

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO EEL
CURSO ENGENHARIA ELÉTRICA

Matheus Diniz Gonçalves Leite

**ANÁLISE COMPARATIVA DE NORMAS REFERENTES A LIMITES DE
EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E CONSTRUÇÃO DE
CENÁRIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DO 5G**

Florianópolis

2019

Ficha de identificação da obra

Leite, Matheus Diniz Gonçalves
Análise comparativa de normas
referentes a limites de exposição a
campos eletromagnéticos e construção
de cenários de implementação do 5G /
Matheus Diniz Gonçalves Leite ;
orientador, Adroaldo Raizer, 2019.
58 p.

Trabalho de Conclusão de Curso
(graduação) - Universidade Federal
de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis,
2019.

Inclui referências.

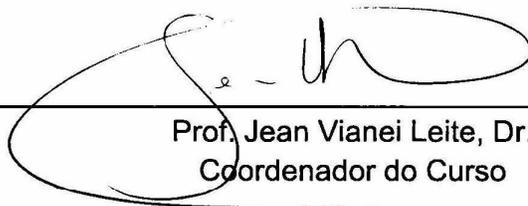
1. Engenharia Elétrica. 2.
Campos Eletromagnéticos. 3. 5G. 4.
Quociente de Exposição Total. I.
Raizer, Adroaldo.
II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

Matheus Diniz Gonçalves Leite

**ANÁLISE COMPARATIVA DE NORMAS REFERENTES A LIMITES DE
EXPOSIÇÃO A CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS E CONSTRUÇÃO DE
CENÁRIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DO 5G**

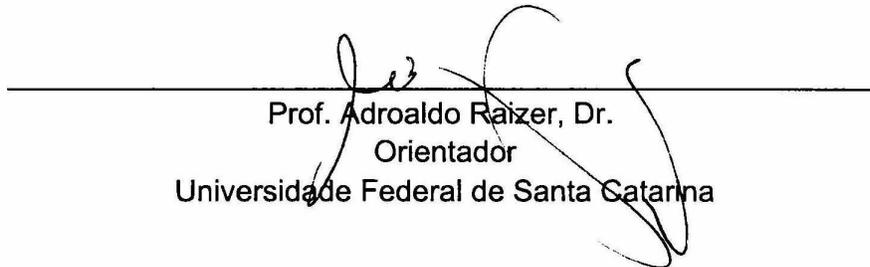
Este Trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação
em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 05 de dezembro de 2019.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Mauricio Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng.ª Kássia Toccolini, M.sc.
Avaliadora

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, à minha amada família e aos meus verdadeiros amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me deu saúde e motivação para concluir esse trabalho.

Agradeço aos meus pais e família que me incentivaram e apoiaram todos os anos em que estive na faculdade.

Agradeço aos meus amigos que fizeram destes anos mais felizes.

Agradeço aos meus colegas de universidade, professores e a todos que fizeram parte dessa linda fase em minha vida.

RESUMO

Este trabalho disserta sobre as diferenças e equivalências acerca das normas referentes à exposição a campos eletromagnéticos na faixa de radiofrequências (CEMRF). As normas discutidas são o Ato 458, outorgado em 24 de janeiro de 2019, e a norma revogada por ela, a Resolução 303. O foco deste trabalho é dividido em duas vertentes. A primeira reside em analisar a nova norma vigente, fazendo comparações entre os métodos teóricos e por medições diretas, uma vez que, de acordo com a norma, ambos os métodos possuem mesma validade. O segundo enfoque consiste em traçar cenários de implementação da rede 5G e o seu suposto impacto no total de exposição a CEMRF, fazendo uma ponte entre as conclusões obtidas na primeira e segunda parte.

Palavras Chave: CERMF. Ondas Eletromagnéticas. Radiação. 5G.

ABSTRACT

This work disserts about the differences and equivalences around the norms relative to electromagnetic fields (CERMF) exposure in the radio frequency range. The norms here discussed are the Ato 458, signed in January 24, 2019, and the norm revoked by it, the Resolução 303. The focus of this work is divided in two parts. The first one consists in analyze the current norm, making comparisons between the theoretical method and the direct measure method, once, according to the current norm, both have the same validity. The second focus consists in drawing scenarios of 5G implementation and its supposed impact in the total of electromagnetic fields exposure, making a bridge between the conclusions obtained in the first and second part.

Keywords: Electromagnetic Waves. CERMF. Radiaton. 5G.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de metodologia para média espacial.	20
Figura 2 – <i>Setup</i> utilizado para o ensaio.....	23
Figura 3 – Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em valor adimensional.....	24
Figura 4 – Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em dB.	25
Figura 5 – Torre localizada próxima ao RU.	26
Figura 6 - Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em adimensional.	28
Figura 7 - Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em dB.	28
Figura 8 – Diferentes cenários de implementação da rede 5G.....	32
Figura 9 – Representação do diagrama de radiação horizontal variando o ângulo ϕ e mantendo fixo o ângulo vertical $\theta = 90^\circ$	32
Figura 10 – Região no bairro de Jurerê escolhida para estudo.	34
Figura 11- Região central de Florianópolis escolhida para estudo.	36
Figura 12 – Ponto 1 relativo à região escolhida para estudo em Jurerê Internacional.	38
Figura 13 - Ponto 2 relativo à região escolhida para estudo em Jurerê Internacional.	38
Figura 14 - Ponto 3 relativo à região escolhida para estudo em Jurerê Internacional.	39
Figura 15 - Ponto 1 relativo à região escolhida para estudo no centro de Florianópolis.	39
Figura 16 - Ponto 2 relativo à região escolhida para estudo no centro de Florianópolis.	40
Figura 17 - Ponto 3 relativo à região escolhida para estudo no centro de Florianópolis.	40
Figura 18 – Gráfico do valor de campo elétrico máximo versus o nível de emissão obtido na primeira medição.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de exposição a campos eletromagnéticos para a população ocupacional [1].	16
Tabela 2 - Limites de exposição a campos eletromagnéticos para população em geral [1].	16
Tabela 3 – Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em valor adimensional e em dB.	25
Tabela 4 - Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em valor adimensional e em dB.	29
Tabela 5 – Distância entre ERBs.	34
Tabela 6 - Distância entre ERBs.	36
Tabela 7 – Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G para uma EIRP=75 dBm referente às antenas de 5G.	42
Tabela 8 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G para uma EIRP=60 dBm referente às antenas de 5G.	42
Tabela 9 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G após a inclusão do fator multiplicativo x2,56 nos cálculos. EIRP=75 dBm referente às antenas de 5G.	43
Tabela 10 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G após a inclusão do fator multiplicativo x2,56 nos cálculos. EIRP=60 dBm referente às antenas de 5G.	44
Tabela 11 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G após a inclusão de fontes externas. EIRP=75 dBm referente às antenas de 5G.	45
Tabela 12 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G após a inclusão de fontes externas. EIRP=60 dBm referente às antenas de 5G.	46
Tabela 13 - Dados relativos às medições efetuadas no Reino do Bahrain	48
Tabela 14 – Campos medidos no MagLab.	57
Tabela 15 – Campos medidos referentes à torre próxima ao RU	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CEMRF	Campos Eletromagnéticos na faixa de Radiofrequência
QET	Quociente de Exposição Total
ERB	Estação Rádio Base
<i>ISD</i>	<i>Inter-Site Distance</i>
<i>SAR</i>	<i>Taxa de absorção média no corpo humano</i>
<i>ADB</i>	<i>Assessment Domain Boundary</i>
<i>EIRP</i>	<i>Effective Isotropic Radiated Power</i>
<i>ICNIRP</i>	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation</i>

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	13
2 - AVALIAÇÃO DAS NORMAS	15
2.1- ANÁLISES TEÓRICAS DAS NORMAS	17
2.2- ANÁLISES DO MÉTODO POR MEDIÇÕES DIRETAS DAS NORMAS	20
2.2.1- Exposição Simultânea a Campos de Múltiplas Radiofrequências.....	21
2.3 – ANÁLISE DE CONFORMIDADE	22
2.4 - COMPARAÇÕES DE RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO TEÓRICO E PELO MÉTODO DE MEDIÇÕES DIRETAS DO ATO 458	22
3 – CENÁRIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DA REDE 5G	31
3.1 – INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA 5G.....	31
3.2 – CONTRIBUIÇÃO TEÓRICA DA REDE 5G AO QUOCIENTE DE EXPOSIÇÃO TOTAL.....	33
3.2.1 – Pontos Analisados.....	37
3.2.2 – Metodologia de Cálculos	41
3.2.3 – Probabilidade de Campos de Diferentes Fontes se Adicionarem em Fase...	43
3.2.4 – Fontes Externas Não Consideradas.....	45
3.2.5 – Análise dos Resultados	47
4 - CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS.....	53
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
APÊNDICE A – Campos Medidos.....	57

1 - INTRODUÇÃO

A radiação eletromagnética é criada quando cargas aceleram. Nas ondas eletromagnéticas os campos elétrico e magnético se auto induzem e estão defasados 90 graus espaciais entre si, para o campo distante. Possuem a capacidade de se propagar à velocidade da luz e o que difere as várias frequências dentro de um mesmo meio são os seus comprimentos de onda [3].

Quando se sofre exposição a ondas eletromagnéticas, dentro do espectro não ionizante, se está exposto aos efeitos da interação dessa onda com os tecidos corpóreos, independente da natureza da fonte emissora. Em baixas frequências, tem-se como efeito principal a indução de correntes pelo corpo. Em médias e altas frequências, observa-se o aquecimento, chegando ao nível de aquecimento fotoquímico para as frequências mais altas, próximas ao limiar superior do espectro não ionizante [4].

Desta forma, é de suma importância o entendimento da interação dessas ondas, cada vez mais presentes no cotidiano, com os seres humanos. E a partir do entendimento dessa interação, traçar diretrizes a serem seguidas.

Neste trabalho, o objeto de estudo foi o campo eletromagnético inerente à faixa de radiodifusão. O órgão responsável por regulamentar e fiscalizar as atividades de telecomunicação no Brasil é a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL).

Recentemente, em 24 de janeiro de 2019, foi outorgado o Ato 458 [1] que detalha os limites de exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências (CEMFR) entre 8,3kHz e 300GHz gerados por estações transmissoras de radiocomunicação e por terminais de usuário [1]. Este Ato [1] define também procedimentos e equações a serem utilizados para as medições e cálculos e estabelece modelo para relatório de conformidade e procedimentos diferentes, menos severos ou isentos de avaliação, para algumas classes de radiodifusão como, por exemplo, serviços de Radioamador e Rádio do Cidadão.

O supracitado Ato 458 [1] tem como finalidade substituir a Resolução 303 [2], de 2 de julho de 2002, que também trata sobre a exposição a campos eletromagnéticos na faixa de radiofrequências.

Foi realizada neste trabalho uma análise comparativa sobre as diferenças e semelhanças entre essas duas normas com foco na interpretação do Ato [1] vigente.

Em seguida, foram efetuadas comparações entre os resultados obtidos pelos métodos de avaliação teórica e por medição do Ato 458 [1].

Posteriormente, construiu-se cenários hipotéticos de futura implementação da rede 5G e sua hipotética contribuição para o quociente de exposição total (QET), segundo método de avaliação teórica do Ato 458 [1].

As conclusões obtidas através da comparação entre método teórico e por medição do Ato 458[1] foram aplicadas aos valores de QET calculados nos cenários de 5G.

2 - AVALIAÇÃO DAS NORMAS

O Ato 458 [1] é estruturado em 5 Anexos que vão do Anexo A até o Anexo E. No começo do Anexo A, tem-se a apresentação dos limites de exposição para população ocupacional e da população em geral a campos eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 8,3kHz e 300GHz [1]. Estes limites são os estabelecidos pela *International Commission on Non-Ionizing Radiation (ICNIRP)* e são variáveis ao longo do tempo, atualizados conforme novos testes e cálculos que apontem novos valores. A primeira diferença entre a Resolução 303 [2] e a Ato 458 [1], é que os limites seguidos pela norma mais antiga são referentes às *guidelines* [5] de 1998.

O novo valor de limite para intensidade de CEMRF seguido por [1] é mais restritivo para a população ocupacional, adultos expostos em atividades profissionais temporárias [1], em cerca de 3,6 vezes na faixa entre 8,3kHz e 1MHz. Para a população geral, o valor de limite seguido pelo Ato 458 [1] é cerca de 1,04 vezes mais rigoroso na faixa entre 3kHz e 1MHz.

