



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



# **Medição e Avaliação da Exposição à Radiação Não Ionizante em Ambientes Internos**

**Júlia da Luz Andrade 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 Ciências.

Número de ordem PPgEEC: M665  
Natal, RN, setembro de 2023

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

Silva, Júlia da L. A.

Medição e avaliação da exposição à radiação não ionizante em ambientes internos / Júlia da Luz Andrade Silva. - 2023.  
49f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Natal, 2023.

Orientação: Dr. Vicente A. de Sousa Junior.

1. Radiação Não-Ionizante - Dissertação. 2. RNI - Dissertação. 3. Campo Elétrico - Dissertação. 4. Medidas em Shoppings - Dissertação. 5. Medidas em Residências - Dissertação. I. Sousa Junior, Vicente A. de. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 621.3

*Aos meus pais, Jailton e Márcia, e a  
minha irmã, Julie, por sempre  
acreditarem no meu potencial.*

---

# Agradecimentos

---

Ao meu orientador, professor Vicente, sou grata, em primeiro lugar, pela oportunidade única e todo conhecimento adquirido. Em segundo lugar, pela orientação e auxílio em todas as etapas do trabalho.

Aos professores Márcio, Fred e Gutembergue pela troca de conhecimento e contribuição no trabalho.

Aos colegas Ricardo, Fernanda e demais participantes do projeto pelo aprendizado compartilhado, dedicação e auxílio durante a etapa das medições.

Aos meus pais Jailton e Márcia, a minha irmã Julie e ao meu noivo Júlio por me apoiar e me incentivar, não só durante a minha jornada acadêmica, mas como em toda a minha vida.

À ANATEL e ao engenheiro Halysson por dispor dos equipamentos de medição e viabilizar as medições.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

---

# Resumo

---

Tendo em vista a rápida ascensão dos serviços de telecomunicação e as perspectivas de um sociedade extremamente conectada, é fundamental monitorar os níveis de Radiação Não-Ionizante (RNI) que a população em geral pode estar exposta e compará-los com os limites definidos nas normas vigentes. Ambientes internos (*indoor*), como residências e *shoppings*, são locais que atendem aos interesses das medições, devido principalmente a presença de diferentes fontes de RNI e a localização dessas fontes em relação aos usuários finais. Este trabalho apresenta medições de RNI em um *shopping center* e em residências em Natal, RN, Brasil. No *shopping*, foi proposto um conjunto de seis pontos de medição, seguindo dois critérios: locais com grande fluxo de pessoas e presença de um ou mais *Distributed Antenna System* (DAS), co-localizados ou não com pontos de acesso Wi-Fi. Os resultados são apresentados e discutidos em termos de distância do DAS (condições: perto e longe) e densidade de fluxo de pessoas no shopping (cenários: baixo e alto número de pessoas). A maior média e maior pico de campo elétrico medidos foram 1,96 e 3,26 V/m, correspondendo respectivamente a 5% e 8% dos limites definidos pela Comissão Internacional de Proteção contra Radiações Não Ionizantes (ICNIRP) e Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). Nas residências, foram realizadas medições em 40 pontos de acesso Wi-Fi em situações usuais de utilização e operando em 2,4 e 5 GHz. Os resultados são discutidos em relação a situações de conectividade, marca e tempo de uso do equipamento. O maior nível de exposição foi de 4,66 V/m (7,64% do limite legal), verificado para a rede operando em 2,4 GHz. Além disso, foi notado influência do fator marca e modelo do equipamento nos níveis medidos de campo elétrico médio. Finalmente, foram realizadas medições em 51 fornos de micro-ondas, dos quais somente um excedeu 50 W/m<sup>2</sup> (limite determinado nas normas vigentes). Esse vazamento de radiação foi provocado pela presença de ferrugem que comprometeu a estrutura da porta do forno. Dois tipos de reparos foram realizados no forno: uso de massa epóxi para preencher a abertura na porta (Reparo 1) e troca da superfície externa do forno (Reparo 2). Somente o Reparo 2 solucionou o problema efetivamente, gerando um medição com média de 0,1841 W/m<sup>2</sup> e pico de 0,4222 W/m<sup>2</sup> depois do conserto. Quanto aos 50 demais fornos de micro-ondas, foram apresentados os resultados de densidade de potência relacionando com fatores como posição do pior ponto medido, marca, tempo de uso e estado de conservação do aparelho. Diante dos resultados, foi possível notar a influência dos fatores tempo de uso e estado de conservação do forno na densidade de potência média medida.

**Palavras-chave:** Radiação Não-Ionizante; RNI; Campo Elétrico; Ambientes Internos; Medidas em Shopping; Medidas em Residências.

---

# Abstract

---

Given the rapid rise of telecommunication services and the perspectives of a highly connected society, monitoring the levels of Non-Ionizing Radiation (NIR) that the general population may be exposed to and comparing them with the limits defined in the current norms is essential. Indoor environments, such as homes and shopping malls, are places that meet the interests of measurements, mainly due to the presence of different NIR sources and the location of these sources about end users. This work presents NIR measurements in a shopping center and residences in Natal, RN, Brazil. At shopping, a set of six measurement points was proposed, following two criteria: places with a large flow of people and the presence of one or more Distributed Antenna System (DAS), co-located or not with Wi-Fi access points. The results are presented and discussed in terms of distance from the DAS (conditions: near and far) and flow density of people in the mall (scenarios: low and high number of people). The highest mean and highest peak electric fields measured were 1.96 and 3.26 V/m, corresponding respectively to 5% and 8% of the limits defined by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) and Agency National Telecommunications Agency (ANATEL). In the homes, measurements were taken at 40 Wi-Fi access points in usual use situations and operating at 2.4 and 5 GHz. The results are discussed about connectivity situations, brand, and equipment use time. The highest exposure level was 4.66 V/m (7.64% of the legal limit), verified for the network operating at 2.4 GHz. Furthermore, the influence of the brand and model of the equipment on the measured levels of the average electric field was noted. Finally, measurements were carried out in 51 microwave ovens, of which only one exceeded 50 W/m<sup>2</sup> (the limit determined in current regulations). This radiation leak was caused by the presence of rust that compromised the structure of the oven door. Two types of repairs were performed on the oven: using epoxy putty to fill the opening in the door (Repair 1) and the replacement of the external surface of the oven (Repair 2). Only Repair 2 effectively solved the problem, generating a measurement with an average of 0.1841 W/m<sup>2</sup> and a peak of 0.4222 W/m<sup>2</sup> after the repair. As for the other 50 microwave ovens, the power density results were presented relating to factors such as the position of the worst measured point, brand, time of use, and state of conservation of the device. Given the results, it was possible to note the influence of the factors of time of use and state of conservation of the oven on the measured average power density.

**Keywords:** Non-Ionizing Radiation; NIR; Electric Field; Indoor Measurements; Shopping mall measurements; measurements in homes.

---

# Sumário

---

<b>Sumário</b>	<b>i</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>iv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Escopo de Realização do Trabalho . . . . .	2
1.2 Hipótese Científica e Objetivo Geral . . . . .	3
1.3 Objetivos Específicos . . . . .	3
1.4 Organização da Dissertação . . . . .	3
<b>2 Trabalhos Relacionados</b>	<b>5</b>
2.1 Estudo Quantitativo . . . . .	5
2.2 Estudo Qualitativo . . . . .	9
<b>3 Referencial Teórico</b>	<b>13</b>
3.1 RNI . . . . .	13
3.2 Legislação sobre RNI . . . . .	13
3.3 Breve Anatomia de um Forno Micro-ondas . . . . .	15
<b>4 Metodologia</b>	<b>17</b>
4.1 <i>Shopping Center</i> e Limites de Exposição . . . . .	17
4.1.1 Procedimento de Medição . . . . .	18
4.1.2 <i>Setup</i> de Medição . . . . .	19
4.1.3 Seleção dos Locais de Medição . . . . .	21
4.1.4 Definição do Cronograma de Medição . . . . .	22
4.2 Residências (Wi-Fi) . . . . .	22
4.2.1 <i>Setup</i> de medição . . . . .	23
4.2.2 Procedimento de Medição . . . . .	24
4.3 Residências (Forno de Micro-ondas) . . . . .	26
4.3.1 <i>Setup</i> de Medição . . . . .	26
4.3.2 Procedimento de Medição . . . . .	27
<b>5 Resultados e Discussões</b>	<b>28</b>
5.1 <i>Shopping Center</i> . . . . .	28
5.2 Residências (Wi-Fi) . . . . .	32

5.2.1	Situação de Medição . . . . .	33
5.2.2	Marca . . . . .	35
5.2.3	Tempo de Uso . . . . .	36
5.3	Residências (Forno de Micro-ondas) . . . . .	37
5.3.1	Pior Ponto . . . . .	37
5.3.2	Marca . . . . .	38
5.3.3	Tempo de Uso . . . . .	39
5.3.4	Estado de Conservação . . . . .	40
5.3.5	Forno de Micro-ondas <i>Outlier</i> . . . . .	41
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>43</b>
6.1	Produção acadêmica . . . . .	44
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>46</b>

---

# Lista de Figuras

---

2.1	Número de artigos por Abordagem. . . . .	6
2.2	Número de artigos por Conclusão. . . . .	7
2.3	Número de artigos por ano. . . . .	8
2.4	Número de artigos por país. . . . .	8
3.1	Ilustração da anatomia do forno de micro-ondas [1]. . . . .	16
4.1	Fotos do shopping alvo do estudo. . . . .	17
4.2	Foto do <i>setup</i> de medição. . . . .	20
4.3	Ilustração do <i>setup</i> de medição para um local selecionado, incluindo a área de isolamento, as duas condições de medição (perto e longe) e as Rodadas 1 e 2. . . . .	20
4.4	Amostra de locais selecionados no andar L1. . . . .	21
4.5	Amostra de locais selecionados no andar L2. . . . .	22
4.6	Foto do <i>setup</i> de medição para ponto de acesso Wi-Fi. . . . .	24
4.7	Configuração para o <i>smartphone</i> servidor. . . . .	25
4.8	Configuração para o <i>smartphone</i> cliente. . . . .	25
4.9	Foto do <i>setup</i> de medição para forno de micro-ondas. . . . .	27
5.1	Campo elétrico médio no cenário de alto número de pessoas. . . . .	29
5.2	Campo elétrico médio no cenário de baixo número de pessoas. . . . .	30
5.3	Campo elétrico médio na condição longe da antena. . . . .	31
5.4	Campo elétrico médio na condição perto da antena. . . . .	32
5.5	Exemplo de gráfico <i>boxplot</i> [2]. . . . .	33
5.6	Campo elétrico médio por situação de medição. . . . .	34
5.7	Campo elétrico médio por marca. . . . .	35
5.8	Campo elétrico médio por ano de aquisição. . . . .	36
5.9	Densidade de potência média por posição do pior ponto. . . . .	38
5.10	Densidade de potência média por marca. . . . .	39
5.11	Densidade de potência média por ano de aquisição. . . . .	40
5.12	Densidade de potência média por presença de sinais de uso. . . . .	41
5.13	Estado da porta do forno de micro-ondas <i>outlier</i> . . . . .	42

---

# Lista de Tabelas

---

2.1	Número de artigos por grupo de palavras-chave. . . . .	5
2.2	Resumo dos principais trabalhos de pesquisa sobre medições de RNI no <i>shopping</i> . . . . .	10
2.3	Resumo dos trabalhos relacionados sobre medições de RNI em forno de micro-ondas e sinal Wi-Fi. . . . .	11
3.1	Limites de exposição para campo elétrico e densidade de potência definidas pela ANATEL. [3] adaptado. . . . .	15
4.1	Limites de exposição para a população em geral (valores efetivos não perturbados). Adaptado de [3]. . . . .	18
5.1	Valor de pico e ER para cada local de medição selecionado. . . . .	28
5.2	Número de amostras de pontos de acesso Wi-Fi. . . . .	32
5.3	Número de amostras de fornos de micro-ondas. . . . .	37
5.4	Valor de média e pico de densidade de potência para o forno de micro-ondas <i>outlier</i> . . . . .	42

---

# Capítulo 1

## Introdução

---

Paralelamente aos benefícios do crescimento acelerado dos serviços de telecomunicações e às perspectivas de uma sociedade cada vez mais conectada, há uma preocupação internacional com a saúde de seres humanos sujeitos às fontes de Radiação Não Ionizante (RNI), pois seus efeitos no corpo humano podem ser potencialmente prejudiciais [4]. Por isso, a ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) se destaca mundialmente por definir diretrizes para limitar a exposição humana à RNI, que serve de base para muitos países, como o Brasil, onde a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) segue os mesmos princípios.

É fundamental acompanhar os níveis de radiação aos quais a população em geral pode estar exposta e compará-los com os padrões nacionais e internacionais vigentes, especialmente em ambientes *indoor*, tendo em vista que os usuários encontram-se a distâncias curtas dos aparelhos que emitem radiação, além de haver a tendência de permanecer nessas distâncias por períodos prolongados.

Ao comparar a exposição em casa e fora de casa, os autores de [5] concluem que a população está mais exposta em casa e seus resultados mostram uma influência significativa do uso do Wi-Fi. Esse mesmo estudo identificou que metade dos usuários (mediana) estão conectados 91% do tempo em casa e 29% do tempo fora de casa [5]. Visto isso, torna-se essencial acompanhar esses níveis de exposição nas residências, uma vez que a exposição mais que dobrou em um período de quatro anos, sendo o Wi-Fi o contribuinte mais significativo [5]. Ainda nas residências, há também uma sólida adesão ao uso de fornos de micro-ondas. Dado que há uma certa quantidade de vazamento de radiação não ionizante em torno de fornos de micro-ondas domésticos e que a exposição diária pode causar variações biológicas [6], esse ambiente passa a ser um alvo relevante para medições de RNI.

A ANATEL possui uma série de procedimentos práticos para mensurar os parâmetros necessários para avaliar a exposição humana à RNI, dentre elas, há a recomendação de avaliar a exposição em áreas de alta densidade de fluxo de pessoas [3] e, portanto, *shopping center* é uma área de interesse para o estudo. Tradicionalmente, os *shopping centers* possuem um Sistema de Antenas Distribuídas (DAS, do inglês *Distributed Antennas System*) celular, que é um conjunto de antenas de sinais de celular móvel, visando cobertura interna de voz e dados para melhoria da conectividade. Atualmente, esses DAS, geralmente co-localizados com pontos de acesso Wi-Fi, agregam sinais

de várias operadoras para fornecer cobertura e capacidade para 4G LTE e 5G NR. Enquanto lida com o problema da baixa cobertura *outdoor-to-indoor*, o sistema sem fio interno dos *shoppings* exige antenas próximas aos usuários finais. Como consequência, *shopping centers* são locais que também atendem aos interesses das medições, devido principalmente a grande quantidade de fontes de sinal *indoor*, sua localização em relação ao público e o grande fluxo de pessoas neste ambiente.

## 1.1 Escopo de Realização do Trabalho

A realização desse trabalho almeja continuar fomentando a integração científica entre professores, alunos de graduação, alunos de pós-graduação da UFRN e engenheiros da ANATEL. Essa cooperação possibilita o compartilhamento de conhecimento e de infraestrutura, algo positivo para UFRN, que pode usufruir de equipamentos certificados e calibrados que a ANATEL possui. Esse grupo de pesquisadores conta com duas publicações de destaque: a primeira abrange medição de campo elétrico nas bandas de VHF e UHF em vários pontos da cidade do Natal/RN [7]; e a segunda foca em medições na proximidade de estações base [8]. Além das publicações, o grupo conta também com os seguintes projetos de extensão:

- PJ160-2021: *Medições e avaliação de riscos à exposição de radiações não ionizantes à população em ambientes públicos e privados: uma contribuição de prevenção* (finalizado);
- PJ436-2022: *Medições e avaliação de riscos à exposição de radiações não ionizantes à população em ambientes públicos e privados: uma contribuição de prevenção à saúde pública* (finalizado);
- PJ388-2023: *Medições e Avaliação de Riscos à Exposição de Radiações Não Ionizantes à População: As Novas Gerações Tecnológicas e seus Impactos*.

Os projetos são coordenados pelo Prof. Dr. Gutemberg Soares da Silva, do Departamento de Engenharia de Comunicações (DCO/UFRN) e têm como membros o prof. Vicente Angelo de Sousa Junior (orientador deste trabalho) e o Engenheiro Halysson Barbosa Mendonça, da ANATEL. Em seu escopo geral, os projetos visam oferecer uma análise preventiva de riscos à população com avaliação do grau de exposição às radiações eletromagnéticas não-ionizantes em ambientes públicos internos e externos de ocupação adensada (*shoppings centers*, escolas públicas e universidades).

Como complemento, há também o interesse em trazer à população informação de forma responsável, tendo em vista que a precaução se faz necessária pela falta de uma conclusão oficial da Organização Mundial da Saúde (OMS) em relação aos efeitos da exposição humana à RNI. As medições e discussões deste trabalho se somarão aos resultados já expostos por outros autores e trazem as novidades apresentadas na Seção 2.2.

## 1.2 Hipótese Científica e Objetivo Geral

A hipótese científica deste trabalho de mestrado é materializada pela intenção de verificar o atendimento aos limites de RNI em ambientes internos. Partindo disso, o objetivo geral da pesquisa é medir a intensidade de campo eletromagnético em cenários internos, como residências e *shoppings*, almejando avaliar se os níveis de exposição estão dentro dos limites definidos nas diretrizes mais recentes da ANATEL e do ICNIRP. Especificamente, em *shoppings*, medindo os níveis de campo elétrico proveniente das antenas DAS e Wi-Fi; e em residências, fazendo medições nas proximidades do forno micro-ondas e de pontos de acesso Wi-Fi. Dessa forma, em caso de não atendimento aos padrões estabelecidos, há a possibilidade de adotar um planejamento de medidas preventivas com a finalidade de evitar ou diminuir a ocorrência de danos à saúde humana.

## 1.3 Objetivos Específicos

Guiado por esta hipótese científica, o objetivo geral pode ser alcançado por meio dos seguintes objetivos específicos:

- Realizar medições em *shoppings centers* em diferentes horários ao longo dia e a diferentes distâncias das antenas;
- Realizar medições em salas convencionais de residências que possuem dispositivos Wi-Fi operando somente em 2,4 GHz, somente em 5 GHz e em ambas as frequências ao mesmo tempo;
- Realizar medições, em residências ou ambientes de trabalho, na proximidade do forno micro-ondas;
- Realizar o levantamento de dados respeitando as metodologias de medição definidas pelo ICNIRP e ANATEL;
- Avaliar se os níveis de exposição obtidos em medição respeitam as diretrizes da ICNIRP e ANATEL;
- Apresentar as medições (e as conclusões qualitativas fruto de sua análise) para a comunidade científica por meio de artigos, recebendo comentários de especialistas em relação a metodologia de medição e os resultados alcançados.

