



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

KEYLA REZENDE CARDOSO

**Análise de interferência eletromagnética
conduzida provocada por inversor de sistema
fotovoltaico operando com baixa geração**

NITERÓI

2020

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
TELECOMUNICAÇÕES

KEYLA REZENDE CARDOSO

**Análise de interferência eletromagnética conduzida
provocada por inversor de sistema fotovoltaico operando com
baixa geração**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador:
Prof. Marcio Zamboti Fortes, Dr.

NITERÓI
2020

(Espaço reservado para a ficha catalográfica)

KEYLA REZENDE CARDOSO

Análise de interferência eletromagnética conduzida provocada por inversor de sistema
fotovoltaico operando com baixa geração

Dissertação de mestrado apresentada ao
Programa de Pós Graduação em Engenharia
Elétrica e de Telecomunicações da
Universidade Federal Fluminense, como
requisito parcial para obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica e de
Telecomunicações. Área de concentração:
Sistemas de Energia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcio Zamboti Fortes – Orientador (UFF)

Prof. D.Sc. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos
(UFF/PPGEET)

Prof. PhD. Teófilo Miguel de Souza (UNESP)

Prof. D.Sc. Gustavo Fernandes Rodrigues (UFSJ)

Niterói

Outubro de 2020

*Dedico este trabalho aos meus
queridos pais, Jonas e Onice.*

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço ao meu soberano e eterno Deus que até aqui me tem sustentado dia após dia, o qual proveu os recursos essenciais à superação de cada desafio defrontado até o presente. Que toda honra seja a Ele.

Agradeço também aos meus pais, Jonas e Onice, e à minha irmã, Kênia, por serem a matriz do que sou hoje, por terem ensinado os princípios que me moldam e por me apoiarem na construção de minha vida e carreira.

Agradeço ao meu noivo, Mateus, por todo carinho, auxílio, compreensão e por estar ao meu lado nesta empreitada.

Agradeço com grande apreço aos meus tios, Néia, Genuino e Juarez que sempre me apoiam nas minhas demandas.

Agradeço à minha família do coração, Carla, Giullie e tia Lu, que com tanto carinho me acolhe nesta cidade.

Agradeço aos meus amigos que são parte de minha caminhada.

Agradeço aos meus professores e meu orientador, M. Zamboti, pelos conhecimentos transmitidos que me possibilitaram chegar até aqui.

Agradeço ao Lablux pela oportunidade de trabalhar e aprender com sua equipe.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense pela oportunidade de fazer parte de seu quadro de alunos nesta pós-graduação.

Agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte da minha caminhada, tornando possível a conclusão de mais esta etapa.

“Quem nos separará do amor de Cristo? A tribulação, ou angústia, ou a perseguição, ou a fome, ou a nudez, ou o perigo, ou a espada? Como está escrito: Por amor de ti somos entregues todo o dia; somos reputados como ovelhas para o matadouro. Mas em todas estas coisas somos mais que vencedores, por aquele que nos amou. Porque estou certo de que nem a morte, nem a vida, nem anjos, nem os principados, nem as potestades, nem o presente, nem o porvir, nem a altura, nem a profundidade, nem alguma outra criatura nos poderá separar do amor de Deus, que está em Cristo Jesus nosso Senhor.” (Romanos 8. 35-39 – Bíblia Sagrada)

Resumo

Nesta dissertação é apresentada uma análise da compatibilidade eletromagnética, quanto ao critério de interferências eletromagnéticas conduzidas, de um modelo de inversor de sistema solar fotovoltaico comercializado no mercado brasileiro, visando avaliar se esse equipamento atende às especificações de normas internacionais, tendo em vista que não existe regulamentação de compatibilidade eletromagnética para tais equipamentos no Brasil, sendo de caráter não compulsório a realização dos ensaios para avaliação desse requisito.

Uma vez que o mecanismo de funcionamento do inversor fotovoltaico envolve o uso de componentes de chaveamento alternando entre estados *on* e *off* em todo o tempo de funcionamento, podendo ocasionar defasagem entre a corrente demandada pela carga e a tensão de alimentação, há possibilidade de ocorrência de distorção entre formas de onda de tensão e/ou corrente. Tais distorções fazem com que o sistema fotovoltaico apresente característica não linear, podendo causar degradação da qualidade da energia entregue para uso final, com ocorrência de perturbações de baixa frequência (distorções harmônicas) e/ou de alta frequência (interferências eletromagnéticas) que, dependendo de sua intensidade, podem afetar o funcionamento de equipamentos e sistemas sensíveis a essas perturbações, tais como sistemas e equipamentos de telecomunicações e equipamentos eletromédicos, por exemplo. Devido a tais fatores, existem regulamentações internacionais que visam limitar os níveis de perturbações eletromagnéticas emitidas por equipamentos potencialmente ruidosos, como é o caso dos inversores de sistemas fotovoltaicos.

Os ensaios para avaliação dos níveis de interferência eletromagnética do inversor foram realizados conforme especificações da norma internacional IEC 61000-6-3, que estabelece limites de emissão em ambientes residenciais, comerciais e industriais leves, e da norma internacional IEC CISPR 16-2-1, que estabelece métodos de medições de emissão e imunidade de perturbações eletromagnéticas conduzidas. Foi avaliada a operação do equipamento para baixo nível de geração de energia, considerando que os sistemas fotovoltaicos estão sujeitos à baixa incidência de radiação solar ao menos duas vezes em um dia de geração. Para estimativa de desempenho do equipamento operando em potências de geração mais elevadas, foi realizada uma simulação no *software* Simulink – MATLAB®.

Os resultados demonstram que, para o equipamento avaliado, os níveis de interferência eletromagnética apresentam-se acima dos limites de EMC especificados internacionalmente, mostrando a importância da certificação, quanto aos parâmetros de EMC,

por parte dos órgãos regulamentadores nacionais, dos inversores fotovoltaicos comercializados nacionalmente.

Palavras-chaves: Compatibilidade eletromagnética, inversor fotovoltaico, sistema fotovoltaico, interferência eletromagnética conduzida, geração distribuída.

Abstract

In this work it is presented an analysis of electromagnetic compatibility, regarding the criterion of conducted electromagnetic interference, of a photovoltaic inverter model commercialized in the Brazilian market, in order to evaluate whether this equipment meets the specifications of international standards, considering that there is no regulation of electromagnetic compatibility for such equipment in Brazil, and it is not compulsory to perform the tests to assess this requirement.

Since the operation mechanism of the photovoltaic inverter involves the use of switching components alternating between on and off states during the operating time, which may cause a lag between the current demanded by the load and the supply voltage, there is a possibility of distortion occurring between voltage and/or current waveforms. Such distortions make the solar photovoltaic system a non-linear feature system, which may cause degradation of the power quality delivered for the final use, causing the occurrence of low frequency disturbances (harmonic distortions) and/or high frequency disturbances (electromagnetic interference) that, depending on their intensity, may affect the functioning of equipment and systems that are sensitive to these disturbances, such as telecommunications and electromedical equipment and systems. Due to these factors, there are international regulations that aim to limit the levels of electromagnetic disturbances emitted by potentially noisy equipment, such as inverters of photovoltaic systems.

The tests to evaluate the inverter's electromagnetic interference levels were performed according to the specifications of the international standard IEC 61000-6-3, which establishes emission limits in residential, commercial and light industrial environments, and the international standard IEC CISPR 16-2-1, which establishes methods for measuring emission and immunity from conducted electromagnetic disturbances. The operation of the equipment for low level of energy generation was evaluated, considering that the photovoltaic systems are subject to low incidence of solar radiation at least twice in one day of generation. To estimate the performance of the equipment operating at higher generation powers, a simulation was performed using the Simulink - MATLAB® software.

The results show that, for the evaluated equipment, the electromagnetic interference levels are above the internationally specified EMC limits, showing the importance of certification, in terms of EMC parameters, by national regulatory agencies, of photovoltaic inverters commercialized in the Brazilian market.

Keywords: Electromagnetic compatibility, photovoltaic inverter, photovoltaic system, conducted electromagnetic interference, distributed generation.

Lista de Figuras

FIGURA 1 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE CUMULATIVA DE GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR NAS REGIÕES DE MAIOR CAPACIDADE INSTALADA (ADAPTADO DE [10])	20
FIGURA 2 - EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE INSTALADA DA GERAÇÃO SOLAR E DA TARIFA MÉDIA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL DE 2010 A 2019.....	21
FIGURA 3 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UMA CÉLULA FOTOVOLTAICA DE SILÍCIO (ADAPTADO DE [4]).....	29
FIGURA 4 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE (A) UM CIRCUITO EQUIVALENTE DE UM INVERSOR COMUTADO PELA REDE, CONSTITUÍDO POR PONTE DE TIRISTORES E; (B) SINAIS DE TENSÃO E SAÍDA DO INVERSOR (ADAPTADO DE [78]).....	31
FIGURA 5 – (A) TOPOLOGIA DE CIRCUITO DE UM INVERSOR MONOFÁSICO DE PONTE COMPLETA E; (B) SINAIS DE REFERÊNCIA E CONTROLE DA ESTRATÉGIA PWM DE CHAVEAMENTO BIPOLAR (ADAPTADO DE [4]).....	33
FIGURA 6 - ILUSTRAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE (ADAPTADO DE [77]).....	33
FIGURA 7 - EXEMPLO DE TOPOLOGIA DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO (SFI) (ADAPTADO DE [81]).....	34
FIGURA 8 – PROPAGAÇÃO DE INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS.....	37
FIGURA 9 – FORMAS DE ACOPLAMENTO DAS INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS. (ADAPTADO DE [84])	37
FIGURA 10 – ACOPLAMENTO INDUTIVO (MAGNÉTICO) ENTRE DOIS CIRCUITOS. (ADAPTADO DE [29])	38
FIGURA 11 - ACOPLAMENTO CAPACITIVO ENTRE DOIS CIRCUITOS. (ADAPTADO DE [29])	39
FIGURA 12 - DIPOLO MAGNÉTICO. (ADAPTADO DE [86])	41
FIGURA 13 – ACOPLAMENTO CONDUTIVO ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIA COMUM DE ATERRAMENTO. (ADAPTADO DE [29]).....	43
FIGURA 14 – ACOPLAMENTO CONDUTIVO ATRAVÉS DE IMPEDÂNCIA COMUM NO SISTEMA DE POTÊNCIA. (ADAPTADO DE [29]).....	43
FIGURA 15 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DETECTOR DE PICO (ADAPTADO DE [101]).....	47
FIGURA 16 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DETECTOR DE QUASE PICO (ADAPTADO DE [101])	47
FIGURA 17 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DETECTOR DE MÉDIA (ADAPTADO DE [101]) ..	47

FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS LIMITES DE INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS CONDUZIDAS PELOS TERMINAIS DE ALIMENTAÇÃO CONFORME NORMA INTERNACIONAL IEC 61000-6-3 [87].....	48
FIGURA 19 – SETOR DE EMC DO LABLUX-UFF, LOCAL DE REALIZAÇÃO DO PRESENTE ESTUDO	50
FIGURA 20 - CONFIGURAÇÕES ADOTADAS PARA OS ENSAIOS DE INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS CONDUZIDAS	51
FIGURA 21 - CURVA DE GERAÇÃO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO LOCALIZADO NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO-RJ	55
FIGURA 22 – MODELAGEM DO INVERSOR FOTOVOLTAICO (ADAPTADO DE [109]).....	56
FIGURA 23 – MODELO DE LISN UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO.....	57
FIGURA 24 – MODELAGEM PARA SIMULAÇÃO DE EMISSÃO DE EMI PELO INVERSOR FOTOVOLTAICO.....	57
FIGURA 25 - RUÍDO AMBIENTE NO TERMINAL DE ALIMENTAÇÃO CC POSITIVO.....	59
FIGURA 26 - RUÍDO AMBIENTE NO TERMINAL DE ALIMENTAÇÃO CC NEGATIVO.....	60
FIGURA 27 - RUÍDO AMBIENTE EM F1 DOS TERMINAIS DE ALIMENTAÇÃO CA	61
FIGURA 28 - RUÍDO AMBIENTE EM F2 DOS TERMINAIS DE ALIMENTAÇÃO CA	62
FIGURA 29 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA MEDIDO NO TERMINAL POSITIVO DA ALIMENTAÇÃO CC	65
FIGURA 30 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA MEDIDO NO TERMINAL NEGATIVO DA ALIMENTAÇÃO CC	66
FIGURA 31 – ESPECTRO DE FREQUÊNCIA MEDIDO NO TERMINAL F1 DA REDE CA.....	68
FIGURA 32 - ESPECTRO DE FREQUÊNCIA MEDIDO NO TERMINAL F2 DA REDE CA	69
FIGURA 33 – SIMULAÇÃO DE INVERSOR FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO ON-GRID OPERANDO COM GERAÇÃO DE 90 W	70
FIGURA 34 - SIMULAÇÃO DE INVERSOR FOTOVOLTAICO MONOFÁSICO ON-GRID OPERANDO COM GERAÇÃO DE 3000 W	72

Lista de Tabelas

TABELA 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE ESTUDOS ABORDANDO INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	26
TABELA 2 – LIMITES DE INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS CONFORME IEC 61000-6-3.....	46
TABELA 3 - PARÂMETROS NOMINAIS DO INVERSOR FOTOVOLTAICO AVALIADO	52
TABELA 4 - PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS MEDIDAS COM DETECTOR DE QUASE PICO NO TERMINAL POSITIVO.....	63
TABELA 5 - PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS MEDIDAS COM DETECTOR DE MÉDIA NO TERMINAL POSITIVO.....	64
TABELA 6 - PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS MEDIDAS COM DETECTOR DE QUASE PICO NO TERMINAL NEGATIVO.....	65
TABELA 7 - PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS MEDIDAS COM DETECTOR DE MÉDIA NO TERMINAL NEGATIVO.....	66
TABELA 8 – PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS MEDIDAS COM DETECTOR DE QUASE PICO EM F1	67
TABELA 9 – PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS MEDIDAS COM DETECTOR DE MÉDIA EM F1.	67
TABELA 10 – PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS MEDIDAS COM DETECTOR DE QUASE PICO EM F2.....	68
TABELA 11 – PERTURBAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS MEDIDAS COM DETECTOR DE MÉDIA EM F2	69
TABELA 12 – RESUMO E PARECER ACERCA DOS RESULTADOS OBTIDOS DAS MEDIÇÕES.....	73

Lista de Siglas e Abreviaturas

- ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica
- AV - *Average*
- BEN – Balanço Energético Nacional
- BJT - *Bipolar Junction Transistor*
- BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento
- CA – Corrente Alternada
- CC – Corrente Contínua
- CENELEC - Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica
- CISPR - *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*
- CLP - Controlador Lógico Programável
- COFINS - Contribuição para Financiamento da Seguridade Social
- CP - Chamada Pública
- DPS - Dispositivos de Proteção contra Surtos
- EMC – *Electromagnetic Compatibility*
- EMI - *Electromagnetic Interference*
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética
- EU – *European Union*
- EUT – *Equipment Under Test*
- FCC - *Federal Communications Commission*
- GD – Geração Distribuída
- IC - *Industry Canada*
- ICMS - Isenção de Imposto Sobre Circulação de Mercadorias
- IEC - *International Electrotechnical Commission*
- IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*
- IPI - Isenção de Imposto sobre Produto Industrializado
- LISN – *Line Impedance Stabilization Network*
- MOSFET - *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*
- PIS - Programas de Integração Social
- PLC – *Power Line Communication*
- PNE – Plano Nacional de Energia
- ProGD - Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica

- PWM - *Pulse Width Modulation*
- QEE – Qualidade de Energia Elétrica
- QP – *Quasi-Peak*
- SCR - *Silicon Controlled Rectifier*
- SFCR - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
- SFI – Sistema Fotovoltaico Isolado
- SPDA - Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas
- THD - *Total Harmonic Distortion*
- TRIAC - *Triode for Alternating Current*
- TUSD - Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
- TUST - Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão

Sumário

1. Introdução	19
1.1. Motivação e Objetivos	19
2. Sistema Solar Fotovoltaico	28
2.1. Módulo Fotovoltaico	28
2.2. Inversor	30
2.3. Dispositivos de Proteção e Controle	34
3. Compatibilidade Eletromagnética (EMC).....	35
3.1. Acoplamento Indutivo	38
3.2. Acoplamento Capacitivo	39
3.3. Acoplamento Eletromagnético	40
3.4. Acoplamento Condutivo.....	42
4. Principais Regulamentações de EMC para Inversores Fotovoltaicos	44
5. Metodologia de Testes	48
5.1. Ambiente, Configuração e Regulamentação Adotada para Testes.....	49
5.2. Parâmetros de Operação do Inversor Avaliado	51
5.3. Equipamentos Utilizados nas Medições de EMI.....	52
5.3.1. Line Impedance Stabilization Network (LISN).....	52
5.3.2. Analisador de espectro.....	53
5.3.3. Pré-seletor	53
5.3.4. Pré-amplificador	53
5.4. Procedimentos Adotados para as Medições de EMI	54
5.5. Simulação de EMI Conduzida Emitida pelo Inversor Fotovoltaico Quando Operando em Sua Potência Nominal máxima de geração (3.000 W)	55
6. Resultados.....	58
6.1. Ruído Ambiente	58
6.2. Emissão de Perturbações Eletromagnéticas pelo Inversor Fotovoltaico	63

6.3. Resultados da Simulação de EMI Conduzida Emitida pelo Inversor Fotovoltaico Modelado	70
6.4. Resumo dos Resultados Obtidos	72
7. Conclusões	74
Sugestões para Trabalhos Futuros.....	76
Referências Bibliográficas	77
Anexo A – Artigo Sobre Efeitos de Perturbações Eletromagnéticas em Sistemas com PLC	89

1.Introdução

1.1. Motivação e Objetivos

O desenvolvimento social, tecnológico e econômico se mostra sobremaneira atrelado ao aumento do consumo de energia elétrica e às mudanças ocorridas no meio ambiente. No ano de 2019 o consumo final de eletricidade no país foi de 545,6 TWh, montante 1,3% superior ao ano anterior [1], [2]. É estimado que ao final de 2030 o consumo de energia elétrica seja da ordem de 859 a 1.245 TWh [3] variando de acordo com os cenários de crescimento econômico vivenciados no país durante os anos precedentes a 2030.

De forma responsiva aos desdobramentos ocorridos na sociedade moderna, os meios de obtenção das diferentes formas de energia tendem a serem adaptados, de maneira a mitigar o esgotamento de recursos não renováveis usados para tal fim, bem como possibilitar o atendimento do aumento da demanda de energia, dada sua fundamental importância ao desenvolvimento humano. Dessa forma, busca-se nos dias atuais promover melhor aproveitamento de fontes alternativas de energia, bem como de novas formas de geração que provoquem menor impacto ambiental e que seja uma opção ao esgotamento de recursos naturais não renováveis, como os combustíveis fósseis, por exemplo.

Destacam-se atualmente, com perspectiva promissora no campo de fontes renováveis de energia, sendo classificadas não mais como fontes alternativas, mas como fontes de energia primária, a energia hidrelétrica, da biomassa, eólica e solar.

Da energia do sol, derivam praticamente todas as formas de energia conhecidas e utilizadas, visto que, é a energia solar que altera o estado físico da água, possibilitando seu represamento e aproveitamento nas usinas hidrelétricas, que provoca o aquecimento das massas de ar dando origem aos ventos, a energia absorvida na fotossíntese dando vida às plantas, das quais provém a energia de biomassa e, também do sol foi proveniente a energia necessária à vida existente em eras passadas, possibilitando a existência de combustíveis fósseis nos dias atuais [4].

Uma das formas de aproveitamento da energia solar que vem ganhando espaço nos últimos anos é a geração de energia solar fotovoltaica. Além de sua abundante disponibilidade natural e da crescente consciência e responsabilidade socioambiental, conforme abordado em [5], o preço da tarifa média da energia elétrica tem aumentado de forma intensa para os brasileiros nos últimos anos, especificamente para as micro, pequenas e médias empresas um

aumento de cerca de 500% foi observado somente no período de 2012 a 2015 [5], [6], com relação à tarifa média residencial, no período de 2012 a 2018, houve um aumento de 60% no valor da tarifa [7], [8]. Houve também, ao longo da última década, uma considerável redução no preço da tecnologia de geração solar fotovoltaica, redução de mais de 75% foi observada [5], [6]. Tais fatores têm contribuído para o crescimento do número de autoprodutores de energia e, conseqüentemente, para a ascensão da fonte solar fotovoltaica no mercado de energia elétrica.

Em nível mundial, a Figura 1 mostra a evolução da capacidade cumulativa instalada de energia solar nas cinco regiões que, de acordo com [9], possuem maior capacidade instalada, para base de dados de 2019, juntamente com a evolução da capacidade instalada no Brasil, para as duas últimas décadas.

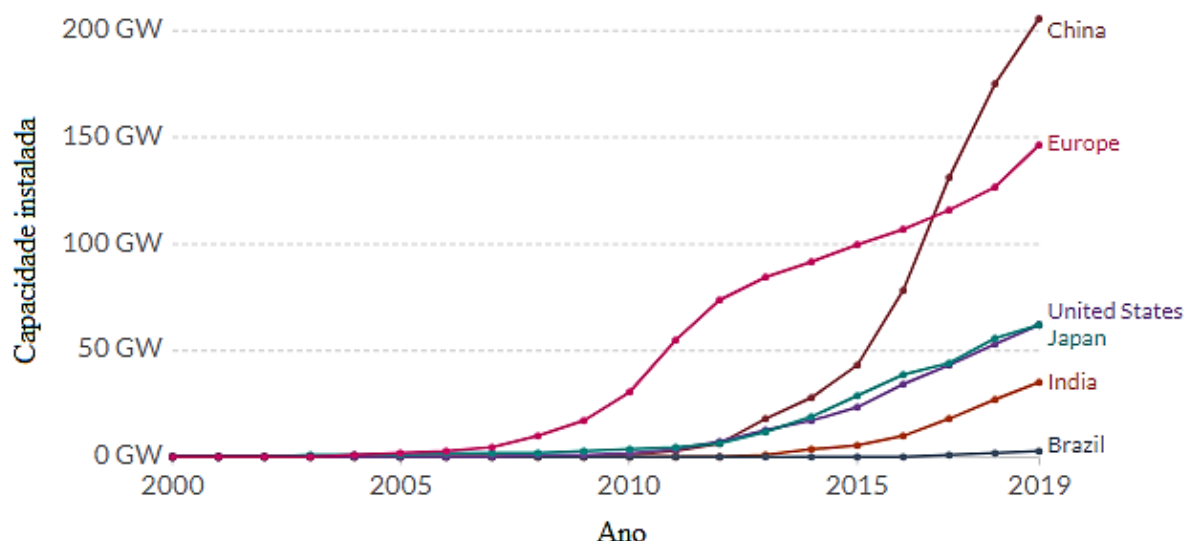


Figura 1 - Evolução da capacidade cumulativa de geração de energia solar nas regiões de maior capacidade instalada (Adaptado de [10])

A fonte solar fotovoltaica está posicionada dentro da micro e mini geração de energia elétrica, que, no Brasil, tem atualmente seu crescimento incentivado por ações regulatórias, como por exemplo, a ação que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de pequeno porte, conhecidos como *net metering* [11], aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através da Resolução Normativa 482, de 2012, que regulamenta a micro e mini geração distribuída e o sistema de compensação de energia elétrica [12]. O gráfico apresentado na Figura 2 mostra, conforme dados apresentados em [1], [2], [7], [8], [11], [13], [14], a evolução da capacidade instalada da geração solar desde o ano de 2010, bem como a evolução da tarifa média da energia

elétrica para os brasileiros no mesmo período, destacando a evolução da fonte solar fotovoltaica desde a aprovação da Resolução Normativa 482 [12], e englobando também o período de considerável aumento no valor da energia elétrica para os brasileiros (2012 a 2019), bem como, parte do período de queda no preço da tecnologia solar fotovoltaica, fatores que alavancaram a capacidade instalada a partir do ano de 2017.

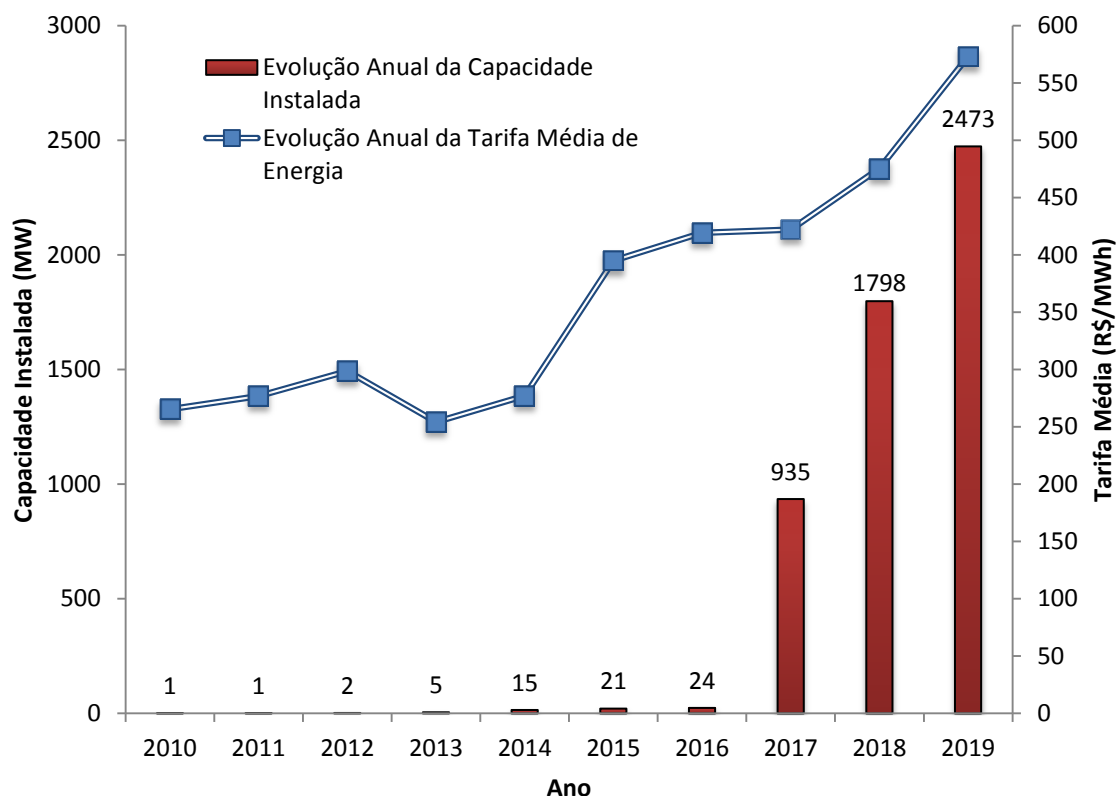


Figura 2 - Evolução da capacidade instalada da geração solar e da tarifa média de energia elétrica no Brasil de 2010 a 2019

Conforme apresentado no Balanço Energético Nacional de 2020 (BEN 2020), com ano base de 2019, a micro e mini geração distribuída atingiu, no referido período, 2.226 GWh, com potência instalada de 2.162 MW, tendo destaque para a energia solar fotovoltaica, que contribuiu com 1.659 GWh de geração e, 1.992 MW de potência instalada [2], apresentando participação de 1,0% na oferta interna de energia elétrica por fonte no ano de 2019 [2] contra 0,54% no ano anterior [1] e 0,01% no ano de 2016 [15]. Tais dados possibilitam a observância do crescimento da participação da energia solar fotovoltaica na matriz energética nacional que, apesar de ainda pouco significativa frente a outras fontes de geração, como a hidráulica que representa uma parcela de 64,9% da oferta interna de energia elétrica por fonte [2], tem considerável potencial de crescimento no país, dada a existência de características naturais favoráveis à geração solar fotovoltaica.

Ainda com diferentes características climáticas observadas no Brasil, há um nível anual de irradiação global com boa uniformidade e médias relativamente altas em todo país, com valores na faixa de 1.500 a 2.500 kWh/m² em qualquer região do território nacional, faixa superior às encontradas na maioria dos países da União Europeia, tais como Alemanha (900-1.250 kWh/m²), França (900-1.650 kWh/m²) e Espanha (1.200-1.850 kWh/m²), países com fortes incentivos governamentais e projetos para aproveitamento de recursos solares [16].