Ainda dentro do escopo do Anexo A, não houve alterações nos limites da taxa de absorção média no corpo humano (SAR). É tratada também neste anexo a média temporal aplicada às frequências superiores a 100kHz, que deve ser menor que o limite de exposição referente à frequência em análise. O tempo para o cálculo do valor médio varia conforme a frequência, mas para uma grande faixa de frequência o período de análise é de 6 minutos. Na Tabela 1 são apresentados os limites de exposição a campos eletromagnéticos para a população ocupacional e na Tabela 2 os limites de exposição a campos eletromagnéticos para a população geral.

Tabela 1 - Limites de exposição a campos eletromagnéticos para a população ocupacional [1].

Faixa de Radiofrequência	Intensidade de campo, E (V/m)	Intensidade de campo, H (A/m)	Densidade de potência da onda plana equivalente S_{eq} ($\frac{W}{m^2}$)
8,3kHz a 150kHz	170	24,4	-
0,150MHz a 1MHz	170	$\frac{1,6}{f}$	-
1MHz a 10MHz	$610/f$	$\frac{1,6}{f}$	-
10MHz a 400MHz	61	0,16	10
400MHz a 2000MHz	$3 f^{1/2}$	$0,008 f^{1/2}$	$f/40$
2 GHz a 300 GHz	137	0,36	50

Fonte: ANATEL. Ato 458 [1]

Tabela 2 - Limites de exposição a campos eletromagnéticos para população em geral [1].

Faixa de Radiofrequência	Intensidade de campo, E (V/m)	Intensidade de campo, H (A/m)	Densidade de potência da onda plana equivalente S_{eq} ($\frac{W}{m^2}$)
8,3kHz a 150kHz	83	5	-
0,150MHz a 1MHz	83	$\frac{0,73}{f}$	-
1MHz a 10MHz	$83/f^{1/2}$	$\frac{0,73}{f}$	-
10MHz a 400MHz	28	0,073	2
400MHz a 2000MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$f/200$
2GHz a 300GHz	61	0,16	10

Fonte: ANATEL. Ato 458 [1]

2.1- ANÁLISES TEÓRICAS DAS NORMAS

O Anexo B disserta sobre os procedimentos para a avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos por meio de análises teóricas. O primeiro método apresentado é o chamado método padrão, sendo dividido em 2 partes, de acordo com a faixa de frequência. Para frequências acima de 30MHz, realiza-se a determinação da *assessment domain boundary (ADB)*, que remete à fronteira do domínio de avaliação, ou seja, região em que a emissão relativa à estação sendo avaliada é considerada relevante [1].

Nota-se, comparando o Ato 458 [1] com a Resolução 303 [2], uma melhoria no detalhamento da ADB para frequências acima de 30MHz. Antes, a fronteira do domínio de avaliação, para esta faixa de frequência, era representada por uma esfera centrada na antena, sendo o raio da mesma o único parâmetro calculado, sem preocupação com a natureza da emissão da antena, diretiva ou isotrópica. Na nova norma [1], para frequências acima de 30MHz, parâmetros como ângulo de *tilt* e contribuição de outras portadoras instaladas na mesma estrutura de suporte são considerados no cálculo da figura representativa da ADB que pode ser um cilindro ou um paralelepípedo, definido pela diretividade da antena.

Para frequências iguais ou inferiores a 30MHz, mantêm-se o mesmo método de cálculo da ADB. Calcula-se o raio, através da EIRP e faixa de frequência da emissão, e constrói-se uma esfera centrada na antena com o raio calculado. Para toda a faixa de frequência abrangida pelo método padrão para frequências inferiores a 30MHz, tanto para a população ocupacional quanto população em geral, houve aumento da distância mínima.

No caso em que haja acesso da população geral ou ocupacional dentro das suas respectivas ADBs, a conformidade pode ser comprovada pelo método teórico alternativo, discutido a seguir e utilizado para frequências maiores ou iguais a 10MHz, ou por medições diretas.

O método alternativo representa uma melhoria em abrangência do método teórico, uma vez que possibilita o cálculo do Quociente de Exposição Total (QET). Desta forma, mesmo que haja circulação dentro da ADB e o método teórico padrão não seja suficiente para a conformidade, há ainda a possibilidade de homologação da estação através do método teórico alternativo sem que haja a necessidade de medições.

No método alternativo é calculado o QET, obtido através do cálculo da contribuição de todas as fontes emissoras presentes na mesma torre de sustentação [1] utilizando a equação (1).

$$\sum \frac{S_i}{S_{lim,i}} = QET \leq 0,05 \quad (1)$$

Sendo $S_{lim,i}$ o limite referente à faixa de frequência da emissão i de acordo com as Tabelas 1 e 2 e S_i a densidade de potência relativa à i ésima portadora, calculada a partir das equações (2) e (3), conforme [1].

$$S_i = \frac{EIRP_i}{4\pi r^2} \cdot F(\theta, \varphi) \quad (2)$$

$$S_i = E_i \cdot H_i = \frac{E_i^2}{377} = 377H_i^2 \quad (3)$$

Sendo a $EIRP_i$ em Watts, r a distância em metros entre o ponto analisado e a i ésima antena, e $F(\theta, \varphi)$ a função de ganho normalizado, $F(\theta, \varphi) \leq 1$. O ganho normalizado é obtido pela divisão do ganho da antena para o ponto em análise pelo ganho máximo da antena. Para um caso pessimista pode-se considerar $F(\theta, \varphi)$ sempre igual a 1 [1].

Para estar em conformidade com o Ato 458 [1], deve-se assegurar que o limite de QET não seja ultrapassado [1] nos pontos em que a população geral e ocupacional tenha acesso.

Um caso notável ocorre quando apenas se está instalado na torre a emissora que está sendo avaliada. A equação (1) se reduz então a:

$$\sum_i \frac{S_i}{S_{lim,i}} = \frac{S_{avaliada}}{S_{lim,i}} = QET$$

Para a conformidade, segundo Ato 458 [1], o QET deve ser menor ou igual a 0,05, de acordo com a equação (2). Sendo $F(\theta, \varphi)$ utilizado com valor igual a 1, para uma análise conservadora.

Pela Resolução 303 [2], tem-se, analogamente para o cálculo de densidade de potência, a equação (8).

$$S = EIRP_i \cdot \frac{2,56}{4\pi r^2} \quad (8)$$

Sendo a conformidade obtida quando o valor de $S_{\text{calculado}}$ dividido pelo limite relativo àquela faixa de frequência for menor ou igual a 1, ou seja:

$$\frac{S}{S_{\text{lim}}} \leq 1.$$

O coeficiente multiplicativo igual a 2,56 presente na equação (8) é relativo ao fator de reflexão, que leva em conta a possibilidade de que campos, através da reflexão, possam se somar em fase com o campo incidente direto [2]. Comparando as 2 fórmulas, nota-se que do lado esquerdo das inequações apenas o fator de reflexão é diferente, quando considerado o valor de 1 para o ganho normalizado em todas direções. Dividindo-se 1 por 2,56 tem-se o valor de 0,3906.

Desta forma, para o caso de uma única antena emissora instalada na torre de sustentação e adotando o ganho normalizado igual a 1 em todas direções, a conformidade referente a norma [1] atual é 7,8125 vezes mais rigorosa quando comparada a norma [2] anteriormente vigente.

Os métodos teóricos da nova norma tem uma abrangência maior que a Resolução antiga. Além do cálculo de uma ADB mais detalhado para frequências acima de 30MHz no método para frequências iguais ou inferiores a 30MHz, ainda calculando uma esfera centrada na antena, o Ato 458 [1] é mais abrangente uma vez que contempla frequências no limite inferior de até 525kHz sendo que antes o limite inferior era de 1 MHz [2].

Além disso, a norma vigente [1] permite, para frequências acima de 10 MHz, uma análise de conformidade mesmo havendo a circulação de pessoas dentro da ADB, através do método alternativo calculando o QET resultante.

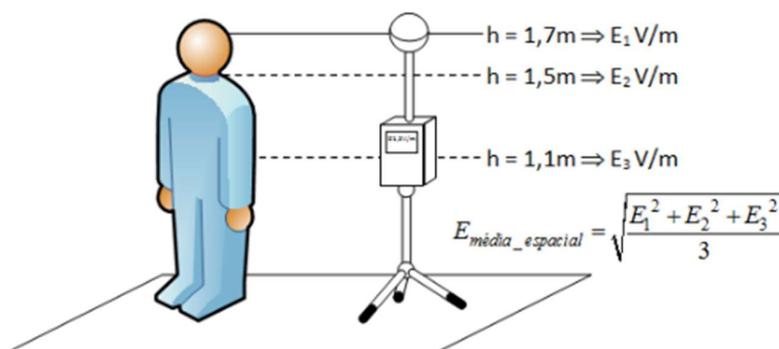
A seguir será apresentado o método direto, ou seja, por medição. Posteriormente, serão comparados os resultados obtidos pelos dois métodos, verificando se há uma sobre ou subestimação dos resultados teóricos quando comparados aos provenientes de medições.

2.2- ANÁLISES DO MÉTODO POR MEDIÇÕES DIRETAS DAS NORMAS

Para o método de medições diretas, algumas diretrizes devem ser asseguradas antes da realização dos testes de maneira a comprovar a conformidade mesmo nos cenários mais desfavoráveis.

Quando o nível de pico, no ambiente sob análise, exceder 50% do limite relativo àquela frequência, deve ser realizado uma média espacial de, pelo menos, três pontos [1]. Cada ponto deve ser espaçado, verticalmente, em no máximo 40cm e no mínimo de 20cm de pontos adjacentes [1]. Uma sugestão apresentada na norma é realizar tais medições segundo uma linha vertical em 1,10m, 1,50m e 1,70m, conforme a Figura 1, retirada do Ato 458 [1]:

Figura 1 - Exemplo de metodologia para média espacial.



Fonte: ANATEL. Ato 458 [1]

Sobre a natureza dos equipamentos ressalta-se a recomendação de realizar medições utilizando um detector do tipo “*True Root Mean Square*”.

É considerada de relevância qualquer emissão, dentro de todo o espectro abrangido pela norma [1], que esteja acima de -40dB comparado ao limite para aquela faixa, conforme estabelecido pelo Ato 458 [1].

2.2.1- Exposição Simultânea a Campos de Múltiplas Radiofrequências

Como supracitado, deve-se considerar todas as emissões acima de -40dB em relação ao limite aplicável para a frequência analisada. Em locais em que haja ou venha ser instalado mais de uma estação emissora simultaneamente é necessário que cada estação atenda, individualmente e em conjunto, os limites estipulados no Ato 458 [1].

A norma [1] determina que todas estações emissoras ativas no sítio compartilhado devem estar operando com máxima potência autorizada no momento da realização das medições. Além disso, estipula-se a cooperação entre as emissoras no que diz respeito a resultados de análises anteriores e informações técnicas relevantes para a avaliação [1].

Para casos relativos a este item são considerados dois efeitos relevantes à saúde humana. O primeiro deles remete aos efeitos atribuídos à densidade de corrente induzida e estimulação elétrica no corpo. Tal efeito é relevante para frequências abaixo de 10MHz [1]. A seguir são apresentadas as equações (4) e (5), obtidas a partir da ICNIRP [5], utilizadas para a obtenção do QET relativo a este efeito.

$$\sum_{i=8.3 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{E_i}{E_{lim,i}} = QET \leq 1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=8.3 \text{ kHz}}^{10 \text{ MHz}} \frac{H_i}{H_{lim,i}} = QET \leq 1 \quad (5)$$

As 2 equações, utilizando valor de campo elétrico e magnético, respectivamente, são equivalentes. $E_{lim,i}$ e $H_{lim,i}$ são os limites referentes à frequência em análise.

O segundo efeito é relativo ao aquecimento térmico. É relevante para todas as frequências do espectro não ionizante superiores a 100kHz [1]. A seguir são apresentadas equações (6) e (7), também retiradas da ICNIRP [5], que formulam o valor de QET referente a este efeito.

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{E_i}{E_{lim,i}} \right)^2 = QET \leq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{300 \text{ GHz}} \left(\frac{H_i}{H_{lim,i}} \right)^2 = QET \leq 1 \quad (7)$$

A norma determina também que no caso de não conformidade em relação aos limites máximos de exposição, a responsabilidade será atribuída a cada estação de acordo com a sua contribuição nos pontos em que são excedidos tais limites [1].

