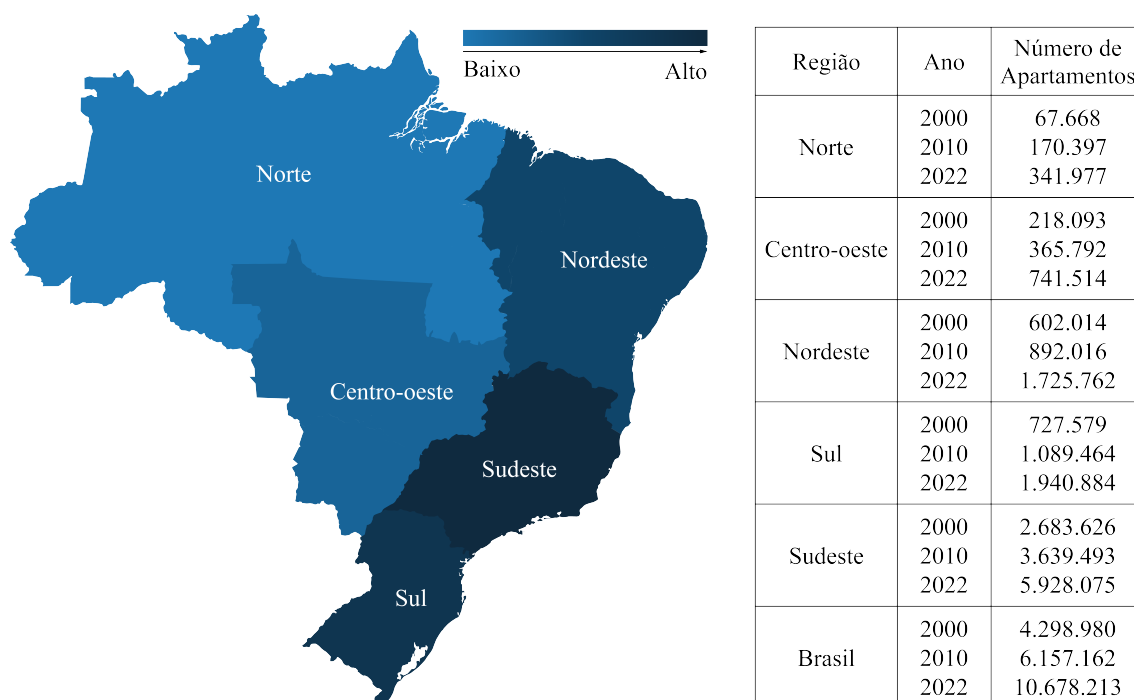


Figura 1.1: Número de domicílios particulares permanentes do tipo apartamento nos anos 2000 [3], 2010 [4] e 2022 [5].

exposição em prédios diretamente expostos a CEMRF emitidos por antenas de ERBs. É comum que as medições de exposição a CEMRF sejam realizadas no nível do solo por meio de *drive tests* [10, 11], desconsiderando o maior potencial de exposição nos apartamentos desses prédios. A possibilidade de aprimoramento dos procedimentos de medição predominantes enfatiza a necessidade de conduzir avaliações específicas para esse cenário.

1.1 Escopo de Realização do Trabalho

Este trabalho é fruto da integração científica entre professores, alunos de pós-graduação e alunos de graduação estagiários da ANATEL, consolidada por meio dos seguintes projetos de extensão:

- PJ388-2023: *Medições e Avaliação de Riscos à Exposição de Radiações Não Ionizantes à População: As Novas Gerações Tecnológicas e seus Impactos* (finalizado);
- PJ267-2024: *Medições e Avaliação de Riscos à Exposição de Radiações Não Ionizantes à População e de Cobertura/Qualidade de Serviços das Redes 5G* (finalizado);
- PJ263-2025: *Medições e Avaliação de Riscos à Exposição de Radiações Não Ionizantes à População, Desempenho e Qualidade de Serviços das Redes 5G*.

A equipe desses projetos realizou análises de riscos à saúde da população em geral, avaliando os índices de exposição à RNI em diferentes ambientes e com diferentes objetos de estudo. Dentre os trabalhos resultantes dos estudos conduzidos, ressalta-se:

- [12], que conduziu medições de RNI do sistema de antenas distribuídas e de Wi-Fi de um *shopping center*.
- [13], que fez uma avaliação da radiação emitida por pontos de acesso Wi-Fi e fornos micro-ondas em residências.
- [14], que realizou uma extensa campanha de medições em diversos contextos *outdoor* na cidade de Natal, no Nordeste brasileiro.
- [15], que investigou a situação de exposição à RNI ao longo de 24 horas, em quatro prédios a diferentes distâncias de um conjunto de estações de rádio FM, de TV e de telefonia celular.
- [16], que sugere uma metodologia para a seleção de prédios que estão sob incidência direta de antenas de ERBs, na qual o presente trabalho foi baseado.

1.2 Hipótese Científica e Objetivo Geral da Dissertação

As diretrizes estabelecidas pela ANATEL e pela ICNIRP são generalistas e contemplam cenários contemporâneos, como a implantação do 5G. No entanto, elas não especificam critérios detalhados para avaliação da exposição a CEMRF em cenários particulares, como em prédios sob incidência direta da radiação advinda de antenas de ERBs, cenário ilustrado na Figura 1.2. Deste modo, a hipótese científica deste trabalho é materializada na crença de que, por meio do estabelecimento de uma abordagem para a seleção de prédios sob essas circunstâncias, é possível obter resultados de avaliação de intensidade de campo elétrico mais próximos do pior caso de exposição. O objetivo geral desta dissertação é desenvolver uma abordagem que defina a localização de prédios-alvo e os critérios para a avaliação da intensidade de campo eletromagnético nessas residências verticais. Essa abordagem deve ser fundamentada nas diretrizes mais recentes estabelecidas pela ANATEL e pela ICNIRP, buscando aperfeiçoar seus métodos e auxiliar no planejamento de ações preventivas ou corretivas. Desta forma, a abordagem proposta neste trabalho contribui na discussão sobre os riscos potenciais da exposição a CEMRF à saúde humana.

1.3 Objetivos Específicos

Guiado pela hipótese científica, o objetivo geral desta dissertação de mestrado pode ser alcançado por meio dos seguintes objetivos específicos:

- Conceber uma abordagem para localizar prédios susceptíveis a uma maior exposição a CEMRF, considerando as características de radiação das antenas das ERBs circunvizinhas e a posição do prédio e de seus andares em relação ao local das emissões;

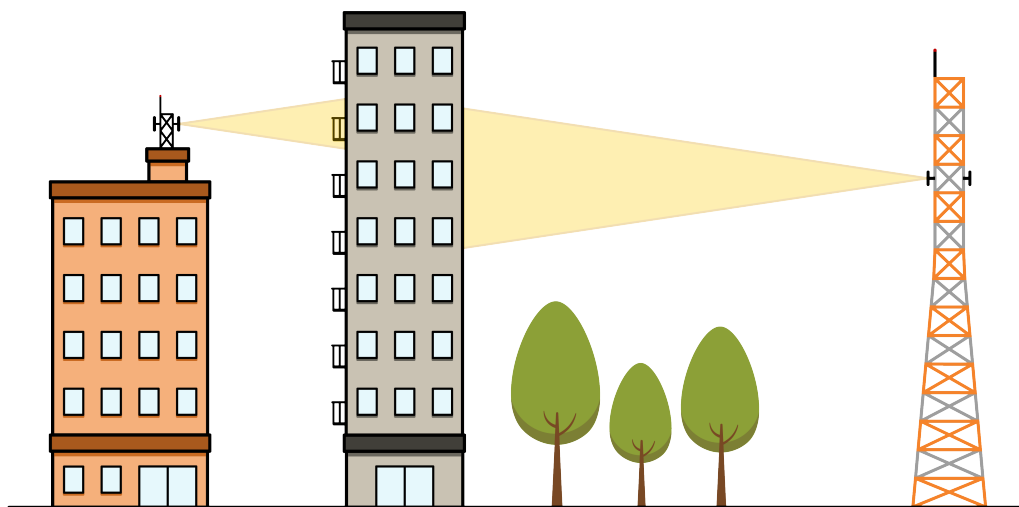


Figura 1.2: Ilustração de situações de exposição avaliadas no objeto de estudo do trabalho.

- Realizar a aplicação da abordagem proposta para listar os prédios da cidade de Natal que se enquadrem como objeto de estudo;
- Realizar medições no andar-alvo e no pavimento térreo dos prédios selecionados com a abordagem proposta, respeitando as diretrizes de medição definidas na legislação brasileira e pela ICNIRP;
- Comparar os níveis de exposição obtidos no andar-alvo e no nível do solo;
- Discutir se os níveis de exposição obtidos nas medições respeitam os limites estabelecidos na legislação brasileira;
- Documentar a abordagem proposta e discutir seus detalhes com a comunidade científica por meio de publicações e participação em congressos, recebendo opiniões e realizando os refinamentos sugeridos.

1.4 Organização da Dissertação

Este documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 2: analisa de forma quantitativa e qualitativa os trabalhos relacionados à avaliação de exposição a CEMRF em prédios;
- Capítulo 3: detalha a legislação brasileira de telecomunicações sobre CEMRF e descreve a metodologia de avaliação e os limites de exposição utilizados por essa;
- Capítulo 4: apresenta a abordagem proposta;
- Capítulo 5: descreve o cenário de avaliação e a aplicação da abordagem proposta;
- Capítulo 6: detalha as etapas seguidas para avaliar a abordagem proposta;
- Capítulo 7: expõe e discute os resultados obtidos a partir das medições realizadas;
- Capítulo 8: traz as conclusões obtidas e indica direções para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Pesquisa Bibliográfica

Pesquisadores do mundo todo e de diferentes áreas, como engenharia, biologia e medicina, se dedicam a investigar os impactos da exposição a CEMRF em diversos contextos. Este capítulo apresenta estudos relacionados ao tema desta dissertação.

2.1 Metodologia de Pesquisa da Bibliografia

Um levantamento utilizando diferentes conjuntos de palavras-chave foi realizado nas bases de dados Scopus e Web of Science (WoS) em abril de 2025. O escopo das pesquisas abrangeu trabalhos publicados entre os anos de 2005 e 2025, escritos em inglês, que possuíam palavras-chave consideradas relevantes em seu título, resumo e/ou palavras-chave.

A Tabela 2.1 aponta uma restrição no uso da denominação *Non-Ionizing Radiation* (NIR) em estudos de medição de radiação advinda de campos eletromagnéticos. Isto é evidenciado pela quantidade 9,41 vezes maior de produções científicas presentes no Conjunto 1 em comparação ao Conjunto 0, na base Scopus, e 5,51 vezes maior na base WoS. Por este motivo, seguiu-se com a pesquisa bibliográfica tomando como referência o Conjunto 1, que adota um jargão mais abrangente para radiação eletromagnética.

Tabela 2.1: Número de artigos por conjunto de palavras-chave.

Conjunto	Palavras-chave	Scopus	WoS
0	<i>Non-Ionizing AND Radiation AND Measurement</i>	701	537
1	<i>Electromagnetic AND Field AND Radiation AND Measurement</i>	6594	2958
2	Conjunto 1 <i>AND Exposure</i>	1356	660
3	Conjunto 2 <i>AND Stations</i>	292	233
4	Conjunto 3 <i>AND (Mobile OR Cellular)</i>	231	158

A pesquisa foi refinada com a adição da palavra-chave *Exposure* ao Conjunto 1, gerando o Conjunto 2. Para restringir ainda mais os trabalhos, adicionou-se a palavra-chave *Stations* ao Conjunto 2, gerando o Conjunto 3 e, em seguida, as palavras-chave *(Mobile OR Cellular)*, formando o Conjunto 4. Este último conjunto retornou majoritariamente trabalhos que conduziram avaliações da exposição a CEMRF

advindos de ERBs de telefonia celular. Notou-se que ao se adicionar mais palavras-chave, o quantitativo de trabalhos reduzia drasticamente, deixando trabalhos relevantes de fora da seleção. Desta forma, a lista de trabalhos relacionados a este trabalho (apresentado na Seção 2.2) foi definida a partir dos trabalhos retornados pelo Conjunto 4 na Scopus, base de dados com o maior número de produções encontradas.

A Figura 2.1 exibe o acumulado da quantidade de trabalhos no Conjunto 4 entre os anos de 2005 e 2025 e demonstra que o tema segue sendo alvo de investigação pela comunidade acadêmica.

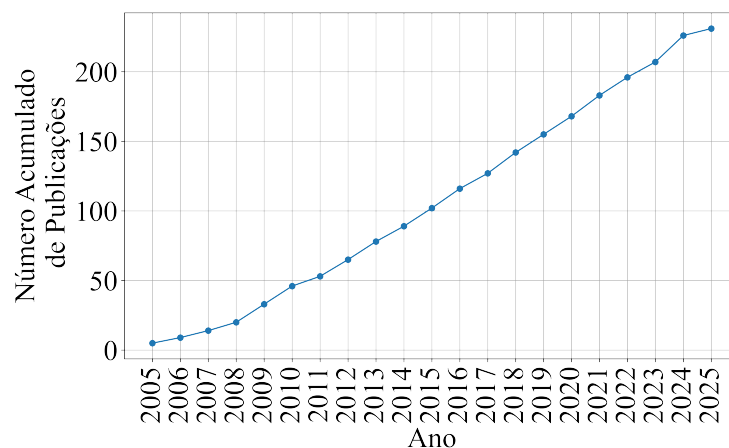


Figura 2.1: Número acumulado de publicações entre os anos de 2005 e 2025.

2.2 Trabalhos Relacionados

Esta seção apresenta os trabalhos identificados na pesquisa bibliográfica que abordam medições de exposição a CEMRF em prédios próximos a antenas de ERBs, seja como foco principal de investigação ou como parte de investigações mais abrangentes. Os trabalhos estão organizados em ordem cronológica pelo ano de publicação. Ao longo da seção, as tecnologias de comunicação móvel são referidas da seguinte maneira:

- Segunda geração (2G): *Global System for Mobile Communications* (GSM), *General Packet Radio Service* (GPRS) ou *Enhanced Data rates for GSM Evolution* (EDGE);
- Terceira geração (3G): *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) ou *Wide-Band Code-Division Multiple Access* (WCDMA);
- Quarta geração (4G): *Long Term Evolution* (LTE);
- Quinta geração (5G): *New Radio* (NR).

Em um estudo de 2007 [17] realizado na Alemanha, medições de emissões de radiofrequência foram usadas para caracterizar a exposição a CEMRF em mais de 1100 ambientes internos e externos, incluindo edifícios com mais de três andares. Além disso, o estudo estimou os índices de exposição por meio de cálculos baseados em dados técnicos de antenas e fatores de transmissão empíricos.