Visando o aproveitamento de tais características favoráveis à geração solar fotovoltaica, o Brasil também conta atualmente com alguns incentivos governamentais, tais como o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), Chamada Pública (CP) ANEEL, Isenção de Imposto sobre Produto Industrializado (IPI), Isenção de Imposto Sobre Circulação de Mercadorias (ICMS), desconto na Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão/Distribuição (TUST/TUSD), Isenção na Contribuição para Financiamento da Seguridade Social (COFINS) e Programas de Integração Social (PIS) na Geração Distribuída, redução do Imposto de Importação, inclusão no programa “Mais Alimentos”, Apoio BNDES e Plano Inova Energia [17].

Além de ser uma tecnologia de geração limpa, a energia solar pode ser implementada desde em pequenos a grandes sistemas fotovoltaicos, por essa razão, esse tipo de geração pode ser encontrado em uma gama de instalações residenciais, bem como, em fazendas solares de grande porte.

Por conta de tais desdobramentos na área de geração solar fotovoltaica, é esperado que a adoção de tal sistema se torne cada vez mais comum e que essa tecnologia permaneça em consolidação no país nos anos vindouros. Os estudos do Plano Nacional de Energia – PNE 2050, que se encontra em estágio de elaboração pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estimam uma parcela de 18% dos domicílios de 2050 com geração solar fotovoltaica, representando um total de 13% de todo o consumo residencial [17].

Existem duas classificações principais para um sistema solar fotovoltaico, de acordo com a configuração adotada, podendo ser do tipo isolado ou conectado à rede.

O sistema solar fotovoltaico isolado (*Off-Grid*) consiste em um sistema que não possui conexão a uma rede de distribuição de energia de uma concessionária, podendo funcionar juntamente com outros sistemas de geração, como um sistema de geração eólica, ou a combustível fóssil por exemplo, possibilitando assim o atendimento da demanda de energia mesmo com a variação anual de irradiação solar [18], sendo classificados como sistemas híbridos. Os sistemas isolados podem funcionar também de forma autônoma, ou seja, sem a contribuição de outro sistema de geração, podendo operar com armazenamento da energia

gerada em bancos de bateria, para uso em períodos sem ou com pouca geração (período noturno e dias nublados), ou até mesmo sem armazenamento, funcionando apenas durante períodos com incidência de irradiação solar (sistemas limitados a usos específicos, como sistemas de bombeamento de água, por exemplo, levando em conta o potencial de geração solar da região) [4], [19].

No sistema solar fotovoltaico conectado à rede (*On-Grid*), a rede elétrica da concessionária conectada absorve a energia excedente do sistema, ou seja, a energia não consumida imediatamente pelas cargas locais, permitindo, com essa energia injetada pelo sistema fotovoltaico, a compensação de energia consumida pelo autoprodutor em períodos sem geração. Tais sistemas não possuem usualmente processo de armazenamento da energia gerada, sendo, portanto mais baratos se comparados aos sistemas isolados com armazenamento [4], [19].

É esperado para os próximos anos, frente a essas novas tendências na matriz energética nacional, advindas da disseminação e consolidação da geração solar fotovoltaica, um aumento no número de autoprodutores de energia elétrica independentes de concessionárias locais, bem como um aumento das conexões de Geração Distribuída (GD) às redes de energia elétrica das concessionárias no país, situação que já é realidade inclusive nos dias atuais, onde se observa um gradativo aumento de autoprodutores de energia conectados às redes elétricas.

Com as novas tendências da matriz energética nacional, envolvendo a GD solar fotovoltaica, entram em pauta novas questões que envolvem a transmissão e distribuição da energia, seja em um sistema conectado à rede, ou até mesmo a distribuição da energia gerada em um sistema isolado, conectado apenas a cargas locais.

Um sistema solar fotovoltaico é composto basicamente pelos módulos fotovoltaicos responsáveis pela conversão da energia luminosa em energia elétrica, os inversores que convertem a energia gerada em Corrente Contínua (CC) para energia em corrente alternada (CA) e, dispositivos de proteção, controle e medição da energia gerada, apropriados às dimensões e capacidade do sistema, além de baterias para sistemas que operam com armazenamento da energia gerada.

O mecanismo de funcionamento do inversor do sistema solar fotovoltaico, envolve o uso de componentes de chaveamento alternando entre estados *on* e *off* em todo o tempo de funcionamento, tal aspecto de operação do inversor faz com que o sistema solar fotovoltaico seja de característica não linear, ou seja, apresentando defasagem entre a corrente demandada pela carga e a tensão de alimentação, sistema esse capaz de distorcer as formas de onda de

tensão e/ou corrente, podendo trazer uma degradação da qualidade da energia entregue para uso final, devido à inserção de harmônicas. Com isso, a disseminação da GD solar fotovoltaica traz consigo um aumento do número de equipamentos de característica não linear conectados ao sistema de transmissão/ distribuição de energia e, conseqüentemente, algum impacto à qualidade de energia (QEE).

No caso de um sistema *on grid* a preocupação quanto à QEE é mais presente, principalmente por parte da concessionária, que deve se preocupar com seu sistema de proteção e com os novos níveis de distorções harmônicas presentes na rede. No entanto, os problemas da QEE não se limitam apenas à concessionária que recebe a conexão de novos equipamentos de características não lineares, mas a todos os sistemas que possuem equipamentos sensíveis a distorções harmônicas, alimentados pela rede conectada ao sistema solar fotovoltaico, englobando também os sistemas isolados da rede de uma concessionária.

O inversor do sistema solar fotovoltaico provoca não somente as distorções harmônicas na frequência de operação dos sistemas de energia elétrica, classificada como baixa frequência (60 Hz), como também provoca perturbações em altas frequências, perturbações essas mais comumente conhecidas como interferências eletromagnéticas ou, do inglês, *Electromagnetic Interference* (EMI), existentes devido às altas frequências de chaveamento e elementos parasitas existentes em todo o sistema [20]. Os efeitos dessas interferências eletromagnéticas podem, dependendo da intensidade das perturbações, afetar o funcionamento de equipamentos sensíveis, que operem na mesma faixa de frequência das interferências geradas. Atualmente, são diversos os equipamentos e sistemas susceptíveis a sofrer os impactos negativos de ambientes/redes de energia com espectro característico demasiadamente ruidoso, tais como equipamentos eletromédicos, de telecomunicações e os diversos equipamentos eletrônicos que estão cada vez mais presentes em conexões às redes de energia e de telecomunicações. Alguns desses problemas e relatos de interferências eletromagnéticas são abordados em trabalhos como [21]–[28].

Além da massificação do uso de dispositivos eletrônicos nos dias atuais, o uso de circuitos integrados em larga escala tem contribuído para a redução do tamanho dos equipamentos e dispositivos eletrônicos e, à medida que se tornam menores e mais sofisticados, são cada vez mais agrupados em menores espaços, aumentando assim a probabilidade de interferências eletromagnéticas. Com isso, é necessário que um equipamento eletroeletrônico esteja apto a funcionar não somente nas condições ideais de um laboratório, mas precisa ser projetado de maneira a também operar satisfatoriamente em ambientes onde podem estar presentes outros equipamentos eletroeletrônicos que sejam sensíveis a

interferências eletromagnéticas e/ou que podem também estar gerando determinados níveis de interferência na rede de energia ou no ambiente onde operam. Dessa forma, os equipamentos eletroeletrônicos precisam apresentar compatibilidade eletromagnética ou, do inglês, *Electromagnetic Compatibility* (EMC) [29].

EMC consiste na capacidade que um sistema eletrônico apresenta de funcionar satisfatoriamente em seu local de operação, sem que provoque, ou esteja susceptível a sofrer interferências eletromagnéticas capazes de ocasionar mau funcionamento dos equipamentos operando conjuntamente em um mesmo ambiente ou circuito [29]. Portanto, para que um equipamento eletroeletrônico opere satisfatoriamente em conjunto com outros equipamentos também eletroeletrônicos, precisa apresentar em seu projeto mecanismos de atenuação e filtragem de interferências eletromagnéticas, bem como atender a alguns limites de emissão dessas interferências, a fim de que também não venha a interferir no funcionamento de outros equipamentos.

Atualmente existem diversos documentos de diferentes regiões do mundo que visam regulamentar limites máximos de interferências eletromagnéticas para equipamentos potencialmente ruidosos, bem como requisitos mínimos de imunidade para equipamentos sensíveis a tais interferências. Dessa forma, existem órgãos responsáveis pelas diferentes regulamentações de compatibilidade eletromagnética de acordo com cada país, tais como *Federal Communications Commission* (FCC), nos Estados Unidos, *Industry Canada* (IC), no Canadá, *European Union* (EU), na União Europeia, dentre outros. Além dos órgãos regulamentadores de EMC em cada país, também existem padrões internacionais de EMC, que visam estabelecer especificações que permitam aos fabricantes projetarem seus equipamentos de forma a serem aceitáveis mundialmente. O veículo mais provável a estabelecer tal harmonização entre padrões de diferentes regiões são as normas de EMC da União Europeia, baseadas nos padrões do *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques* (CISPR), que determinam métodos de medição e limites de interferências de radiofrequências. Quando adotadas pelos governos, as normas CISPR se tornam padrões nacionais [29].

Uma revisão de dados bibliográficos realizada para o tema de interferência eletromagnética relacionada a inversores fotovoltaicos, para o período de 2000 a 2020 (período de ocorrência de grande desenvolvimento da tecnologia e sua utilização), aponta o nível de preocupação da comunidade acadêmico-científica com tal questão, no período de avanço da tecnologia de geração fotovoltaica. A Tabela 1 mostra os resultados da revisão bibliográfica feita a partir da base de dados Scopus, da Elsevier, totalizando 45 trabalhos

científicos publicados em revistas, jornais, anais de congressos/conferências e seções de livros [30], [31].

Tabela 1 – Revisão bibliográfica de estudos abordando interferências eletromagnéticas em sistemas fotovoltaicos

Revista/Jornal/Conferência/Simpósio/Seção de livro	Referência
Advances in Intelligent Systems and Computing	[32]
Proceedings of the 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, EIConRus 2020	[33]
2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2018 - Proceedings	[34]
2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2019 ECCE Europe	[35]
IEEE Access	[36]
Proceedings: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society	[37]
2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)	[38]
2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC/APEMC 2018	[39], [40]
Materials	[41]
Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC	[42]
2017 International Automatic Control Conference, CACS 2017	[43]
2017 52nd International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2017	[44]
IEEE Transactions on Power Delivery	[45]
IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON	[20]
2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2016 ECCE Europe	[46]
2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility, APEMC 2016	[47]
Proceedings - 2016 51st International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2016	[48]
IET Conference Publications	[49]
Journal of Electrical Engineering	[50]
Journal of Power Electronics	[51]
2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference, COBEP/SPEC 2016	[52], [53]
2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2015	[54]
2014 International Conference on Information Communication and Embedded Systems, ICICES 2014	[55]
IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON	[56]

Journal of Power Electronics	[57]
Journal of Electrical Engineering	[58]
IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility	[59]
IEEE Transactions on Power Electronics	[60]
Advanced Materials Research	[61]
Renewable Energy and Power Quality Journal	[62]
2013 Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2013	[63, p. 2011]
2013 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems, AMPS 2013 - Proceedings	[64]
2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2012	[65]
IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)	[66]
IEEE Transactions on Magnetics	[67]
2010 International Conference on Power System Technology: Technological Innovations Making Power Grid Smarter, POWERCON2010	[68]
PQ2010: 7th International Conference - 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability, Conference Proceedings	[69]
Renewable and Sustainable Energy Reviews	[70]
IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility	[71]
Proceedings of the 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC Zurich 2009	[72]
Xinan Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Southwest Jiaotong University	[73]
IEEE Transactions on Energy Conversion	[74]
Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Industrial Technology	[75]

Considerando os desdobramentos levantados na área de GD solar fotovoltaica e as questões relacionadas à EMC, este trabalho apresenta um estudo da compatibilidade eletromagnética, em termos de EMI conduzida, de um inversor de sistema fotovoltaico comercializado nacionalmente, visto que no Brasil a realização de testes de EMC não é de caráter compulsório para esses equipamentos, ficando a cargo do próprio fabricante ou importador a verificação do atendimento ou não aos padrões internacionais de EMC.

Além do presente capítulo introdutório, o prosseguimento deste trabalho está dividido em uma abordagem mais detalhada sobre o sistema solar fotovoltaico e seu funcionamento, no capítulo 2, seguido de uma apresentação sobre as principais questões tratadas na área de EMC, no capítulo 3, um levantamento das principais regulamentações de EMC para inversor solar fotovoltaico no mundo, no capítulo 4; a metodologia de testes adotada para a análise realizada neste trabalho, no capítulo 5, os resultados obtidos, no capítulo 6, as conclusões obtidas acerca deste estudo, no capítulo 7 e, por fim, são apresentadas algumas sugestões de trabalhos futuros na área de estudo aqui abordada.

2. Sistema Solar Fotovoltaico

Conforme mencionado no capítulo 1 deste trabalho, um sistema de geração solar fotovoltaica é composto basicamente pelos módulos fotovoltaicos, inversores e dispositivos de proteção e de medição. No presente capítulo, serão abordados mais detalhadamente tais componentes do sistema solar fotovoltaico.

2.1. Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico constitui-se da associação série-paralelo de células fotovoltaicas. Uma vez que as células fotovoltaicas comuns produzem menos de 3 W a aproximadamente 0,5 V em CC, faz-se necessária a constituição do módulo fotovoltaico a partir da associação de várias dessas células, de forma a se obter uma geração suficiente para atender a aplicações de alta potência [76].

A célula fotovoltaica é um dispositivo de junção *pn* ou barreira *Schottky* e, normalmente feita utilizando duas cadeias produtivas: silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si), cadeias essas que representam mais de 85% do mercado, uma vez que, o silício é considerado uma tecnologia consolidada e confiável, possuindo a melhor eficiência comercialmente [4].

O material que constitui uma célula fotovoltaica é denominado de material semicondutor, caracterizado por possuir uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução, sem elétrons, na temperatura do zero absoluto (0 K), de forma que o material semicondutor se comporta como um isolante na temperatura do zero absoluto [4].

A separação entre as duas bandas de energia (valência e condução) de um material semicondutor é denominada de banda proibida e pode atingir até 3 eV. A condutividade elétrica nesse material se eleva com a temperatura, onde ocorre a excitação térmica de elétrons da banda de valência para a banda de condução, de forma que, na banda de valência surgem as lacunas, que constituem portadores de cargas positivas. Dessa forma, para temperaturas superiores a 0 K, o material semicondutor apresenta um número de elétrons ocupando a banda de condução e o mesmo número de lacunas na banda de valência [4].

Quando a célula recebe a incidência de irradiação solar, pares elétron-lacuna são produzidos pela interação dos fótons com os átomos da célula. Dada a incidência de luz em um material, ela pode ser refletida, transmitida ou absorvida, sendo que, a absorção de luz é a conversão da energia contida no fóton incidente em outra forma de energia, geralmente calor,

entretanto, alguns materiais apresentam propriedades que os tornam capazes de converter a energia do fóton incidente, dada conforme Equação 1, em energia elétrica, são esses os materiais semicondutores [76]. Quando um fóton é absorvido pelo material semicondutor, há uma interação entre esse fóton e um átomo do material e, a energia do fóton é liberada para um elétron do material. Dependendo da energia do fóton, um elétron pode passar a um estado de energia mais elevado dentro de um átomo ou pode ser liberado do mesmo [76].

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} (\text{joules}) \quad (1)$$

A Figura 3 mostra uma representação esquemática de uma célula fotovoltaica de silício, material semicondutor mais usado na fabricação de células fotovoltaicas, com destaque para as regiões tipo *p* e *n*, onde se forma a junção *pn* e o campo elétrico.

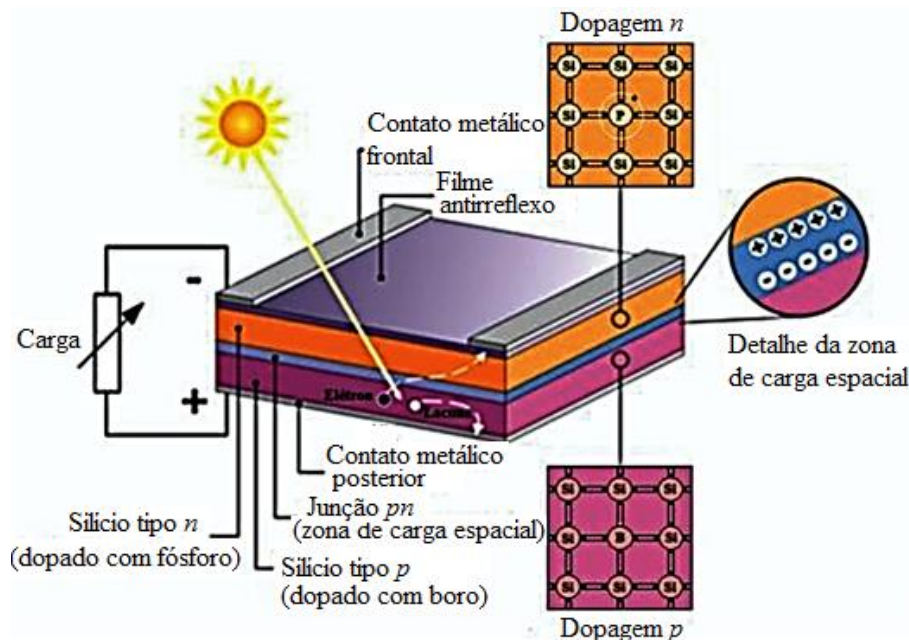


Figura 3 - Representação esquemática de uma célula fotovoltaica de silício (Adaptado de [4])

Os pares elétron-lacuna fotogerados podem mover-se dentro do material, aumentando sua condutividade elétrica. Para aproveitamento da corrente e tensão elétrica, faz-se necessária a aplicação de um campo elétrico, com o objetivo de separar os portadores, o que é feito através da junção *pn*, construída por meio de dopagens no material, que permitem a formação de uma região com cargas elétricas positivas no lado *n* e uma região com cargas elétricas negativas no lado *p*, denominada zona de carga espacial ou de depleção, onde praticamente não existem portadores (*n* ou *p*); o excesso de cargas positivas e negativas na junção das regiões *n* e *p* produz um campo elétrico que impede a passagem de elétrons do lado *n* para o lado *p*, e a passagem de lacunas da região *p* para a *n*.

Quando o material semicondutor com uma junção pn é exposto a fótons com energia superior àquela existente na banda proibida, ocorre a fotogeração de pares elétron-lacuna, quando gerados na região de carga espacial, tais portadores são separados pelo campo elétrico, sendo os elétrons acelerados para o lado n e as lacunas para o lado p , gerando assim uma corrente elétrica através da junção, conforme é descrito em [4].

2.2. Inversor

O inversor é um dispositivo eletrônico que recebe energia elétrica em corrente contínua e a converte em energia elétrica de corrente alternada. No caso de um sistema solar fotovoltaico, a energia elétrica é gerada em CC na célula fotovoltaica, tornando essencial o uso do inversor para converter essa energia em CA para atendimento da maioria dos equipamentos e dispositivos alimentados pelas redes de energia elétrica, uma vez que, geralmente, possuem funcionamento em CA.

Os inversores podem ser divididos em duas categorias, de acordo com o tipo de aplicação: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCRs) e Sistemas Fotovoltaicos Isolados (SFIs). Os princípios gerais de operação são os mesmos para as duas categorias, no entanto, os inversores para aplicação em SFCRs apresentam características específicas que visam ao atendimento das exigências das concessionárias de distribuição no que diz respeito à segurança e qualidade da energia injetada pelo sistema fotovoltaico na rede [4]. Além disso, a escolha do inversor a ser aplicado a um sistema fotovoltaico não está unicamente associada ao tipo do sistema, mas também às características específicas demandadas pela carga e à eficiência do inversor.

O desempenho de um inversor é geralmente caracterizado em termos da potência nominal, capacidade de surto, eficiência e distorção harmônica [76]. A escolha do inversor é etapa importante de um projeto de implantação de um sistema solar fotovoltaico, uma vez que, a falha desse dispositivo é uma das principais causas de falha no sistema [76]; além disso, o inversor representa cerca de 5 a 10% do custo total de sistemas conectados à rede em escala comercial e cerca de 15 a 25% do custo total de sistemas isolados residenciais [77].

Para permitir a conversão de tensão CC em tensão CA, são utilizados no projeto de um inversor dispositivos semicondutores de potência funcionando como chaves eletrônicas controláveis que se utilizam de um sinal de controle para alternar entre os estados de condução e bloqueio [4].

Os primeiros inversores utilizavam, normalmente, os tiristores *Silicon Controlled Rectifier* (SCR) e *Triode for Alternating Current* (TRIAC) para chaveamento, esses

dispositivos semicondutores possuem controle através da corrente de referência (corrente no *gate*) ou através da inversão de polaridade entre anodo e catodo, fazendo com que a alternância entre estado de condução e bloqueio seja controlada pelo circuito de potência, o que os classifica como **Inversores Comutados pela Rede** [4].

Os inversores comutados pela rede, com princípio de funcionamento adotando tiristores, não apresentam bloqueio controlado, uma vez que os tiristores apenas controlam o disparo através de um pulso de corrente no terminal do *gate*, por essa razão, é utilizada a tensão nos terminais de alimentação da rede para controlar o bloqueio (comutação) do tiristor [4], [78].

A Figura 4 (a) mostra um circuito equivalente de um inversor comutado pela rede, onde cada par de tiristores da ponte comuta a energia em CC primeiro em uma direção e depois em outra a 60 Hz (frequência da rede CA). No momento de comutação a energia é armazenada em um capacitor eletrolítico conectado em paralelo com a entrada CC. Conforme mostra a Figura 4 (b), são geradas ondas quadradas de corrente, por essa características, esses inversores são também chamados de inversores de onda quadrada; essa diferença entre a forma de onda gerada pelo inversor e a forma de onda da rede CA ocasiona o surgimento de elevadas componentes harmônicas, comprometendo assim a QEE e trazendo a necessidade de maiores investimentos em filtros de conteúdo harmônico [78].

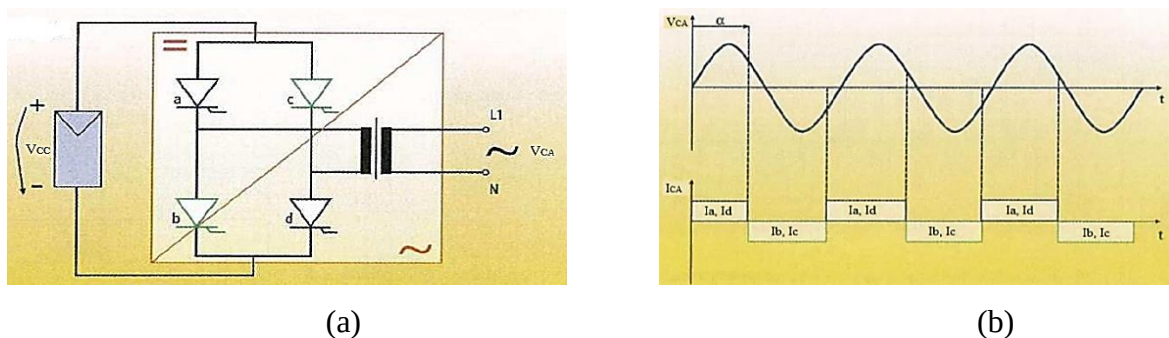


Figura 4 – Representação esquemática de (a) um circuito equivalente de um inversor comutado pela rede, constituído por ponte de tiristores e; (b) sinais de tensão e saída do inversor (Adaptado de [78])

Atualmente, com avanços ocorridos na eletrônica de potência, existem novos dispositivos de chaveamento, tais como o *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (MOSFET), o *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) e o *Bipolar Junction Transistor* (BJT), que permitem a alternância entre os estados de condução e bloqueio em qualquer instante do ciclo, através de um terminal de controle, não dependendo para tanto do circuito de potência, o que classifica os inversores que adotam tais componentes de chaveamento

como **Inversores Autocomutados** [4], desta forma, os tiristores são usados atualmente somente para sistemas com inversores de elevado nível de potência, na faixa de 100 kW [18].

Para os modelos de inversores de sistemas fotovoltaicos que não operam a elevados níveis de potência, há normalmente uma ponte de transistores feita usualmente com MOSFETs, IGBTs ou BJTs, responsável pela alternância entre os estados de condução e bloqueio, através de chaveamentos que ocorrem normalmente a altas frequências, na faixa de 2 a 20 kHz [77], esses dispositivos de chaveamento utilizam o método de modulação por largura de pulso, do inglês *Pulse Width Modulation* (PWM), possibilitando uma boa reprodução de uma onda senoidal [78].

O método de controle PWM se baseia no acionamento dos dispositivos de chaveamento a uma frequência constante, a dezenas ou centenas de kHz, e o ciclo de trabalho variando durante cada semiciclo, de forma proporcional ao sinal de referência fornecido (forma de onda senoidal). Onde pulsos estreitos são aplicados quando a amplitude da senoide de referência é baixa e vão se alargando à medida que o valor de referência aumenta [4], [79].

Existem diferentes estratégias de PWM, uma delas é o chaveamento bipolar, onde o controle de chaveamento se dá pela comparação entre duas formas de onda geradas internamente no inversor, uma delas é a tensão de referência, uma senoide com frequência de 60 Hz (frequência da rede CA), e a outra é um sinal de onda triangular e frequência superior (na faixa de kHz). Os parâmetros de saída do inversor são então controlados pelas relações de amplitudes e frequências dessas duas ondas [4], [80].

A Figura 5 (a) ilustra uma topologia de circuito de um inversor de ponte completa monofásico, se nessa topologia for utilizada a estratégia PWM de chaveamento bipolar, no momento em que a tensão de referência (senoide de 60 Hz) alcança valor superior ao da onda triangular, as chaves S1 e S4 são acionadas enquanto S2 e S3 são postas em estado de bloqueio, aplicando uma tensão positiva à carga, quando a tensão de referência é inferior à da onda triangular o estado de condução e bloqueio dos pares de chaves é então invertido e a carga recebe tensão negativa, conforme representado na Figura 5 (b), onde, $V_{CA\ ref}$ representa a tensão senoidal de referência e V_{tri} , o sinal de onda triangular. [4].

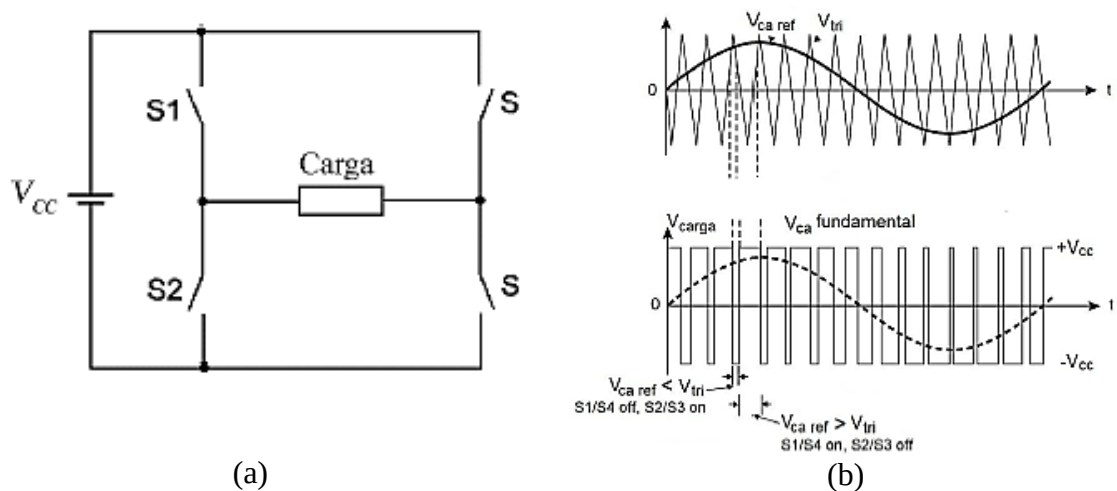


Figura 5 – (a) Topologia de circuito de um inversor monofásico de ponte completa e; (b) sinais de referência e controle da estratégia PWM de chaveamento bipolar (Adaptado de [4])

Dessa forma, a tecnologia PWM possibilita a obtenção de um sinal de saída praticamente senoidal, favorecendo a redução de componentes harmônicas e, conseqüentemente, apresenta uma menor taxa de distorção harmônica total, do inglês, *Total Harmonic Distortion* (THD). No entanto, as elevadas frequências de chaveamento (10 – 100 kHz) trazem a necessidade de consideração da EMC no projeto do inversor [4], [18], [77], [78], [81], que deve apresentar-se devidamente imune a sofrer danos de interferências externas, bem como, não deve gerar interferências nocivas a outros sistemas operando nas proximidades de seu local de instalação.