2.3 – ANÁLISE DE CONFORMIDADE

O que determina, ou não, a conformidade para os métodos de medição direta e teórico alternativo, no que diz respeito ao limite de exposição, é o QET. Ou seja, caso o limite máximo não seja excedido a estação analisada pode ser considerada conforme [1].

2.4 - COMPARAÇÕES DE RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO TEÓRICO E PELO MÉTODO DE MEDIÇÕES DIRETAS DO ATO 458

Objetivou-se comparar as duas abordagens, por cálculos teóricos e por medições diretas, discutidas na norma vigente [1] a fim de se saber quão fidedignamente a abordagem teórica modela os valores reais, obtidos por medição.

Para tal comparação foi montado, primeiramente, um ensaio no laboratório MagLab, localizado dentro do campus da UFSC (Trindade – Florianópolis), onde duas antenas, ambas do modelo HE200 da fabricante *Rohde & Schwarz*, foram utilizadas para radiar e medir sinais de características conhecidas. A antena emissora foi conectada a um gerador de sinais e a antena receptora foi conectada ao equipamento analisador de espectro *ETH Handheld Analyzer*. O ETH contém, carregado em sua memória, os parâmetros relativos à antena conectada ao mesmo. O *setup*, meramente ilustrativo, relativo ao ensaio é mostrado a seguir, na Figura 2.

Figura 2 – Imagem ilustrativa do *Setup* utilizado para o ensaio.



Fonte: Do autor.

Observa-se na Figura 2 que as antenas estavam apontadas uma para a outra nas suas respectivas elevações e azimutes de máxima radiação. Desta forma, retornando à equação (2), pode-se considerar o ganho adimensional como sendo igual a 1.

Conhecendo a distância entre as antenas e a EIRP referente à antena emissora, obtida a partir da potência radiada e do ganho da mesma, pôde-se obter a densidade de potência teórica $S_{teórica}$. A distância entre as antenas foi de três metros, a potência radiada foi de 1mW e o ganho relativo a cada frequência em que foram feitas medições foi obtido através do *datasheet* da antena. Utilizando a equação (3), válida para o campo distante, pode-se obter o valor de campo elétrico teórico $E_{teórico}$ a partir da densidade de potência calculada.

As equações (9) a (11) são utilizadas para determinar a distância mínima em relação à antena a partir da qual é possível considerar região de campo distante [6].

A equação (9) é relativa a antenas infinitesimais, onde a relação D/λ é muito menor que um.

$$r_{mínimo} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (9)$$

A equação (10) é relativa à antenas eletricamente pequenas, onde a relação D/λ é menor que um.

$$r_{mínimo} = 2\lambda \quad (10)$$

A equação (11) é relativa à antenas eletricamente grandes, onde a relação D/λ é maior que um.

$$r_{\text{mínimo}} = 2 \cdot \frac{D^2}{\lambda} \quad (11)$$

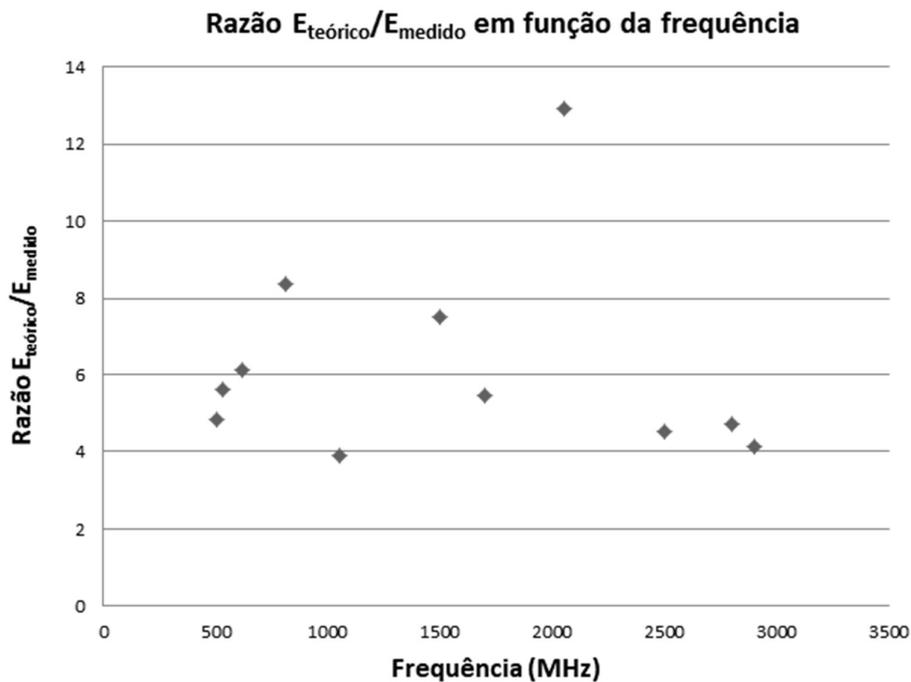
Sendo D a maior dimensão da antena e λ o comprimento de onda do sinal radiado. Para a antena utilizada D igual a 0,36m.

Pôde-se determinar que para todas as frequências em que foram realizadas medições o espaçamento entre as antenas, três metros, foi maior que a distância mínima para estar em região de campo distante.

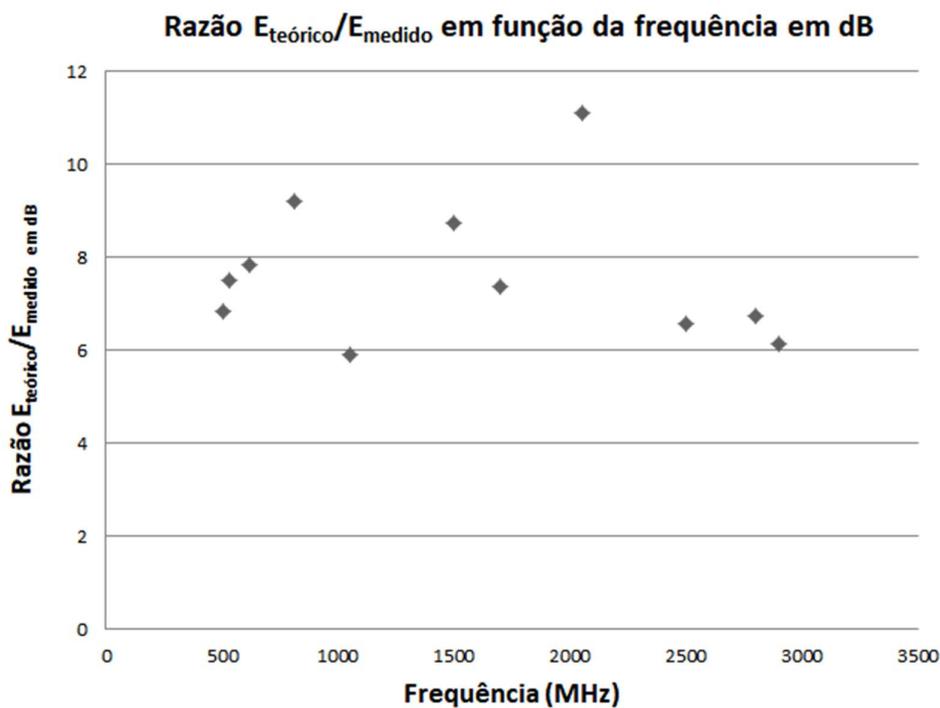
Foram realizadas medições em onze frequências distintas, entre 505MHz e 2900MHz. Maiores detalhes das medições, como metodologia e valores dos campos (V/m), são apresentados no Apêndice A

A Figura 3 apresenta o gráfico com os valores adimensionais da razão $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$. A Figura 4 apresenta o gráfico com os valores em dB da razão $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$. Os valores dos dois gráficos estão representados na Tabela 3.

Figura 3 – Razão $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$ em valor adimensional.



Fonte: Do autor

Figura 4 – Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em dB.

Fonte: Do autor

Tabela 3 – Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em valor adimensional e em dB.

Frequência (MHz)	$\frac{E_{teórico}}{E_{medido}}$	$dB\left(\frac{E_{teórico}}{E_{medido}}\right)$
810	8,37	9,22
2500	4,54	6,57
1500	7,50	8,75
615	6,11	7,86
2800	4,71	6,73
505	4,82	6,83
530	5,63	7,51
2050	12,94	11,12
1050	3,91	5,92
1700	5,45	7,37
2900	4,13	6,16

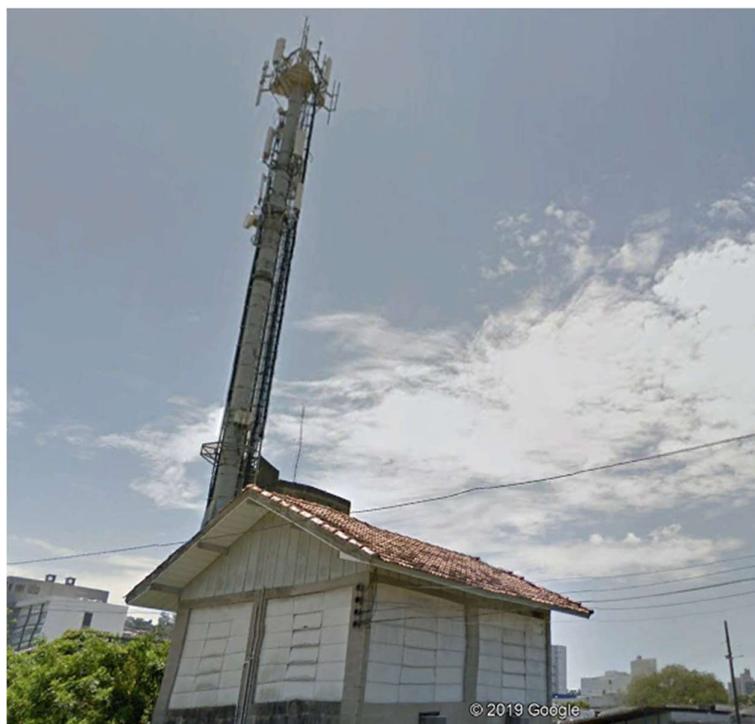
Fonte: Do autor

Os valores da razão $E_{teórico}/E_{medido}$ variaram entre 3,91 e 12,94, em valores adimensionais e entre 6,1594 dB e 11,1194 dB na escala de decibel.

Tais resultados mostram que as fórmulas indicadas no Ato 458 [1] para cálculo de densidade de potência e campo elétrico via métodos teóricos, não representam fidedignamente os valores de campo medido. Agrega-se a isso o fato de que as medidas foram realizadas com visada direta sem obstáculos entre as antenas e que a distância entre as mesmas, três metros, não representa a ordem de grandeza das distâncias médias entre antenas emissoras e receptoras referentes a serviços de radiodifusão, levando assim a menores valores de perda de percurso do sinal recebido.

Para maior espaço amostral de resultados, foi feito mais um conjunto de medições. Desta vez, foram medidos sinais provenientes de uma torre de telefonia móvel instalada próxima ao restaurante universitário (RU) da UFSC. A localização da torre supracitada é mostrada na Figura 5.

Figura 5 – Torre localizada próxima ao RU.



Fonte: Google Earth [8]

Dados das antenas da torre em análise puderam ser encontrados na plataforma Mosaico [7] da ANATEL. Foram encontradas quatro antenas de interesse. Estas quatro antenas têm seu azimute de máxima radiação em três graus, segundo

[7]. Os dados de potência radiada e ganho máximo, necessário para o cálculo da EIRP, também foram obtidos através da plataforma Mosaico [7].

Todas as medições foram realizadas em frente à reitoria antiga da UFSC em pontos no azimute, eixo horizontal, de máxima radiação ou muito próximo dele não diferindo mais que dois graus.

Como não havia informação em [7] sobre o diagrama de radiação no eixo vertical foi considerado que todas as medidas foram realizadas no ângulo de -3dB do eixo vertical. Tal inferência foi feita, pois, para o ponto mais próximo da base da torre (260m), estar-se-ia no ângulo de -3dB do eixo vertical caso o mesmo fosse, aproximadamente, 11 graus.