Em 2008, os autores de [18] investigaram a exposição a CEMRF em um prédio universitário próximo a uma estrutura com antenas de uma ERB direcionadas para ele. Duas campanhas de medições foram realizadas utilizando um analisador de espectro. A primeira focou em 20 locais ao redor das antenas, priorizando áreas com alta densidade de pessoas, como dormitórios, salas de aula, escritórios e espaços abertos. A segunda campanha concentrou-se em medições a diferentes distâncias ao longo do eixo horizontal.

O estudo [19], de 2009, desenvolveu um software para apoiar o planejamento e o monitoramento de instalação de ERBs em contextos urbanos, utilizando informações da infraestrutura de telecomunicações vigente e medições realizadas em Reggio Calabria, na Itália. As medições foram conduzidas em prédios dentro da região de máxima radiação das ERBs avaliadas e que possuem altura semelhante à das antenas das ERBs. Os resultados das medições foram comparados com previsões formuladas com o software desenvolvido, que consideram a presença de múltiplas fontes de CEMRF.

Posteriormente, em 2010, uma pesquisa realizada na Romênia [20] avaliou os níveis de exposição a CEMRF em prédios localizados a até 100 m de antenas de ERBs e em prédios com antenas instaladas em seus telhados. A intensidade de campo elétrico foi medida em salas, sacadas, pátios e coberturas dos prédios.

No estudo [21], de 2011, os autores realizaram medições em todos os andares de um prédio de cinco pavimentos, localizado em uma área universitária na Lituânia e diretamente exposto às antenas posicionadas em sua direção. As medições foram conduzidas durante uma hora, a uma distância de 0,5 m de uma janela de cada andar.

Em 2012, dois estudos foram publicados [22, 23] sobre o assunto explorado nesta dissertação. O primeiro [22] propôs um modelo para prever os níveis dos CEMRF emitidos por antenas de ERBs em um apartamento residencial com paredes de concreto e janelas de vidro, situado a 19 m de uma antena GSM operando na faixa de 900 MHz, posicionada a 5,7 m de altura em relação ao apartamento. O segundo estudo [23], dos mesmos autores de [21], avaliou quatro cenários diferentes de redes GSM:

1. Medições ao nível do solo nas proximidades e no telhado de um prédio com antenas instaladas no telhado;
2. Medições no telhado de prédios adjacentes a uma antena instalada no telhado de outro edifício;
3. Medições em um prédio situado sob a incidência direta do lóbulo principal de radiação de uma antena;
4. Medições ao nível do solo próximo a uma ERB instalada em área rural.

A metodologia adotada considerou as configurações de azimute, ângulo de meia potência (vertical e horizontal), altura e elevação das antenas. No terceiro cenário, foram avaliados os índices de exposição em todos os andares do prédio, incluindo salas com e sem janelas e sacadas.

Em 2013, um estudo realizado no Irã [24] demonstrou a correlação entre a altura da medição e o aumento da densidade de potência medida em uma ERB. As medições foram realizadas em alturas variando de 1,5 m a 16,5 m, utilizando um guindaste posicionado a 15 m de distância de três ERBs instaladas em telhados de prédios e de dez ERBs com

infraestrutura dedicada. A maior densidade de potência foi registrada em uma ERB localizada no telhado de um prédio, a 16,5 m de altura.

O trabalho [25], de 2014, validou um modelo tridimensional de propagação de ondas de rádio, chamado NISMap. Este modelo considera o ambiente geoespacial e a configuração das antenas para prever campos eletromagnéticos provenientes de ERBs em ambientes internos de cenários urbanos complexos. Os autores realizaram medições em 263 ambientes de 101 escolas e 30 residências em Amsterdã e compararam com as previsões obtidas com o modelo para os ambientes.

Em 2016, uma pesquisa na Turquia [26] avaliou a exposição a CEMRF em 92 escolas, realizando medições de campo elétrico em dois períodos distintos do ano, tanto em faixa estreita quanto em faixa larga. O maior valor de pico de intensidade de campo elétrico registrado no segundo período ocorreu em um prédio com linha de visada para uma ERB instalada no telhado de um prédio vizinho.

Em 2018, os autores do estudo [27] mediram a exposição a CEMRF em 46 locais diferentes do distrito de Atakum, na Turquia, utilizando medidores de faixa estreita e de faixa larga. Uma medição, conduzida ao longo de 24 horas, em um prédio em frente a uma ERB, apresentou os maiores valores de média e de pico de intensidade de campo elétrico.

Em 2021, uma pesquisa em Madri [28] explorou a correlação entre exposição a CEMRF e indicadores epidemiológicos em um bairro cercado por várias ERBs. Utilizando um analisador de espectro para medir os níveis de exposição a CEMRF em diferentes ambientes e aplicando questionários de saúde aos moradores, observou-se uma relação estatisticamente significativa (segundo os autores) entre a exposição e sintomas como dores de cabeça, tonturas, distúrbios do sono e uma taxa de câncer dez vezes superior à média nacional.

Neste mesmo ano, na França, foi avaliada a exposição a CEMRF em residências localizadas a até 250 m de ERBs em áreas urbanas [29], utilizando equipamentos de faixa larga e de faixa estreita. Também foram avaliados os índices de exposição aos quais voluntários estavam submetidos em suas atividades cotidianas ao longo de 48 horas e ao longo de uma semana, utilizando exposímetros pessoais portáteis.

Também em 2021, pesquisadores brasileiros [15] realizaram medições de exposição a CEMRF durante 24 horas no telhado de quatro prédios situados a até 300 m de um conjunto de estações de rádio FM, de TV e de telefonia móvel. O prédio mais próximo das estações apresentou o maior valor de média e de pico de intensidade de campo elétrico.

Na Suíça, um trabalho de 2021 [30] investigou a contribuição das antenas com *massive Multiple Input Multiple Output* (maMIMO) de redes 5G comerciais nos níveis de exposição a CEMRF. Medições em 22 pontos, sendo 20 deles no nível do solo e dois no telhado de prédios, todos com linha de visada para as antenas, revelaram níveis de intensidade de campo elétrico extremamente baixos quando não havia tráfego de *downlink*.

Em 2022, na Suécia, os autores de [31] realizaram medições em uma rua de Estocolmo com infraestrutura de telecomunicações posicionada a somente alguns metros do chão, direcionada para prédios do lado oposto da rua. As medições foram realizadas ao longo da rua, incluindo pontos próximos das fachadas externas dos prédios.

A utilização de drones equipados com exposímetros pessoais para avaliação de CEMRF foi explorada em 2023 [32]. As medições realizadas na parte externa e interna de um prédio, próximo a antenas de uma ERB no telhado de um prédio vizinho, mostraram que a comunicação sem fio do drone com o seu controle remoto interferiu nas medições da banda Wi-Fi de 2,4 GHz e a estrutura do drone impactou, de forma mensurável, as medidas das bandas de telefonia móvel. A visualização tridimensional do campo elétrico no entorno do prédio permitiu identificar áreas de maior exposição. O trabalho demonstrou os desafios que precisam ser enfrentados para medições precisas com drones.

No mesmo ano, um estudo na França [33] propôs um modelo estatístico para caracterizar a exposição *indoor* a CEMRF gerados por sinais de *downlink*. Medições realizadas em um prédio com três alas e três pavimentos, a menos de 320 m de duas ERBs, foram analisadas utilizando testes estatísticos e validação por *Leave-One-Out Cross-Validation* (LOOCV). Os resultados indicaram que a exposição pode ser modelada por uma distribuição gaussiana quando o tamanho do prédio é pequeno comparado à distância até a ERB.

Por fim, uma pesquisa de 2024 [34], conduzida na Grécia, analisou as etapas iniciais da implantação do 5G, avaliando sua contribuição para a exposição total a CEMRF em áreas urbanas e suburbanas. Medições nas proximidades de 117 ERBs, incluindo telhados de prédios e pontos no solo, revelaram que a contribuição do NR representava, em média, cerca de 6% da exposição total.

2.3 Contribuições do Trabalho Proposto

A Tabela 2.2 resume as características dos estudos analisados, destacando os aspectos comuns e as contribuições exclusivas desta dissertação.

Tabela 2.2: Resumo dos principais trabalhos sobre medições de CEMRF em prédios.

Referência	Gerações de Redes Móveis	Segue as Diretrizes da ICNIRP*	Avalia Vários Prédios	Considera os Parâmetros da ERB na Avaliação da Exposição	Compara Medições no Solo e no Andar-alvo
[17] 2007	2G e 3G	✗	✓	✗	✗
[18] 2008	2G e 3G	✓	✗	✗	✗
[19] 2009	2G e 3G	✗	✓	✓	✗
[20] 2010	2G e 3G	Parcialmente	✓	✗	✗
[21] 2011	2G	Parcialmente	✗	✓	✓
[22] 2012	2G	✓	✗	✓	✗
[23] 2012	2G	Parcialmente	✗ [§]	✓ [§]	✓ [§]
[24] 2013	Não Mencionado	✗	✓ [†]	✗	✓ [†]
[25] 2014	2G e 3G	✗	✓	✗	✗
[26] 2016	2G, 3G e 4G	✓	✓	✗	✗
[27] 2018	2G, 3G e 4G	✓	✓	✗	✗
[28] 2021	2G, 3G e 4G	✗	✓	✓	✓
[29] 2021	2G, 3G e 4G	✗	✓	✓	✗

[15] 2021	Não Mencionado	✓	✓	✗	✗
[30] 2021	5G	✓	✓	✗	✗
[31] 2022	2G, 3G e 4G	✗	✓	✗	✓ [‡]
[32] 2023	2G, 3G e 4G	✗	✗	✗	✓
[33] 2023	2G, 3G, 4G e 5G	Parcialmente	✗	✗	✓
[34] 2024	2G, 3G, 4G e 5G	✗	✓	✗	✓
Este Trabalho	2G, 3G, 4G e 5G	✓	✓	✓	✓

*Refere-se às diretrizes vigentes na data de publicação do trabalho.

§Refere-se ao Cenário 3 do estudo.

†As medições são conduzidas na altura de um andar-alvo com um guindaste.

‡O andar-alvo era no nível do solo.

A análise dos trabalhos apresentados evidenciou uma lacuna significativa na literatura quanto à adesão às diretrizes da ICNIRP. Embora alguns trabalhos apliquem as diretrizes para limites de exposição e tempo de medição em suas metodologias, a maioria dos estudos não segue as diretrizes da ICNIRP ou aplica somente um dos dois critérios citados.

Vários estudos, incluindo [19, 21–23, 28, 29], consideraram os parâmetros de configuração das ERBs na definição de suas metodologias de avaliação. Todavia, nenhum desses estudos descreve em detalhes como utilizar essas informações para reproduzir as avaliações. Além disso, em [28] e em [29], os parâmetros foram usados para identificar prédios nas zonas de exposição, mas as medições não foram realizadas em andares determinados pelo diagrama de radiação vertical das antenas. Ademais, os estudos [22] e [23] realizam medições em apenas um prédio. Isso indica a necessidade de uma abordagem capaz de identificar e avaliar os piores cenários de exposição a CEMRF em prédios, ao mesmo tempo em que permita investigar uma grande diversidade de configurações entre prédios-alvo e ERBs, de forma reprodutível.

Diante dessas lacunas, o presente trabalho contribui significativamente à literatura ao apresentar uma abordagem abrangente para avaliação de pior caso de exposição a CEMRF em prédios. Essa proposta considera diferentes configurações de infraestrutura de telecomunicações e características arquitetônicas dos prédios-alvo, permitindo uma maior aplicabilidade. Adicionalmente, são realizadas comparações entre os resultados obtidos no nível do solo e no andar-alvo, permitindo quantificar as diferenças entre os dois locais de medição.

Diante dessas lacunas, as principais contribuições deste trabalho para a literatura são:

- Abordagem para determinação o pior caso de exposição em prédios diretamente expostos a CEMRF;
- Viabilização de avaliações em larga escala, abrangendo cidades, estados e até países inteiros, limitando locais específicos para medição;
- Avaliação de todos os prédios de Natal utilizando a abordagem proposta;
- Novos resultados de exposição a CEMRF em habitações verticais;
- Discussões inéditas sobre as recomendações brasileiras e mundiais de exposição humana a CEMRF em prédios.

Capítulo 3

Legislação sobre CEMRF e Metodologia de Referência

A RNI abrange campos elétricos e magnéticos cuja intensidade normalmente não possui energia suficiente para produzir ionização na matéria, mas é capaz de elevar o estado de excitação de elétrons. Essa é caracterizada por possuir energia por fóton inferior a cerca de 12 eV e comprimento de onda superior a 100 nm (frequências inferiores a 3×10^{15} Hz) [35]. O espectro de radiofrequência, situado entre 30 kHz e 300 GHz, está contido nessa nomenclatura.

A ICNIRP é uma organização sem fins lucrativos reconhecida pela OMS que definiu diretrizes sobre a exposição a radiação advinda de CEMRF pela primeira vez em 1998 [35] e as atualizou em 2020 [9]. Essas diretrizes objetivam limitar a exposição a CEMRF, fornecendo um nível maior de proteção para as pessoas contra efeitos adversos à saúde decorrentes de exposições de curto e de longo prazo, de forma contínua e descontínua.

Tanto o conjunto de diretrizes de 1998 [35] quanto sua atualização [9] foram amplamente adotados por órgãos reguladores de diversos países ao longo dos anos. Outros padrões, como o IEEE C.95.1 [36] e o IEC 62232 [37], também são comumente empregados por órgãos reguladores. Consequentemente, as diretrizes definidas por estes órgãos são usadas como guia para a metodologia de diversos estudos.

3.1 Legislação de Telecomunicações sobre CEMRF

A exposição a CEMRF é regulamentada no Brasil por um conjunto de normas e legislações que visam proteger a saúde pública e ocupacional, garantindo o uso seguro das tecnologias que envolvem emissões eletromagnéticas. O arcabouço legal brasileiro sobre exposição a CEMRF inclui:

- Lei n.º 11.934/2009 [38]: define que os limites devem estar alinhados com as recomendações da OMS (como os estabelecidos pela ICNIRP). Determina que prestadoras de serviços de telecomunicações garantam a conformidade das emissões com os limites de exposição estabelecidos e designa a ANATEL como responsável pela fiscalização;

- Resolução n.º 700/2018 [39]: estabelece como a ANATEL deve conduzir a atividade de fiscalização do cumprimento da Lei n.º 11.934/2009 [38];
- Ato n.º 17865/2023 [40]: define os requisitos técnicos da avaliação (limites de exposição e metodologia) da exposição humana a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 8,3 kHz e 300 GHz;
- Lei n.º 13.116/2015 [41] (Lei Geral das Antenas): estabelece normas gerais para implantação e compartilhamento da infraestrutura de telecomunicações, garantindo conformidade com limites de exposição.

O principal documento sobre a avaliação de exposição a CEMRF no Brasil é o Ato n.º 17.865/2023 [40]. A seguir, são apresentados alguns artigos do Ato n.º 17865/2023 [40], especialmente os que se referem à população em geral, grupo alvo desse estudo de mestrado.