## 1.4 Organização da Dissertação

Este documento está organizado como descrito a seguir. O Capítulo 2 apresenta uma análise quantitativa e qualitativa de trabalhos relacionados à RNI e à metodologia de medição de artigos já publicados nas bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus. Na sequência, é apresentando no Capítulo 3 todo o referencial teórico necessário para ter um entendimento satisfatório do trabalho. O Capítulo 4 apresenta o *setup*/metodologia de medição, enquanto apresenta e discute as recomendações da ANATEL e do ICNIRP sobre os níveis de exposição humana à RNI. A seguir, o Capítulo 5 apresenta e discute as medições de RNI realizadas em *shopping centers*, além de medições voltadas à emissão

proveniente de fornos micro-ondas e pontos de acesso Wi-Fi. Finalmente, no Capítulo 6 é apresentada a conclusão obtida das medições realizadas, bem como a produção acadêmica resultante do trabalho.

---

# Capítulo 2

## Trabalhos Relacionados

---

A RNI é uma temática multidisciplinar que relaciona tecnologia e engenharia à saúde, abrangendo áreas como biologia, medicina e telecomunicações. Como consequência, desperta a curiosidade de pesquisadores e da população. Esta seção apresenta algumas investigações envolvendo RNI, mostrando o interesse da comunidade científica nas últimas décadas. A maioria desses estudos se concentram em diferentes aspectos das medições e na comparação dos valores medidos com os limites estabelecidos de exposição humana.

### 2.1 Estudo Quantitativo

Foi realizado um levantamento nas bases de dados Scopus e Web of Science (WoS) para reunir a produção científica sobre RNI. Os dados de saída são organizados em quatro grupos de palavras-chave. Para os Grupos #1, #2 e #3, as buscas foram realizadas pelo título, resumo e palavras-chave das publicações, mas foram restritas pelo título para o Grupo #0, almejando evitar artigos fora da área de engenharia. A Tabela 2.1 mostra as estratégias de pesquisa, que foram feitas para os anos de 2002 a 2022.

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

Grupo	Palavras-chave	Pesquisa em	Scopus	WoS
#0	"Non-ionizing"AND "Radiation"	Título	236	177
#1	"Non-ionizing"AND "Radiation"AND "Measurement"	Título, resumo e palavras-chave	636	480
#2	#1 AND "Outdoor"	Título, resumo e palavras-chave	29	35
#3	#1 AND "Indoor"	Título, resumo e palavras-chave	35	31

Os resultados do Grupo #0 foram verificados novamente para garantir que os artigos fossem realmente relacionados aos efeitos da RNI, sua medição ou sua aplicação. Por meio da leitura do título, do resumo e da conclusão dos 50 artigos mais citados desse grupo na Scopus (base de dados com o maior número de artigos encontrados), foi realizada uma classificação em termos de:

- **Abordagem:** medições/experimentos em laboratório, revisões/discussões subjetivas, *surveys* ou legislação;
- **Conclusão:** pessimista, neutro ou otimista.

Quanto à classificação de Conclusão, as três opções estão relacionadas aos possíveis efeitos nocivos da RNI à saúde humana. Os artigos pessimistas concluem pela existência de tais efeitos, enquanto os otimistas concluem pela inexistência dos efeitos e os artigos neutros são inconclusivos.

Os resultados da classificação Abordagem são apresentados na Figura 2.1, enquanto os da classificação Conclusão são apresentados na Figura 2.2.

A partir da Figura 2.1, se conclui que a maioria das publicações são fruto de experimentos em laboratório ou de medições. Tais trabalhos geralmente abrangem experimentos baseados na exposição à RNI em animais e em plantas. Em segundo lugar de ocorrência estão os trabalhos que abordam revisões ou discussões subjetivas. Em relação à classificação Conclusão, a Figura 2.2 mostra que a maioria dos autores defende uma postura neutra sobre o assunto.

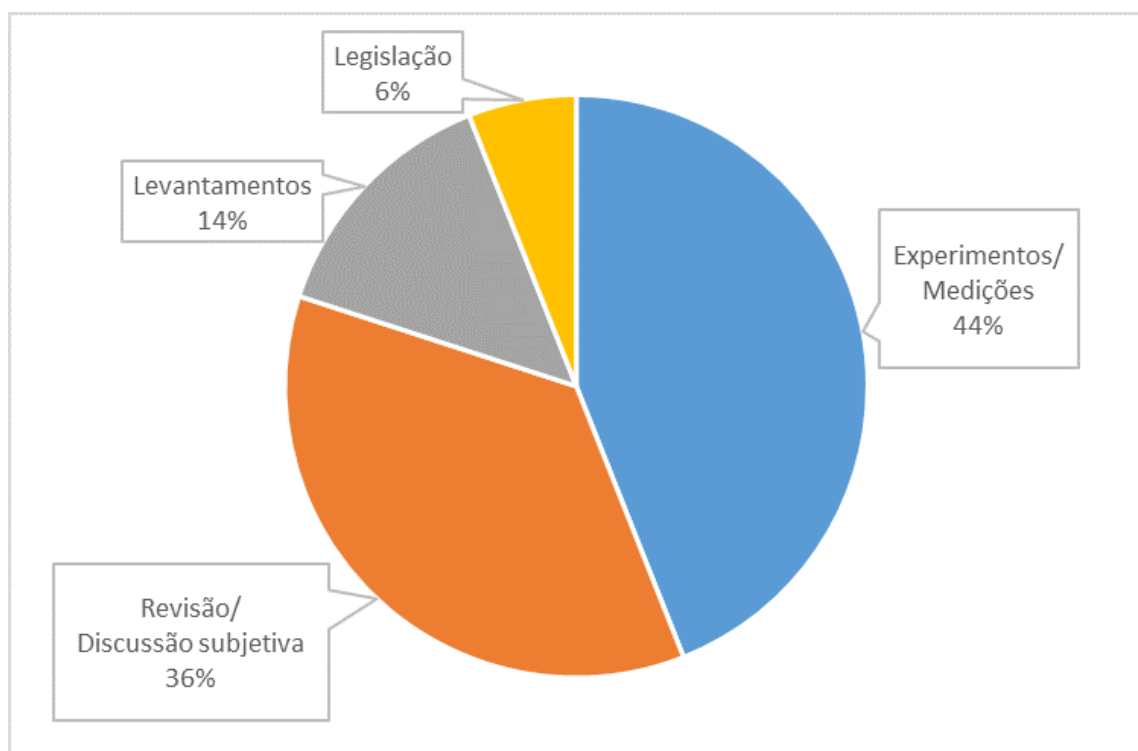


Figura 2.1: Número de artigos por Abordagem.

A busca baseada no Grupo #1 retorna diversas publicações estendendo-se a áreas como biologia e medicina. Em seguida, para reunir apenas publicações sobre mensuração da exposição geral da população ao RNI, em ambientes *indoor* ou *outdoor*, devido a serviços de telecomunicações ou eletrodomésticos, por exemplo, a estratégia de busca foi refinada, resultando nos Grupos #2 e #3.

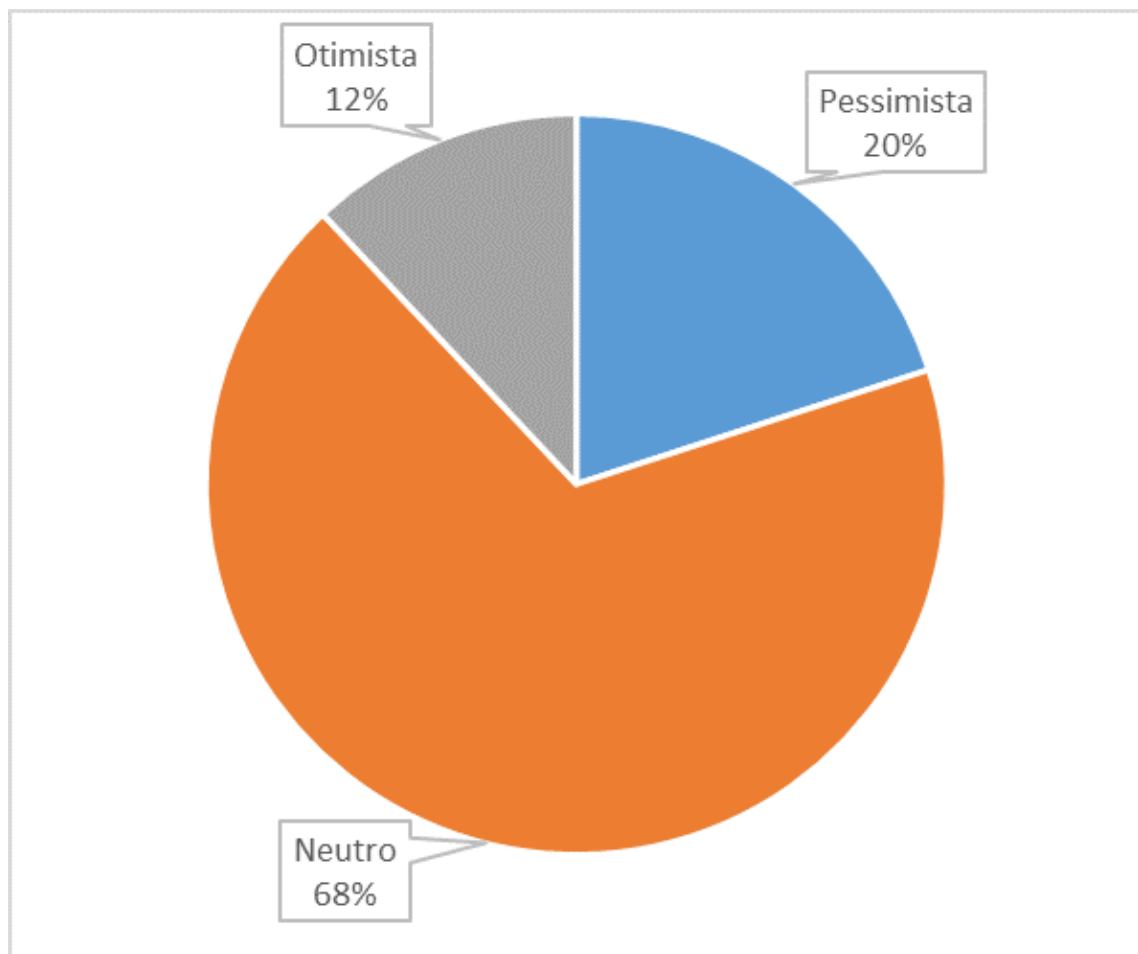


Figura 2.2: Número de artigos por Conclusão.

As primeiras publicações do Grupo #2 foram registradas nas bases de dados datadas de 2006 (Scopus e WoS). No entanto, para o Grupo #3, as primeiras publicações foram registradas mais cedo, em 2003 (WoS) e 2005 (Scopus).

A Figura 2.3 apresenta um desenho mais detalhado do desenvolvimento científico de medições *indoor* e *outdoor* da exposição da população em geral à RNI ao longo do tempo. Ela mostra o número de publicações nos últimos 20 anos para o Grupo #2 (G2) e Grupo #3 (G3) para ambas as bases. Há um aumento no número de publicações para ambos os grupos.

O próximo passo na análise quantitativa foi a busca de publicações por país, para identificar os locais mais comprometidos com a discussão do assunto RNI. A Figura 2.4 mostra os países com maior número de publicações sobre RNI em relação aos Grupos #2 e #3. A Bélgica se destaca no número de publicações, à frente de todos os outros países para ambos os grupos. Outro fato interessante é que apenas para a Grécia se verifica uma diferença significativa entre o número de trabalhos nos Grupos #2 e #3.

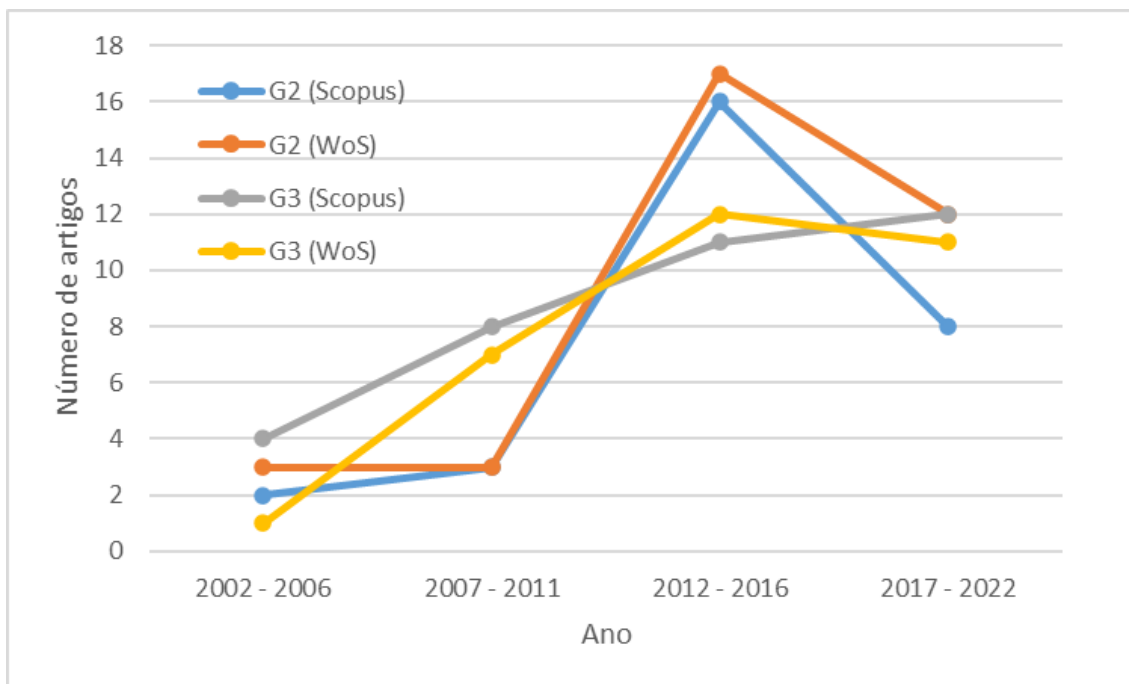


Figura 2.3: Número de artigos por ano.

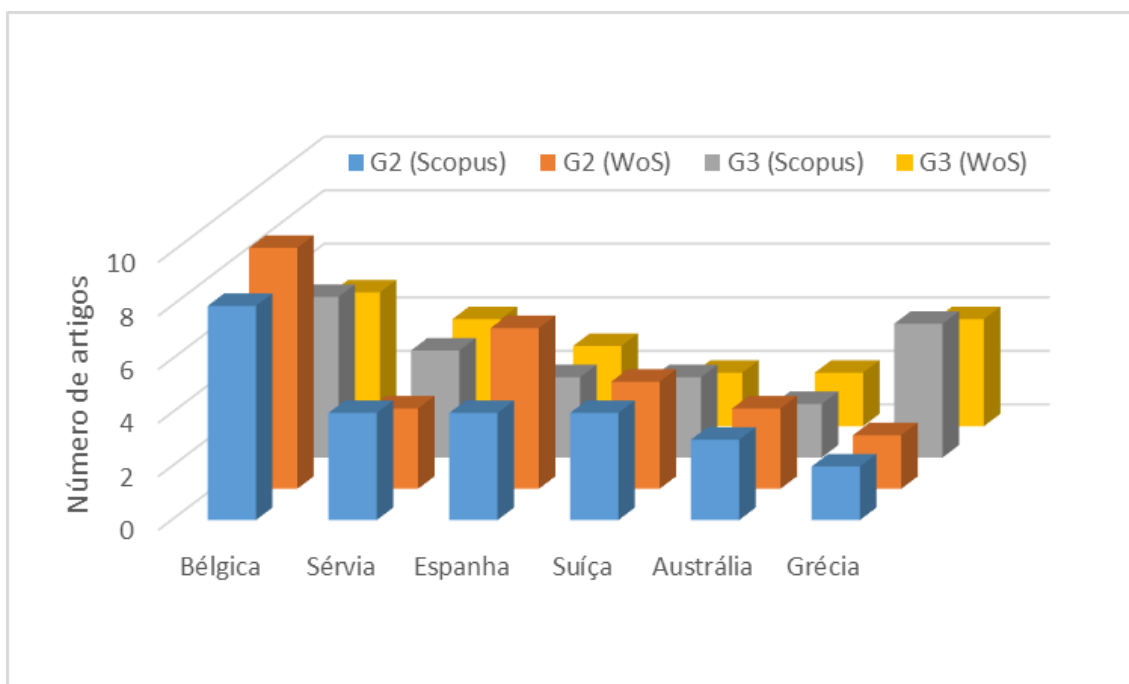


Figura 2.4: Número de artigos por país.

## 2.2 Estudo Qualitativo

Esta seção apresenta uma análise qualitativa dos trabalhos encontrados no Grupo #3, o grupo mais relacionado a este trabalho. Entre os primeiros trabalhos registrados, uma quantidade considerável realiza medições de campos elétricos e magnéticos devido à operação de subestações internas de distribuição de energia em 50 Hz [9, 10, 11]. O ambiente *indoor* é o foco de investigação em dois cenários principais: a emissão de aparelhos elétricos nas frequências baixas [12, 13, 14] e intermediárias [15], bem como a emissão de rádio frequência (RF), como de estações base GSM/UMTS [16] e 4G/LTE [17]. No contexto das telecomunicações, também existem medições de banda estreita envolvendo diferentes serviços de telecomunicações para diferentes ambientes, como prédios, escolas, hospitais e outros [18]. Essas medições apresentam os níveis de RNI estratificados por serviços. Por exemplo, é possível saber quanto as transmissões Wi-Fi influenciam no nível total de RNI.

