



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FAIOSSANDER SUELA

# **Medição de Ruídos Eletromagnéticos Irrradiados em Sistemas de Geração Fotovoltaica**

Belo Horizonte

2016

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 937

**MEDIÇÃO DE RUÍDOS ELETROMAGNÉTICOS IRRADIADOS EM  
SISTEMAS DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA**

**FAIOSSANDER SUELA**

DATA DA DEFESA: 29/07/2016

**Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

**Medição de Ruídos Eletromagnéticos Irrradiados  
em Sistemas de Geração Fotovoltaica**

Faiossander Suela

Dissertação de mestrado submetida à banca examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de mestre em engenharia elétrica.

Orientador: Prof. José Osvaldo Saldanha Paulino

Área de concentração: Engenharia de Potência  
Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e  
Qualidade de Energia

Belo Horizonte - MG  
Julho de 2016



**"Medição de Ruídos Eletromagnéticos Irrradiados em Sistemas de Geração Fotovoltaica"**


**FAIOSSANDER SUELA**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 29 de julho de 2016.

Por:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. José Osvaldo Saldanha Paulino  
DEE (UFMG) - Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Wallace do Couto Boaventura  
DEE (UFMG)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Glássio Costa de Miranda  
Eng. Elétrica (UFMG)

*Dedico este trabalho a minha esposa e filha por todo incentivo paciência e amor. E aos meus pais por todo apoio e carinho.*

---

---

## *Agradecimentos*

---

Alguns anos se passaram e muitos desafios foram superados. Hoje comemoro mais essa vitória, mas sozinho não teria conseguido. Aproveito então para agradecer a todos que me ajudaram a realizar este sonho. Em especial:

A minha querida esposa Aline, por todo amor, dedicação, paciência e compreensão. Todo seu apoio foi fundamental em minha caminhada. Suas palavras de incentivo e sua confiança de sempre achar que as coisas iriam melhorar fez muita diferença.

A minha filha Rayne por toda responsabilidade e alegria que acrescentou em minha vida. Suas traquinagens, brincadeiras e gargalhadas, que me fizeram sorrir mesmos nos dias mais difíceis e me deram força para continuar foi determinante para concretizar este trabalho.

A meus pais por toda atenção, carinho e apoio que sempre me deram. Sempre presentes, acompanharam de perto todas as etapas de minha vida, ajudando nos momentos de dificuldade e comemorando nos momentos de alegria. Serei eternamente grato por tudo.

A meu orientador, Prof. José Osvaldo, por todos os conselhos e ensinamentos. Uma mente brilhante que sempre está disposto a ajudar. É um exemplo de profissional e de pessoa. Esse trabalho é resultado do nosso esforço. Muito obrigado por tudo!

Aos professores Wallace, Glássio, Ivan e Helder, que tiveram participação fundamental no desenvolvimento deste projeto. Agradeço pela atenção, interesse e contribuições para a realização deste projeto.

A minha irmã Karoliny por todo o carinho e admiração. Apesar das divergências, admiro muito sua coragem e autenticidade, e sei que a recíproca também é verdadeira.

A todos os funcionários da PPGEE pelo suporte que sempre me forneceram. Agradeço por toda a dedicação, atenção e disponibilidade que tiveram para me ajudar quando precisei.

Aos velhos amigos e aos novos amigos que conquistei nesta jornada, por todos os momentos de alegria e distração que nos alivia e fortalece para continuarmos a seguir nossos objetivos.

E, finalmente, ao CNPQ pelo apoio financeiro, que possibilitou minha vinda e viabilizou minha permanência em Belo Horizonte.

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas felizmente, não sou o que era antes”.*

*(Martin Luther King)*



---

---

## *Resumo*

---

A cada ano a demanda de energia elétrica cresce significativamente em todo mundo, demonstrando a necessidade de ampliação da matriz energética. Ao mesmo tempo, existe uma preocupação com os impactos ambientais causados pela construção de novas hidroelétricas e na utilização de combustíveis fósseis. Neste contexto, a energia solar fotovoltaica se apresenta como uma ótima alternativa para suprir algumas demandas. Toda via, os sistemas fotovoltaicos (SFV) apresentam alguns problemas de qualidade de energia, que podem ser inseridos na rede elétrica ou até mesmo irradiados para o ambiente.

O processo de conversão de energia CC para CA realizada por conversores CC/CA em um SFV pode gerar ruídos com amplitudes significativas em uma ampla faixa de frequência. Este ruído não somente é conduzido dos conversores para os painéis através dos cabos, mas também pode ser irradiado para o ambiente por estes cabos, que atuam como antenas no sistema, podendo causar interferências em dispositivos eletrônicos, equipamentos de rádio, ou até mesmo ser nocivo à saúde de seres humanos. No Brasil não existem normas específicas que regulamentam os níveis de radiação eletromagnética em SFV, muito menos estudos de medição de ruídos irradiados por estes sistemas, portanto, se faz necessário estabelecer mecanismos capazes de verificar se os níveis de radiação provenientes de SFV são toleráveis. Desta maneira, este trabalho tem o objetivo de medir o campo elétrico que é irradiado por um SFV no ambiente, e analisar se estes campos podem ter algum efeito nocivo a equipamentos eletrônicos ou à saúde dos indivíduos que circulam próximo a estes sistemas.

O sistema avaliado neste trabalho é parte complementar de uma usina de 1,42 MW<sub>p</sub>, instalada no estádio de futebol Governador Magalhães Pinto (Mineirão), em Belo Horizonte. Os resultados apresentados neste trabalho comprovam que o funcionamento da usina gera uma elevação significativa no nível do campo eletromagnético no ambiente, principalmente em frequências entre 1 e 50 MHz, no entanto, este campo cai para o nível de ruído ambiente a poucos metros da fonte, não representando um risco para sistemas ou indivíduos localizados nas arquibancadas do estádio.

Palavras Chave - *Medição de Ruído Irradiado, Interferência Eletromagnética Irradiada, Compatibilidade Eletromagnética, Sistemas Fotovoltaicos.*

---

---

## *Abstract*

---

The each year the electricity demand grows significantly all around the world, demonstrating the need to expand the energy grid. At the same time, there is concern about the environmental impacts caused by the construction of new hydroelectric plants and the use of fossil fuels. In this context, photovoltaic solar power is presented as a great alternative to supply some demands. However, the photovoltaic systems (PVS) have some power quality problems, which can be inserted into the grid or even radiated into the environment.

The DC power conversion to AC performed by DC / AC converters in a photovoltaic system (PVS) can generate noise with significant amplitudes in a wide frequency range. This noise is not only conducted from the converters to the panels via cables, but can also be radiated to the environment through these cables, which act as an antenna in the system causing interference in electronic devices, radio devices, or even human. In Brazil there are no specific standards that regulate electromagnetic radiation levels in PVS, much less measurement studies of the radiated noise by these systems, so, it is necessary to establish mechanisms to verify that radiation levels derived from PVS are tolerable. Thus, this study aim is to measure the electric field that is radiated by a PVS to the environment, and to examine whether these fields may have some harmful effect to electronic equipment or the health of individuals that circulate close to these systems.

The system used in this work is complementary part of a plant of 1.42 MWp, installed in the soccer stadium Governador Magalhães Pinto (Mineirão), in Belo Horizonte. The results presented in this study show that the operation of the plant generates a significant increase in the electric field level in the environment, especially at frequencies between 1 and 50 MHz, however, this field decreases to the ambient noise level a few meters from the source, not presenting a risk to systems or individuals located in the bleachers of the stadium.

Key words - Radiated Noise Measurement, Radiated Electromagnetic Interference, Electromagnetic compatibility, Photovoltaics Systems.

---

---

## *Lista de Figuras*

---

Figura 1. Crescimento da potência instalada de sistemas fotovoltaicas no mundo nos últimos anos e previsão até 2018.....	16
Figura 2. Interferência eletromagnética conduzida e irradiada em um SFV.....	18
Figura 3. Espectro eletromagnético e suas aplicações.....	22
Figura 4. (a) Propagação de uma onda plana uniforme na direção z; (b) Orientações dos campos elétricos e magnéticos.....	23
Figura 5. Balanço de energia (Teorema de Poynting).....	25
Figura 6. Elementos de EMC.....	26
Figura 7. Fluxograma das vertentes de estudo de EMC.....	27
Figura 8. Modos de Radiação de Campos Elétricos.....	28
Figura 9. Esquema para estimativa da emissão irradiada devido a circulação de corrente de modo diferencial.....	29
Figura 10. Esquema para estimativa da emissão irradiada devido a circulação de corrente de modo comum.....	29
Figura 11. (a) Comutação de tensão em um transistor; (b) Representação de um conversor como fonte de ruído.....	39
Figura 12. Interferências conduzidas ou irradiadas em um Conversor CC/CA.....	39
Figura 13. Modelo “ $\pi$ ” representando o circuito do cabo.....	40
Figura 14. Capacitâncias distribuídas de um módulo fotovoltaico composta de multiplas células e seu equivalente agrupado.....	42
Figura 15. Capacitâncias distribuídas em um conversor CC/CA.....	42
Figura 16. Circuito equivalente de um Sistema fotovoltaico.....	43
Figura 17. Analisador de Espectro Anritsu MS2712E.....	45
Figura 18. Ilustração explicativa para obtenção da faixa de frequência (SPAN).....	47
Figura 19. Influência do parâmetro RBW na medição.....	47
Figura 20. Influência do parâmetro VBW na medição.....	48
Figura 21. Influência do parâmetro SWT na medição.....	48
Figura 22. Antenas utilizadas para medição de campo elétrico: (a) Antena Monopolo Elétrico Ativa; (b) Antena <i>Loop Ativa Blindada</i> .....	49
Figura 23. Vista superior da UFV montada na cobertura do estádio Mineirão.....	51

Figura 24. (a) Vista superior das oito seções da usina fotovoltaica do estádio Mineirão; (b) Zoom de uma das seções da usina fotovoltaica.....	51
Figura 25. Configuração típica de medição de emissões irradiadas em um SFV .....	55
Figura 26. Representação do sistema de medição .....	55
Figura 27. Setup de medição do ruído irradiado por um cabo excitado em sua extremidade..	57
Figura 28. (a) Espectro de frequência do sinal de excitação dos cabos; Comparação do nível de ruído irradiado, com, e sem a presença do cabo excitado de (b) 1 m e (c) 100 m. ....	58
Figura 29. (a) Espectro de frequência do sinal de excitação do cabo; (b) Comparação do ruído irradiado pelo cabo de 10 m e do ruído ambiente.....	59
Figura 30. Configuração de medição em uma das salas dos inversores.....	60
Figura 31. Medição na sala dos inversores.....	60
Figura 32. Comparação do ruído eletromagnético irradiado pelo SFV na sala dos conversores, na arquibancada e do ruído ambiente, para as seguintes faixas de frequência: (a) 10 kHz até 1 MHz; (b) 1MHz até 50 MHz; (c) 10 kHz até 50 MHz (escala logarítmica). ....	61
Figura 33. Comparação da emissão irradiada do SFV com os limites máximos estabelecidos pela CISPR22. ....	62
Figura 34. Cabo coaxial RG 58 flexível.....	73
Figura 35. Perdas em um cabo coaxial RG 58. ....	73

---

---

## *Lista de Tabelas*

---

Tabela 1. Forma geral das equações de Maxwell	20
Tabela 2. Espectro eletromagnético e suas classificações	23
Tabela 3. Exemplos de elementos de EMC	27
Tabela 4. Limites da CISPR 11 para Emissões Irradiadas	36
Tabela 5. Níveis de referência da ICNIRP para exposição ocupacional	37
Tabela 6. Níveis de referência da ICNIRP para exposição de público em geral	37
Tabela 7. Resumo das principais prescrições normativas adotadas nas medições	54

---

---

## *Lista de Siglas*

---

AM	Modulação de Amplitude ( <i>Amplitude Modulation</i> )
ANSI	Instituto Nacional de Normas Americana ( <i>American National Standards Institute</i> )
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CISPR	Comitê Internacional Especial de Rádio Frequência ( <i>Committee International Special of Perturbation Radio</i> )
EMC	Compatibilidade Eletromagnética ( <i>Electromagnetic Compatibility</i> )
EC	Comunidade Europeia ( <i>European Community</i> )
EPIA	Associação Europeia das Industrias Fotovoltaicas ( <i>Europe Photovoltaic Industry Association</i> )
FA	Fator de Antena
FCC	Comissão Federal para Comunicações ( <i>Federal Communication Commission</i> )
ICNIRP	Comissão Internacional para Proteção à Radiação Não-Ionizante ( <i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i> )
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional ( <i>International Electrotechnical Commission</i> )
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos ( <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> )
IEM	Interferência Eletromagnética
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
RBW	Resolução de Largura de Banda ( <i>Resolution Bandwidth</i> )
SAR	Taxa de Absorção Específica ( <i>Specific Absorption Rate</i> )
SFV	Sistema Fotovoltaico
SPAN	Intervalo de Frequência
SWT	Tempo de Varredura ( <i>Sweep Time</i> )
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UFV	Usina Fotovoltaica
VBW	Filtro de Vídeo ( <i>Video Bandwidth</i> )

---

---

## *Sumário*

---

Agradecimentos.....	6
Resumo.....	8
Abstract .....	9
Lista de Figuras .....	10
Lista de Tabelas.....	12
1 Introdução.....	16
1.1 Contexto Atual.....	16
1.2 Definição do Problema .....	17
1.3 Objetivo .....	18
1.4 Motivação .....	18
1.5 Estrutura do Trabalho .....	19
2 Fundamentação Teórica .....	20
2.1 Fundamentos de Eletromagnetismos .....	20
2.1.1 Ondas Eletromagnéticas .....	22
2.1.2 Propagação de Ondas Planas no Espaço Livre.....	23
2.1.3 Considerações Finais .....	25
2.2 Conceitos de Compatibilidade Eletromagnética (EMC) .....	26
2.2.1 Interferência Eletromagnética.....	26
2.2.2 Emissões Irradiadas .....	28
2.2.3 Susceptibilidade Eletromagnética em Equipamentos Eletrônicos.....	30
2.2.4 Susceptibilidade Eletromagnética em Seres Vivos .....	31
2.2.5 Unidades de Medida Utilizadas em EMC .....	33
2.3 Normas de EMC para Emissões Irradiadas .....	35
2.3.1 Normas para Sistema de Medição .....	35
2.3.2 Normas para Procedimento de Medição.....	35
2.3.3 Normas para Limites de Segurança de Equipamentos Eletrônicos .....	36
2.3.4 Normas para Limites de Segurança de Seres Vivos .....	36

3	Interferência Eletromagnética em Sistemas Fotovoltaicos .....	38
3.1	Conversores CC/CA como Fonte de Ruído.....	38
3.2	Influência dos Cabos no Mecanismo de Condução e Irradiação dos Ruídos Eletromagnéticos .....	40
3.3	Elementos Parasitas de um SFV .....	41
3.4	Circuito Equivalente de um Sistema Fotovoltaico .....	43
4	Materiais e Metodologia de Medição.....	44
4.1	Instrumentos de Medição de Campo Elétrico.....	44
4.1.1	Analisador de Espectro .....	44
4.1.2	Sensores de Campo Elétrico .....	49
4.2	Planta Fotovoltaica Sob Estudo.....	51
4.2.1	Características Construtivas da Usina Fotovoltaica do Mineirão.....	51
4.2.2	Limitações da Planta sob Estudo.....	52
4.3	Medição de Emissões Irradiadas em SFV .....	53
4.3.1	Protocolo de Medição .....	53
4.3.2	Sistema de Medição.....	55
5	Investigação Experimental e Resultados.....	57
5.1	Análise Experimental da Influência do Tamanho dos Cabos no Mecanismo de Radiação de Campos Eletromagnéticos.....	57
5.2	Medição e Análise do Ruído Irradiado nas Proximidades da Usina Fotovoltaica do Mineirão.....	59
6	Conclusões.....	63
6.1	Conclusões Preliminares dos Estudos Teóricos .....	63
6.2	Conclusões da Análise Experimental .....	64
6.2.1	Influência do Tamanho dos Cabos no Mecanismo de Radiação dos Campos Eletromagnético.....	64
6.2.2	Medições da Emissão Irradiada pelo SFV do Mineirão .....	65
6.3	Sugestão para Trabalhos Futuros.....	66
	Referências Bibliográficas .....	68
	ANEXOS.....	71
A.1	Antenas Utilizadas e Suas Características .....	71
A.1.1	Antena Monopolo Ativa 3301C (ETS-Lindgren).....	71
A.1.2	Antena Loop Ativa Blindada 6502 (ETS - Lindgren).....	72
A.2	Cabo Utilizado e Suas Características .....	73

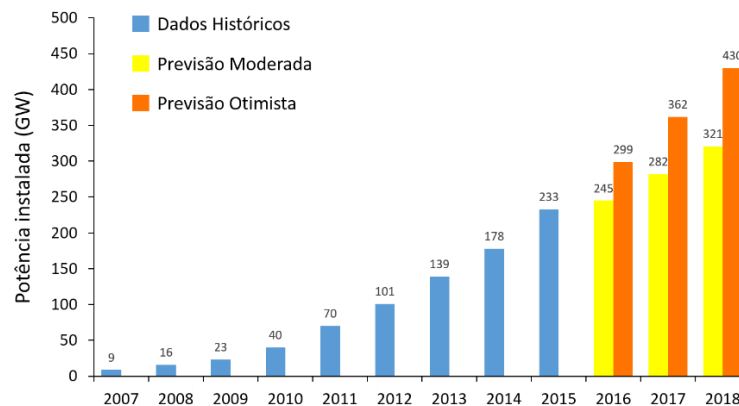


# 1 Introdução

## 1.1 Contexto Atual

A crescente demanda de energia elétrica em cenário mundial mostra a necessidade cada vez maior da ampliação e construção de novas usinas de geração de energia. Ao mesmo tempo, existe uma grande preocupação em relação aos impactos ambientais relacionado a construção de usinas hidroelétricas e o consumo de combustíveis fósseis em usinas termoelétricas. Neste contexto, a utilização de fontes alternativas de energia é cada vez mais estudada e aplicada, e a energia solar fotovoltaica está entre as energias alternativas que apresenta um maior crescimento de implantação nos últimos anos em todo o mundo [1].

A Figura 1 mostra o crescimento da energia solar fotovoltaica instalada nos últimos anos.



**Figura 1.** Crescimento da potência instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo nos últimos anos e previsão até 2018 (adaptado de [1]).

No Brasil, o alto custo associado a importação de equipamentos (não existem ainda equipamentos com tecnologia 100 % nacional) dificulta a instalação de sistemas fotovoltaicos. Portanto, embora tenha grande potencial de geração deste tipo de energia, o Brasil está muito atrás de alguns países que possuem potenciais de geração bem menores, mas que vem investindo alto neste seguimento, como é o caso da Alemanha, Itália, Espanha, China, Japão e EUA [1]. Só para se ter uma ideia, segundo a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), o índice máximo de insolação da Alemanha encontra-se em torno de  $3,4 \text{ kWh/m}^2$ , enquanto no Brasil os valores médios encontram-se entre  $4,8$  e  $6 \text{ kWh/m}^2$  [2].

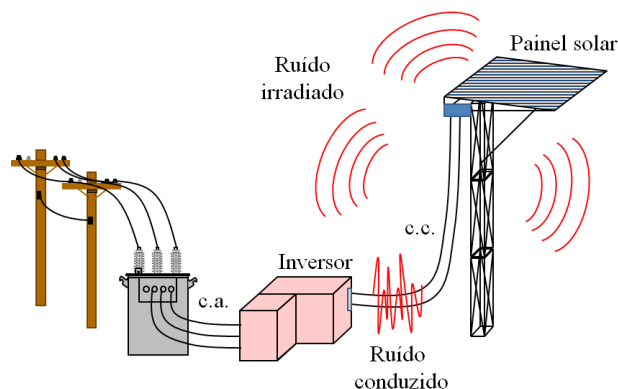
No entanto, a crise no setor energético nacional vivida atualmente, tem demonstrado a necessidade de uma ampliação da capacidade de geração de energia no país. Problemas já mencionados, como os impactos ambientais envolvidos na construção de novas hidroelétricas e o apelo mundial na utilização de energias alternativas que sejam mais amigáveis ao meio ambiente, aliado a escassez de chuva experimentada em algumas regiões do país nos últimos anos, torna a geração fotovoltaica uma boa alternativa para o problema.