3.2 Metodologia de Referência

3.2.1 Limites de Exposição

Dois tipos de exposição são considerados na ICNIRP [9] e, consequentemente, no Ato n.º 17.865/2023 [40]: exposição ocupacional e exposição da população em geral. A primeira se refere a situações de exposição de trabalhadores, que têm consciência da situação de exposição e podem se proteger desta, enquanto a segunda está relacionada a pessoas que podem não estar cientes de sua exposição a CEMRF. Desta forma, são estabelecidos dois conjuntos de limites de exposição, sendo o referente à exposição da população geral mais rígido que o ocupacional. Quatro métricas são usadas no estabelecimento dos limites de exposição, sendo elas:

- Intensidade de Campo Elétrico - E (V/m) e de Campo Magnético — H (A/m): média de um conjunto de valores medidos das intensidades de campo em um local durante um determinado período;
- Densidade de Potência Incidente - S_{inc} (W/m^2): representa a densidade de fluxo de potência eletromagnética em uma determinada direção. Na região de campo distante, é equivalente à densidade de potência equivalente média (S_{eq});
- Taxa de Absorção Específica (TAR), do inglês *Specific Absorption Rate* (SAR) - (W/kg): descreve a taxa de potência absorvida por cada unidade de massa de tecido do corpo humano.

Os limites de exposição referentes à intensidade de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência incidente estão dispostos na Tabela 3.1, enquanto a Tabela 3.2 evidencia os limites referentes à SAR.

Considerando que medições de intensidade de campo elétrico (E) e magnético (H) nem sempre fornecem uma boa estimativa dos valores básicos de restrição para frequências acima de 2 GHz [42], a ICNIRP defende que, para a faixa de frequências compreendida entre 2 GHz e 300 GHz, as avaliações devem ser conduzidas utilizando a densidade de potência incidente, conforme mostrado na Tabela 3.1. O mesmo princípio é

Tabela 3.1: Limites de exposição adotados pela ANATEL referentes a campo elétrico, campo magnético e densidade de potência incidente [40].

Limites para Exposição Ocupacional			
Faixa de Radiofrequências	Intensidade de Campo Elétrico, E (V/m)	Intensidade de Campo Magnético, H (A/m)	Densidade de Potência Incidente, S_{inc} (W/m ²)
8,3 kHz a 100 kHz	170	80	Não Aplicável
0,1 MHz a 30 MHz	$660/f^{0,7}$	$4,9/f$	Não Aplicável
30 MHz a 400 MHz	61	0,16	10
400 MHz a 2000 MHz	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$f/40$
2 GHz a 300 GHz	Não Aplicável	Não Aplicável	50
Limites para Exposição da População em Geral			
Faixa de Radiofrequências	Intensidade de Campo Elétrico, E (V/m)	Intensidade de Campo Magnético, H (A/m)	Densidade de Potência Incidente, S_{inc} (W/m ²)
8,3 kHz a 100 kHz	83	21	Não Aplicável
0,1 MHz a 30 MHz	$300/f^{0,7}$	$2,2/f$	Não Aplicável
30 MHz a 400 MHz	27,7	0,073	2
400 MHz a 2000 MHz	$1,375f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$f/200$
2 GHz a 300 GHz	Não Aplicável	Não Aplicável	10

aplicado nos limites da Tabela 3.2 para as faixas de frequência acima de 6 GHz, visto que medidas de SAR podem subestimar a exposição superficial em frequências mais altas, adotando-se medições de densidade de potência para medições de frequências superiores a 6 GHz.

Tabela 3.2: Limites de exposição adotados pela ANATEL referentes à SAR [40].

Limites para Exposição Ocupacional					
Faixa de Radiofrequências	SAR Média do Corpo Inteiro (W/kg)	SAR Localizada [Cabeça e Tronco] (W/kg)	SAR Localizada [Membros] (W/kg)	S_{ab}^* Localizada [Sobre 4 cm ²] (W/m ²)	S_{ab}^* Localizada [Sobre 1 cm ²] (W/m ²)
100 kHz a 6 GHz	0,4	10	20	Não Aplicável	Não Aplicável
6 GHz a 30 GHz	0,4	Não Aplicável	Não Aplicável	100	Não Aplicável
30 GHz a 300 GHz	0,4	Não Aplicável	Não Aplicável	100	200
Limites para Exposição da População em Geral					
Faixa de Radiofrequências	SAR Média do Corpo Inteiro (W/kg)	SAR Localizada [Cabeça e Tronco] (W/kg)	SAR Localizada [Membros] (W/kg)	S_{ab}^* Localizada [Sobre 4 cm ²] (W/m ²)	S_{ab}^* Localizada [Sobre 1 cm ²] (W/m ²)
100 kHz a 6 GHz	0,08	2	4	Não Aplicável	Não Aplicável
6 GHz a 30 GHz	0,08	Não Aplicável	Não Aplicável	20	Não Aplicável
30 GHz a 300 GHz	0,08	Não Aplicável	Não Aplicável	20	40

* S_{ab} é a densidade de potência absorvida na área determinada.

No escopo do Ato n.º 17.865/2023 [40] também estão os critérios de avaliação nos quais os limites estabelecidos devem ser considerados:

- Para radiofrequências entre 100 kHz e 300 GHz, deve-se garantir que a média temporal atenda ao limite em qualquer período de 30 (trinta) minutos;
- Para as radiofrequências entre 30 MHz e 2 GHz, deve-se garantir que, na região de campo distante, qualquer um dos parâmetros (E, H ou S_{inc}) atendam aos limites;
- O valor de pico de campo elétrico ou magnético pode ser superior aos valores da Tabela 3.1, desde que o valor médio da intensidade de campo, em qualquer período de 30 (trinta) minutos, seja inferior;
- Em locais onde duas ou mais ERBs operem em radiofrequências distintas (sítios compartilhados), as estações devem atender individualmente e coletivamente aos limites estabelecidos. Neste caso, deve ser usado o limite de exposição mais rigoroso para o cenário, isto é, o menor dos valores dispostos na Tabela 3.1.

3.2.2 Métodos para Medição

O método para medir a exposição a CEMRF também é descrito em [40]:

- Na avaliação do atendimento aos valores de pico, deve ser determinado o valor máximo do campo elétrico ou magnético no local que está sendo avaliado;
- O processo de medição deve acontecer sem a presença de objetos absorvedores ou refletores de CEMRF e na ausência de indivíduos potencialmente expostos, a fim de não perturbar os valores medidos;

- Não se deve circular próximo à sonda isotrópica (ou antena) do equipamento ao coletar os dados, mantendo-se um distanciamento mínimo de 2 metros;
 - Não utilizar dispositivos portáteis de telecomunicações, como telefones celulares, próximos ao equipamento de medição durante a coleta dos dados;
 - As sondas (ou antenas) de medição devem ser instaladas em tripés não condutores, para não perturbar o campo eletromagnético em medição.
- Deve-se realizar uma caminhada ao redor do local avaliado, analisando as leituras instantâneas do medidor, a fim de estabelecer o ponto mais crítico (maiores níveis) para que nele seja feita a medição;
 - Quando o nível de pico do campo no ponto medido exceder 50% do limite em termos de intensidade de campo elétrico ou de campo magnético, deverá ser executada uma média de, pelo menos, três médias espaciais de varreduras verticais, medidas em pontos distantes de no mínimo 20 cm e no máximo 40 cm entre pontos adjacentes. O procedimento está ilustrado na Figura 3.1;
 - Para realização da média temporal em um único ponto, a sonda (ou antena) deve estar localizada, preferencialmente, na altura da máxima intensidade de campo, ou, alternativamente, a 1,70 m de altura;
 - Considera-se importante anotar a temperatura ambiente no momento da medição.

No procedimento ilustrado pela Figura 3.1, as médias M_1 , M_2 e M_3 devem ser conduzidas a 1,7 m, 1,5 m e 1,1 m de altura, respectivamente. Essas médias podem ser conduzidas ao longo de uma mesma linha vertical ou horizontalmente espaçadas, com distância mínima de 20 cm e máxima de 40 cm entre cada posição. Quando utilizadas medições de campo elétrico (E) ou magnético (H), a média espacial é dada pela raiz quadrada da soma do quadrado das médias, dividida pela quantidade de médias. Utilizando densidade de potência incidente (S), a média espacial se dá pela soma do quadrado das médias, dividida pela quantidade de médias.

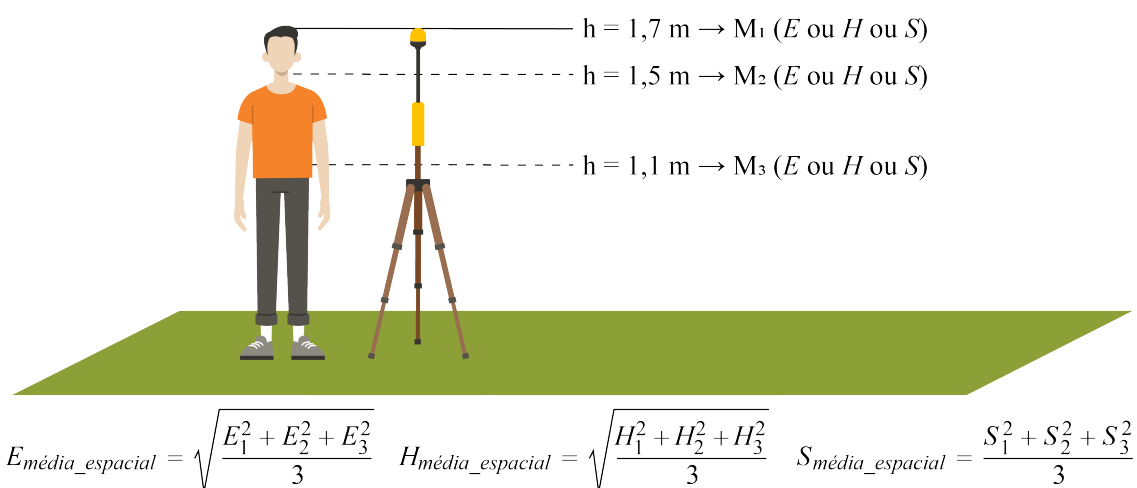


Figura 3.1: Ilustração do processo de coleta da média espacial nos locais onde há a excedência de 50% do limite de exposição. Adaptado de [40].

3.2.3 Descrição do Equipamento de Medição

Conforme estabelecido em [40], as medições podem ser realizadas utilizando equipamentos de faixa estreita ou de faixa larga, empregando sondas quasi-isotrópicas ou antenas direcionais, aplicando-se as seguintes diretrizes:

- Ao realizar medições com antenas direcionais, as componentes ortogonais dos campos devem ser medidas separadamente, para determinação do campo total resultante;
- Ao se almejar uma perspectiva geral em relação ao nível de exposição humana a CEMRF, deve ser empregado um equipamento faixa larga com sonda isotrópica;
- Devem ser priorizado os equipamentos que são do tipo RMS verdadeiro, do inglês *true Root Mean Square*, por fornecerem uma identificação mais precisa do nível do campo composto;
- Deve ser considerado o valor RMS das incertezas especificadas pelo fabricante do instrumento na demonstração do atendimento ao limite de exposição;
- Todas as medições devem ser efetuadas com equipamentos devidamente calibrados e que abrangem toda a faixa de radiofrequências de interesse.

3.2.4 Determinação dos Locais de Medição

Sobre os locais de medição, o Ato n.º 17.865/2023 [40] estabelece os seguintes critérios:

- A avaliação da exposição da população em geral a CEMRF deve ser realizada, no mínimo, nos pontos listados abaixo:
 - Um ponto no local de máxima exposição humana decorrente da emissão de CEMRF da estação transmissora de radiocomunicação sendo avaliada;
 - Três pontos na direção/azimute de máxima radiação de um ou mais dos sistemas radiantes, medidos a partir da base da estrutura de suporte: um ponto a uma distância inferior a 50 m, um ponto a uma distância entre 50 m e 150 m e outro entre 150 m e 500 m. Caso o ponto de máxima exposição ocorra em um dos pontos de medição previstos neste item, deve-se indicar esse fato no relatório, não sendo necessário repetir a medição realizada no item acima;
 - Um ponto em cada área crítica ou em área de grande circulação de pessoas, caso existam.
- A avaliação da exposição da população ocupacional a CEMRF deve ser realizada, no mínimo, nos pontos listados abaixo:
 - Um ponto no local de máxima exposição ocupacional decorrente das emissões de CEMRF da estação transmissora de radiocomunicação sendo avaliada;
 - Um ponto no qual os trabalhadores tendem a permanecer por mais tempo durante a execução de suas atividades.

Esta seção apresentou os aspectos do Ato n.º 17.865/2023 [40] que serviram de base para o desenvolvimento da abordagem proposta nesta dissertação. Conclui-se que

*CAPÍTULO 3. LEGISLAÇÃO SOBRE CEMRF E METODOLOGIA DE REFERÊNCIA*17

a hipótese de tese deste trabalho é fortalecida ao perceber que a legislação estabelece que a medição de exposição a CEMRF deve ser feita em “um ponto no local de máxima exposição humana decorrente da emissão de CEMRF da estação transmissora de radiocomunicação sendo avaliada”. Entretanto, mesmo sendo abrangente para situações contemporâneas, a legislação não especifica detalhes para a determinação de pontos com potencial de maior exposição em residências verticais, os quais são propostos no Capítulo 4.

Capítulo 4

Abordagem Proposta

Para atingir o objetivo do trabalho e validar a hipótese de dissertação apresentada na Seção 1.2, foi desenvolvida uma metodologia baseada em cinco passos, descritos nas seções a seguir.

4.1 Seleção das ERBs-alvo

Essa etapa concentra-se em identificar os prédios que atendem ao critério de pior cenário de exposição. O primeiro passo consiste em obter a localização geográfica das ERBs da região escolhida para o estudo e as informações de azimuth, ângulo de meia potência horizontal, ângulo de meia potência vertical, altura e elevação das antenas dessas ERBs. No Brasil, essas informações estão disponibilizadas publicamente para consulta e *download* na plataforma Mosaico da ANATEL [43].

Utilizando as informações baixadas de latitude e longitude das ERBs e uma ferramenta de visualização de ruas como o *Street View* do *software* Google Earth Pro¹, realiza-se uma inspeção visual de cada ERB para filtrar as que estão localizadas a até 100 m de prédios. Em seguida, aplica-se um filtro no *dataset* baixado para manter somente as ERBs que se enquadram no critério estabelecido.

4.2 Seleção dos Prédios-alvo

Conforme mostrado em um trabalho anterior [44], o azimuth e o ângulo de meia potência horizontal das antenas das ERBs filtradas são utilizados para criar diagramas que representam a direção de emissão de cada antena, chamados de zonas de interesse. Essas zonas correspondem às regiões onde se concentra a maior parte da potência radiada por cada antena no plano horizontal, destacadas em amarelo nas Figuras 4.1a e 4.1b. Em casos de sítios compartilhados, os diagramas das antenas de todas as ERBs do local são sobrepostos, resultando em uma única visualização, conforme ilustrado na Figura 4.1b.