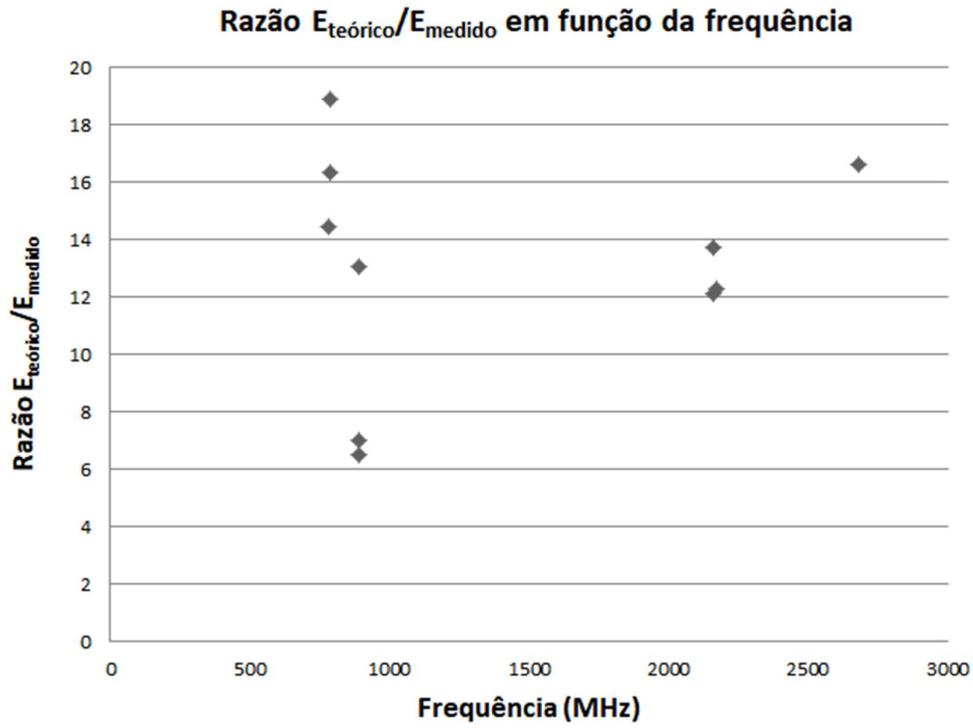
Tal cálculo foi possível através de razões trigonométricas sabendo a altura das antenas igual a 25m, a distância em que foram realizadas as medidas até a base da torre 260m, 300m e 330m, e o ângulo de *tilt* das antenas igual a zero graus.

Ou seja, caso o ângulo de -3dB das antenas analisadas fosse maior que 11 graus se estaria subestimando o campo calculado, e se desta forma a razão $E_{teórico}/E_{medido}$ se mantivesse significativamente maior que 1 haveriam bons indícios de que a fórmula presente no Ato [1] não retrata fidedignamente os campos medidos.

Para as medições, foi utilizado o kit de antenas HE 200 da marca Rohde & Schwarz conectada ao equipamento analisador de espectro *ETH Handheld Analyzer*. Maiores detalhes das medições, como metodologia e valores dos campos (V/m), são apresentados no Apêndice A.

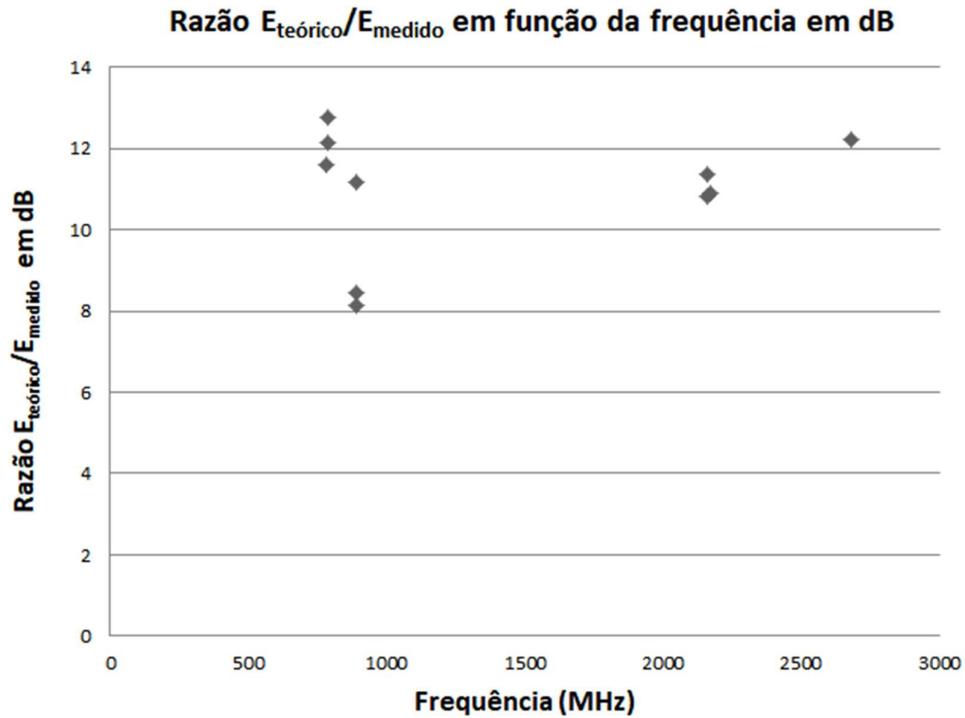
Os valores da razão $E_{teórico}/E_{medido}$ variaram entre 6,51 e 18,90, em valores adimensionais e entre 8,14 dB e 12,76 dB na escala de decibel. A Figura 6 apresenta o gráfico com os valores adimensionais da razão $E_{teórico}/E_{medido}$. A Figura 7 apresenta o gráfico com os valores em dB da razão $E_{teórico}/E_{medido}$. Os valores dos dois gráficos estão representados na Tabela 4.

Figura 6 - Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em adimensional.



Fonte: Do autor

Figura 7 - Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em dB.



Fonte: Do autor

Tabela 4 - Razão $E_{teórico}/E_{medido}$ em valor adimensional e em dB.

Frequência (MHz)	$\frac{E_{teórico}}{E_{medido}}$	$dB\left(\frac{E_{teórico}}{E_{medido}}\right)$	Distância (m)
2155-2165	13,74	11,38	260
891.5-894	13,10	11,17	260
783-793	16,35	12,14	260
2155-2165	12,32	10,91	300
891.5-894	7,00	8,45	300
783-793	18,90	12,76	300
2155-2165	12,15	10,84	330
2670-2690	16,62	12,21	330
891.5-894	6,51	8,14	330
783-793	14,45	11,60	330

Fonte: Do autor

Os resultados obtidos foram condizentes com os resultados do ensaio no MagLab. De uma forma geral, a razão $E_{teórico}/E_{medido}$ se manteve um pouco maior que os valores encontrados no ensaio controlado. Isto é esperado uma vez que as medições referentes à estação próxima ao RU foram realizadas a uma distância significativamente maior comparado ao ensaio no MagLab, levando assim à maior relevância de fatores como reflexão, difração, absorção e refração. Além disso, estes resultados têm especial importância uma vez que a ordem de grandeza da distância à antena nos pontos em que foram realizadas as medições é bem mais próxima da ordem de grandeza da distância média entre antena e usuário de serviços de radiodifusão.

Pode-se então inferir que de fato os campos calculados, utilizando a fórmula indicada no Ato 458 [1], e campos medidos apresentam uma diferença significativa em seu valor.

3 – CENÁRIOS DE IMPLEMENTAÇÃO DA REDE 5G

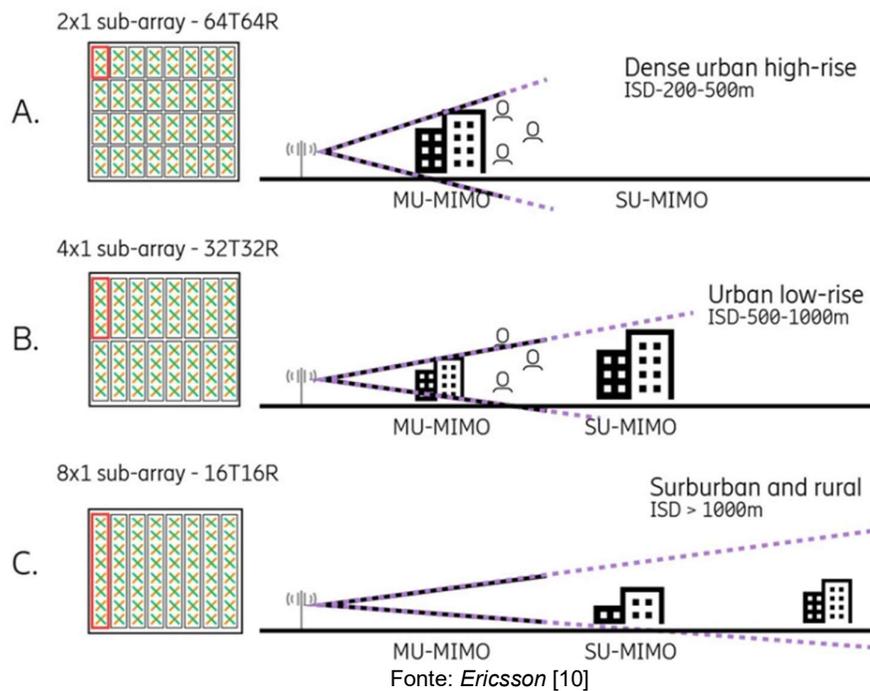
3.1 – INTRODUÇÃO À TECNOLOGIA 5G

A quinta geração de internet móvel (5G) promete revolucionar a forma de se comunicar, trazendo uma interligação nunca antes vista. Funcionalidades como maior banda, baixa latência ultra confiável e massiva interconexão digital de objetos com a internet (IoT) são os três pilares que impulsionam o desenvolvimento do 5G [9].

Carros inteligentes que possam se comunicar através do 5G com obstáculos e pessoas e evitar colisões, cirurgias e atividades que necessitem de um tempo de resposta quase imediato entre emissor e receptor e velocidades de *upload* e *download* relativos à internet móvel na ordem de *gigabytes* por segundo são alguns exemplos de avanços tecnológicos que serão possíveis com o desenvolvimento do 5G [9].

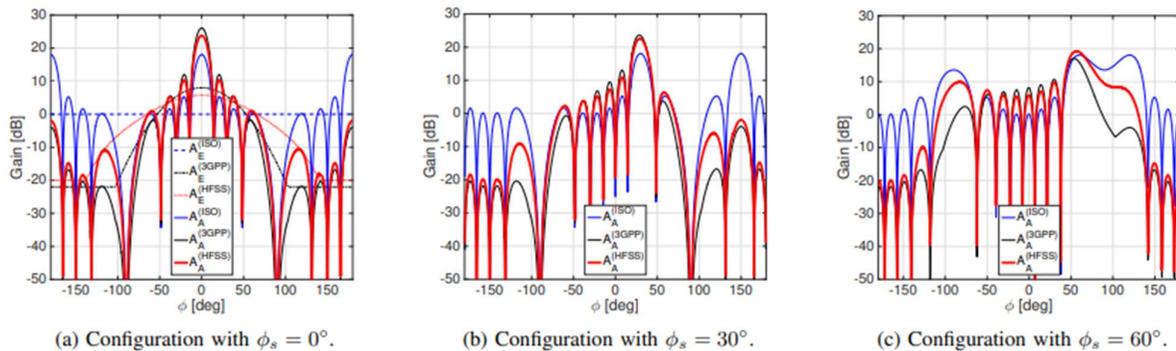
Contudo, o 5G necessitará de uma quantidade consideravelmente maior de antenas comparado às tecnologias anteriores (4G,3G,2G,1G). Segundo estudos, a distância entre estações de 5G variará entre 200 metros e 1000 metros [10]. A Figura 8 mostra diferentes configurações de antenas 5G relativas aos diferentes cenários de ambiente, assim como a faixa de distância entre estações, *Inter-Site Distance* (ISD), para cada cenário.

Figura 8 – Diferentes cenários de implementação da rede 5G.



Uma das tecnologias que será massivamente utilizada no 5G é a formação de feixe direcional (*beamforming*) que é a capacidade de direcionar o diagrama de radiação da antena ao usuário [11]. Desta forma, se terá um diagrama de radiação não estático capaz de orientar o azimute e atitude de máximo ganho em diferentes direções. Na Figura 9 é apresentado o diagrama de radiação horizontal ao se variar o azimute de máxima radiação, através da técnica de *beamforming*.

Figura 9 – Representação do diagrama de radiação horizontal variando o ângulo ϕ_s e mantendo fixo o ângulo vertical $\theta = 90^\circ$.