Há alguns anos, medidas de incentivo à inserção de geração fotovoltaica vem sendo adotadas. O maior avanço neste sentido, foi a regulação das minis e microgeradoras distribuídas que permite, basicamente, que os consumidores instalem pequenos geradores em suas unidades consumidoras e injetem a energia excedente na rede em troca de créditos na conta de energia [3]. A partir daí: subsídios, incentivos fiscais, condições diferenciadas de financiamento, redução e isenção de impostos, incentivo a pesquisa e desenvolvimento (P&D), dentre outras medidas, vêm contribuindo para o crescimento da utilização de geração fotovoltaica no país, e alguns projetos de grandes usinas estão em andamento [4], [5].

## ***1.2 Definição do Problema***

A energia fotovoltaica já se mostrou uma ótima alternativa para suprir algumas demandas. No entanto, estes sistemas apresentam alguns problemas de qualidade de energia, que podem ser inseridos na rede elétrica ou até mesmo irradiados para o ambiente.

Como a energia fotovoltaica é gerada em corrente contínua (CC), é necessário a conversão da mesma para corrente alternada (CA), de maneira que esta energia possa ser inserida no sistema elétrico. Essa conversão é feita através dos conhecidos conversores CC/CA. Já é amplamente entendido que o processo de conversão CC/CA gera diversos problemas de transitórios eletromagnéticos, causados pelo rápido chaveamento da tensão/corrente, que gera um conteúdo harmônico (ruídos) significativo em uma ampla faixa de frequência. Este ruído não somente é conduzido do inversor para o painel através dos cabos, mas também pode ser irradiado para o ambiente por estes cabos, que atuam como antenas no sistema, podendo causar interferências em dispositivos eletrônicos, equipamentos de rádio, ou até mesmo prejudicar a saúde de seres humanos [6] [7] [8]. O processo de radiação eletromagnética em um SFV está representado através da Figura 2.



**Figura 2.** Interferência eletromagnética conduzida e irradiada em um SFV.

Aliado a tudo isso, não existe no Brasil uma legislação específica com o objetivo de normalizar os limites de radiações provenientes desses sistemas, e muito menos um controle de qualidade rigorosa dos conversores instalados no país, no que diz respeito a níveis de radiação eletromagnética. Assim não é possível prever, de maneira eficiente, a quantidade de ruído que será irradiado por uma usina de grande porte que empregará vários destes conversores.

### **1.3 Objetivo**

No contexto apresentado até aqui, este trabalho visa realizar estudos teóricos e experimentais a respeito de medição de campos eletromagnéticos irradiados por um SFV. Serão realizadas medições e análises do perfil do campo elétrico irradiado na faixa de frequência que se estende de 10kHz até 50MHz nas proximidades de uma usina fotovoltaica (UFV), com a finalidade de identificar se estes ruídos podem ou não causar interferências eletromagnéticas em sistemas e instalações nas proximidades da planta, e, caso necessário, propor soluções para a atenuação destes ruídos.

### **1.4 Motivação**

Este trabalho se iniciou como parte integrante de um projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D\_D470 e tem como maior motivação contribuir para o melhor entendimento do ambiente eletromagnético em locais próximos a grandes SFV, fazendo uma análise técnica dos níveis de radiação encontrados e os possíveis danos associados a eles.

Em virtude de um conjunto de problemas o projeto foi suspenso e o presente trabalho foi desenvolvido nas dependências da usina fotovoltaica instalada no estádio de futebol Governador Magalhães Pinto (Mineirão).

### **1.5 Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação está dividida em 6 (seis) capítulos. O presente capítulo é dedicado à apresentar uma introdução do trabalho, aonde é feita uma contextualização do tema e o problema a ser estudado é definido. Além disso o capítulo expõe o objetivo do trabalho bem como as principais motivações de seu estudo.

O Capítulo 2 aborda os conceitos fundamentais de eletromagnetismo, teoria de ondas e propagação, os conceitos básicos de EMC bem como as normas aptas a serem aplicadas no contexto do presente trabalho. Desta forma, fica solidificada toda a fundamentação teórica que sustenta este projeto.

O Capítulo 3 estabelece os aspectos teóricos que estão diretamente aplicados no desenvolvimento deste trabalho. Neste capítulo são definidas teorias e hipóteses a respeito dos mecanismo de geração, propagação e emissão dos ruídos eletromagnéticos em SFV.

O capítulo 4 apresenta todo o instrumental utilizado nas medições bem como discute pontualmente as principais características destes instrumentos. Também é feita uma análise da planta fotovoltaica sob estudo. Além disso, o capítulo apresenta o protocolo desenvolvido para realizar as medições e um *setup* para medição de emissões irradiadas em um SFV.

A metodologia detalhada de cada medição realizada neste trabalho e os resultados obtidos nestas medições são apresentados no capítulo 5. Com base nestes resultados, o capítulo também traz uma avaliação específica para cada ensaio proposto.

Por fim, o capítulo 6 apresenta uma avaliação global do trabalho, com uma breve discussão e conclusão. Neste capítulo também são feitas sugestões e propostas para trabalhos futuros, a fim de complementar esta obra.

## 2 Fundamentação Teórica

Este capítulo se propõe a fazer uma revisão dos principais conceitos e teorias que sustentam o tema deste trabalho. Primeiramente são apresentados alguns fundamentos de eletromagnetismo. Em seguida, conceitos básicos de compatibilidade eletromagnética (EMC) e interferência eletromagnética (EMI) são discutidos.

### 2.1 Fundamentos de Eletromagnetismos

Para o entendimento adequado deste trabalho é muito importante entender a teoria de campos eletromagnéticos. O cálculo de campos eletromagnéticos muitas vezes exige exaustivas análises vetoriais e a resolução de complexas equações diferenciais. Por se tratar de um trabalho de medição, este tópico faz uma análise mais conceitual das equações de campo, que possuem interpretações físicas relativamente simples. Assim, a prioridade aqui é o entendimento do mecanismo de geração e propagação de campos eletromagnéticos, desta forma, a carga matemática que envolve tais teorias será suprimida na medida do possível.

Baseados em estudos de físicos, como: Ampère, Gauss e Faraday. James Clerk Maxwell unificou, em 1864, todos os fenômenos elétricos e magnéticos observáveis que estabeleceu conexão entre as várias teorias da época. Maxwell demonstrou, com essa nova teoria, que todas os fenômenos elétricos e magnéticos poderiam ser descritos por apenas quatro equações, conhecidas atualmente como equações de Maxwell, essas equações estão descritas na tabela abaixo. A forma integral das equações de Maxwell evidencia as leis físicas subjacentes, enquanto a forma diferencial é usada mais frequentemente na solução de problemas [9] [10].

**Tabela 1.** Forma geral das equações de Maxwell.

Forma Diferencial	Forma Integral	Nomenclatura	Meio material	Legenda
$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$	$\oint \vec{D} \cdot d\vec{s} = \int \rho_v \cdot dv$	Lei de Gauss Elétrica	$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$ $\vec{B} = \mu \vec{H}$ $\vec{J}_c = \sigma \vec{E}$	$\vec{E} \rightarrow$ Intesidade de campo elétrico $\vec{H} \rightarrow$ Intesidade de campo magnético $\vec{D} \rightarrow$ Densidade de fluxo elétrico $\vec{B} \rightarrow$ Densidade de fluxo magnético $\rho \rightarrow$ Densidade de carga elétrica $\vec{J} \rightarrow$ Densidade de corrente elétrica
$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0$	Lei de Gauss Magnética		
$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \vec{B} \cdot d\vec{S}$	Lei de Faraday		
$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S}$	Lei de Ampère		

Como já foi mencionado, não estamos preocupados com a essência matemática do cálculo de campos eletromagnéticos, e sim, com o entendimento do fenômeno que as equações de Maxwell descreve. Deste modo, a interpretação física das equações de Maxwell é discutida a seguir [9] [10].

**Lei de Gauss:** A existência de uma densidade volumétrica de carga em um ponto qualquer produz uma densidade de fluxo elétrico de natureza divergente, ou seja, cargas pontuais geram campos elétricos que entram ou sai de sua superfície.

**Lei de Gauss Magnética:** A densidade de campo magnético de natureza divergente é nula, ou seja, não existe fonte de campo magnético do tipo divergente. Em outras palavras, a densidade de fluxo magnético divergente que sai de um volume no espaço é igual ao que entra no mesmo.

**Lei de Faraday:** A variação no tempo da densidade de fluxo magnético em um ponto, gera um campo elétrico de natureza rotacional. O sinal negativo significa que o sentido do fluxo gerado, tende a se opor a variação do fluxo que o gerou.

**Lei de Ampère:** A variação no tempo da densidade de fluxo elétrico bem como uma densidade de corrente constitui fonte de campo magnético de natureza rotacional. Em outras palavras, a existência de corrente gera um campo magnético que circula no plano ortogonal a direção da densidade de corrente.

Pode-se perceber que os efeitos de campo elétrico e campo magnético podem ocorrer de forma complementar. Cargas livres em um meio, submetidas a um campo elétrico, podem entrar em movimento transferindo energia de um ponto para outro. O movimento das cargas produz um campo magnético variável, além da criação de novas cargas devido ao deslocamento. Por sua vez, as novas cargas permitem o surgimento de um campo elétrico variável, capaz de deslocar essas novas cargas, resultando novamente na produção de campo magnético.

Esse efeito combinado, tem como consequência a propagação de ondas eletromagnéticas entre dois pontos no espaço, de forma que um campo elétrico variável gera um campo magnético variável, que por sua vez produz um campo elétrico variável e assim sucessivamente. Este fenômeno também é conhecido como irradiação eletromagnética que é de grande interesse deste trabalho [11].

### 2.1.1 Ondas Eletromagnéticas

Como foi discutido anteriormente, as equações de Maxwell prevê que um campo magnético variável no tempo gera um campo elétrico variável no tempo e vice-versa, assim, existe uma autossustentação dos campos elétricos e magnéticos. Esse fenômeno foi denominado de ondas eletromagnéticas, e constitui uma maneira eficiente de transporte de energia e informação [9].

As ondas eletromagnéticas respeitam todas as leis que regem a teoria dos fenômenos ondulatórios, como: reflexão, refração, difração, superposição, interferência, entre outros [12]. As ondas eletromagnéticas viajam em alta velocidade, que depende diretamente do meio de propagação, e dependendo de sua frequência podem atravessar diferentes obstáculos físicos, tais como gases, água, paredes, superfícies condutoras, dentre outras [13]. Assim, o comportamento de interação das ondas eletromagnéticas com o meio depende fundamentalmente de sua frequência, e, portanto, as aplicações práticas a quais foram destinadas são divididas em faixas de frequência bem definidas. A divisão do espectro de frequência e algumas aplicações práticas podem ser observadas na Figura 3.

A Tabela 2 destaca as faixas de frequência de interesse neste trabalho. Nesta faixa de frequência, a característica de propagação das ondas pode ser aproximada pelo comportamento de uma *onda plana uniforme*, que consiste no tipo mais simples de onda e propagação. Essa característica é particularmente interessante, não só pela sua simplicidade, mas também pelo fato de que a propagação de ondas em linhas de transmissão ou de ondas propagadas por antenas pode ser satisfatoriamente representada por esta aproximação.

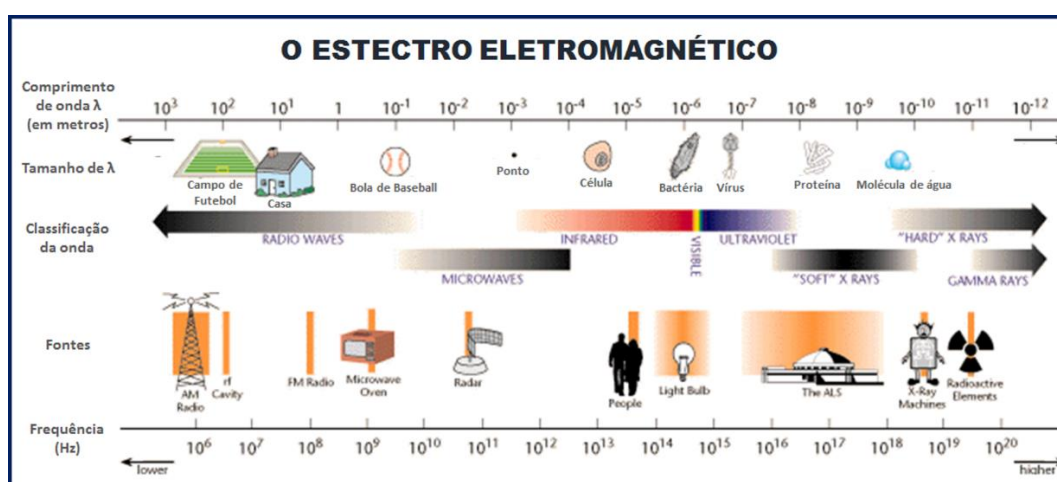


Figura 3. Espectro eletromagnético e suas aplicações (adaptado de [13]).

**Tabela 2.** Espectro eletromagnético e suas classificações.

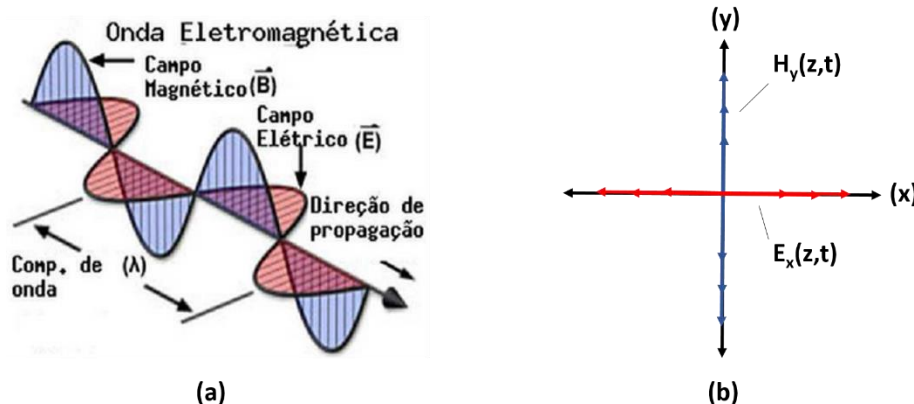
Espectro de Frequência				
Frequência		Comprimento de onda		Algumas aplicações
Classificação	Faixa	Definição	Faixa	
Muito baixas (ELF)	3 kHz a 30 kHz	Muito longas	100 km a 10 km	Deteção de estruturas subterrâneas
Baixas (LF)	30 kHz a 300 kHz	Longas	10 km a 1 km	Comunicação Subterrânea
Médias (MF)	300 kHz a 3 MHz	Médias	1 km a 100 m	Rádio AM
Altas (HF)	3 MHz a 30 MHz	Curtas	100 m a 10 m	Comunicação de submarinos

### 2.1.2 Propagação de Ondas Planas no Espaço Livre

Em uma onda plana uniforme, o campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e o campo magnético ( $\vec{H}$ ) são perpendiculares entre si e normais à direção de propagação da onda [9] [10]. Estas características implicam em simplificações importantes nas equações dos campos elétricos e magnéticos que compõe a onda EM.

A propagação de uma onda plana uniforme pode ser caracterizada por alguns parâmetros, que serão discutidos a seguir. A orientação dos campos e a direção de propagação da onda utilizada nesta análise é convencionada conforme a Figura 4.

Por questões de simplificações, os cálculos realizados neste trabalho consideram o vácuo como meio de propagação das ondas eletromagnéticas. Desta forma, para o espaço livre o meio é caracterizado por:  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  [F/m],  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  [H/m] e  $\sigma = 0$  [S/m].



**Figura 4.** (a) Propagação de uma onda plana uniforme na direção z; (b) Orientações dos campos elétricos e magnéticos (Adaptado de [13]).



Com base nas considerações feitas até aqui, pode-se afirmar que a onda eletromagnética se propaga na direção  $z$ , com uma velocidade que é definida pela Equação 1.

$$v = \lambda f = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = c \cong 3 \times 10^8 \text{ [m/s]} \quad (1)$$

Através da aplicação das equações de Maxwell e considerando as simplificações permitidas pelas características do problema, é possível obter as expressões que regem a variação temporal e espacial dos campos envolvidos [10].

$$E_x(z, t) = E_0 \cos(\omega t - \beta z) \text{ [V/m]} \quad (2)$$

$$H_y(z, t) = H_0 \cos(\omega t - \beta z) \text{ [A/m]} \quad (3)$$

Onde  $\beta$  representa a constante de fase, dada por:

$$\beta = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \text{ [rad/m]} \quad (4)$$

O comprimento de onda é representado por  $\lambda$ , e pode ser obtido pela equação:

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \text{ [m]} \quad (5)$$

Uma outra propriedade importante é a *impedância intrínseca* do meio ( $\eta$ ) que relaciona a magnitude do campo elétrico e do campo magnético [9] [10]. Este parâmetro é dado pela seguinte expressão:

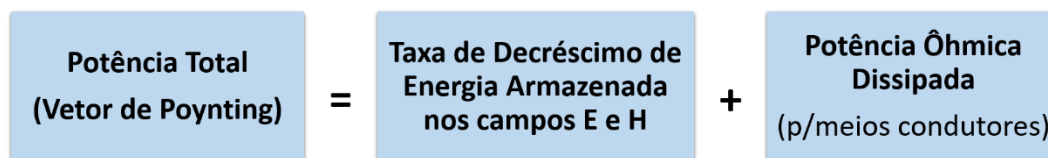
$$\eta_0 = \frac{E_0}{H_0} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \approx 377 \text{ [\Omega]} \quad (6)$$

Este resultado é muito interessante, pois mostra que a relação entre campo elétrico e campo magnético é constante para qualquer ponto e em qualquer instante.

Conforme mencionado anteriormente, uma das principais aplicações de uma onda eletromagnética é a capacidade de transferir energia de um ponto (fonte eletromagnética) para outro (receptor). A taxa de transferência desta energia também pode ser obtida a partir das equações de Maxwell e é dada por:

$$\oint (\vec{E} \times \vec{H}) \cdot d\vec{S} = -\frac{\partial}{\partial t} \int \left[ \frac{1}{2} \epsilon E^2 + \frac{1}{2} \mu H^2 \right] dv - \int \sigma E^2 dv \quad (7)$$

Esta equação, conhecida como teorema de Poynting, rege o balanço de energia na propagação de uma onda eletromagnética. Sob o aspecto de propagação de energia, os seus termos podem ser identificados conforme mostrado na Figura 5.



**Figura 5.** Balanço de energia (Teorema de Poynting).

O termo do lado esquerdo da igualdade, também conhecido como vetor de Poynting ( $\vec{P}$ ), representa a potência instantânea líquida associada ao campo eletromagnético, ou seja, a densidade superficial de potência [9] [10]. Este produto vetorial é dado em watts por metro quadrado ( $W/m^2$ ).

$$\vec{P} = \vec{E} \times \vec{H} \quad (8)$$

É interessante notar que pela definição de produto vetorial a direção de  $\vec{P}$  (em que a potência flui) é perpendicular tanto ao vetor  $\vec{E}$  quanto ao vetor  $\vec{H}$ . A densidade de potência média pode ser obtida pela integração da Equação 8 durante um período  $T = 2\pi / \omega$ , que resulta na equação:

$$P = \frac{1}{2} \frac{E_0^2}{\eta_0} = E_{eficaz} H_{eficaz} \quad (9)$$

### 2.1.3 Considerações Finais

Encerram-se aqui a revisão dos fundamentos de eletromagnetismo. A partir de agora, os conceitos discutidos nesta seção aparecerão de forma aplicada e estarão implícitos nas próximas discussões. A consolidação destes conceitos é fundamental para o entendimento de aspectos mais específicos e importante a este projeto, como a compatibilidade eletromagnética e o estudo de antenas. Ambos os conceitos formarão a sustentação teórica para a realização prática implementada na presente pesquisa.

## 2.2 Conceitos de Compatibilidade Eletromagnética (EMC)

O conceito de compatibilidade eletromagnética (EMC) está associado ao fato de um sistema ou grupo de sistema serem eletricamente compatível ou não. Um sistema é considerado eletricamente compatível quando satisfaz os seguintes critérios [14]:

- Não causa interferência eletromagnética (EMI) em outros sistemas, ou seja, seu funcionamento não prejudica o funcionamento de outros sistemas.
- Não é susceptível a interferência eletromagnética (EMI) causada por outros sistemas, em outras palavras, o seu funcionamento não é comprometido devido ao ruído gerado por outros equipamentos.
- Não causa interferência eletromagnética (EMI) nele próprio, isto é, o ruído produzido durante seu funcionamento não altera sua performance.