Cada diagrama gerado é sobreposto a uma imagem aérea mostrando a localização do sítio da(s) sua(s) respectiva(s) ERB(s), com um raio de aproximadamente 100 m na escala da imagem. As imagens aéreas dos sítios podem ser obtidas usando o Google Earth Pro.

¹<https://www.google.com.br/earth/>

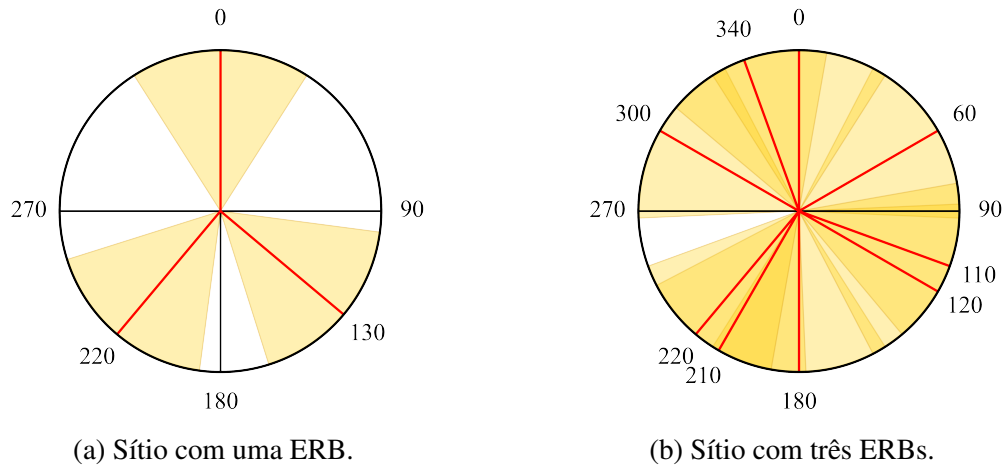


Figura 4.1: Exemplos de diagramas de zona de interesse horizontal das ERBs.

Cada prédio dentro das zonas de interesse horizontais da(s) ERB(s) é marcado com um indicador, conforme exemplificado na Figura 4.2. Nesta etapa, as ERBs sem prédios em suas zonas de interesse horizontais são descartadas do filtro estabelecido na Seção 4.1.

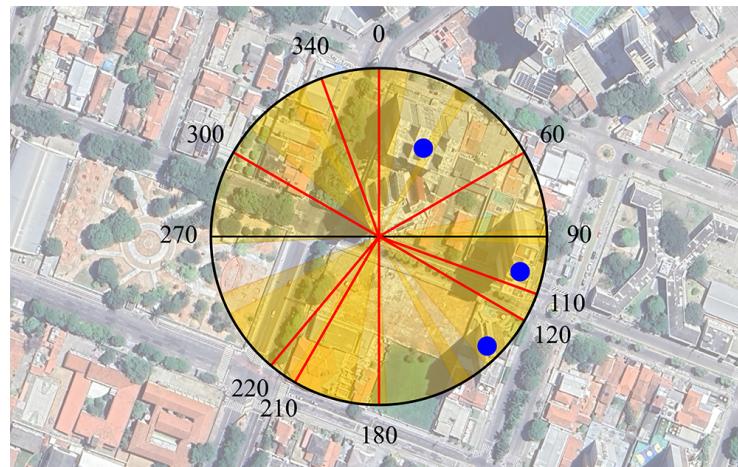


Figura 4.2: Exemplo de seleção de prédios-alvo a partir de um diagrama de zonas de interesse horizontais de um sítio compartilhado.

4.3 Estimação dos Andares-alvo

A elegibilidade de um prédio-alvo para o estudo se dá quando a emissão da antena de uma ERB incide sobre um de seus andares. Para essa análise, utilizam-se o ângulo de meia potência vertical, a elevação e a altura da antena, permitindo gerar uma visualização da direção de emissão de potência da antena no eixo vertical sobre o prédio-alvo, chamada de zona de interesse vertical. De forma análoga ao passo anterior, quando mais de uma

emissão incide sobre os andares do prédio, os diagramas de zonas de interesse verticais das antenas são sobrepostos, gerando uma única visualização.

Conforme exemplificado na Figura 4.3, os diagramas gerados são sobrepostos às visualizações 3D dos prédios, que podem ser obtidas com o Google *Earth Pro*, para estimar o(s) andar(es)-alvo(s). Para evitar distorções de perspectiva, as imagens devem ser obtidas sempre buscando que a altura de observação esteja nivelada com a altura da emissão.

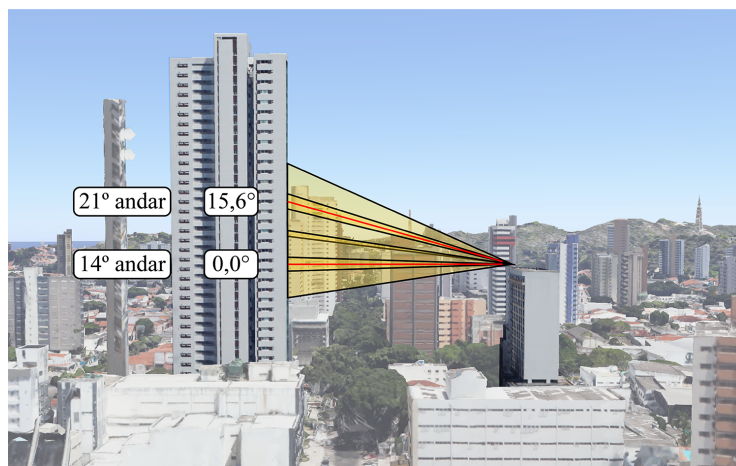


Figura 4.3: Exemplo de estimativa de andares-alvo.

O andar no centro da incidência da zona de interesse vertical possui maior prioridade para medição. Recomenda-se que as medições sejam conduzidas no andar-alvo central e em seus andares adjacentes, caso seja possível.

Em caso de obstrução parcial da zona de interesse vertical por um obstáculo, somente os andares acima do obstáculo são considerados aptos à medição. Quando o centro da zona de interesse vertical não incide sobre um andar do prédio-alvo, este deve ser descartado da lista de prédios-alvo.

4.4 Determinação das Fachadas-alvo

As medições devem ser feitas em uma fachada do prédio-alvo que recebe diretamente a emissão da ERB-alvo. Para padronizar a identificação das fachadas-alvo, elas são nomeadas segundo os pontos cardeais: Norte, Leste, Sul e Oeste. A classificação das fachadas é definida considerando o centro do prédio-alvo e adotando o Norte geográfico como referência. No exemplo da Figura 4.4, a fachada do prédio-alvo onde as medições devem ocorrer é a Oeste.

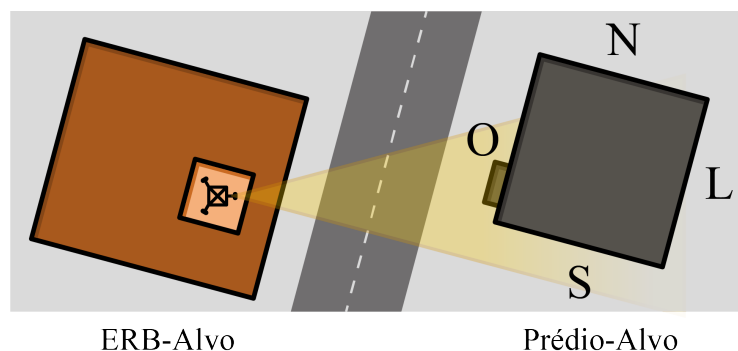


Figura 4.4: Exemplo de categorização da fachada-alvo de um prédio.

4.5 Determinação dos Pontos de Medição

Para garantir uma metodologia de medição reproduzível em múltiplos prédios, os pontos de medição devem ser escolhidos de forma que sejam equivalentes entre os prédios, independentemente do projeto ou estilo arquitetônico. A Figura 4.5 exibe os pontos de medição definidos, descritos a seguir:

- Ponto P1: refere-se a uma janela ou sacada presente na fachada-alvo, na altura do andar-alvo;
- Ponto P2: local no nível do solo, voltado para a mesma direção da fachada-alvo onde o ponto P1 foi estabelecido. Nesse caso, priorizam-se locais ao ar livre e com alto movimento de pessoas.

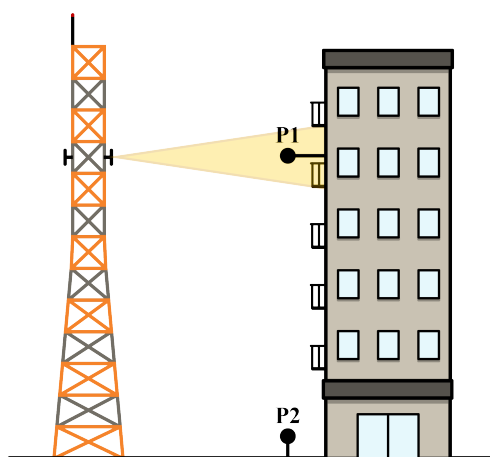


Figura 4.5: Ilustração dos pontos de medição nos prédios-alvo.

Capítulo 5

Aplicação da Abordagem Proposta

O estudo foi conduzido na cidade de Natal, capital do Rio Grande do Norte, estado do nordeste brasileiro. O censo demográfico de 2022 [5] aponta uma população de 751 mil habitantes, distribuídos pela cidade com uma densidade demográfica de 4488 habitantes por quilômetro quadrado. Natal possui aproximadamente 59 mil domicílios particulares permanentes do tipo apartamento, representando 21,81% do total de domicílios [5]. Em fevereiro de 2025, a cidade possuía um total de 560 ERBs, de quatro operadoras distintas, distribuídas conforme mostrado na Figura 5.1.

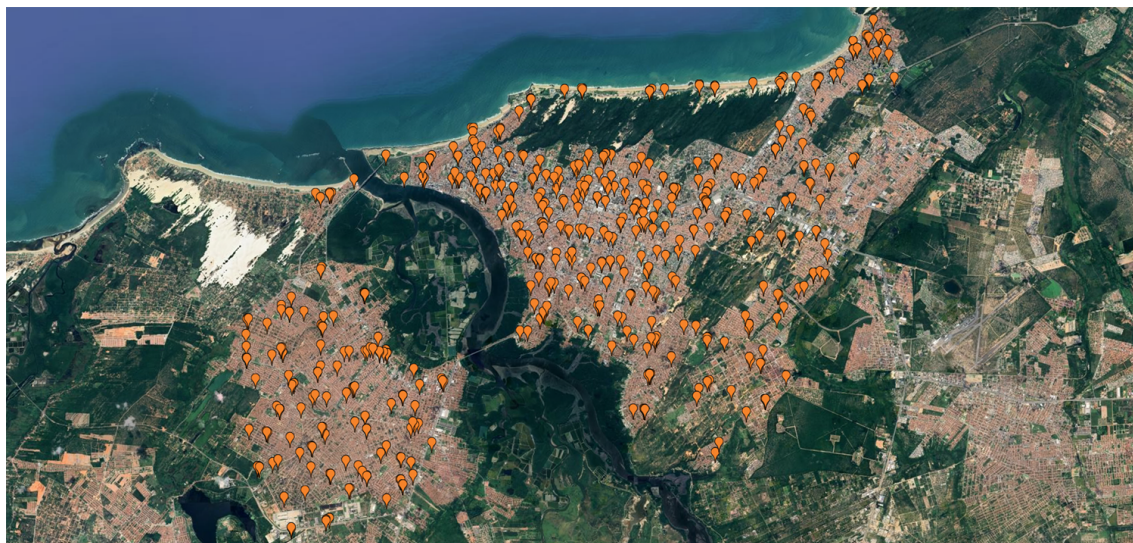


Figura 5.1: Distribuição das ERBs de Natal em 2025.

Os dados das ERBs de Natal foram obtidos na plataforma Mosaico da ANATEL [43] em abril de 2024. O *dataset* baixado foi filtrado por estado (Rio Grande do Norte), por município (Natal) e por código do serviço (10 - Telefonia Celular). As emissões com data de validade vencida foram removidas do *dataset*, filtrando os valores da coluna *DataValidade* que se referiam a anos anteriores a 2024. Como resultado, obteve-se um *dataset* contendo 6925 linhas.

Cada linha do *dataset* se refere a emissão de uma ERB, de modo que uma única ERB pode ter várias linhas de informações. Como as estações possuem um número

de identificação único, aplicou-se um filtro de valores únicos na coluna *NumEstacao*, obtendo-se 405 ERBs únicas no município do Natal.

Para encontrar as ERBs que atendessem ao critério de proximidade de 100 m, utilizou-se uma aplicação em Python, baseada na biblioteca *folium*, para desenhar um raio de 100 m ao redor da geolocalização de cada ERB, utilizando os dados do *dataset* baixado, conforme mostrado na Figura 5.2. O Google *Street View* foi utilizado para validar a seleção efetuada com a aplicação, buscando averiguar e catalogar o real endereço de cada sítio, para obter as imagens aéreas da região com o Google *Earth Pro*. Nessa etapa, também corrigiu-se dados incoerentes e criou-se um filtro no *dataset* contendo as ERBs selecionadas.

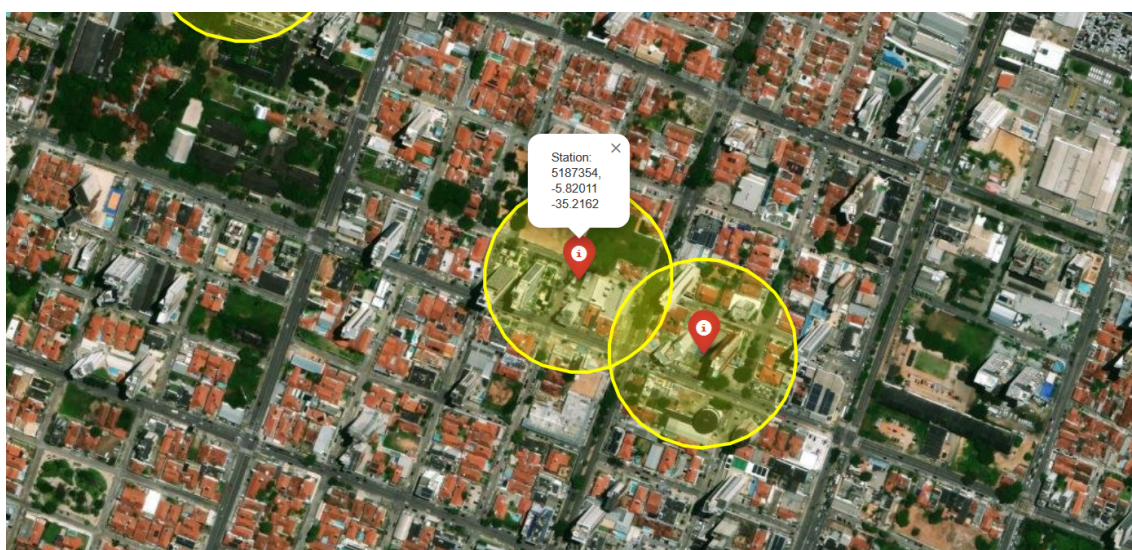


Figura 5.2: Visualização das informações de uma ERB pela aplicação desenvolvida em Python.