Poucos estudos foram encontrados sobre medidas de RNI em *shopping centers* [19, 20, 21]. Em [19], as medições são focadas em Wi-Fi nas bandas de 2400–2500 MHz e 5150–5850 MHz (banda ISM, do Inglês *Industrial, Scientific and Medical*). A RNI foi medida usando um equipamento portátil o qual os voluntários carregavam durante a execução de tarefas rotineiras por 24 horas e, portanto, o estudo engloba diferentes ambientes, incluindo *shopping centers* [19]. Investigações em [20] avaliam os níveis de exposição à radiofrequência de estações base de celular externas e dentro de um shopping subterrâneo no Japão [20]. Por fim, os autores de [21] fornecem medições de banda larga em um *shopping center* durante 24 horas por dia, por uma semana, em um ponto fixo do local [21]. A Tabela 2.2 resume os principais pontos das publicações citadas, destacando a comparação com estudo proposto nesta dissertação em termos de:

- **Tempo de medição segue as recomendações do ICNIRP:** adotou-se um tempo de medição de 6 minutos, de acordo com [22, 3];
- **Medição de valores não perturbados segue as recomendações do ICNIRP:** a configuração de medição foi isolada para evitar a perturbação dos campos eletromagnéticos devido ao fluxo de pessoas nas proximidades. Um tripé de madeira foi usado para evitar materiais refletivos próximos ao equipamento de medição, conforme [22, 3];
- **Estudo da influência do número de pessoas no shopping nos níveis de RNI:** todos os pontos foram avaliados para dois cenários de densidade de fluxo de pessoas (baixo e alto número de pessoas);
- **Estudo da influência da distância da antena nos níveis de RNI:** medições RNI foram realizadas em duas distâncias diferentes da antena, conforme indicado no Capítulo 4.

Tabela 2.2: Resumo dos principais trabalhos de pesquisa sobre medições de RNI no *shopping*.

Referência	Tempo de medição segue as recomendações do ICNIRP	Medição de valores não perturbados segue as recomendações do ICNIRP	Estudo da influência do número de pessoas no shopping nos níveis de RNI	Estudo da influência da distância da antena nos níveis de RNI
[19]	✓	x	x	x
[20]	x	✓	x	x
[21]	✓	x	✓	x
Estudo proposto	✓	✓	✓	✓

Existe uma quantidade considerável de literatura abordando os efeitos da exposição RNI e como o corpo humano reage a ela em diferentes situações, embora a maioria dos resultados seja inconclusiva. Sobre a tecnologia Wi-Fi, os autores de [23] indicam que o campo eletromagnético de radiofrequência emitido pelos dispositivos Wi-Fi tem a capacidade de afetar o funcionamento normal do cérebro de jovens. Por sua vez, ao investigar o efeito da exposição de curto prazo aos sinais Wi-Fi nas funções cognitivas da mente, os autores de [24] concluíram que os resultados não observaram diferença estatisticamente significativa entre as pontuações médias do tempo de reação, de memória a curto prazo e de capacidade de raciocínio.

Quanto aos estudos referentes ao forno de micro-ondas, os efeitos da emissão do forno de micro-ondas no nível de estresse dos ratos foram avaliados por meio da medição da concentração plasmática de cortisol e identificou-se que os níveis de cortisol no plasma foram maiores no grupo exposto do que no grupo não exposto [6]. Ao avaliar os níveis de exposição de fornos de micro-ondas em uso doméstico e em restaurantes, os autores de [25] observaram uma influência da idade do forno nos níveis medidos, enquanto os autores de [26] não encontraram uma dependência clara. Até a data da escrita deste trabalho, não foram encontrados estudos que analisem o uso de Wi-Fi em residências em condições reais de operação residencial. Apesar disso, há medições de níveis de RNI provenientes de sinais Wi-Fi em universidades [27] e diversos ambientes [19]. Os principais resultados desses estudos estão resumidos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Resumo dos trabalhos relacionados sobre medições de RNI em forno de micro-ondas e sinal Wi-Fi.

Referência	Medição Proposta	Resultados
[25]	Medir emissão de 117 fornos de micro-ondas de uso em domicílio e em restaurante a uma distância de 1 m.	Variação de 0,43 a 16,4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ com um valor médio igual a 3,64 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (abaixo do limite de 1 $\text{mW}/\text{cm}^2$ ).
[26]	Medir a emissão de 116 fornos de micro-ondas de uso em domicílio e em restaurante, movendo a sonda do dispositivo de medição lentamente ao redor da superfície externa do forno a 5 cm.	Um forno apresentou vazamento superior ao limite de 5 $\text{mW}/\text{cm}^2$ , especificado na norma. Quinze fornos vazaram 1 $\text{mW}/\text{cm}^2$ ou mais, e o restante apresentou vazamento inferior a 1 $\text{mW}/\text{cm}^2$ .
[27]	Medir os níveis de exposição pessoal das bandas de Wi-Fi em pontos internos e externos da universidade.	A média mínima foi de 0.0900 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ em 2.4 GHz, em 2019, e a média máxima foi de 211 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ em 5.85 GHz, em 2017.
[19]	Medir a exposição pessoal na banda de Wi-Fi em diferentes microambientes.	A média mínima foi de 146.5 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ , em viagem, na banda de Wi-Fi 2G e 116.8 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ , em casa, na banda Wi-Fi 5G. Já a média máxima foi de 499.7 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ e 264.9 $\mu\text{W}/\text{m}^2$ , no local de trabalho, para a banda de Wi-Fi 2G e Wi-Fi 5G, respectivamente.

Portanto, motivado pela existência de poucos estudos que investiguem os níveis de exposição em *shopping centers* e em residências, além de saber da importância deste estudo, este trabalho fornece medições de RNI realizadas em um *shopping center* e residências em Natal, RN, Brasil. As principais contribuições dos resultados deste trabalho são:

- Análises qualitativas e quantitativas do estado da arte em investigações de RNI em medições *indoor* e *outdoor*;
- Medições inéditas para verificar a conformidade com as recomendações brasileiras e mundiais de exposição humana à RNI de DAS celular *indoor* com instalações de pontos de acesso Wi-Fi próximos dentro de um *shopping center*;
- Investigação sobre a dependência entre o nível de RNI e o número de pessoas no *shopping*, conforme discutido em [21];
- Investigação sobre a relação dos níveis RNI e a distância das antenas DAS;
- Medições inéditas para verificar a conformidade com as recomendações brasileiras e mundiais de exposição humana à RNI de pontos de acesso Wi-Fi instalados em residências;
- Investigação sobre a dependência entre o nível de RNI emitido pelo ponto de acesso

- Wi-Fi com situações de conectividade, marca e tempo de uso do equipamento;
- Medições inéditas para verificar a conformidade com as recomendações brasileiras e mundiais de exposição humana à RNI de forno de micro-ondas usados em residências.
  - Investigação sobre a dependência entre o nível de RNI emitido pelo forno de micro-ondas com posição do pior ponto medido, marca, tempo de uso e estado de conservação do equipamento.

---

# Capítulo 3

## Referencial Teórico

---

Para o domínio do trabalho, é importante reforçar conceitos, legislação e funcionamento das tecnologias envolvidas. Portanto, este capítulo apresenta um referencial teórico necessário para o entendimento do trabalho.

### 3.1 RNI

O conceito de radiação está associado ao fenômeno natural e físico que envolve a transmissão de energia por meio da propagação de ondas eletromagnéticas através do espaço ou meio físico, podendo desempenhar papéis importantes em diversas áreas da ciência e da tecnologia. A radiação é, ainda, dividida em dois grupos: ionizante e não ionizante. O que difere esses grupos é a frequência ou comprimento de onda que assumem no espectro eletromagnético e, conseqüentemente, seus efeitos sobre a matéria.

A Radiação Não Ionizante (RNI) ou, no inglês, *Non-Ionizing Radiation* (NIR), que é o foco deste trabalho, é definida como ondas eletromagnéticas cujos campos elétricos e magnéticos possuem energia suficiente para apenas elevar o estado de excitação de elétrons, sem ionizar a matéria. Caracteriza-se por possuir energia por fóton inferior a cerca de 12 eV e comprimentos de onda superiores a 100 nm (frequências inferiores a  $3 \cdot 10^{15}$  Hz) [22]. Logo, a RNI abrange a faixa das baixas frequências, ondas de rádio, micro-ondas, infravermelho, luz visível e a ultravioleta de baixa energia (UV-A).

### 3.2 Legislação sobre RNI

No cenário global, o ICNIRP é a principal organização internacional que define os regulamentos sobre a exposição à radiofrequência (RF). A organização definiu as primeiras diretrizes em 1998 [22] e, em seguida, as revisou em 2020 [28].

De maneira geral, o regulamento considera dois conjuntos distintos de limites para a exposição humana: limites para o público em geral e limites ocupacionais. O primeiro conjunto é feito para o grupo popular de pessoas que pode não estar ciente sobre a exposição. Por outro lado, os limites ocupacionais são definidos para trabalhadores sujeitos à exposição em um ambiente controlado e, portanto, podem tomar alguns procedimentos de precaução para reduzir a exposição. Sendo assim, os limites do público em geral costumam ser mais rígidos do que os ocupacionais.

As principais métricas levadas em consideração para limitar a exposição são:

- Densidade de potência: refere-se a medida da potência por unidade de área na direção da normal à área atravessada, expressa em watt por metro quadrado (W/m);
- Intensidade de campo eletromagnético: pode ser medida por meio do campo elétrico, em volt por metro (V/m), e por meio do campo magnético, em ampère por metro (A/m). São caracterizados por valores médios no tempo, ou seja, por meio de medições em um intervalo de tempo suficientemente longo;
- Taxa de absorção específica (ou SAR, do inglês, *Specific Absorption Rate*): corresponde a taxa de absorção de energia por tecidos do corpo, medida em watt por quilograma (W/kg).

A regulamentação que rege os níveis de radiação referente ao forno micro-ondas é um pouco mais específica. Muitos países adotam as abordagens definidas pela *Food and Drug Administration* (FDA)<sup>1</sup>, determinando o limite aceitável de vazamento de radiação como  $50 \text{ W/m}^2$  a partir da distância de 5 cm [29]. A FDA descreve também como devem ser realizadas as medições em fornos de micro-ondas, o que será tratado mais detalhadamente na Seção 4.3.

No contexto nacional brasileiro, a ANATEL é a instituição regulatória responsável por definir os limites adotados no país. Por meio da Resolução nº 303 de 2 de Julho de 2002, a ANATEL aprovou o regulamento que estabelece os limites de exposição na faixa de 9 kHz a 300 GHz [30]. Porém, foi somente em 2009 que os limites de exposição humana foram estabelecidos por lei, por meio da Lei nº 11.934 [31]. Então, em 2018, o regulamento brasileiro sobre a avaliação da exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos de radiofrequências foi atualizado por meio do Regulamento sobre a Avaliação da Exposição Humana a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Associados à Operação de Estações Transmissoras de Radiocomunicação, aprovado pela Resolução nº 700 [32], revogando, assim, a Resolução nº 303, mas ainda mantendo as condutas do ICNIRP 1998, como mostra a Tabela 3.1. E, por meio do Ato nº 458, de 24 de janeiro de 2019 [3], foram estabelecidos requisitos técnicos complementares a esse regulamento.

Assim como no contexto internacional, as medições no forno micro-ondas seguem uma metodologia específica no Brasil, a qual é regulamentada pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia) [33] e seguem as mesmas condutas da FDA.

---

<sup>1</sup>Agência federal do Departamento de Saúde e Serviços Humanos dos Estados Unidos.

Tabela 3.1: Limites de exposição para campo elétrico e densidade de potência definidas pela ANATEL. [3] adaptado.

<b>Limite ocupacional</b>		
<b>Frequência</b>	<b>Campo Elétrico [V/m]</b>	<b>Densidade de Potência [W/m<sup>2</sup>]</b>
8,3 kHz a 3,6 MHz	170	NA <sup>a</sup>
3,6 MHz a 10 MHz	610/ $f$	NA <sup>a</sup>
10 MHz a 400 MHz	61	10
400 MHz a 2 GHz	$3f^{0,5}$	$f/40$
2 GHz a 300 GHz	137	50
<b>Limite geral</b>		
<b>Frequência</b>	<b>Campo Elétrico [V/m]</b>	<b>Densidade de Potência [W/m<sup>2</sup>]</b>
8,3 kHz a 1 MHz	83	NA <sup>a</sup>
1 MHz a 10 MHz	$87/f^{0,5}$	NA <sup>a</sup>
10 MHz a 400 MHz	28	2
400 MHz a 2 GHz	$1,375f^{0,5}$	$f/200$
2 GHz a 300 GHz	61	10

<sup>a</sup>Não se aplicam limites para essa faixa de frequência.

### 3.3 Breve Anatomia de um Forno Micro-ondas

Um dos estudos de caso deste trabalho é a medição de vazamento de RNI em fornos de micro-ondas. Este tipo de dispositivo opera na faixa de frequência das micro-ondas, como o nome indica. Seguindo padrões internacionais, o equipamento opera na frequência de 2,45 GHz. Os componentes do forno micro-ondas são ilustrados na Figura 3.1 e dividem-se, em geral, entre duas funções: ajudar a cozinhar os alimentos e garantir que a radiação não vaze para a parte externa do forno.

O calor gerado para o cozimento é proveniente da força de atrito intermoleculares. As moléculas polares, como a água, presentes nos alimentos são excitadas sob a influência de um campo elétrico alternado gerado, movendo-se rapidamente e o atrito gerado entre elas produz calor [34]. O magnétron é responsável pela geração das micro-ondas que, por sua vez, são transportadas para a cavidade de cozimento através do guia de ondas.

Para evitar o vazamento da radiação, a cavidade de cozimento é uma estrutura de paredes grossas de aço inoxidável e funciona como uma gaiola de Faraday, bloqueando o vazamento das micro-ondas para o exterior do forno. Ademais, a porta do equipamento é feita, além de vidro, de uma superfície seletiva de frequência, a qual é projetada para atuar bloqueando a passagem das micro-ondas e permitindo a passagem de ondas de comprimentos inferiores, por esse motivo há a passagem da luz (que tem comprimento de onda menor que as micro-ondas). Uma outra função de segurança importante é que a abertura da porta aciona um mecanismo para cortar a alimentação do magnétron.

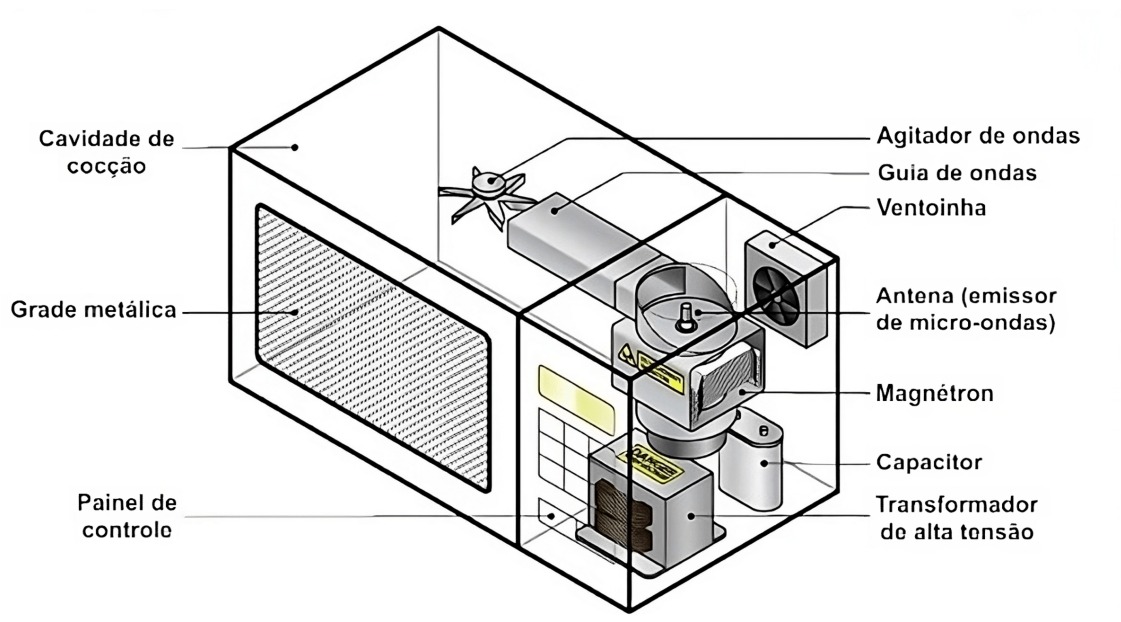


Figura 3.1: Ilustração da anatomia do forno de micro-ondas [1].

---

# Capítulo 4

## Metodologia

---

Nesta seção apresenta-se a metodologia utilizada no trabalho ao nível dos procedimentos, equipamentos e campanhas de medições. Cada objeto de estudo teve uma metodologia de medição específica a ser seguida e foi baseada em documentos de diferentes órgãos competentes.

### 4.1 *Shopping Center e Limites de Exposição*

Todas as medições foram realizadas no Natal Shopping, localizado em Natal, estado do Rio Grande do Norte, cidade da região nordeste do Brasil. O edifício comercial possui três andares compostos por longos e amplos corredores com lojas, praças de alimentação e algumas áreas de entretenimento e tem também um edifício de garagem, como ilustra a Figura 4.1. Algumas reuniões foram feitas com o corpo administrativo do *shopping*, com a finalidade de explicar a motivação e o procedimento de medição, além de solicitar autorização para realização do trabalho, que foi prontamente atendida.



Figura 4.1: Fotos do shopping alvo do estudo.

A metodologia de investigação utilizada no *shopping center* em termos de procedimento e configuração, bem como local e cronograma de medições, foram baseadas em recomendações e diretrizes definidas pela ANATEL e ICNIRP.

Como apresentado no Capítulo 3, as recomendações brasileiras vinculadas à avaliação de RNI são definidas pela lei federal brasileira 11.934/2009 [35] e pelo ato 458/2019 [3], que estabelece limites para exposição humana à RNI com base nas diretrizes da ICNIRP. Para facilitar a inspeção, os limites de exposição para a população geral estão novamente apresentados na Tabela 4.1. São considerados valores não perturbados, ou seja, com medições na ausência de indivíduos potencialmente expostos e sem a introdução de objetos capazes de absorver ou refletir ondas durante o processo de medição [3]. O valor  $f$  tem a mesma unidade indicada na coluna Faixa de Radiofrequência [3].

Tabela 4.1: Limites de exposição para a população em geral (valores efetivos não perturbados). Adaptado de [3].

Faixa de radiofrequência	Intensidade de Campo Elétrico, $E$ (V/m)	Densidade de Potência de Onda Plana Equivalente, $S_{eq}$ (W/m <sup>2</sup> )
10 MHz to 400 MHz	28	2
400 MHz to 2000 MHz	$1.375f^{0.5}$	$f/200$
2 GHz to 300 GHz	61	10

De acordo com a ANATEL [36], o espectro alocado para operadoras de rede móvel (até o 4G) no Brasil é de 880 MHz a 2600 MHz. Como mencionado anteriormente, o *shopping* também possui alguns pontos de acesso Wi-Fi em 2,4 e 5 GHz. Assim, foi realizada uma medição de banda larga abrangendo essas três faixas do espectro. De acordo com a equação na Tabela 4.1, o limite de exposição calculado usado na análise aqui apresentada é 40,79 V/m ( $f = 880$  MHz), representando a frequência mais baixa possível, de forma a expressar o caso mais conservador (limite mais rigoroso).