Em definições mais modernas, o termo *sistema* é generalizado, e refere-se a qualquer objeto ou ser vivo inserida no mesmo ambiente, desta forma, os níveis de perturbações eletromagnéticas devem respeitar também os limites toleráveis para seres vivos [15].

### 2.2.1 Interferência Eletromagnética

A partir da definição de compatibilidade eletromagnética, fica evidente que uma avaliação em termos de EMC só faz sentido se houver: um sistema gerador de interferência eletromagnética (fonte de EMI), um sistema susceptível a incidência desta interferência (receptor de EMI) e um caminho (meio) para que a EMI se propague da fonte até o receptor. A propagação da interferência eletromagnética pode se dar por radiação, condução e/ou acoplamentos capacitivos ou indutivos [14] [16]. A Figura 6 mostra esquematicamente os elementos necessários para que ocorra interferência eletromagnética e os mecanismos de acoplamento. A Tabela 3 apresenta alguns exemplos dos elementos de EMI.

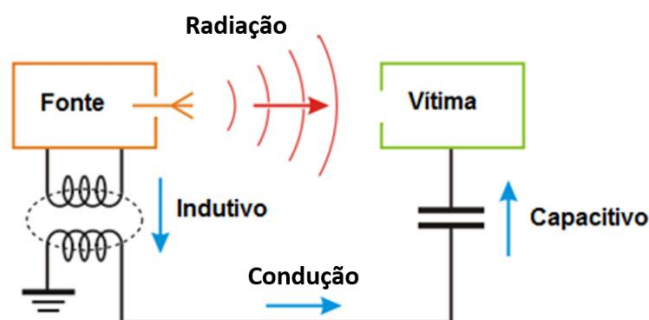


Figura 6. Elementos de EMC (adaptado de [16]).

**Tabela 3.** Exemplos de elementos de EMC.

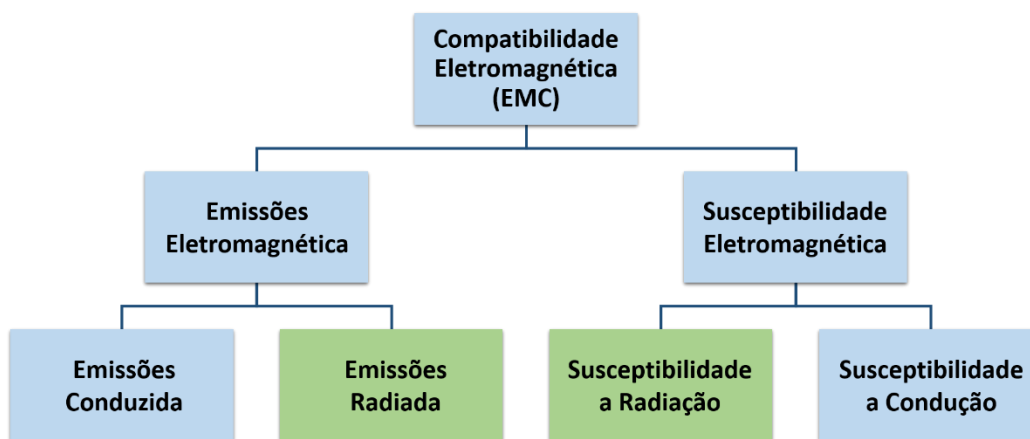
<b>Elementos de EMI</b>		
<b>Fontes</b>	<b>Mecanismos de Acoplamento</b>	<b>Receptores</b>
Antenas	Radiação	Antenas
Chaveamentos		Seres Vivos
Sistemas de Radar	Condução	Sistema de Radar
Descargas Atmosféricas		Telefones Celulares
Emissoras de Rádio e TV	Acoplamento Capacitivo	Receptores de Rádio e TV
Lâmpadas Fluorescentes	Acoplamento Indutivo	Equipamentos Eletrônicos
Equipamentos Eletrônicos		Trilhas de Circuito Impresso
Sistemas de Telecomunicações		Computadores e Periféricos

Pode-se definir a interferência eletromagnética (EMI) como a perda da funcionalidade de um equipamento em razão da sua susceptibilidade (ou falta de imunidade) à energia eletromagnética proveniente do ambiente onde ela opera.

Para se reduzir o nível de interferência eletromagnética entre dois sistemas deve-se basicamente adotar três procedimentos [14]:

- Suprimir as emissões na fonte;
- Tornar o caminho de acoplamento o mais ineficiente possível, ou seja, dificultar a propagação das emissões, sejam elas radiadas ou conduzidas;
- Tornar o receptor o menos susceptível possível;

O estudo de EMC pode ser dividido basicamente em quatro subgrupos: emissões radiadas, emissões conduzidas, susceptibilidade a radiação e susceptibilidade a condução, conforme pode ser observado na Figura 7. Este trabalho se limita ao estudo de emissão irradiada e susceptibilidade à radiação.

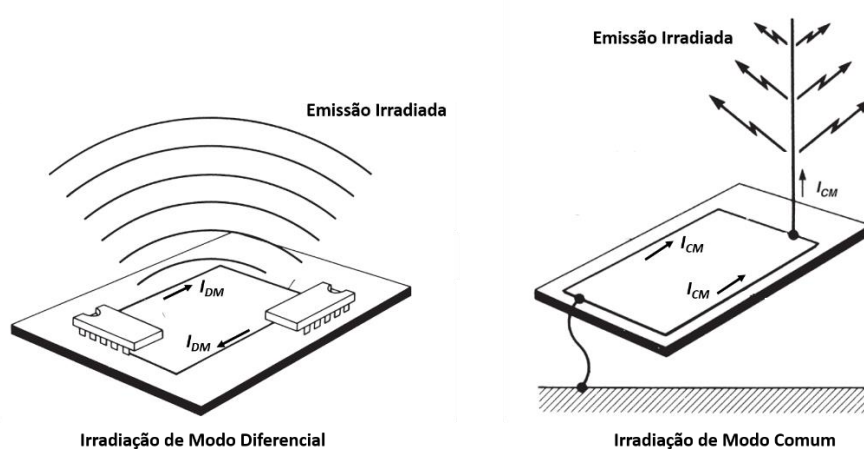


**Figura 7.** Fluxograma das vertentes de estudo de EMC.

### 2.2.2 Emissões Irradiadas

As emissões irradiadas são caracterizadas pela propagação de ondas eletromagnéticas (ruído) que é emitida para o ambiente, de maneira intencional ou não, quando um equipamento eletro-eletrônico entra em funcionamento. Estes ruídos são gerados através da circulação de correntes por trilhas, cabos e terminais semicondutores e sua intensidade depende de fatores da corrente (amplitude e frequência), do comprimento das trilhas e cabos, dentre outros.

Basicamente, os circuitos eletro-eletrônico possuem um condutor de alimentação (fase, positivo), um condutor de retorno (neutro, negativo) e um condutor terra, por onde as correntes se propagam. Estas correntes, dependendo do modo de propagação, podem ser decompostas em corrente de modo comum e corrente de modo diferencial. As correntes de modo diferencial são aquelas que tem sentido oposto de propagação em cabos e trilhas, enquanto correntes de modo comum se propagam no mesmo sentido [17]. O modo de propagação de corrente é fundamental para o entendimento de emissões irradiadas e serão apresentadas separadamente. A radiação para os dois modos de propagação de corrente pode ser visualizada através da Figura 8.

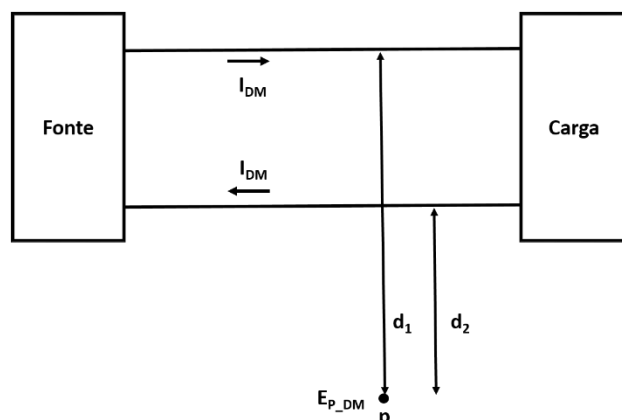


**Figura 8.** Modos de Radiação de Campos Elétricos. (Adaptado de [18])

#### a) Emissão Irradiada Devido a Corrente de Modo Diferencial

A corrente de modo diferencial é aquela que se propaga através do cabo de fase de um circuito eletro-eletrônico e retorna para a fonte através do condutor neutro, desta forma, as correntes estão em sentido oposto de propagação, conforme representado pela Figura 9.

A contribuição de cada corrente para o campo elétrico no ponto P depende da distância deste ponto ao cabo, além disso, os campos correspondentes a cada uma destas correntes também estão em sentido opostos. Desta forma, o campo elétrico resultante no ponto P ( $E_{P\_DM}$ ) pode ser dado pela Equação 10.



**Figura 9.** Esquema para estimativa da emissão irradiada devido a circulação de corrente de modo diferencial.

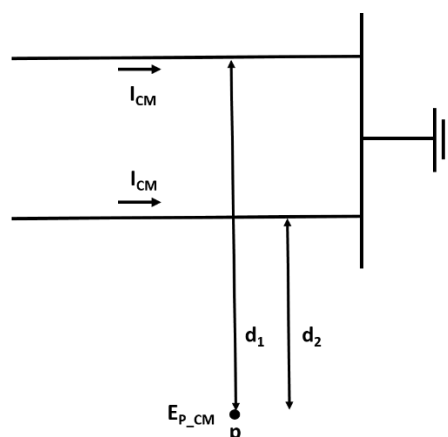
$$E_{P\_DM} = E_{P\_DM1}(d_1) - E_{P\_DM2}(d_2) \tag{10}$$

Apesar das componentes de campo de modo diferencial serem elevadas, em geral, o campo resultante é pequeno, já que estas componentes se subtraem. Além disso, as emissões podem ser drasticamente reduzidas através da aproximação dos cabos (redução do loop), pois desta forma:  $d_1 \approx d_2 \Rightarrow E_{P\_DM1} \approx E_{P\_DM2}$  e a resultante praticamente é anulada ( $E_{P\_DM} \approx 0$ ).

**b) Radiação Devido a Corrente de Modo Comum**

A corrente de modo comum é aquela que se propaga para o plano de terra do circuito, seja através dos condutores de fase e neutro, seja através dos elementos parasitas (capacitâncias e indutâncias) presentes no circuito. Desta forma, as correntes possuem o mesmo sentido de propagação, conforme representado pela Figura 10.

Assim como no modo diferencial, a contribuição de cada corrente de modo comum para o campo elétrico em P ( $E_{P\_CM}$ ) depende da distância deste ponto ao cabo, no entanto, os campos correspondentes a cada uma destas correntes ( $E_{P\_CM1}$  e  $E_{P\_CM2}$ ) também estão no mesmo sentido. Desta forma, o campo elétrico resultante no ponto (P) pode ser dado pela Equação 11.



**Figura 10.** Esquema para estimativa da emissão irradiada devido a circulação de corrente de modo comum.

$$E_{PCM} = E_{PCM1}(d_1) + E_{PCM2}(d_2) \quad (11)$$

Apesar das componentes de campo de modo comum serem bem menores do que as componentes de campo de modo diferencial, o campo resultante de modo comum pode ser bem maior, já que as componentes de campo se somam. Desta forma, para sinais com espectros de frequência elevado, onde os elementos parasitas são mais significativos, as correntes de modo comum são as principais fontes de campos elétricos irradiados e conseqüentemente de interferências eletromagnéticas.

### 2.2.3 Susceptibilidade Eletromagnética em Equipamentos Eletrônicos

A susceptibilidade eletromagnética em equipamentos eletrônicos está relacionada a possibilidade deste equipamento sofrer influências frente a presença de uma perturbação eletromagnética. Diversos fatores condicionam a susceptibilidade eletromagnética de um equipamento, dentre eles pode-se destacar [13]:

- a) Intensidade de campo ou amplitude;
- b) Distância e disposição dos equipamentos;
- c) Comprimento de onda e frequência da emissão;

a) A **intensidade de campo ou amplitude** é o principal fator na caracterização da susceptibilidade de um determinado equipamento. Para as emissões irradiadas, a intensidade dos campos elétricos (V/m) e magnéticos (A/m), são os principais fatores que influenciam na imunidade dos equipamentos. Quanto maior a intensidade dos campos, maior será sua influência sobre os dispositivos receptores.

b) A **distância dos equipamentos** até a fonte está de certa forma relacionada com a intensidade do campo, pois a medida que a fonte de radiação eletromagnética se distancia do receptor, menor será sua influência em razão da atenuação dos campos eletromagnéticos à medida que a onda se propaga. Contudo, a disposição geométrica dos equipamentos no ambiente entre a fonte e o receptor, determina o comportamento das ondas eletromagnéticas emitidas quanto a seus aspectos de reflexão, refração e difração. Assim, a interação dos campos eletromagnéticos com o meio pode resultar em acoplamentos construtivos ou destrutivos, de modo a definir uma intensidade de campo resultante sob a qual o receptor será submetido.

c) Outros fatores de suma importância para susceptibilidade de equipamentos eletrônicos são o **comprimento de onda ( $\lambda$ )** e a **frequência da emissão ( $f$ )** que estão relacionados entre si através da relação  $v = \lambda f$ . Da teoria de antenas, é sabido que um radiador ou receptor de energia eletromagnética (antena) possui maior eficiência quando seu tamanho físico é da ordem de grandeza do comprimento da onda do sinal a ser transmitido ou recebido [11] [19]. Assim, antenas de submúltiplos comprimentos de onda, ex.  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ , e outros múltiplos são encontrados facilmente em situações práticas. Desta forma, diversos componentes eletrônicos e cabos presentes em um equipamento podem funcionar como elementos receptores ou radiadores (antenas não intencionais) de maior ou menor eficiência a depender da frequência do ruído. Como consequência, as dimensões físicas dos diversos elementos que compõe um equipamento, definem as características de emissão e susceptibilidade do mesmo em relação a uma dada faixa de frequência.

#### ***2.2.4 Susceptibilidade Eletromagnética em Seres Vivos***

A susceptibilidade eletromagnética em seres vivos está relacionada a possíveis danos biológicos causados pela exposição a campos eletromagnéticos. Existem diversos fatores que caracterizam a susceptibilidade em seres vivos, dentre eles destacam-se:

- a) Tipo de radiação eletromagnética (ionizantes ou não ionizantes);
- b) Tempo de exposição;
- c) Taxa de absorção específica;
- d) Indução de correntes;

a) O **tipo de radiação eletromagnética** está diretamente ligado com a frequência da emissão. A partir do espectro eletromagnético (Figura 3) percebe-se que quanto maior a frequência de uma onda eletromagnética, menor será seu comprimento de onda. A partir de uma determinada frequência, da ordem de 2,5 PHz (*Peta* =  $10^{15}$ ), as ondas eletromagnéticas possuem comprimento de onda tão pequenos que podem ser comparados com o tamanho das cadeias proteicas e outras estruturas moleculares, desta forma, as ondas eletromagnéticas tem a capacidade de interagir e ionizar átomos e moléculas presentes em estruturas vivas, e por isso, são denominadas de radiação ionizante. O estudo das radiações ionizantes foge do escopo deste trabalho, uma vez que as frequências de interesse aqui são bem menores.



Para frequências relativamente baixas, as ondas eletromagnéticas possuem comprimentos de onda relativamente grandes, não sendo assim, capazes de interagir com átomos e moléculas de estruturas vivas, desta forma, são chamadas de radiações não ionizantes.

Os danos biológicos causados por radiações não ionizantes é alvo de estudo para diversos grupos de pesquisa ao redor do mundo. Existem estudos que tentam associar a exposição à radiação não-ionizante com problemas biológicos, como por exemplo, câncer e surgimento de tumores [20]. Estas pesquisas são centro de grande polêmica e ainda apresentam resultados inconclusivos. Até o momento, os únicos efeitos biológicos relacionados a radiações não ionizantes, são os efeitos térmicos e indução corporal de corrente [13].

b) O **tempo de exposição** de um organismo ao campo eletromagnético é um dos principais fatores de riscos às estruturas vivas. A elevação da temperatura do organismo até um determinado nível crítico pode levar a sérios riscos biológicos, esta elevação de temperatura está diretamente relacionada ao tempo de exposição a radiações eletromagnéticas. Desta forma, quanto maior o tempo de exposição do organismo maior serão os efeitos biológicos sobre ele.

c) A **taxa de absorção específica** (*SAR* – do inglês *Specific Absorption Rate*) quantifica a energia eletromagnética absorvida por um meio biológico. Esta grandeza estabelece a relação entre a potência eletromagnética radiada que é absorvida por unidade de massa do volume do organismo [13]. A *SAR* é expressa em W/kg, e pode ser relacionada ao campo eletromagnético pela expressão:

$$SAR = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (12)$$

Onde  $\sigma$  é a condutividade do tecido vivo dado em (S/m),  $\rho$  é a densidade de massa do tecido em kg/m<sup>3</sup> e  $|E|$  é o módulo do valor eficaz do campo elétrico dado em V/m.

(d) A interação dos campos eletromagnéticos presentes no ambiente com os seres vivos pode **induzir corrente elétrica** no interior do organismo. A distribuição de corrente induzida no corpo depende de fatores como a frequência da radiação, das condições de exposição, das propriedades elétricas do corpo, dentre outros [13]. Os principais danos biológicos decorrentes de corrente induzida no organismo são: A eletroestimulação e o efeito térmico. Em frequências mais baixas (até 100 kHz) os efeitos de eletroestimulação devido circulação de corrente no organismo são mais comuns e podem ocasionar diversas reações adversas no sistema nervoso. Para frequências mais elevadas (a partir de 10 MHz), os efeitos de sobreaquecimento local dos tecidos são predominantes em relação aos efeitos de eletroestimulação [13] [21].

### 2.2.5 Unidades de Medida Utilizadas em EMC

A interferência eletromagnética de um sistema, está associado a ruídos de tensão e corrente produzido por este sistema. Nas emissões conduzidas, o interesse está nas correntes e tensões que são conduzidas para a fonte e para a carga através dos condutores. Por outro lado, os parâmetros de interesse nas emissões irradiadas são os campos elétricos e magnéticos gerados pela circulação de corrente no sistema. Portanto, as principais unidades da EMC são: [14] [18]

- Emissões conduzida: Corrente (A) e tensão (V);
- Emissões radiadas: Campo magnético (A/m) e campo elétrico (V/m);

Outros fatores importantes no estudo de EMC estão relacionados à energia/potência associadas as emissões. Deste modo, outras unidades associadas a estas grandezas são comumente utilizadas, dentre elas destacam-se:

- Potência (W);
- Densidade de Potência (W/m);

Em aplicações de EMC, as amplitudes dos ruídos podem variar em uma larga faixa (nV até V), por isso é comum expressar as unidades em (dB).

Conforme adotado em diversas fontes da literatura, neste trabalho define-se:

$$G_P = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (13)$$

$$G_V = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (14)$$

$$G_I = \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (15)$$

Onde  $G_P$ ,  $G_V$  e  $G_I$  são, respectivamente, os ganhos de potência, tensão e corrente. Em dB, tem-se:

$$G_P = 10 \log_{10} \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (16)$$

$$G_V = 20 \log_{10} \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (17)$$

$$G_I = 20 \log_{10} \frac{I_{out}}{I_{in}} \quad (18)$$

Note que o dB é a razão entre duas quantidades. Os níveis de potência, tensão ou correntes absolutos são expressos em dB com o seu valor referenciado a alguma quantidade de base. Em EMC as tensões geralmente são expressas em relação a 1  $\mu\text{V}$  como  $\text{dB}\mu\text{V}$ :

$$\text{dB}\mu\text{V} = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{tensão (V)}}{1\mu\text{V}} \right) \quad (19)$$

Portanto, uma tensão de 1 V equivale a 120  $\text{dB}\mu\text{V}$ . Pode-se interpretar isso como: 1 V é 120 dB acima de 1  $\mu\text{V}$ .