Uma ilustração esquemática de um sistema fotovoltaico conectado à rede é apresentada na Figura 6, onde, o arranjo contendo os módulos fotovoltaicos fornecendo energia em CC é conectado ao inversor através de uma chave, da mesma forma, a energia convertida em CA pelo inversor também chega à rede através de uma chave, cujo objetivo é garantir maior segurança em operações de manutenção e reparos no sistema [77].

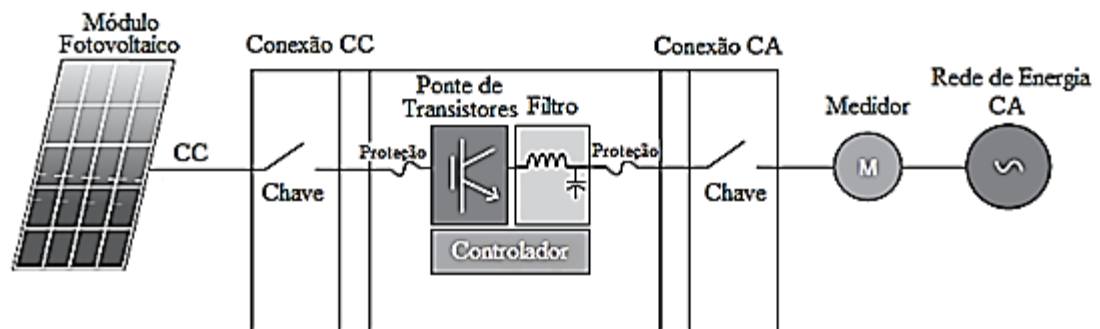


Figura 6 - Ilustração esquemática de um sistema fotovoltaico conectado à rede (Adaptado de [77])

O filtro anexo ao circuito do inversor tem por objetivo filtrar componentes harmônicas de corrente, que são provenientes do chaveamento da ponte de transistores e são de frequências diferentes da fundamental (60 Hz). O controlador representa um componente chave do inversor, uma vez que, tem por finalidade a implementação do algoritmo de controle dos transistores, dos requerimentos de conexão à rede, executa medição de entrada e saída do sistema e executa o processo de comunicação com o usuário e monitoramento/controla geral do sistema; no caso de SFIs, o controlador executa a função de controle do carregamento da bateria [77].

Para um sistema fotovoltaico não conectado à rede, é apresentado na Figura 7 um exemplo de topologia que pode ser aplicado, sendo que, a energia CC gerada pelos módulos fotovoltaicos pode não precisar de conversão para CA, se esta for destinada à alimentação de cargas CC, caso contrário, o uso de um inversor faz-se necessário também nesta topologia, para alimentação de cargas CA.

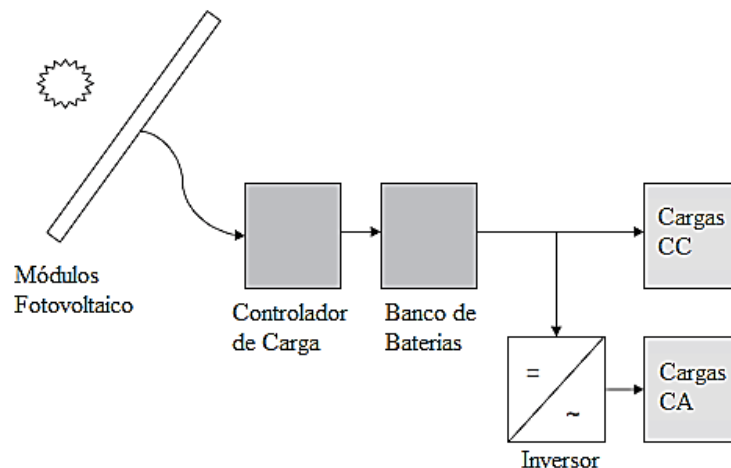


Figura 7 - Exemplo de topologia de um sistema fotovoltaico isolado (SFI) (Adaptado de [81])

Apesar de não conectado à rede, as precauções quanto à QEE e EMC não devem ser tratadas como menos importantes que para o SFCR, uma vez que deve ser levada em consideração a possibilidade de alimentação de equipamentos sensíveis ou proximidade dos mesmos ao SFI.

2.3. Dispositivos de Proteção e Controle

Além dos módulos fotovoltaicos e do inversor, também compõem os sistemas de geração fotovoltaica os dispositivos auxiliares que têm função de controle, medição, supervisão do sistema, aquisição e armazenamento de dados. Em um SFCR, por exemplo, uma falha pode vir a comprometer a operação e segurança da rede de fornecimento de energia

à qual está conectado; existem então dispositivos auxiliares visando minimizar a ocorrência de falhas, bem como, promover a comunicação do sistema com o operador quando da ocorrência dessas, a fim de que a solução de problemas no sistema seja otimizada [4].

Quanto à proteção de sistemas fotovoltaicos, alguns dispositivos comuns e essenciais são os dispositivos anti-ilhamento, já inseridos na maioria dos inversores para SFCR, Dispositivos de Proteção contra Surtos (DPS), sistemas de aterramento e Sistemas de Proteção contra Descargas Atmosféricas (SPDA), dentre outros que podem ser adicionados aos sistemas fotovoltaicos de forma a garantir maior segurança e confiabilidade do mesmo [4].

Sistemas de supervisão, controle, aquisição e armazenamento de dados também são implementados a sistemas fotovoltaicos, podendo tomar decisões e atuar automaticamente, através de Controladores Lógico Programáveis (CLPs), de forma a otimizar a operação, ajustar pontos de regulação do sistema, elevando assim a eficiência global do mesmo além de facilitar o monitoramento das instalações [4].

3. Compatibilidade Eletromagnética (EMC)

Conforme comentado no capítulo 1 deste trabalho, a compatibilidade eletromagnética consiste na capacidade que um sistema eletrônico apresenta de funcionar satisfatoriamente em seu local de operação, sem que provoque ou esteja susceptível a sofrer interferências eletromagnéticas capazes de causar alterações indesejadas em seu funcionamento ou de outros equipamentos eletroeletrônicos operando no mesmo ambiente ou circuito de alimentação [29].

O crescente uso de sistemas eletrônicos para comunicação, computação, automação, dentre outros propósitos, torna necessária a operação de diversos circuitos próximos uns dos outros. Além disso, o uso de circuitos integrados em larga escala, tem contribuído para a redução do tamanho dos equipamentos eletrônicos, de forma que os circuitos se tornam menores e mais sofisticados, sendo cada vez mais alojados conjuntamente em menores espaços. Todos esses fatores têm contribuído para ocorrência de interferências eletromagnéticas com maior frequência em sistemas eletroeletrônicos, de forma que os projetistas e fabricantes de equipamentos eletrônicos precisam se preocupar não somente com o funcionamento dos mesmos nas condições ideais de um laboratório, mas na sua operação em ambientes susceptíveis a interferências eletromagnéticas e com presença de equipamentos sensíveis [29], [82].

Há diferentes classificações para as fontes de interferências eletromagnéticas existentes, de acordo com a natureza de sua origem, faixa de frequência, local de ocorrência, dentre outras. Desta forma, as fontes de interferência podem ser contínuas ou transientes, onde, em certas aplicações, transientes podem ser aceitáveis, enquanto fontes de interferências contínuas podem ser mais prejudiciais; as interferências também podem ser intencionais, como no caso de um transmissor de rádio, ou podem ser não intencionais, como no caso de uma interferência irradiada causada por uma rede de comunicação de sinal digital de um computador a outro. A fonte de interferência pode ainda ser classificada como sendo de banda larga ou estreita, dependendo da faixa de frequência ocupada, e pode ser classificada como interna, como é o caso de interferências devido à operação com chaveamentos de dispositivos eletrônicos, ou externa, no caso de descargas atmosféricas, por exemplo [83].

Dentre outras formas de classificações, além das citadas anteriormente, as fontes de interferências eletromagnéticas podem ainda ser classificadas, de acordo com sua natureza, como naturais, a exemplo das descargas atmosféricas, ou de natureza humana, onde se enquadram as interferências provocadas pela operação de dispositivos de engenharia desenvolvidos pelo homem [83], que consiste em uma forma de interferência eletromagnética que demanda cada vez mais atenção e técnicas para sua mitigação nos sistemas eletroeletrônicos, e será a classificação abordada no presente estudo.

São diversas as fontes de interferência eletromagnética provocadas pela operação de dispositivos de engenharia desenvolvidos pelo homem, dentre elas pode-se citar transmissores de rádio, aplicações de aquecimento elétrico, processamento e transmissão de sinais digitais, transmissão e condicionamento de energia, chaveamento de dispositivos eletrônicos, dentre outras [83].

As interferências eletromagnéticas podem ser propagadas de duas diferentes formas da fonte até o receptor, a primeira delas ocorre de forma radiada através do espaço, a segunda, de forma conduzida através dos terminais de alimentação e/ou portas de comunicação, conforme ilustra a Figura 8.

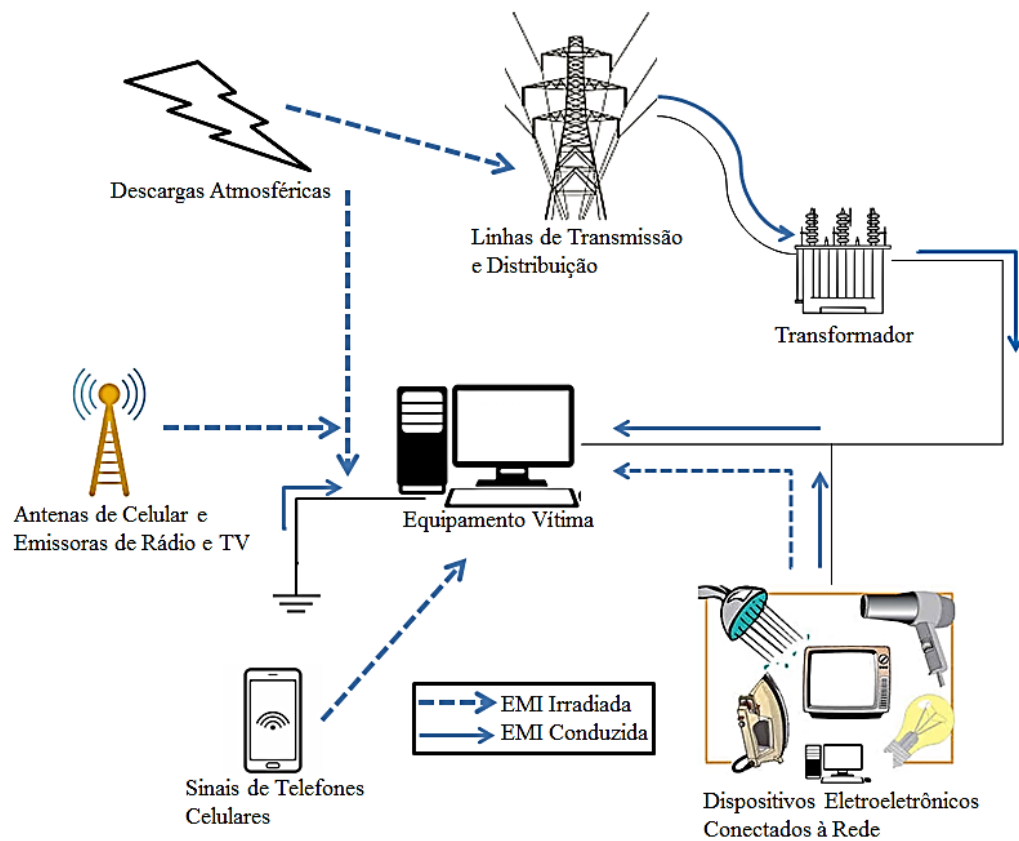


Figura 8 – Propagação de interferências eletromagnéticas

Semelhantemente, existem diferentes formas de acoplamento das interferências eletromagnéticas propagadas aos dispositivos receptores (vítimas), podendo ser: acoplamento indutivo, capacitivo, eletromagnético e condutivo, conforme ilustra a Figura 9.

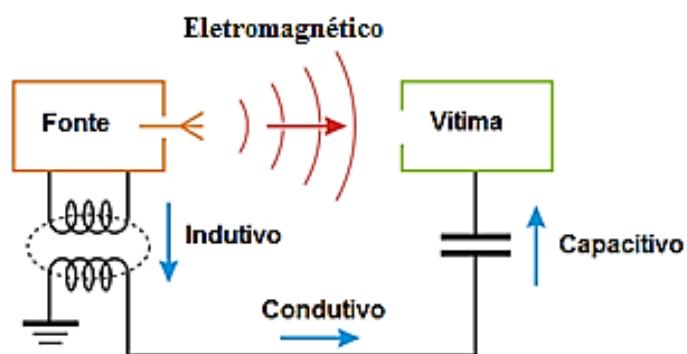


Figura 9 – Formas de acoplamento das interferências eletromagnéticas. (Adaptado de [84])

As seções seguintes descrevem cada uma das referidas formas de acoplamento.

3.1. Acoplamento Indutivo

O acoplamento indutivo ocorre por indução através de um campo magnético e dá-se predominantemente em circuitos de baixa impedância transportando sinais de baixa frequência [83]. A Figura 10 ilustra como ocorre o acoplamento indutivo entre dois circuitos 1 e 2, onde I_1 é a corrente fluindo pelo circuito emissor de interferência e M é o termo que representa a geometria e propriedades do meio entre os dois circuitos (emissor e receptor) [29].

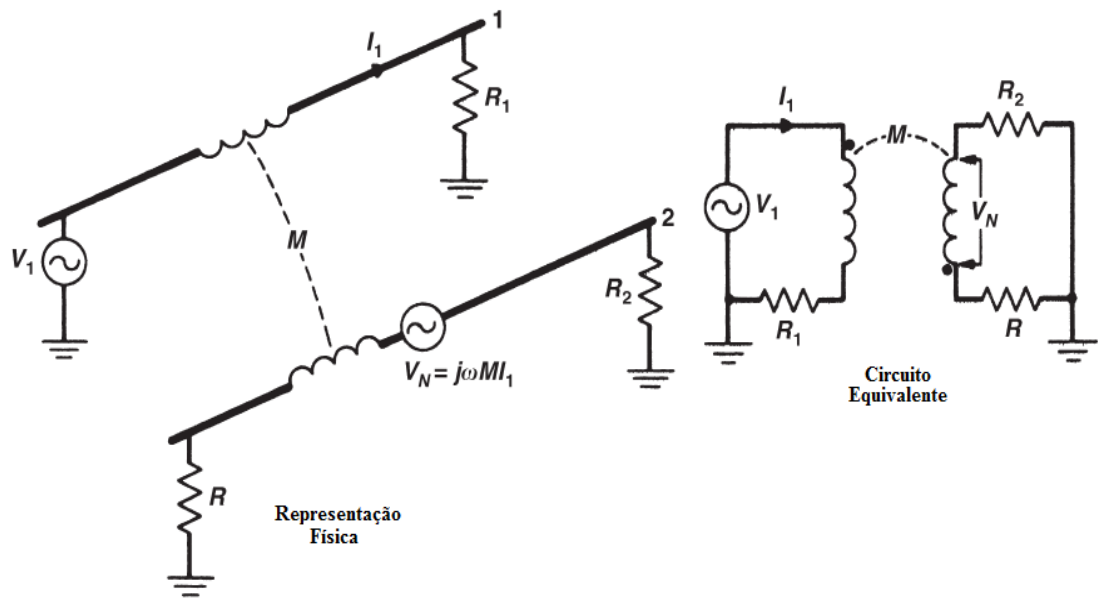


Figura 10 – Acoplamento indutivo (magnético) entre dois circuitos. (Adaptado de [29])

Quando uma corrente I flui por um condutor, produz um fluxo magnético Φ proporcional, com constante de proporcionalidade sendo a indutância L , como mostra a Equação 2 [29].

$$\Phi_T = LI \quad (2)$$

Onde, Φ_T é o fluxo magnético total e I é a corrente que produz o fluxo. Desta forma, a Equação 2 pode ser reescrita conforme Equação 3 [29].

$$L = \frac{\Phi_T}{I} \quad (3)$$

Quando uma corrente elétrica fluindo em um circuito produz um fluxo magnético em outro circuito localizado próximo ao primeiro, há uma indutância mútua M_{12} entre os circuitos 1 e 2, tal indutância mútua pode ser definida conforme Equação 4 [29].

$$M_{12} = \frac{\Phi_{12}}{I} \quad (4)$$

Onde Φ_{12} representa o fluxo magnético que surge no circuito 2 devido à passagem de corrente no circuito 1 (I_1).

A tensão induzida V_N em uma área A , resultante de um campo magnético de densidade $\vec{B}$, pode ser definida a partir da Lei de Faraday, conforme Equação 5 [29].

$$V_N = -\frac{d}{dt} \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (5)$$

Se o *loop* fechado formando a área A é estacionário, e a densidade de fluxo varia de forma senoidal com o tempo, mas se mantém constante na área do *loop*, a Equação 5 se reduz à Equação 6 [29].

$$V_N = j\omega BA \cos \theta \quad (6)$$

Como $BA \cos \theta$ representa o fluxo magnético total acoplado pelo circuito receptor (Φ_{12}), a Equação 6 pode ser reescrita em termos da indutância mútua entre os circuitos emissor e receptor, conforme Equação 7 [29].

$$V_N = j\omega MI_1 = M \frac{di_1}{dt} \quad (7)$$

3.2. Acoplamento Capacitivo

O acoplamento capacitivo, diferentemente do indutivo, ocorre geralmente quando dois circuitos de alta impedância operam em proximidade um ao outro e transportam sinais de baixa frequência [83]. A Figura 11 apresenta uma ilustração para esse tipo de acoplamento, onde o circuito 1 representa a fonte de interferência e o circuito 2 é o circuito receptor (circuito afetado) de interferência; C_{12} é a capacitância entre os condutores 1 e 2, a capacitância C_{1G} é a capacitância entre o condutor 1 e terra, C_{2G} é a capacitância entre o condutor 2 e terra, R é a resistência existente entre o circuito 2 e terra e, D representa a distância física entre os condutores 1 e 2.

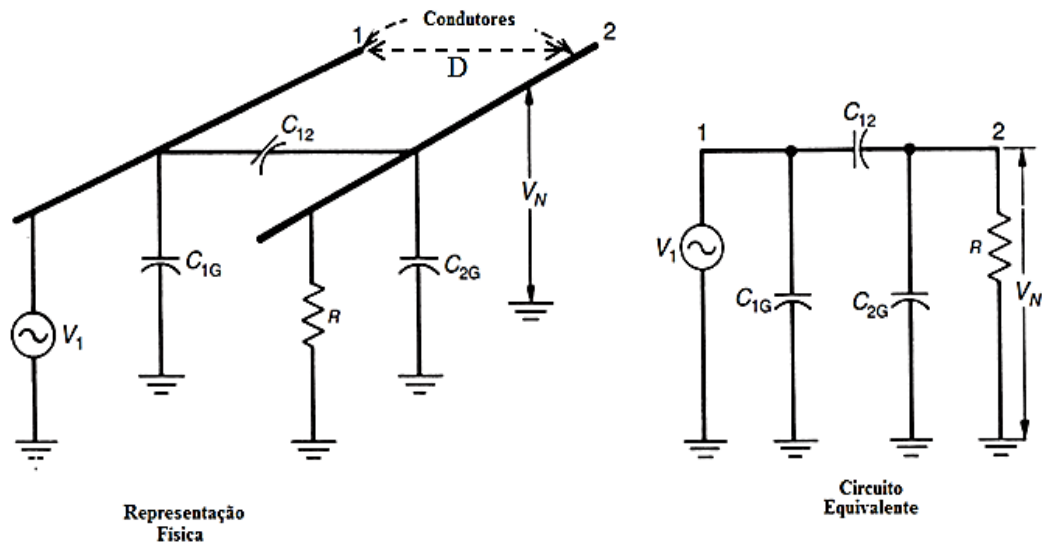


Figura 11 - Acoplamento capacitivo entre dois circuitos. (Adaptado de [29])

A aplicação de uma tensão alternada V_1 , de frequência angular w , no condutor 1, ocasiona o surgimento de uma tensão V_N entre o condutor 2 e terra, conforme ilustrado na Figura 10. Essa tensão produzida através de R é dada conforme Equação 8 [82].

$$V_N = \frac{jwC_{12}R}{1+j\frac{w}{w_0}} V_1 \quad (8)$$

Onde,

$$w_0 = \frac{1}{R(C_{12}+C_{2G})} \quad (9)$$

A partir das Equações 8 e 9, pode-se obter a Equação 10, para $w \ll w_0$, isto é, quando $R \ll \frac{1}{jw(C_{12}+C_{2G})}$ [29], [82].

$$V_N \cong jwC_{12}RV_1 \quad (10)$$

Para $w \gg w_0$, isto é, quando $R \gg \frac{1}{jw(C_{12}+C_{2G})}$, tem-se a Equação 11, para definição de V_N [29], [82].

$$V_N \cong \frac{C_{12}}{C_{12}+C_{2G}} V_1 \quad (11)$$

3.3. Acoplamento Eletromagnético

Os tipos de acoplamento abordados anteriormente não envolvem uma conexão física visível entre a fonte emissora de interferência eletromagnética e a receptora, originando, portanto uma interferência eletromagnética irradiada no circuito vítima [83] e que por ocorrerem quando os circuitos transportam sinais de baixa frequência, podem comprometer a qualidade da energia sendo transportada, uma vez que opera em baixa frequência (60 Hz).

O acoplamento eletromagnético se dá também para uma interferência eletromagnética propagada de forma irradiada, no entanto, se aplica aos casos onde os sinais transmitidos são de alta frequência e o comprimento físico das redes que transmitem esses sinais é eletricamente longo, de forma que se torna comparável ao comprimento de onda. Por tais fatores, o acoplamento de interferências entre linhas separadas por longas distâncias não pode ser tratado como indutivo ou capacitivo, em vez disso, esse mecanismo de acoplamento é tratado como “verdadeiramente” eletromagnético, onde a interferência se propaga através do espaço, por meio de ondas eletromagnéticas, e neste acoplamento estão envolvidos ambos os campos elétrico e magnético nos efeitos da interferência [82], [83].

Desta forma, para definir se um campo é estático (ou estacionário) ou de alta frequência, há estudiosos que consideram que se o comprimento de onda (λ) não supera em

grandes proporções as dimensões do sistema (D), ou seja, quando a condição $\lambda \gg D$ não ocorre, tem-se um sistema em regime de alta frequência, conforme abordado em [83], sendo, portanto, onde ocorre o acoplamento eletromagnético. Há também estudiosos que definem uma região classificatória, a exemplo da abordagem feita em [85], onde os autores consideram que a transição entre as regiões estacionária e de alta frequência se dá quando $l = \frac{\lambda}{10}$, onde l é a maior dimensão geométrica dentro do arranjo considerado e λ o menor comprimento de onda a ser considerado (comprimento da onda de maior frequência do sistema em questão).

A compreensão do acoplamento eletromagnético, bem como de diversas questões envolvendo EMC e EMI, está ligada ao entendimento das equações de Maxwell, que basicamente estabelecem relações entre campos elétricos e magnéticos e ondas [86].

A primeira equação de Maxwell é baseada no trabalho de Gauss, e trata do conceito de que um campo elétrico resulta do confinamento de uma carga, conforme Equação 12 [86], onde q , dado em Coulomb (C), representa a carga em confinamento, ϵ_0 a permissividade no vácuo, dada em F/m, e A é a área de confinamento, em m^2 , de q .

$$\partial E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (12)$$

A segunda equação de Maxwell, também baseada no trabalho de Gauss, trata a respeito do dipolo magnético, e diz que, para qualquer superfície fechada, o fluxo magnético direcionado para dentro, em direção ao polo sul será igual ao fluxo externo, direcionado para fora do polo norte, e o fluxo magnético fora da superfície fechada resulta em zero, conforme Equação 13 e conforme demonstra a Figura 12 [86].

$$\partial B \cdot dA = 0 \quad (13)$$

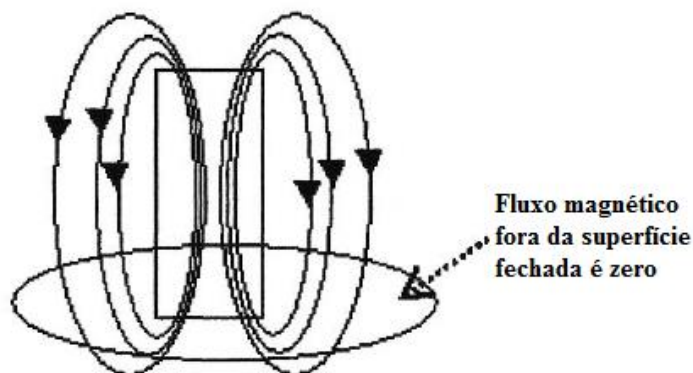


Figura 12 - Dipolo magnético. (Adaptado de [86])

Sua terceira equação se baseia no trabalho de Faraday que expressa que um fluxo magnético variável no tempo gera um campo elétrico, conforme apresentado na Equação 14 [86], onde s representa a circunferência da superfície fechada e A é a área da mesma.

$$\partial E \cdot ds = -\frac{d}{dt}(\partial B \cdot dA) \quad (14)$$

A quarta equação de Maxwell, também baseada no trabalho de Faraday, expressa que a densidade de fluxo magnético é proporcional à taxa de variação do campo elétrico [86], conforme demonstrado na Equação 15.

$$\partial B \cdot ds = m_0 \cdot \left(I + \frac{d}{dt}(\epsilon_0 \cdot \partial E \cdot dA) \right) \quad (15)$$

3.4. Acoplamento Condutivo

Diferentemente dos tipos de acoplamento apresentados nas seções anteriores, onde a forma de propagação ocorre por meio de ondas eletromagnéticas através do espaço, o acoplamento condutivo se dá de forma conduzida através dos terminais de alimentação e/ou portas de comunicação, por meio de uma impedância comum.

O acoplamento condutivo ocorre quando correntes de dois circuitos distintos fluem através de uma impedância comum, de forma que, a queda de tensão através de tal impedância observada por cada circuito é influenciada pelo outro circuito. Esse tipo de acoplamento pode ocorrer em sistemas de potência (redes de alimentação comuns, condutores de referência mútuos) e/ou sistemas de aterramento [29], [85].

A Figura 13 apresenta um exemplo de acoplamento condutivo através da impedância comum do sistema de aterramento, onde o potencial de aterramento do circuito 1 é moldado pela corrente do circuito 2 que flui na impedância de aterramento, desta forma, caso haja algum ruído no circuito 2, este é acoplado ao circuito 1 (ou vice-versa) através da impedância comum [29].