Fonte: IEEE [11]

3.2 – CONTRIBUIÇÃO TEÓRICA DA REDE 5G AO QUOCIENTE DE EXPOSIÇÃO TOTAL

Para a análise da contribuição da rede 5G ao QET foram montados 36 cenários relativos à implementação do 5G, sendo 18 cenários no bairro de Jurerê Internacional na cidade Florianópolis, e outros 18 cenários na região central da mesma cidade.

Foram escolhidas três frequência de emissão para o 5G: 700MHz, 3,5GHz e 30GHz, todas condizentes com as faixas de frequências mais especuladas para a implementação da quinta geração de internet móvel.

Foram escolhidos dois cenários de EIRP para as antenas de 5G: 60dBm e 75dBm. Tais valores foram escolhidos a fim de representar cenário de antenas destinadas apenas ao serviço de telefonia móvel, com EIRP de 60dBm, e representar cenário de antenas destinadas a oferecer simultaneamente o serviço de telefonia móvel e o acesso *wireless* fixo (FWA), com EIRP de 75dBm [12].

Foram escolhidos três pontos para análise em cada região, Jurerê Internacional (Florianópolis) e região central de Florianópolis, que serão detalhados no item 3.2.1.

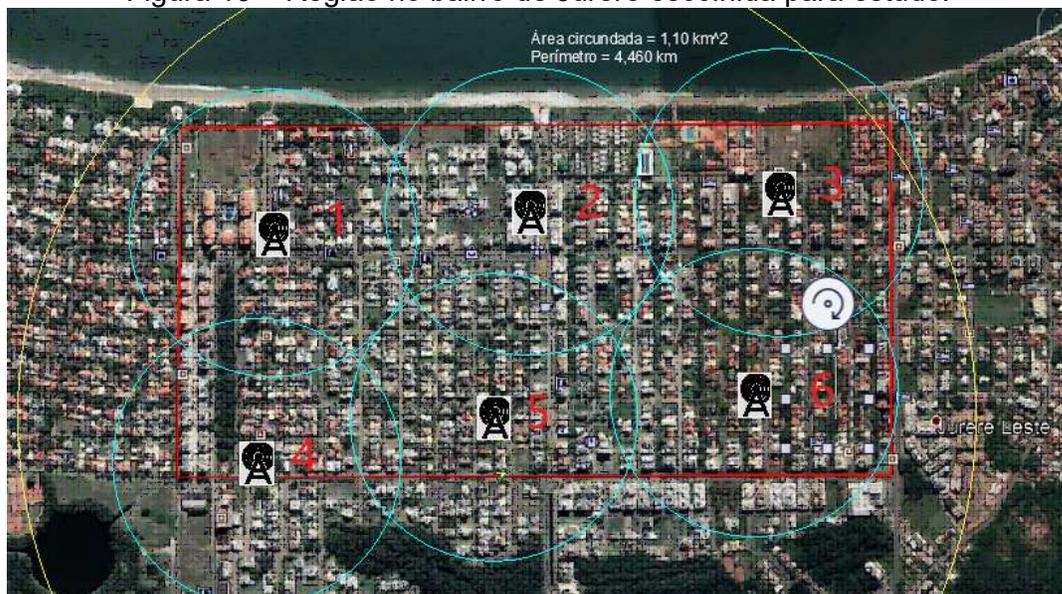
A região escolhida para estudo em Jurerê Internacional possui uma área de 1,10km² e um perímetro de 4.460 metros. Foi escolhido um raio de alcance de 300 metros para cada estação rádio base (ERB) 5G a fim de representar um cenário de urbanização não densa, homogênea e com poucas barreiras físicas como, por exemplo, edifícios altos, montanhas, entre outros.

Foi posicionada uma antena de 4G, para análise conjunta dos efeitos da rede 4G e 5G, na ERB de número 5. O raio de alcance considerado da antena de 4G foi de 1.000 metros. O número de antenas de 4G (um) e sua localização dentro da região analisada foram embasados na quantidade e no posicionamento de antenas relativas à quarta geração de internet móvel dentro da mesma área, através do portal [13] de uma empresa de telefonia.

Foi considerado que a antena de 4G opera em uma frequência de 2,5GHz e possui uma EIRP fixa de 65dBm. Este valor de EIRP foi escolhido com base em valores reais de EIRP de antenas de 4G instaladas em Florianópolis, disponível em [7]. A Figura 10 e a Tabela 5 mostram a região escolhida para análise no bairro de Jurerê Internacional, em Florianópolis, e as distâncias entre as ERBs,

respectivamente. Por padronização de notação, as estações foram numeradas da esquerda para direita e de cima para baixo. O índice menor será sempre mostrado primeiro, desta forma $d_{12} = d_{21}$. O círculo amarelo é referente ao raio de alcance da antena de 4G. Todas as distâncias foram calculadas com auxílio do programa AutoCAD™ e da escala da imagem.

Figura 10 – Região no bairro de Jurerê escolhida para estudo.



Fonte: Do autor

Tabela 5 – Distância entre ERBs.

ERBs	Distância (m)
d_{12}	539,94
d_{13}	1066,02
d_{14}	481,61
d_{15}	601,58
d_{16}	1063,61
d_{23}	526,09
d_{24}	777,84
d_{25}	761,73
d_{26}	606,83
d_{34}	1235,36
d_{35}	762,40
d_{36}	425,23
d_{45}	507,01
d_{46}	1055,39

ERBs	Distância (m)
d_{56}	548,23

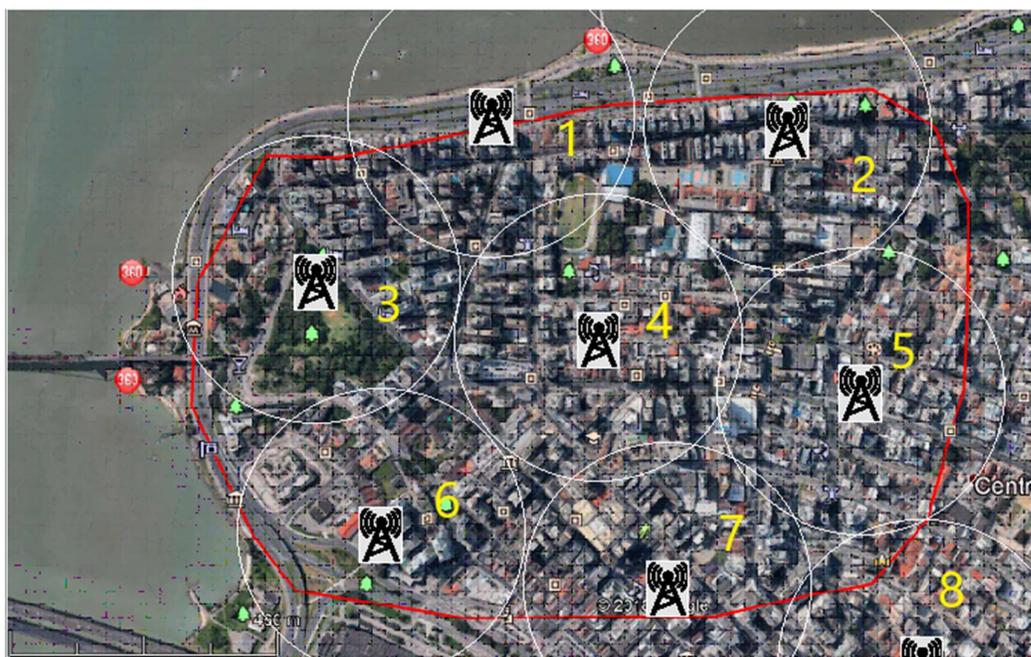
Fonte: Do autor

A região escolhida para estudo no centro de Florianópolis possui uma área de 1,014 km² e um perímetro de 3.800 metros. Foi escolhido um raio de alcance de 250 metros para cada estação rádio base (ERB) de 5G a fim de representar um cenário de urbanização densa, heterogênea e com algumas barreiras físicas como, por exemplo, edifícios altos.

Foram posicionadas antenas de 4G para análise conjunta dos efeitos das redes 4G e 5G, nas ERBs de números 1, 2, 3, 5 e 7. O raio de alcance considerado da antena de 4G foi de 1.000 metros. O número de antenas de 4G (cinco) e sua localização dentro da região analisada foram embasados na quantidade e no posicionamento de antenas relativas à quarta geração de internet móvel dentro da mesma área, através do portal [13] de uma empresa de telefonia.

Foi considerado que a antena de 4G opera em uma frequência de 2,5GHz e possui uma EIRP de 65dBm. Este valor de EIRP foi escolhido com base em valores reais de EIRP de antenas de 4G instaladas em Florianópolis, disponível em [7]. A Figura 12 e a Tabela 6 mostram a região escolhida para análise na região central de Florianópolis e as distâncias entre as ERBs, respectivamente. Por padronização de notação, as estações foram numeradas da esquerda para direita e de cima para baixo. O índice menor será sempre mostrado primeiro, desta forma $d_{12} = d_{21}$. Foram omitidos os raios de alcance das antenas de 4G, sem prejuízo para os cálculos, a fim de manter a legibilidade da Figura 11.

Figura 11- Região central de Florianópolis escolhida para estudo.



Fonte: Do autor

Tabela 6 - Distância entre ERBs.

ERBs	Distância (m)
d_{12}	419,96
d_{13}	516,01
d_{14}	432,83
d_{15}	803,65
d_{16}	754,43
d_{17}	877,60
d_{18}	1214,65
d_{23}	862,50
d_{24}	492,49
d_{25}	476,74
d_{26}	999,77
d_{27}	825,54
d_{28}	961,93
d_{34}	502,77
d_{35}	967,43
d_{36}	455,34
d_{37}	812,29
d_{38}	1247,79

ERBs	Distância (m)
d_{45}	464,66
d_{46}	508,83
d_{47}	448,17
d_{48}	797,44
d_{56}	870,30
d_{57}	477,02
d_{58}	485,47
d_{67}	507,78
d_{68}	967,75
d_{78}	461,43

Fonte: Do autor

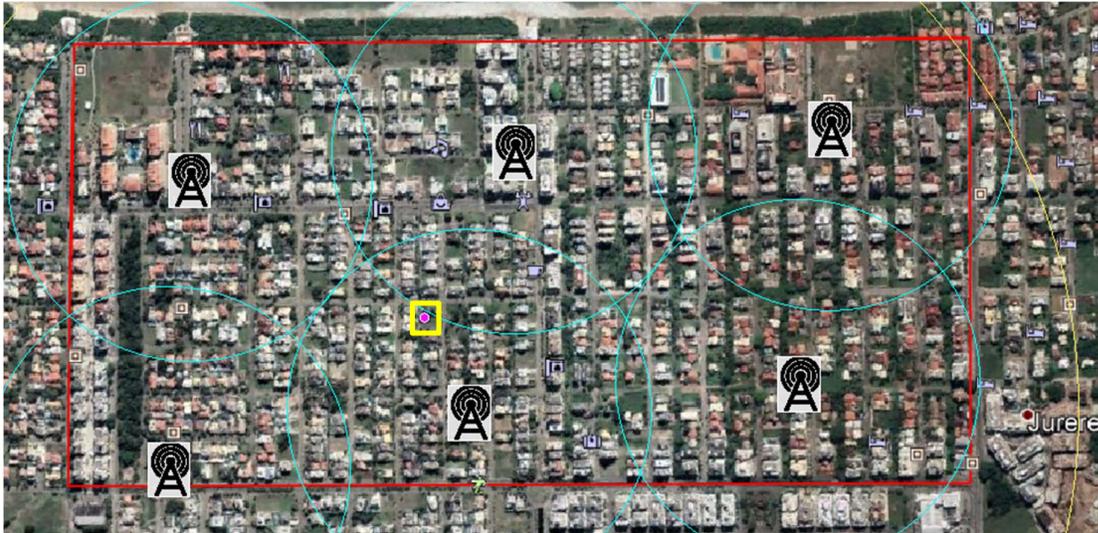
3.2.1 – Pontos Analisados

Para cada cenário de frequência e cada cenário de EIRP das antenas 5G foi feito o cálculo de QET total para três pontos. Estes três pontos escolhidos em cada região tentaram retratar uma situação de maior exposição, ou seja, onde todas ou quase todas as antenas contribuíam relevantemente, uma situação de exposição média, onde a emissão proveniente de duas ou três antenas era responsável pela maior contribuição, e uma situação de baixa exposição, onde a emissão de uma ou duas antenas era responsável pela maior contribuição, respectivamente.

Os 3 pontos escolhidos para análise, em cada região, são apresentados a seguir.