De acordo com [3], campos elétricos foram medidos considerando:

- Medições em pontos de radiação máxima da estação transmissora sendo avaliada;
- Medições em áreas de grande densidade de fluxo de pessoas;
- Como se trata de frequências de rádio entre 100 kHz e 10 GHz, a média de tempo de seis minutos em cada medição.

#### 4.1.1 Procedimento de Medição

As antenas DAS instaladas no shopping alvo das medições deste trabalho são as I-ATO1-800/2500 da Radio Frequency Systems (RFS) [37]. Para confirmar que as medidas de campo elétrico (V/m) são feitas na região de campo distante do transmissor, a distância de Fraunhofer é calculada usando a Equação 4.1.

$$\frac{2D^2}{\lambda}, \quad (4.1)$$

sendo  $D$  a maior dimensão da antena e  $\lambda$  o comprimento de onda. Assim, para o pior caso no espectro de frequência alvo, tem-se  $2 \cdot 0,067^2 / [3 \cdot 10^8 / (2600 \cdot 10^6)] = 7,78$  cm.

Como as antenas do DAS estão posicionadas no teto do shopping (altura equivalente a dois andares residenciais), todos os possíveis pontos de medição no andar estão localizados no campo distante da antena, pois a altura da sonda de medição definida em [3] é 1,7 m do chão. Na prática, existem mais modelos de antenas instalados, mas todos eles são semelhantes ao I-ATO1-800/2500, levando basicamente à mesma conclusão em termos de distância da região de campo distante.

Levando em consideração as recomendações de [3], um ponto selecionado para medições consideraria a distância do emissor e seu diagrama de radiação. Em seguida, após alguns testes preliminares, duas **condições de medição** foram definidas: perto e longe. Considerando a origem como a projeção da antena no solo, o ponto de medição próximo foi fixado a três passos da origem, e enquanto o ponto de medição distante foi fixado a dez passos da origem. Assim, uma vez definida uma linha de azimute relevante, foram realizadas medições próximas e distantes nas duas orientações opostas ao longo da linha: medições para uma orientação foram denominadas como Rodada 1 e para a orientação oposta Rodada 2. Assim, há quatro medições para cada local selecionado. Cada quatro pontos para o mesmo lugar são nomeados com o mesmo número, conforme ilustrado na Figura 4.3.

#### 4.1.2 *Setup* de Medição

A configuração de medição inclui a seguinte lista de equipamentos:

- Narda Broadband Field Meter NBM-520 (100 kHz - 60 GHz) [38];
- Sonda NBM E-Field-Probe EF 0691 (100 kHz - 6 GHz) [39];
- Tripé de madeira.

Além disso, uma faixa de isolamento da área foi usada para garantir o distanciamento do público em um raio de 2 metros da sonda de medição, conforme definido em [3]. A Figura 4.2 mostra uma foto tirada no momento de umas das medições e é possível observar o *setup* utilizado.

Figura 4.3 ilustra a configuração de medição, incluindo a área de isolamento, as duas condições de medição (perto e longe) e as rodadas de medição. O desenho nesta figura ilustra os quatro pontos de medição relacionados à antena DAS no teto.



Figura 4.2: Foto do *setup* de medição.

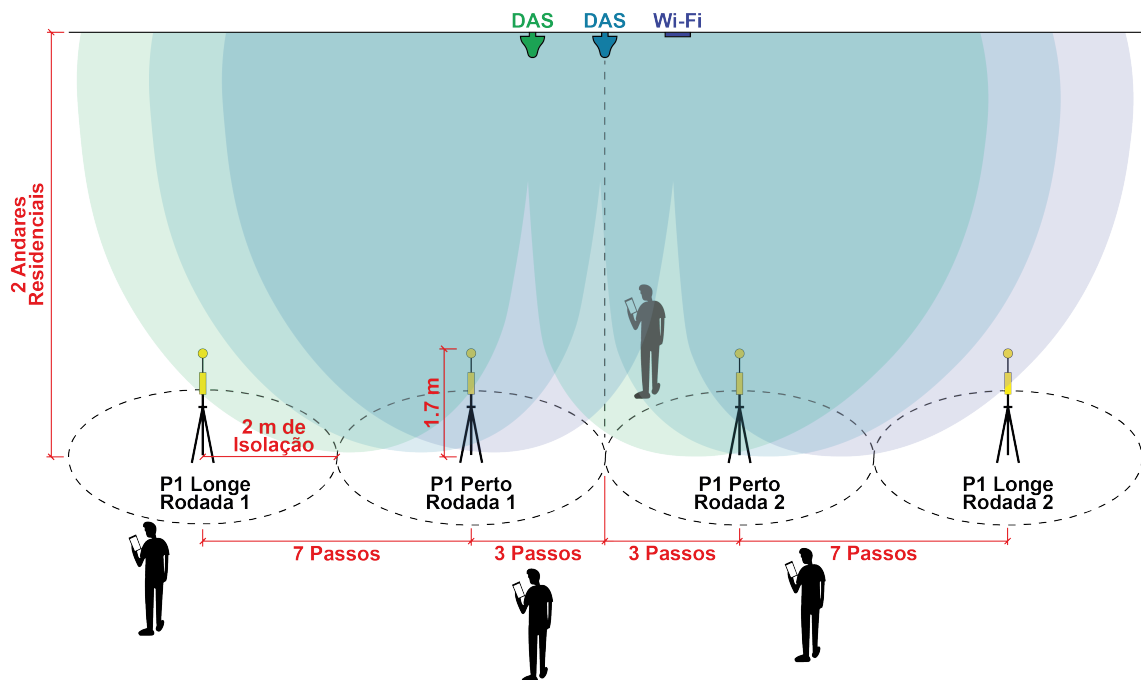


Figura 4.3: Ilustração do *setup* de medição para um local selecionado, incluindo a área de isolamento, as duas condições de medição (perto e longe) e as Rodadas 1 e 2.

### 4.1.3 Seleção dos Locais de Medição

Todos os locais de medição foram definidos levando em consideração dois requisitos importantes:

- Presença de um ou mais DAS, co-instalados ou não com pontos de acesso Wi-Fi;
- Grande fluxo de pessoas.

Assim, foram estabelecidos um total de seis locais de medição (três por andar), como mostram as Figuras 4.4 e 4.5. Cada local selecionado dá origem a quatro pontos de medição com o número do local e uma indicação de sua categoria de condição (distância até a antena DAS).



Figura 4.4: Amostra de locais selecionados no andar L1.

Em cada andar, os locais de medição são numerados de 1 a 3. O sufixo L1 ou L2 designa os locais do primeiro ou segundo andar, respectivamente. No primeiro andar, locais selecionados estão localizados próximos ou dentro da praça de alimentação principal. Dois pontos no segundo andar (P2L2 e P3L2) estão localizados na área comercial, e o terceiro (P1L2) está localizado próximo aos restaurantes.



(a) P1L2

(b) P2L2

(c) P3L2

Figura 4.5: Amostra de locais selecionados no andar L2.

#### 4.1.4 Definição do Cronograma de Medição

Visitando a página do Natal Shopping no Google, foram consultadas as informações de *Horas Populares* [40] para verificar a densidade do fluxo de pessoas categorizado por dias da semana e horário. As métricas do Google mostraram uma baixa densidade de fluxo de pessoas às 10h (horário de abertura do shopping) e uma alta densidade de fluxo às 16h, especialmente às sextas-feiras. Assim, dois cenários de medição foram definidos: baixa e alta densidade de fluxo de pessoas.

Portanto, as campanhas de medição foram realizadas em dois dias da semana e em dois horários diferentes para incluir os dois cenários com o seguinte cronograma:

- Terça-feira de manhã (10h00 - 12h00): baixo número de pessoas;
- Sexta-feira à tarde (16:00 - 18:00): grande número de pessoas.

As medições foram feitas ao longo de duas semanas: a primeira dedicada ao segundo andar e a segunda dedicada ao primeiro andar.

Então, foram estabelecidas duas **condições** (*perto e longe*) e dois **cenários** de fluxo de pessoas no shopping (*baixo e alto* número de pessoas). Para possibilitar a comparação, os pontos de medição selecionados foram exatamente os mesmos para ambos os cenários.

## 4.2 Residências (Wi-Fi)

Para as investigações do Wi-Fi, a metodologia baseia-se nas mesmas recomendações utilizadas na Seção 4.1. Dessa forma, refere-se aos limites de exposição humana à RNI e as recomendações da lei federal brasileira 11.934/2009 [35] e o ato 458/2019 [3].

Como é apresentado na Tabela 4.1, para frequências entre 2 GHz e 300 GHz, o limite de campo elétrico descrito é 61 V/m, portanto, esse foi o limite adotado no estudo. Uma vez que os objetos de estudo operam em 2,4 GHz e 5 GHz, optou-se por desconsiderar a

influência de qualquer transmissão ocorrendo fora dessa faixa de frequência, pois, como é mostrado mais adiante neste trabalho, ao realizar as medições com o ponto de acesso desligado, identificou-se níveis de RNI quase nulos.

Além disso, como é definido em [3], para frequências de rádio entre 100 kHz e 10 GHz, utilizou-se o tempo médio de seis minutos de medições. Ainda de acordo com [3], o ponto de medição também deve estar localizado na região de campo distante (Fraunhofer) da antena do transmissor. Portanto, a Equação 4.1 também foi utilizada para calcular a distância em que a região de campo distante é considerada para a antena de maiores dimensões encontrada no equipamento medido. No cenário mais desfavorável do espectro de frequência alvo, tem-se  $2 \cdot 0.067^2 / [3 \cdot 10^8 / (5 \cdot 10^9)] = 7,48$  cm. Este resultado foi considerado na construção do procedimento de medição.

### 4.2.1 Setup de medição

A configuração de medição consistiu nos seguintes equipamentos:

- Narda Broadband Field Meter NBM-520 (100 kHz - 60 GHz) [38];
- Sonda NBM E-Field-Probe EF 0691 (100 kHz - 6 GHz) [39];;
- Tripé de madeira;
- 2 *smartphones* com conectividade Wi-Fi de 2,4 GHz e 5 GHz.
  - *Smartphone* 1: Samsung Galaxy A03;
  - *Smartphone* 2: Motorola Moto G5.

O aparelho Narda NBM-520 foi posicionado a uma distância de 50 cm do ponto de acesso Wi-Fi, com na ilustrado na Figura 4.6. A motivação para esta disposição é simular o pior caso de exposição à RNI em cenários residenciais, em que os equipamentos de medição representam uma pessoa próxima do ponto de acesso Wi-Fi a fim de obter a melhor qualidade de conexão possível, situação muito comum em residências. É um fato que dispositivos Wi-Fi tem cobertura limitada, além de interferência não controlada entre pontos de acesso vizinhos. Isso faz com que a operação com qualidade ainda seja mais limitada ainda em termos de distância, fazendo com que os usuários de redes Wi-Fi estejam cada vez mais perto do ponto de acesso.

Os terminais móveis foram posicionados a uma distância de 2 metros do equipamento de medição, conforme determinado em [3]. Essa distância é especificada para que a presença dos terminais não ofereça distorções nas métricas obtidas nas medições, comportamento que pode ocorrer devido à sensibilidade da sonda.



Figura 4.6: Foto do *setup* de medição para ponto de acesso Wi-Fi.

### 4.2.2 Procedimento de Medição

Foram realizadas 40 medições de campo elétrico (V/m) provenientes de pontos de acesso Wi-Fi diferentes. Nas campanhas, foram avaliados quatro situações:

- Situação 1: ambos os terminais móveis conectados à rede 2,4 GHz;
- Situação 2: ambos os terminais móveis conectados à rede de 5 GHz;
- Situação 3: um terminal conectado à rede 2,4 GHz e outro conectado à rede 5 GHz;
- Situação 4: ponto de acesso Wi-Fi desligado (sem emissão de sinal).

Nos três primeiros cenários, o aplicativo Magic iPerf foi utilizado para estabelecer uma comunicação controlada entre os *smartphones*, por meio do ponto de acesso Wi-Fi, permitindo uma conexão com máxima taxa de transferência de dados. Este aplicativo

configura um *smartphone* como servidor e outro como cliente e estabelece o tráfego entre os dois dispositivos a uma determinada taxa configurável. No *smartphone* correspondente ao servidor, foi configurado como *-s*, como mostra a Figura 4.7.

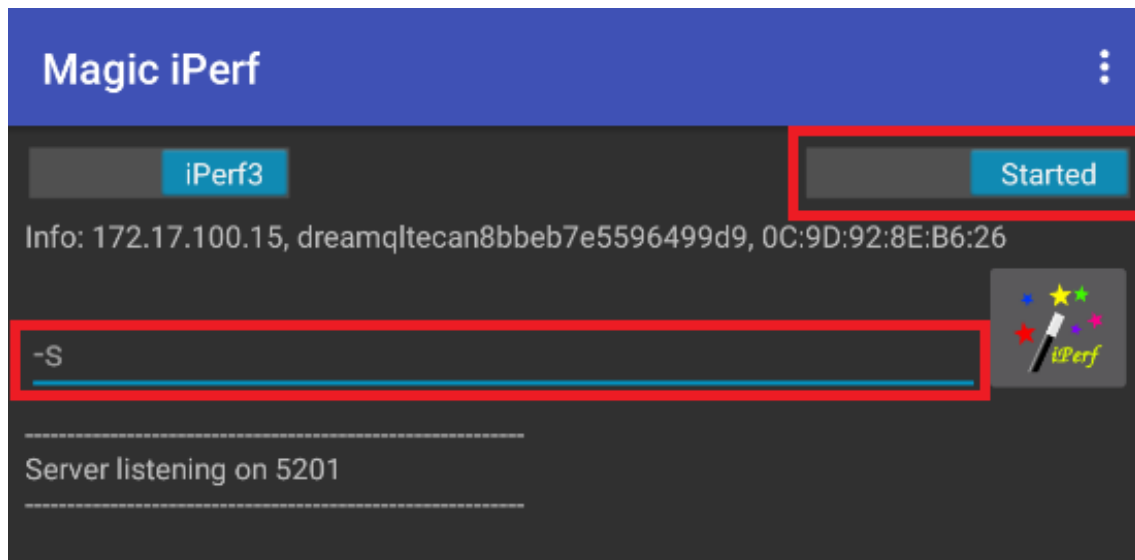


Figura 4.7: Configuração para o *smartphone* servidor.

No *smartphone* referente ao cliente, habilitou-se os botões mostrados na Figura 4.8 e configurou-se os demais campos como a descrição a seguir:

- Campo *Host*: endereço de IP do servidor (disponível na tela inicial do *smartphone* servidor);
- Campo *Rate*: valor de 1000M (1000 Mbps) para garantir que a rede utilize a maior taxa de transmissão disponível;
- Campo *Duration*: 360 (segundos), equivalente aos seis minutos de medição.

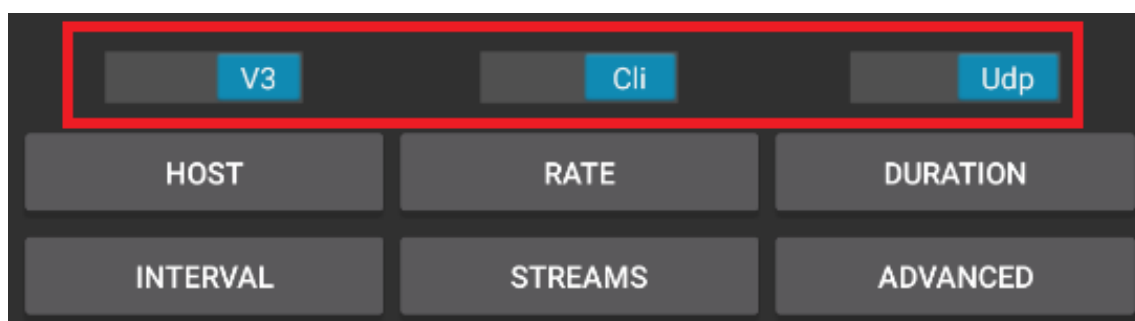


Figura 4.8: Configuração para o *smartphone* cliente.

Essa configuração tenta garantir que a camada física terá sinal para transmitir constantemente, estabelecendo uma situação de pior caso.

Os cenários foram submetidos a medições de 6 minutos, exceto o caso em que o ponto de acesso está desligado, o qual durou 1 minuto, uma vez que este cenário não se enquadra nas condições exigidas por [35] ou [3].

### 4.3 Residências (Forno de Micro-ondas)

Como já apresentado no Capítulo 3, no Brasil, a regulamentação de qualidade e os parâmetros limites para fornos de micro-ondas são estabelecidos pela portaria número 174 de 10 de abril de 2012 [33] do INMETRO. A metodologia de avaliação apresentada neste documento é congruente com o estabelecido em [29] pela FDA dos Estados Unidos. Assim, embasado pelo procedimento estabelecido pelo INMETRO, a metodologia de medição deste trabalho estabelece:

- As medições devem ser feitas com o forno de micro-ondas operando em sua potência máxima;
- Deve ser utilizada carga de 275 +/-15 mililitros de água da torneira inicialmente a 20 +/-2 graus centígrados depositada em recipiente de vidro borossilicato com diâmetro interno de aproximadamente 85 mm colocado no centro do porta-cargas, superfície fornecida pelo fabricante do forno;
- A medição deve ser feita com um instrumento que atinja 90% de sua leitura em estado estacionário em 2 ou 3 segundos, quando submetido à intensidade do sinal de vazamento;
- A densidade de potência equivalente existente nas proximidades da superfície externa do forno não deve exceder 50 watts por metro quadrado (50 W/m<sup>2</sup>) em qualquer ponto a 5 centímetros ou mais da superfície externa do forno.

#### 4.3.1 Setup de Medição

A configuração de medição consistiu nos seguintes equipamentos:

- Narda Broadband Field Meter NBM-520 (100 kHz - 60 GHz) [38];
- Sonda NBM E-Field-Probe EF 0691 (100 kHz - 6 GHz) [39];
- Recipiente de vidro borossilicato com 85 mm de diâmetro e 400 ml de capacidade total.

As medições foram realizadas com o Narda em mãos, respeitando a distância de 5 cm entre a superfície do forno e a sonda, determinada por [33]. Um exemplo de configuração de medição é mostrado na Figura 4.9.