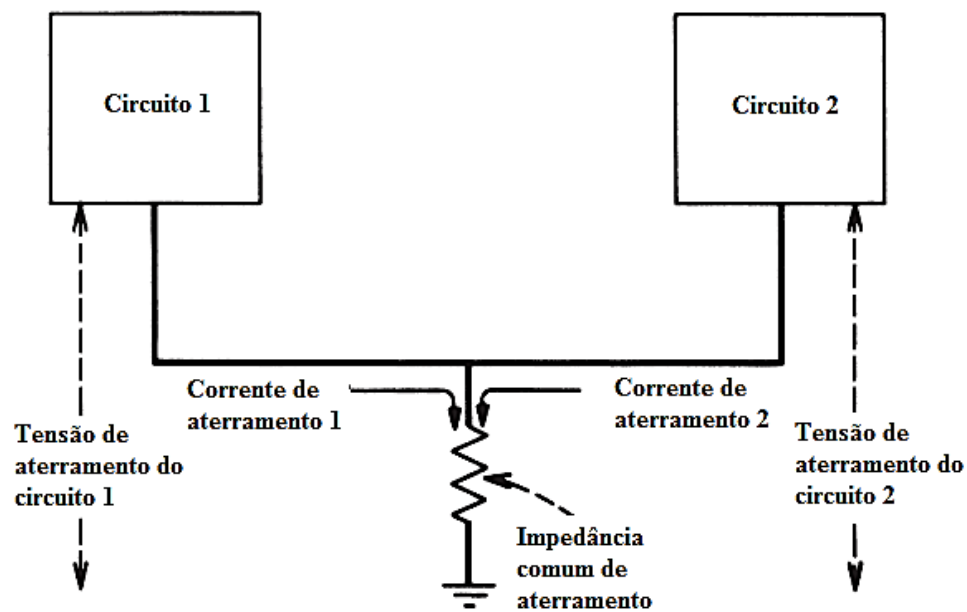


Figura 13 – Acoplamento condutivo através de impedância comum de aterramento.
(Adaptado de [29])

Na Figura 14 é apresentado um segundo exemplo de acoplamento condutivo, sendo este através de impedância comum no sistema de potência, onde qualquer ruído ou alteração da corrente de alimentação do circuito 2 influenciará a tensão nos terminais do circuito 1, devido à impedância comum das linhas de alimentação dos circuitos e da fonte de alimentação [29].

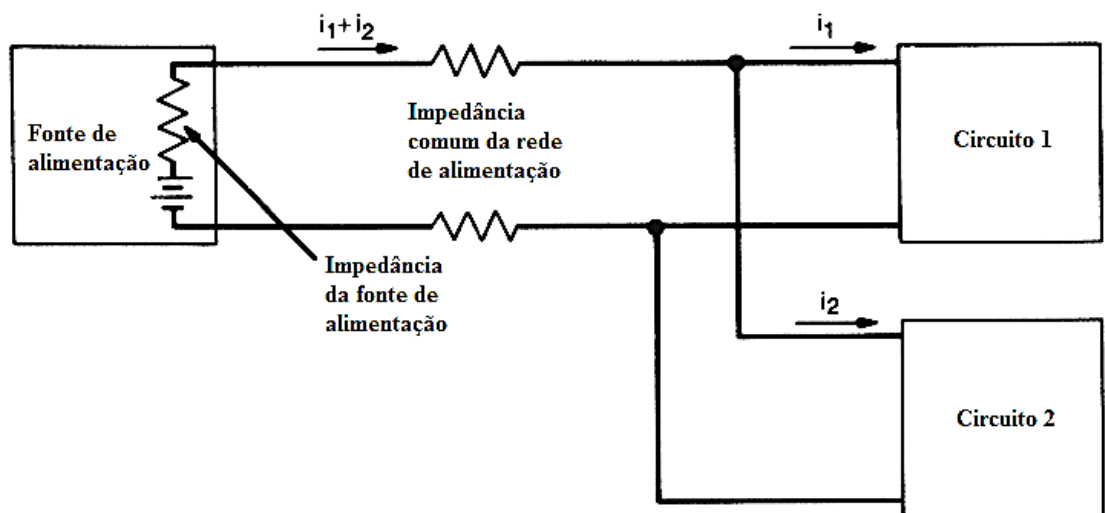


Figura 14 – Acoplamento condutivo através de impedância comum no sistema de potência. (Adaptado de [29])

Especificamente o acoplamento condutivo será o tipo abordado neste estudo, onde será avaliada a compatibilidade eletromagnética de um inversor de sistema solar fotovoltaico para a emissão de interferência eletromagnética conduzida. Portanto, este tipo de acoplamento será ainda mais abordado em capítulos seguintes deste estudo.

4.Principais Regulamentações de EMC para Inversores Fotovoltaicos

Neste capítulo são apresentadas as principais regulamentações de EMC aplicáveis às classes de equipamentos onde se enquadram os inversores de sistemas solares fotovoltaicos.

Existem diferentes regulamentações específicas de EMC para inversores de sistemas fotovoltaicos ou classes de equipamentos onde estes se enquadram, de acordo com as classificações de diferentes países e seus respectivos órgãos regulamentadores. Essas regulamentações visam estabelecer limites de emissão e requisitos de imunidade desses equipamentos, de forma a garantir funcionamento satisfatório quando inserido em seu local de operação, que pode ser um ambiente eletromagnético (com presença de ondas eletromagnéticas emitidas por outros equipamentos, bem como, presença de outros equipamentos sensíveis a interferências eletromagnéticas).

A Comissão Eletrotécnica Internacional, do inglês, *International Electrotechnical Commission* (IEC), estabelece padrões internacionais de EMC através de normas como a IEC 61000-6-3 que especifica padrões de emissão para ambientes residenciais, comerciais e industriais leves [87], enquanto a norma IEC 61000-6-4 especifica padrões de emissões para ambientes industriais [88]. Já as normas IEC 61000-6-1 e IEC 61000-6-2 especificam padrões de imunidade para ambientes residenciais, comerciais e industriais leves [89] e padrões de imunidade para ambientes industriais [90], respectivamente.

Na Europa, o Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC) adota os padrões internacionais IEC citados acima, sendo, portanto os equipamentos tratados neste estudo, regulamentados conforme normas EN 61000-6-3 [91] para padrões de emissão em ambientes residenciais, comerciais e industriais leves, EN 61000-6-4 [92] para padrões de emissões em ambientes industriais, EN 61000-6-1 [93] para padrões de imunidade em ambientes residenciais e, EN 61000-6-2 [94] para padrões de imunidade em ambientes industriais.

Nos Estados Unidos, a Comissão Federal de Comunicações, do inglês, *Federal Communications Commission* (FCC), especifica para esse tipo de equipamento, apenas limites de emissão de interferências eletromagnéticas, sendo que, a norma FCC-Part 15 especifica, para a classe B, limites de emissão para equipamentos classificados como residenciais, segundo classificação da FCC e, para a classe A, limites de emissão para equipamentos classificados como comerciais e industriais [95].

Além das normas que especificam limites de perturbações ou imunidade a interferências eletromagnéticas, outra regulamentação internacional frequentemente utilizada para avaliação de conformidade de equipamentos e dispositivos quanto à EMC é a norma internacional IEC CISPR 16 que especifica métodos de medição de perturbações e imunidade a interferências eletromagnéticas. A norma internacional IEC CISPR 16 contém, entre outras partes que a compõem, duas seções que serão utilizadas especificamente neste trabalho, são elas: a parte 1 [96], que trata de equipamentos para medição de perturbações e imunidade a interferências eletromagnéticas; e a parte 2 [97] que trata de métodos de medição de perturbações e imunidade a interferências eletromagnéticas conduzidas.

Os padrões internacionais citados anteriormente constituem as principais recomendações de EMC aplicáveis a inversores de sistemas solares fotovoltaicos, e cada país adapta tais padrões às características operacionais e regulamentos nacionais específicos, desta forma, os fabricantes devem adequar o projeto final de seus produtos de forma a atender aos requisitos específicos de cada país [98].

No Brasil, a Portaria Inmetro nº 004 de 04 de janeiro de 2011 estabelece critérios para o Programa de Avaliação da Conformidade de sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica, no entanto, não são contemplados neste documento os ensaios de EMC, estando ainda em estudos para futura inclusão no programa [99]. Com isso, os inversores de sistemas solares fotovoltaicos não são verificados quanto aos parâmetros de EMC para serem inseridos nos sistemas brasileiros, desta forma não se avalia e nem se controla a contribuição que esses equipamentos estão oferecendo em termos de interferências eletromagnéticas injetadas nas redes de energia elétrica, que podem estar afetando outros sistemas e equipamentos sensíveis conectados à mesma rede ou operando em suas proximidades.

Considerando a não existência de uma regulamentação nacional para certificação de inversores fotovoltaicos, quanto à EMC, no Brasil, para a realização deste trabalho foi adotada a norma internacional IEC 61000-6-3 que especifica limites de emissão em ambientes residenciais, comerciais e industriais leves [87], conforme apresentado na Tabela 2, e a norma

internacional IEC CISPR 16, onde são especificados os equipamentos e métodos de medições que foram adotados neste estudo.

Tabela 2 – Limites de interferências eletromagnéticas conforme IEC 61000-6-3

Local	Faixa de Frequência	Limites Aplicáveis
Terminais de Alimentação CA	0,15 MHz - 0,5 MHz	66 dB(μ V) - 56 dB(μ V) Quase pico
		56 dB(μ V) - 46 dB(μ V) Média
	0,5 MHz - 5 MHz	56 dB(μ V) Quase pico
		46 dB(μ V) Média
	5 MHz - 30 MHz	60 dB(μ V) Quase pico
		50 dB(μ V) Média
Terminais de Alimentação CC	0,15 MHz - 0,5 MHz	79 dB(μ V) Quase pico
		66 dB(μ V) - Média
	0,5 MHz - 30 MHz	73 dB(μ V) Quase pico
		60 dB(μ V) Média

Conforme pode ser observado pela apresentação dos limites na Tabela 2, a norma internacional adotada especifica limites de emissão de interferências eletromagnéticas com base em dois diferentes tipos de detectores: quase pico e média. As normas que especificam padrões e métodos de medições de interferências eletromagnéticas fazem referência a pelo menos 3 tipos de detectores, são eles os detectores de pico, do inglês *peak* (PK), quase pico, do inglês *quasi-peak* (QP), e média, do inglês *average* (AV).

O detector é a parte do analisador de espectro que efetivamente irá fazer a medição do sinal de radiofrequência recebido, diferentes tipos de detectores são adotados em normas de EMC para avaliar a variação da amplitude do sinal no tempo de medição. Para sinais senoidais contínuos, todos os detectores apresentam o mesmo resultado, porém, para sinais pulsados, intermitentes ou modulados, os detectores fornecem resultados diferentes, pois há alteração na taxa de variação [100].

O detector de pico registra o valor máximo observado a cada frequência medida, visando mostrar o pior caso. Tal detector é implementado selecionando-se o valor máximo em cada faixa de frequência da transformada discreta de Fourier sobre todos os espectros calculados. Este detector opera conforme demonstrado na Figura 15, em que o diodo conduz uma polaridade do sinal e o capacitor se carrega mantendo o nível máximo, o resistor representa a base para o tempo, de forma a estabelecer a frequência de detecção, dessa forma, entre cada etapa de medição, o capacitor de retenção de pico deve ser descarregado [96], [100], [101].



Figura 15 – Princípio de funcionamento do detector de pico (Adaptado de [101])

O detector de quase pico visa avaliar a taxa de repetição de um determinado nível de perturbação medido, uma vez que, distúrbios com elevadas taxas de repetição podem ser mais prejudiciais do que os picos momentâneos de tensão, que são normalmente detectados pelo detector de pico. Dessa forma, o detector de quase pico é projetado de forma que o tempo de carregamento seja inferior ao tempo de descarga, para que quanto maior a taxa de repetição dos sinais, maior seja o nível detectado [96], [100], [101], conforme ilustrado na Figura 16.

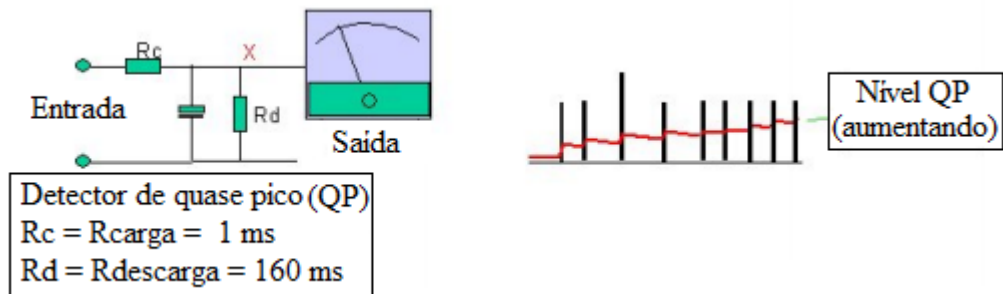


Figura 16 - Princípio de funcionamento do detector de quase pico (Adaptado de [101])

O detector de média é similar ao detector de pico, porém, contém um conjunto de filtros passa-baixa, de banda menor que a do detector de pico, tal conjunto de filtros visam integrar as componentes de alta frequência, ou seja, é calculado o valor médio aritmético em cada faixa de frequência da transformada discreta de Fourier sobre todos os espectros encontrados. Como o ciclo de trabalho dos sinais pulsados é normalmente baixo, o nível resultante do sinal pelo detector de média será menor que o encontrado para os demais [96], [100], [101]. A demonstração de funcionamento desse detector é representada na Figura 17.

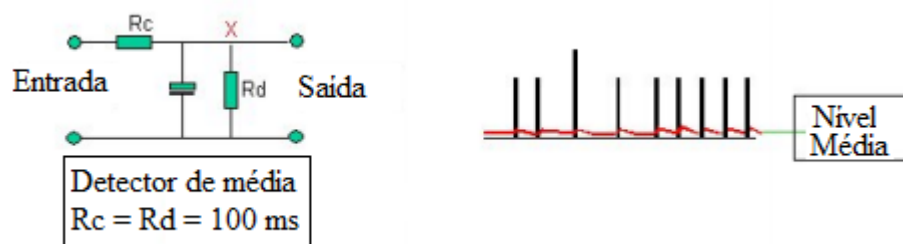


Figura 17 - Princípio de funcionamento do detector de média (Adaptado de [101])

As normas de EMC, como pode ser observado pelos limites apresentados na Tabela 1, especificam o uso dos detectores de quase pico e média, entretanto, uma vez que o tempo de varredura do espectro pelo detector de quase pico é maior, a norma IEC CISPR 16-1- 1 [96], sugere que a medição seja feita primeiramente com o detector de pico, e depois refeita com os detectores de quase pico e média, visto que após selecionar os pontos de maior amplitude do sinal com o detector de pico, é possível realizar a varredura com o detector de quase pico apenas nesses pontos, otimizando o tempo gasto para a medição [96]

A representação gráfica dos limites de interferências eletromagnéticas conduzidas pelos terminais de alimentação especificados pela norma internacional IEC 61000-6-3 [87] é apresentada na Figura 18.

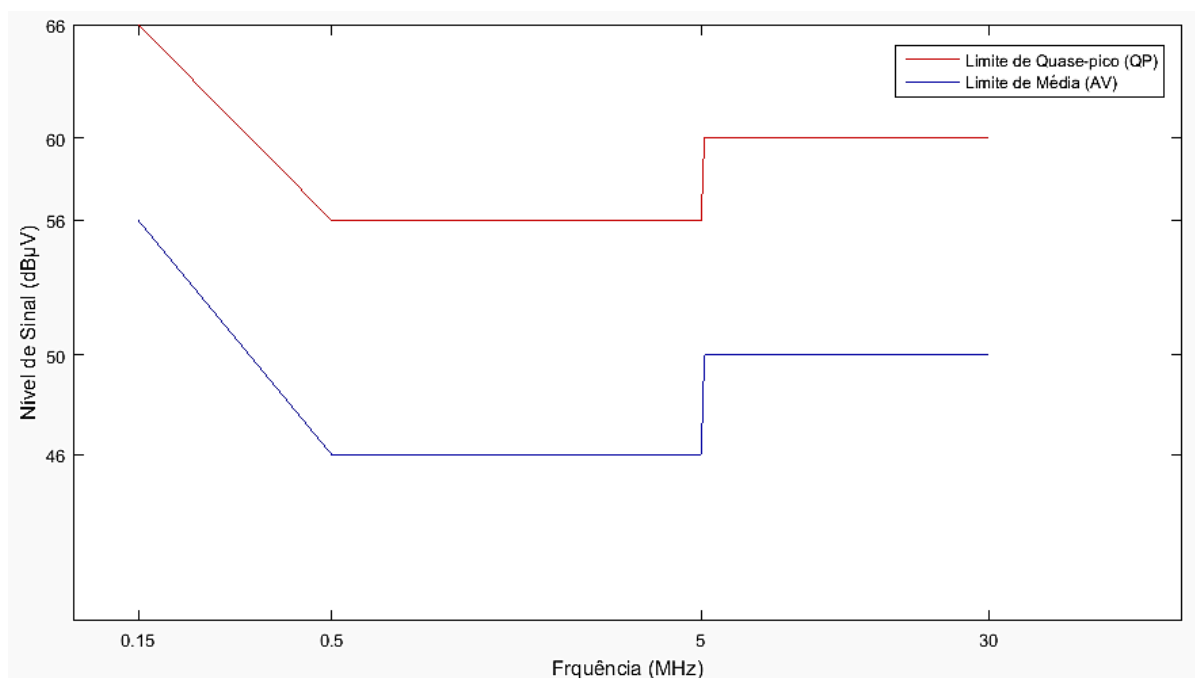


Figura 18 – Representação gráfica dos limites de interferências eletromagnéticas conduzidas pelos terminais de alimentação conforme norma internacional IEC 61000-6-3 [87]

5. Metodologia de Testes

Neste capítulo são apresentadas as configurações e especificações normativas que foram utilizadas neste estudo, para avaliação do desempenho, quanto à compatibilidade eletromagnética, de um inversor de sistema solar fotovoltaico comercializado no mercado brasileiro, visto que não há regulamentação nacional para avaliação de conformidade de tais equipamentos.

5.1. Ambiente, Configuração e Regulamentação Adotada para Testes

A avaliação de EMC realizada neste estudo contempla os testes referentes à medição da interferência eletromagnética conduzida que é injetada pelo inversor de sistema solar fotovoltaico quando conectado a uma rede de suprimento de energia elétrica. Todas as medições realizadas no inversor foram efetuadas no Laboratório de Luminotécnica da Universidade Federal Fluminense – Lablux UFF, que faz parte da Rede Brasileira de Laboratórios de Ensaio (RBLE), conjunto de laboratórios acreditados pelo Inmetro para a execução de serviços de ensaios.

Um dos setores de atuação do Lablux é o setor de EMC, onde são realizados ensaios de compatibilidade eletromagnética em lâmpadas e luminárias LED, de acordo com as especificações da norma ABNT NBR IEC/CISPR 15 [102], que estabelece Limites e métodos de medição das radioperturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares. O setor de EMC do Lablux é também um espaço voltado à realização de pesquisas abordando assuntos da área de compatibilidade eletromagnética em equipamentos eletroeletrônicos e sistemas de telecomunicações, algumas das pesquisas recentemente realizadas estão apresentadas em [103]–[105].

Todas as medições efetuadas neste trabalho foram realizadas dentro de uma sala blindada do setor de EMC do Lablux, com dimensões de 3,4 m x 5,3 m x 3,1 m com característica de atenuação até a frequência de 300 MHz, com o objetivo de mitigar a influência de interferências eletromagnéticas radiadas de fontes externas; a temperatura ambiente da sala blindada é mantida no valor de 25 ± 1 °C. A Figura 19 mostra parcialmente a sala blindada do setor de EMC do Lablux.



Figura 19 – Setor de EMC do Lablux-UFF, local de realização do presente estudo

Para as configurações de testes, foi adotada a norma internacional IEC CISPR 16-2-1 [97], que especifica métodos de medição de perturbações e imunidade a interferências eletromagnéticas conduzidas.

Conforme recomendações da norma internacional IEC CISPR 16-2-1, o equipamento em teste, do inglês, *Equipment Under Test* (EUT), deve ser posicionado em uma mesa de material não condutor, com pelo menos 80 cm de altura e, estar a uma distância de 40 cm de um plano terra de referência (plano de aterramento). Este plano de aterramento, normalmente é uma parede ou o chão de uma sala blindada. No cenário adotado para este estudo, o plano terra de referência consiste em uma das paredes de uma sala blindada. O equipamento a ser ensaiado deve também ser posicionado de forma a respeitar uma distância de 80 cm da rede de estabilização de impedâncias de linha, do inglês, *Line Impedance Stabilization Network* (LISN).

A representação do ambiente e configurações de testes é apresentada na Figura 20, onde, o cenário adotado foi seguido conforme especificações e recomendações da norma

internacional IEC CISPR 16-2-1, e de forma a reproduzir as configurações sugeridas pela mesma norma em [97, p. 35].

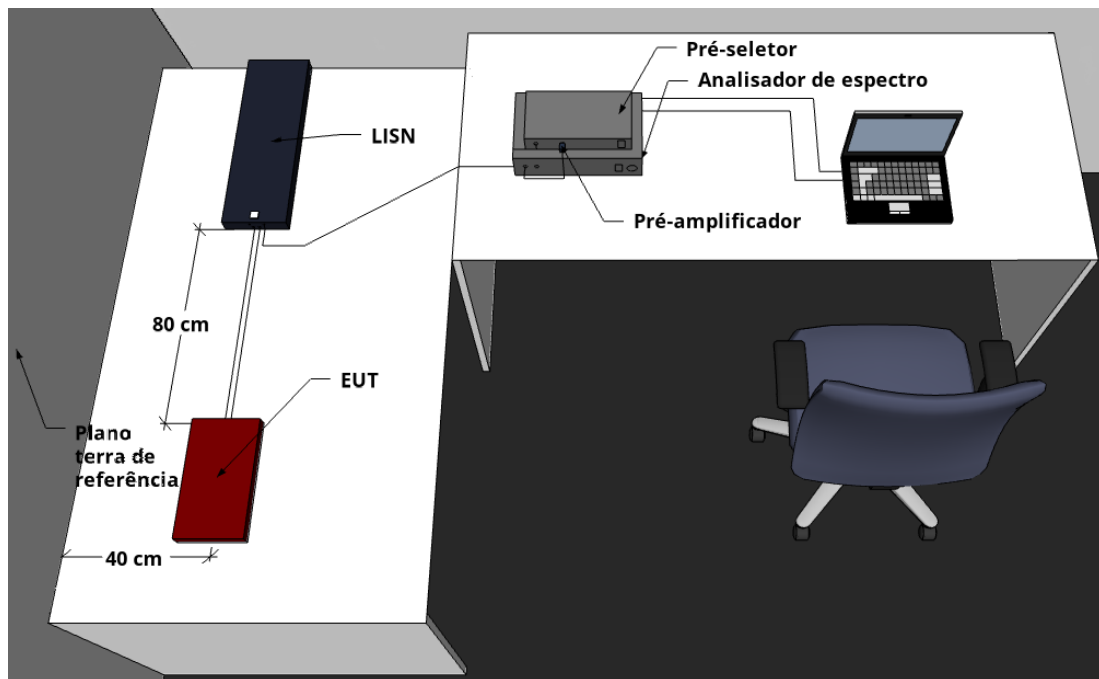


Figura 20 - Configurações adotadas para os ensaios de interferências eletromagnéticas conduzidas

5.2. Parâmetros de Operação do Inversor Avaliado

O inversor fotovoltaico avaliado neste estudo consiste em um equipamento *on-grid*, ou seja, projetado para uso exclusivamente conectado à rede, consequentemente, para aplicação a sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Desta forma, os parâmetros da rede de energia (nível de tensão e frequência) a qual o inversor está conectado servirão de base para a sincronização de operação do mesmo.

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros nominais do inversor fotovoltaico avaliado no presente estudo, onde se pode observar que o mesmo possui capacidade máxima de potência de geração de 3 kW.

Tabela 3 - Parâmetros nominais do inversor fotovoltaico avaliado

Parâmetro	Dados de Entrada (CC)	Dados de Saída (CA)
Potência Máxima (W)	3.900	3.000
Tensão Máxima (V)	500	-
Faixa de Operação (V)	80 - 450	176 - 242
Corrente Máxima (A)	15	13,5
Saída Nominal (V)	-	220
Saída Nominal (Hz)	-	60
Faixa de Operação (Hz)	-	57,5 - 62
Tipo de Conexão	-	Monofásica/Bifásica

5.3. Equipamentos Utilizados nas Medições de EMI

A seguir, são apresentados os principais equipamentos utilizados para realização dos ensaios de interferências eletromagnéticas conduzidas para avaliação de EMC do inversor solar fotovoltaico, conforme especificações e recomendações da norma internacional IEC CISPR 16-2-1 [97].

5.3.1. *Line Impedance Stabilization Network (LISN)*

A LISN é um equipamento recomendado por organizações regulamentadoras, como o CISPR, para ensaios de emissão conduzida para avaliação de EMC. A LISN apresenta três funções primordiais nos ensaios de EMC, uma delas é a de proporcionar impedância estável para realização das medições, a fim de manter uma impedância especificada no equipamento a ser ensaiado, uma vez que, a rede de distribuição de energia pode apresentar variações na impedância de linha, podendo afetar o processo de medições [106], [107]. Outra função primordial da LISN nos ensaios de EMC é a de atenuar interferências eletromagnéticas provenientes da rede de distribuição de energia, agindo como um filtro passa-baixa que visa mitigar a passagem de perturbações de alta frequência que possam se sobrepor às faixas de

frequência nas quais se deseja avaliar a emissão do equipamento em análise e, provendo um caminho de baixa impedância para as perturbações de alta frequência introduzidas pelo equipamento em ensaio [107], [108]. É também da LISN a função de efetuar o acoplamento das perturbações eletromagnéticas geradas pelo equipamento em ensaio, para processamento pelo dispositivo receptor [108].

5.3.2. Analisador de espectro

O analisador de espectro é um instrumento amplamente utilizado no processo de medições de interferências eletromagnéticas, desempenhando a função de análise de sinais alternados no domínio da frequência. Esse instrumento recebe um sinal eletromagnético e o exibe em sua interface gráfica de forma a permitir a medição e análise desse sinal no domínio da frequência, sendo a amplitude e frequência do sinal apresentadas em escala logarítmica, possibilitando a leitura e análise até mesmo de sinais de baixa amplitude.

5.3.3. Pré-seletor

O pré-seletor é um dispositivo eletrônico similar a um filtro passa-banda, que opera bloqueando sinais que não fazem parte da faixa de frequência em análise em determinado momento de forma a evitar que tais sinais interfiram no espectro que se deseja analisar. Desta forma, o pré-seletor divide em bandas de frequência menores, a faixa de frequência na qual se deseja analisar a emissão de determinado equipamento para avaliação do atendimento aos requisitos de EMC.

Desta forma, o pré-seletor é utilizado em conjunto com o receptor de medição para realização de ensaios de emissão conduzida para avaliação da conformidade com os parâmetros de EMC.

5.3.4. Pré-amplificador

O uso da LISN, descrita no item 5.3.1 ocasiona uma atenuação de 30 dB no sinal original emitido pelo equipamento a ser testado, atenuação esta conforme declarado no *datasheet* do equipamento utilizado, podendo variar de fabricante para fabricante. Dessa forma, devido à perda ocorrida no sinal que se deseja medir, utiliza-se o pré-amplificador, um dispositivo que visa amplificar em 30 dB o sinal recebido, de forma a compensar o que foi atenuado ao passar pela LISN.

5.4. Procedimentos Adotados para as Medições de EMI

As medições de interferências eletromagnéticas no inversor analisado foram realizadas para as duas fases de alimentação do equipamento, de acordo com sua tensão nominal de 220 V.

Antes do início das medições foi medido o ruído ambiente para verificação da adequação do ambiente e das configurações para realização dos testes, sendo especificado pela norma internacional IEC CISPR 16-2-1 [97], que o ruído ambiente deve estar a pelo menos 20 dB abaixo do limite de interferência especificado para o equipamento a ser avaliado.

Como as normas adotadas para realização deste estudo não especificam um período de estabilização para os equipamentos de ensaio e para o EUT, foi estabelecido para este trabalho um período de 5 minutos para estabilização dos equipamentos de medição e um período de 15 minutos para estabilização do inversor avaliado.

As medições de interferências eletromagnéticas realizadas neste estudo visam analisar a compatibilidade eletromagnética do inversor fotovoltaico avaliado quanto à emissão de perturbações eletromagnéticas conduzidas pelos terminais de alimentação. No caso do inversor avaliado, que é um equipamento de funcionamento *on-grid*, serão avaliados os níveis de perturbações eletromagnéticas injetadas na rede de distribuição de energia elétrica quando o mesmo disponibiliza a energia convertida em CA a partir da energia CC recebida.