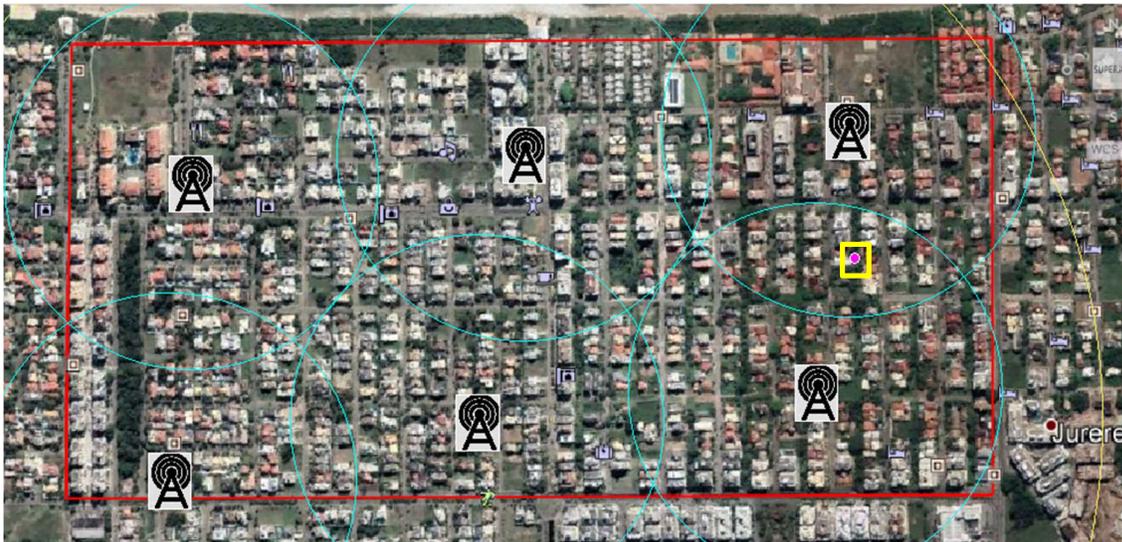
As Figuras 12 a 17 apresentam os pontos escolhidos para análise no bairro de Jurerê Internacional (Florianópolis) e na região central da cidade de Florianópolis.

Figura 12 – Ponto 1 relativo à região escolhida para estudo em Jurerê Internacional.



Fonte: Do autor

Figura 13 - Ponto 2 relativo à região escolhida para estudo em Jurerê Internacional.



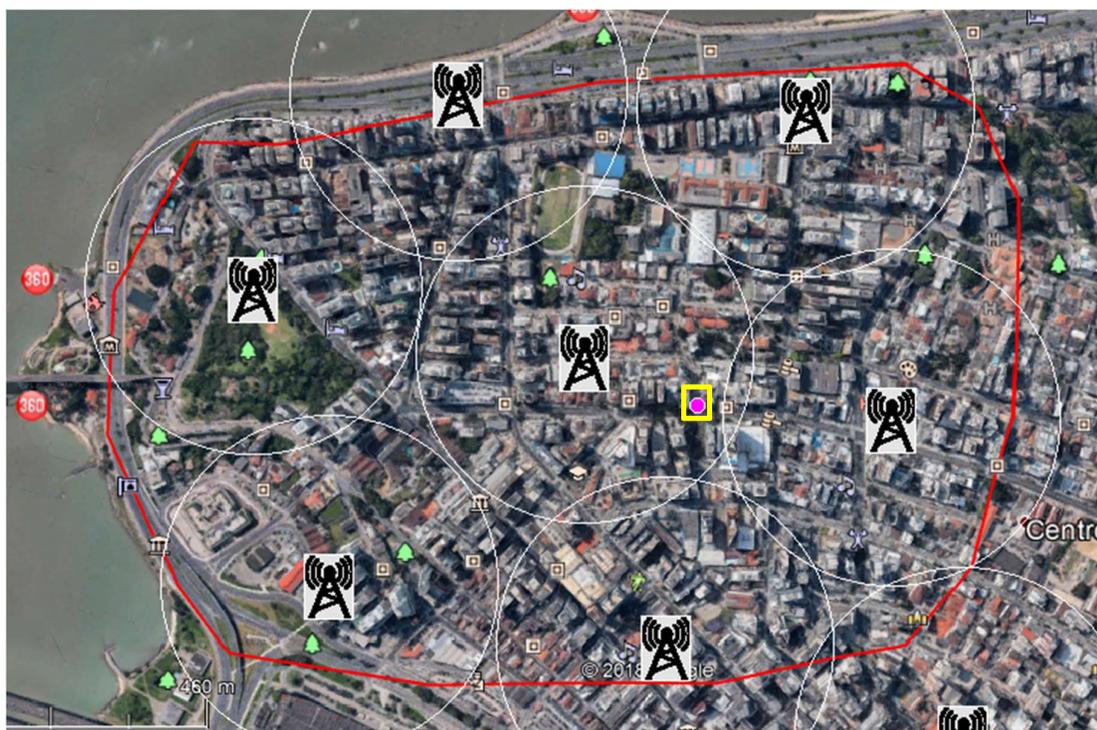
Fonte: Do autor

Figura 14 - Ponto 3 relativo à região escolhida para estudo em Jurerê Internacional.



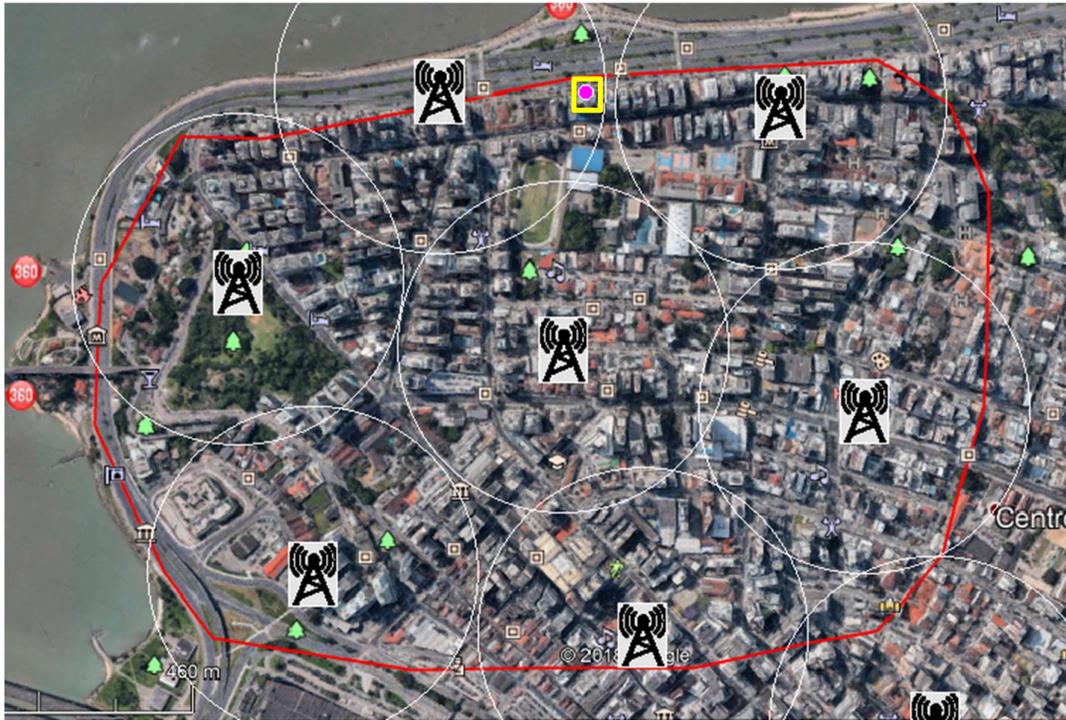
Fonte: Do autor

Figura 15 - Ponto 1 relativo à região escolhida para estudo no centro de Florianópolis.



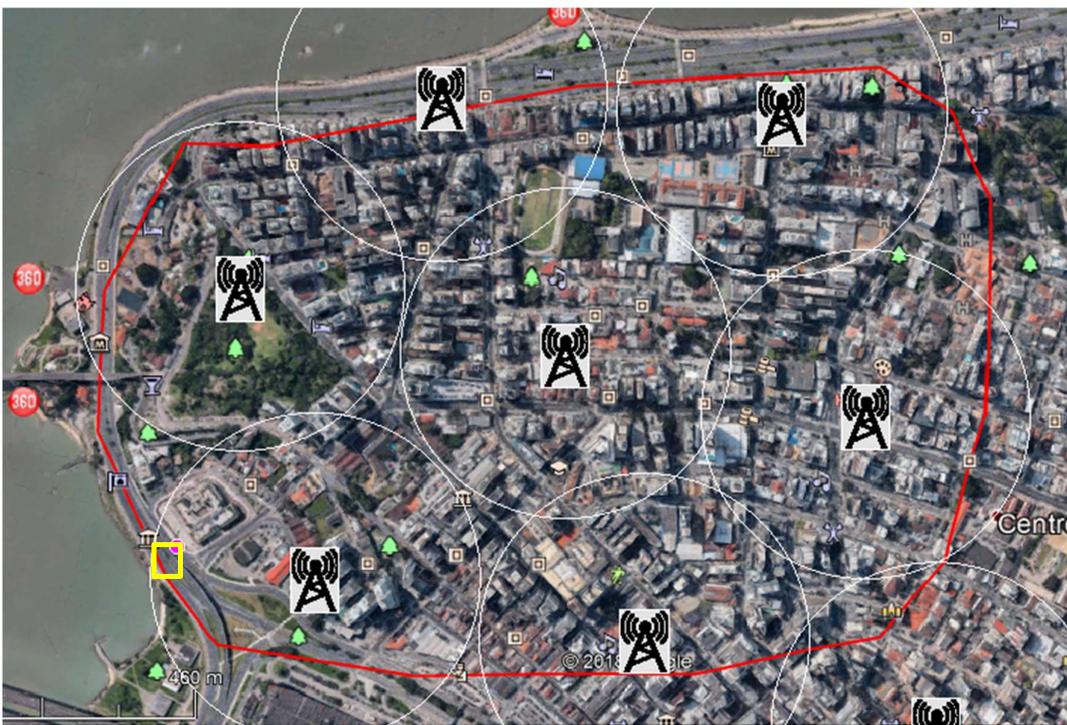
Fonte: Do autor

Figura 16 - Ponto 2 relativo à região escolhida para estudo no centro de Florianópolis.



Fonte: Do autor

Figura 17 - Ponto 3 relativo à região escolhida para estudo no centro de Florianópolis.



Fonte: Do autor

3.2.2 – Metodologia de Cálculos

Para a estimativa da contribuição de QET das antenas de 5G e 4G instaladas nas regiões de estudo, foram utilizadas as equações indicadas no método alternativo teórico do Ato 458 [1], conforme discutido no item 2.1. As equações utilizadas serão as equações (1) e (2).

Através do valor de EIRP relativa a cada antena, 60 ou 75dBm para as antenas de 5G e 65dBm para as antenas de 4G, do valor da distância do ponto até cada antena calculado utilizando-se a escala da imagem e o programa AutoCAD™, e do valor do ganho adimensional $F(\theta, \varphi)$, pôde-se calcular a densidade de potência teórica S_i através da equação (E.2). O valor do ganho adimensional foi estabelecido como 1 para as antenas de 5G, em função do *beamforming* capaz de direcionar o eixo de máxima radiação em qualquer direção, e foi estabelecido como 1 para as antenas de 4G para uma abordagem conservadora.

Calculada as densidades de potência referentes a cada antena e conhecendo o limite referente a cada faixa de frequência, obtido a partir da Tabela 2, pode-se calcular o somatório referentes à equação (1). Tal somatório refere-se ao QET e caso não se exceda o limite máximo (0,05) é possível inferir que, considerando apenas as antenas de 4G e 5G dentro da área delimitada como fontes relevantes de emissão, estar-se-ia dentro dos limites para a conformidade.

Foi realizada a soma algébrica da contribuição de cada fonte emissora para o QET, ou seja, considerou-se que todas as emissões que atingiam o ponto sob análise se adicionavam em fase (interferência construtiva).

Nota-se que o cenário construído é bem conservador em suas considerações, objetivando-se saber quais níveis de QET seriam obtidos para a pior circunstância.

As Tabelas 7 e 8 apresentam os resultados de contribuição, tanto da rede 5G quanto da rede 4G, em porcentagem. Tal valor percentual é referente ao limite máximo de QET=0,05, ou seja, caso fosse atingido exatamente o limite máximo, teria-se um QET de 100%.