Figura 4.9: Foto do *setup* de medição para forno de micro-ondas.

### 4.3.2 Procedimento de Medição

A metodologia de medição foi aplicada a 51 fornos de micro-ondas diferentes, resultando em valores de densidade de potência ( $W/m^2$ ) considerando duas situações de medição:

- Medição 01: medição de 1 minuto na frente do micro-ondas com o mesmo ligado;
- Medição 02: buscou-se a maior emissão entre as demais faces do micro-ondas (lado superior, esquerdo e direito) por meio de uma medição de 10 segundos em cada face. Em seguida, foi realizada uma medição de 1 minuto na face que foi encontrado o maior valor de densidade de potência;
- Medição 03: medição de 1 minuto na frente do micro-ondas com o mesmo desligado.

Com essas situações de medição, foram obtidas medições na frente do forno micro-ondas em operação e desligado, bem como em outro ponto onde apresentava a maior emissão (cima, lado esquerdo ou direito).

---

# Capítulo 5

## Resultados e Discussões

---

### 5.1 *Shopping Center*

A Tabela 5.1 mostra os valores de pico encontrados para cada local de medição, selecionado do ponto-alvo, indicando condições, cenários, valor de pico do campo elétrico e taxa de exposição (ER, do inglês, *exposure ratio*), que é a relação entre o valor de pico medido e o limite de exposição definido pela legislação, expresso em porcentagem para duas exposições limites:

- Situação adequada de campanhas realizadas (medidas de sinais DAS com  $f = 880$  MHz);
- Situação muito conservadora (pessimista), incluindo frequências de transmissão FM de  $f = 88$  MHz.

Tabela 5.1: Valor de pico e ER para cada local de medição selecionado.

Ponto	Condição do Ponto (distância)	Cenário (número de pessoas)	Pico do Campo Elétrico (V/m)	ER (%) ( $f = 880$ MHz)	ER (%) ( $f = 88$ MHz)
P1L1	Longe	Alto	1,68	4,12	6,00
P2L1	Perto	Alto	2,90	7,11	10,35
P3L1	Longe	Alto	1,68	4,12	6,00
P1L2	Perto	Alto	2,69	6,59	9,60
P2L2	Longe	Baixo	1,51	3,70	5,39
P3L2	Perto	Baixo	3,26	7,99	11,64

Analisando a categoria de condição (distância das antenas DAS), observam-se maiores valores de pico para a condição próxima. O padrão de elevação do diagrama de radiação da antena do DAS desempenha um papel fundamental nesta análise e, portanto, considera-se que seu ângulo de meia potência, perda de percurso e condições de propagação são responsáveis pelos níveis mais baixos em longas distâncias.

Por outro lado, avaliando a cenário (número de pessoas), para um número de pessoas alto se esperava um maior uso de telefones celulares, pois mais pessoas estão no shopping, levando a valores mais altos de RNI. No entanto, não é possível identificar uma relação forte entre o cenário (número de pessoas) e os valores de pico. Certamente, a rede celular

estará mais ou menos carregada dependendo também do perfil de geração de tráfego de cada usuário, variável impossível de controlar no experimento realizado no shopping.

A fim de analisar os resultados da campo elétrico médio para a condição (distância das antenas DAS), os dados medidos com o mesmo cenário foram agrupados e mostrados separadamente nas Figuras 5.1 e 5.2 para alto e baixo número de pessoas, respectivamente. As figuras apresentam os valores médios de RNI para as duas rodadas de medição realizadas. As rodadas são identificadas como R1 e R2, para cada um dos seis locais de medição definidos. Então, considerando o total de lugares, rodadas e condições (perto e longe), as figuras apresentam um total de 24 medições.

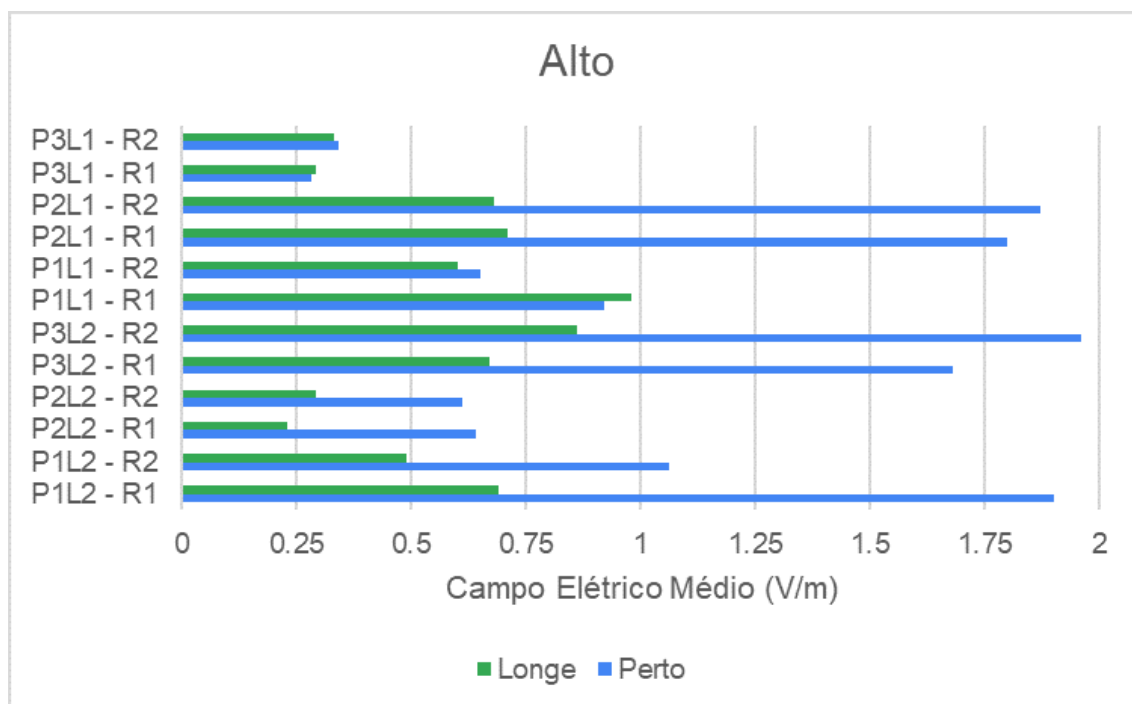


Figura 5.1: Campo elétrico médio no cenário de alto número de pessoas.

Sobre a relação entre a categoria de condição (distância das antenas DAS) e os valores de campo elétrico medidos, chega-se à mesma conclusão apresentada para os valores de campo elétrico de pico na Tabela 5.1: em geral, maiores níveis de RNI média são observados para a condição de medição próxima ao DAS.

Alguns resultados surpreendentes são notados e destacados nas seguintes discussões adicionais:

- O nível médio de RNI para a condição de perto é menor do que para a condição de longe em uma das rodadas de medição para os locais P1L1 e P3L1 na Figura 5.1, bem como em P2L2 na Figura 5.2. É possível que esse comportamento seja influenciado pela carga da rede celular no momento das duas medições, levando a situação de maior carga (consequentemente maior emissão) para condição de medição longe, quando comparada a condição perto. Infelizmente, devido a natureza das medições, essa hipótese não pôde ser investigada;

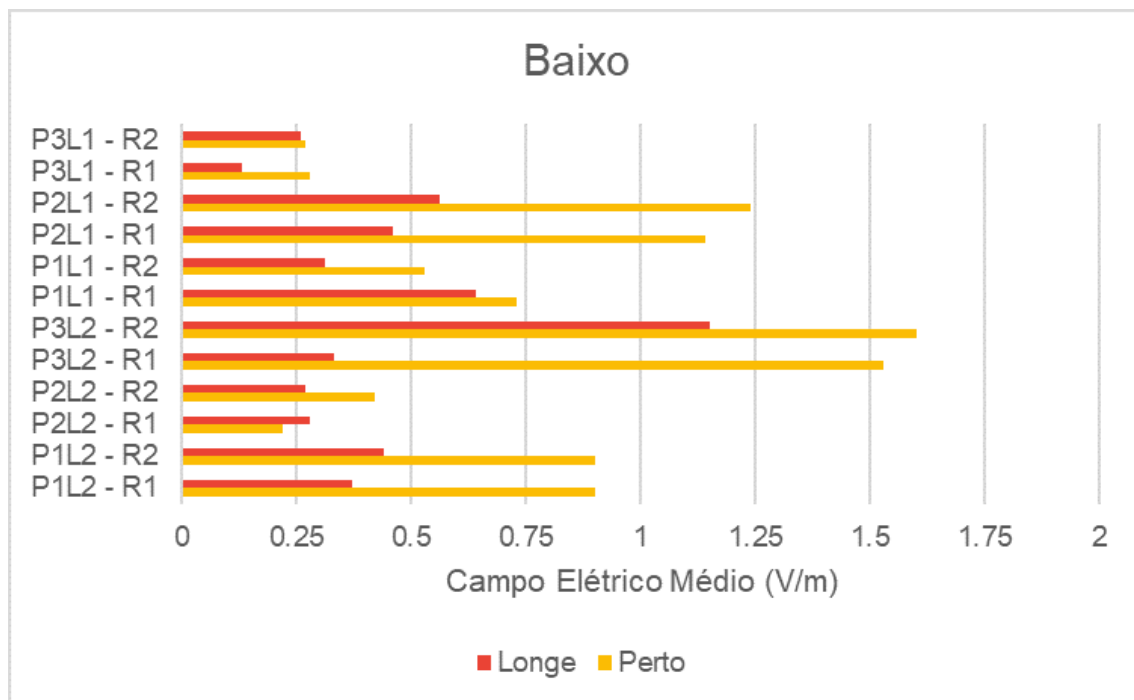


Figura 5.2: Campo elétrico médio no cenário de baixo número de pessoas.

- Os pontos mencionados também apresentam os menores níveis de campo elétrico e a menor variação com a mudança da distância. Embora mais investigações devam ser feitas, a pequena variação com a distância sugere condições peculiares de propagação, como algum grau de canalização. Em ambas as figuras, é particularmente evidente para o local P3L1, que é um ponto de corredor;
- Por outro lado, os locais P2L1, P1L2 e P3L2 apresentaram um comportamento bem definido quanto à categoria de condição. P2L1 e P1L2 apresentam mais de uma antena DAS e/ou antena Wi-Fi nas proximidades. Eles também estão perto de restaurantes, onde as pessoas ficam por um longo tempo. O P3L2 é o local com maior número de antenas DAS juntas e está localizado no corredor do shopping. Assim, como esperado, este local apresenta níveis medidos mais elevados. Além de possuir os maiores valores medidos, para esses pontos, a influência da distância torna-se mais visível. Possivelmente, isso pode ser explicado por uma composição de diagramas de radiação das múltiplas antenas DAS posicionadas naquele local.

Para analisar os resultados médios de RNI dos cenários (número de pessoas), os dados medidos com a mesma condição foram agrupados e mostrados separadamente nas Figuras 5.3 e 5.4 para as distâncias perto e longe da antena DAS, respectivamente. As figuras apresentam os valores médios de RNI para as duas rodadas de medição realizadas. As rodadas são identificadas da mesma forma explicada para as duas figuras anteriores.

Comparando as categorias de cenários (baixo e alto número de pessoas), os valores médios apresentam um comportamento bem definido quando comparados aos picos apresentados na análise da Tabela 5.1. Para os valores médios de RNI, observa-se uma relação direta entre o aumento da densidade de fluxo de pessoas e o aumento da exposição

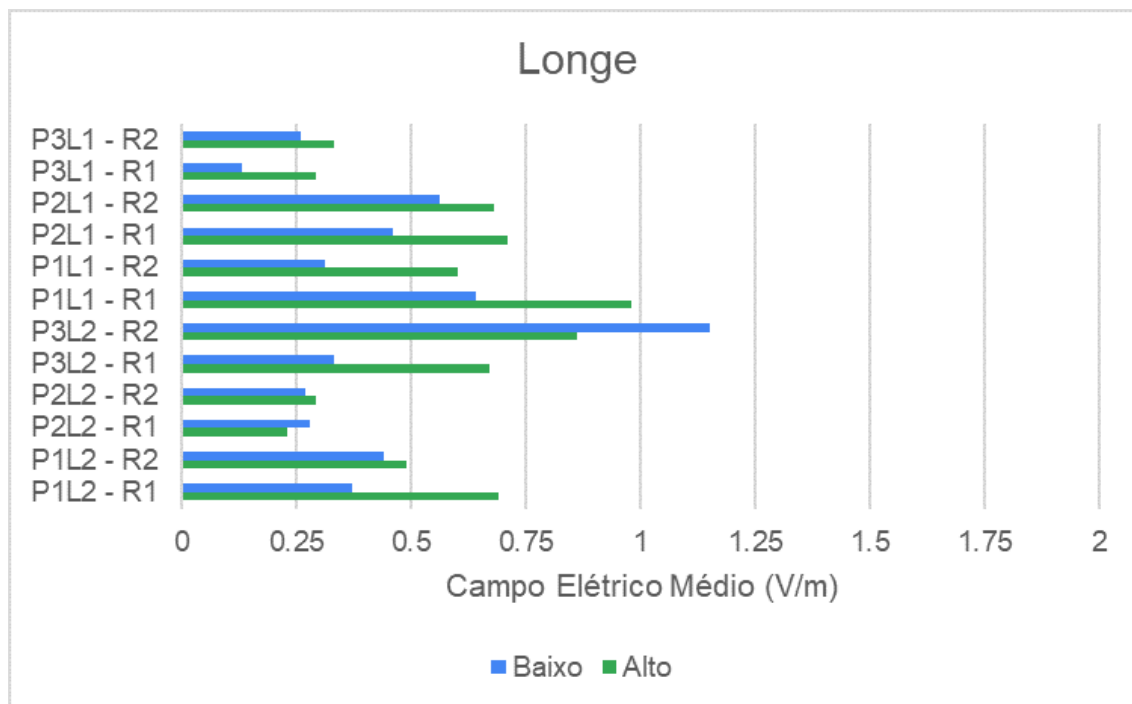


Figura 5.3: Campo elétrico médio na condição longe da antena.

à RNI. Um número maior de pessoas significa que os usuários potenciais da rede móvel *indoor* aumentam, o que pode levar a um maior campo elétrico medido dos terminais dos usuários e também possivelmente das antenas DAS, uma vez que uma maior demanda de tráfego pode exigir a ativação de mais transmissores.

Os locais P3L2 e P2L2 na Figura 5.3 apresentam um comportamento de RNI oposto para a primeira e segunda rodada de medição. Ambos os locais têm o maior nível de campo elétrico para o cenário de alto número de pessoas, como seria geralmente esperado. No entanto, isso acontece apenas para uma rodada de medição, a outra apresenta níveis mais altos para o cenário de baixo número de pessoas. Embora as condições de propagação possam ser diferentes para cada rodada de medição, principalmente a longa distância, esse comportamento pode ser atribuído ao fato desses pontos estarem localizados em corredores e a RNI depender do número de pessoas que utilizam o celular e passam por aquele correspondente corredor no momento da medição para cada rodada.

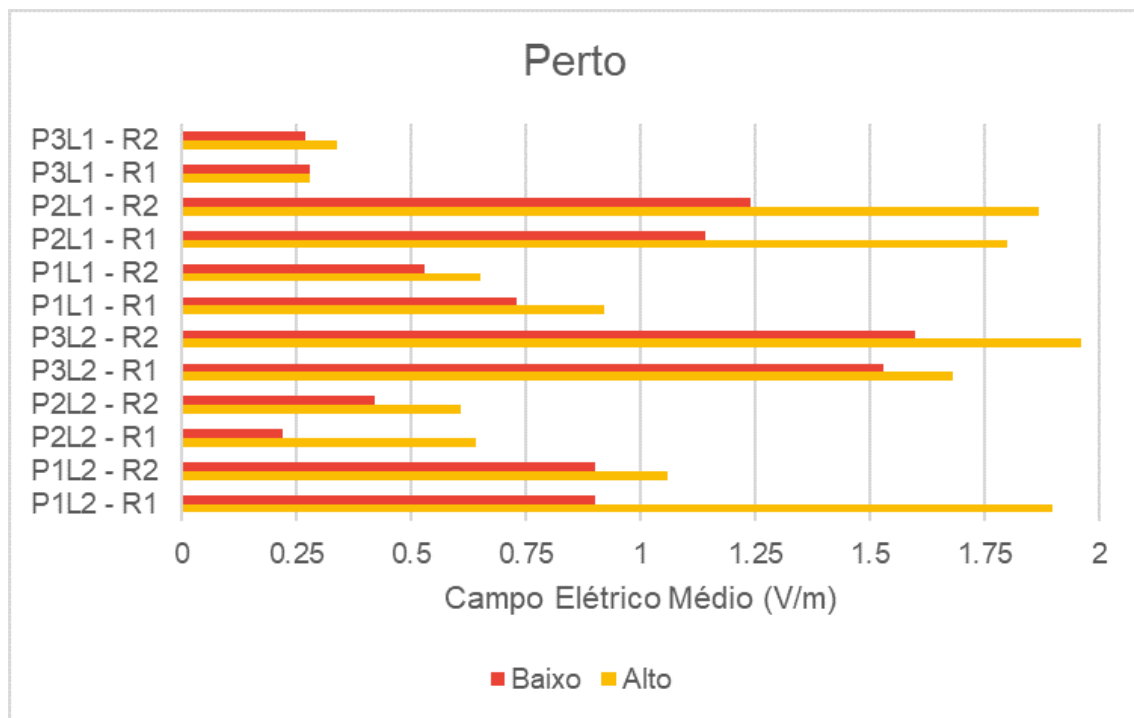


Figura 5.4: Campo elétrico médio na condição perto da antena.

## 5.2 Residências (Wi-Fi)

As 40 amostras de pontos de acesso Wi-Fi incluem 14 marcas diferentes e ano de aquisição de 2012 a 2022. Essas amostras foram divididas em grupos, conforme Tabela 5.2, para avaliar a relação entre a intensidade do campo elétrico com as situações de medição, a marca dos aparelhos e o tempo de uso. Em Ano de Aquisição, os grupos foram divididos de forma que contenham o número de amostras mais próximo possível. Para Marca, foram selecionadas as quatro marcas que mais apareceram entre as amostras.

Tabela 5.2: Número de amostras de pontos de acesso Wi-Fi.