Este estudo é voltado principalmente à análise da emissão de perturbações eletromagnéticas ocorridas nos momentos de baixa geração de energia elétrica pelo sistema fotovoltaico, visto que, tais sistemas estão sujeitos a baixos níveis de geração de energia todos os dias de sua operação, uma vez que a curva de geração típica passa pelo menos em dois períodos pelo ponto de mínima capacidade de geração do sistema, sendo esses períodos no início e final do dia, conforme pode ser observado na Figura 21. Esta figura apresenta um gráfico de uma curva de geração de um sistema fotovoltaico localizado na cidade do Rio de Janeiro - RJ, composto por 5 módulos de potência máxima de 250 W e um inversor com potência nominal de 1.550 W, em um dia típico do mês de junho (dia 27 de Junho de 2018), no período de 07 horas da manhã a 17 horas da tarde.

Desta forma, considerando a faixa de operação do inversor fotovoltaico avaliado (80 a 450 V_{CC}), foram efetuadas medições com tensão de alimentação de 100 V_{CC} na entrada do inversor, correspondendo uma energia injetada na rede em torno de 90 W.

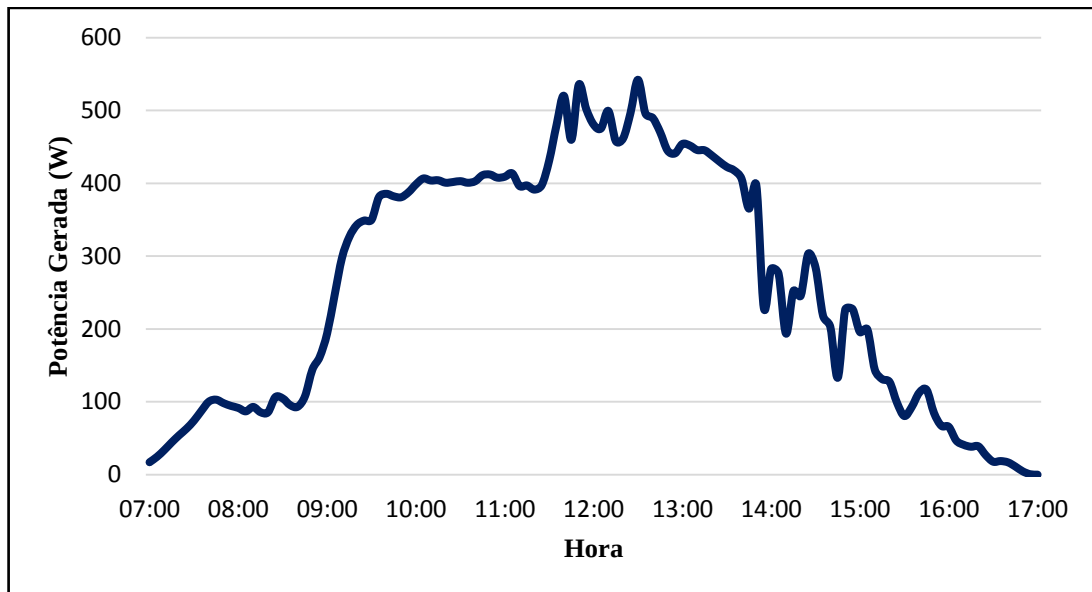


Figura 21 - curva de geração de um sistema fotovoltaico localizado na cidade do Rio de Janeiro-RJ

Além das medições de interferências eletromagnéticas no lado CA, cujos efeitos impactam diretamente na QEE da rede de distribuição, também foram realizadas medições no lado CC, ou seja, das perturbações eletromagnéticas injetadas pelo inversor fotovoltaico no lado de corrente contínua, cujos efeitos, em um sistema fotovoltaico de operação comum, podem afetar o funcionamento do próprio sistema, ocasionando operação indevida ou mal funcionamento em seu sistema de proteção [20].

Para alimentação CC controlada do inversor fotovoltaico avaliado foi utilizada uma fonte de potência CC, de forma a permitir o fornecimento do nível de tensão desejado para a realização das medições.

5.5. Simulação de EMI Conduzida Emitida pelo Inversor Fotovoltaico Quando Operando em Sua Potência Nominal Máxima de Geração (3.000 W)

A fim de avaliar o funcionamento de um inversor fotovoltaico também nas suas condições nominais de máxima geração, bem como verificar de forma comparativa a fidelidade de resultados simulados em software para medição de EMI conduzida, foi realizada uma simulação computacional no Software Simulink - MATLAB®, considerando um modelo genérico de inversor fotovoltaico monofásico *on-grid*, adaptado com os parâmetros nominais do equipamento avaliado neste estudo, conforme apresentado na Tabela 3.

O modelo simplificado do inversor fotovoltaico simulado está apresentado na Figura 22.

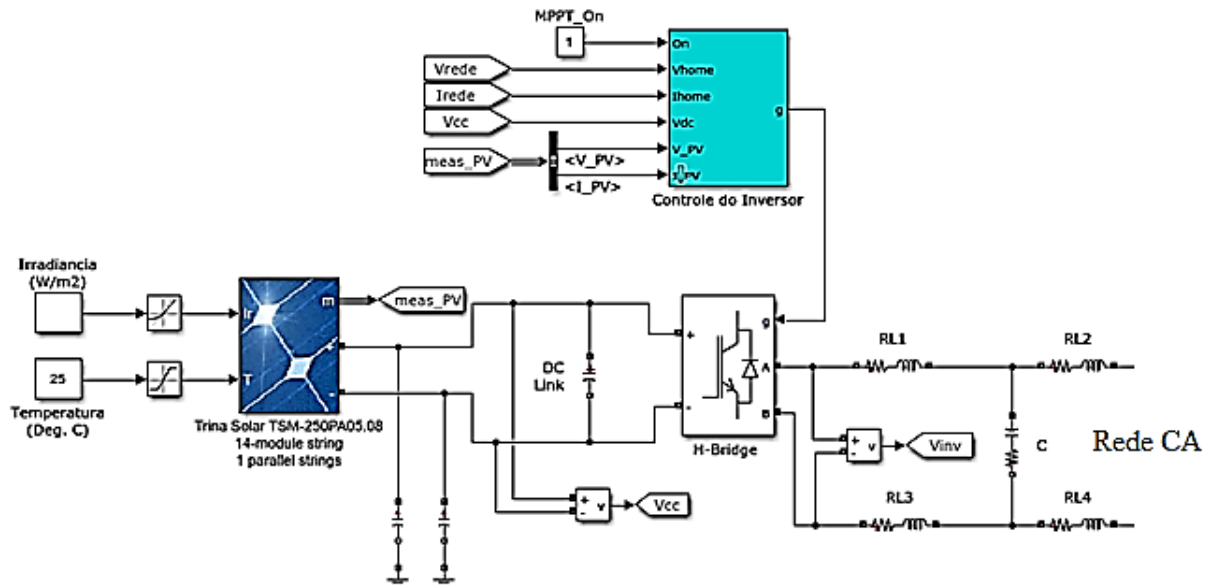


Figura 22 – Modelagem do inversor fotovoltaico (Adaptado de [109])

Para a simulação, da mesma forma que nas medições realizadas com equipamentos reais em laboratório, foi utilizada uma LISN para estabilização da impedância de linha e filtragem do ruído proveniente da rede a fim de se obter uma medição fidedigna da perturbação eletromagnética emitida pelo inversor modelado; desta forma, o sistema de medição conta com a LISN e um receptor EMI (equivalente ao analisador de espectro e pré-seletor do sistema de medição real). O modelo de LISN utilizado é apresentado na Figura 23, cuja modelagem foi realizada levando em consideração literatura sobre este sistema [29], [82], [83], [86], [110], [111].

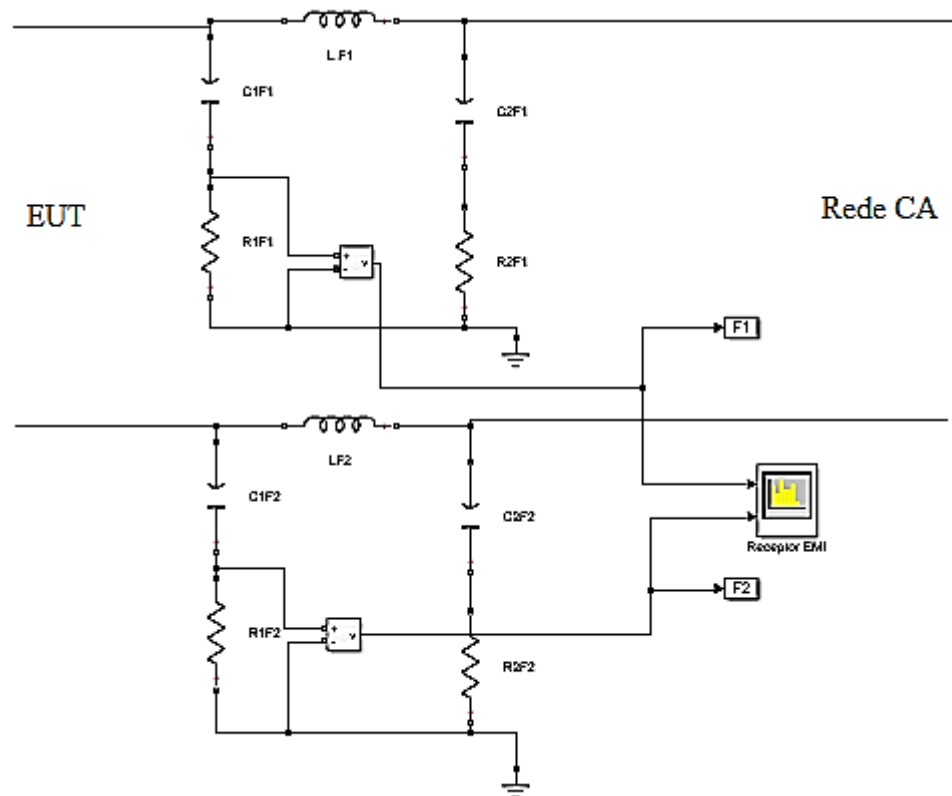


Figura 23 – Modelo de LISN utilizado para simulação

A Figura 24 apresenta o sistema conjunto, interligado com um modelo de rede CA, utilizado para a simulação de emissão de EMI conduzida pelo inversor fotovoltaico.

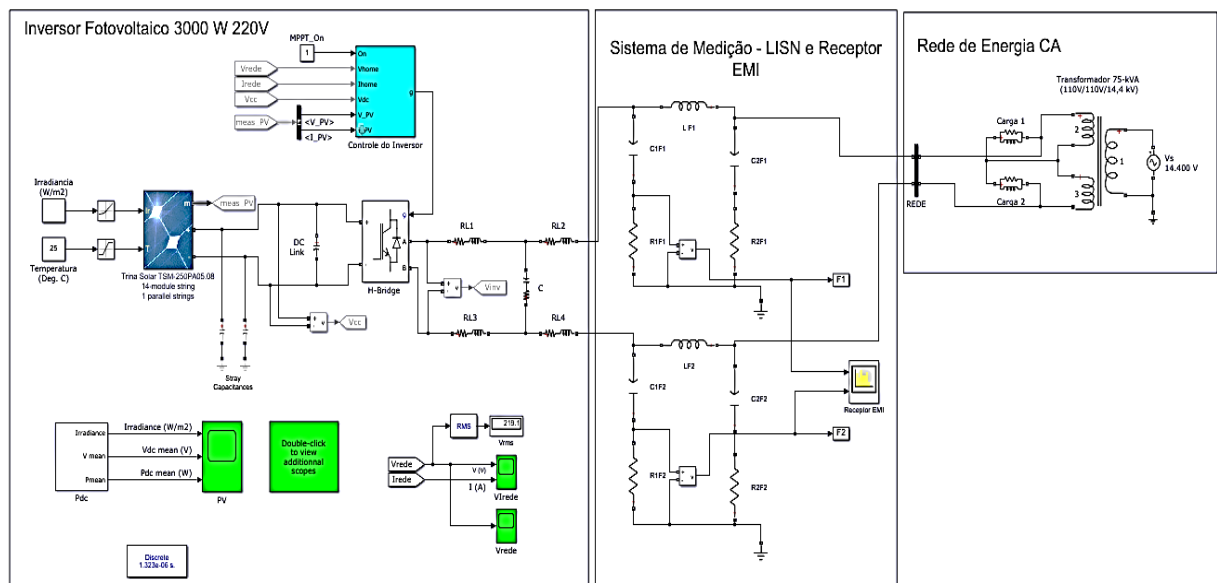


Figura 24 – Modelagem para simulação de emissão de EMI pelo inversor fotovoltaico

6. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir das medições de interferências eletromagnéticas realizadas no inversor fotovoltaico avaliado neste trabalho, segundo as especificações e recomendações das normas internacionais IEC 61000-6-3 [87] e IEC CISPR 16-2-1 [97].

6.1. Ruído Ambiente

Nesta seção serão apresentados os resultados das medições do ruído ambiente, realizadas antes do início das medições de perturbações eletromagnéticas emitidas pelo inversor fotovoltaico avaliado, com o objetivo de verificar a adequação das configurações e ambiente de ensaio aos requisitos e recomendações das normas internacionais adotadas para avaliação do equipamento. As curvas apresentadas fazem referência ao espectro de frequência gerado a partir do analisador de espectro em comunicação com o *software* do mesmo (*EMC Engineer software*), onde a curva apresentada em cor preta representa a curva de perturbação medida, de acordo com cada etapa da medição, enquanto as curvas apresentadas em cor vermelha representam os limites especificados na norma internacional IEC 61000-6-3 [87], conforme exposto na Tabela 2, em que “QP” representa a curva dos limites de interferências eletromagnéticas medidas com o detector de quase pico, e “AV” representa a curva dos limites de interferências eletromagnéticas medidas com o detector média. Em todos os gráficos gerados através do *software* de análise de EMC associado ao analisador de espectro, o eixo x faz referência aos valores de frequência, em MHz, e o eixo y aos valores de tensão, em dB μ V.

A Figura 25 mostra o espectro de frequência do ruído ambiente no terminal de alimentação positivo, medido no lado CC (entre a fonte de potência CC e a entrada do inversor fotovoltaico avaliado), antes da entrada em operação do inversor fotovoltaico.

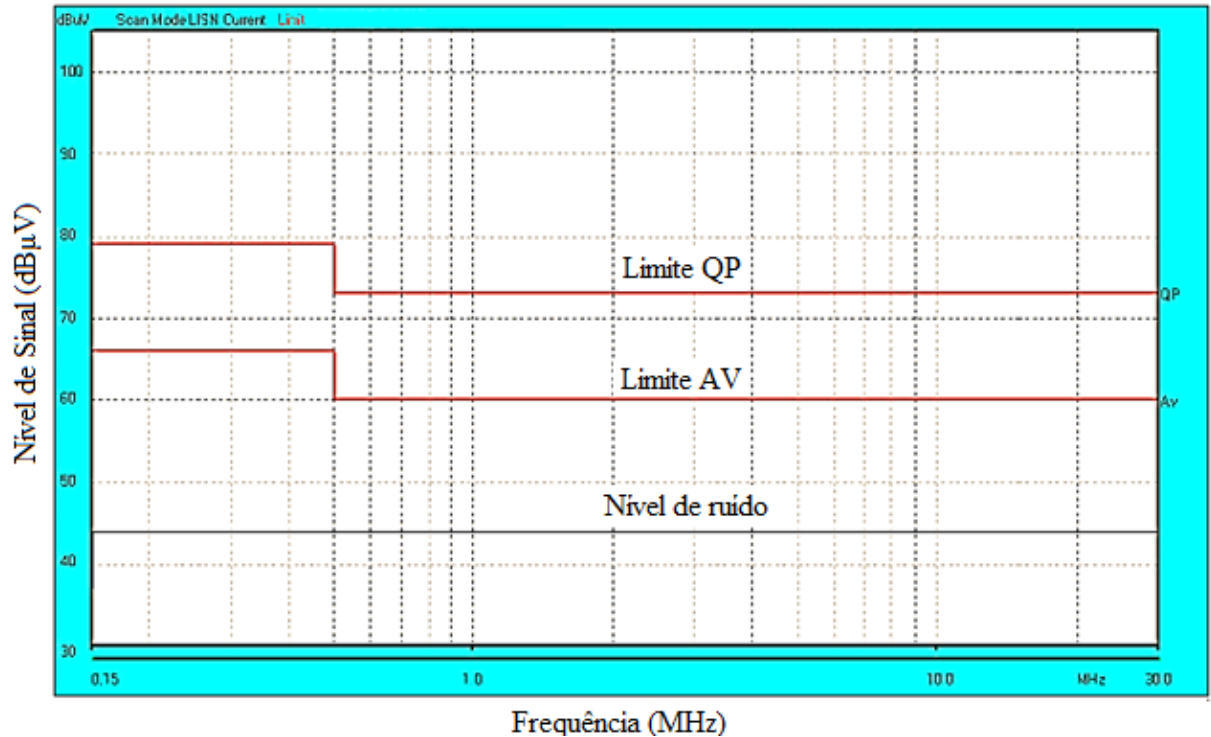


Figura 25 - Ruído ambiente no terminal de alimentação CC positivo

Conforme pode ser observado através da Figura 25, não há presença de ruídos consideráveis no terminal de alimentação CC positivo, que possam afetar os resultados das medições de emissão de perturbações eletromagnéticas pelo inversor fotovoltaico avaliado.

A Figura 26 mostra o espectro de frequência do ruído ambiente no terminal de alimentação negativo, medido no lado CC (entre a fonte de potência CC e a entrada do inversor fotovoltaico avaliado), antes da entrada em operação do inversor fotovoltaico.

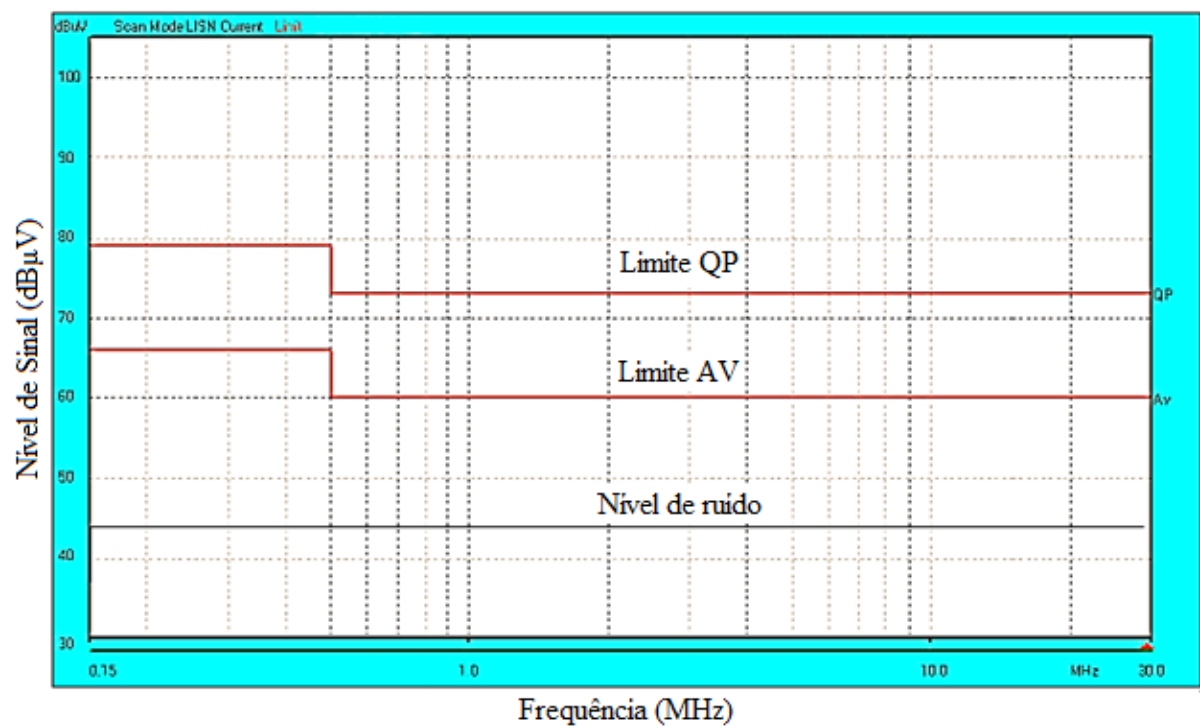


Figura 26 - Ruído ambiente no terminal de alimentação CC negativo

Conforme pode ser observado através da Figura 26, não há presença de ruídos consideráveis, no terminal de alimentação CC negativo, que possam afetar os resultados das medições de emissão de perturbações eletromagnéticas pelo inversor fotovoltaico avaliado.

A Figura 27 mostra o ruído ambiente de uma das fases (F1) dos terminais da rede CA, medido antes da entrada em operação do inversor fotovoltaico.

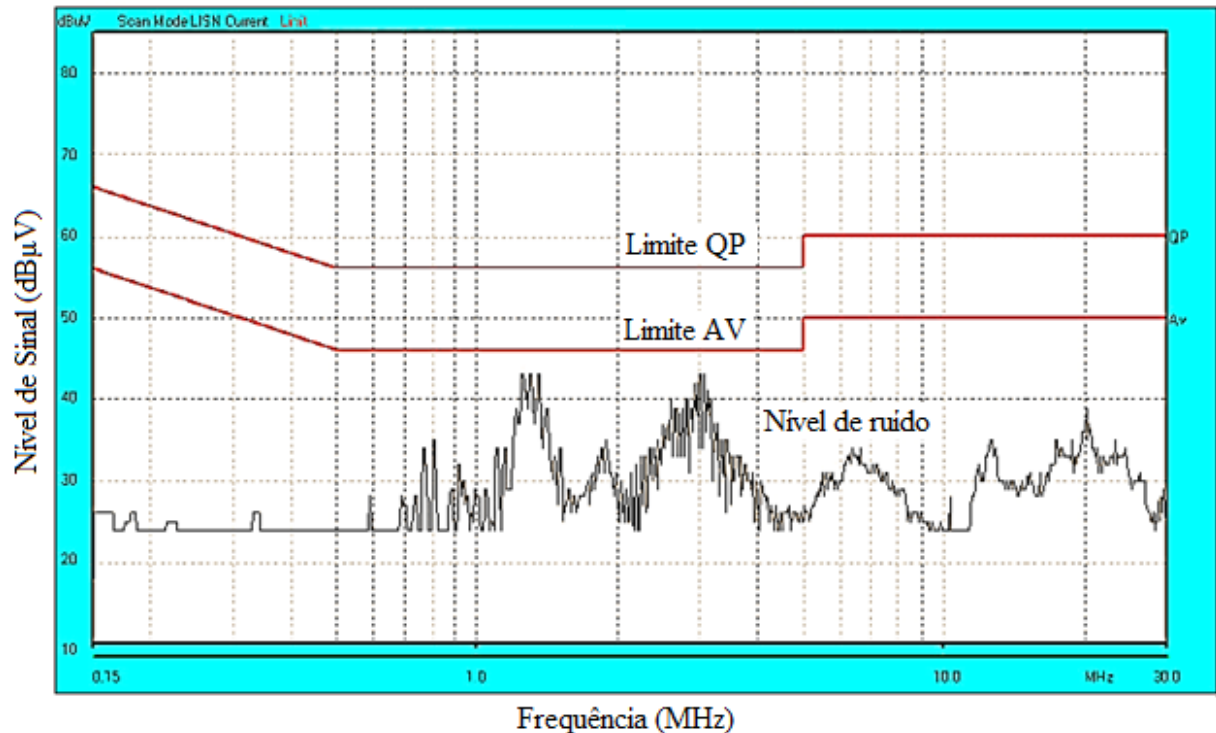


Figura 27 - Ruído ambiente em F1 dos terminais de alimentação CA

Conforme pode ser observado pela análise do gráfico apresentado na Figura 27, a curva do ruído ambiente no terminal F1 da rede CA, mostra a presença de alguns picos de perturbações eletromagnéticas, tal resultado era esperado devido à utilização de uma rede de distribuição de energia elétrica com a presença de diversos equipamentos de comportamento não linear conectados, injetando na mesma perturbações de diferentes amplitudes e em diferentes faixas de frequência.

Vale ressaltar que tal resultado de ruído ambiente já é o resultado com a adoção de algumas medidas de mitigação de perturbações eletromagnéticas externas, onde, além da blindagem do ambiente de ensaios visando à mitigação de interferências eletromagnéticas irradiadas, que podem ser acopladas aos terminais de alimentação interferindo nos resultados das medições, também foram inseridos outros mecanismos de filtragem dos sinais espúrios que são conduzidos pela rede de energia elétrica, são eles: um *nobreak online*, que recebe um sinal de entrada CA da rede de energia, o retifica e, novamente o inverte gerando uma onda CA independente das características de qualidade do sinal de entrada, funcionando assim como uma espécie de filtro para as perturbações que chegam pela rede de distribuição; um filtro de linha, que visa mitigar as interferências eletromagnéticas nas faixas de frequência de 9 kHz a 30 MHz e; dois transformadores isoladores de 1:1, também operando como filtros para as interferências eletromagnéticas conduzidas. Além de tais medidas, a própria LISN que

faz parte dos equipamentos necessários à realização dos ensaios de EMC, também opera como um filtro, conforme abordado na seção 5.3 deste trabalho.

Ainda com diversas medidas para mitigação de interferências eletromagnéticas conduzidas pela rede de alimentação CA, não é possível se ter um espectro completamente isento de ruídos, uma vez que não se tem o controle sobre todos os equipamentos ruidosos que compõem a rede elétrica, as medidas visam controlar e mitigar os níveis dessas interferências, por tais razões é especificado pela norma internacional IEC CISPR 16-2-1 [97], que os níveis QP e AV do ruído ambiente devem estar a pelo menos 20 dB abaixo do limite de interferência especificado para o equipamento a ser avaliado, o que foi garantido para a realização deste trabalho, pelas medidas de mitigação adotadas, citadas anteriormente.

A Figura 28 mostra o ruído ambiente de uma das fases (F2) dos terminais da rede CA, medido antes da entrada em operação do inversor fotovoltaico.

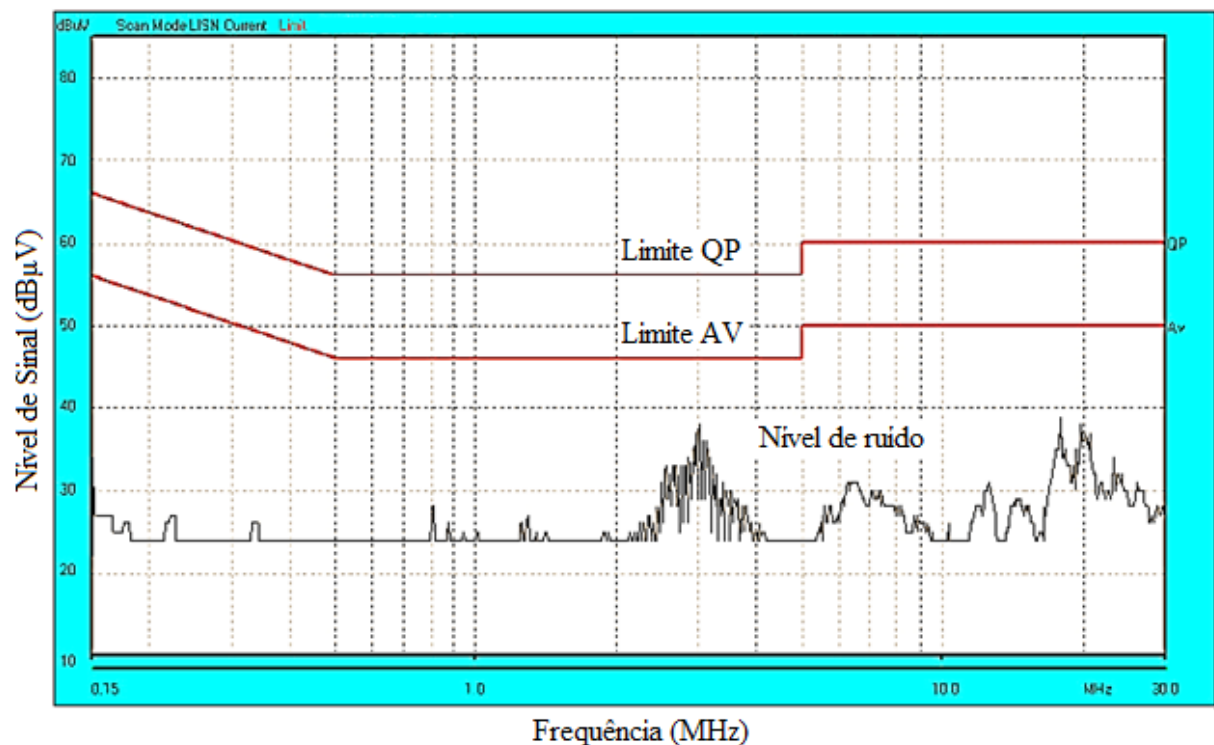


Figura 28 - Ruído ambiente em F2 dos terminais de alimentação CA

Conforme pode ser observado pela análise da Figura 28, similarmente ao ocorrido no terminal F1 da rede CA, há presença de alguns picos de perturbações eletromagnéticas no espectro de frequência do terminal F2, o que ocorre devido à característica do sinal CA recebido a partir da rede de distribuição de energia elétrica, sendo garantido para este trabalho a margem de 20 dB entre o limite da norma adotada e a amplitude QP e AV do sinal do ruído ambiente.