Da mesma forma, outras unidades comumente utilizadas são:

$$\text{dBmV} = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{tensão (V)}}{1\text{mV}} \right) \quad (20)$$

$$\text{dB}\mu\text{A} = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{corrente (A)}}{1\mu\text{A}} \right) \quad (21)$$

$$\text{dBmA} = 20 \log_{10} \left( \frac{\text{corrente (A)}}{1\text{mA}} \right) \quad (22)$$

A potência também é geralmente referenciada a 1  $\mu\text{W}$  ou a 1 mW, conforme equações:

$$\text{dB}\mu\text{W} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{potência (W)}}{1\mu\text{W}} \right) \quad (23)$$

$$\text{dBmW} = \text{dBm} = 10 \log_{10} \left( \frac{\text{potência (W)}}{1\text{mW}} \right) \quad (24)$$

Para finalizar, as unidades de EMC para campos elétricos e magnéticos são análogas as unidades de tensão e corrente, e usualmente são expressos em  $\text{dB}\mu\text{V/m}$  e  $\text{dB}\mu\text{A/m}$ :

$$\text{dB}\mu\text{V/m} = 20 \log_{10} \left( \frac{E \text{ (V/m)}}{1\mu\text{V/m}} \right) \quad (25)$$

$$\text{dB}\mu\text{A/m} = 20 \log_{10} \left( \frac{H \text{ (A/m)}}{1\mu\text{A/m}} \right) \quad (26)$$

É muito importante a familiarização com as unidades de EMC apresentadas neste tópico, pois, como já foi mencionado, estas são as unidades habitualmente encontradas em trabalhos de EMC, além de serem as unidades de referência adotadas pelas principais normas nacionais e internacionais de compatibilidade eletromagnética.

## ***2.3 Normas de EMC para Emissões Irradiadas***

Assim como em diversas áreas da engenharia, o estudo de compatibilidade eletromagnética deve obedecer algumas normas, a fim de obter uma maior padronização e confiabilidade das metodologias de estudo. Dentro do escopo deste trabalho, existem três tipos de normas pertinentes, que são: normas para sistema de medição, normas para procedimento de medição e normas para limites de segurança. Os objetivos de cada categoria de norma são discutidos a seguir:

### ***2.3.1 Normas para Sistema de Medição***

Definem as especificações das características técnicas e do desempenho necessário dos equipamentos que compõe o sistema de medição para garantir a medição adequada dos parâmetros de EMC. As normas utilizadas neste trabalho com este propósito foram:

**ANSI C63-2:** Esta norma determina algumas características dos instrumentos de medição de ruídos e campos eletromagnéticos na faixa de frequência de 10 Hz à 40 GHz. O propósito desta norma é a definição das características técnicas do instrumental de medição, tal como: unidade de medida, seletividade de largura de banda, sistema de detecção, dentre outros [22].

**IEC/CISPR 16-1:** Especifica as principais características de desempenho para o sistema de medição de campos eletromagnéticos no estudo de perturbações e imunidade em radiofrequência. Esta norma é voltada para estudos dentro dos limites de 9 kHz à 18 GHz [23].

### ***2.3.2 Normas para Procedimento de Medição***

Estas normas estabelecem uma padronização da metodologia de medição das grandezas elétricas de interesse, com o objetivo de garantir a reprodutividade e coerência dos resultados. A norma para procedimento de medição adotada neste trabalho foi:

**IEEE Std. 139:** Norma específica para métodos de medição de emissões de rádio interferência para equipamentos industriais, científicos e médicos. Este documento aborda os principais problemas e dificuldades encontrados na medição de campos eletromagnéticos em ambientes complexos (ambientes não controlados) [24].

Outras normas utilizadas para este fim foram: ANSI C63-4, NBR IEC/CISPR11, IEC/CISPR 16-2, [25] [26] [27].

### 2.3.3 Normas para Limites de Segurança de Equipamentos Eletrônicos

Existem diversos órgãos reguladores internacionais com o objetivo de estabelecer limites seguros para emissões eletromagnéticas em equipamentos eletrônicos. Dentre estes órgãos destacam-se: A Comissão Federal para Comunicações (*FCC – Federal Communication Commission*), Comissão Eletrotécnica Internacional (*IEC – International Electrotechnical Commission*) e a Comunidade Europeia (*EC – European Community*).

Em linhas gerais, as principais normas internacionais são bastante similares, no entanto existem diferenças significativas em alguns aspectos. Para estabelecer uma maior padronização entre estas normas, foi criado um Comitê Internacional Especial de Rádio Frequência (*CISPR – Committee International Special of Perturbation Radio*) que tem sido adotada como um padrão único para as normas internacionais de EMC.

A CISPR divide os equipamentos em Classe A e B. Os equipamentos da Classe A são aqueles destinados a uso industrial ou comercial. Os equipamentos de Classe B são destinados a uso residencial. Além disso os limites da norma são dados em termos de  $dB\mu V/m$  e a faixa de frequência para as emissões irradiadas começa em 30 MHz e se estende até 40 GHz [26].

Os limites de emissão irradiada para equipamentos eletrônicos são apresentados na Tabela 4 [26]. Estes valores limitam a máxima elevação do campo elétrico observada à três metros de distância dos equipamentos sob investigação quando os mesmos entram em operação.

**Tabela 4.** Limites da CISPR 11 para Emissões Irradiadas.

<b>Emissões Irradiadas (3 m)</b>				
<b>Frequência (MHz)</b>	<b>Equipamentos Classe A</b>		<b>Equipamentos Classe B</b>	
	$\mu V/m$	$dB\mu V/m$	$\mu V/m$	$dB\mu V/m$
30 – 230	100	40	31,6	30
230 – 1000	224	47	70,8	37

### 2.3.4 Normas para Limites de Segurança de Seres Vivos

A Comissão Internacional para Proteção à Radiação Não-Ionizante (*ICNIRP – do inglês International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*) foi estabelecida para a investigação dos perigos que podem estar associados às diferentes formas de radiação não-ionizante, assim como para o desenvolvimento de recomendações internacionais e todos os aspectos voltados à proteção de seres vivos. A ICNIRP estabelece duas categorias de população para a definição dos fatores de segurança: ocupacional e público geral [21].

**População ocupacional:** Formada por adultos que estão geralmente submetidos a condições de exposição conhecidas e são aptos para tomar as medidas apropriadas de precaução.

**Público geral:** Formado por indivíduos de todas as idades e estado de saúde. Em muitos casos, estas pessoas não possuem consciência de sua exposição a campos de RF e, portanto, não estão aptos para tomarem as devidas precauções em minimizar ou evitar a sua exposição. Portanto, os limites de segurança para o público em geral são mais rigorosos do que para a população ocupacional.

A definição dos níveis de referência para exposição aos campos eletromagnéticos é obtida a partir das restrições básicas por meio de modelagem matemática e por extrapolação dos resultados das pesquisas em laboratório. Estes níveis são fornecidos em termos das grandezas físicas fundamentais (campo elétrico, campo magnético e densidade de potência) para permitir a verificação da conformidade de um determinado ambiente pela comparação dos valores obtidos na medição de campos eletromagnéticos. Os níveis de referência para exposição ocupacional e do público em geral, são apresentados pela Tabela 5 e pela Tabela 6 respectivamente [21]. Todos os valores são expressos em rms.

**Tabela 5.** Níveis de referência da ICNIRP para exposição ocupacional.

<b>Níveis de Referência para Exposição Ocupacional</b>				
<b>Faixa de Frequência</b>	<b>Campo Elétrico (V/m)</b>	<b>Campo Magnético (A/m)</b>	<b>Densidade de Potência (W/m)</b>	<b>Tempo de exposição (min)</b>
3 kHz até 150 kHz	610	24,4	-	-
150 kHz até 1 MHz	610	1,6.f	-	6
1 MHz até 10 MHz	610/f	1,6.f	-	6
10 MHz até 400 MHz	61	0,16	10	6

**Tabela 6.** Níveis de referência da ICNIRP para exposição de público em geral.

<b>Níveis de Referência para Exposição de Público em Geral</b>				
<b>Faixa de Frequência</b>	<b>Campo Elétrico (V/m)</b>	<b>Campo Magnético (A/m)</b>	<b>Densidade de Potência (W/m)</b>	<b>Tempo de exposição (min)</b>
3 kHz até 150 kHz	87	5	-	-
150 kHz até 1 MHz	87	0,73.f	-	6
1 MHz até 10 MHz	$87/f^{1/2}$	0,73.f	-	6
10 MHz até 400 MHz	28	0,073	2	6

---

## 3 *Interferência Eletromagnética em Sistemas Fotovoltaicos*

---

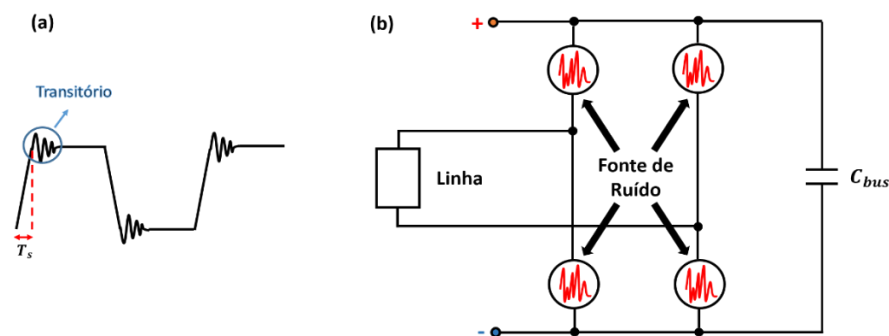
Sustentado por toda fundamentação teórica discutida até aqui, e por uma vasta bibliografia (livros, artigos e conferências) este capítulo desenvolve as principais hipóteses e teorias a respeito da influência de cada elemento que compõe um SFV (painéis, cabos e conversores) nos mecanismos de geração, propagação e radiação de EMI em SFV.

### 3.1 *Conversores CC/CA como Fonte de Ruído*

Os conversores CC/CA são equipamentos que utilizam dispositivos semicondutores para o chaveamento da tensão contínua, a fim de convertê-la em tensão alternada. Este chaveamento geralmente é realizado através de um controle PWM de alta frequência (que em geral é de algumas dezenas de kHz), para evitar poluições harmônicas de baixa frequência e reduzir o tamanho físico dos conversores [28]. Estas comutações (comportamento não linear) produzem distúrbios de alta frequência que podem se propagar pelo equipamento, carga, rede de alimentação e pelo ar. Assim, os conversores CC/CA podem ser considerados uma potencial fonte de ruído.

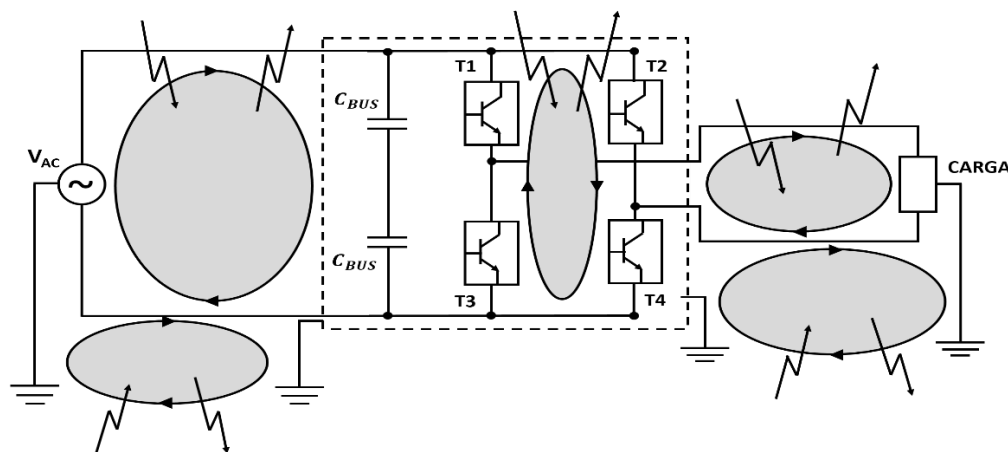
Embora o chaveamento dos conversores seja de algumas dezenas de kHz, existem as componentes de frequência relacionada ao tempo de condução e de bloqueio, ao tempo de subida e aos transitórios eletromagnéticos dos pulsos PWM que estão na faixa de algumas dezenas a centenas de MHz [29]. Desta forma ruídos com amplitudes significativas em uma ampla faixa de frequência podem ser geradas pelos conversores e conduzidas para o restante do sistema através dos cabos.

É através da comutação dos semicondutores que a EMI é gerada em um conversor. Podemos então representar os semicondutores de um conversor como fonte de ruído. A Figura 11 apresenta, respectivamente, a comutação de tensão de um transistor presente em um conversor e o modelo simplificado de um conversor CC/CA monofásico, aonde, os semicondutores do conversor são representados como fontes de ruído.



**Figura 11.** (a) Comutação de tensão em um transistor; (b) Representação de um conversor como fonte de ruído.

Como vimos no capítulo 2, as EMI's podem ser classificadas, quanto ao modo de transmissão, em conduzidas e irradiadas e os equipamentos podem ser considerados fontes ou receptores destas EMI's. Também nos conversores CC/CA existem estes aspectos da EMI. Assim, um conversor pode gerar interferências conduzidas ou irradiadas, bem como pode estar sujeito a estas mesmas interferências oriundas de outros equipamentos ou dele próprio. A Figura 12 mostra estes aspectos da EMI em um conversor chaveado. Nela pode-se observar alguns laços (*loopings*) que podem atuar como antenas de emissão e/ou recepção de EMI irradiada. Pode-se notar que estes laços podem ser estabelecidos entre os elementos internos do conversor, exclusivamente, ou destes com elementos externos. Estes laços com elementos externos caracterizam a EMI conduzida propagada ou recebida pelo conversor.



**Figura 12.** Interferências conduzidas ou irradiadas em um Conversor CC/CA.

As EMI's conduzidas são propagadas e recebidas pela conexão com a rede e a carga, através dos cabos de alimentação e também da terra (virtual ou não), nos modos comum e diferencial. Além disso, fios, trilhas e caminhos fechados (*loop*) atuam como antenas na emissão e recepção de EMI irradiadas. Em frequências de até 30 MHz as EMI's conduzidas são mais significativas do que as irradiadas. A partir de 30 MHz as irradiadas (campos elétricos e magnéticos) começam a ser consideradas mais importantes.



### 3.2 *Influência dos Cabos no Mecanismo de Condução e Irradiação dos Ruídos Eletromagnéticos*

A influência do tamanho dos cabos em diversos problemas de transitórios eletromagnéticos já é estudado há algum tempo. Já se sabe que existe uma relação direta entre o tamanho do cabo e o nível de sobretensão transitória que pode ser gerado pelo chaveamento de tensão. Estes transitórios eletromagnéticos possuem conteúdo harmônico de amplitudes elevadas em uma ampla faixa de frequência e, conseqüentemente, são conduzidos pelos cabos [29]. Sistemas fotovoltaicos de grande porte empregam, em sua maioria, dezenas ou até centenas de conversores CC/CA e cabos CC de grandes extensões, assim estes cabos podem conduzir ruídos com frequências de algumas dezenas a centenas de kHz devido ao chaveamento dos conversores e ainda ruídos de algumas dezenas a centenas de MHz devido ao tempo de subida e aos transitórios eletromagnéticos.

Além disso, cabos de grandes extensões não podem simplesmente ser tratados como um condutor perfeito. As indutâncias longitudinais e as capacitâncias transversais devem ser consideradas. Os elementos distribuídos dos cabos associados com as capacitâncias dos painéis devido a sua grande área, podem representar um circuito ressonante em uma ampla faixa de frequência [6] [7]. Uma maneira clássica de representar um cabo é através dos módulos “ $\pi$ ”, este modelo pode ser visualizado através da Figura 13. **Modelo “ $\pi$ ” representando o circuito do cabo.** Figura 13. Os valores dos elementos, ou a quantidade de módulos “ $\pi$ ” do circuito depende do tamanho do cabo e da frequência do sinal de propagação.

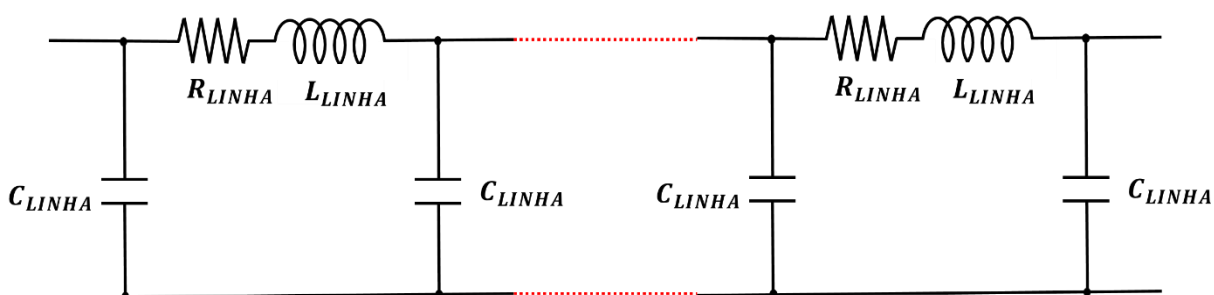


Figura 13. Modelo “ $\pi$ ” representando o circuito do cabo.

Até agora foi discutido como o tamanho dos cabos pode influenciar no nível e frequência do ruído que o mesmo conduz. No entanto, o tamanho do cabo pode também influenciar no nível de ruído eletromagnético que é irradiado para o ambiente. Como já foi discutido, uma antena monopolo consiste em um fio fino alimentado ou excitado em sua extremidade, neste sentido, os condutores de um SFV podem, a grosso modo, ser considerados antenas monopolo.

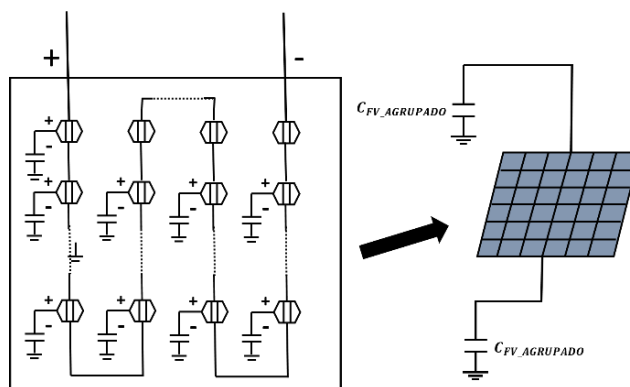
A teoria de antena mostra que o tamanho físico ideal de uma antena monopolo corresponde à metade do comprimento de onda do sinal de operação [11] [19]. Em outras palavras, uma antena monopolo irradia de maneira mais eficiente sinais cujo comprimento de onda é o dobro do seu tamanho físico. Como os SFV podem empregar cabos de dezenas ou até centenas de metros, estes cabos podem irradiar ruídos em uma ampla faixa de frequência. De fato, alguns estudos mostram que ruídos irradiados na faixa de algumas dezenas de kHz até centenas de MHz são observados, em amplitudes significativas, quando os inversores são ligados [7] [8] [30].

A usina estudada neste trabalho possui cabos CC da ordem de 100 m, baseado no que foi dito até aqui, existe uma expectativa que essa usina possa irradiar de maneira eficiente ruídos cujo comprimento de onda é da ordem de 200 m, ou seja, sinais na faixa de 15 MHz. Uma investigação experimental a respeito desta hipótese foi realizada. A metodologia de medição e os resultados obtidos são apresentados na primeira seção do Capítulo 5.

### ***3.3 Elementos Parasitas de um SFV***

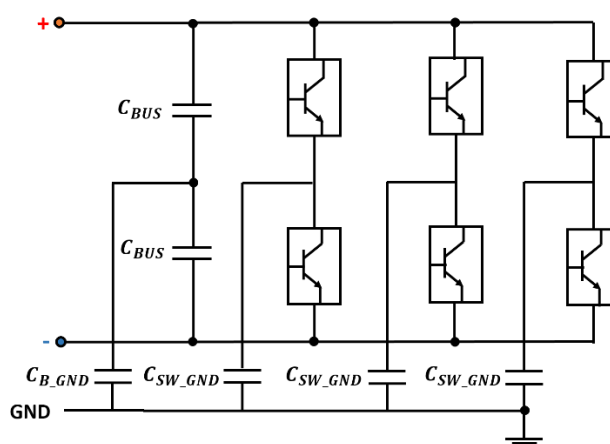
Em termos práticos, existem diversas capacitâncias e indutâncias inerentes aos dispositivos que compõe um SFV que depende basicamente da geometria e disposição de seus componentes. As reatâncias capacitivas e indutivas destes elementos dependem da frequência de seu sinal de excitação, e são geralmente desconsiderados em aplicações de baixas e médias frequências. Todavia, foi visto que os ruídos que circulam em um SFV podem ter componentes de frequências bem elevados, deste modo, as capacitâncias intrínsecas passam a exercer papel importante no circuito, podendo constituir um caminho de baixa impedância para estes ruídos. Desta maneira, os elementos parasitas, principalmente os presentes nos módulos fotovoltaicos e nos conversores, são de fundamental importância para este estudo e serão apresentadas a seguir.