Tabela 7 – Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G para uma EIRP=75 dBm referente às antenas de 5G.

Ponto Analisado	QET 5G (%)	QET 4G (%)	QET Total (%)
Ponto 1 - 700MHz Jurerê	82,32	1,69	84,01
Ponto 2 - 700MHz Jurerê	72,85	0,11	72,97
Ponto 3 - 700MHz Jurerê	41,52	0,12	41,64
Ponto 1 – 3.5GHz Jurerê	28,78	1,69	30,47
Ponto 2 – 3.5GHz Jurerê	25,49	0,11	25,60
Ponto 3 – 3.5GHz Jurerê	14,53	0,12	14,66
Ponto 1 – 30GHz Jurerê	28,78	1,69	30,47
Ponto 2 – 30GHz Jurerê	25,49	0,11	25,60
Ponto 3 – 30GHz Jurerê	14,53	0,12	14,66
Ponto 1 - 700MHz Centro	88,41	1,34	89,75
Ponto 2 - 700MHz Centro	68,60	1,94	70,54
Ponto 3 - 700MHz Centro	51,80	0,56	52,37
Ponto 1 – 3.5GHz Centro	30,93	1,34	32,27
Ponto 2 – 3.5GHz Centro	24,00	1,94	25,95
Ponto 3 – 3.5GHz Centro	18,39	0,56	18,96
Ponto 1 – 30GHz Centro	30,93	1,34	32,27
Ponto 2 – 30GHz Centro	24,00	1,94	25,95
Ponto 3 – 30GHz Centro	18,39	0,56	18,96

Fonte: Do autor

Tabela 8 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G para uma EIRP=60 dBm referente às antenas de 5G.

Ponto Analiado	QET 5G (%)	QET 4G (%)	QET Total (%)
Ponto 1 - 700MHz Jurerê	2,60	1,69	4,29
Ponto 2 - 700MHz Jurerê	2,30	0,11	2,41
Ponto 3 - 700MHz Jurerê	1,31	0,12	1,44
Ponto 1 – 3.5GHz Jurerê	0,91	1,69	2,60
Ponto 2 – 3.5GHz Jurerê	0,80	0,11	0,91
Ponto 3 – 3.5GHz Jurerê	0,45	0,12	0,58
Ponto 1 – 30GHz Jurerê	0,91	1,69	2,60
Ponto 2 – 30GHz Jurerê	0,80	0,11	0,91
Ponto 3 – 30GHz Jurerê	0,45	0,12	0,58
Ponto 1 - 700MHz Centro	2,79	1,34	4,13
Ponto 2 - 700MHz Centro	2,16	1,94	4,11
Ponto 3 - 700MHz Centro	1,63	0,56	2,20
Ponto 1 – 3.5GHz Centro	0,98	1,34	2,32

Ponto Analiado	QET 5G (%)	QET 4G (%)	QET Total (%)
Ponto 2 – 3.5GHz Centro	0,75	1,94	2,70
Ponto 3 – 3.5GHz Centro	0,57	0,56	1,13
Ponto 1 – 30GHz Centro	0,98	1,34	2,32
Ponto 2 – 30GHz Centro	0,75	1,94	2,70
Ponto 3 – 30GHz Centro	0,57	0,56	1,13

Fonte: Do autor

3.2.3 – Probabilidade de Campos de Diferentes Fontes se Adicionarem em Fase

Tendo em mente que os cálculos realizados até este momento levaram em conta apenas uma antena posicionada em cada ERB, é razoável inferir que, assim como acontece atualmente, em cada ERB estarão presentes mais de uma antena, referente às diferentes operadoras atuantes no Brasil.

Para representar a possibilidade de emissões posicionadas em faixas de frequência muito próximas, provenientes das quatro principais operadoras ativas no Brasil, se adicionarem em fases, foi considerada que esta probabilidade é a mesma que de campos refletidos se adicionarem em fase. Este fator multiplicativo, relativo à probabilidade de campos refletidos se adicionarem em fase, é igual a 2,56. Tal valor, seguido pela ANATEL, tem sua demonstração embasada no valor suposto de coeficiente de reflexão $p=0,6$ para obstáculos e barreiras [14].

As Tabelas 9 e 10 apresentam os valores de contribuição de QET após a inclusão do fator multiplicativo.

Tabela 9 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G após a inclusão do fator multiplicativo $\times 2,56$ nos cálculos. EIRP=75 dBm referente às antenas de 5G.

Ponto Analisado	QET Total (%)
Ponto 1 - 700MHz – Jurerê	215,08
Ponto 2 - 700MHz – Jurerê	186,80
Ponto 3 - 700MHz – Jurerê	106,62
Ponto 1 – 3.5GHz - Jurerê	78,02
Ponto 2 – 3.5GHz - Jurerê	65,54
Ponto 3 – 3.5GHz - Jurerê	37,53
Ponto 1 – 30GHz - Jurerê	78,02
Ponto 2 – 30GHz - Jurerê	65,54

Ponto Analisado	QET Total (%)
Ponto 3 – 30GHz - Jurerê	37,53
Ponto 1 - 700MH - Centro	229,76
Ponto 2 - 700MHz - Centro	180,60
Ponto 3 - 700MHz - Centro	134,07
Ponto 1 – 3.5GHz - Centro	82,63
Ponto 2 – 3.5GHz - Centro	66,44
Ponto 3 – 3.5GHz - Centro	48,53
Ponto 1 – 30GHz - Centro	82,63
Ponto 2 – 30GHz - Centro	66,44
Ponto 3 – 30GHz - Centro	48,53

Fonte: Do autor

Tabela 10 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G após a inclusão do fator multiplicativo x2,56 nos cálculos. EIRP=60 dBm referente às antenas de 5G.

Ponto Analisado	QET Total (%)
Ponto 1 - 700MHz – Jurerê	10,99
Ponto 2 - 700MHz – Jurerê	6,18
Ponto 3 - 700MHz – Jurerê	3,68
Ponto 1 – 3.5GHz – Jurerê	6,66
Ponto 2 – 3.5GHz – Jurerê	2,35
Ponto 3 – 3.5GHz – Jurerê	1,50
Ponto 1 – 30GHz – Jurerê	6,66
Ponto 2 – 30GHz – Jurerê	2,35
Ponto 3 – 30GHz - Jurerê	1,50
Ponto 1 - 700MHz - Centro	10,58
Ponto 2 - 700MHz - Centro	10,54
Ponto 3 - 700MHz - Centro	5,63
Ponto 1 – 3.5GHz - Centro	5,95
Ponto 2 – 3.5GHz - Centro	6,93
Ponto 3 – 3.5GHz - Centro	2,91
Ponto 1 – 30GHz - Centro	5,95
Ponto 2 – 30GHz - Centro	6,93
Ponto 3 – 30GHz - Centro	2,91

Fonte: Do autor

3.2.4 – Fontes Externas Não Consideradas

Foi considerada uma contribuição adicional externa de 10% do limite máximo (0,05) ao QET. Tal consideração é conservadora e advém do fato de que mesmo para uma antena de elevada EIRP = 85dBm, como por exemplo antenas de *link* ponto a ponto, a uma distância superior a 2km do ponto analisado, sua contribuição é inferior a 6,3% considerando a faixa mais restrita de emissão, que vai de 10 a 400MHz. Para a faixa acima de 2GHz esta contribuição seria inferior a 1,5%.

O morro da Cruz, para comparação, está a cerca de 2km da região escolhida no centro de Florianópolis.

Para uma antena de EIRP de até 65 dBm a uma distância superior de 300m do ponto analisado, sua contribuição no total de QET será inferior a 2,8% do limite máximo, considerando a faixa mais restrita de emissão. Para a faixa acima de 2GHz esta contribuição seria inferior a 0,6%. Ressalta-se que a conformidade de nenhum ponto foi alterada pela adição destes 10%.

As Tabelas 11 e 12 mostram o percentual resultante.

Tabela 11 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G após a inclusão de fontes externas. EIRP=75 dBm referente às antenas de 5G.

Ponto Analisado	QET Total (%)
Ponto 1 - 700MHz – Jurerê	225,08
Ponto 2 - 700MHz – Jurerê	196,80
Ponto 3 - 700MHz - Jurerê	116,62
Ponto 1 – 3.5GHz - Jurerê	88,02
Ponto 2 – 3.5GHz - Jurerê	75,54
Ponto 3 – 3.5GHz - Jurerê	47,53
Ponto 1 – 30GHz - Jurerê	88,02
Ponto 2 – 30GHz - Jurerê	75,54
Ponto 3 – 30GHz - Jurerê	47,53
Ponto 1 - 700MHz - Centro	239,76
Ponto 2 - 700MHz - Centro	190,60
Ponto 3 - 700MHz - Centro	144,07
Ponto 1 – 3.5GHz - Centro	92,63
Ponto 2 – 3.5GHz - Centro	76,44
Ponto 3 – 3.5GHz - Centro	58,53
Ponto 1 – 30GHz - Centro	92,63

Ponto Analisado	QET Total (%)
Ponto 2 – 30GHz - Centro	76,44
Ponto 3 – 30GHz - Centro	58,53

Fonte: Do autor

Tabela 12 - Percentual de QET atingido pelas redes de 4G e 5G após a inclusão de fontes externas. EIRP=60 dBm referente às antenas de 5G.

Ponto Analisado	QET Total (%)
Ponto 1 - 700MHz - Jurerê	20,99
Ponto 2 - 700MHz - Jurerê	16,18
Ponto 3 - 700MHz - Jurerê	13,68
Ponto 1 – 3.5GHz - Jurerê	16,66
Ponto 2 – 3.5GHz - Jurerê	12,35
Ponto 3 – 3.5GHz - Jurerê	11,50
Ponto 1 – 30 GHz - Jurerê	16,66
Ponto 2 – 30GHz - Jurerê	12,35
Ponto 3 – 30GHz - Jurerê	11,50
Ponto 1 - 700MHz - Centro	20,58
Ponto 2 - 700MHz - Centro	20,54
Ponto 3 - 700MHz - Centro	15,63
Ponto 1 – 3.5GHz - Centro	15,95
Ponto 2 – 3.5 GHz - Centro	16,93
Ponto 3 – 3.5GHz - Centro	12,91
Ponto 1 – 30GHz - Centro	15,95
Ponto 2 – 30GHz - Centro	16,93
Ponto 3 – 30GHz - Centro	12,91

Fonte: Do autor

3.2.5 – Análise dos Resultados

A partir dos resultados numéricos obtidos pelo estudo de cenários, pode-se fazer algumas análises. Em todos os pontos não conformados, ou seja, cujo QET total ultrapassou os 100%, a contribuição para o QET da rede 5G foi maior que da rede 4G. Além disso, os pontos não conformados são referentes a cenários em que as antenas da rede 5G tem EIRP igual a 75dBm.

Integralmente, os pontos não conformados foram referentes a um cenário de frequência de emissão igual a 700MHz, que possui o limite mais rigoroso das três frequências analisadas, devido ao melhor acoplamento eletromagnético com o corpo humano.

Em seis dos 36 cenários analisados, obteve-se valores de QET acima do aceitável pelo método teórico, ou seja, caso uma antena viesse a ser instalada em algum destes pontos, esta antena já estaria submetida a valor de QET maior que o permitido, considerando a abordagem teórica indicada no Ato 458 [1].

Os resultados apresentaram estabilidade do ponto de vista da conformidade, uma vez que considerando um acréscimo de 10% no percentual total de QET, relativo a fontes externas desconsideradas, nenhum cenário teve sua conformidade alterada.

A fim de mensurar o impacto da diferença observada entre campos medidos e calculados através de métodos teóricos indicados no Ato 458 [1], foi aplicado aos resultados da simulação de cenários da rede 5G uma atenuação condizente com os valores de $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$ encontrados.

No ensaio realizado dentro do MagLab, em condições controladas e minimizando o efeito de não idealidades como, refração, difração, reflexão, absorção, foram obtidos valores para a razão $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$ que variaram entre 3,91 e 12,94. Nas medições referentes à ERB instalada próxima ao RU, os valores para a razão $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$ variaram entre 6,513 e 18,899.

Analisando a equação (3) observa-se que a densidade de potência, utilizada para o cálculo de QET por método teórico, é proporcional ao quadrado do campo elétrico. Desta forma uma atenuação de 10 vezes no campo elétrico, dentro da faixa de valores obtidos para a razão $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$, resultaria em uma atenuação de 100 vezes na densidade de potência.