6.2. Emissão de Perturbações Eletromagnéticas pelo Inversor Fotovoltaico

Nesta seção são apresentados os resultados das medições de perturbações eletromagnéticas emitidas pelo inversor fotovoltaico avaliado, na faixa de frequência de 150 kHz a 30 MHz, conforme especificado pela norma internacional IEC 61000-6-3 [87].

De forma similar ao apresentado na seção anterior, As curvas apresentadas fazem referência ao espectro de frequência gerado a partir do analisador de espectro em comunicação com o *software* do mesmo (*software* de análise de EMC), onde a curva apresentada em cor preta representa a curva de perturbação medida, de acordo com cada etapa da medição, enquanto as curvas apresentadas em cor vermelha representam os limites especificados em norma, conforme exposto na Tabela 1, em que “QP” representa a curva dos limites de interferências eletromagnéticas medidas com o detector de quase pico, e “AV” representa a curva dos limites de interferências eletromagnéticas medidas com o detector média. Em todos os gráficos gerados através do *software* de análise de EMC associado ao analisador de espectro, o eixo x faz referência aos valores de frequência em MHz e o eixo y, aos valores de tensão em dB μ V.

As Tabelas 4 e 5 apresentam os resultados de perturbações eletromagnéticas medidas nos pontos de frequências contendo os picos de maiores amplitudes, com os detectores de quase pico e média, respectivamente, no terminal positivo da alimentação CC, após entrada em operação do inversor fotovoltaico avaliado, a uma tensão de entrada CC de 100 V, resultando em uma injeção de potência em torno de 90 W.

Tabela 4 - Perturbações eletromagnéticas medidas com detector de quase pico no terminal positivo

Frequência (MHz)	Valor QP Medido (dB μ V)	Limite Norma (dB μ V)	Margem (dB)
0,1567	68	79	11
0,1801	67	79	12
0,2016	72	79	7
0,2208	60	79	19
0,2506	63	79	16
0,5060	62	73	11
0,7545	61	73	12

Tabela 5 - Perturbações eletromagnéticas medidas com detector de média no terminal positivo

Frequência (MHz)	Valor AV Medido (dBμV)	Limite Norma (dBμV)	Margem (dB)
0,1567	66	66	0
0,1801	64	66	2
0,2016	67	66	-1
0,2208	58	66	8
0,2506	58	66	8
0,5060	58	60	2
0,7545	58	60	2

Os valores de margem apresentados nas Tabelas 4 e 5 representam o valor do limite especificado pela norma internacional adotada subtraído do valor de perturbação medido e, conforme se pode observar, para o terminal positivo da parte CC, um ponto de frequência apresentou valor superior ao limite especificado em norma, para a medição com detector de média, ultrapassando em 1 dB o valor estabelecido, na frequência de 0,2016 MHz. Tal ultrapassagem do valor limite, ainda que apenas em um ponto, seria suficiente para a não conformidade do equipamento para os requisitos de EMC, tornando-o uma potencial fonte de interferência nociva para o funcionamento de equipamentos sensíveis e, consequentemente, classificando-o como inapto à obtenção de selo de certificação em países que possuem regulamentação para EMC.

A representação gráfica dos resultados para o terminal positivo da alimentação CC é apresentada na Figura 29.

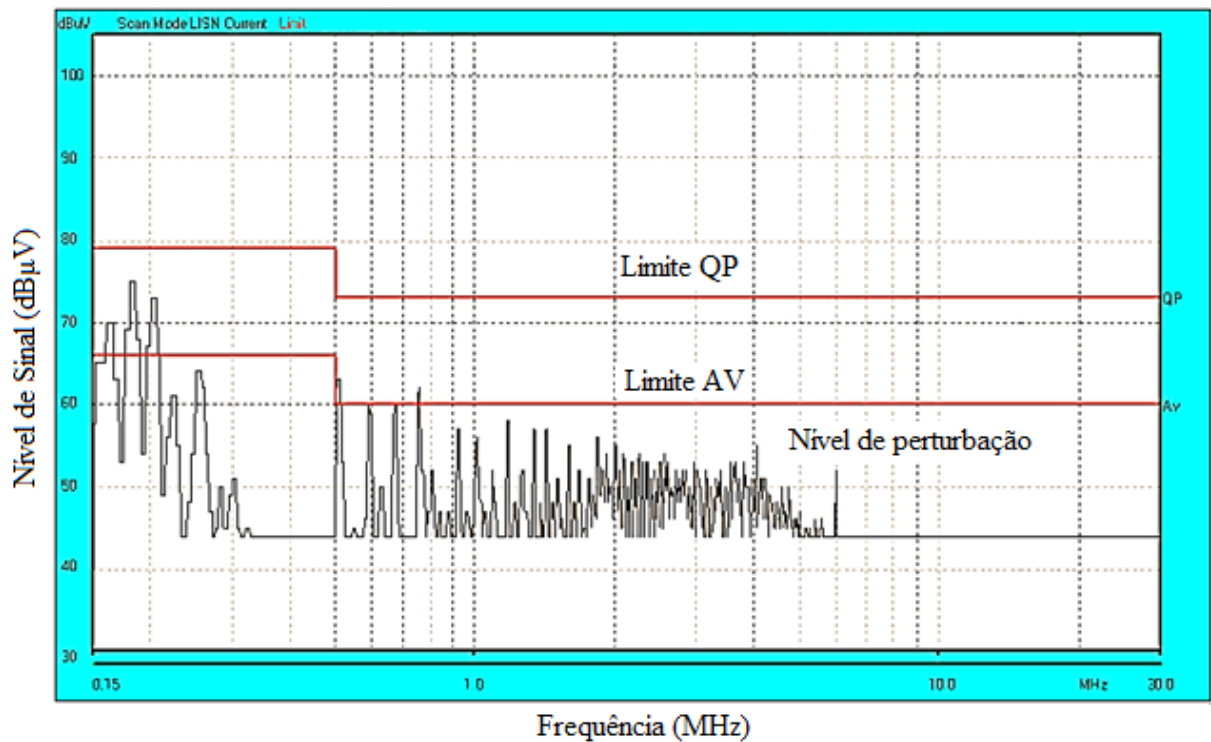


Figura 29 - Espectro de frequência medido no terminal positivo da alimentação CC

As Tabelas 6 e 7 apresentam os resultados de perturbações eletromagnéticas medidas nos pontos de frequências contendo os picos de maiores amplitudes, com os detectores de quase pico e média, respectivamente, no terminal negativo da alimentação CC, após entrada em operação do inversor fotovoltaico avaliado, a uma tensão de entrada CC de 100 V, resultando em uma injeção de potência em torno de 90 W.

Tabela 6 - Perturbações eletromagnéticas medidas com detector de quase pico no terminal negativo

Frequência (MHz)	Valor QP Medido (dBμV)	Limite Norma (dBμV)	Margem (dB)
0,1617	69	79	10
0,1803	74	79	5
0,1986	74	79	5
0,2476	63	79	16
0,5048	62	73	11
0,5060	61	73	12
0,5185	61	73	12

Tabela 7 - Perturbações eletromagnéticas medidas com detector de média no terminal negativo

Frequência (MHz)	Valor AV Medido (dBμV)	Limite Norma (dBμV)	Margem (dB)
0,1617	66	66	0
0,1803	69	66	-3
0,1986	70	66	-4
0,2476	58	66	8
0,5048	58	60	2
0,5060	58	60	2
0,5185	57	60	3

Conforme se pode observar a partir da análise da coluna contendo os valores de margem entre o limite estabelecido em norma e o valor de perturbação eletromagnética medido, para o terminal negativo da alimentação CC ocorre ultrapassagem do valor limite da norma em dois pontos de frequência, nas medições com o detector de média. A representação gráfica de tais resultados para o terminal negativo da alimentação CC é apresentada na Figura 30.

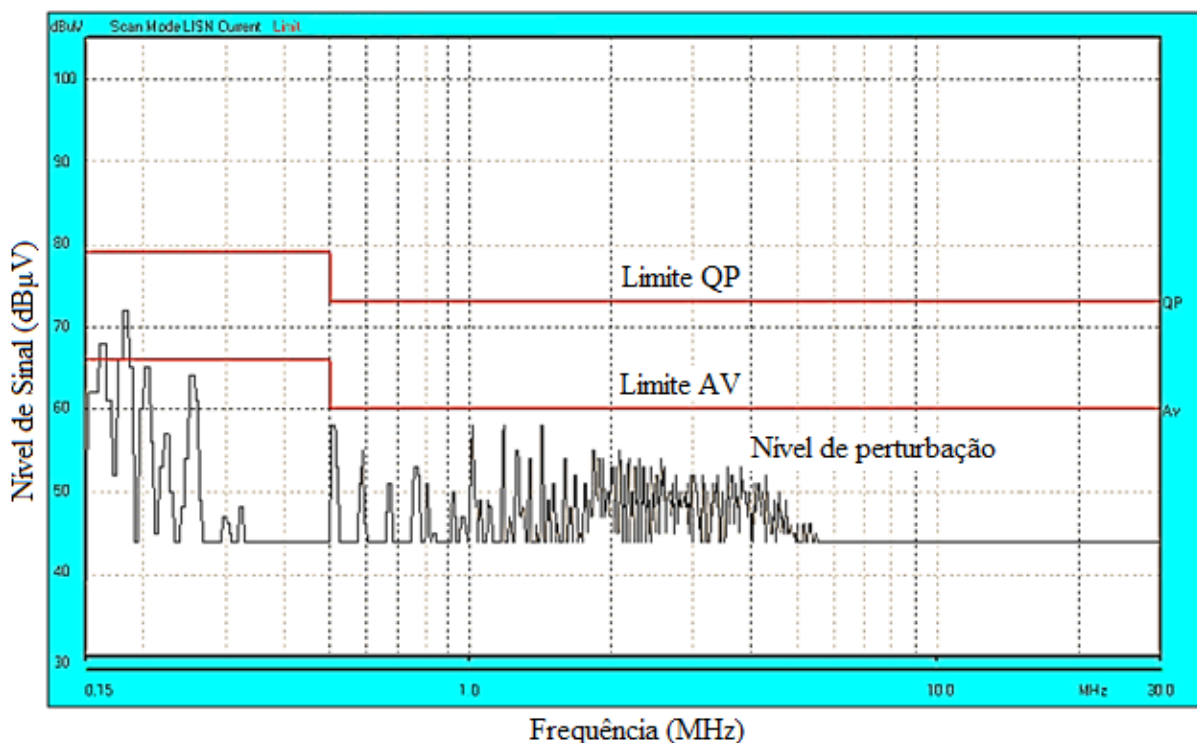


Figura 30 - Espectro de frequência medido no terminal negativo da alimentação CC

As Tabelas 8 e 9 apresentam os resultados de perturbações eletromagnéticas medidas nos pontos de frequências contendo os picos de maiores amplitudes, com os detectores de

quase pico e média, respectivamente, no terminal F1 da rede de alimentação CA, após entrada em operação do inversor fotovoltaico avaliado, a uma tensão de entrada CC de 100 V, resultando em uma injeção de potência em torno de 90 W.

Tabela 8 – Perturbações eletromagnéticas medidas com detector de quase pico em F1

Frequência (MHz)	Valor QP Medido (dBμV)	Limite Norma (dBμV)	Margem (dB)
0,1678	68	65	-3
0,2481	70	62	-8
0,3342	70	59	-11
0,4998	80	56	-24
0,5861	77	56	-21
0,6680	76	56	-20
0,7525	74	56	-18

Tabela 9 – Perturbações eletromagnéticas medidas com detector de média em F1

Frequência (MHz)	Valor AV Medido (dBμV)	Limite Norma (dBμV)	Margem (dB)
0,1678	65	55	-10
0,2481	67	52	-15
0,3342	67	49	-18
0,4998	75	46	-29
0,5861	73	46	-27
0,6680	72	46	-26
0,7525	70	46	-24

Conforme pode ser observado pela análise das tabelas, os valores de perturbações eletromagnéticas emitidas pelo inversor fotovoltaico avaliado ultrapassam os limites especificados em norma, tanto para a medição com detector de quase pico (QP) quanto para a medição com detector de média (AV), tais resultados são demonstrados na Figura 31.

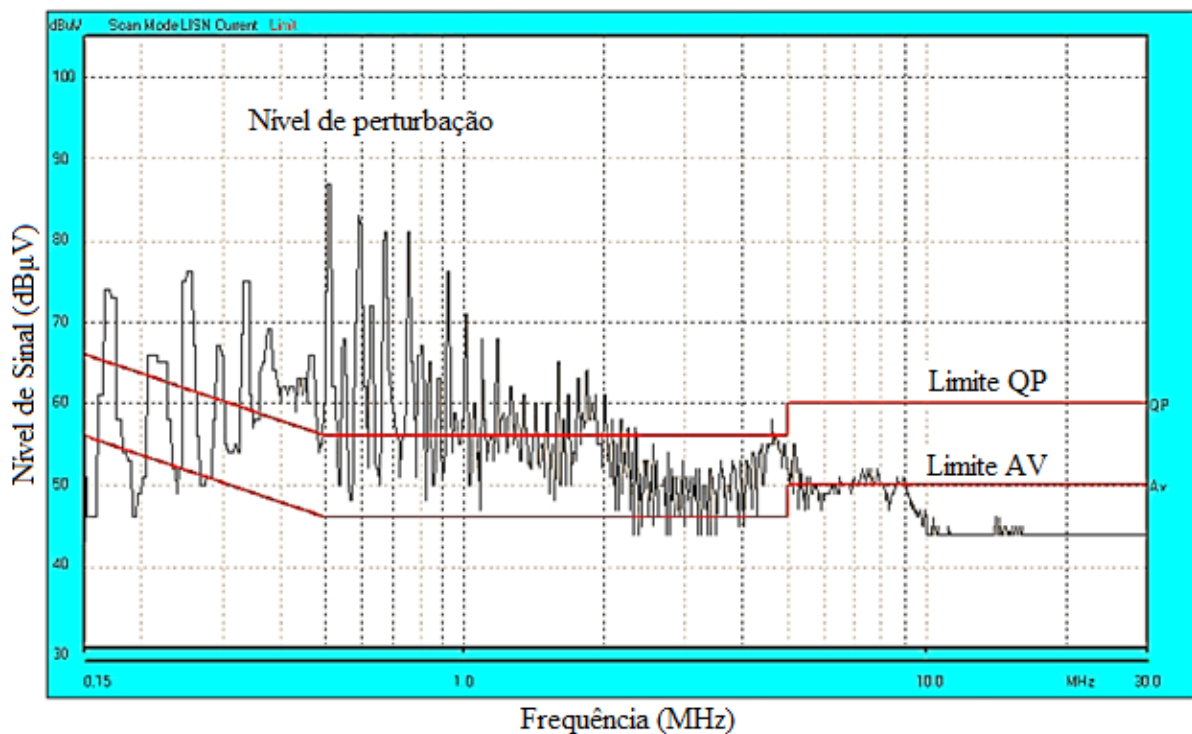


Figura 31 – Espectro de frequência medido no terminal F1 da rede CA

Conforme pode ser observado pela análise da Figura 31, os níveis das perturbações eletromagnéticas emitidas pelo inversor fotovoltaico avaliado, no terminal F1 da rede CA, se mostram acima dos limites estabelecidos em norma tanto para o detector de quase pico (QP) quanto para o detector de média (AV).

As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados de perturbações eletromagnéticas medidas nos pontos de frequências contendo os picos de maiores amplitudes, com os detectores de quase pico e média, respectivamente, no terminal F2 da rede de alimentação CA, após entrada em operação do inversor fotovoltaico avaliado, a uma tensão de entrada CC de 100 V, resultando em uma injeção de potência em torno de 90 W.

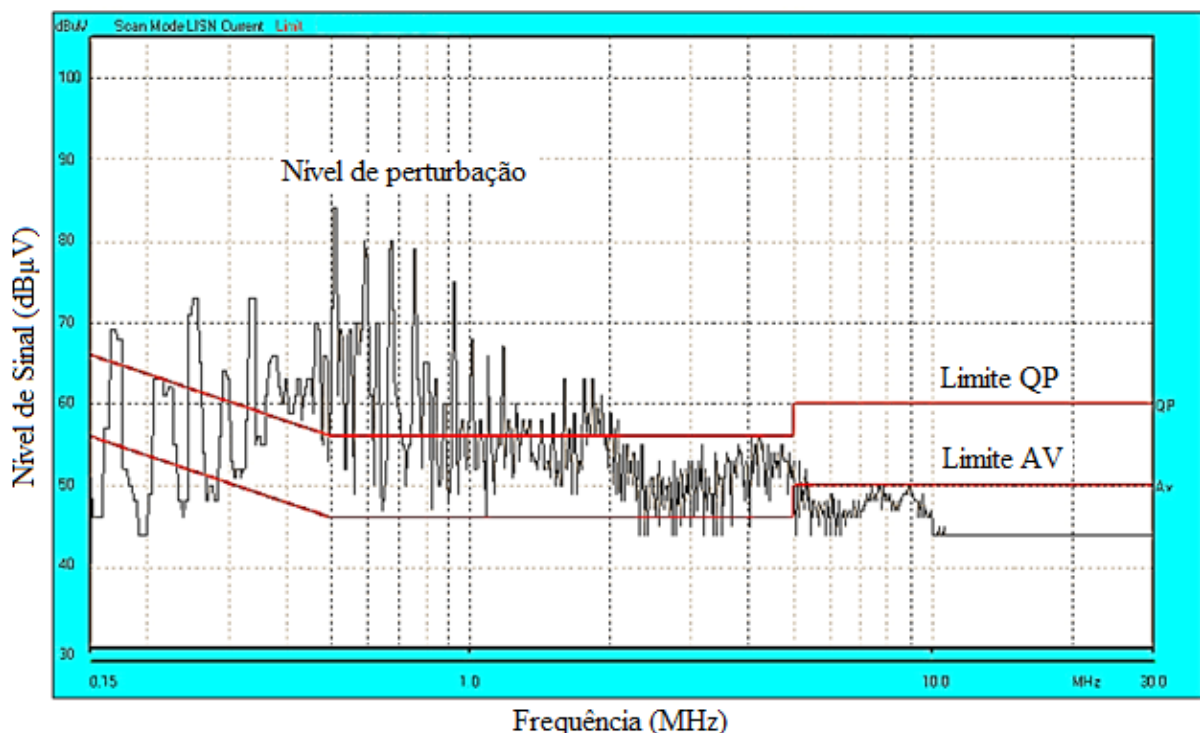
Tabela 10 – Perturbações eletromagnéticas medidas com detector de quase pico em F2

Frequência (MHz)	Valor QP Medido (dBμV)	Limite Norma (dBμV)	Margem (dB)
0,1679	44	65	21
0,2482	46	62	16
0,3323	44	59	15
0,5010	49	56	7
0,5928	60	56	-4
0,6660	54	56	2
0,7545	58	56	-2

Tabela 11 – Perturbações eletromagnéticas medidas com detector de média em F2

Frequência (MHz)	Valor AV Medido (dB μ V)	Limite Norma (dB μ V)	Margem (dB)
0,1679	44	55	11
0,2482	45	52	7
0,3323	44	49	5
0,5010	48	46	-2
0,5928	58	46	-12
0,6660	53	46	-7
0,7545	57	46	-11

Conforme mostrado nas Tabelas 10 e 11, os resultados de perturbações eletromagnéticas emitidas pelo inversor fotovoltaico no terminal F2 da rede CA mostraram menores amplitudes que as emitidas no terminal F1, entretanto, o valor limite especificado em norma ainda é ultrapassado em alguns pontos de frequência, como pode ser visto pela análise da coluna contendo os valores de margem. O resultado gráfico é apresentado na Figura 32.

**Figura 32 - Espectro de frequência medido no terminal F2 da rede CA**

Pode se observar pela análise da Figura 31 que, semelhantemente ao ocorrido em F1, os níveis das perturbações eletromagnéticas emitidas pelo inversor fotovoltaico avaliado, no

terminal F2 da rede CA, se mostram acima dos limites estabelecidos em norma tanto para o detector de quase pico (QP) quanto para o detector de média (AV).

6.3. Resultados da Simulação de EMI Conduzida Emitida pelo Inversor Fotovoltaico Modelado

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos através de simulação, no *software* Simulink – MATLAB®, de emissão de EMI por um modelo de inversor fotovoltaico monofásico *on-grid*, cujos parâmetros foram ajustados conforme dados nominais do inversor real avaliado neste estudo.

Visto que resultados de uma simulação podem se distanciar consideravelmente dos resultados reais medidos devido ao uso de componentes de circuitos projetados que nem sempre representam fielmente sua operação nas condições reais, e também pelo fato de o desempenho do equipamento, em termos de compatibilidade eletromagnética, depende muito dos componentes internos aplicados em seu projeto, o que torna ainda mais difícil a representação fiel do equipamento em um software, realizou-se inicialmente uma simulação com o nível de irradiância capaz de prover o mesmo valor de potência gerada no inversor real durante a medição, a saber, 90 W, de forma a possibilitar a comparação entre o resultado obtido pelo sistema simulado e o resultado obtido pela medição em sistema real.

O resultado da simulação do inversor fotovoltaico operando com geração de 90 W é apresentado na Figura 33.

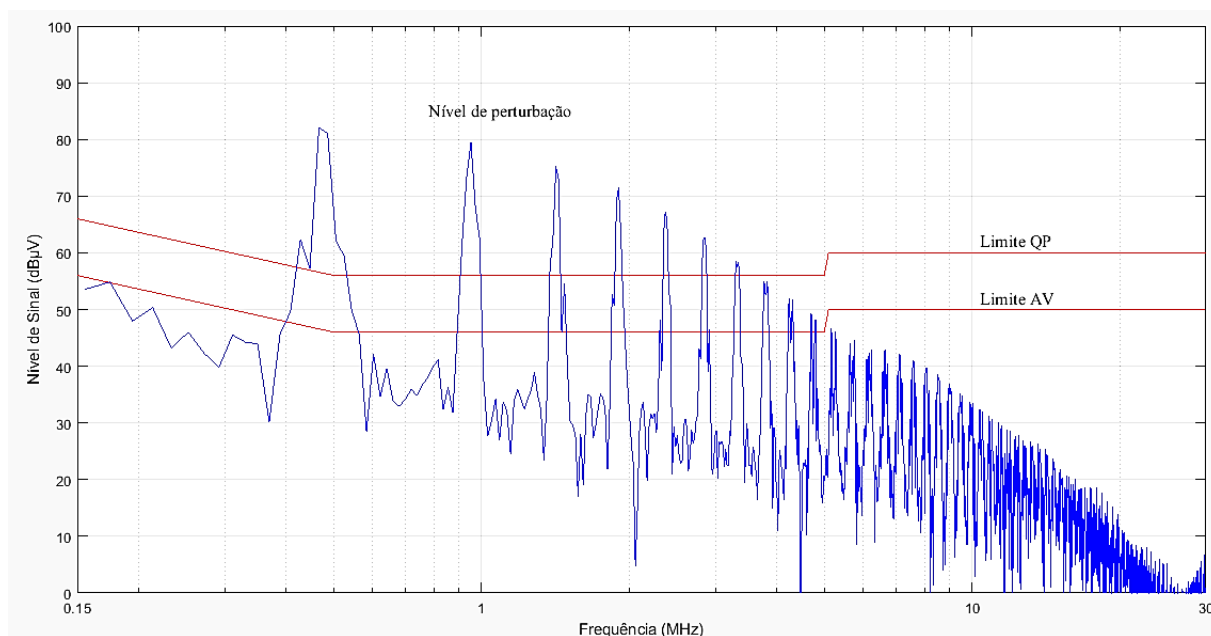


Figura 33 – Simulação de inversor fotovoltaico monofásico *on-grid* operando com geração de 90 W

Comparando o resultado da medição real apresentado na Figura 31 com o resultado da simulação apresentado na Figura 33, pode-se observar que, na faixa de frequência que apresentou níveis de perturbações mais críticos, de 500 kHz a 1 MHz, a diferença de valores dos maiores picos entre resultados medidos e simulados é da ordem de 2 dB μ V aproximadamente, sendo os maiores valores observados para os resultados medidos no sistema real para esta faixa; esta foi a banda de frequência que apresentou os resultados mais insatisfatórios quando comparados aos limites de perturbações especificados pela norma adotada para análise.

A faixa de frequência a partir de 1 MHz nos resultados da simulação apresentou característica decrescente do nível de sinal de perturbação emitida devido ao comportamento ideal dos componentes de chaveamento do inversor fotovoltaico modelado, diferente dos resultados medidos no sistema real que apresentam característica de nível de sinal não decrescente, mas atenuada em relação à faixa de frequência anterior; entretanto, como esta faixa não é a que apresentou as perturbações mais críticas nas medições do sistema real, a parcela crucial para análise do desempenho do inversor quanto à EMC não abrange tais frequências.

Já a faixa de frequência de 150 kHz a 500 kHz, anterior à faixa mais crítica do espectro do inversor, apresenta alguns pontos críticos de perturbação eletromagnética na medição do sistema real, tais pontos são observados com um sinal mais atenuado nos resultados da simulação, o que limita a análise do inversor pela simulação nesta faixa específica, no entanto, conforme pode ser observado pelos resultados apresentados nas Tabelas 8 a 11, tal faixa de frequência não é a que apresenta os níveis de perturbações eletromagnéticas mais críticos do equipamento avaliado.

Desta forma, a comparação entre medição real e simulação se mostra plausível e aceitável para análise da faixa de frequência que apresenta os níveis de perturbações mais críticos das medições no sistema real, a saber, a faixa de frequência de 500 kHz a 1 MHz.

Feita a comparação entre os resultados da modelagem simulada e os resultados do sistema real medido, a segunda etapa da simulação computacional foi a análise da modelagem com os parâmetros ajustados de forma a se obter a potência nominal máxima de geração do inversor fotovoltaico. Os resultados desta segunda análise são apresentados na Figura 34.