Agrupou-se os dados das ERBs que possuem a mesma referência geográfica (infraestrutura compartilhada) e gerou-se o diagrama das zonas de interesse horizontais dos sítios selecionados anteriormente. Este processo foi automatizado por meio de uma aplicação desenvolvida em Python, que gera um gráfico polar contendo as indicações de azimutes e de abertura de meia potência horizontal para cada azimute do sítio. Uma vez que cada emissão possui um conjunto de dados próprio, podem existir vários valores de ângulo de meia potência horizontal para um mesmo azimute. Sendo assim, o diagrama gerado pela aplicação exibe somente o menor ângulo de meia potência horizontal não nulo de cada azimute, buscando visualizar a menor zona de interesse horizontal do sítio (pior cenário).

Os diagramas foram sobrepostos às imagens aéreas da região de cada sítio. Desconsiderou-se os sítios que não possuíam prédios dentro de suas zonas de interesse horizontal. Esse procedimento resultou na seleção de 41 sítios, referentes a 47 ERBs, uma vez que algumas ERBs compartilham a infraestrutura. Dentre os sítios, 27 são instalações em telhados de prédios e 14 são instalações em mastros dedicados. Foram selecionados 68 prédios a partir dos diagramas de zona de interesse horizontal dos sítios.

O ângulo de meia potência vertical das antenas não está disponível diretamente no *dataset* da ANATEL. O *dataset* dispõe de uma coluna com o número de homologação da antena utilizada para a emissão. Geralmente, esse número se refere a mais de um modelo de antena, inviabilizando a determinação de qual modelo está especificamente sendo usado para cada emissão e, por consequência, de um ângulo de meia potência vertical.

Para contornar essa lacuna, obteve-se os *datasheets* de todos os modelos de antenas indicados pelos códigos de homologação das 47 ERBs filtradas nas etapas anteriores. Para as análises, utilizou-se os ângulos de meia potência vertical máximo ($17,5^\circ$) e mínimo ($3,7^\circ$) encontrados nos *datasheets*. Os ângulos adotados estão ilustrados na Figura 5.3.

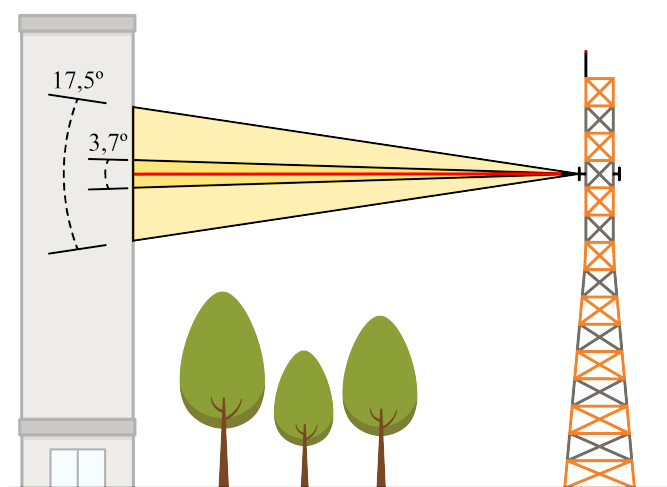


Figura 5.3: Ilustração dos ângulos de meia potência verticais utilizados.

Tomando como base esses ângulos, desenvolveu-se uma aplicação em Python que faz um diagrama com o ângulo de meia potência vertical mínimo e máximo para cada combinação única de azimuth e de ângulo de elevação da(s) ERB(s) dos sítios. Os diagramas de zona de interesse vertical foram gerados e sobrepostos às imagens do mapa 3D de Natal.

O mapa 3D da cidade de Natal disponível no Google *Earth Pro* data do ano de 2013, de forma que alguns prédios analisados ainda não haviam sido construídos. Nesses casos, realizou-se a contagem dos andares do prédio-alvo e a medição de sua altura utilizando o Google *Earth Pro*. Como a altura fornecida pelo Google *Earth* considera o nível do mar, é necessário subtrair desse valor a elevação do terreno na rua onde o prédio-alvo está localizado, obtendo-se a altura relativa ao prédio.

Para representar o prédio-alvo, um objeto com uma altura proporcional à altura medida foi inserido na posição apropriada na imagem do mapa 3D. O mesmo procedimento foi utilizado para ERBs instaladas em infraestruturas dedicadas, como mastros, visto que o mapeamento 3D não as inclui. Utilizando as informações de altura da antena da plataforma da ANATEL [43], um objeto representando a estrutura da ERB foi inserido na visualização do mapa 3D e ajustado às suas proporções, com base nas medidas do prédio-alvo obtidas com o Google *Earth Pro*. O resultado desse processo é exemplificado na Figura 5.4.

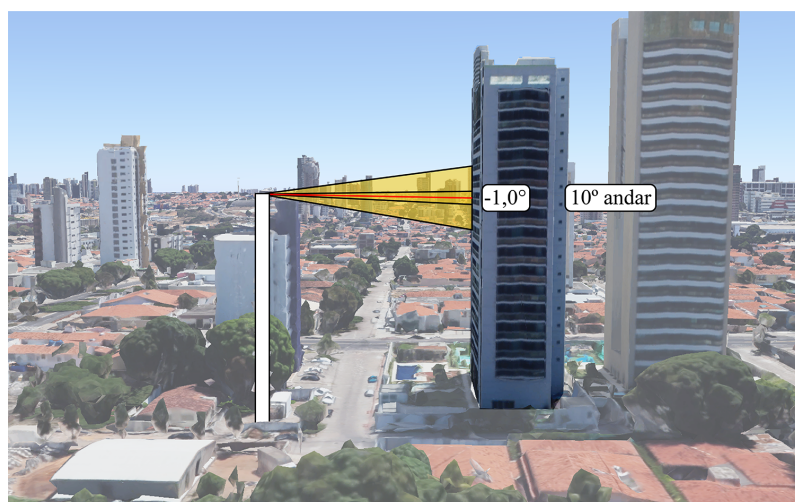


Figura 5.4: Exemplo de inserção de uma ERB instalada em infraestrutura dedicada na visualização do mapa 3D da cidade.

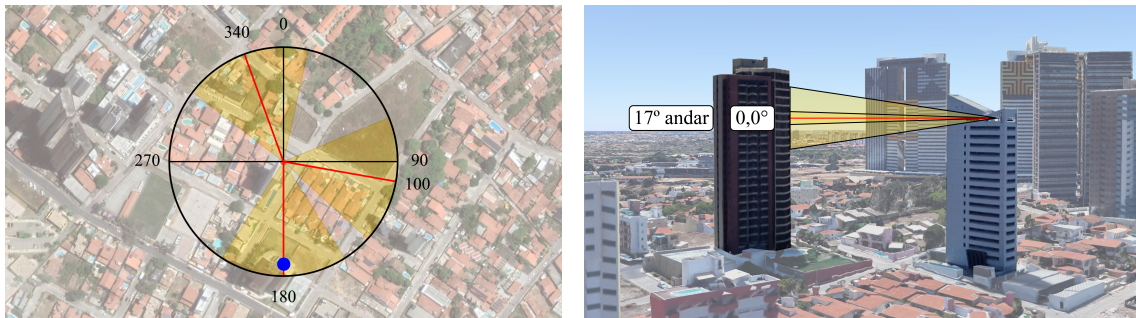
Após as análises serem feitas para os ângulos de meia potência vertical máximo e mínimo, 22 prédios, dos 68 selecionados anteriormente, se enquadraram nos critérios da abordagem proposta, conforme detalhado na Tabela 5.1. Sete dos prédios selecionados estão localizados no centro do ângulo de meia potência horizontal e possuem um andar no centro do ângulo de meia potência vertical, conforme exemplificado na Figura 5.5, sendo esses os cenários mais críticos.

Tabela 5.1: Informações sobre o andar-alvo e a fachada-alvo dos prédios-alvo.

Prédio-alvo	Andar(es)-alvo (3,7°)	Andar(es)-alvo (17,5°)	Fachada(s)-alvo
Prédio 1	Cobertura	12° e Cobertura	Norte
Prédio 2	17° ao 19°	15° ao 19°	Norte e Oeste
Prédio 3	13°	11° ao 15°	Sul
Prédio 4	10°	9° ao 11°	Leste
Prédio 5*	11°	9° ao 13°	Oeste
Prédio 6	4° ao 6°	4° ao 8°	Norte
Prédio 7	13°	10° ao 13°	Sul e Norte
Prédio 8*	17°	14° ao 22°	Norte
Prédio 9*	23° e 25°	22° ao 25°	Sul
Prédio 10	21°, 22° e 24°	20° ao 25°	Norte e Leste
Prédio 11*	16° ao 19°	13° ao 20°	Oeste
Prédio 12*	17°	14° ao 20°	Norte e Oeste
Prédio 13	14° e 22°	10° ao 25°	Sul
Prédio 14	Cobertura	15° e 16°	Norte e Leste
Prédio 15	17°	13° ao 19°	Norte
Prédio 16	6°	2° ao 8°	Oeste
Prédio 17	13°	12° ao 14°	Norte
Prédio 18	7°	4° ao 10°	Sul

Prédio 19	7° e 11°	4° ao 14°	Leste
Prédio 20	11° e 12°	8° ao 14°	Leste e Sul
Prédio 21	9°	8° ao 11°	Norte e Leste
Prédio 22*	9° e 10°	5° ao 14°	Leste

*Caso crítico.



(a) Prédio situado no centro do ângulo de meia potência horizontal de um azimuth. (b) Andar situado no centro do ângulo de meia potência vertical de um azimuth.

Figura 5.5: Exemplo de prédio sob incidência direta de uma emissão.

A Figura 5.6 exibe a distribuição dos prédios na cidade de Natal, com uma concentração maior de prédios no bairro de Tirol. Os objetos de estudo foram encontrados somente nas regiões Leste e Sul da cidade. Isto se dá pelos bairros das demais regiões serem menos verticalizados.



Figura 5.6: Distribuição dos prédios-alvo.

A fim de garantir a reprodutibilidade do estudo, as aplicações desenvolvidas foram disponibilizadas em um repositório do Github², contendo descrições mais detalhadas e as instruções de uso de cada uma delas.

²<https://github.com/ricardoqueirozz/nir-measurement-methodology>.

Capítulo 6

Metodologia de Avaliação da Abordagem Proposta

Este capítulo descreve os métodos empregados nas medições conduzidas nos prédios-alvo identificados por meio da abordagem proposta, com o objetivo de validar sua hipótese motivadora utilizando os resultados obtidos.

6.1 Procedimento de Medição nos Prédios-alvo

O procedimento de medição proposto segue as diretrizes definidas pela legislação brasileira, especialmente as do Ato n.º 17865/2023 [40], que se baseia nas recomendações da ICNIRP de 2020 [9].

6.1.1 Configuração do Arranjo de Medição

Segundo [40], medições de exposição a CEMRF podem ser realizadas com equipamentos de faixa estreita ou de faixa larga. Para esse estudo, adotou-se o medidor de campo de faixa larga Narda NBM-520 [45], em associação à sonda de campo elétrico EF 0691 [46], mostrados na Figura 6.1. Com tal arranjo, é possível medir valores RMS de campos elétricos na faixa de frequência de 100 kHz à 6 GHz, por meio de rotinas de medição cíclicas, que varrem toda essa faixa de frequência por um dado período. Também foi utilizado um tripé de madeira para garantir a estabilidade do conjunto em seu posicionamento nos pontos de medição e minimizar perturbações nas medições.

Todos os equipamentos citados foram disponibilizados pela ANATEL para a realização das campanhas de medição. As campanhas de medição fizeram parte do plano de trabalho de estagiários da ANATEL, que acompanharam todas as medições realizadas. O conjunto de medidor e sonda esteve sob validade de calibração durante todo o período de execução das medições.

6.1.2 Posicionamento do Arranjo de Medição

O arranjo de medição, que compreende o tripé de madeira, o NBM-520 e a sua sonda, foi posicionado de forma que a sonda ficou afastada em 2 m de superfícies refletoras



Figura 6.1: Narda NBM-520 e sonda EF 0691 [45, 46].

e/ou absorvedoras de ondas eletromagnéticas e de pessoas. Além disso, a sonda foi posicionada a 1,7 m de altura, conforme determinado em [40]. A Figura 6.2 exibe o posicionamento do arranjo de medição nos pontos P1 e P2 de cada prédio-alvo durante sua respectiva campanha de medição.



Figura 6.2: Posicionamento do arranjo de medição nos pontos de medição de cada prédio-alvo.

Antes do arranjo de medição ser posicionado nos pontos de medição P1, foi feita uma varredura de intensidade de campo elétrico nos cômodos com janela ou sacada na fachada-alvo, visando identificar o local de maior exposição e, então, posicionar o arranjo de medição neste local.

6.1.3 Procedimentos Adicionais de Medição

Conforme sugerido em [40], a temperatura no momento da medição foi registrada. Para isso, foi utilizada a ferramenta de clima do Google, que fornece a temperatura obtida na estação atmosférica mais próxima da localização do usuário.

Para cumprir a condição de não perturbação nas medições, a equipe de medição manteve os celulares em modo avião durante todo o processo de medição. Pelo mesmo motivo, nos pontos de medição P1 com ponto de acesso Wi-Fi no mesmo ambiente, foi solicitado que o ponto de acesso fosse desligado durante o período de medição.

Uma média temporal de 30 minutos da intensidade de campo elétrico foi coletada em cada ponto de medição, respeitando o critério estabelecido em [40].

6.1.4 Determinação do Limite de Exposição

O arranjo de medição empregado possibilita somente medições em faixa larga, implicando que todas as frequências dentro da faixa de 100 kHz a 6 GHz são aferidas a cada ciclo de medição do Narda NBM-520. Segundo [40], quando se utiliza equipamento de medição de faixa larga, o atendimento ao limite de exposição simultânea a campos de múltiplas radiofrequências é garantido quando a avaliação não exceder o limite de exposição mais rigoroso para a faixa avaliada. Desta forma, as conclusões do trabalho foram obtidas utilizando o limite de 27,70 V/m, referente a faixa de 88 MHz a 108 MHz dos serviços de radiodifusão funcionando em Natal.

Considerando que a contribuição dos serviços de radiodifusão para o panorama total da exposição pode ser pequena e buscando também analisar o atendimento ao limite de exposição para a faixa de radiofrequências utilizadas pelas operadoras de telefonia móvel na região do estudo, utilizou-se as informações da plataforma da ANATEL [43] para calcular os limites de exposição de cada faixa de frequência desse tipo de serviço. A Tabela 6.1 exibe as informações sobre as frequências e tecnologias servidas pelas operadoras, bem como seu respectivo limite de exposição.

Tabela 6.1: Limites para as faixas de frequências de *downlink* utilizadas nas ERBs de Natal. [43].