Em um módulo fotovoltaico existem capacitâncias distribuídas entre as células fotovoltaicas e a carcaça deste módulo. De maneira generalizada, a carcaça dos módulos fotovoltaicos em uma usina real é aterrada, introduzindo assim capacitâncias parasitas distribuída para a terra [31]. As capacitâncias parasitas através dos módulos podem ser caracterizadas por uma capacitância equivalente agrupada  $C_{PV\_Agrupada}$ , conforme é mostrado na Figura 14. Os valores destas capacitâncias dependem do tamanho e do tipo de módulos fotovoltaicos, e seus valores típicos são encontrados com certa facilidade na literatura e geralmente são dados em F/kW.



**Figura 14.** Capacitâncias distribuídas de um módulo fotovoltaico composta de múltiplas células e seu equivalente agrupado (adaptado de [31]).

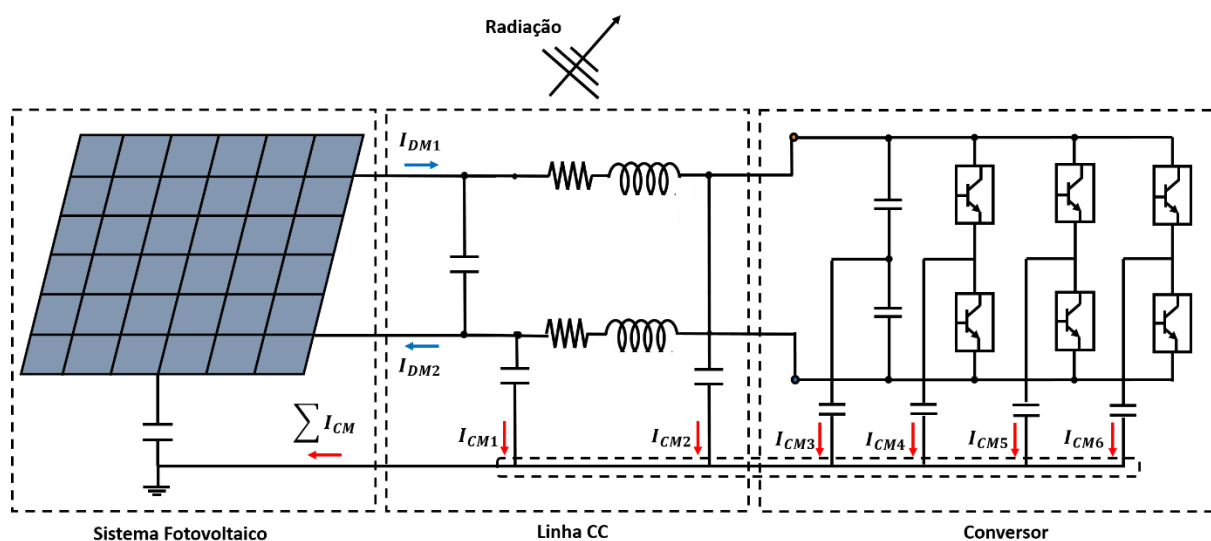
Os conversores de tensão são dispositivos que empregam grandes quantidades de elementos em sua estrutura (chaves semicondutoras, trilhas, dissipadores de calor, dentre outros), existe então capacitâncias intrínsecas entre estes elementos e ainda entre estes elementos e a carcaça do conversor. Assim como os painéis fotovoltaicos, os conversores de um SFV real normalmente têm sua estrutura aterrada, desta forma, novas capacitâncias para o plano de terra são introduzidas no sistema. Existe uma extensa bibliografia com modelos que contemplam todos os elementos capacitivos e indutivos intrínsecos aos conversores, a discussão destes modelos foge do escopo deste trabalho, que apresenta através da Figura 15 apenas um exemplo de um modelo simplificado de conversor que contempla algumas das capacitâncias intrínsecas mais relevantes, dentre estas, estão as capacitâncias dos IGBTs e do barramento CC para a estrutura aterrada.



**Figura 15.** Capacitâncias distribuídas em um conversor CC/CA.

### 3.4 Circuito Equivalente de um Sistema Fotovoltaico

Com base na discussão apresentada neste capítulo um circuito equivalente de um sistema fotovoltaico é proposto e pode ser visualizado através da Figura 16. Este modelo emprega além das capacitâncias transversais e indutâncias longitudinais dos cabos, as capacitâncias intrínsecas aos elementos que compõe o SFV como um todo. Este modelo é interessante para este trabalho pois mostra esquematicamente as componentes de corrente de modo diferencial e de modo comum. Pode-se observar que as correntes de modo diferencial circulam entre os condutores de fase que ligam a fonte fotovoltaica ao conversor. Já as componentes de modo comum fluem através das capacitâncias entre os condutores de fase e o plano de terra, e através das capacitâncias intrínsecas dos painéis e conversores para a terra. Desta forma, existe uma circulação de corrente no plano de referência que é a soma das correntes de modo comum. Como já foi discutido anteriormente esta corrente de modo comum resultante é a principal responsável pela irradiação de campos elétricos (ruído irradiado) para o ambiente.



**Figura 16.** Circuito equivalente de um Sistema fotovoltaico.

Em [7] é realizado um estudo teórico bem detalhado a respeito das grandezas de modo comum de um sistema fotovoltaico. Neste estudo o autor propõe um circuito equivalente de modo comum bem completo para o SFV. Em [32] é feita uma análise do efeito dos painéis no processo de irradiação do ruído, neste trabalho é possível verificar que o cabo é o fator determinante, no entanto, os painéis também contribuem significativamente no nível de ruído que é irradiado.

---

## 4 *Materiais e Metodologia de Medição*

---

Este capítulo é destinado a apresentar os equipamentos de medições utilizados na parte experimental deste projeto, bem como descrever a metodologia utilizada nas medições das grandezas eletromagnéticas de interesse.

Primeiramente os equipamentos de medição são apresentados e suas características e variáveis mais importantes são analisadas e discutidas, com o intuito de auxiliar na escolha correta dos diversos parâmetros dos equipamentos. Em seguida são apresentadas as metodologias e arranjos utilizados na medição de campos eletromagnéticos irradiados.

### 4.1 *Instrumentos de Medição de Campo Elétrico*

Para medição de campos elétricos na faixa 10 kHz até 50 MHz foi utilizado um sistema de medição composto por um analisador de espectro e um conjunto de antenas de EMC. Maiores detalhes a respeito destes equipamentos serão discutidos ao longo deste tópico.

#### 4.1.1 *Analisador de Espectro*

O analisador de espectro é um instrumento de medição utilizado para analisar sinais no domínio da frequência e é basicamente um receptor de rádio calibrado e ajustado para uma frequência de medição [33]. Os analisadores modernos são capazes de medir e mostrar em tempo real a amplitude de um sinal em uma ampla faixa de frequência, sendo assim, uma espécie de osciloscópio capaz de traçar a transformada de Fourier do sinal medido. Neste trabalho o analisador de espectro utilizado foi o *Anritsu MS2712E* (ver Figura 17). Dentre as principais características que levou a escolha deste analisador destacam-se:

- Portabilidade e características de resposta (sensibilidade, exatidão e precisão conforme requerido por norma);
- Monitoramento e armazenamento de sinais na faixa de 9 KHz a 4 GHz;
- Seletividade de frequência dentro da faixa de operação (medição em faixa estreita);
- Carregamento instantâneo dos parâmetros de medição pré-definidos;
- Armazenamento de dados de medição em meio digital;



**Figura 17.** Analisador de Espectro Anritsu MS2712E.

Durante a realização de medições, diversos parâmetros de ajuste são importantes na configuração do analisador de espectro. Alguns destes parâmetros são estabelecidos por normas enquanto outros devem ser analisados de acordo com o objetivo e as características das medições. A utilização incorreta dos parâmetros pode influenciar significativamente nos sinais obtidos. Desta forma, uma discussão a respeito dos principais parâmetros de ajuste será realizada a fim de auxiliar na correta escolha dos valores a serem utilizados, otimizando assim, todo o procedimento de medição.

**Seleção de antenas:** A função de seleção de antena tem fundamental importância na aquisição adequada da intensidade dos campos elétricos de interesse, pois através dessa função o analisador corrige automaticamente o valor medido de acordo com o fator de antena (FA) do modelo de sensor selecionado. Na memória do analisador *Anritsu MS2712E* já existe uma série de antenas pré-configuradas, todavia, também é possível registrar novas antenas, inserindo em forma de tabela os valores de FA para cada frequência dentro da faixa de operação do sensor escolhido.

Note que este não é um ajuste crítico para as medições, pois a ausência desta função não influenciaria no resultado final, já que a correção do sinal poderia ser feita posteriormente através de um programa simples de tratamento de sinais. Todavia, a possibilidade do ajuste automático otimiza de maneira significativa a etapa de análise de dados.

**Seleção da unidade de medida:** A unidade de medida de campo elétrico adotada neste trabalho foi o  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ . Essa escolha está sustentada pelo fato de grande parte das recomendações normativas relacionada a compatibilidade eletromagnética e para exposição aos campos elétricos ser expressa nesta unidade. Além disso, a unidade de  $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$  possui uma transformação muito simples para  $\text{V}/\text{m}$  que é a unidade de campo elétrico adotada pelo Sistema Internacional de Unidades.

**Seleção do sistema de detecção:** O sistema de detecção utilizado para a aquisição dos valores medidos depende das características do sinal a ser medido e das finalidades do ensaio. Em geral, os analisadores possuem três tipos de detectores: o detector de pico, o detector de quase pico e o detector de valor médio.

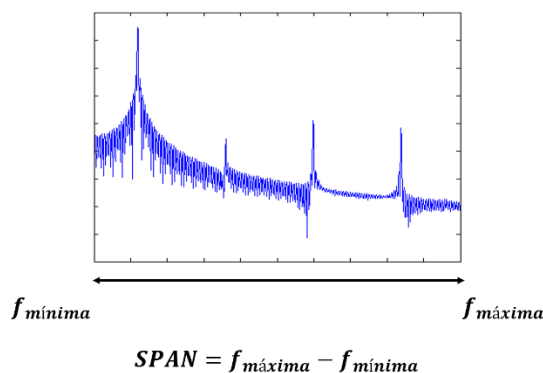
O detector de pico é o método mais simples para detecção de um sinal. Ele apresenta o valor máximo de uma harmônica em um sinal para uma dada taxa de repetição dessa harmônica [14]. Desta forma, o detector de pico apresenta o pior caso para um sinal de interesse.

O detector de quase-pico pondera um harmônico do sinal de acordo com sua taxa de repetição, eliminando assim picos elevados que ocorrem eventualmente. É importante destacar que para sinais com baixa taxa de repetição o valor de quase-pico poderá ser consideravelmente menor do que o valor apresentado por um detector de pico. No entanto, para sinais com altas taxas de repetição ambos os detectores apresentaram respostas bem semelhantes [14]. Devido às características apresentadas, um sistema de detecção de quase-pico leva um tempo bem maior para fazer a varredura do espectro selecionado em comparação com um detector de pico.

O detector de valor médio é constituído basicamente por um filtro passa baixa conectado após um circuito detector de pico comum. Este filtro permite a passagem apenas da componente contínua da forma de onda detectada [14].

Geralmente, os níveis máximos recomendados por normas são estabelecidos para ensaios que empregam detectores de quase pico. Entretanto, neste trabalho os ensaios foram realizados utilizando o detector de pico devido a considerável redução de tempo de medição que este detector oferece. Além disso, o valor de pico representa o pior caso, desta forma, garantimos uma maior margem de segurança nas medições.

**Seleção da faixa de frequência (SPAN):** Esta seleção depende da faixa de operação de cada um dos sensores utilizados, e pode ser definida em termos de frequência inicial e final, ou ainda, em termos de frequência central e largura de faixa. Para medições em uma ampla faixa de frequência é necessário dividir esta faixa de frequência em várias faixas menores, sendo a janela amostrada no display do instrumento denominada de SPAN, conforme apresentado na Figura 18. Neste trabalho a faixa de frequência de interesse era de 10 kHz a 50 MHz, para uma boa representação do sinal essa faixa de frequência foi dividida em janelas de 10 kHz a 500 kHz, 500 kHz a 1.6 MHz (banda de rádio AM), 1.6 MHz a 50 MHz.



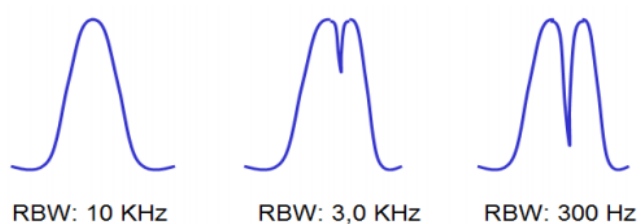
**Figura 18.** Ilustração explicativa para obtenção da faixa de frequência (SPAN).

**Resolução de Largura de Banda (RBW – Resolution Bandwidth):** Representa a largura do filtro passa faixa (em geral com atenuação de 6 dB na banda de rejeição) que varre constantemente todo o espectro de interesse durante a realização de uma medição.

Este é um parâmetro muito importante e está relacionado basicamente com a distinção de dois sinais adjacentes separados por um pequeno  $\Delta f$ . Desta forma, a seleção de um RBW elevado pode tornar impossível distinguir dois sinais que estão muito próximos na frequência, sendo visualizado como somente uma componente. Por outro lado, menor resolução de largura de banda ajuda na distinção de sinais adjacentes e diminui o ruído de fundo, em contrapartida, aumenta o tempo de varredura do espectro selecionado. A Figura 19 mostra como este parâmetro influencia na amostragem do sinal.

A partir desta análise, podemos concluir que o ideal é a escolha de um RBW pequeno em relação a  $\Delta f$ , mas não demasiadamente pequeno a ponto do analisador levar um tempo muito grande para varrer todo o espectro selecionado.

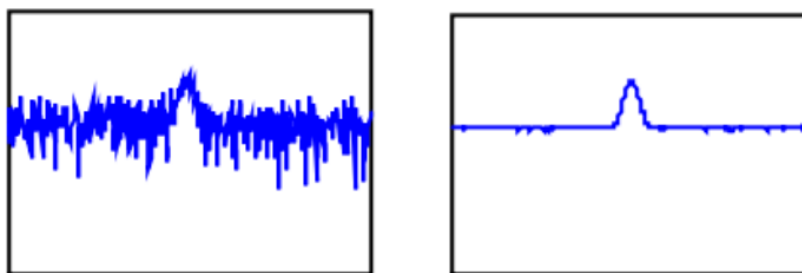
Em geral, o valor de RBW é definido por norma em termos da faixa de frequência da medição e do tipo de detector utilizado na medição. Neste trabalho, estas recomendações foram atendidas de acordo com as especificações para detector de pico e para cada uma das faixas de frequências medidas, com resoluções que variam entre 1 kHz (faixa de 10 kHz à 500 kHz), 10 kHz (faixa de 500 kHz à 1,6 MHz) e 100 kHz (faixa de 1.6 MHz à 50 MHz).



**Figura 19.** Influência do parâmetro RBW na medição.



**Filtro de Vídeo (VBW – Video Bandwidth):** Se trata de um filtro passa-baixas que se encontra após o detector e antes do display e tem a função de suavizar a curva mostrada na tela do instrumento. O analisador mostra o somatório do sinal medido e do ruído inerente. Se os níveis máximos do sinal estiverem próximos ao nível de ruído (baixa relação sinal/ruído) fica difícil identificá-los, assim, o filtro VBW tem o objetivo de reduzir as variações pico a pico do ruído a fim de melhorar a visualização do sinal no visor do analisador, como mostra a Figura 20. Normalmente, valores de VBW que variam entre 1/3 e 1/100 do valor de RBW apresentam resultados satisfatórios. Neste trabalho o valor de VBW foi configurado para 1/3 de RBW.

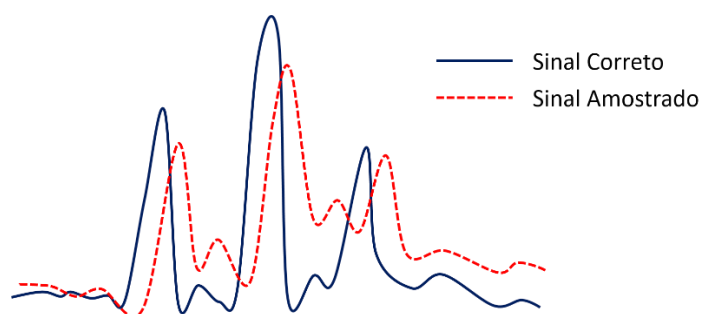


**Figura 20.** Influência do parâmetro VBW na medição (retirado de [34]).

**Tempo de Varredura: (SWT - Sweep Time):** É o tempo que o analisador leva para varrer todo o SPAN selecionado. Este parâmetro pode afetar significativamente uma medição. Um SWT muito baixo pode causar erros de simultaneidade na visualização de dois sinais de frequências diferentes. Em contrapartida, a seleção de um tempo de varredura muito elevado pode resultar em erros nos valores das amplitudes e frequências mostrados no display, como pode ser observado na Figura 21. Geralmente este parâmetro é configurado automaticamente pelo analisador, mas também pode ser obtido através da Equação 27.

$$SWT = k \frac{SPAN}{RBW^2} \quad (27)$$

Onde k varia entre 2 e 3 [34].



**Figura 21.** Influência do parâmetro SWT na medição.

### 4.1.2 Sensores de Campo Elétrico

Para a medição de campo elétrico os analisadores de espectro precisam ser acoplados a um sensor de campo que tem a função de transformar o sinal de rádio interferência (campo eletromagnético) em tensão (sinal medido). A tensão de saída da antena é proporcional a intensidade do campo elétrico, e a relação entre estas duas grandezas é denominada de fator de antena.

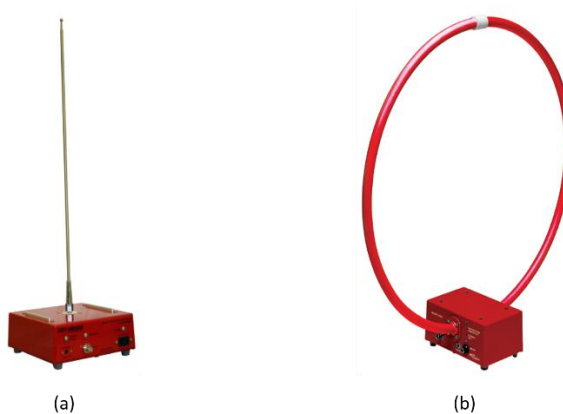
$$FA = \frac{E_{inc}}{V_{ant}} \quad (28)$$

Onde  $V_{ant}$  é a tensão induzida nos terminais de saída da antena,  $E$  é a intensidade do campo elétrico que incide na antena e  $FA$  é o fator de antena. O FA depende das características construtivas de cada antena e pode ser obtida através da curva de fornecida pelo fabricante.

Atualmente, as antenas de banda larga (*broadband antennas*) vem sendo amplamente utilizadas em testes de emissões irradiadas, em virtude da obtenção rápida e eficiente de sinais em uma ampla faixa de frequência. Seguindo este padrão, e a necessidade a cobertura da faixa de frequência de interesse, foram selecionadas as antenas para a medição de campo elétrico neste trabalho, estas antenas estão relacionadas abaixo:

**Antena Monopolo Ativa 3301C (ETS - Lindgren):** Esta é uma antena monopolo elétrico que possui faixa de frequência nominal que varia de 30 Hz a 50 MHz, em algumas aplicações, a eficiência desta antena pode ser melhorada, através da colocação de um plano metálico aterrado em sua base. Desta forma, ela atua como uma antena dipolo elétrico.