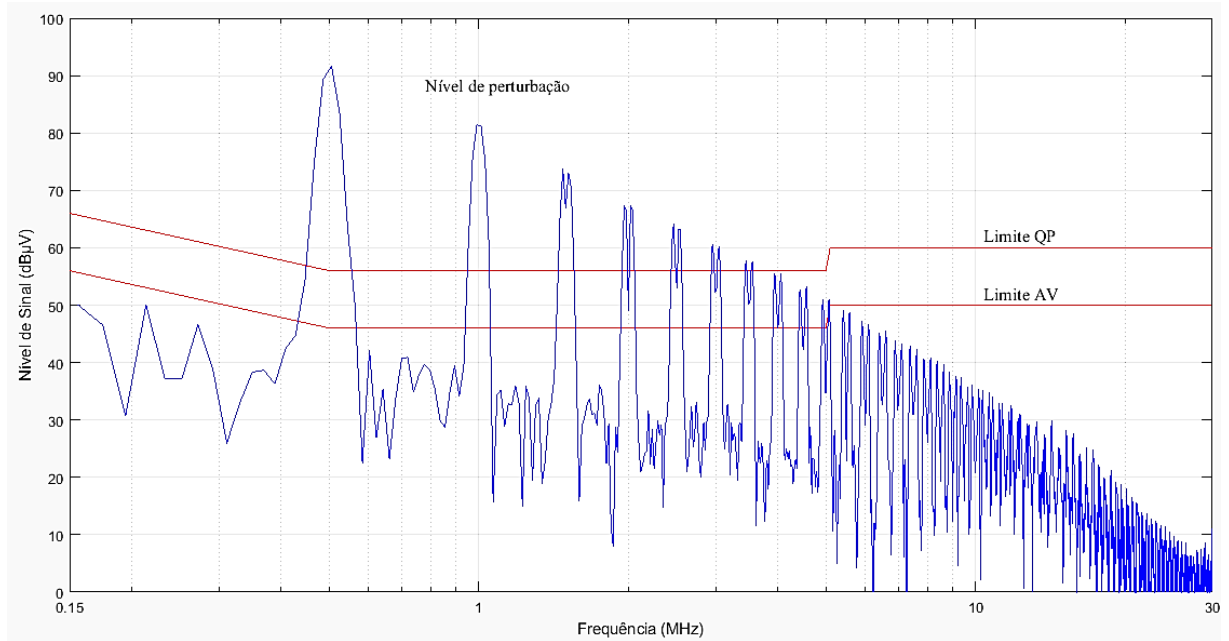


Figura 34 - Simulação de inversor fotovoltaico monofásico *on-grid* operando com geração de 3000 W

Pela análise do resultado da simulação à potência nominal de 3000 W do inversor fotovoltaico modelado, pode-se observar que houve, no valor de pico em 500 kHz, um aumento de cerca de 10 dBμV em comparação ao resultado da simulação à potência de 90 W, apontando para um pior desempenho do inversor fotovoltaico modelado em níveis de potências mais elevados, cuja ocorrência pode também ser esperada para o inversor fotovoltaico real medido, uma vez que este apresentou características de desempenho semelhantes ao inversor modelado para baixa potência de operação.

6.4. Resumo dos Resultados Obtidos

A partir dos resultados obtidos pelas medições com os detectores de quase pico e média apresentados na seção anterior deste trabalho, é possível fazer uma síntese contendo o parecer do desempenho do inversor fotovoltaico real avaliado neste estudo, de acordo com as especificações da norma internacional adotada (IEC 61000-6-3 [87]), para uma condição de operação considerando um período de baixa incidência de irradiação solar nos painéis fotovoltaicos, ocasionando um baixo nível de geração de energia, em torno de 90 W. O resumo dos resultados obtidos é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Resumo e parecer acerca dos resultados obtidos das medições

Ponto de Avaliação	Parecer
Terminal Positivo (CC)	Não Conforme
Terminal Negativo (CC)	Não Conforme
Terminal F1 (CA)	Não Conforme
Terminal F2 (CA)	Não Conforme

A partir dos resultados apresentados, pode-se observar que o inversor fotovoltaico avaliado não atende aos requisitos internacionais de EMC, emitindo perturbações eletromagnéticas acima dos limites especificados tanto para a avaliação do lado em corrente contínua, quanto para a avaliação do lado em corrente alternada (rede de distribuição de energia). Os piores resultados foram, no entanto, observados para o lado de corrente alternada, demonstrando que tais equipamentos podem, quando não certificados para EMC, apresentar perturbações eletromagnéticas nocivas a equipamentos sensíveis como os eletromédicos e sistemas de telecomunicações, por exemplo.

Tais resultados são, de certa forma, esperados, considerando a não existência de certificação compulsória de EMC no país. Conforme mostram diversos estudos realizados nos últimos anos [35], [39], [56], [112], [113], os inversores fotovoltaicos são potenciais equipamentos causadores de interferências eletromagnéticas, que podem, em determinados casos, apresentar níveis não admissíveis para o adequado funcionamento de equipamentos e sistemas sensíveis a tais perturbações.

Quanto ao desempenho do inversor fotovoltaico avaliado neste estudo, quando operando em sua potência nominal máxima de geração, as medições no sistema real não foram possíveis devido à limitação de máxima potência da fonte CC disponível para realização deste estudo. De forma a se obter uma estimativa do funcionamento do equipamento também para potências mais elevadas de geração, foi realizada uma simulação no *software* Simulink – MATLAB®, considerando para as configurações do modelo os mesmos parâmetros de potência nominal, tensão CA e tensão CC do inversor fotovoltaico real medido. Os resultados obtidos a partir das simulações mostraram desempenho similar ao sistema real para a simulação em baixa potência (90 W), na faixa de frequência mais crítica quanto às perturbações eletromagnéticas medidas, e mostraram um pior desempenho para a simulação em potência nominal máxima (3000 W), com elevação de cerca de 12% nas perturbações eletromagnéticas presentes na faixa de frequência mais crítica analisada (entre 500 kHz e 1 MHz).

7. Conclusões

Este estudo traz uma avaliação da compatibilidade eletromagnética, quanto à emissão de perturbações eletromagnéticas conduzidas, de um inversor fotovoltaico comercializado no mercado brasileiro, tendo em vista que tais equipamentos não são certificados nacionalmente quanto aos níveis de emissão de interferências eletromagnéticas. Considerando as novas tendências no mercado brasileiro de energia elétrica, onde ocorre um crescente interesse no aproveitamento do recurso solar fotovoltaico para geração de energia elétrica, tanto por parte de instalações comerciais quanto de instalações residenciais, os inversores fotovoltaicos são equipamentos a serem cada vez mais introduzidos nas redes de distribuição de energia ou até mesmo em sistemas isolados que podem estar alimentando cargas sensíveis a perturbações eletromagnéticas.

Atualmente, conforme consta na Matriz de Energia Elétrica Brasileira, existem 3.885 usinas de geração fotovoltaica instaladas no Brasil, contribuindo com 2.679,046 MW de capacidade instalada [114], contra uma participação de 1 MW de capacidade instalada no ano de 2010 [1], o que mostra o considerável aumento no uso da tecnologia de geração solar fotovoltaica ocorrido na última década.

Por conta de tais desdobramentos na área de geração solar fotovoltaica e consequente aumento na introdução dos inversores fotovoltaicos nas redes de distribuição de energia elétrica brasileiras, torna-se importante a certificação desses equipamentos quanto a todos os parâmetros de desempenho definidos por órgãos regulamentadores internacionais.

A compatibilidade eletromagnética é na atualidade um critério de desempenho de fundamental importância a ser atendido pelos inversores fotovoltaicos, uma vez que, a sociedade caminha para uma realidade tecnológica onde a automação e integração de sistemas está cada vez mais presente, de forma que os equipamentos precisam ser projetados de maneira a operarem compativelmente uns com os outros, ou seja, sem que a operação de um equipamento interfira no adequado funcionamento de outro, e nesse aspecto todas as questões envolvendo sinais de radiofrequência devem estar em pauta para certificação pelos órgãos regulamentadores nacionais.

Considerando tais fatores, neste trabalho é realizada a avaliação da compatibilidade eletromagnética de um modelo de inversor fotovoltaico disponível no mercado brasileiro, com o objetivo de analisar se tal equipamento, sem uma certificação nacional de EMC, está em conformidade com os padrões adotados internacionalmente para tal parâmetro. Foi considerado um cenário de baixo nível de geração fotovoltaica (90 W) com o objetivo de

avaliar a compatibilidade do equipamento nos períodos de baixa incidência de irradiação solar, considerando que tais períodos ocorrerão ao menos duas vezes em um dia comum de geração fotovoltaica e, o atendimento à EMC foi avaliado apenas quanto aos níveis de perturbações eletromagnéticas conduzidas, não sendo contemplada neste trabalho a avaliação quanto a perturbações eletromagnéticas radiadas. Foram adotados os limites de perturbações eletromagnéticas definidos na norma internacional IEC 61000-6-3 [87] e as configurações de ensaios definidas na norma internacional IEC CISPR 16-2-1 [97].

Os resultados obtidos a partir das medições realizadas, apresentados no capítulo anterior, mostraram que o inversor fotovoltaico avaliado não atendeu às especificações internacionais de EMC para nenhum dos critérios avaliados.

Quanto à análise para operação em potência superior, uma simulação foi realizada a fim de avaliar o desempenho de um modelo de inversor, cujos parâmetros foram configurados de forma a representar o inversor fotovoltaico real medido em laboratório. Os resultados da simulação mostraram também um desempenho insatisfatório quanto à EMC para a operação na potência nominal máxima de geração do inversor (3000 W). A partir da simulação realizada também foi possível concluir que a modelagem simulada apresentou boa representatividade do sistema real medido, quando comparados os resultados obtidos pela simulação e pela medição real a 90 W; apesar das limitações existentes no uso de componentes ideais projetados por *softwares* para representação de sistemas reais com características de funcionamento não ideais, pode-se dizer que os resultados simulados foram satisfatórios, dada a proximidade com os resultados reais medidos.

Em suma, a ausência de uma certificação nacional dos parâmetros de EMC deixa uma lacuna que permite a entrada de equipamentos ruidosos no mercado brasileiro, situação que pode vir a ocasionar problemas quando da operação integrada desses equipamentos com outros sistemas de energia e/ou telecomunicações.

A introdução de equipamentos ruidosos em sistemas que operam de forma integrada e/ou automatizada pode ocasionar danos e mau funcionamento a equipamentos sensíveis que operam na mesma faixa de frequência das perturbações geradas pelos equipamentos emissores. Atualmente, são diversos os equipamentos e sistemas susceptíveis a sofrerem os impactos negativos de ambientes/redes de energia com espectro característico demasiadamente ruidoso, tais como equipamentos eletromédicos, de telecomunicações e os diversos equipamentos eletroeletrônicos que estão cada vez mais presentes em conexões às redes de energia e de telecomunicações.

Um exemplo de sistema que pode vir a sofrer degradação em seu funcionamento devido a perturbações eletromagnéticas provenientes de um inversor fotovoltaico não certificado para EMC é o sistema *Power Line Communication* (PLC), no qual as perturbações eletromagnéticas podem ocasionar perdas ou atrasos de pacotes de dados, conforme abordado em [103] (artigo apresentado no Anexo A desta dissertação), o que poderia comprometer, por exemplo, a operação de medidores de energia que se utilizam de tais sistemas para transmissão de dados. Diversos estudos realizados na última década trazem abordagens sobre efeitos de perturbações eletromagnéticas em medidores de energia [44], [114]–[121]. Tais efeitos, que podem comprometer o desempenho desses dispositivos que operam no mesmo ambiente e até mesmo em conjunto com os inversores fotovoltaicos, reforçam ainda mais a importância de certificação compulsória para tais equipamentos.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa deste estudo, são feitas as seguintes sugestões:

- Avaliação de outros inversores fotovoltaicos, de diferentes fabricantes, disponíveis no mercado brasileiro
- Medição em sistema real de perturbações eletromagnéticas emitidas por inversor fotovoltaico operando em sua máxima potência de geração
- Avaliação de EMC em inversores fotovoltaicos considerando também os níveis de interferências eletromagnéticas radiadas
- Avaliação de EMC em inversores híbridos e *off-line* comercializados no mercado brasileiro
- Proposição de filtro EMI para mitigação de interferências eletromagnéticas emitidas por inversores fotovoltaicos

Referências Bibliográficas

- [1] MME - Ministério de Minas e Energia, “Balanço Energético Nacional”. EPE, 2019.
- [2] MME - Ministério de Minas e Energia, “Balanço Energético Nacional”. EPE, 2020.
- [3] MME - Ministério de Minas e Energia, “Plano Nacional de Energia 2030”. EPE, 2007.
- [4] GTES - CEPEL, *Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos*. Rio de Janeiro - Brasil: CRESESB, 2014.
- [5] R. Sauaia, “Potencial Solar Brasileiro Poderia Atender Demanda de Energia Elétrica de 170 Brasis”, maio 28, 2018.
- [6] Absolar - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, “Potencial Solar Brasileiro Poderia Atender Demanda de Energia Elétrica de 170 Brasis”, *ABSOLAR*, 2018. <http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/energia-fotovoltaica-atinge-marca-de-350mw-em-micro-e-minigeracao-distribuida-no-brasil.html> (acessado jul. 12, 2019).
- [7] EPE - Empresa de Pesquisa Energética, “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2013”. EPE, 2013, Acessado: maio 27, 2020. [Online].
- [8] EPE - Empresa de Pesquisa Energética, “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2019”. EPE, 2019, Acessado: maio 27, 2020. [Online].
- [9] IEA - Technology Collaboration Programme, “Snapshot of Global PV Markets”. International Energy Agency (IEA), 2020, Acessado: set. 26, 2020. [Online]. Disponível em: https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/04/IEA_PVPS_Snapshot_2020.pdf.
- [10] Our World in Data, “Installed Solar Energy Capacity”, 2020. <https://ourworldindata.org/grapher/installed-solar-pv-capacity?time=2000..2019&country=IND~CHN~BRA~USA~JPN~Europe> (acessado set. 26, 2020).
- [11] MME - Ministério de Minas e Energia, “Balanço Energético Nacional”. EPE, 2018.
- [12] ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica, “Resolução Normativa nº 482, de 17 de Abril de 2012”. 2012, Acessado: jul. 12, 2019. [Online]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>.
- [13] EPE - Empresa de Pesquisa Energética, “Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2014”. EPE, 2014, Acessado: maio 28, 2020. [Online].
- [14] Agencia Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Ranking das Tarifas”, *Ranking das Tarifas*, set. 28, 2020. <https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas> (acessado out. 05, 2020).
- [15] MME - Ministério de Minas e Energia, “Balanço Energético Nacional”. EPE, 2017.

- [16] E. B. Pereira, F. R. Martins, S. L. de Abreu, e R. R  ther, Orgs., *Atlas brasileiro de energia solar*, 1a. edi  o. S  o Jos   dos Campos: INPE, 2006.
- [17] MME - Minist  rio de Minas e Energia, “Energia Solar no Brasil e no Mundo”. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energ  tico - N  cleo de Estudos Estrat  gicos de Energia, 2016.
- [18] A. Goetzberger e V. U. Hoffmann, *Photovoltaic solar energy generation*. Berlin ; New York: Springer, 2005.
- [19] R. Souza, “Os Sistemas de Energia Solar Fotovoltaica. Livro Digital de Introdu  o aos Sistemas Solares”. <http://programaintegradoronline.com.br/wp-content/uploads/2016/03/Livro-Digital-de-Introdu  o-aos-Sistemas-Solares-novo.pdf> (acessado jul. 10, 2019).
- [20] J. Jiraprasertwong e C. Jettanasen, “Electromagnetic interference in photovoltaic system and mitigation of conducted noise at DC side”, in *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Singapore, nov. 2016, p. 915–920, doi: 10.1109/TENCON.2016.7848138.
- [21] Denshi J  h   Ts  shin Gakkai, Org., *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo (EMC’14/Tokyo): Tokyo, Japan, 12 - 16 May 2014*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014.
- [22] J. P. Hertel, I. D. Flintoft, S. J. Porter, e A. C. Marvin, “Measurement of EMI on network cables due to multiple GSM phones”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 42, n   4, p. 358–367, nov. 2000, doi: 10.1109/15.902305.
- [23] A. Nayak e S. Mitra, “Novel methodology to analyze the source causing electromagnetic interference problem in a LASER system”, jul. 2015, p. 41–44, doi: 10.1109/INCEMIC.2015.8055843.
- [24] J. Bai, Y. Shi, e G. Zhao, “Research on electromagnetic interference of vehicle GPS navigation equipment”, out. 2017, p. 1–5, doi: 10.1109/EMC-B.2017.8260366.
- [25] M. S. S. K. Bhargav, B. V. Ramana, K. C. B. Rao, e P. S. Kumar, “Prediction and analysis of electromagnetic interference in radio frequency propagation for transmitter — Receiver pair using LabVIEW”, dez. 2016, p. 1–4, doi: 10.1109/INCEMIC.2016.7921514.
- [26] H. Alnamir, “Study of Low Frequency Electromagnetic Interference Problems in Hospital Environment”, mar. 2019, p. 1–5, doi: 10.1109/ATEE.2019.8724736.

- [27] Huijuan Zhang, Yanting Wang, Shitao Wang, Meng Wu, e Weili Yan, “Forecast and analysis of electromagnetic interference in substation”, maio 2010, p. 1–1, doi: 10.1109/CEFC.2010.5481815.
- [28] D. Pande, “Electromagnetic compatibility problems in mobile communication systems”, 1999, p. 342, doi: 10.1109/ICEMIC.1999.871659.
- [29] H. W. Ott e H. W. Ott, *Electromagnetic compatibility engineering*. Hoboken, N.J: John Wiley & Sons, 2009.
- [30] Elsevier, “Scopus”. <https://www-scopus-com.ez24.periodicos.capes.gov.br/search/form.uri?display=basic&zone=header&origin=> (acessado set. 26, 2020).
- [31] CAPES/MEC, “Portal de Periódicos”. <http://www-periodicos-capes-gov-br.ez24.periodicos.capes.gov.br/>.
- [32] Y. Pavithra e K. Lakshmi, “Performance Analysis of Grid Connected Modified Z-Source High Step up Inverter for Solar Photovoltaic System”, in *Intelligence in Big Data Technologies—Beyond the Hype*, vol. 1167, J. D. Peter, S. L. Fernandes, e A. H. Alavi, Orgs. Singapore: Springer Singapore, 2019, p. 559–569.
- [33] G. S. Mytsyk, T. Aung Zaw, e H. Z. Htet, “Structural-Algorithmic and Parametric Synthesis of Single-Phase Voltage Source Inverters for Solar Power System”, in *2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, jan. 2020, p. 1261–1265, doi: 10.1109/EIConRus49466.2020.9039055.
- [34] R. Maltione, V. G. Marcos dos Reis, D. I. Narvaez, M. G. Villalva, e L. C. Kretly, “Small Size Inverters: Development Challenges for PV, Renewable Energy Applications, as Well IoT, EMC, Lightning and Robustness Tradeoffs”, in *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Paulo, Brazil, nov. 2018, p. 1150–1157, doi: 10.1109/INDUSCON.2018.8627074.
- [35] T.-T. Tran, M.-K. Nguyen, J.-H. Choi, e Y.-C. Lim, “A Single-Phase Common-Ground-Type Boost Inverter for Photovoltaic Applications”, in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, Genova, Italy, set. 2019, p. P.1-P.8, doi: 10.23919/EPE.2019.8915056.
- [36] Y. Chen, W. Jiang, Y. Zheng, e G. He, “EMI Suppression of High-Frequency Isolated Quasi Z-Source Inverter Based on Multi-Scroll Chaotic PWM Modulation”, *IEEE Access*, vol. 7, p. 146198–146208, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946233.

- [37] S. Ilango, R. Viju Nair, R. Chattopadhyay, e S. Bhattacharya, “Photovoltaic and Energy Storage Grid Integration with Fully Modular Architecture using Triple Port Active Bridges and Cascaded H-Bridge Inverter”, in *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Washington, DC, out. 2018, p. 1400–1405, doi: 10.1109/IECON.2018.8591763.
- [38] A. Mohos e J. Ladanyi, “Emission Measurement of a Solar Park in the Frequency Range of 2 to 150 kHz”, in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Amsterdam, ago. 2018, p. 1024–1028, doi: 10.1109/EMCEurope.2018.8485049.
- [39] P.-M. Nicolae, R.-F. Marinescu, D.-C. Marinescu, M.-S. Nicolae, e I.-D. Nicolae, “Harmonics induced by inverters from a photovoltaic plant in the power grid”, in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, Singapore, maio 2018, p. 821–826, doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393895.
- [40] E. Salinas, K. Yamamoto, L. Severo, e A. Pinhel, “Some examples of EMI/EMC in wind power systems and large solar parks”, in *2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC)*, Singapore, maio 2018, p. 423–427, doi: 10.1109/ISEMC.2018.8393813.
- [41] A. Suarez *et al.*, “Characterization of Different Cable Ferrite Materials to Reduce the Electromagnetic Noise in the 2–150 kHz Frequency Range”, *Materials*, vol. 11, n° 2, p. 174, jan. 2018, doi: 10.3390/ma11020174.
- [42] S. U. Hasan, B. Shaffer, H. A. Hassan, M. J. Scott, Y. Siwakoti, e G. E. Town, “Common-ground transformerless inverter for solar photovoltaic module”, in *2018 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, San Antonio, TX, mar. 2018, p. 167–172, doi: 10.1109/APEC.2018.8341004.
- [43] C. Jettanasen e C. Pothisarn, “Performance and electromagnetic compatibility of a photovoltaic power converter”, in *2017 International Automatic Control Conference (CACS)*, Pingtung, nov. 2017, p. 1–4, doi: 10.1109/CACS.2017.8284248.
- [44] K. Murray, G. McLorn, J. Morrow, R. Best, S. McLoone, e A. Liu, “Power quality observations for solar photovoltaic inverters under part-load operation”, in *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Heraklion, ago. 2017, p. 1–6, doi: 10.1109/UPEC.2017.8231930.

- [45] P. Kotsampopoulos *et al.*, “EMC Issues in the Interaction Between Smart Meters and Power-Electronic Interfaces”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 32, n° 2, p. 822–831, abr. 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2561238.
- [46] S. Biswas, N. Mohan, O. Midtgard, e T. Undeland, “A copper-loss based design method and verification for a zero-ripple interface for PV/Battery-to-grid applications”, in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, set. 2016, p. 1–9, doi: 10.1109/EPE.2016.7695285.
- [47] Huan Zhang, Shuo Wang, e J. Puukko, “Common mode EMI noise modeling and prediction for a three-phase, three-level, grid tied photovoltaic inverter”, in *2016 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Shenzhen, China, maio 2016, p. 1188–1194, doi: 10.1109/APEMC.2016.7522982.
- [48] R. Mechouma, B. Azoui, e S. Ouchen, “Fundamental frequency PWM control of IGBT clamped three phase nine levels inverter topology for photovoltaic system”, in *2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Coimbra, set. 2016, p. 1–6, doi: 10.1109/UPEC.2016.8114045.
- [49] M. Klatt, J. Meyer, P. Schegner, e C. Lakenbrink, “Characterization of supraharmic emission caused by small photovoltaic inverters”, in *Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016)*, Belgrade, Serbia, 2016, p. 78 (6 .)-78 (6 .), doi: 10.1049/cp.2016.1067.
- [50] R. Mechouma, H. Aboub, e B. Azoui, “Multicarrier wave dual reference very low frequency PWM control of a nine levels NPC multi-string three phase inverter topology for photovoltaic system connected to a medium electric grid”, *Journal of Electrical Engineering*, p. 293–298, 2016.
- [51] R. Kot, S. Stynski, K. Stepień, J. Zaleski, e M. Malinowski, “Simple Technique Reducing Leakage Current for H-Bridge Converter in Transformerless Photovoltaic Generation”, *J. Power Electron.*, vol. 16, n° 1, p. 153–162, jan. 2016, doi: 10.6113/JPE.2016.16.1.153.
- [52] P. Pereira, H. de Paula, E. N. Cardoso, N. G. do N. Irias, e B. Marciano Lopes, “Comparative analysis of PWM techniques: An electromagnetic compatibility study on the inverter operation within photovoltaic systems”, in *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, Fortaleza, nov. 2015, p. 1–6, doi: 10.1109/COBEP.2015.7420154.
- [53] P. Pereira, H. de Paula, B. de Jesus Cardoso Filho, e J. A. de Souza Brito, “Photovoltaic systems representation for high frequency studies - part II: The inverter

- modeling”, in *2015 IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, Fortaleza, nov. 2015, p. 1–6, doi: 10.1109/COBEP.2015.7420156.
- [54] R. S. Farswan, A. Datta, G. Kamble, e B. G. Fernandes, “A low leakage transformer-less 3-level DC-DC boost converter for transformer-less PV inverters”, in *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)*, Geneva, set. 2015, p. 1–10, doi: 10.1109/EPE.2015.7309321.
- [55] A. Justus, “High efficient power electronic inverter topology with SPWM technique for single phase transformerless utility interactive photovoltaic system”, in *International Conference on Information Communication and Embedded Systems (ICICES2014)*, Chennai, India, fev. 2014, p. 1–6, doi: 10.1109/ICICES.2014.7034141.
- [56] J. Jiraprasertwong e C. Jettanasen, “Analysis and mitigation of conducted electromagnetic interference in a photovoltaic single-phase inverter”, in *TENCON 2014 - 2014 IEEE Region 10 Conference*, Bangkok, Thailand, out. 2014, p. 1–5, doi: 10.1109/TENCON.2014.7022314.
- [57] Z. Ozkan e A. M. Hava, “Classification of Grid Connected Transformerless PV Inverters with a Focus on the Leakage Current Characteristics and Extension of Topology Families”, *J. Power Electron.*, vol. 15, n° 1, p. 256–267, jan. 2015, doi: 10.6113/JPE.2015.15.1.256.
- [58] V. Tarateeraseth, “Integrated LCL filters used in grid-tied photovoltaic power systems for conducted EMI reduction”, *J. Electr. Eng.*, vol. 15, n° Issue 4, p. 323–329, 2015.
- [59] C. Keyer, R. Timens, F. Buesink, e F. Leferink, “In-situ measurement of high frequency emission caused by photo voltaic inverters”, in *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Gothenburg, set. 2014, p. 74–78, doi: 10.1109/EMCEurope.2014.6930880.
- [60] D. Hamza, M. Qiu, e P. K. Jain, “Application and Stability Analysis of a Novel Digital Active EMI Filter Used in a Grid-Tied PV Microinverter Module”, *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, n° 6, p. 2867–2874, jun. 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2219074.
- [61] Y. H. Dong, M. Y. Liu, e L. Cao, “EMI Noise Testing and Diagnosis for PV Inverter”, *Adv. Mater. Res.*, vol. 805–806, p. 31–35, set. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.805-806.31.
- [62] F. J. Pazos, I. Lumbreras, e B. Guerra, “Case studies on voltage distortion not covered by harmonic standards”, *Renew. Energy Power Qual. J.*, p. 295–299, mar. 2013, doi: 10.24084/repqj11.282.