Faixa de Frequência (MHz)	Banda do 3GPP	Tecnologia(s) da Rede	Limite (V/m) [40]
778 a 803	n28	LTE e NR	38,35
874,5 a 894	n5	WCDMA	40,66
944,75 a 957,5	n8	GSM	42,26
1812,5 a 1880	n3	GSM e LTE	58,54
2117,5 a 2167,5	n1	WCDMA, LTE e NR	Não Aplicável
2325 a 2370	n40	LTE e NR	Não Aplicável
2625 a 2690	n7	LTE	Não Aplicável
3350 a 3550	n78	NR	Não Aplicável

Aplicando o valor de frequência de 778 MHz na equação da Tabela 3.1 encontra-se um limite de exposição de 38,35 V/m, para radiofrequências na faixa de 400 MHz

a 2000 MHz, sendo esse o limite mais rigoroso para o conjunto de radiofrequências da Tabela 6.1. As análises do Capítulo 7 baseadas nesse limite têm apenas efeito informacional, vide a exigência de se utilizar o limite mais restritivo para o cenário avaliado quando utilizados equipamentos de medição de faixa larga.

6.2 Manual de Medição

Foi produzido um documento com instruções para a execução das medições, com o intuito de garantir a reprodutibilidade da metodologia. As instruções do manual foram sumarizadas no fluxograma da Figura 6.3 e estão descritas no seguinte passo a passo:

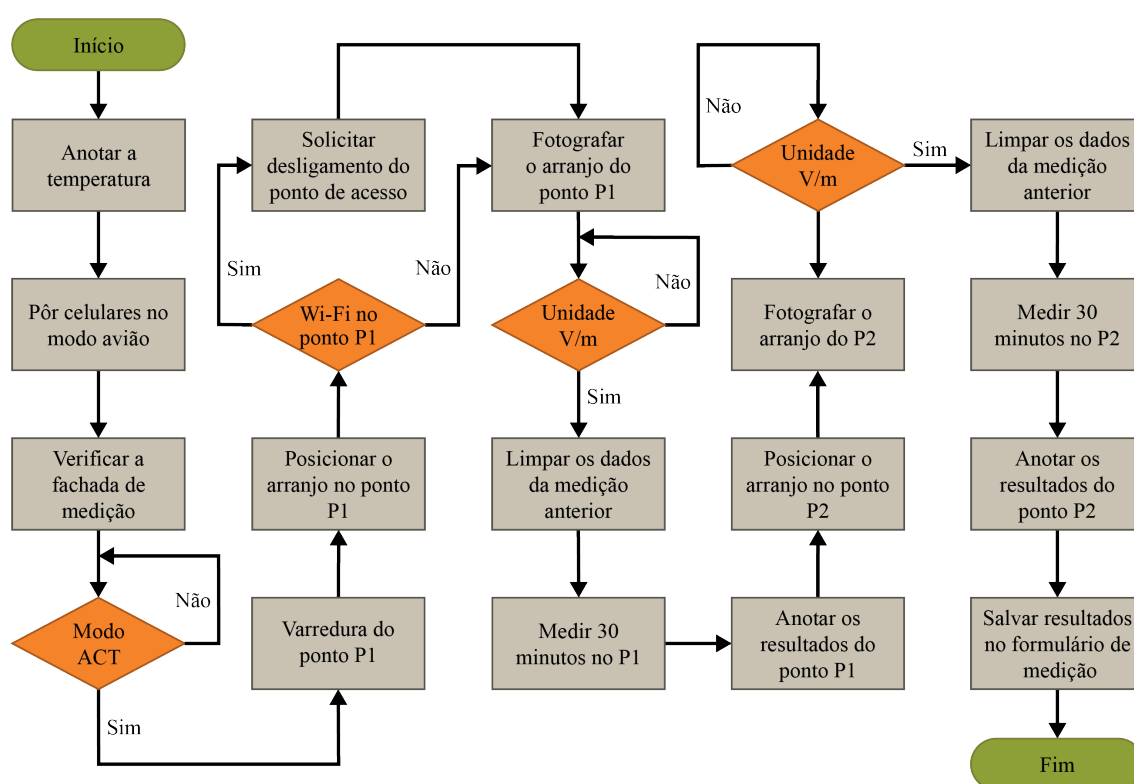


Figura 6.3: Fluxograma de execução da medição.

- Anotar a temperatura da região (utilizar a temperatura da ferramenta de clima do google);
- Pôr todos os celulares da equipe de medição em modo avião;
- Confirmar a fachada de medição do ponto P1 no andar-alvo com uma bússola;
- Varrer os ambientes para determinar o ponto de maior exposição (P1) com o modo ACT³ do NBM-520;
- Montar o arranjo de medição do ponto P1 no local determinado;

³Neste modo, o visor do equipamento mostra o valor medido mais recente.

- Solicitar o desligamento de pontos de acesso Wi-Fi presentes no ambiente de medição do ponto P1, caso existam;
- Tirar fotos do arranjo de medição no ponto P1;
- Checar se a unidade de medição do NBM-520 está em V/m. Caso não, apertar a tecla *Unit* para alterar;
- Iniciar uma nova medição, apertando o botão *Clear* do NBM-520. Fazer isso primeiro no modo MAX e depois no modo AVG);
- Medir por 30 minutos no ponto P1;
- Anotar os valores de média e de pico de intensidade de campo elétrico do ponto P1;
- No andar térreo, montar o arranjo de medição do ponto P2, no mesmo ponto da fachada da medição do ponto P1;
- Tirar fotos do arranjo de medição no ponto P2;
- Checar se a unidade de medição do NBM-520 está em V/m. Caso não, apertar a tecla *Unit* para alterar;
- Iniciar uma nova medição, apertando o botão *Clear* do NBM-520. Fazer isso primeiro no modo MAX e depois no modo AVG);
- Medir por 30 minutos no ponto P2;
- Anotar os valores de média e de pico de intensidade de campo elétrico do ponto P2;
- Responder o Formulário de Medição para gravar as informações da medição de ambos os pontos.

6.3 Descrição das Campanhas de Medição

Um total de 10 prédios foram contatados, mas somente cinco responderam e forneceram o acesso da equipe para a realização das medições. A Tabela 6.2 apresenta as principais informações das ERBs-alvo referentes a cada prédio-alvo onde as medições foram realizadas. A distância entre o prédio-alvo e a sua respectiva ERB-alvo foi calculada usando a distância geodésica entre as coordenadas de cada objeto. O azimute incidente foi identificado a partir do diagrama de zona de interesse horizontal da(s) ERB(s). Adicionalmente, foram coletadas informações da plataforma Mosaico da ANATEL [43], incluindo o somatório da potência dos transmissores associados ao azimute incidente e as tecnologias de comunicação móvel de suas emissões.

Tabela 6.2: Informações da ERB referente a cada prédio-alvo.

Local da Medição	Distância do Prédio	Azimute Incidente [43]	Potência Máxima dos Transmissores do Azimute [43]	Tecnologia(s) [43]
Prédio 1	79,26 m	220°	480 W	GSM, WCDMA, LTE e NR
Prédio 2	96,88 m	120°	260 W	WCDMA, LTE e NR
Prédio 3	67,89 m	10°	960 W	GSM, WCDMA, LTE e NR
Prédio 4	47,34 m	240°	585,6 W	GSM, WCDMA, LTE e NR
Prédio 5	44,90 m	120°	585,6 W	GSM, WCDMA, LTE e NR

As medições realizadas nos pontos P1 e P2 de cada prédio-alvo foram tratadas como

uma única campanha de medição. Conforme indicado na Tabela 6.3, as campanhas foram conduzidas em diferentes dias da semana e horários do dia. As posições do ponto de medição P1 também variaram entre as campanhas.

Tabela 6.3: Informações das medições realizadas.

Local da Medição	Data da Medição	Posição do Ponto P1	Horário da Medição (P1)	Horário da Medição (P2)	Temperatura na Região
Prédio 1	24/04/2024	Cobertura	15:24	15:59	30 °C
Prédio 2	30/04/2024	Sala	10:15	10:54	29 °C
Prédio 3	24/05/2024	Quarto	16:07	15:21	29 °C
Prédio 4	20/06/2024	Quarto	15:24	16:47	27 °C
Prédio 5	25/02/2025	Corredor de Acesso	14:40	15:16	28 °C

Capítulo 7

Resultados e Discussões

Este capítulo apresenta os resultados das medições de exposição a CEMRF feitas nos prédios-alvo. Também é feita uma análise do pior caso de exposição identificado e uma comparação desses resultados com trabalhos do estado da arte.

7.1 Medições de Exposição a CEMRF nos Prédios-alvo

A Tabela 7.1 apresenta os resultados obtidos no andar-alvo e no nível do solo. Nela são mostrados os valores de média e de pico do campo elétrico, além da taxa de exposição, definida como o quadrado da razão entre a intensidade de campo elétrico medido e o limite de exposição adotado para a referida faixa de frequências [40,47]. Uma vez que o arranjo de medição adota equipamento de faixa larga, o valor de campo elétrico obtido se refere a toda a faixa de frequências abarcada pelo equipamento. Dessa forma, a Tabela 7.2 exibe as faixas de frequências usadas nas ERBs-alvo relacionadas a cada prédio-alvo medido.

Tabela 7.1: Resultados das medições de exposição a CEMRF conduzidas nos prédios-alvo.

Ponto de Medição P1 - Andar-alvo				
Local da Medição	Média do Campo Elétrico (V/m)	Pico do Campo Elétrico (V/m)	Taxa de Exposição (%), [limite de 38,35 V/m]	Taxa de Exposição (%), [limite de 27,70 V/m]
Prédio 1	5,03	7,86	1,72	3,30
Prédio 2	3,02	6,64	0,62	1,19
Prédio 3	6,32	10,55	2,72	5,21
Prédio 4	13,14	22,79	11,74	22,50
Prédio 5	17,34	31,86	20,44	39,19
Ponto de Medição P2 - Nível do Solo				
Local da Medição	Média do Campo Elétrico (V/m)	Pico do Campo Elétrico (V/m)	Taxa de Exposição (%), [limite de 38,35 V/m]	Taxa de Exposição (%), [limite de 27,70 V/m]
Prédio 1	1,25	2,07	0,11	0,20
Prédio 2	0,80	1,40	0,04	0,08
Prédio 3	1,52	2,25	0,16	0,30
Prédio 4	0,93	1,31	0,06	0,11
Prédio 5	0,83	1,33	0,05	0,09

Tabela 7.2: Faixas de frequências de *downlink* usadas nas ERBs-alvo [43].

Referência da ERB	Frequências Usadas nas ERBs-alvo, por Geração de Rede			
	2G (MHz)	3G (MHz)	4G (MHz)	5G (MHz)
Prédio 1	1867,5	2160	788, 2150, 2160 e 2680	3450
Prédio 2	-	875,5, 2130 e 2160	788, 798 e 2680	778, 3350, 3450 e 3550
Prédio 3	1855 e 1875	885, 2117,5 e 2140	1855, 1875, 2117,5, 2140 e 2680	2117,5, 2140 e 3350
Prédio 4	1855 e 1875	885, 2117,5 e 2140	1855, 1875 e 2640	3350
Prédio 5	1855 e 1875	885, 2117,5 e 2140	1855, 1875 e 2640	3350

A Figura 7.1 compara os valores de intensidade de campo elétrico encontrados nos pontos P1 e P2 de cada prédio alvo e demonstra sua proximidade com os limites de exposição. A Figura 7.1a compara os valores de média enquanto a Figura 7.1b compara os valores de pico.

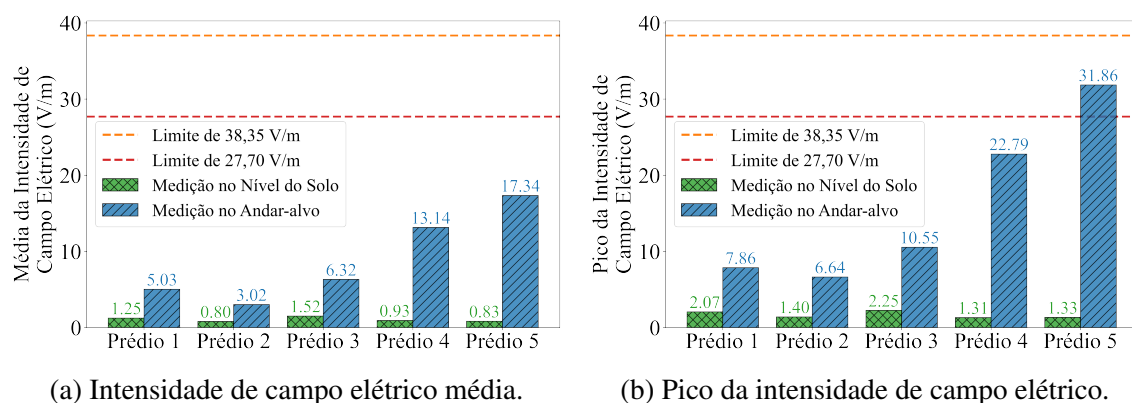


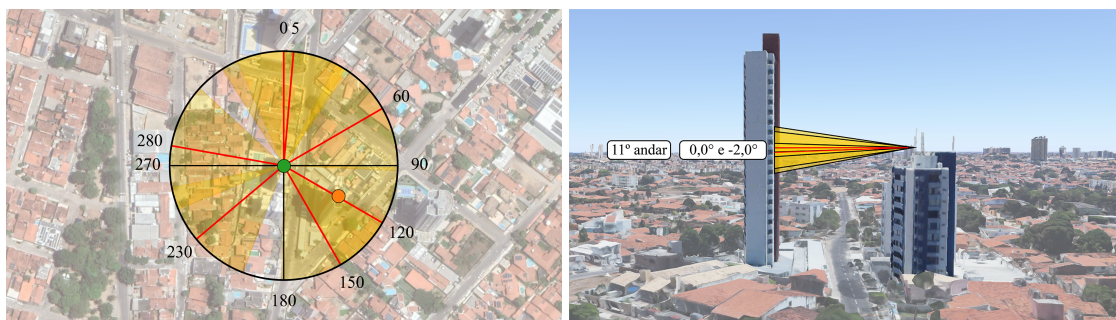
Figura 7.1: Comparação da intensidade de campo elétrico nos pontos P1 e P2 de cada prédio-alvo.

Os pontos de medição P2 apresentaram intensidades de campo elétrico inferiores aos pontos P1 em todos os prédios medidos. Consequentemente, os pontos P1 apresentam taxas de exposição mais elevadas, chegando a 39,19% do limite de exposição para a faixa de radiodifusão, no ponto P2 do Prédio 5, uma razão de aproximadamente 435 vezes a taxa de exposição obtida no ponto P1 deste prédio. A diferença entre os valores de média dos pontos P1 e P2 varia de 2,22 V/m a 16,51 V/m, enquanto varia entre 5,24 V/m e 30,53 V/m para os valores de pico.