**Antena Loop Ativa 6502 (ETS - Lindgren):** Esta é uma antena tipo *loop* magnético que possui uma faixa de frequência nominal que varia de 10 kHz a 30 MHz.



**Figura 22.** Antenas utilizadas para medição de campo elétrico: (a) Antena Monopolo Elétrico Ativa; (b) Antena Loop Ativa Blindada.

Na prática, a antena utilizada para medições foi a Antena Monopolo Ativa devido sua facilidade de operação e  $FA$  praticamente constante em toda a faixa de frequência de interesse. No entanto, as Antenas *Loop*, mesmo fazendo uma medição indireta (mede campo magnético e converte para campo elétrico) possui uma maior confiabilidade por se tratar de uma antena blindada, sendo assim, menos sensível a “barreiras” (principalmente metálicas) presentes no ambiente de medição. Em contrapartida, a Antena *Loop* possui polarização linear, portanto, para obtenção do campo elétrico total é necessária a realização de duas etapas de medição (uma em polarização vertical e outra em horizontal) seguida da composição vetorial das duas componentes. Isso torna as medições demoradas e exaustivas, inviabilizando a utilização desta antena em todas as medições, devido às limitações operacionais do processo de medição que serão discutidas na seção 4.2.2. A vista disso, em cada ambiente de medição foi realizado uma medida na faixa de frequência que vai de 500 kHz a 1.6 MHz, utilizando ambas as antenas *Loop* e Monopolo, afim de garantir maior confiabilidade nas demais medições, que foram realizadas apenas pela Antena Monopolo elétrica. Essa faixa de frequência foi escolhida para comparação, por possuir elevadas amplitudes em frequências muito bem definidas, já que é a faixa de frequência destinada a operação de rádio AM.

As principais características físicas e elétricas, bem como as curvas de  $FA$  das antenas utilizadas neste trabalho encontram-se no ANEXO A.1.

## 4.2 Planta Fotovoltaica Sob Estudo

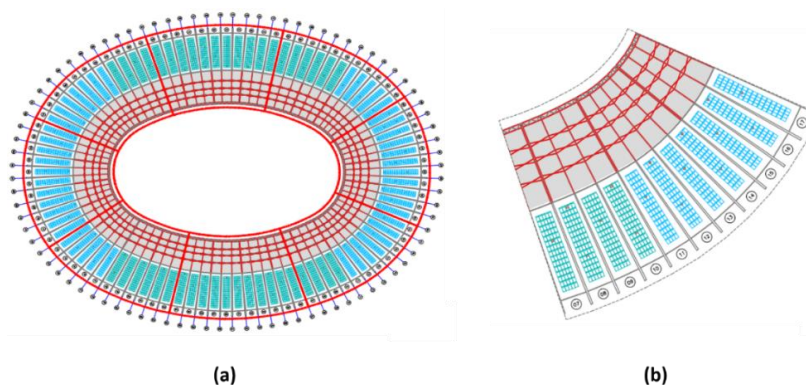
A investigação experimental deste presente trabalho foi realizada na central fotovoltaica instalada na cobertura do estádio de futebol Governador Magalhães Pinto, popularmente conhecido como Mineirão. O sistema montado no estádio trata-se de uma usina de médio porte com 1,42 MW<sub>p</sub> de capacidade de geração e emprega 5910 painéis fotovoltaicos. Uma vista superior desta usina é mostrada pela Figura 23.



**Figura 23.** Vista superior da UFV montada na cobertura do estádio Mineirão.

### 4.2.1 Características Construtivas da Usina Fotovoltaica do Mineirão

Conforme mencionado anteriormente, a central fotovoltaica montada na cobertura do estádio é composta por 5.910 painéis fotovoltaicos. Estes painéis estão divididos em oito seções conforme mostrado na Figura 24.a. Como pode ser observado na Figura 24.b, cada seção possui onze segmentos, alguns seguimentos possuem 75 e outros 60 módulos fotovoltaicos conectados em série. Finalmente, cada um dos segmentos é conectado a um conversor CC/CA instalado em uma sala localizada abaixo das arquibancadas. Desta forma, esta usina emprega um total de 88 conversores CC/CA.



**Figura 24.** (a) Vista superior das oito seções da usina fotovoltaica do estádio Mineirão; (b) Zoom de uma das seções da usina fotovoltaica.

É importante salientar que a conexão entre os painéis e os conversores é feita através de cabos com comprimentos da ordem de centenas de metros. Desta forma, baseado em tudo que foi estudado até aqui, existe a expectativa de produção de ruído em uma ampla faixa de frequência por parte desta usina, onde parte deste ruído pode ser irradiado para o ambiente através destes cabos.

#### ***4.2.2 Limitações da Planta sob Estudo.***

Este trabalho foi pensado e elaborado como parte do projeto P&D D470 – ANEEL/CEMIG/UFMG, que consistia na construção de uma usina fotovoltaica de 3 MW<sub>p</sub> na cidade de sete Lagoas. Parte desta usina (aproximadamente 500 kW) seria destinada a estudos teóricos e experimentais, servindo assim, como “laboratório” para profissionais da CEMIG e da UFMG e seria alvo deste projeto. Infelizmente, em virtude de um conjunto de problemas econômicos e políticos este projeto foi suspenso, e o presente trabalho foi adaptado para ser aplicado na UFV do Mineirão.

Embora seja relativamente grande, possua um grande número de conversores e empregue cabos de grandes extensões, a usina do Mineirão apresenta algumas limitações importantes que atrapalhou em partes o escopo deste projeto.

Primeiramente, parte desta usina pertence a empresa Minas Arena que administra o estádio, assim, o acesso à mesma necessita da permissão da empresa e do acompanhamento de um profissional da CEMIG responsável pela manutenção da UFV. Isso limitou bastante os dias de acesso à usina e o tempo disponível para as medições. Além disso, por possuir contrato de produtividade, não era possível desligar a usina (exceto em dias de manutenção). O que limitou a caracterização do ambiente eletromagnético, com a usina desligada.

No entanto, a limitação mais importante está relacionada a impossibilidade de variação de diversos parâmetros da usina, que em princípio seria estudado neste trabalho. Através de um sistema mais flexível seria possível analisar o ruído irradiado frente a diferentes topologias de SFV; variar o tamanho dos cabos CA e CC de maneira a analisar como isso influencia no nível e na faixa de frequência do ruído irradiado; modificação da disposição e posicionamentos dos cabos. Note que tudo isso seria possível na usina experimental que em princípio seria alvo deste estudo.

### **4.3 Medição de Emissões Irrradiadas em SFV**

A medida de emissão irradiada é um tema complexo. São necessárias padronizações dos procedimentos e unidades de medidas para que se possa comparar resultados obtidos em diferentes locais e procedimentos. Geralmente em ensaios de emissões irradiadas são utilizadas câmaras anecoica, que isola eletromagneticamente o ambiente de medição. Medições em ambientes abertos, como é o caso de SFVs reais, requer uma atenção especial, devido à existência de grande número de ruídos externos, o que dificulta este tipo de medição. Existem recomendações e normas específicas para procedimentos, e cuidados que devem ser tomados no processo de medição de emissões irradiadas em ambientes agressivos, algumas das principais recomendações serão discutidas a seguir.

#### **4.3.1 Protocolo de Medição**

Com o objetivo de auxiliar este e outros trabalhos de medição de campos elétricos irradiados em sistemas fotovoltaicos, foi elaborado um protocolo de medição. Este protocolo é baseado em revisões bibliográficas de artigos científicos e em normas técnicas, e adaptado para aplicação em SFV. Alguns cuidados e procedimentos merecem destaque:

**Pré-calibração:** Primeiramente é necessária fazer uma pré-calibração dos equipamentos, esta etapa é realizada em laboratório e é necessária para validar as medições realizadas pelos equipamentos bem como a metodologia para a medição.

**Definição dos pontos de medida:** As medições de ruídos irradiados podem ser realizadas em qualquer ponto dentro da área de interesse desde que respeite alguns limites. Por motivos de calibração das antenas, os pontos que se encontram a uma distância inferior a 1 m das fontes eletromagnéticas e dos obstáculos (paredes, anteparos, pessoas, equipamentos de medição, dentre outros,) são considerados impróprios para medição de campos elétricos. Nestes pontos o sistema não consegue acoplar eficientemente os campos elétricos emitidos e os resultados obtidos nestas situações não são garantidos pelos fabricantes dos sensores.

**Verificação das condições de operação dos equipamentos:** Antes de iniciar o procedimento de medição é muito importante verificar as condições de operação dos equipamentos de medição, como: montagem correta do suporte da antena, utilização de cabos blindados, verificação de carga do analisador e antenas, posicionamento adequado das antenas (entre 1 e 4 m do solo), aterramento do plano metálico das antenas (se necessário), dentre outros.

**Caracterização do ruído ambiente:** O campo elétrico medido nas proximidades de um SFV não provem apenas deste sistema, diversas fontes externas (intencionais ou não) influenciam nos valores medidos. Por isso, é muito importante a caracterização adequada do ambiente eletromagnético com o SFV fora de operação. Tomado os devidos cuidados, é possível afirmar que os níveis de campo irradiado pelo SFV correspondem a elevação do nível de campo elétrico que ocorre quando o SFV entra em operação.

**Medições das emissões irradiadas:** Respeitando todas as etapas prescritas anteriormente, finalmente pode ser iniciada as medições com a usina em operação. Também é importante, tanto nesta etapa, quanto na etapa anterior, que todas as fontes eletromagnéticas externas (lâmpadas fluorescentes, antenas, motores, etc.) sejam desligadas sempre que possíveis. É importante salientar que nas duas últimas etapas as condições de medição devem ser idênticas e realizadas nos mesmos pontos, para efeito de comparação.

Os procedimentos descritos neste protocolo de medição são apresentados de maneira sucinta através da Tabela 7.

**Tabela 7.** Resumo das principais prescrições normativas adotadas nas medições.

<b>Protocolo de Medição de Campo Elétrico Irradiado em Sistema Fotovoltaicos</b>			
	<b>Norma</b>	<b>Prescrição Normativa</b>	<b>Condição de Teste</b>
<b>Parâmetros do Sistema</b>	ANSI C63-2	Detectores de pico devem ser utilizados para representação da situação de pior caso	Em todas as medições foram utilizadas detecção de pico
	ANSI C63-2 e CISPR 16-1	Especificação de instrumentos devem ser seletivos em frequência, com unidades adequadas e fornecidos com curva de calibração pelo fabricante	Foi utilizado analisador de espectro ANRITSU MS2712E, em unidade de dB $\mu$ V/m e com documentação fornecida pela ANRITSU
		Seletividade de Largura de Banda (RBW)	10 kHz a 100 kHz (RBW = 1 kHz) 100 kHz a 30 MHz (RBW = 10 kHz) 30 MHz a 1 GHz (RBW = 100 kHz)
		Impedância de entrada de 50 $\Omega$	Selecionado para 50 $\Omega$ , conforme especificado no manual dos sensores
		Especificação de sensores	Uma antena monopolo (30 Hz – 50 MHz) com especificação de FA definida pelo fabricante
<b>Procedimentos de Medição</b>	IEEE Std. 139	Verificação da condição de operação dos equipamentos de medição e antenas	De acordo com a operação especificada pelo fabricante <ul style="list-style-type: none"> <li>• FA calibrado para 1m de distância</li> <li>• Montagem em suporte próprio</li> <li>• Utilização de cabos blindados</li> <li>• Verificação de sobrecarga do analisador</li> </ul>
		Antenas posicionadas entre 1 e 4 m do solo	Todas as medições foram realizadas com a antena a 1,2 m
		Antenas posicionadas a pelo menos 1 m das fontes eletromagnéticas e anteparos	Todas as medições foram realizadas a mais de 1 m da fonte e de qualquer anteparo
<b>Limites</b>	NBR IEC/CISPR11	Especificação do nível de Emissão para Dispositivos Eletrônicos.	Foi utilizado o limite as especificações para equipamentos classe A e B conforme a Tabela 4
	ICNIRP 1998	Especificação de limites de exposição para seres vivos	Foram utilizados as especificações para público geral, conforme a Tabela 6

### 4.3.2 Sistema de Medição

Baseado no protocolo de medição que foi traçado para este trabalho, a Figura 25 mostra uma configuração típica de uma jornada de medição de emissão irradiada em um SFV qualquer. Vale lembrar que a característica modular de um SFV permite uma ampla gama possibilidades de instalação, onde diversas topologias diferentes podem ser adotadas. Desta maneira, é importante ter em mente que a metodologia de medição de campos eletromagnéticos irradiados em UFV pode variar muito de um sistema para outro.

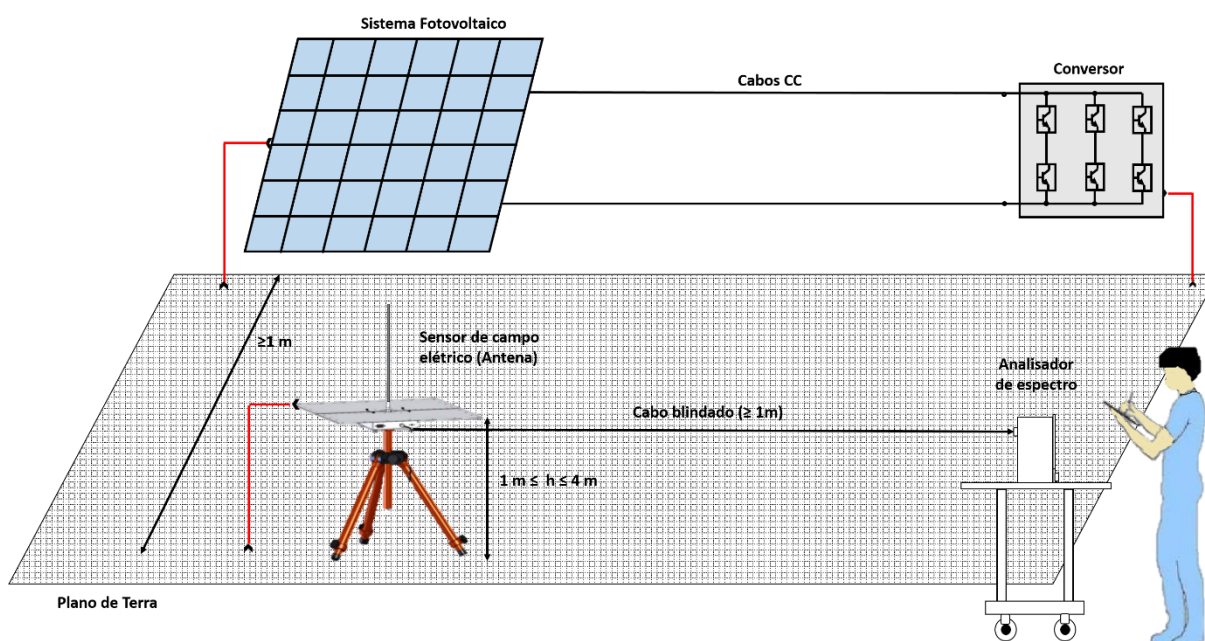


Figura 25. Configuração típica de medição de emissões irradiadas em um SFV.

Deve-se lembrar, que o sinal de recepção do analisador de espectro sofre diversas atenuações ao longo do sistema de medição. Assim, para determinar o valor real do campo elétrico incidente na antena, estas atenuações devem ser corrigidas. O procedimento de cálculo do campo elétrico incidente pode ser obtido através da análise da Figura 26.

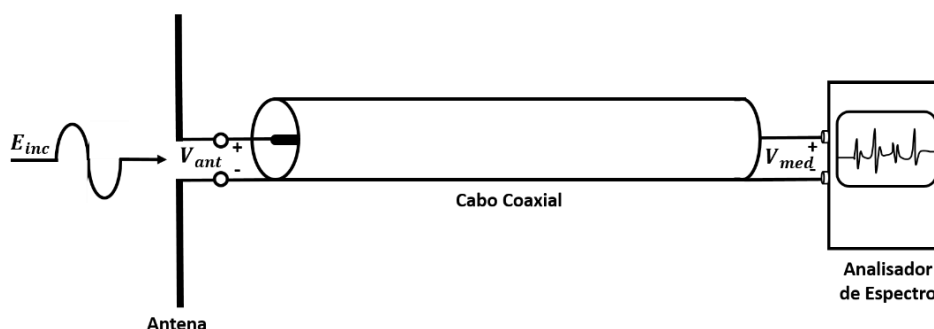


Figura 26. Representação do sistema de medição.



A Equação 28 mostrou que a tensão de saída da antena é proporcional a intensidade do campo elétrico, e a relação entre estas duas grandezas é denominada de fator de antena (FA). A equação 28 também pode ser escrita da forma apresentada pela Equação 29 quando os valores envolvidos são dados em dB, novamente, a partir do conhecimento do fator de antena do sensor, e da tensão na saída da antena é possível determinar de maneira simples o campo elétrico incidente.

$$E_{inc}(dB\mu V/m) = V_{ant}(dB\mu V) + FA(dB/m) \quad (29)$$

Além disso, temos que a tensão na saída da antena sofre uma atenuação até chegar ao receptor localizado na outra extremidade do cabo coaxial. Desta forma, temos que:

$$V_{ant}(dB\mu V) = V_{rec}(dB\mu V) + P_c(dB) \quad (30)$$

A partir das Equações 29 e 30, podemos concluir que o campo elétrico incidente na antena pode ser calculado através da Equação 31.

$$E_{inc}(dB\mu V/m) = V_{rec}(dB\mu V) + FA(dB/m) + P_c(dB) \quad (31)$$

A Equação 31 é uma maneira simples de converter a tensão medida pelo receptor  $V_{rec}$  no valor de campo elétrico incidente  $E_{inc}$ , efetuando a soma direta da tensão lida com o valor do FA e da perda no cabo coaxial  $P_{cabo}$ .

Vale ressaltar que tanto o fator de antena quanto a atenuação no cabo variam dentro da faixa de frequência em que a antena foi projetada para operar. As curvas de FA dos sensores utilizados neste trabalho bem como a curva de atenuação do cabo empregado nas medições, podem ser visualizados nos anexos A.1.1, A.1.2 e A.2 respectivamente.

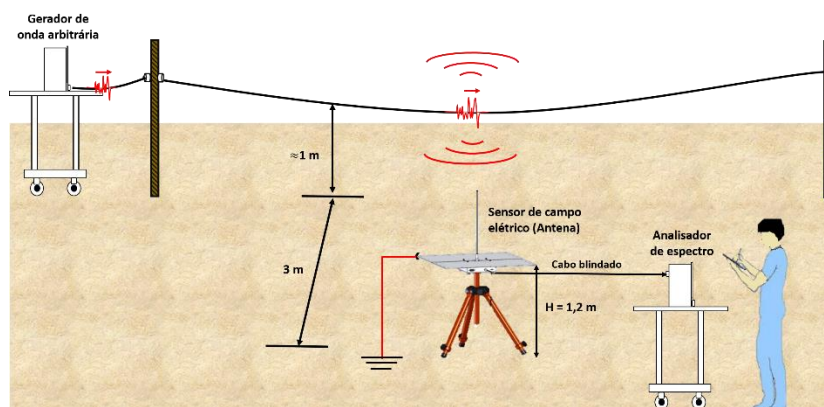
## 5 *Investigação Experimental e Resultados*

Neste capítulo são descritos os detalhes da investigação experimental realizada durante o projeto. São detalhados aqui os procedimentos julgados adequados para a realização das medições, frente às características físicas do problema estabelecido e das limitações do sistema investigado. Em seguida é apresentada uma síntese dos resultados obtidos em cada ensaio. Finalmente os resultados são analisados e discutidos. A análise experimental realizada neste trabalho foi dividida em duas partes principais:

- Estudo prático para verificar a influência do comprimento dos cabos na eficiência de irradiar ruídos em determinadas faixas de frequência.
- Medição e análise do perfil do campo elétrico irradiado nas proximidades da usina fotovoltaica do estádio de futebol Governador Magalhães Pinto (Mineirão).