Situação de Medição			
Situação 1 (Wi-Fi em 2,4 GHz)	Situação 2 (Wi-Fi em 5 GHz)	Situação 3 (Wi-Fi em 2,4 e 5 GHz)	Situação 4 (Wi-Fi desligado)
40	40	40	40
Marca			
Marca 1	Marca 2	Marca 3	Marca 4
10	4	5	5
Ano de Aquisição			
≤2020		>2020	
21		19	

Para facilitar a leitura e a análise dos resultados, as quatro situações de medição, definidas na Seção 4.2.2, são reescritas a seguir:

- Situação 1: ambos os terminais móveis conectados à rede 2,4 GHz;
- Situação 2: ambos os terminais móveis conectados à rede de 5 GHz;
- Situação 3: um terminal conectado à rede 2,4 GHz e outro conectado à rede 5 GHz;
- Situação 4: ponto de acesso Wi-Fi desligado (sem emissão de sinal).

### 5.2.1 Situação de Medição

Alguns resultados das próximas seções são apresentados por meio de *boxplot* e sua configuração pode ser visualizada na Figura 5.5. Para facilitar a visualização dos resultados, são apresentados a seguir as principais definições associadas a esta representação gráfica:

- Primeiro quartil (Q1): corresponde ao valor em que 25% das amostras são menores ou iguais e 75% são maiores ou iguais;
- Mediana ou segundo quartil (Q2): refere-se ao valor central do conjunto de dados, em outras palavras, é o valor o qual 50% das amostras estão abaixo e os outros 50% estão acima desse valor;
- Terceiro quartil (Q3): corresponde ao valor em que 75% das amostras são menores ou iguais e 25% são maiores ou iguais;
- Amplitude interquartil (AIQ): é a diferença entre o terceiro e o primeiro quartil, ou seja,  $AIQ = Q3 - Q1$ .
- Limite inferior: é definido a partir do cálculo de  $Q1 - 1,5 \cdot AIQ$ .
- Limite superior: é definido a partir do cálculo de  $Q3 + 1,5 \cdot AIQ$ .
- *Outlier*: corresponde a amostra que ultrapassa o limite inferior ou superior.

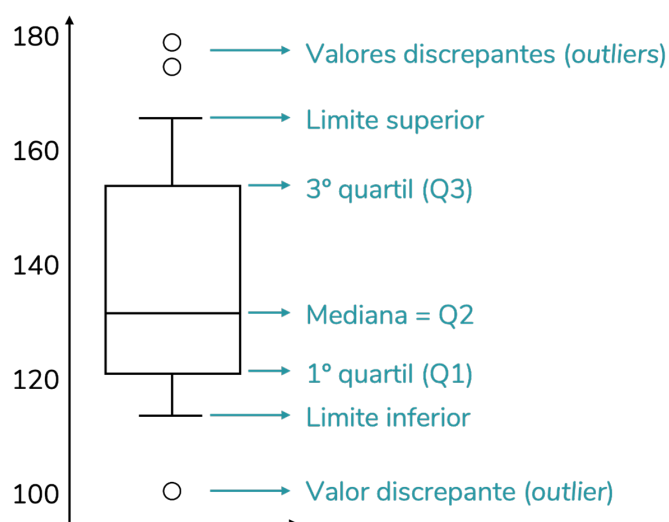


Figura 5.5: Exemplo de gráfico *boxplot* [2].

Na Figura 5.6, pode-se constatar que há baixa contribuição de emissão de RNI diferente do ponto de acesso Wi-Fi na distância definida para medição, isso pode ser concluído a partir dos resultados da Situação 4. Verificou-se um campo elétrico médio

de 0,05 a 4,66 V/m para a Situação 1; de 0,09 a 4,34 V/m para a Situação 2; de 0,07 a 4,35 V/m para a Situação 3; e de 0,00 a 0,78 V/m para a Situação 4. Dessa forma, a Situação 1 apresentou a maior média medida, representando 7,64% do limite, o que pode ser justificado por 2,4 GHz ser a banda que apresenta maior congestionamento e a menor perda de percurso. Além disso, vale destacar que o mesmo dispositivo o qual apresentou a maior média para a Situação 1 (4,66 V/m), apresentou também a maior média para a Situação 2 (4,34 V/m) e a segunda maior média para a Situação 3 (3,45 V/m).

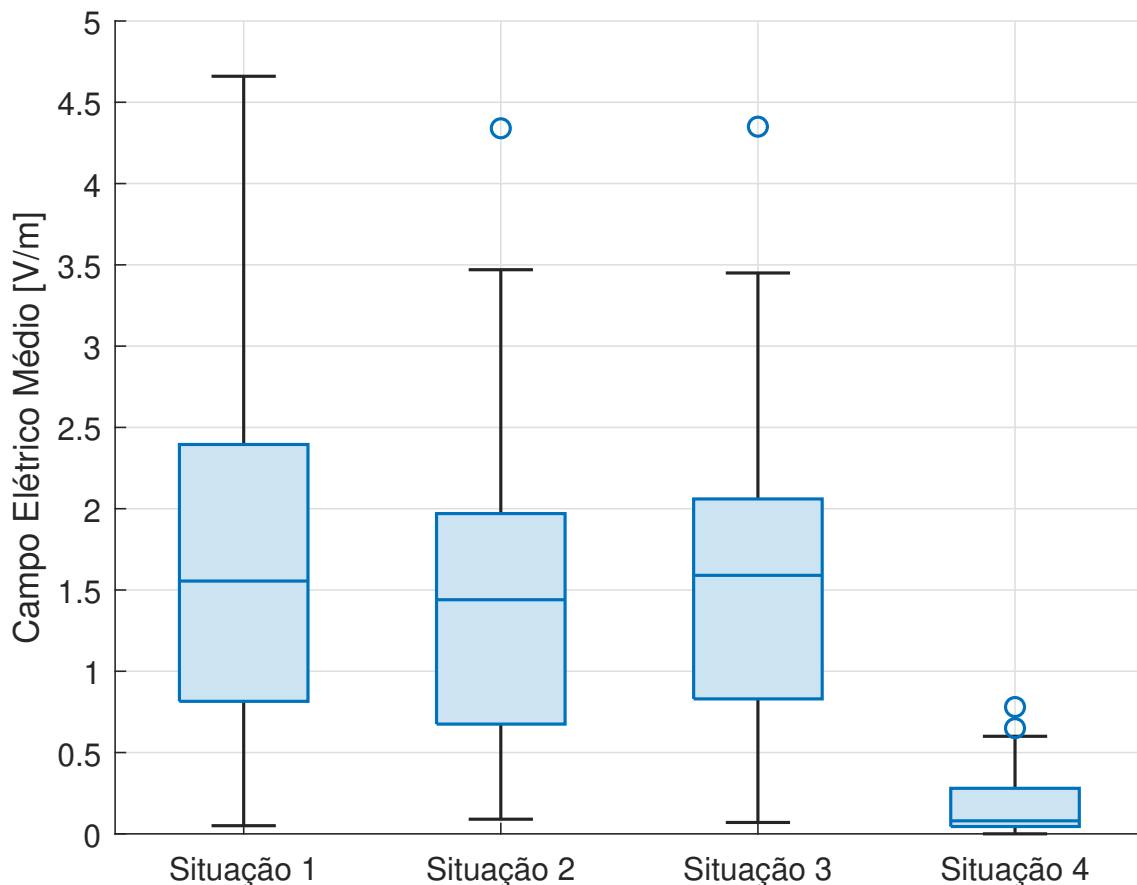


Figura 5.6: Campo elétrico médio por situação de medição.

Existe certa semelhança entre as distribuições das Situações 2 e 3. Em geral, as medianas para as três situações são de aproximadamente 1,5 V/m, indicando que 50% das amostras apresentam campo elétrico menor ou igual a 1,5 V/m (2,46% do limite). O terceiro quartil é de aproximadamente 2,4 V/m para a Situação 1 e 2 V/m para as Situações 2 e 3, indicando que 75% das amostras possuem campo elétrico menor ou igual a 2,4 V/m (3,93% do limite) para a Situação 1 e menor ou igual a 2 V/m (3,28% do limite) para as Situações 2 e 3.

### 5.2.2 Marca

As Marcas 1 e 2 apresentam a menor dispersão para as três situações, como mostra a Figura 5.7. A maioria das amostras desses grupos apresenta o mesmo modelo. As amostras da Marca 1 concentram-se principalmente abaixo de 1 V/m, enquanto as da Marca 2 entre 1 e 2 V/m. Os *outliers* vistos na Marca 1 são uma amostra única de modelo distinto. *Outliers* superiores a 2 V/m relatados para a Marca 1 correspondem a um único dispositivo.

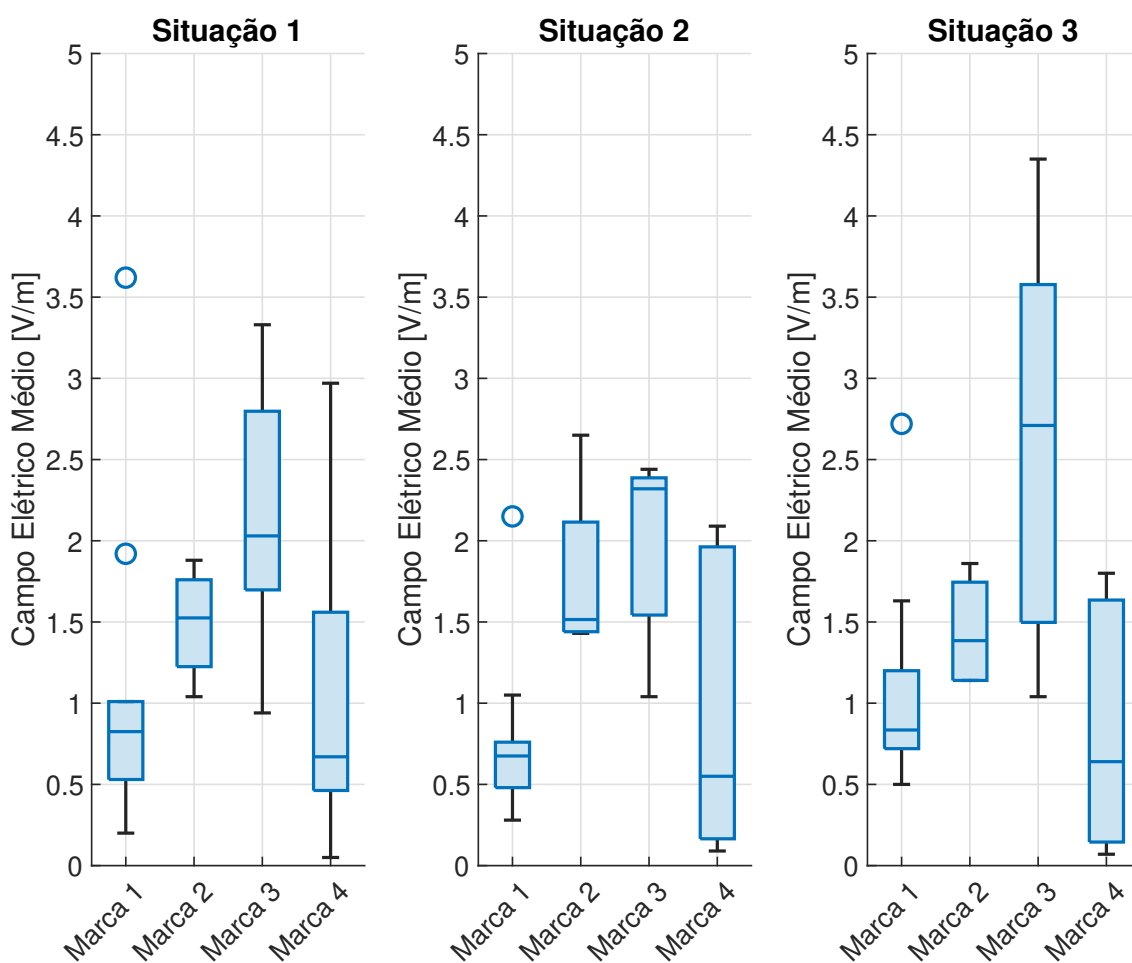


Figura 5.7: Campo elétrico médio por marca.

A Marca 3 apresentou, em geral, a maior intensidade de campo elétrico, concentrada acima de 1 V/m para todas as situações. Sua dispersão é maior para a Situação 3, atingindo pouco mais de 4 V/m (6,56% do limite); e menor para a Situação 2, chegando a aproximadamente 2,5 V/m (4,10% do limite). As amostras são divididas entre dois modelos.

A Marca 4 possui uma das maiores dispersões, o que pode estar associado à variação do modelo, já que existem quatro modelos e apenas duas amostras eram de modelos idênticos.

### 5.2.3 Tempo de Uso

A partir da Figura 5.8, observa-se que para pontos de acesso referentes ao ano de aquisição  $\leq 2020$  apresentou o maior máximo para todas as situações. Entretanto, a influência da variável *Tempo de uso* é ainda mais visível para a Situação 2, que atinge uma diferença de 1 V/m entre os máximos do ano de aquisição  $\leq 2020$  e ano de aquisição  $> 2020$ .

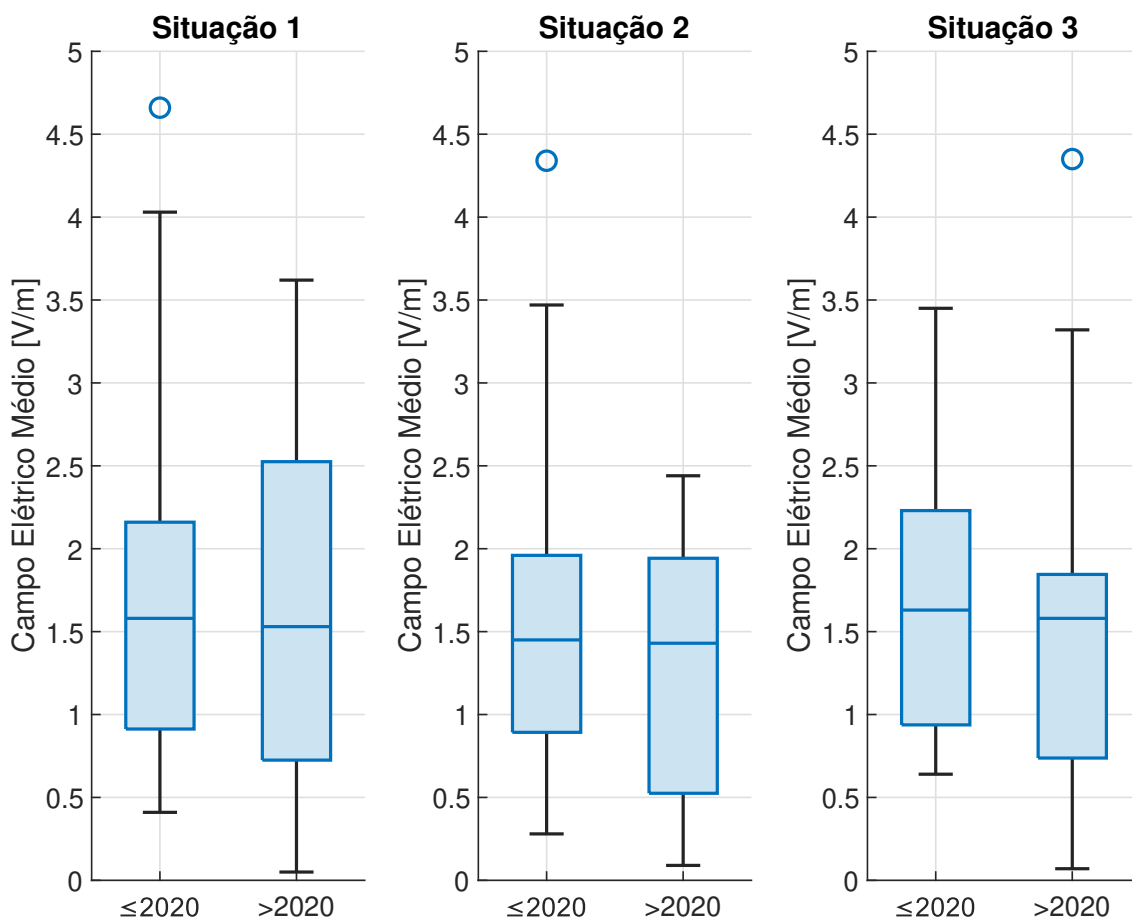


Figura 5.8: Campo elétrico médio por ano de aquisição.

Comparando as situações, o primeiro quartil para o ano de aquisição  $> 2020$  é menor para todos os casos, o que significa que este grupo atinge 25% das amostras em valores menores em relação a  $\leq 2020$ . As medianas são aproximadamente equivalentes para todas as situações, demonstrando que 50% das amostras apresentam exposições menores ou iguais a cerca de 1,5 V/m. Quanto ao terceiro quartil, notou-se que o grupo  $> 2020$  atingiu o maior valor para a Situação 1; que os dois grupos correspondem a valores equivalentes para a Situação 2; e, o grupo  $\leq 2020$  atinge o maior valor para a Situação 3.

### 5.3 Residências (Forno de Micro-ondas)

Foram realizadas um total 51 medições para forno de micro-ondas, das quais somente uma delas excedeu o limite estabelecido, sendo essa excluída da análise a seguir e seu estudo é tratado particularmente na Subseção 5.3.5. As 50 amostras de forno de micro-ondas restantes incluem 10 marcas diferentes, anos de aquisição que variam de 2000 a 2022. A partir delas, é estudada a relação entre o nível de densidade de potência com os fatores posição de medição, marca, tempo de uso e conservação. Para isso, as amostras são divididas em grupos conforme a Tabela 5.3. Em Ano de Aquisição, os grupos foram divididos de forma que contenham o número de amostras mais próximo possível. As quatro marcas que mais apareceram entre as amostras foram selecionadas para o grupo Marca.

Tabela 5.3: Número de amostras de fornos de micro-ondas.

<b>Pior Ponto</b>			
Frente	Esquerda	Direita	Cima
36	9	2	3
<b>Marca</b>			
Marca 1	Marca 2	Marca 3	Marca 4
14	6	8	9
<b>Ano de Aquisição</b>			
<2016	2016 e 2017	>2017	
17	19	14	
<b>Sinais de Uso</b>			
Sim	Não		
32	18		

#### 5.3.1 Pior Ponto

O pior ponto refere-se a posição onde foi medido o maior nível de densidade de potência. A partir das medições, destaca-se o grupo Frente, com 36 micro-ondas (72% das amostras), apresentando a maior média de densidade de potência na frente da porta, conforme mostra a Figura 5.9. Dentro deste grupo estão as quatro maiores médias medidas. Porém, a maior média ainda representa 2,9% do limite determinado na norma. A maior parte do grupo Frente encontrou picos e médias abaixo de 0,8 W/m<sup>2</sup> (1,6% do limite).