7.2 Investigação do Ponto de Pior Exposição

Os maiores valores de média e de pico de intensidade do campo elétrico foram registrados no Prédio 5, um dos sete casos críticos encontrados com a abordagem proposta. A Figura 7.2a destaca o prédio no centro da zona de interesse horizontal de suas ERBs-alvo, enquanto a Figura 7.2b denota a presença de um andar sob incidência

direta das emissões direcionadas ao Prédio 5. Adicionalmente, a Figura 7.2c exibe uma visualização *in situ* do pior cenário de exposição, destacando o local onde a medição ocorreu e a posição das antenas da ERB-alvo.



(a) Zona de interesse horizontal das ERBs-alvo. (b) Zona de interesse vertical das ERBs-alvo.



(c) Local do pior caso de exposição (destacado em laranja) e ERB-alvo (destacado em verde).

Figura 7.2: Situação do cenário de pior exposição (Prédio 5).

O Prédio 5 está situado a aproximadamente 45 m de um sítio compartilhado por duas operadoras, mas somente uma das operadoras possui emissões direcionadas ao prédio, no azimute 120° . Segundo [43], esse azimute possui emissões com dois valores de elevação distintos (-2° e 0°). Ao sobrepor o diagrama de zona de interesse vertical sobre a imagem do mapa 3D do local, encontra-se que o centro das duas emissões incide sobre o 11º andar do Prédio 5, conforme já mostrado na Figura 7.2b. A Figura 7.3 apresenta o arranjo de medição posicionado no andar-alvo estimado (ponto P1) do Prédio 5, durante a medição conduzida. Observa-se que as antenas das ERBs-alvo estão a uma altura equivalente ao andar-alvo obtido com a abordagem proposta.

Uma vez que a planta do Prédio 5 permitia que as medições fossem conduzidas sem a necessidade de entrar nos apartamentos, médias temporais de um minuto foram medidas em todos os andares do prédio. A partir dos resultados dessa avaliação, determinaram-se os andares que apresentavam os maiores índices de intensidade de campo elétrico. Em sequência, realizaram-se medições de 30 minutos nos três andares que apresentaram os maiores índices, cujos resultados estão dispostos na Tabela 7.3.

A Figura 7.4 ilustra a distribuição da intensidade nos andares onde as medições de

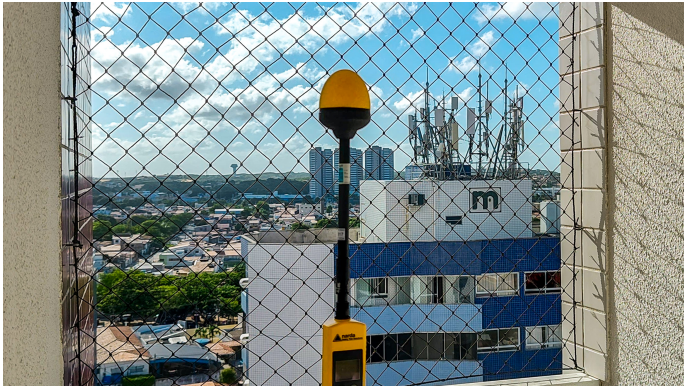


Figura 7.3: Arranjo de medição posicionado no 11º andar do prédio-alvo.

Tabela 7.3: Resultados das medições nos andares adjacentes ao andar-alvo encontrado com a abordagem proposta e no nível do solo.

Andar da Medição	Média do Campo Elétrico (V/m)	Pico do Campo Elétrico (V/m)	Taxa de Exposição, $f = 778 \text{ MHz}$ (%)	Taxa de Exposição, $f = 88 \text{ MHz}$ (%)
Nível do Solo	0,83	1,33	0,05	0,09
9º	6,74	10,18	3,09	5,92
10º	17,34	31,86	20,44	39,19
11º	13,13	18,36	11,72	22,47

30 minutos foram conduzidas. O 10º andar apresentou o maior pico de intensidade de campo elétrico (31,86 V/m), uma diferença de 21,68 V/m e de 13,50 V/m em relação às medidas do 9º e do 11º andar, respectivamente.

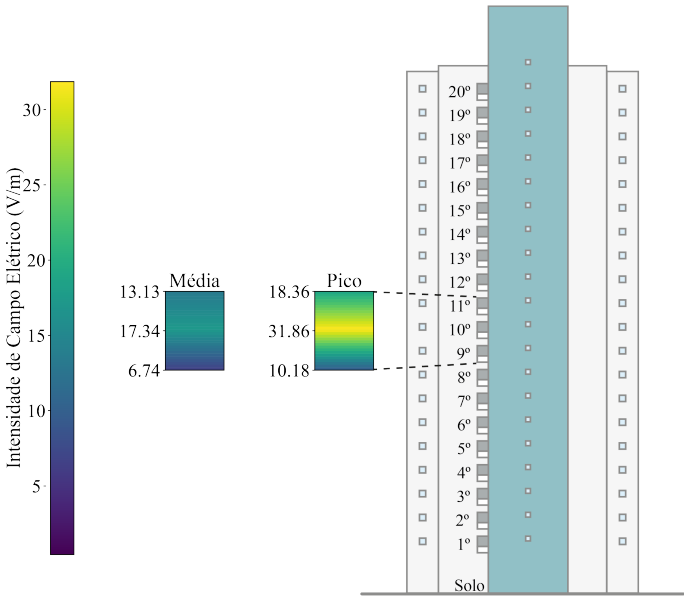


Figura 7.4: Disposição da intensidade de campo elétrico nos andares com maiores valores registrados.

Apesar da discrepância entre o andar no centro da zona de interesse estimado e o obtido por medição, os andares que apresentaram os maiores valores estavam previstos pela análise proposta na Seção 4.3 e apresentada na Tabela 7.3. Além disso, esses andares apresentaram taxas de exposição muito superiores às do nível do solo, reforçando a importância de realizar medições nos andares adjacentes ao andar no centro da zona de interesse vertical sempre que possível. Tal discrepância pode ser resultado de fatores imprevisíveis, como diferenças entre o ângulo de elevação mecânica cadastrado na plataforma da ANATEL e o ângulo utilizado na instalação da antena, bem como pela presença de uma elevação elétrica intrínseca do modelo de antena utilizado na emissão, que, conforme comentado no Capítulo 5, não pode ser determinado diretamente com os dados disponíveis na plataforma da ANATEL [43].

7.3 Comparação com os Trabalhos Relacionados

Os autores de [48] defendem o uso da unidade de densidade de potência (W/m^2) para apresentação dos resultados de avaliações de exposição a CEMRF. Quando obtidos na região de campo distante das antenas avaliadas, resultados de intensidade de campo elétrico (V/m) podem ser convertidos para W/m^2 a partir da Equação (7.1):

$$I = \frac{E_{\text{rms}}^2}{377}, \quad (7.1)$$

na qual I é a densidade de fluxo de potência (intensidade da onda), E_{rms} é o valor eficaz da intensidade do campo elétrico, e 377 é a impedância característica do espaço livre na zona de Fraunhofer (campo distante), dada em ohms.

Então, os dados dos estudos citados foram convertidos para a unidade V/m , a mesma unidade utilizada pela ANATEL [11], a fim de padronizar os resultados deste estudo. A conversão inversa pode ser obtida utilizando a Equação (7.2).

$$E_{\text{rms}} = 19,4\sqrt{I}. \quad (7.2)$$

A Tabela 7.4 compara os valores de exposição pico (em V/m e mW/m^2) encontrados neste estudo com os relatados em trabalhos do estado da arte, listados na Seção 2.2. O cenário de medição foi classificado como Interno, quando a medição foi realizada no interior dos prédios, e Externo quando foi realizada na cobertura ou no entorno do prédio.

Tabela 7.4: Comparação dos valores de pico de intensidade de campo elétrico e de pico de densidade de fluxo de potência entre o presente trabalho e o estado da arte.

Referência	Pico da Intensidade de Campo Elétrico (V/m)	Pico da Densidade de Fluxo de Potência (mW/m^2)	Ambiente de Medição
[17] 2007	Não Mencionado	Não Mencionado	-
[18] 2008	2,46	16,05	Externo
[19] 2009	Não Mencionado	Não Mencionado	-
[20] 2010	9,70	249,58	Externo
[21] 2011	5,83	90,30	Interno

[22] 2012	0,93	2,28	Interno
[23] 2012	5,32	75,00	Interno
[24] 2013	3,07	25,00	Externo
[25] 2014	Não Mencionado	Não Mencionado	-
[26] 2016	3,04	24,51	Interno
[27] 2018	17,53	815,12	Interno
[28] 2021	1,42	5,31	Interno
[29] 2021	3,64	35,15	Interno
[15] 2021	15,03	599,21	Externo
[30] 2021	Não Mencionado	Não Mencionado	-
[31] 2022	31,60	2648,70	Externo
[32] 2023	Não Mencionado	Não Mencionado	-
[33] 2023	3,45	31,57	Interno
[34] 2024	13,16	459,38	Externo
Este Trabalho	31,86	2692,47	Interno

O presente estudo registou o maior valor de pico de intensidade de campo elétrico dentre os trabalhos encontrados na pesquisa bibliográfica realizada, com o valor máximo sendo advindo de uma medição em ambiente interno no Prédio 5, sob a incidência das antenas de um sítio compartilhado por duas operadoras. A aplicação da abordagem proposta resultou na obtenção de medidas cujos valores superam os encontrados em ambientes externos, como os apresentados em [31].

Capítulo 8

Conclusão

Este trabalho apresentou uma nova abordagem para avaliação de exposição a CEMRF em prédios sob incidência direta de emissões de antenas de ERBs, fundamentada nas diretrizes brasileiras [40] e em normas internacionalmente reconhecidas [9] para a avaliação dessa exposição.

A abordagem definiu critérios de seleção dos prédios-alvo e estimou o local do possível pior cenário de exposição nessas estruturas, a partir da geolocalização das ERBs e dos diagramas de zona de interesse horizontal e vertical de suas antenas, gerados com base nas informações disponibilizadas publicamente na plataforma Mosaico da ANATEL [43].

Esses dados foram processados por *scripts* desenvolvidos em Python, com o propósito de automatizar a geração dos diagramas necessários para as análises de cada etapa da abordagem proposta. Os *scripts* foram disponibilizados em um repositório no GitHub, facilitando o aprimoramento da metodologia pela comunidade acadêmica e possibilitando sua aplicação em trabalhos futuros. O desenvolvimento dos *scripts* constituiu uma etapa essencial para viabilizar a aplicação da abordagem proposta em uma perspectiva de larga escala, graças à significativa otimização do tempo proporcionada pela automação.

Medições realizadas em cinco prédios da cidade de Natal, com o objetivo de avaliar a abordagem proposta, resultaram em valores de média e de pico inferiores aos limites estabelecidos pela ICNIRP [9], exceto no Prédio 5, cujo valor de pico obtido no andar-alvo (ponto P1) superou em 15,02% o limite de 27,70 V/m adotado nas análises. O valor de pico obtido no ponto P1 desse prédio é 23,96 vezes maior que o valor de pico obtido no nível do solo. Em todos os demais prédios também encontrou-se valores de pico e de média maiores no ponto P1. Esses resultados demonstram que a aplicação da abordagem proposta confirma a hipótese científica desta dissertação de mestrado, permitindo identificar condições mais próximas ao pior caso de exposição em prédios situados nas proximidades de antenas de ERBs.

Os valores de pico de intensidade de campo elétrico obtidos neste estudo também superaram aqueles reportados nos trabalhos relacionados realizados em contextos semelhantes, identificados na pesquisa bibliográfica. Assim, esta dissertação contribui para a literatura ao apresentar avaliações da exposição a CEMRF em prédios, evidenciando a robustez dos procedimentos de avaliação previstos na legislação brasileira e propondo uma abordagem de aplicação das diretrizes da ICNIRP em um cenário contemporâneo de exposição.

8.1 Perspectivas de Continuidade do Trabalho

Além dos limites estabelecidos pela ICNIRP [9], que visam à preservação da saúde humana aos efeitos térmicos e de estimulação elétrica involuntária de nervos da exposição a CEMRF, e das diretrizes de medição previstas no Ato nº 17865 [40] da ANATEL, existem ainda recomendações de outros órgãos, como a União Internacional de Telecomunicações (UIT), do inglês *International Telecommunication Union* (ITU), voltadas para avaliações de CEMRF provenientes de ERBs sob a perspectiva de engenharia de telecomunicações. Algumas dessas recomendações são adotadas como referências do Ato nº 17865, como:

- ITU-T K.52 [49]: Fornece orientações gerais para conformidade de instalações de telecomunicações e dispositivos móveis com limites de exposição;
- ITU-T K.61 [50]: Foca nos métodos de medição e nas técnicas de predição numérica para avaliação de conformidade;
- ITU-T K.100 [51]: Define o procedimento de medição para verificar a conformidade de ERBs na faixa de 100 MHz a 100 GHz no início de sua operação.

Somadas as recomendações estabelecidas nesses documentos, destacam-se outro conjunto de recomendações da ITU:

- ITU-T K.70 [52]: Técnicas de mitigação e avaliação cumulativa de exposição em torno de ERBs;
- ITU-T K.91 [53]: Orientações para avaliação, monitoramento e conformidade em ambientes reais e acessíveis ao público, baseando-se nas demais recomendações da ITU-T.

Diferentemente da abordagem desenvolvida nesta dissertação, recomendações como as K.100, K.70 e K.91 [51–53] propõem a determinação do ponto de pior exposição por meio de cálculos matemáticos e do uso de ferramentas que consideram o diagrama de radiação real das antenas, bem como as características exatas de sua instalação. Conforme exposto no Capítulo 5, tais procedimentos não podem ser plenamente reproduzidos apenas com os dados disponibilizados publicamente na plataforma da ANATEL [43], o que dificulta aplicações em uma perspectiva de larga escala. Deste modo, pretende-se selecionar prédios cujas configurações das respectivas ERBs-alvo possam ser integralmente mapeadas, de forma a aplicar os diferentes métodos (os das recomendações da ITU e a abordagem desenvolvida nesta dissertação), visando comparar a precisão dos resultados.

Em aplicações futuras da abordagem proposta, serão tomadas ações quanto à limpeza dos dados obtidos da plataforma da ANATEL, a fim de mitigar a presença de dados que promovam análises que não condizem com a realidade de redes de comunicação móveis.

Buscando reduzir a quantidade de autorizações necessárias para a realização das medições e, por consequência, viabilizar um número maior de medições em um menor tempo, a adoção de métodos de medição na parte externa da fachada dos prédios-alvo, como drones [32], pode ser adicionada à metodologia.

Planeja-se realizar medições em todos os 22 prédios-alvo da cidade de Natal. Além disso, pretende-se estabelecer parcerias com instituições de outras cidades e países, com o objetivo de aplicar a abordagem em diferentes contextos urbanos, analisando sua reprodutibilidade, escalabilidade e contribuindo para uma possível generalização do método.