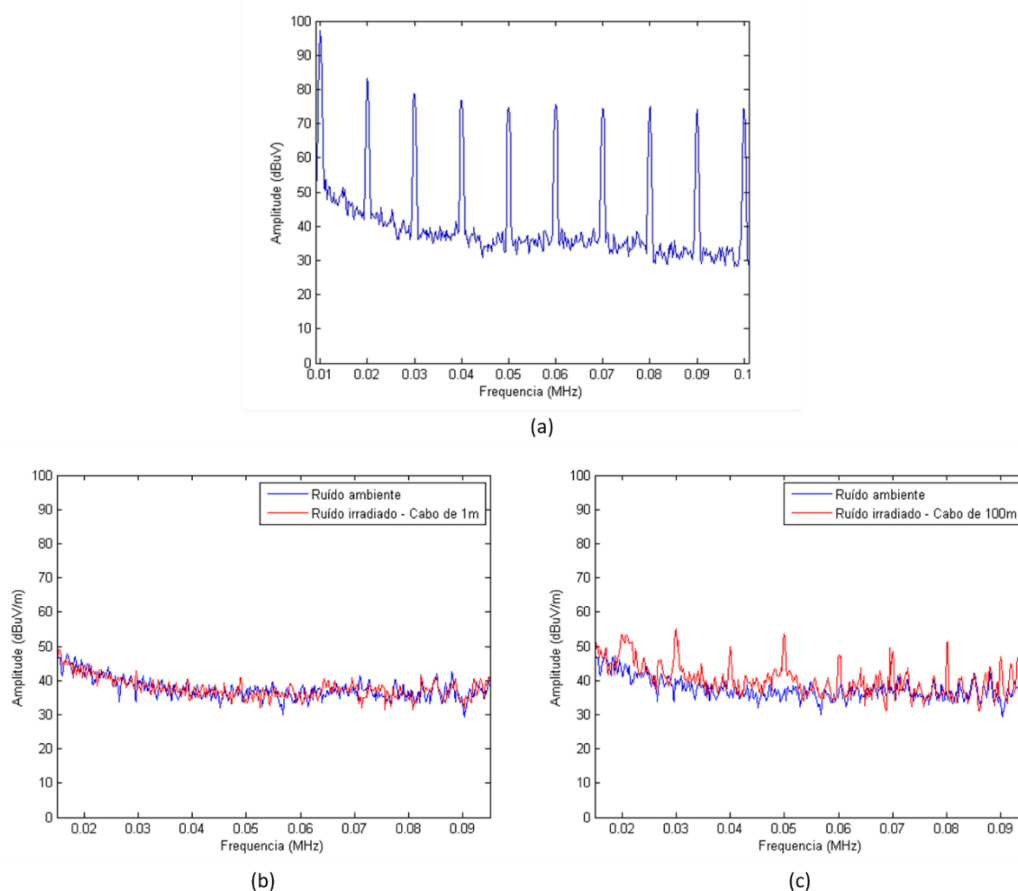
### 5.1 *Análise Experimental da Influência do Tamanho dos Cabos no Mecanismo de Radiação de Campos Eletromagnéticos*

Para validar a hipótese dos cabos de um SFV agirem como antenas para determinadas frequências, uma investigação experimental foi realizada. O ensaio proposto é bem simples e consiste em aplicar um sinal de alta frequência na extremidade de um cabo e medir o ruído irradiado nas proximidades deste cabo. Para gerar o sinal de alta frequência foi utilizado um gerador de onda arbitrária, e para medir o ruído irradiado foram utilizados o analisador e a antena monopolo ativa descrita no capítulo anterior. Um esquema do *setup* de medição pode ser observado através da Figura 27.



**Figura 27.** Setup de medição do ruído radiado por um cabo excitado em sua extremidade.

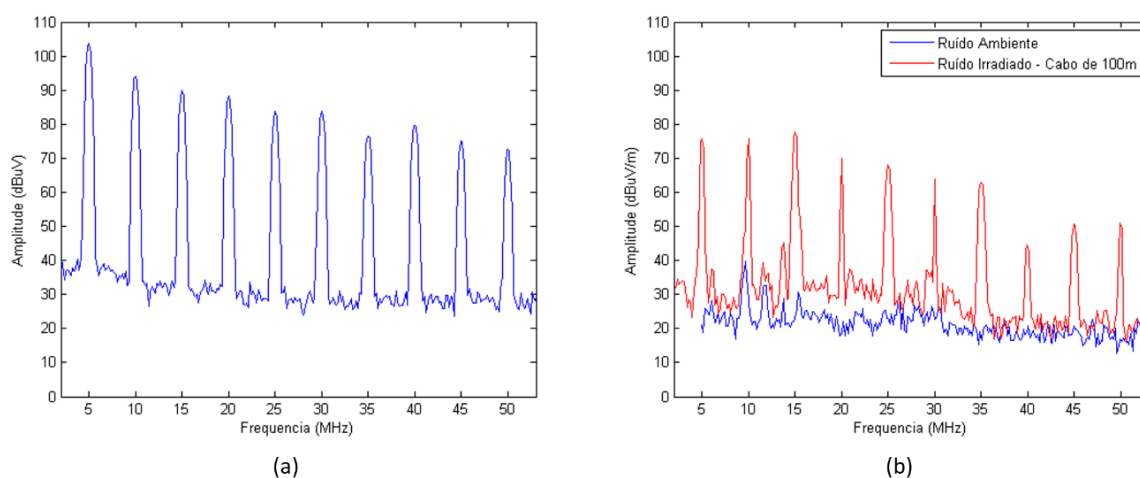
Primeiramente, um cabo de 1 m de comprimento foi excitado por uma onda quadrada de 10 V<sub>pp</sub> ( $V_{\min} = 0$  V e  $V_{\max} = +10$ V) e com frequência de 10 kHz. Mediu-se então o campo elétrico em um eixo transversal ao comprimento do condutor, a 3 m de distância do seu centro. A Figura 28.a apresenta o espectro de frequência do sinal aplicado ao cabo, no intervalo de 10 a 100 kHz, a Figura 28.b mostra a comparação do nível de campo elétrico que é medido com a presença do cabo excitado de 1 m de comprimento (ruído irradiado) e sem a presença do cabo excitado (ruído ambiente), para o mesmo intervalo de frequência. A mesma análise utilizando um cabo excitado de 100 m é feita e o resultado pode ser observado através da Figura 28.c.



**Figura 28.** (a) Espectro de frequência do sinal de excitação dos cabos; Comparação do nível de ruído irradiado, com, e sem a presença do cabo excitado de (b) 1 m e (c) 100 m.

A partir das Figura 28.b e 28.c, é possível perceber que tanto para o cabo de 1 m quanto para o cabo de 100 m o ruído não é irradiado de maneira eficiente na faixa de frequência analisada, ou seja, não se comportam como boas antenas para essa faixa de frequência. No entanto, é fácil perceber que para o cabo de 100 m uma pequena parcela deste ruído é irradiada para o ambiente. Este resultado é coerente, já que, em teoria, os cabos de 1 m e 100 m deveriam se comportar como uma antena eficiente para sinais de 150 MHz e 1,5 MHz respectivamente [11] [19].

Como o SFV em estudo possui cabos de aproximadamente 100 m de comprimento, uma análise similar a anterior foi realizada com a finalidade de se verificar os níveis de ruído que são irradiados por esse comprimento de cabo no intervalo de 1 a 50 MHz. Para isso uma onda quadrada de 10 V<sub>pp</sub> ( $V_{\min} = 0 \text{ V}$  e  $V_{\max} = +10 \text{ V}$ ) e frequência de 5 MHz foi injetada na extremidade do cabo de 100 m. O espectro de frequência da fonte em um intervalo que se estende de 1 a 50 MHz pode ser observado na Figura 29.a. A Figura 29.b mostra a comparação do nível de ruído irradiado que é medido no ambiente sem a presença do cabo excitado e com a presença do cabo excitado.



**Figura 29.** (a) Espectro de frequência do sinal de excitação do cabo; (b) Comparação do ruído irradiado pelo cabo de 100 m e do ruído ambiente.

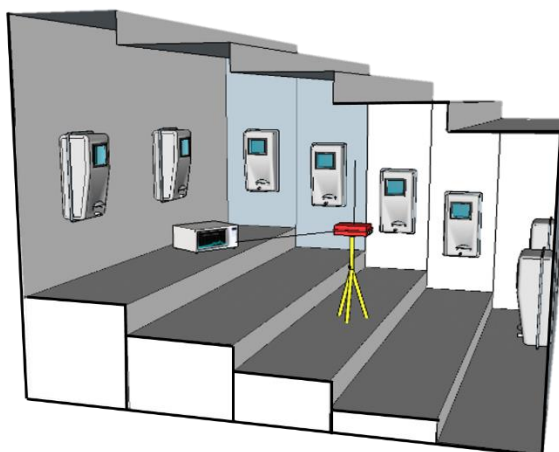
É fácil perceber pela análise destes gráficos, que ruídos na faixa de algumas dezenas de MHz é irradiado de maneira eficiente por cabos da ordem de 100 m de comprimentos, em outras palavras, cabos deste tamanho agem como uma boa antena para sinais nesta faixa de frequência. Desta forma, é possível traçar uma analogia direta desta análise com o estudo foco deste trabalho. O resultado obtido neste experimento é um indicativo de que o SFV estudado neste projeto pode irradiar ruídos com amplitudes significativas em uma ampla faixa de frequência.

## 5.2 *Medição e Análise do Ruído Irradiado nas Proximidades da Usina Fotovoltaica do Mineirão*

Como discutido anteriormente, o SFV sob estudo emprega dezenas de conversores, e estes conversores atuam como fontes de ruídos em uma ampla faixa de frequência, além de possuir cabos de centenas de metros, que demonstrou se comportar como uma boa antena para ruídos na faixa de frequência de dezenas de MHz. Desta forma, medições de ruídos foram realizadas em alguns pontos da usina.

Devido às dimensões e a complexidade de acesso a diferentes pontos ao longo dos cabos, foram realizadas medições apenas nas salas dos conversores e na arquibancada do estádio, local com maior circulação de pessoas, portanto, maior preocupação com os níveis de radiações presentes no ambiente. O ruído foi medido na faixa de frequência de 10 kHz a 50 MHz.

Na sala dedicada aos conversores foram realizadas duas configurações de medição: uma com a usina desligada, com a finalidade de caracterizar o ruído ambiente, e outra com a usina em funcionamento. A medição foi realizada com a antena posicionada no centro da sala, como representado no desenho esquemático da Figura 30. Uma montagem de medição real na sala dos conversores pode ser visualizada pela Figura 31.



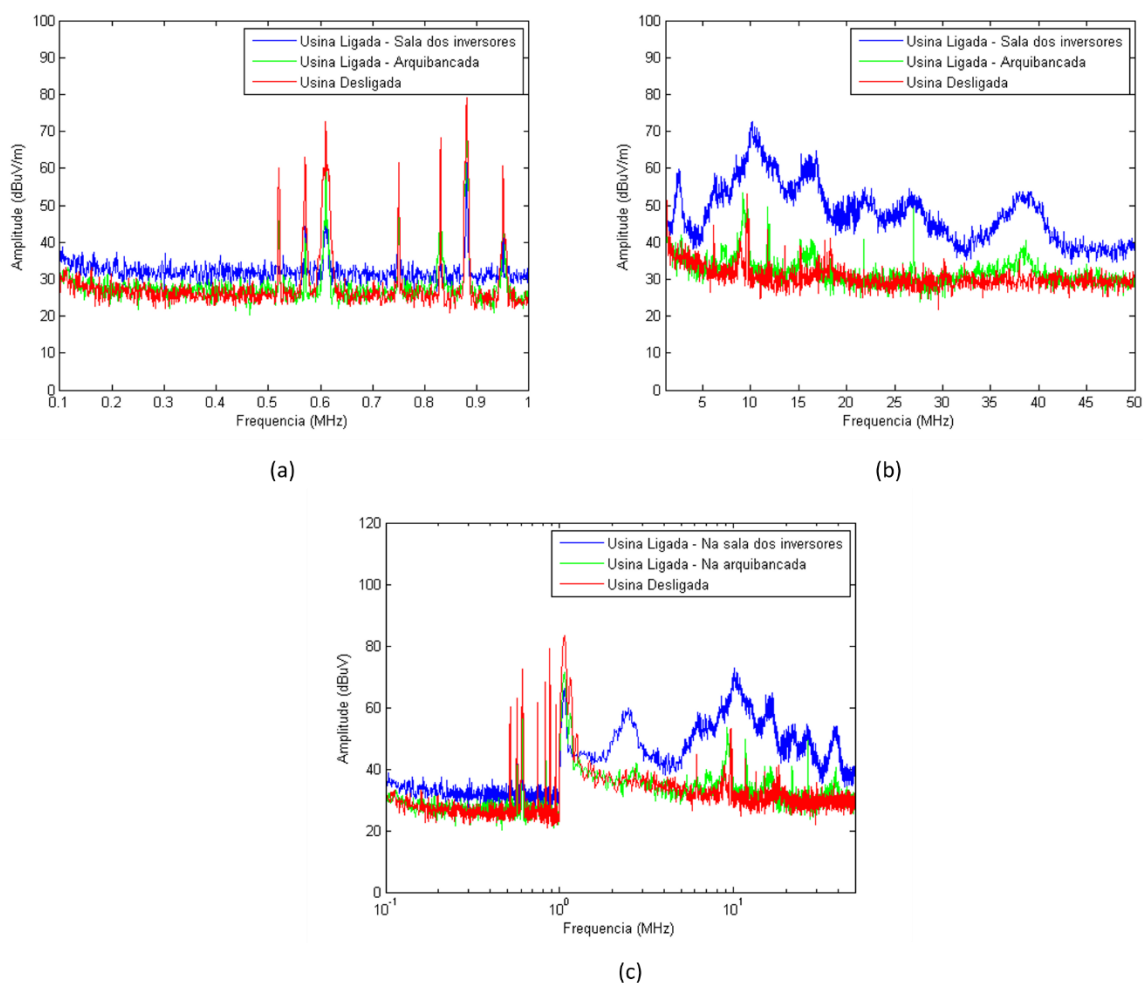
**Figura 30.** Configuração de medição em uma das salas dos inversores.



**Figura 31.** Medição na sala dos inversores.

Também foram realizadas medições na arquibancada, com a finalidade de verificar se o ruído irradiado poderia afetar de alguma forma os equipamentos ou pessoas presentes no estádio. As medições ocorreram no ponto imediatamente acima do centro da sala dos conversores. Os resultados podem ser visualizados pela Figura 32, onde é feita uma comparação

do nível de campo elétrico no centro da sala com a usina ligada, na arquibancada (também com a usina ligada) e do ruído ambiente (usina desligada).



**Figura 32.** Comparação do ruído eletromagnético irradiado pelo SFV na sala dos conversores, na arquibancada e do ruído ambiente, para as seguintes faixas de frequência: (a) 10 kHz até 1 MHz; (b) 1 MHz até 50 MHz; (c) 10 kHz até 50 MHz (escala logarítmica).

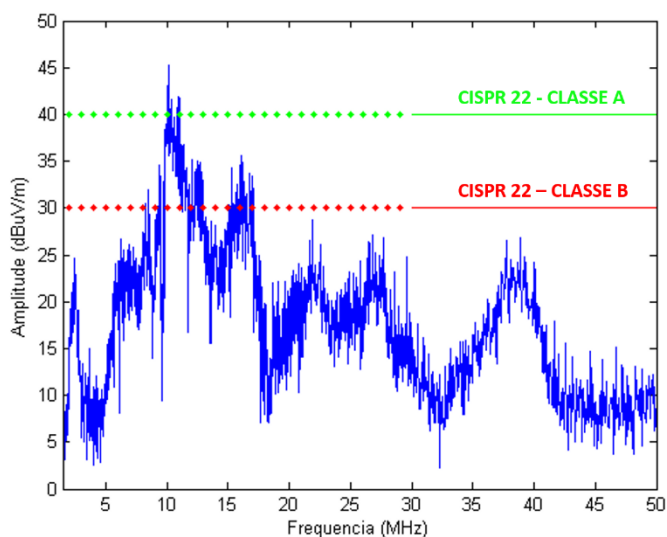
A Figura 32.a deixa claro que o funcionamento da usina não afeta significativamente o ruído irradiado na faixa de 10 kHz a 1 MHz, onde é observado apenas uma pequena elevação deste ruído na sala dos conversores. Por outro lado, a Figura 32.b comprova que na faixa de 1 MHz a 50 MHz existe uma elevação significativa do campo elétrico na sala dos conversores quando a usina entra em operação. Este resultado está coerente com os resultados obtidos na análise do efeito do tamanho dos cabos no mecanismo de irradiação, que mostrou que os cabos de 100 m irradiam de maneira eficiente ruídos na faixa de 1,5 MHz.

É possível observar também que o nível de ruído na arquibancada decai abruptamente para o nível ambiente, mesmo para as frequências mais elevadas, não representando assim, um risco para pessoas ou equipamentos eletrônicos localizados nessa região. Desta maneira, o

ponto crítico desta usina se limita a emissão irradiada na faixa de 1 MHz a 50 MHz restrito apenas as salas dos conversores.

Deve-se lembrar que os níveis de campo medidos resultam da combinação dos campos emitidos pela UFV e do campo inerente ao ambiente (ruído ambiente). Desta forma, os níveis de emissão do sistema fotovoltaico consistem na diferença do campo medido com a usina ligada e do ruído ambiente. A Figura 33 exibe o ruído que de fato é irradiado pelo SFV e os limites máximos de emissão para equipamentos eletroeletrônicos definidos pela CISPR11 (ver Tabela 4). A parte pontilhada representa uma extensão da norma, já que a mesma define emissões irradiadas apenas para frequências acima de 30 MHz.

A partir do resultado, é possível perceber que em grande parte do espectro, a UFV emite níveis de ruídos bem próximos dos limites máximos estabelecidos pelas normas. Na janela que de aproximadamente 8 MHz à 17 MHz os níveis de frequência estão acima dos limites referentes a equipamentos Classe B. Para frequências em torno de 10 MHz, o campo irradiado supera inclusive o limite estabelecido para equipamentos Classe A. Este resultado é muito importante, pois mostra que de fato os SFV podem emitir níveis consideráveis de ruídos eletromagnéticos para o ambiente, e que estudos mais detalhados devem ser realizados.



**Figura 33.** Comparação da emissão irradiada do SFV com os limites máximos estabelecidos pela CISPR22.

---

## 6 *Conclusões*

---

Este trabalho se propôs a medir e analisar o perfil do campo elétrico irradiado em uma ampla faixa de frequência (100kHz – 50MHz) nas proximidades de uma usina fotovoltaica, com o intuito de verificar se os níveis de campo eletromagnético estão dentro de valores aceitáveis. Esta preocupação se justifica pelo fato de não existir normas que regulamentam níveis de campos irradiados em boa parte da faixa de frequência estudada neste projeto, tão pouco, trabalhos de medição, de ruídos irradiados em SFV no Brasil. De fato, os resultados obtidos mostram que as hipóteses levantadas a respeito do mecanismo de irradiação em SFV e a preocupação com os níveis de ruídos são pertinentes, justificando assim a importância deste estudo.

Este trabalho se dividiu basicamente em uma etapa teórica, onde foram estudadas e levantada diversas hipóteses e teorias a respeito de emissões eletromagnéticas em SFV e em duas partes experimentais. A primeira consistiu em verificar e analisar a influência do tamanho dos cabos no mecanismo de irradiação de campos eletromagnéticos. A segunda etapa consistiu na medição do ambiente eletromagnético em um SFV real. As principais conclusões para cada uma destas etapas são discutidas separadamente a seguir.

### **6.1 *Conclusões Preliminares dos Estudos Teóricos***

Primeiramente foi feito um estudo teórico a respeito dos principais temas que fundamentam o presente trabalho. A partir deste estudo, foi possível desenvolver hipóteses a respeito dos mecanismos de geração, propagação e irradiação dos ruídos eletromagnéticos em um SFV.

Esta revisão teórica, apontou que os conversores de uma usina fotovoltaico são as principais fontes de ruído do sistema, estes ruídos são causados principalmente pelo chaveamento de alta frequência da tensão CC. Foi visto também que os ruídos são significativos em uma ampla faixa de frequência, que varia de algumas dezenas de kHz, que está relacionada com a frequência de chaveamento dos conversores e suas componentes harmônicas, até várias centenas de kHz ou algumas dezenas de MHz, relacionadas principalmente ao tempo de subida e aos transitórios eletromagnéticos dos pulsos PWM.