O segundo maior grupo é o da Esquerda, com nove micro-ondas (18% das amostras). A saída de ventilação está localizada neste ponto, o que pode causar pequenos vazamentos. Para o grupo da Esquerda, há uma concentração de picos de maior densidade de potência – entre 1 e 2 W/m<sup>2</sup>, porém as médias encontram-se totalmente abaixo de 0,8 W/m<sup>2</sup>.

Apenas três fornos apresentaram o pior ponto na parte superior, sendo que dois desses possuíam saída de ventilação neste local, reforçando a hipótese de que há vazamento por

essas saídas. Somente dois fornos tiveram o pior ponto do lado direito, com valores abaixo de  $0,2 \text{ W/m}^2$  (0,4% do limite).

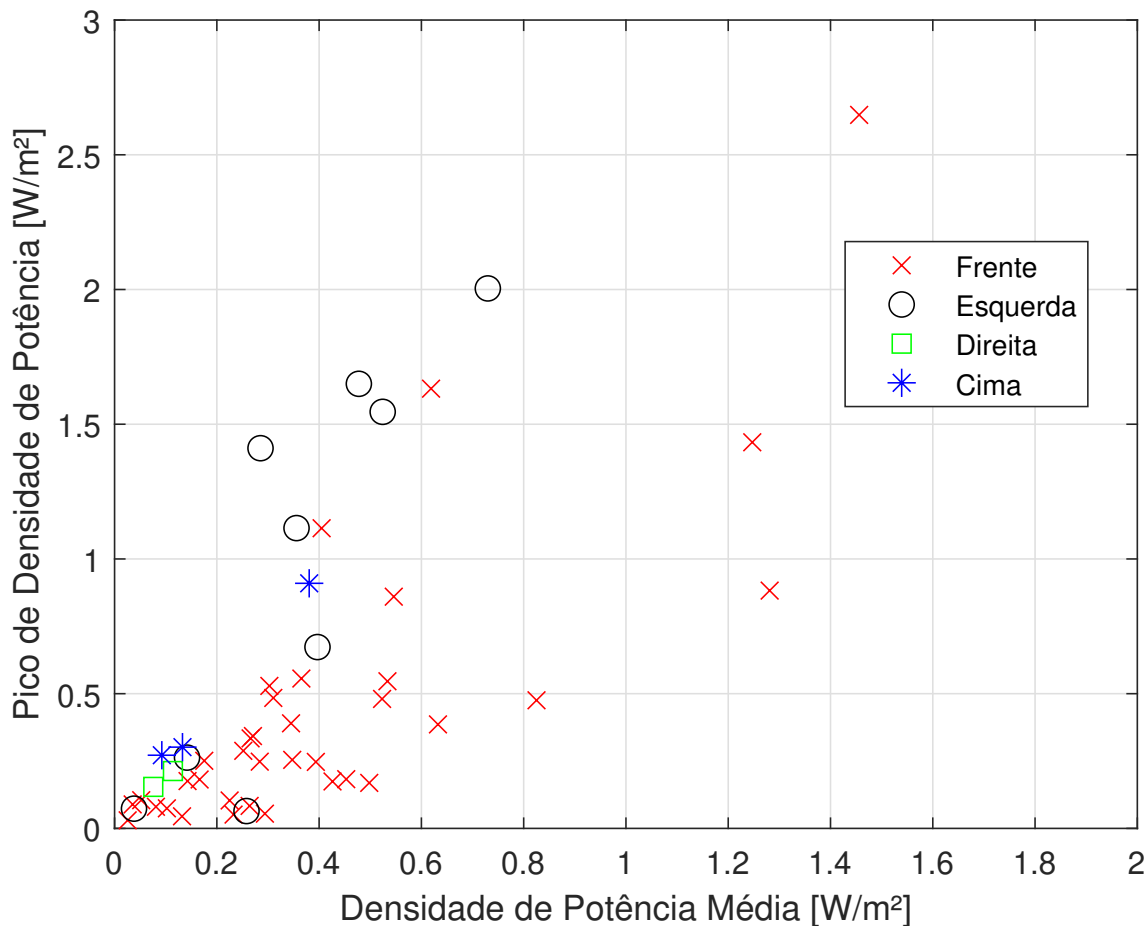


Figura 5.9: Densidade de potência média por posição do pior ponto.

### 5.3.2 Marca

As quatro marcas mais comuns entre as amostras foram selecionadas para avaliar seus níveis de densidade de potência. O número de amostras por marca foi de 14 para a Marca 1, 6 para a Marca 2, 8 para a Marca 3 e 9 para a Marca 4, como mostrado na Tabela 5.3.

Analisando os resultados apresentados na Figura 5.10, nota-se que a Marca 1 tem a maior mediana, em outras palavras, 50% das suas amostras atingiram até  $0,4 \text{ W/m}^2$  (0,8% do limite). Este mesmo valor corresponde ao máximo da Marca 3. O terceiro quartil, correspondente a 75% das amostras, está próximo de  $0,5 \text{ W/m}^2$  (1% do limite) para a Marca 1, 2 e 4.

A Marca 3 tem menor dispersão entre marcas, mas possui amostras únicas de modelos. Da mesma forma, a Marca 1 possui o maior número de amostras de um mesmo modelo, mas isso não afeta sua distribuição. Portanto, ao contrário do que foi visto para os

pontos de acesso Wi-Fi, os modelos de forno de micro-ondas não têm influência visível na dispersão de amostras para o fator marca.

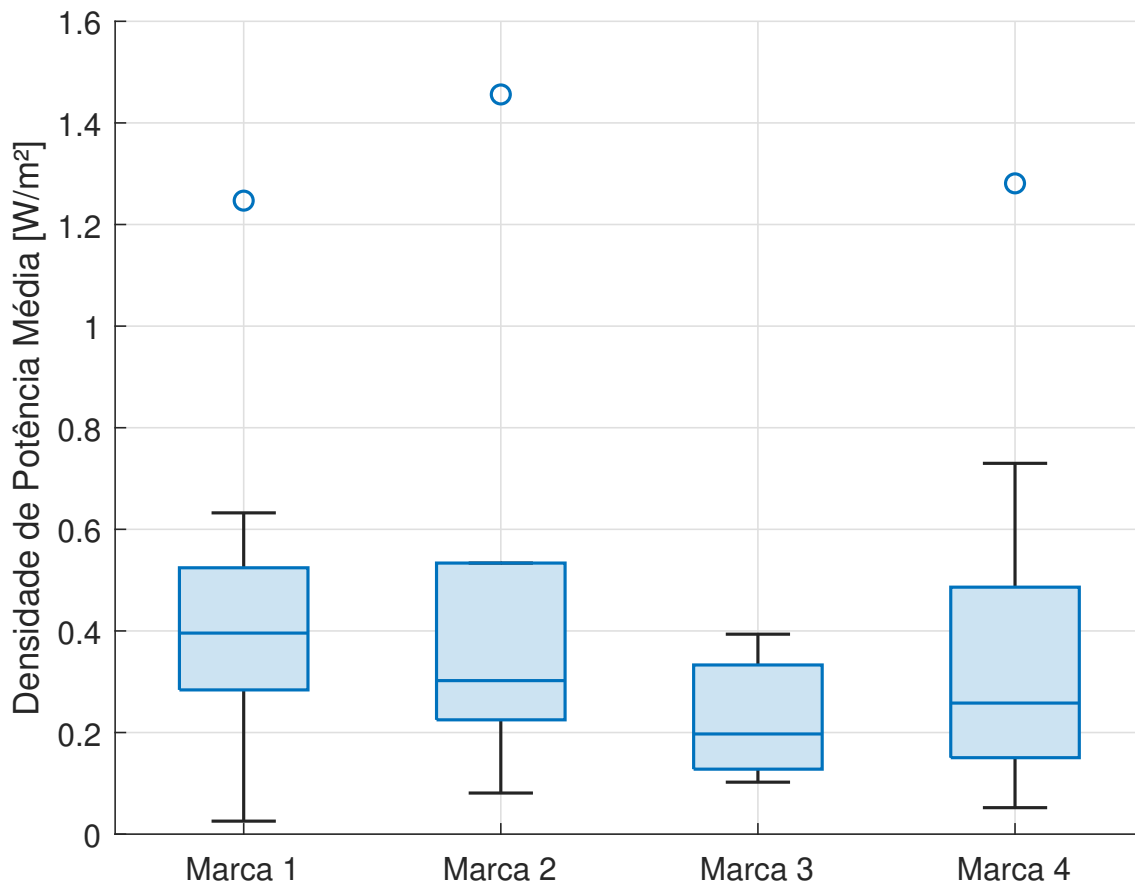


Figura 5.10: Densidade de potência média por marca.

### 5.3.3 Tempo de Uso

Para avaliar a influência do tempo de uso nos níveis de exposição, as amostras foram divididas em três intervalos de anos de aquisição, resultando em 17 amostras para anos de aquisição <2016, 19 amostras para anos equivalentes de aquisição 2016 ou 2017 e 14 amostras para anos de aquisição >2017, como mostrado na Tabela 5.3.

Analisando a Figura 5.11, ao comparar os níveis do terceiro quartil e o máximo das distribuições, como em [26], observa-se uma tendência a maiores níveis de densidade de potência com o aumento do tempo de uso, ou seja, quanto mais antigo é o forno de micro-ondas. Assim, 75% das amostras apresentaram densidade de potência menor ou igual a cerca de 0,75 W/m<sup>2</sup> para o grupo <2016, 0,5 W/m<sup>2</sup> para o grupo 2016 e 2017 e 0,35 W/m<sup>2</sup> para o grupo >2017 grupo. O máximo corresponde a aproximadamente 1,5 W/m<sup>2</sup> para o grupo <2016, 0,6 W/m<sup>2</sup> para o grupo 2016 e 2017; e 0,5 W/m<sup>2</sup> para o grupo >2017.

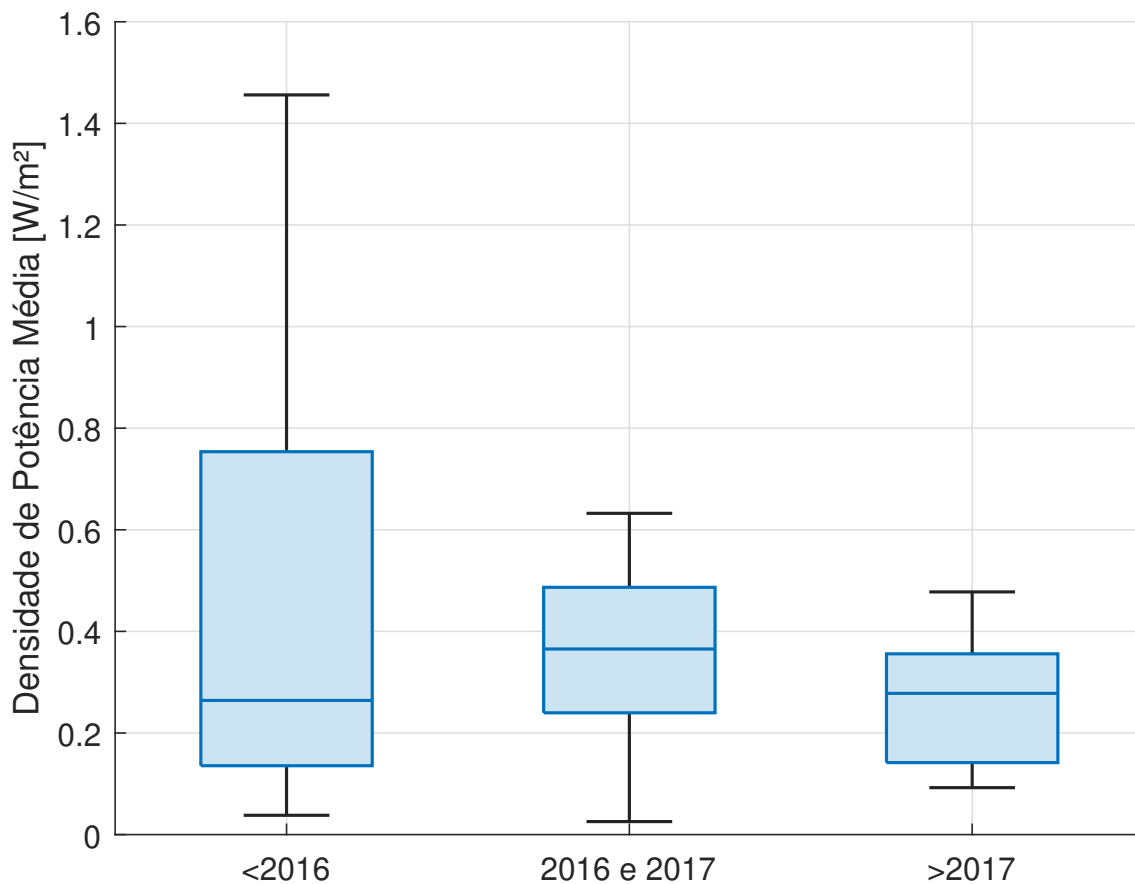


Figura 5.11: Densidade de potência média por ano de aquisição.

### 5.3.4 Estado de Conservação

Neste estudo, entende-se como sinais de uso: presença de sujeira, presença de ferrugem e o aspecto antigo. Ao avaliar a relação entre os níveis de exposição e o estado de conservação dos fornos de micro-ondas na Figura 5.12, observa-se que há indícios de uso em todos os fornos de micro-ondas que atingiram densidade de potência média acima de  $0,6 \text{ W/m}^2$ . Além disso, apenas duas das nove amostras que apresentaram pico de densidade de potência acima de  $1 \text{ W/m}^2$  não apresentavam sinais de uso.

Vale ressaltar que os sinais de uso podem estar associados ao ano de aquisição do equipamento, uma vez que:

- 14 de 17 amostras apresentaram sinais de uso no grupo <2016;
- 14 de 19 amostras apresentaram sinais de uso no grupo de 2016 e 2017;
- 4 de 14 amostras apresentaram sinais de uso no grupo >2017.

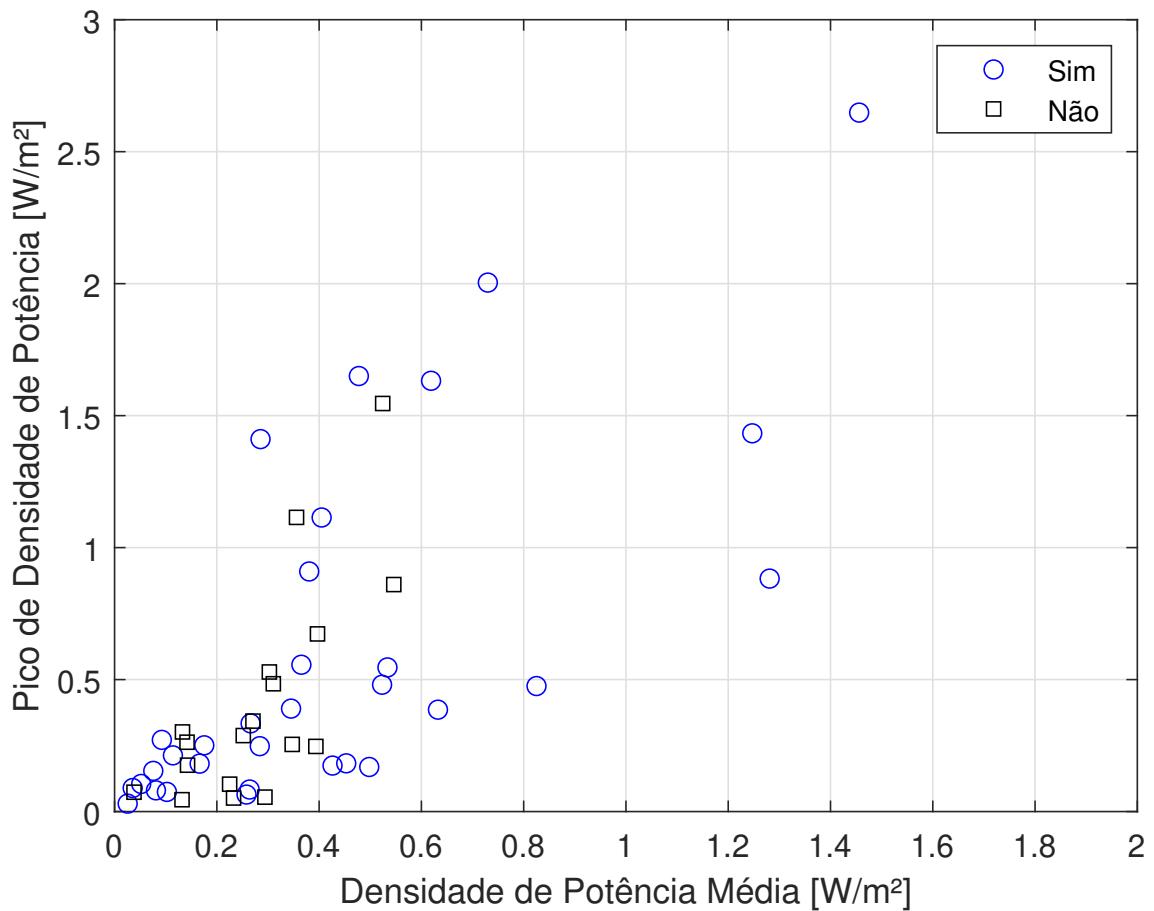


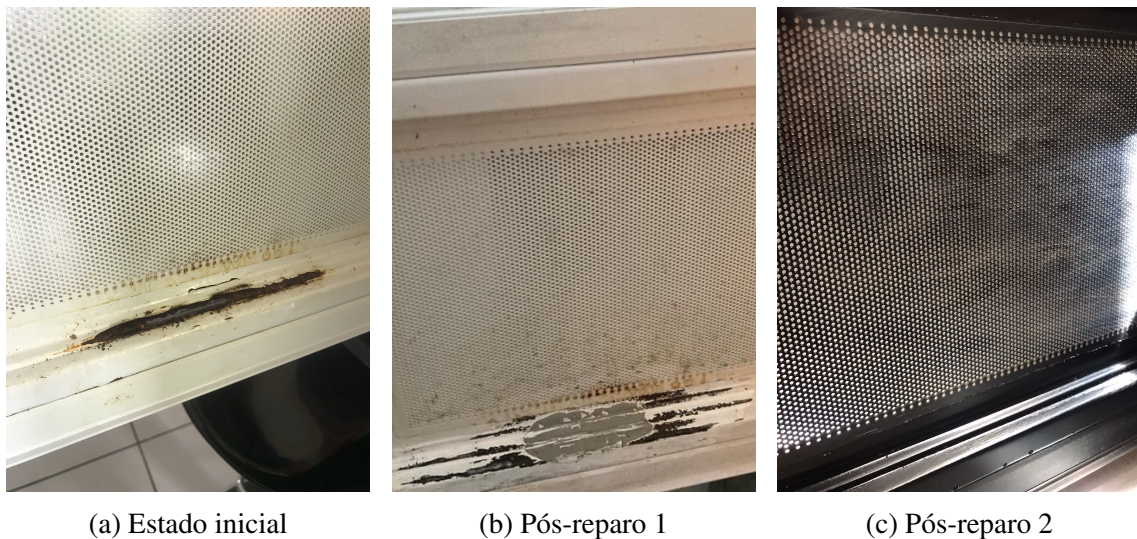
Figura 5.12: Densidade de potência média por presença de sinais de uso.