Também se almeja investigar a influência da distância entre o prédio-alvo e a ERB-alvo nos índices de exposição, bem como da distância angular da posição do prédio-alvo para o centro do azimute incidente. Para isso, será ampliado o raio de busca de prédios-alvo, possibilitando a comparação entre medições realizadas em prédios expostos a contextos diferentes da(s) emissão(ões) oriundas de um mesmo azimute da ERB-alvo.

Por fim, pretende-se aplicar técnicas de aprendizado de máquina nos dados da infraestrutura de telecomunicações, do espaço geográfico, das características construtivas e arquitetônicas dos prédios-alvo e de medições de campo elétrico. Essa abordagem visa à predição dos níveis de exposição e a classificação desses prédios quanto ao seu grau de criticidade, proporcionando uma otimização de tempo e recursos, bem como o fortalecimento das estratégias de monitoramento em áreas urbanas verticalizadas.

8.2 Produção Acadêmica

Durante a execução deste trabalho de mestrado, o autor colaborou no desenvolvimento de 12 trabalhos junto ao grupo de pesquisa GppCom, atuando no laboratório LANCE, dos quais 11 já foram publicados. Os trabalhos são:

1. Artigos de congresso (circulação nacional):

- (a) Análise de Impacto da Escolha do MCS em Cenários de NR V2X Modo 2;
 - XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2023 (fruto de trabalho de Iniciação Científica).
- (b) Análise da aplicabilidade do ns-3 na avaliação de cenários de coexistência do 5G NR-U com o Wi-Fi;
 - XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2023 (fruto de trabalho de Iniciação Científica).
- (c) Análise de RNI para Pontos de Acesso Wi-Fi em Operação Doméstica;
 - XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2023 (fruto de trabalho de estágio de graduação na ANATEL e de atuação no Projeto de Medição de RNI).
- (d) Estudo de Caso sobre Cobertura e Capacidade de Transmissão de Redes 5G Comerciais em um Cenário Urbano;
 - XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2024 (fruto de resultados do TCC de uma parceira do Projeto de Medições de RNI).
- (e) Licenciamento de Espectro para uso Científico: Legislação e Estudo de Caso de Sistema 5G Aberto;

- XIV Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM), 2024 (artigo em parceria com o LANCE e de envolvimento em aprendizado sobre redes virtualizadas 5G).
 - (f) Metodologia para Geração de Radio Environment Maps de Redes 5G SA Privadas;
 - XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2024 (artigo em parceria com o LANCE e de envolvimento em aprendizado sobre redes virtualizadas 5G).
 - (g) Metodologia para Medição e Avaliação de RNI em Prédios Próximos a Estações de Telecomunicações.
 - XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2024 (primeiro artigo de circulação nacional fruto da dissertação e de resultados do TCC de um parceiro do Projeto de Medições de RNI).
2. Artigos de jornal (circulação internacional):
- (a) *Analysis of Measurements in Microwaves Oven with High Level of Non-Ionizing Radiation (NIR) Before and After Repair*;
 - *Journal of Communication and Information Systems*, 39(1), 160–163, 2024 (fruto de trabalho de estágio de graduação na ANATEL e de atuação no Projeto de Medição de RNI).
 - (b) *Measurement and Analysis of Non-Ionizing Radiation Levels in Residential Environments Emitted by Wi-Fi Routers*;
 - *IEEE Latin America Transactions*, v. 22, p. 31-38, 2024 (fruto de trabalho de estágio de graduação na ANATEL e de atuação no Projeto de Medição de RNI).
 - (c) *Measurement of Non-ionizing Radiation (NIR) from Wi-Fi Access Points and Microwave Ovens in Residential Environments*;
 - *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* (ISSN: 1569-3937) (fruto de trabalho de estágio de graduação na ANATEL e de atuação no Projeto de Medição de RNI).
 - (d) *A Novel Approach for Assessments of Radiofrequency Electromagnetic Fields Exposure in Buildings Near Telecommunication Infrastructure*.
 - *Science of The Total Environment* (ISSN: 1879-1026) (primeiro artigo de circulação internacional fruto direto da dissertação).

Dentre os trabalhos publicados, ressalta-se os artigos 1(g) [44] e 2(d) [54], que apresentam a abordagem desenvolvida e os resultados parciais desta dissertação.

Três dos trabalhos publicados em revistas de circulação internacional são produtos da colaboração no desenvolvimento da dissertação de mestrado de Julia Silva [55], que resultou no amadurecimento da hipótese científica deste trabalho e na experiência em escrita de artigos científicos.

Referências Bibliográficas

- [1] RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. 2nd. ed. USA: Prentice Hall PTR, 2001. v. 2. ISBN 0130422320.
- [2] AL-FALAHY, N.; ALANI, O. Y. K. Network capacity optimisation in millimetre wave band using fractional frequency reuse. *IEEE Access*, v. 6, p. 10924–10932, 2018.
- [3] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Demográfico 2000*. 2000. Acesso em: 19 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/administracao-publica-e-participacao-politica/9663-censo-demografico-2000.html?edicao=9771&t=resultados>>.
- [4] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Demográfico 2010*. 2010. Acesso em: 19 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/administracao-publica-e-participacao-politica/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=10503&t=resultados>>.
- [5] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Censo Demográfico 2022*. 2022. Acesso em: 19 dez. 2024. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/administracao-publica-e-participacao-politica/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=42157&t=resultados>>.
- [6] WORLD HEALTH ORGANIZATION. RADIATION AND ENVIRONMENTAL HEALTH AND WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Establishing a dialogue on risks from electromagnetic fields*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2002. ISBN 9241545712.
- [7] RAMIREZ-VAZQUEZ, R. et al. Systematic review of exposure studies to radiofrequency electromagnetic fields: Spot measurements and mixed methodologies. *Applied Sciences*, v. 14, n. 23, 2024. ISSN 2076-3417.
- [8] JALILIAN, H. et al. Public exposure to radiofrequency electromagnetic fields in everyday microenvironments: An updated systematic review for europe. *Environmental Research*, v. 176, p. 108517, 2019. ISSN 0013-9351.
- [9] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, v. 118, p. 483–524, 2020.

- [10] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). *Planos de Monitoração*. 2022. Acesso em: 13 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/fiscalizacao/planos-de-monitoracao>>.
- [11] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). *Mapa de Exposição a Campos Eletromagnéticos*. 2025. Acesso em: 13 jan. 2025. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/espectro-e-orbita/mapa-de-exposicao-a-campos-eletromagneticos>>.
- [12] SILVA, J. da L. A. et al. Human exposure to non-ionizing radiation from indoor distributed antenna system: Shopping mall measurement analysis. *Sensors*, v. 23, n. 10, 2023. ISSN 1424-8220.
- [13] SILVA, J. da L. A. et al. Measurement of non-ionizing radiation (nir) from wi-fi access points and microwave ovens in residential environments. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Taylor & Francis, p. 1–22, 2025.
- [14] RODRIGUES, M. E. C. et al. Measurements of non-ionizing radiation on urban environment and preliminary assessment of relative contribution among different services. In: IEEE. *2013 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave & Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.], 2013. p. 1–4.
- [15] DINIZ, A. B. de F. et al. Non-ionizing radiation analysis in close proximity to antenna tower: A case study in northeast brazil. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, v. 20, p. 126–142, 2021.
- [16] COSTA, A. B. da S. *Estudo de radiação não ionizante e medições em residências próximas a torres de telecomunicações na área urbana de Natal*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.
- [17] NEITZKE, P. et al. Determination of exposure due to mobile phone base stations in an epidemiological study. *Radiation Protection Dosimetry*, v. 124, p. 35–9, 02 2007.
- [18] CHIANG, K. H.; TAM, K. W. Electromagnetic assessment on human safety of mobile communication base stations at university of macau. *American Journal of Applied Sciences*, v. 5, 10 2008.
- [19] BARRILE, V.; ARMOCIDA, G.; BILOTTA, G. Gis supporting the plan of bts (base transceiver stations) for mobile network in urban context. *WSEAS Transactions on Communications*, v. 8, p. 775–784, 01 2009.
- [20] GOICEANU, C.; DANULESCU, R.; DANULESCU, E. Investigation on residential exposure to electromagnetic radiation in the proximity of mobile phone base stations. In: *The 40th European Microwave Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1449–1452.
- [21] BALTRÈNAS, P.; BUCKUS, R. Indoor measurements of the power density close to mobile station antenna. In: *8th International Conference on Environmental Engineering, ICEE 2011*. [S.l.: s.n.], 2011.

- [22] CHIO, C.-K. et al. Prediction model for radiation from base-station antennas using electromagnetic simulation. In: *2012 Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1082–1084.
- [23] BALTRÈNAS, P.; BUCKUS, R.; VASAREVIČIUS, S. Research and evaluation of the intensity parameters of electromagnetic fields produced by mobile communication antennas. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Taylor & Francis, v. 20, n. 4, p. 273–284, 2012.
- [24] NASSERI, S. et al. The vertical pattern of microwave radiation around bts (base transceiver station) antennae in hashtgerd township. *Journal of environmental health science and engineering*, v. 11, p. 40, 12 2013.
- [25] BEEKHUIZEN, J. et al. Modelling indoor electromagnetic fields (emf) from mobile phone base stations for epidemiological studies. *Environment International*, v. 67, p. 22–26, 2014. ISSN 0160-4120.
- [26] KURNAZ, Ç.; ENGİZ, B. K.; BOZKURT, M. C. Monitoring of rf/microwave field strength at schools in a pilot district in samsun/turkey. In: *2016 16th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–4.
- [27] KURNAZ, Ç.; YILDIZ, D.; KARAGOL, S. Assessment of short/long term electric field strength measurements for a pilot district. *Open Physics*, v. 16, n. 1, p. 69–74, 2018.
- [28] LOPEZ, I. et al. What is the radiation before 5g? a correlation study between measurements in situ and in real time and epidemiological indicators in vallecas, madrid. *Environmental Research*, v. 194, p. 110734, 09 2021.
- [29] DE GIUDICI, P. et al. Radiofrequency exposure of people living near mobile-phone base stations in france. *Environmental Research*, v. 194, p. 110500, 2021. ISSN 0013-9351.
- [30] AERTS, S. et al. In situ assessment of 5g nr massive mimo base station exposure in a commercial network in bern, switzerland. *Applied Sciences*, v. 11, n. 8, 2021. ISSN 2076-3417.
- [31] KOPPEL, T. et al. Very high radiofrequency radiation at skeppsbron in stockholm, sweden from mobile phone base station antennas positioned close to pedestrians' heads. *Environmental Research*, v. 208, p. 112627, 2022. ISSN 0013-9351.
- [32] GARCÍA-COBOS, F. J. et al. Personal exposimeter coupled to a drone as a system for measuring environmental electromagnetic fields. *Environmental Research*, v. 216, p. 114483, 2023. ISSN 0013-9351.
- [33] MULUGETA, B. A. et al. Statistical characterization and modeling of indoor rf-emf down-link exposure. *Sensors*, v. 23, n. 7, 2023. ISSN 1424-8220.

- [34] CHRISTOPOULOU, M. I. et al. 5g nr launching in greece: Preliminary in situ and monitoring network measurements of electromagnetic fields exposure levels at rooftops. *Bioelectromagnetics*, v. 45, n. 4, p. 193–199, 2024.
- [35] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health physics*, v. 74, n. 4, p. 494–521, 1998.
- [36] IEEE. *IEEE C95.1-2019 - IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz*. 2019, 1-312 p.
- [37] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *IEC 62232:2025 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of base stations for the purpose of evaluating human exposure*. 2025.
- [38] BRASIL. Lei nº 11.934, de 05 de maio de 2009. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2009. ISSN 1677-7042. Acesso em: 06. jul. 2023. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l11934.htm>.
- [39] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). Resolução nº 700, de 28 de setembro de 2018. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2018. ISSN 1677-7042. Acesso em: 06. jul. 2023. Disponível em: <https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/43460488/do1-2018-10-02-resolucao-n-700-de-28-de-setembro-de-2018-43460191>.
- [40] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). Ato nº 17865, de 30 de dezembro de 2023. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2023. ISSN 1677-7042. Acesso em: 02. fev. 2024. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2023/1914-ato-17865>>.
- [41] BRASIL. Lei nº 13.116, de 20 de abril de 2015. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2015. ISSN 1677-7042. Acesso em: 19 dez. 2024. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13116.htm>.
- [42] INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION (ICNIRP). *Differences between the ICNIRP (2020) and previous guidelines*. Acesso em: 28. jul. 2025. Disponível em: <<https://www.icnirp.org/en/differences.html>>.
- [43] AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (ANATEL). *Lista de Emissões das Estações Licenciadas no Brasil*. n.d. Acesso em: 06 fev. 2024. Disponível em: <<https://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/licenciamento.php>>.

- [44] SILVA, R. Q. de F. H. et al. Metodologia para medição e avaliação de rni em prédios próximos a estações de telecomunicações. In: *Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT2024)*. [S.l.: s.n.], 2024. p. 5.
- [45] NARDA. *Datasheet NBM-520*. 2024. Acesso em: 06 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.narda-sts.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=1314&dl=1&token=2a2eab06dc3a84103f30aacdd952d39433b77b45>>.
- [46] NARDA. *Datasheet EF 0691*. 2021. Acesso em: 06 jan. 2025. Disponível em: <<https://www.narda-sts.com/index.php?eID=dumpFile&t=f&f=1304&dl=1&token=bb5dc97e7304ccb419270f8a799d2cd8f87e4144>>.
- [47] LINHARES, A. Review on human exposure to radiofrequency electromagnetic field. In: *2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–5.
- [48] RAMIREZ-VAZQUEZ, R. et al. Physical units to report intensity of electromagnetic wave. *Environmental Research*, v. 204, p. 112341, 2022. ISSN 0013-9351.
- [49] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T K.52: Guidance on complying with limits for human exposure to electromagnetic fields*. 2024. Acesso em: 13 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-K.52>>.
- [50] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T K.61: Guidance on measurement and numerical prediction of electromagnetic fields for compliance with human exposure limits for telecommunication installations*. 2018. Acesso em: 13 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-K.61>>.
- [51] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T K.100: Measurement of radio frequency electromagnetic fields to determine compliance with human exposure limits when a base station is put into service*. 2024. Acesso em: 13 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-K.100>>.
- [52] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T K.70: Mitigation techniques to limit human exposure to electromagnetic fields in the vicinity of radiocommunication stations*. 2020. Acesso em: 13 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-K.70>>.
- [53] INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *ITU-T K.91: Guidance for assessment, evaluation and monitoring of human exposure to radio frequency electromagnetic fields*. 2024. Acesso em: 13 ago. 2025. Disponível em: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-K.91>>.
- [54] SILVA, R. Q. de F. et al. A novel approach for assessments of radiofrequency electromagnetic fields exposure in buildings near telecommunication infrastructure. *Science of The Total Environment*, v. 992, p. 179853, 2025. ISSN 0048-9697.

- [55] SILVA, J. da L. A. *Medição e avaliação da exposição à radiação não ionizante em ambientes internos*. 49 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023.