Aplicando um fator redutor de 100 vezes ao cenário com maior QET resultante (239,76%), obtém-se um QET máximo recalculado de 2,39%.

Calculando-se um QET médio, obtido somando-se os valores de QET de todos os cenários e dividindo este valor pelo número de cenários (36), atingiu-se um valor de QET médio igual a 63,07%, maior que metade do limite máximo aceitável.

Aplicando o mesmo fator atenuador de 100 vezes obtém-se um QET médio recalculado igual a 0,63%, muito inferior ao valor de QET médio encontrado por aplicação direta dos métodos teóricos indicados em [1].

Valores obtidos por meio de medição direta no Reino do Bahrain [15], onde já existe uma rede de 5G operante, seguindo os limites recomendados pela *ICNIRP* [4], concluíram que em nenhum ponto de análise o valor de emissão relativo à quinta geração ultrapassou 1% do limite máximo.

Na Tabela 13 é apresentada a data de cada medição realizada no Bahrain, o endereço onde a mesma foi efetuada e os valores de magnitude média, em V/m, relativos a cada rede operante (2G,3G,4G,5G).

Tabela 13 - Dados relativos às medições efetuadas no Reino do Bahrain

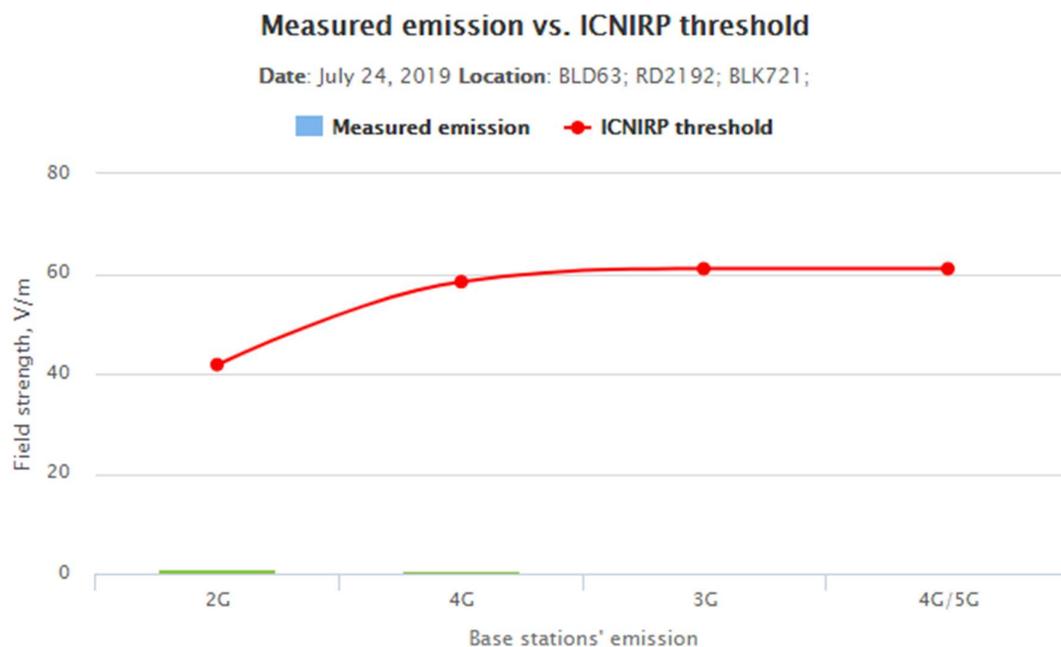
Data	Endereço de medição	Intensidade média de campo elétrico (V/m)			
		2G	3G	4G	5G
dd/mm/aaaa	(Prédio#, Rua#, Bloco#, Área)				
24/07/2019	BLD63; RD2192; BLK721;	0,914	0,515	0,348	0,474
24/07/2019	BLD1542; RD2930; BLK729;	1,277	1,143	0,716	0,342
24/07/2019	BLD937; RD2923; BLK729;	0,159	0,218	0,256	0,056

Fonte: TRA Bahrain [15]

Foi aplicado aos valores de magnitude de campo elétrico, referentes à rede 4G e 5G, obtidos na segunda medição realizada no Bahrain, a mesma metodologia de cálculo de QET teórico [1] utilizado para a construção de cenários de implementação do 5G. Obteve-se um QET relativo às duas redes, 4G e 5G, conjuntas de 0,83% do máximo permitido. Tal valor se mostra condizente ao valor de QET médio recalculado igual a 0,63%, obtido após a aplicação do fator de atenuação de 100 vezes.

Na Figura 18 é apresentado o gráfico de nível de campo elétrico máximo permitido pela *ICNIRP* [5] para cada rede operante versus o nível de emissão obtido na primeira medição realizada no Bahrain.

Figura 18 – Gráfico do valor de campo elétrico máximo versus o nível de emissão obtido na primeira medição.



Fonte: TRA Bahrain [15]

Pode ser observado que os níveis de campo elétrico medidos ficaram muito abaixo do limiar permitido pela *ICNIRP* [5]. Tal resultado reforça o indicativo que de fato as equações sugeridas no Ato 458 [1] não modelam realisticamente os campos medidos.

É ressaltado que nos três pontos em que foram realizadas medições, o valor médio de campo elétrico devido à rede 5G foi menor que o valor médio de campo elétrico devido à rede 4G e 2G.

4 - CONCLUSÃO

Constata-se que a nova norma [1] responsável por detalhar os limites de exposição ocupacional e da população em geral a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 8,3 kHz e 300 GHz traz melhorias quando comparada à norma [2] anteriormente vigente.

Sobre a determinação da conformidade por métodos teóricos, tem-se um maior detalhamento na especificação da ADB, maior abrangência de frequência e a inclusão de um método alternativo, onde se calcula o QET por métodos teóricos, que possibilita a determinação da conformidade mesmo que houver a circulação de pessoas dentro da ADB.

Além disso, a nova norma [1] traz limites referentes à ICNIRP [5] mais atuais e, portanto representa uma melhoria do ponto de vista da sociedade.

No método por medições, há também um maior detalhamento de procedimentos a serem seguidos. Finalmente, houve a inserção de um modelo para o relatório de conformidade que leva a uma padronização, positiva, dos documentos submetidos à ANATEL.

Contudo, verificou-se que as equações indicadas no Ato 458 [1] para cálculo teórico da densidade de potência e/ou cálculo de campos elétricos e magnéticos não modelam satisfatoriamente os campos medidos. Os valores da razão $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$ foram, em média, de uma ordem de grandeza.

A análise da simulação de cenários da rede 5G mostrou que quando aplicado aos campos calculados ($E_{\text{teórico}}$) uma atenuação condizente com os resultados observados da razão $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$, os valores obtidos de emissão eletromagnética são, mesmo para casos conservadores, muito abaixo do limiar máximo recomendado pela *ICNIRP* [4]. Em concordância com estes resultados pode-se citar o estudo realizado na República do Bahrain [15] onde se constatou que em nenhum dos três pontos em que foram realizadas medições, a rede 5G apresentou radiação acima de 1% do limite recomendado pela *ICNIRP* [5].

REFERÊNCIAS

[1] ANATEL, Ato nº 458, de 24 de janeiro de 2019, disponível em: [<http://www.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2019/1237-ato-458>], acessado em 01 de julho de 2019.

[2] ANATEL, Resolução nº 303, de 2 de julho de 2002, disponível em: [<http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/17-2002/128-resolucao-303>], acessado em 01 de julho de 2019.

[3] Labman, *The Production of EM waves*, disponível em [http://labman.phys.utk.edu/phys222core/modules/m6/production_of_em_waves.htm] , acessado em 01 de outubro de 2019.

[4] LEL Ambiental, Você Sabe o Que É Radiação Não Ionizante? Saiba Quais São Seus Riscos, disponível em [<https://lelambiental.com.br/artigos-tecnicos/radiacao-nao-ionizante/>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[5] ICNIRP, *ICNIRP GUIDELINES: For Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and electromagnetic fields*. Disponível em [<https://www.icnirp.org/cms/upload/publications/ICNIRPemfgdl.pdf>], acessado em 01 de julho de 2019.

[6] Wikipedia, *Near and Far Field*, disponível em [https://en.wikipedia.org/wiki/Near_and_far_field], acessado em 01 de outubro de 2019.

[7] ANATEL, Portal MOSAICO, disponível em: [<http://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/licenciamento.php>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[8] GOOGLE, Google Earth website, disponível em: [<https://earth.google.com/web>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[9] Qualcomm, *Everything You Need to Know About 5G*, disponível em [<https://www.qualcomm.com/invention/5g/what-is-5g>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[10] Ericsson, *Advanced Antenna Systems for 5G Network*, disponível em: [<https://www.ericsson.com/en/white-papers/advanced-antenna-systems-for-5g-networks>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[11] *IEEE, Study of Realistic Antenna Patterns in 5G mmwave Cellular*, disponível em: [<https://arxiv.org/pdf/1802.01316.pdf>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[12] *ALCAN, ALCAN's Smart Antenna's 5G Opportunities and Solutions*, disponível em: [<https://www.alcansystems.com/alcans-smart-antennas-5g-opportunities-and-solutions/>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[13] *TIM, TIM-Geoportal*, disponível em: [<https://tim-geoportal.geoportal3d.com.br/>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[14] Clarét Sêda R. Scudeler, Fátima. *Interação das Ondas Eletromagnéticas Com o Material Biológico*, disponível em: [<http://tede.inatel.br:8080/jspui/bitstream/tede/62/5/disserta%C3%A7%C3%A3o%20F%C3%A1tima%20Scudeler.pdf>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[15] *TRA, TRA's campaign on control of emissions in public and occupational areas*, disponível em [<https://safetymeasurements.tra.org.br/>], acessado em 01 de outubro de 2019.

[16] *Ondas Eletromagnéticas: Congestionamento Invisível. SUPERINTERESSANTE*, 31 de outubro de 2016. Disponível em: [<https://super.abril.com.br/ciencia/ondas-eletromagneticas-congestionamento-invisivel/>], acessado em 01 de julho de 2019.

[17] Henrique Cardoso, José. *Relatório de Conformidade da Estação do Link Instalada no Estúdio em Alegre-ES*. Disponível em: [http://www.fama104.com.br/radio/relato_conf_estudio.pdf], acessado em 01 de julho de 2019.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Destaca-se a necessidade de buscar por modelos teóricos que levem em conta fatores como perdas em cabos, anisotropia do espaço, difração, refração, absorção.
- Ressalta-se a necessidade de estudos que expliquem a razão das diferenças observadas entre $E_{\text{teórico}}/E_{\text{medido}}$
- Salienta-se a busca por modelo teórico que modele precisamente os campos medidos, e desta forma, chegue a resultados confiáveis, quando comparado com valores obtidos por medição direta

APÊNDICE A – Campos Medidos

Para o ensaio no MagLab a medição dos sinais foi direta, sendo a leitura dos campos constante e praticamente invariável no tempo. Na Tabela 14 são apresentados os valores de campos medidos e calculados.

Tabela 14 – Campos medidos no MagLab

Frequência (MHz)	Campo medido (V/m)	Campo calculado (V/m)
810	0,012	0,102
2500	0,017	0,077
1500	0,011	0,086
615	0,017	0,102
2800	0,015	0,072
505	0,021	0,102
530	0,018	0,102
2050	0,006	0,078
1050	0,025	0,100
1700	0,015	0,081
2900	0,025	0,064

Fonte: Do autor

Para a medição à torre próxima ao RU a leitura de campo elétrico foi menos constante, e desta forma, foi esperado até que os valores se mantivessem estáveis.

Para casos em que a antena apresentou diferença maior que 2 dB entre o acoplamento horizontal e vertical, o valor de campo foi definido como a média aritmética das duas medições. Na Tabela 15 são apresentados os valores de campos medidos e calculados.

Tabela 15 – Campos medidos referentes à torre próxima ao RU

Frequência (MHz)	Campo medido (V/m)	Campo calculado (V/m)	Distância à base da torre
2155-2165	0,025	0,69	260
891.5-894	0,028	0,74	260
783-793	0,017	0,58	260
2155-2165	0,024	0,59	300
891.5-894	0,045	0,64	300
783-793	0,013	0,50	300
2155-2165	0,022	0,54	330
2670-2690	0,017	0,60	330
891.5-894	0,044	0,58	330
783-793	0,015	0,46	330

Fonte: Do autor