Além disso, foi visto também que os cabos de grandes extensões destas usinas devem ser tratados como linhas de transmissão, ou seja, as indutâncias longitudinais e as capacitâncias transversais destes cabos devem ser consideradas, podendo inclusive, funcionar como circuito ressonante para várias frequências. Outros elementos muito importantes que devem ser considerados para análise, são as capacitâncias parasitas dos elementos que compõem o SFV, principalmente os presentes nos painéis e conversores. Devido à grande quantidade de painéis e conversores, além das características de alta frequência já citadas, as correntes conduzidas para o plano de terra ( $I_{CM}$ ) através dos elementos parasitas constituem a maior fonte de campo elétrico que é irradiado para o ambiente.

Finalmente, vimos que a eficiência com que os cabos irradiam os campos eletromagnéticos, depende diretamente da relação do tamanho dos cabos com a frequência do ruído. Os cabos foram analisados como uma antena monopolo, desta maneira, este cabo é considerado uma antena “ideal” quando seu comprimento físico é metade do comprimento de onda do sinal propagado por ele.

## ***6.2 Conclusões da Análise Experimental***

### ***6.2.1 Influência do Tamanho dos Cabos no Mecanismo de Radiação dos Campos Eletromagnético***

Nesta etapa do trabalho, foi possível verificar que os cabos podem de fato agir como uma antena irradiando parte do ruído conduzido pelos mesmos, além de demonstrar que o tamanho dos cabos que compõe um SFV realmente exerce uma influência significativa no que diz respeito ao nível de ruído irradiado em determinadas frequências.

Os resultados provaram que os cabos utilizados em um SFV irradiam de maneira eficiente quando o seu tamanho físico é da ordem de grandeza do comprimento de onda do sinal de excitação (ruídos). A medida que o tamanho do cabo vai aumentando ou diminuindo muito em relação a dimensão do comprimento de onda do sinal conduzido, este cabo vai perdendo sua capacidade de irradiar parte deste sinal para o ambiente.

Este resultado permitiu prever que a operação da UFV do Mineirão acarretaria em uma elevação do nível de campo elétrico ambiente na faixa de algumas dezenas de MHz, já que, de forma geral, o tamanho dos cabos neste sistema é da ordem de 100 m.

### ***6.2.2 Medições da Emissão Irradiada pelo SFV do Mineirão***

A partir dos resultados obtidos nas medições realizadas na usina do Mineirão, foi possível observar uma elevação significativa do campo elétrico irradiado, quando a usina entra em operação, principalmente na faixa de frequência de 1 MHz a 50 MHz. Este resultado comprova a hipótese de que em um SFV que emprega diversos conversores e painéis, são produzidos ruídos com amplitudes significativas em uma ampla faixa de frequência e que na prática os cabos de uma usina real realmente funcionam como antenas eficientes para determinadas faixas de frequência.

Através do perfil de campo elétrico obtido quando a UFV está ligada e do perfil de campo elétrico ambiente, foi possível determinar os níveis de emissão desta usina e comparar estes níveis com os limites estabelecidos por norma para equipamentos eletroeletrônicos. A partir desta comparação, pode-se concluir que o ruído irradiado pela usina é relativamente alto na faixa que se estende de 1 MHz até 50 MHz, sendo que em determinadas frequências a amplitude do campo elétrico ultrapassou o limite máximo estabelecido para limites de emissão em equipamentos eletroeletrônicos. Este resultado é importante, pois evidencia a necessidade de discutir a possibilidade de estender as normas de emissão irradiada também para frequências menores do que 30 MHz. Além disso, os resultados apontam a possibilidade de grandes UFV irradiarem campos ainda mais elevados e em maiores faixas de frequências.

É importante observar que a elevação de campo elétrico só é observada dentro da sala dos conversores, nas arquibancadas, a intensidade de campo elétrico decai abruptamente para o nível de ruído ambiente. Assim, é possível concluir que um SFV é capaz de causar uma elevação significativa do ruído ambiente em uma ampla faixa de frequência, no entanto, na planta estudada neste projeto, esta elevação não é capaz de causar danos a equipamentos ou a pessoas, já que o ruído neste caso é intenso apenas nas salas dos inversores, locais que, de forma geral, só estão presentes os equipamentos que compõe o SFV e, eventualmente, os agentes responsáveis pela manutenção do sistema.

É importante salientar que este resultado não pode ser considerado uma regra geral, já que os cabos desta usina estão confinados em locais de difícil acesso sob a estrutura do estádio, sendo assim, não foi possível fazer medições ao longo de toda a usina. Logo, novas medições devem ser realizadas em usinas com topologias e tamanho diferentes, a fim de traçar um perfil generalizado dos ruídos que são irradiados em sistemas fotovoltaicos.

### 6.3 *Sugestão para Trabalhos Futuros*

Como relatado anteriormente, este trabalho seria realizado em uma usina experimental de grande porte, no entanto, o projeto de construção da usina acabou sendo suspenso. Desta maneira, as medições de campo deste trabalho foram realizadas no estádio de futebol Mineirão. Na seção 4.2.2 foram apresentadas as principais limitações com relação a medição de campos nesta usina. Desta forma, as principais sugestões de continuidade deste trabalho se baseia na realização de medições de campos eletromagnéticos em um sistema sem tais limitações, possibilitando variar diversos parâmetros do SFV. As principais sugestões são descritas a seguir:

Primeiramente, seria interessante fazer uma análise mais detalhada da influência dos cabos no processo de radiação de campos eletromagnéticos. Propõe-se então, a medição para diferentes combinações de tamanhos de cabos CC e CA (ex. cabos CC longos e cabos CA curtos; cabos CC curtos e cabos CA longos).

A natureza modular dos SFV propicia uma ampla gama de possibilidades de instalações, assim, é importante analisar o ruído irradiado para diferentes topologias. Algumas topologias empregam um único conversor central, outras empregam um conversor por *string*, e ainda, existem topologias que empregam um conversor por painel fotovoltaico. Como os conversores é a principal fonte de ruído de uma UFV, é de se esperar que os campos eletromagnéticos irradiados por estes ruídos variem de maneira significativa para diferentes topologias.

Por se tratar da principal fonte de ruído de uma central fotovoltaica, os conversores merecem ser alvos de maior estudo, neste sentido, propõe-se utilizar conversores de diferentes fabricantes, e comparar os campos irradiados pelo sistema sob operação de cada um deles. Este estudo é de suma importância pois os resultados poderá servir como respaldo técnico para exigir um controle de qualidade mais rigoroso para os conversores que entram no país.

Ficou claro que os cabos agem como antenas irradiando parte do ruído que é conduzido através dos mesmos (ruído conduzido). Desta forma, é interessante medir também o ruído conduzido do SFV, com o intuito de encontrar uma função que relaciona os dois tipos de emissão (conduzida e irradiada). Isso seria interessante, pois permitiria implementar um “parâmetro de irradiação” nos modelos de ruído conduzido que são bem consolidados na literatura.

Um melhor entendimento do mecanismo de radiação de campos eletromagnéticos em SFV que pode ser conseguido através da execução das propostas anteriores, permitiria almejar propostas mais ousadas. Uma destas propostas seria modelar parte de um sistema fotovoltaico (painel, cabo, painel e cabo) como uma antena, determinado todas as suas características, como: diretividade, polarização, fator de antena, etc. Desta forma, seria possível prever de maneira eficiente o campo eletromagnético que seria gerado por uma determinada configuração de sistema fotovoltaico. Esta proposta pode gerar resultados muito interessantes e consolidar uma teoria mais generalizada a respeito do assunto, no entanto, se trata de um estudo bem mais complexo e que exigiria uma estrutura completa de engenharia de RF, como: antenas para diferentes faixas de frequência, geradores de RF, câmara anecoica, dentre outros instrumentos.

É importante observar que a maior parte das propostas de continuidade sugeridas neste trabalho, depende de uma maior flexibilidade do SFV sob análise, o que provavelmente só seria possível em uma usina experimental, que possa ter seus parâmetros, topologias e componentes variados.

---

## *Referências Bibliográficas*

---

- [1] EPIA, “Global Market Outlook for Pholtovoltaics 2014 - 2018”, 1 ed., EPIA, 2014.
- [2] EPE, “Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil - Condicionantes e Impactos,” EPE, 2014.
- [3] ANEEL, “Resolução Normativa n. 482,” Brasília, 2012.
- [4] R. M. Silva, “ENERGIA SOLAR NO BRASIL: dos Incentivos aos desafios,” Brasília, 2015.
- [5] M. C. D. Piazza, C. Serporta, G. Tinè and G. Vitale, "Electromagnetic Compatibility Characterization of the DC Side in a Low Power Photovoltaic Plant," in *IEEE International Conference on Industrial Techinology (ICIT)*, Tunisia, 2004.
- [6] R. Araneo, S. Lammens, M. Grossi and S. Bertone, "EMC Issues in High-Power Grid Connected Photovoltaic Plants," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 51, no. 3, pp. 639-648, August 2009.
- [7] N. Henze and T. Degner, "Radio Interference of Photovoltaic Power System," in *16th International Wroclaw Symposium and Exhibition on EMC*, Wroclaw, Poland, 2002..
- [8] M. N. O. Shadiku, “Elementos de Eletromagnetismo”, 3 ed., Porto Alegre/RS: Bookman, 2004.
- [9] J. William H. Hayt and J. A. Buck, *Engineering Electromagnetics*, McGraw-Hill Education, 2001.
- [10] A. J. M. Soares e F. d. C. Silva, *Antenas e Propagação*, Brasilia: UNB, 2003.
- [11] M. S. Assis, “Introdução à Propagação das Ondas Radioelétricas,” em *Encontro Anual em Comunicações, Redes e Criptografia*, Campina Grande, 2012.
- [12] W. V. Junior, “Avaliação do Ambiente Eletromagnético em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde”, Florianópolis: UFSC, 2006.
- [13] C. R. Paul, “Introduction to Electromagnetic Compatibility”, 2 ed., New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

- [14] ABNT, “Equipamento Eletromédico - Norma Colateral: Compatibilidade Eletromagnética - Prescrições e Ensaios,” Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), 1996.
- [15] F. Beltrame, “Interferência Eletromagnética,” em *Seminário de Eletrônica de Potência e Controle - SEPOC 2010*, Santa Maria, 2010.
- [16] L. C. M. Schlichting, “Contribuição ao Estudo da Compatibilidade Eletromagnética Aplicada aos Conversores Estáticos”, Florianópolis: UFSC, 2003.
- [17] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [18] P. Azevedo, *Manual de Antenas, Propagação e Linhas de Transmissão*, CINEL - Centro de Formação Profissional da Indústria Eletrônica .
- [19] J. E. Molder, “An Assesment of the Evidence Relating to Radiofrequency Radiation and Cancer,” *Federation of the Electronics Industry Report*, Outubro 1999.
- [20] ICNIRP, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields,” em *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP)*, 1998.
- [21] ANSI C63-2, “American National Standard for Electromagnetic Noise and Field Strength Instrumentation, 10Hz to 40 GHz – Specifications,” American National Standards Institute (ANSI), 1996.
- [22] IEC 16-1, “Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus,” International Electrotechnical Commission (IEC), 1993.
- [23] IEE Std. 139, “Recommended Practice for the Measurement of Radio Frequency Emission from Industrial, Scientific, and Medical (ISM) Equipment Installed on User’s Premises,” Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, 1993.
- [24] ANSI C63-4, “American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz,” American National Standards Institute (ANSI), 2003.
- [25] NBR IEC/CISPR11, “Limites e Métodos de Medição de Características de Perturbação Eletromagnética em Radiofrequencia de ipamentos Industriais, Científicos e Médicos,” Associação Brasileira de Normas, Brasil, 1995.

- [26] IEC 16-2, "Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods: Methods of Measurement of Disturbance and Immunity," International Electrotechnical Commission (IEC), 1996.
- [27] N. Mohan, T. M. Undeland and W. P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications and Design*, 3 ed., Wiley, 2002.
- [28] H. de Paula; M. V. C. Lisboa; J. F. R. Guilherme; W. C. Boaventura; M. L. R. Chaves, "Novas Contribuições ao Estudo das Sobreensões Transitórias e Correntes de Modo Comum em Sistemas de Acionamentos de Motores por Inversores," *VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, Agosto 2008.
- [29] T. Degner, W. Enders, A. Schülbe e H. Daube, "EMC and Safety Designe for Photovoltaic Systems (ESDEPS)," em *16th European Solar Energy Conference and Exhibition*, Glasgrow, 2000.
- [30] S. Essakiappan, P. Enjeti, R. S. Balog and S. Ahmed, "Analysis and Mitigation of Common Mode Voltages in Photovoltaic Power Systems," *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), IEEE*, pp. 28-35, 2011.
- [31] I. Wu, T. Shinozuka, S. Ishigami e Y. Matsumoto, "Evaluation of Electromagnetic Radiation from the DC Side of a Photovoltaic Power Generation System," *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, vol. 4, nº 2, pp. 73-81, Agosto 2015.
- [32] "Testando Interferências com Analisadores de Espectros de Mão," 2012.
- [33] A. L. S. Filho, *Avaliação do Ruído de Rádio Interferência Proveniente de Linhas de Transmissão de 500 kV*, Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- [34] M. Matos, "Noções Básicas de identificação da qualidade de cabos coaxiais e pares trançados," *TELECO Inteligencia em Telecomunicações*, 2005.
- [35] ABINEE, "Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira," ABINEE, 2012.

---



---

## ANEXOS

---

### A.1 Antenas Utilizadas e Suas Características

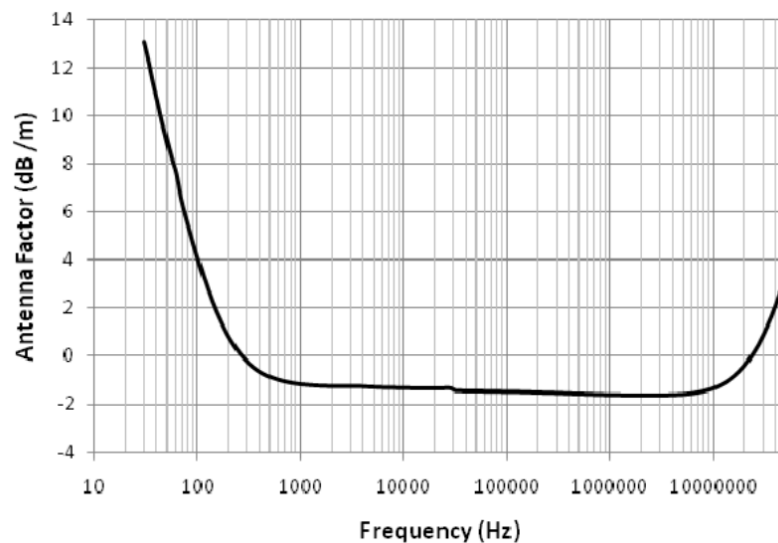
#### A.1.1 Antena Monopolo Ativa 3301C (ETS-Lindgren)

É uma antena tipo *Monopolo* com frequência de operação que se estende de 30 Hz a 50 MHz. Consiste de uma haste ajustável, um contrapeso, a banda larga de alta impedância de entrada do amplificador incorporados na base, que possui um circuito pré-amplificador que lhe traz boa sensibilidade e *FA* quase que constante em toda faixa de frequência de operação. O circuito pré-amplificador é alimentado por baterias seladas recarregáveis [Manual]. Demais características físicas e elétricas estão presentes nas Tabelas e Figuras abaixo.



**Características Físicas e Elétricas da Antena Loop Ativa Blindada 6502**

Frequência Nominal	Impedância	Conectores	Tipo Padrão	Polarização
30 Hz – 50 MHz	50 $\Omega$	BNC (f)	Unidirecional	Linear





### A.1.2 Antena Loop Ativa Blindada 6502 (ETS - Lindgren)

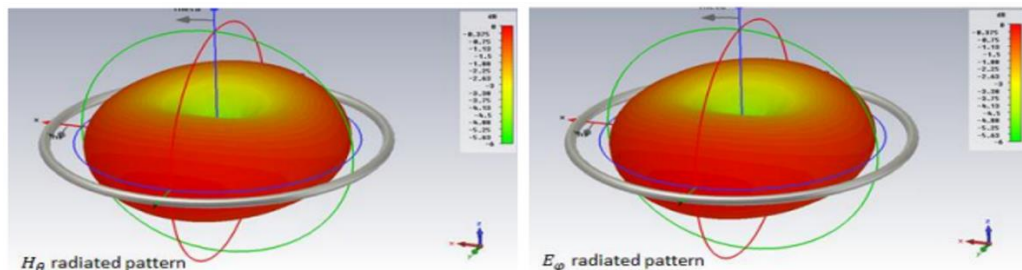
É uma antena tipo *Loop* com frequência de operação que se estende de 9 kHz a 30 MHz. Se trata de uma antena ativa, ou seja, possui um circuito pré-amplificador que lhe traz boa sensibilidade e *FA* quase que constante. O circuito pré-amplificador é alimentado por baterias seladas recarregáveis. Além disso, a antena 6502 é blindada, sendo assim, pouco sensível a objetos que possam estar presentes em suas proximidades. Demais características físicas e elétricas estão presentes nas Tabelas e Figuras abaixo.



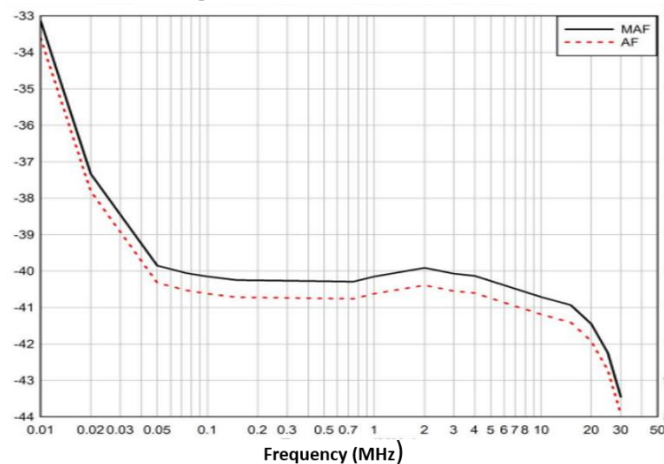
Características Físicas e Elétricas da Antena Loop Ativa Blindada 6502

Frequência Nominal	Impedância	Conectores	Tipo Padrão	Polarização
10 kHz – 30 MHz	50 $\Omega$	BNC (f)	Unidirecional	Linear

Typical Radiated Pattern for an Electrically Small Loop



Magnetic and Electric Antenna Factor



## A.2 Cabo Utilizado e Suas Características

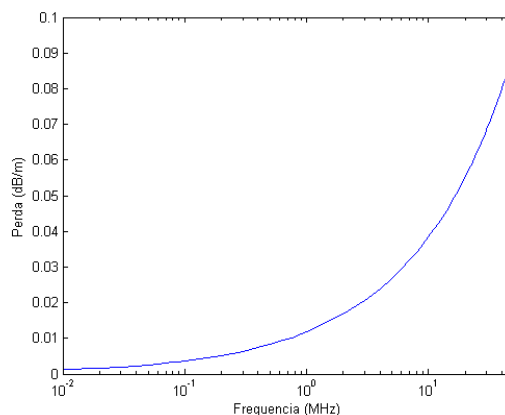
Para medição de emissões irradiadas o analisador de espectro deve ser conectado aos sensores (antenas) através de cabos coaxiais. Estes cabos são formados por um condutor interno, uma isolação, uma blindagem sobre esta isolação, e finalmente a capa externa, conforme é apresentado na Figura 34. O cabo coaxial utilizado neste trabalho foi o RG 58 flexível com impedância de  $50 \Omega$ .



**Figura 34.** Cabo coaxial RG 58 flexível.

O condutor interno tem a função de transmissão do sinal e é feito de fio de cobre duro que lhe garante baixa resistência ôhmica. O dielétrico de polietileno tem a função de isolação entre o condutor interno e externo. O condutor externo de cobre estanhado tem função elétrica tanto na transmissão do sinal como também na blindagem do cabo. A capa externa de PVC serve para proteger o meio de transmissão do ambiente externo [33].

Durante a realização de uma medição, parte do sinal de transmitido pelo cabo se perde. Fisicamente a atenuação depende da frequência do sinal, da construção e do tamanho do cabo. A atenuação é apresentada nas especificações técnicas em gráficos ou tabelas em função da frequência e estes dados devem ser utilizados a fim de corrigir o sinal medido. O gráfico de perdas do cabo em função da frequência pode ser visualizado pela Figura 35.



**Figura 35.** Perdas em um cabo coaxial RG 58.