### 5.3.5 Forno de Micro-ondas *Outlier*

Foi detectado um forno de micro-ondas excedendo o limite definido por [33]. Este equipamento corresponde à Marca 2, ano de aquisição de 2017 e apresentava muitos sinais de uso, principalmente ferrugem, responsável por danificar a estrutura da porta, como mostra a Figura 5.13a. Possivelmente esse motivo levou ao vazamento, já que os níveis mais altos de densidade de potência foram medidos na frente da porta. Para contornar esse vazamento, foram realizados e avaliados dois tipos de reparos:

- Reparo 1 (Figura 5.13b): uso de massa epóxi para preencher a abertura na porta feita pela ferrugem (reparo feito pelos donos do forno sem o conhecimento prévio dos pesquisadores envolvidos neste trabalho);
- Reparo 2 (Figura 5.13c): troca de toda superfície externa do forno de micro-ondas (reparo feito em local especializado).

Fotos das três fases descritas são mostradas na Figura 5.13 e os valores medidos de média e pico de densidade de potência em cada uma delas estão descritos na Tabela 5.4.



(a) Estado inicial

(b) Pós-reparo 1

(c) Pós-reparo 2

Figura 5.13: Estado da porta do forno de micro-ondas *outlier*.Tabela 5.4: Valor de média e pico de densidade de potência para o forno de micro-ondas *outlier*.

Estado	Densidade de Potência Média [W/m <sup>2</sup> ]	% do limite	Pico de Densidade de Potência [W/m <sup>2</sup> ]	% do limite
Inicial	183,00	366%	416,30	832,6%
Pós-reparo 1	37,50	75%	111,50	223%
Pós-reparo 2	0,18	0,37%	0,42	0,84%

Ao realizar novamente a medição na frente da porta após cada reparo, observou-se que, após o Reparo 1, a média de densidade de potência apesar de ter diminuído significativamente, ainda assume valores muito próximos do limite e fora da realidade dos demais fornos medidos. No entanto, após o Reparo 2, os níveis de exposição finalmente encontra-se dentro do aceitável. Portanto, reforça-se a relevância de reparo profissional para garantir segurança no uso desse tipo de aparelho.

Vale destacar que, entre os demais fornos de micro-ondas medidos, foi identificado um da mesma marca, modelo e ano de aquisição. No entanto, o equipamento não apresentava sinais visíveis de uso e sua densidade de potência média corresponde a 0,12% do nível do forno de micro-ondas *outlier*. Logo, verifica-se que, para este caso, o vazamento de RNI está mais associado ao estado de conservação do equipamento do que ao ano de aquisição.

---

# Capítulo 6

## Conclusão

---

Este trabalho teve como objetivo avaliar os níveis de exposição à RNI em ambientes internos, mais especificamente em *shopping center*, focando na emissão do DAS e dos pontos de acesso Wi-Fi, e em residências, com foco em tecnologias de grande uso doméstico: Wi-Fi e forno de micro-ondas. Para isso, foram realizadas medições em um *shopping*, em 40 pontos de acesso Wi-Fi e 51 fornos de micro-ondas.

As medições realizadas no *shopping* mostraram que os campos elétricos estavam significativamente abaixo dos limites estabelecidos pela ANATEL e ICNIRP. Para as faixas de frequência alvo neste trabalho, os maiores campos elétricos médios e de pico foram menores que 8% do limite, com valores de 1,96 e 3,26 V/m, respectivamente. Ambos os resultados correspondem ao local P3L2 do shopping, caracterizado por possuir o maior número de antenas DAS juntas. Ao comparar a mudança na condição de distância da antena para um determinado cenário de número de pessoas, também foi verificado a forte influência do número de antenas próximas. Os locais P2L1, P1L2 e P3L2 possuem pelo menos duas antenas DAS e/ou uma antena Wi-Fi próxima, e suas medições mostraram mudanças significativas entre as condições de perto e de longe. Além disso, esses locais apresentaram os maiores níveis gerais de exposição à RNI.

Ao agrupar os dados medidos correspondentes a uma mesma condição de distância, observou-se a influência do número de pessoas nos níveis de exposição. Os maiores valores de campo elétrico foram verificados nos horários em que o fluxo de pessoas no *shopping* era maior, assim como em [21].

Com base nos resultados, constatou-se a influência da distância da antena e da concentração de pessoas no shopping nos níveis de campo elétrico, mas em nenhuma das situações os níveis de exposição ultrapassaram os limites de segurança estabelecidos pela ICNIRP e ANATEL. Porém, como não há uma conclusão global, nem da comunidade acadêmica nem da Organização Mundial da Saúde (OMS), sobre os efeitos nocivos da RNI na saúde humana, a prevenção é sempre necessária. Assim, verifica-se a importância de um projeto adequado de distribuição de antenas em shoppings para evitar a intensificação dos níveis de RNI causados pela concentração de antenas, principalmente em locais onde o público permanece por muito tempo.

Para as medições de RNI proveniente do sinal Wi-Fi nas residências, foi verificada a influência dos níveis de campo elétrico em quatro situações de medição, marca do equipamento e tempo de uso. O maior nível de exposição foi verificado para a rede carregada em 2,4 GHz (Situação 1), no valor de 4,66 V/m (7,64% do limite). Quanto à

influência da marca, nota-se que a variação do modelo do equipamento entre as amostras impactará na dispersão dos dados; assim a Marca 4, que tem a maior dispersão, tem quatro modelos diferentes e apenas duas amostras de modelos idênticos; enquanto as Marcas 1 e 2 tiveram as menores dispersões e contêm a maioria das amostras pertencentes ao mesmo modelo. Não foi observada relação clara quanto ao tempo de uso (ano de aquisição).

Das 51 medições de fornos de micro-ondas, foi identificada uma amostra com valor de densidade de potência acima de  $50 \text{ W/m}^2$  (limite definido por normas nacionais e internacionais), assumindo uma densidade de potência média e de pico de  $183 \text{ W/m}^2$  (366% do limite) e  $416 \text{ W/m}^2$  (832,6% do limite). O forno de micro-ondas *outlier* apresentou presença de ferrugem que danificou a estrutura da porta. Foram feitas dois tipos de reparos: uso de massa epóxi para preencher a abertura na porta (Reparo 1) e troca da superfície externa do forno (Reparo 2). Somente o Reparo 2 solucionou o problema do vazamento com média de  $0,18 \text{ W/m}^2$  e pico de  $0,42 \text{ W/m}^2$ . Sendo assim, nota-se a importância de aderir ao reparo profissional.

Quanto as demais medições de fornos de micro-ondas, foram avaliados os seguintes aspectos em relação ao nível de densidade de potência: posição, marca, tempo de uso e conservação. Observou-se que 72% dos fornos teve o maior nível de exposição na posição em frente à porta e, em segundo lugar, com 18%, a posição do lado esquerdo (considerando o observador de frente para o forno de micro-ondas como referência). Supõe-se que este segundo resultado seja causado pela saída de ventilação estar localizada neste ponto, uma vez que 2 das 3 amostras que apresentaram o pior ponto na parte superior, a saída de ventilação está localizada neste local.

Não foi possível notar uma influência visível nos níveis de densidade de potência em relação à marca do forno de micro-ondas. No entanto, quanto ao tempo de uso, verificou-se uma tendência de fornos de micro-ondas mais antigos atingirem maiores níveis de densidade de potência, como também aponta [26], já que os fornos micro-ondas com ano de aquisição <2016 (mais antigo) representaram os níveis mais altos. Da mesma forma, o estado de conservação dos equipamentos demonstrou influenciar os níveis de densidade de potência, de forma que todos os fornos de micro-ondas que atingiram densidade de potência média acima de  $0,6 \text{ W/m}^2$  apresentaram indícios de uso, além de que apenas duas das nove amostras que obtiveram pico de densidade de potência acima de  $1 \text{ W/m}^2$  não apresentaram sinais de uso. Além disso, o forno de micro-ondas *outlier* foi comparado com um outro de mesma marca e ano de aquisição, no entanto esse forno não apresentava sinais visíveis de uso e sua densidade de potência média corresponde a 0,12% do nível do forno de micro-ondas *outlier*.

## 6.1 Produção acadêmica

Como parte das atividades de pesquisa da autora deste trabalho no grupo de pesquisa GppCom e como subprodutos do trabalho realizado até o momento, os seguintes trabalhos foram produzidos:

- O estudo bibliométrico apresentado no Capítulo 2 foi submetido, aceito e apresentado no 20º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica (SBMO)

- 2022). O artigo foi intitulado como *Radiação Não Ionizante (RNI): Um Estudo Bibliométrico*;
- O trabalho referente as medições realizadas no Natal Shopping foi submetido, aceito e publicado em formato de artigo no *special issue Sensing in EMF Exposure Monitoring and Mastering* da revista MDPI Sensors. O trabalho tem o título *Human Exposure to Non-Ionizing Radiation from Indoor Distributed Antenna System: Shopping Mall Measurements Analysis* [41];
  - O trabalho sobre as medições de RNI em pontos de acesso Wi-Fi nas residências foi submetido, aceito e será apresentado no XLI Simpósio de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2023). O artigo tem como título *Análise de RNI para Pontos de Acesso Wi-Fi em Operação Doméstica*;
  - As medições de RNI em pontos de acesso Wi-Fi são abordadas em mais um artigo, intitulado como *Measurement and Analysis of Non-Ionizing Radiation Levels in Residential Environments Emitted by Wi-Fi Routers*. O artigo foi submetido ao jornal *IEEE Latin America Transactions* e encontra-se em etapa de revisão;
  - O trabalho correspondente às medições de RNI proveniente do forno de micro-ondas e pontos de acesso Wi-Fi em residências são apresentados em formato de artigo, intitulado como *Measurement of Non-ionizing Radiation (NIR) from Wi-Fi Access Points and Microwave Ovens in Residential Environments* e está em etapa de revisão entre os autores. O artigo será submetido em breve ao *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*.

---

# Referências Bibliográficas

---

- [1] GUITARRARA, P. *Como funciona o micro-ondas?* [S.l.]: Brasil Escola. <https://brasilescola.uol.com.br/fisica/forno-microondas.htm>. Accessed: 2023-08-28.
- [2] PERES, F. *Como interpretar (e construir) um gráfico boxplot?* [S.l.]: Fernanda Peres Estatística Aplicada. <https://fernandafperes.com.br/blog/interpretacao-boxplot/>. Accessed: 2023-08-30.
- [3] ANATEL. *Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), Ato nº 458*. 2019.
- [4] RADIATION, W. H. O.; HEALTH, E.; ORGANIZATION, W. H. *Establishing a dialogue on risks from electromagnetic fields*. [S.l.]: World Health Organization, 2002.
- [5] BOUSSAD, Y. et al. Longitudinal study of exposure to radio frequencies at population scale. *Environment International*, Elsevier, v. 162, p. 107144, 2022.
- [6] DONDOLADZE, K. et al. Impact of household microwave oven non-ionizing radiation on blood plasma cortisol levels in rats and their behavior. *Georgian Medical News*, n. 306, p. 132–137, 2020.
- [7] RODRIGUES, M. E. 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.
- [8] DINIZ, A. B. d. 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*, SciELO Brasil, v. 20, p. 126–142, 2021.
- [9] SAFIGIANNI, A. S.; TSOMPANIDOU, C. G. Measurements of electric and magnetic fields due to the operation of indoor power distribution substations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 20, n. 3, p. 1800–1805, 2005.
- [10] SAFIGIANNI, A. S.; KOSTOPOULOU, A. Electric and magnetic field measurements in an indoor electric power substation. *Journal of materials processing technology*, Elsevier, v. 181, n. 1-3, p. 126–130, 2007.
- [11] KEIKKO, T. et al. Public magnetic field exposure based on internal current density for electric low voltage systems. *Health physics*, LWW, v. 96, n. 4, p. 423–431, 2009.

- [12] CALVENTE, I. et al. Characterization of indoor extremely low frequency and low frequency electromagnetic fields in the inma-granada cohort. *PLoS One*, Public Library of Science San Francisco, USA, v. 9, n. 9, p. e106666, 2014.
- [13] GHANBARI, G.; KHODAKARIM, S.; ESLAMI, A. Survey of public exposure to extremely low-frequency magnetic fields in the dwellings. *Environmental Health Engineering And Management Journal*, Environmental Health Engineering And Management Journal, p. 0–0, 2022.
- [14] HALGAMUGE, M. N.; MCLEAN, L. Measurement and analysis of power-frequency magnetic fields in residences: Results from a pilot study. *Measurement*, Elsevier, v. 125, p. 415–424, 2018.
- [15] AERTS, S. et al. Measurements of intermediate-frequency electric and magnetic fields in households. *Environmental research*, Elsevier, v. 154, p. 160–170, 2017.
- [16] KOPRIVICA, M. et al. Statistical analysis of electromagnetic radiation measurements in the vicinity of gsm/umts base station antenna masts. *Radiation protection dosimetry*, Oxford University Press, v. 158, n. 3, p. 263–275, 2014.
- [17] LUNCA, E.; DAMIAN, C.; SALCEANU, A. Emf exposure measurements on 4g/lte mobile communication networks. In: IEEE. *2014 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE)*. [S.l.], 2014. p. 545–548.
- [18] LAHHAM, A.; SHARABATI, A.; ALMASRI, H. Public exposure from indoor radiofrequency radiation in the city of hebron, west bank—palestine. *Health Physics*, LWW, v. 109, n. 2, p. 117–121, 2015.
- [19] RAMIREZ-VAZQUEZ, R. et al. Personal exposure assessment to wi-fi radiofrequency electromagnetic fields in mexican microenvironments. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, MDPI, v. 18, n. 4, p. 1857, 2021.
- [20] ONISHI, T. et al. Radiofrequency exposure levels from mobile phone base stations in outdoor environments and an underground shopping mall in japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, MDPI, v. 18, n. 15, p. 8068, 2021.
- [21] ENGIZ, B. K.; KURNAZ, C. Long-term electromagnetic field measurement and assessment for a shopping mall. *Radiation Protection Dosimetry*, Oxford University Press, v. 175, n. 3, p. 321–329, 2017.
- [22] AHLBOM, A. et al. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health physics*, Lippincott Williams and Wilkins, v. 74, n. 4, p. 494–521, 1998.
- [23] BAMDAD, K.; SHAKIBA, A.; ESMAEILI, M. Consequences of 2.4-2.48 GHz non-ionizing radiation of Wi-Fi router devices on the information processing speed in adolescents. *J Psychol Cognition*, v. 3, n. 1, p. 244–248, 2018.

- [24] HOSSEINI, M. et al. Evaluating Short-Term Exposure to Wi-Fi Signals on Students' reaction Time, Short-Term Memory And Reasoning Ability. *Radiation Protection Dosimetry*, Oxford University Press, v. 187, n. 3, p. 279–285, 2019.
- [25] LAHHAM, A.; SHARABATI, A. Radiofrequency radiation leakage from microwave ovens. *Radiation protection dosimetry*, Oxford University Press, v. 157, n. 4, p. 488–490, 2013.
- [26] ALHEKAIL, Z. O. Electromagnetic radiation from microwave ovens. *Journal of Radiological Protection*, IOP Publishing, v. 21, n. 3, p. 251, 2001.
- [27] RAMIREZ-VAZQUEZ, R. et al. Comparison of personal exposure to radiofrequency electromagnetic fields from wi-fi in a spanish university over three years. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 858, p. 160008, 2023.
- [28] ICNIRP. 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. DOI: 10.1097/HP.0000000000001210.
- [29] FOOD; ADMINISTRATION, D. et al. Performance standards for microwave and radio frequency emitting products. *Paragraph 1030.10 Microwave Ovens 21 CFR Ch. I (4-1-92 edition), Part*, v. 1030, p. 496–9, 1992.
- [30] ANATEL. *Resolução 303, de 2 de julho de 2002*. [S.l.], 2002. Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2002/128-resolucao-303>>.
- [31] ANATEL. *Lei 11.934, de 5 de maio de 2009*. [S.l.], 2009. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/leis/426-lei-11934>>.
- [32] ANATEL. *Resolução 700, de 28 de setembro de 2018*. [S.l.], 2018. Regulamento sobre a Avaliação da Exposição Humana a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Associados à Operação de Estações Transmissoras de Radiocomunicação. 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](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)>.
- [33] BRASIL. Regulamento técnico da qualidade para fornos de micro-ondas. 2011. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001705.pdf>>.
- [34] VOLLMER, M. Physics of the microwave oven. *Physics Education*, IOP Publishing, v. 39, n. 1, p. 74, 2004.
- [35] BRASIL. Lei nº 11.934, de 05 de maio de 2009. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 2009. ISSN 1677-7042. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2009/lei/11934.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/11934.htm)>.

- [36] ANATEL. *List of cellular base station installed in Brazil*. [S.l.]: Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel). <https://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/licenciamento.php>. Accessed: 2022-10-07.
- [37] RADIO FREQUENCY SYSTEMS. *Indoor Omni Antennas*. [S.l.], 2005.
- [38] NARDA. *Manual Manual NBM-520*. <https://www.narda-sts.com/en/servicesupport/product-literature/nbmnim/>. Accessed: 2022-03-01.
- [39] NARDA. *Datasheet EF 0691*. <https://www.narda-sts.com/en/servicesupport/product-literature/nbmnim/>. Accessed: 2022-03-01.
- [40] GOOGLE. *Popular times, wait times, and visit duration website*. [S.l.]: Google. <https://support.google.com/business/answer/6263531>. Accessed: 2022-08-07.
- [41] SILVA, J. da L. et al. Human exposure to non-ionizing radiation from indoor distributed antenna system: Shopping mall measurement analysis. *Sensors*, MDPI, v. 23, n. 10, p. 4579, 2023.