- [63] D. Perera, P. Ciufo, L. Meegahapola, e S. Perera, “Power quality emission assessment of photovoltaic inverters based on IEC Technical Report 61000-3-15:2011”, in *2013 Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Hobart, Australia, set. 2013, p. 1–6, doi: 10.1109/AUPEC.2013.6725446.
- [64] A. Kullmer, K. Hermanns, e A. Enders, “Contactless investigation on kHz to MHz emission levels of high voltage systems”, in *2013 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, Aachen, Germany, set. 2013, p. 46–50, doi: 10.1109/AMPS.2013.6656224.
- [65] Z. Ozkan e A. M. Hava, “A survey and extension of high efficiency grid connected transformerless solar inverters with focus on leakage current characteristics”, in *2012 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, USA, set. 2012, p. 3453–3460, doi: 10.1109/ECCE.2012.6342322.
- [66] D. Hamza, Q. Mei, e P. K. Jain, “Implementation of an EMI active filter in grid-tied PV micro-inverter controller and stability verification”, in *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Montreal, QC, Canada, out. 2012, p. 477–482, doi: 10.1109/IECON.2012.6388777.
- [67] Z. Wang, S. Fan, Y. Zheng, e M. Cheng, “Design and Analysis of a CHB Converter Based PV-Battery Hybrid System for Better Electromagnetic Compatibility”, *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, n° 11, p. 4530–4533, nov. 2012, doi: 10.1109/TMAG.2012.2198912.
- [68] Jiang Nan e Xu Honghua, “Detection platform design of solar energy grid-connected photovoltaic system”, in *2010 International Conference on Power System Technology*, Zhejiang, Zhejiang, China, out. 2010, p. 1–4, doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666401.
- [69] G. Mehlmann e G. Herold, “The generation of symmetrical space phasors compared with the selective harmonic elimination method of multilevel converters”, in *Proceedings of the 2010 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, Kuressaare, Estonia, jun. 2010, p. 125–130, doi: 10.1109/PQ.2010.5550007.
- [70] M. A. Eltawil e Z. Zhao, “Grid-connected photovoltaic power systems: Technical and potential problems—A review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, n° 1, p. 112–129, jan. 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.07.015.
- [71] R. Araneo, S. Lammens, M. Grossi, e S. Bertone, “EMC Issues in High-Power Grid-Connected Photovoltaic Plants”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 51, n° 3, p. 639–648, ago. 2009, doi: 10.1109/TEMC.2009.2026055.
- [72] M. Tomisawa e M. Tokuda, “Induction Characteristics of a Solar Cell on the Ground Plane from Radiated Electromagnetic Disturbances”, in *2009 20th International Zurich*

- Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, Switzerland, jan. 2009, p. 81–84, doi: 10.1109/EMCZUR.2009.4783395.
- [73] T. Cao, J. Xu, e S. Xu, “Freewheeling current and suppression in inverter of stand-alone photovoltaic lighting system”, *Xinan Jiaotong Daxue Xuebao Journal Southwest Jiaotong Univ.*, vol. 43, n° Issue 4, p. 504–508, 2008.
- [74] F.-S. Kang, S.-J. Park, S. E. Cho, C.-U. Kim, e T. Ise, “Multilevel PWM Inverters Suitable for the Use of Stand-Alone Photovoltaic Power Systems”, *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 20, n° 4, p. 906–915, dez. 2005, doi: 10.1109/TEC.2005.847956.
- [75] M. C. Di Piazza, C. Serporta, G. Tine, e G. Vitale, “Electromagnetic compatibility characterisation of the DC side in a low power photovoltaic plant”, 2004, vol. 2, p. 672–677, doi: 10.1109/ICIT.2004.1490155.
- [76] R. A. Messenger e J. Ventre, *Photovoltaic systems engineering*. Boca Raton: CRC Press, 2004.
- [77] A. Luque e S. Hegedus, Orgs., *Handbook of photovoltaic science and engineering*, 2nd ed. Chichester, West Sussex, U.K: Wiley, 2011.
- [78] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, Org., *Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects and engineers*, 2nd ed. London ; Sterling, VA: Earthscan, 2008.
- [79] D. G. Holmes e T. A. Lipo, *Pulse width modulation for power converters: principles and practice*. Hoboken, NJ: John Wiley, 2003.
- [80] T. L. Skvarenina, Org., *The power electronics handbook*. Boca Raton, Fla: CRC Press, 2002.
- [81] N. Pearsall, Org., *The performance of photovoltaic (PV) systems: modelling, measurement and assessment*. Amsterdam ; Boston: Woodhead Publishing, 2017.
- [82] D. L. Sengupta e V. V. Liepa, *Applied electromagnetics and electromagnetic compatibility*. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2006.
- [83] C. Christopoulos, *Principles and techniques of electromagnetic compatibility*, 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [84] C. Cassiolato, “EMI - Interferência Eletromagnética em instalações industriais e muito mais”, *Smar - Technology Company*. smar.com/brasil/artigo-tecnico/emi-interferencia-eletromagnetica-em-instalacoes-industriais-e-muito-mais (acessado nov. 13, 2019).
- [85] K.-H. Gonschorek e R. Vick, *Electromagnetic compatibility for device design and system integration*. Heidelberg: Springer, 2009.

- [86] T. Rybak e M. Steffka, *Automotive electromagnetic compatibility (EMC)*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [87] International Electrotechnical Commission (IEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) - 61000 Part 6-3: Generic standards - Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments”. IEC, 2011, Acessado: jan. 18, 2020. [Online].
- [88] International Electrotechnical Commission (IEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) - 61000 Part 6-4: Generic standards - Emission standard for industrial environments”. IEC, 2018, Acessado: jan. 18, 2020. [Online].
- [89] International Electrotechnical Commission (IEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) - 61000 Part 6-1: Generic standards - Immunity standard for residential, commercial and light-industrial environments”. IEC, 2016, Acessado: jan. 18, 2020. [Online].
- [90] International Electrotechnical Commission (IEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) - 61000 Part 6-2: Generic standards - Immunity standard for industrial environments”. IEC, 2016, Acessado: jan. 18, 2020. [Online].
- [91] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-3: Generic standards – Emission standard for residential, commercial and light-industrial environments”. CENELEC, 2007, Acessado: dez. 09, 2019. [Online].
- [92] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-4: Generic standards – Emission standard for industrial environments”. CENELEC, 2007, Acessado: dez. 09, 2019. [Online].
- [93] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 6-1: Generic standards – Immunity for residential, commercial and light-industrial environments”. CENELEC, 2007, Acessado: dez. 09, 2019. [Online].
- [94] European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC), “Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 6-2: Generic standards - Immunity standard for industrial environments”. CENELEC, 2016, Acessado: dez. 09, 2019. [Online].
- [95] Federal Communications Commission - FCC, “FCC Part 15 - Radio Frequency Devices”. FCC.
- [96] International Electrotechnical Commission (IEC), “Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods Part 1-1: Radio disturbance and

- immunity measuring apparatus - IEC CISPR 16 Part 1-1". IEC CISPR, 2015, Acessado: mar. 24, 2020. [Online].
- [97] International Electrotechnical Commission (IEC), "CISPR 16-2-1 - Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - Part 2-1: Methods of measurement of disturbances and immunity - Conducted disturbance measurements". IEC CISPR, 2014, Acessado: jan. 18, 2020. [Online].
- [98] S. Kouro, J. I. Leon, D. Vinnikov, e L. G. Franquelo, "Grid-Connected Photovoltaic Systems: An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology", *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 9, n^o 1, p. 47–61, mar. 2015, doi: 10.1109/MIE.2014.2376976.
- [99] Inmetro, "Portaria n^o 004, de 04 de janeiro de 2011". Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Inmetro, 2011.
- [100] T. Karaca, B. Deutschmann, e G. Winkler, "EMI-receiver simulation model with quasi-peak detector", in *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Dresden, Germany, ago. 2015, p. 891–896, doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256283.
- [101] Laplace Instruments Ltd, "User Manual - SA3000 and EMCEngineer Software". LI, 2016, Acessado: mar. 24, 2020. [Online].
- [102] ABNT NBR IEC CISPR 15, "Limites e métodos de medição das radioperturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares". Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2014.
- [103] K. R. Cardoso, P. V. A. Freitas, P. V. G. Castellanos, J. O. Silva, e M. Z. Fortes, "Effects of Electromagnetic Interference Caused by Lighting Technologies in BB-PLC Systems", *ITEGAM- J. Eng. Technol. Ind. Appl. ITEGAM-JETIA*, vol. 6, n^o 22, 2020, doi: 10.5935/2447-0228.20200014.
- [104] R. de Souza Bittencourt, K. Rezende Cardoso, A. Pinheiros Fragoso, J. de Oliveira Silva, e M. Zamboti Fortes, "Electromagnetic Compatibility Analysis of CFL with Integrated Reactor in the Brazilian Market", *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, n^o 04, p. 698–706, abr. 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8891935.
- [105] L. M. Silva, A. C. T. de Carvalho, J. F. Araujo, M. Z. Fortes, L. B. Oliveira, e J. O. Silva, "Evaluation of the impact of EMI on Ethernet networks from lighting technologies", *J. Electromagn. Waves Appl.*, vol. 33, n^o 2, p. 249–259, jan. 2019, doi: 10.1080/09205071.2018.1537135.

- [106] J. Malack, “Statistical Correlation Between Conducted Voltages on the Powerline and Those Measured with a Line-Impedance Stabilization Network”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-20, n° 2, p. 346–349, maio 1978, doi: 10.1109/TEMC.1978.303613.
- [107] L. Mitalkumar, N. P.V., e S. T.K., “Design of a Modified Three Phase Line Impedance Stabilization Network for Conducted Emission Test”, dez. 2018, p. 1–5, doi: 10.1109/PEDES.2018.8707559.
- [108] D. Sakulhirak, V. Tarateeraseth, W. Khan-ngern, e N. Yoothanom, “Design of High Performance and Low Cost Line Impedance Stabilization Network for University Power Electronics and EMC Laboratories”, nov. 2007, p. 284–289, doi: 10.1109/PEDS.2007.4487715.
- [109] MathWorks®, “Single-Phase, 240 Vrms, 3500 W Transformerless Grid-Connected PV Array”, *Help Center*. <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/single-phase-240-vrms-3500-w-transformerless-grid-connected-pv-array.html>.
- [110] J. R. Nicholson e J. A. Malack, “RF Impedance of Power Lines and Line Impedance Stabilization Networks in Conducted Interference Measurements”, *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. EMC-15, n° 2, p. 84–86, maio 1973, doi: 10.1109/TEMC.1973.303254.
- [111] C. R. Paul, *Introduction to electromagnetic compatibility*, 2nd ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2006.
- [112] S. K. Ronnberg, A. G. Castro, A. Moreno-Munoz, M. H. J. Bollen, e J. Garrido, “Solar PV inverter supraharmonics reduction with random PWM”, in *2017 11th IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, Cadiz, Spain, 2017, p. 644–649, doi: 10.1109/CPE.2017.7915248.
- [113] A. C. Schittler, D. Pappis, e P. Zacharias, “EMI filter design for high switching speed and frequency grid-connected inverters”, in *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'16 ECCE Europe)*, Karlsruhe, set. 2016, p. 1–8, doi: 10.1109/EPE.2016.7695643.
- [114] ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica, “Matriz de Energia Elétrica”. ANEEL, 2020, [Online]. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>.
- [115] D. Roggo *et al.*, “Electromagnetic interferences in smart grid applications: a case study with power line communication smart meters and PV energy generation”, *CIREN* -

- Open Access Proc. J.*, vol. 2017, n° 1, p. 607–611, out. 2017, doi: 10.1049/oap-cired.2017.1285.
- [116] J. Liu, Y. Zhu, Q. Xu, e Q. Huang, “Simulation analysis of power-frequency electromagnetic field interference on smart meters”, in *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, Brisbane, Australia, nov. 2015, p. 1–5, doi: 10.1109/APPEEC.2015.7381044.
- [117] C. Keyer e F. Leferink, “Conducted interference on smart meters”, in *2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, Washington, DC, USA, ago. 2017, p. 608–611, doi: 10.1109/ISEMC.2017.8077940.
- [118] G. Rietveld, D. Hoogenboom, e M. Acanski, “Conducted EMI Causing Error Readings of Static Electricity Meters”, in *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, Paris, jul. 2018, p. 1–2, doi: 10.1109/CPEM.2018.8501197.
- [119] B. Have, C. Keyer, e F. Leferink, “Monitoring of Power Measured by Static Energy Meters for Observing EMI Issues”, in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, Amsterdam, ago. 2018, p. 1–5, doi: 10.1109/EMCEurope.2018.8485024.
- [120] A. E. Shadare, M. N. O. Sadiku, e S. M. Musa, “Electromagnetic compatibility issues in critical smart grid infrastructure”, *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 6, n° 4, p. 63–70, 2017, doi: 10.1109/MEMC.0.8272283.
- [121] R. Smolenski, J. Bojarski, A. Kempinski, e P. Lezynski, “Time-Domain-Based Assessment of Data Transmission Error Probability in Smart Grids With Electromagnetic Interference”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, n° 4, p. 1882–1890, abr. 2014, doi: 10.1109/TIE.2013.2263772.
- [122] F. Leferink, C. Keyer, e A. Melentjev, “Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference”, *IEEE Electromagn. Compat. Mag.*, vol. 5, n° 4, p. 49–55, 2016, doi: 10.1109/MEMC.2016.7866234.

Anexo A – Artigo Sobre Efeitos de Perturbações Eletromagnéticas em Sistemas com PLC



RESEARCH ARTICLE

OPEN ACCESS

EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CAUSED BY LIGHTING TECHNOLOGIES IN BB-PLC SYSTEMS

Keyla Rezende Cardoso¹, Paulo Vinicius Alves Freitas², Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos³, Joacir Oliveira Silva⁴ and Marcio Zamboti Fortes⁵

^{1,2,3,4,5} Federal University Fluminense – UFF, Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, Brazil

Email: kevlarezendec@gmail.com, pvafreita@gmail.com, pcastellanos@id.uff.br, joacir.uff@gmail.com, mzamboti@id.uff.br

Received: Feb 29th, 2020

Accepted: Apr 13th, 2020

Published: April 30th, 2020

Copyright ©2016 by authors and Galileo Institute of Technology and Education of the Amazon (ITEGAM). This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



ABSTRACT

Powerline communication (PLC) is a promising technology that allows data transmission through electric power distribution networks, with the advantage of using an existing infrastructure, reducing costs in maintenance and installation of telecommunication systems. However, once power systems are not designed specifically for data transmission, it may exhibit limiting electromagnetic interference characteristics for desirable system performance. This paper aims to analyze data rate performance of a Broadband PLC system when operating under conditions of conducted and radiated electromagnetic interference caused by lighting devices. The analyzed data transmission system presented good performance when subject to radiated electromagnetic interference, but was shown to be sensitive to conducted disturbances caused by lighting devices.

Keywords: Powerline Communication, Electromagnetic Interference, Data Rate, LED Lamps, Compact Fluorescent Lamps.

1. INTRODUCTION

The use of telecommunication systems has been growing rapidly in recent decades [1] and, responsively, new technologies and applications arise in the market aiming to meet demands of the sector's evolution.

The telecommunication systems became an important element in power distribution systems operation using Smart Grids. This type of network is a distribution architecture that allows bi-directional communication, together with the energy flow, among system stakeholders (end user and network, for example) [2]. Such network architecture has been gaining space in the electric sector in recent years, mainly with the technological advances coming from the telecommunication systems.

One of the telecommunications technologies applicable to the systems automation and communication is the data transmission through electric power supply networks, the Powerline Communication (PLC) technology, that brings as main advantage the reduction of operational and installation costs of new telecommunications networks, since an existing infrastructure is used as a means of data transmission. Such advantage provided by the PLC technology becomes a factor of relevance in a project

when considering the installation of access networks to telecommunications systems, sector which is responsible for around 50% of all infrastructure investment in the area [1].

PLC technology may be classified into two main categories: Broadband PLC (BB-PLC) and Narrowband PLC (NB-PLC) [2]. The BB-PLC category was initially designed aiming household applications [3], however, documents such as the IEEE 1901-2010 standard [4] and the ITU-T G.9960-2010 recommendation [5] have regulated its use also for applications in public power grids, given its promising characteristics for smart meters and advanced networks control applications, as addressed by [6].

Despite having attractive advantages from the economic and technological point of view, PLC systems may present degradation of their operation for such types of applications, due to electromagnetic interference between devices connected to the power grid [7].

Considering the PLC technology, its operational characteristics and the interest in its applicability to telecommunication systems together with electric power grids, in this article is performed an assessment of the performance of a data transmission system using BB-PLC devices. For this, it is

considered situations where the BB-PLC system is subject to adverse conditions of electromagnetic interference in a conducted and radiated form, to which it would be exposed under normal conditions of use.

The followings chapters of this article present a brief approach about some existing regulations for BB-PLC systems, in section II, followed by an introduction about the Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulation technique, in section III, the tests methodology and description, in section IV, the results and discussions about this study, in section V and, finally, the conclusions are presented in section VI.

II. BB-PLC REGULATION

In order to standardize the technology, researchers and institutions worldwide have been working together in the development of rules and standards that technology must respect, according to the different regions of use, where disturbance limits are established to ensure the electromagnetic compatibility of such devices.

The IEEE 1901-2010 International Standard addresses on broadband devices operating in power networks with a transmission frequency below 100 MHz, focusing on the balanced and efficient use of the communication channel of the power network by all broadband devices classes that use this channel [4].

The ITU-T G.9960-2010 Recommendation specifies system architecture and functionality for all physical layer components of home network transceivers designed for data transmission, including transmission over power grids [5].

In Europe, the EN 55022 Standard applies to the regulation of information technology equipment by specifying limits for spurious signals generated in the frequency range of 9 kHz to 400 GHz for class A and B equipment [8], applying therefore to the certification of electromagnetic compatibility in PLCs.

In United States (US), the FCC part 15 Regulation contains technical specifications for several telecommunications equipment, including devices designed to be used in connection with public power grids [9], such as PLCs.

In Brazil, in order to regulate the technology of data transmission through power grids, the National Telecommunications Agency (ANEEL) published in 2009, the Normative Resolution n° 527, which approves the regulation on use conditions of radio frequencies for broadband systems through electric power grids. [10].

The Normative Resolution n° 527 establishes the technical characteristics necessary for the proper functioning of the broadband device in its specified frequency range, and determines limits of radiation caused by broadband communication systems through electric power grids (BPL) operating at low and medium voltage, as well as exclusion bands, in which such devices may not cause unwanted radiation, since they are frequency bands allocated to the Aeronautical Mobile and Amateur Mobile Service.

The ANEEL also provides requirements and test procedures applicable to the BPL equipment certification in Brazil, classified as Category II [11].

The PLCs devices used in this work present a compliance declaration with the specifications for a Class B digital device, according to FCC Part 15, the US regulation cited.

III. OFDM MODULATION

The performance of the data transmission system through power grids is significantly affected by phenomena such as noise,

signal attenuation and multipath propagation, characteristics common to power network channels, since they are not specifically designed for data transmission purposes [12], [13].

In some channels of power distribution network, the number of grid interconnections between transmitter and receiver and their load and branch characteristics cause transmission and reflection of signals among transmission line segments. These phenomena lead to the degradation of propagated information [12]. To mitigate the degradations of the transmitted signal, several techniques are employed; one of them is the type of modulation applied to the signal.

The modulation technique widely used in the PLC technology is the OFDM. In this signal modulation method, a high-speed data stream is divided into a parallel low rate data stream, where these information sets are modulated in QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) or QAM (Quadrature Amplitude Modulation) using different orthogonal subcarriers in a frequency range [12]. The modulation technique coding, then provides bits in redundancy, in such a way as multiple signals are sent at different frequencies, allowing the receiver to retrieve bits lost due to impulsive noise [14].

The OFDM modulation enables persistent narrow band interference to be easily manipulated by disconnecting their respective subcarriers [15]. In this way, the OFDM modulation technique is able to handle the phenomena of multipath propagation more effectively than single-subcarrier methods.

IV. METHODOLOGY AND DESCRIPTION OF TESTS

The tests to evaluate the performance of the BB-PLC system, when it is subject to electromagnetic interference caused by lighting devices, were performed at the Technical Lighting Laboratory of the Federal University Fluminense (LABLUX-UFF), which is active in the lighting product certification area.

All measurements were performed in a shielded room with attenuation of radio frequencies up to 30 MHz and dimensions of 3.4 m x 5.3 m.

The BB-PLC devices used are specified with OFDM modulation technique and applied for low voltage usage. As interference sources for the tests, lighting devices were used, since such equipments work with power converters operating in frequency bands that may overlap the BB-PLC operating band.

For measuring the frequency spectrum of the lamps used as interference source and the BB-PLC system, the following equipments were used:

- Line Impedance Stabilization Network (LISN) – 9kHz-30MHz - CISPR 16 specification [16];
- Spectrum Analyzer;
- 13 bands Pre-Selector;
- 2.5 mm² copper power cables.

In the interference tests and measurements of data transmission capacity, two PLCs with the same specifications and manufacturer were used, each one connected to a notebook with GNU/Linux operational system, one operating as a client and one as a server. The LISN network was used to power the PLCs, in order to provide controlled impedance and decouple the test circuit from the supply mains.

For measurements of the maximum transmission rate achievable by the system, under the analyzed conditions, it was used the software tool iperf3, which allows the injection of data packets for the performance evaluation of data transmission networks.

Measurements of electric and magnetic field strength of samples used as sources of radiated electromagnetic interference were also performed, such as their influence on the system data transmission capacity. For these measurements, it was used a broadband non-ionizing radiation (NIR) meter, designed for measurements in the frequency range of 3 kHz to 60 GHz.

As non-controlled electromagnetic interference source, four Compact Fluorescent Lamps (CFL) and three LED Lamps with different power and operating voltage were used, as shown in Table 1.

Table 1: Lamps used as Electromagnetic Interference Source.

Source Code	Technology	Power (W)	Voltage (V)
AM01	LED	20	Bivolt
AM02	LED	9	Bivolt
AM03	LED	6.5	Bivolt
AM04	CFL	45	127
AM05	CFL	45	220
AM06	CFL	20	127
AM07	CFL	20	220
6 Samples Set	LED and CFL	155.5	127
6 Samples Set	LED and CFL	155.5	220

Source: Authors, (2020).

Of these selected interference sources, two are LED lamps complying with the Brazilian electromagnetic compatibility specifications, according to CISPR 15 [17], one is a noisy spectrum LED lamp that exceeds the limits of electromagnetic disturbances acceptable by Brazilian regulations and the last four are noisy spectrum CFLs. The noisy spectrum samples were selected in order to know the performance of the BB-PLC system under such adverse interference conditions.

The electromagnetic compatibility tests for CFLs are not mandatory in the Brazilian market, however, for this study, measurements were performed on the CFLs samples used as interference sources and compared to the limits of the CISPR 15 standard. As result of such tests, the CFLs presented a noisy characteristic spectrum, thus not meeting the standard specifications.

The less noisy lamps, in accordance with CISPR 15 standard, are the samples coded as AM02 and AM03. The LED lamp coded as AM01 and all used CFLs, are samples with noisy characteristic spectrum in the frequency range of 9 kHz to 30 MHz, thus not complying with the limits established by such standard.

The last two interference sources presented in Table 1 as "Set of 6 Samples", comprise two groups of 6 lamps, containing CFLs and LEDs, the first group operating at the voltage of 127V and the second group at the voltage of 220 V. Such interference sources were inserted in parallel in the PLCs power circuit to analyze the effects of the electromagnetic interference caused by the set on the system data transmission.

As mentioned before, LED lamps and CFLs, have typical operation frequency range overlapping the PLCs band. Since they emit conducted electromagnetic interference in the band of 9 kHz to 30 MHz (band with specified interference limits [17]), and the used PLCs operate at the frequency range of 2 MHz to 30 MHz.

Figure 1 shows the frequency spectrum of the BB-PLC system used and the Quasi-Peak (QP) and Average (AV) limits specified by the CISPR 15 standard [17] for lighting devices, to which only AM02 and AM03 interference sources comply. The peak values of three samples frequency spectrum are also presented in Figure 1, which are: the sample peak value with the highest noise level among those used (AM01-blue line) and the peak values of

the models samples most commonly used in homes, where, one is of LED technology (AM02-purple line) and another is of CFL technology (AM06-green line).

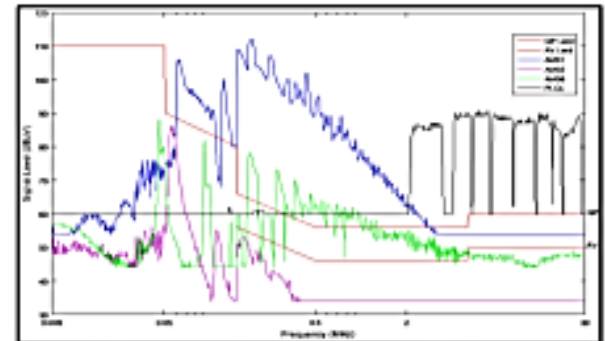


Figure 1: Characteristic frequency spectrum of the lamps used as interference source, PLCs and limits specified by the CISPR 15 standard for conducted electromagnetic disturbances of lighting devices.

Source: Authors, (2020).

The data rate measurements for performance analysis of the BB-PLC system, when subject to electromagnetic interference caused by lighting technologies, were performed considering two different forms of interference, the form conducted by the mains terminals and radiated in order to generate electric and magnetic field, as discussed in the sub-items below.

IV.1 MAINS TERMINALS ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

For measurement of the BB-PLC system performance, when subject to conducted electromagnetic interference, three different scenarios were considered, where the length of power cables between PLCs and interference source and the connection manner were modified. In both measurement scenarios the LISN network powering the used devices and the same samples as sources of electromagnetic interference were used. The connection of the PLCs and interference sources was made in the same circuit, in parallel.

The test settings were designed considering IEC CISPR 16-2-1 standard specifications [18], which determine measurement methods for conducted electromagnetic interference. Therefore, all measurements were performed inside a shielded room, on a table of non-conductive material and 80 cm high. The minimum distance of the equipment under test (PLCs) for the reference ground plane (metallic wall) was 40 cm and for the LISN network was 80 cm, according to [18].

Once the used PLC devices are specified as bivolt and may operate at two voltage levels (127 V and 220 V), the measurements of the system data transmission rate, when influenced by conducted electromagnetic interference, were performed for both system operating voltages.

It was established a data transmission time of 120 seconds between the two PLCs and, for each of the interference sources described in Table 1, 10 measurements of the data rates were performed for subsequent determination of the mean value among them, in order to obtain a better confidence level in results.

Figure 2 shows the schematic with the scenario 1 test setup. In this scenario, it was considered 80 cm for the cable length between the PLCs and the connection point of the interference source. It was also used an 80 cm length cable to energize the

interference source, in order to mitigate possible influences of radiated disturbances in data transmission, since this scenario aims to analyze the influence of conducted interferences. Such configuration of the interference source power cable was also maintained for scenario 2.

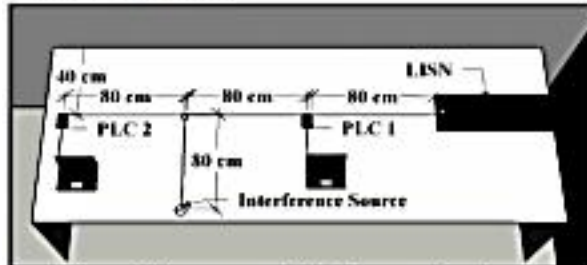


Figure 2: Measurement of the influence of conducted electromagnetic interference on the BB-PLC system performance - Scenario 1.

Source: Authors, (2020).

The second scenario adopted for analysis of the BB-PLC system performance is represented by the scheme of Figure 3. In this scenario, the length of the power cables between the PLCs and the connection point of the interference source was reduced to 40 cm, aiming to know the cable influence on the system data transmission rate.

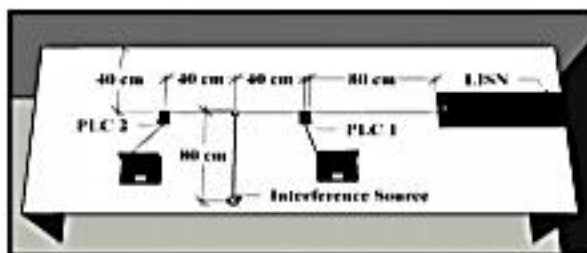


Figure 3: Measurement of the influence of conducted electromagnetic interference on the BB-PLC system performance - Scenario 2.

Source: Authors, (2020).

The scenario 3, represented by the scheme of Figure 4, comprises the measurements performed for the system where the PLCs and the interference source are connected directly to the LISN by 80 cm length cables. The devices were arranged in order to keep a distance of 40 cm from each other.

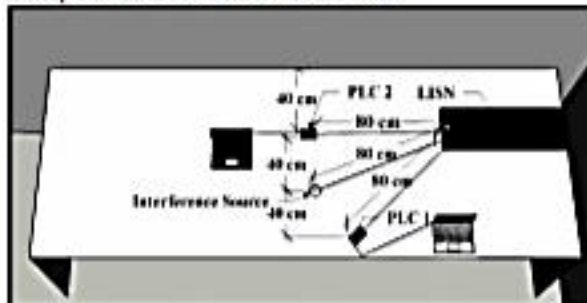


Figure 4: Measurement of the influence of conducted electromagnetic interference on the BB-PLC system performance - Scenario 3.

Source: Authors, (2020).

IV.2 RADIATED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

In order to know also the influence of the radiated electromagnetic interference in the data transmission through power grids, using a BB-PLC system, measurements of the data transmission rate when influenced by electric (E) and magnetic (H) field generated by LED lamps and CFLs, were performed. In the tests the PLCs devices were connected in a different circuit from the interference source, in order to eliminate the influence of the electromagnetic interference conducted by the mains terminals. In this way, the PLCs were energized through the LISN, while the interference source was connected to a second supply circuit.

As non-controlled interference source, the lamps coded as AM01, AM02, AM05 and AM07 in Table 11 were used.

Initially, measurements of the electric and magnetic field strength generated by the interference sources were performed, using a NIR meter. The measuring equipment was positioned 20 cm distant from the interference source and, the measurement time was established in 6 minutes, considering, for the final analyses, the mean value of the measurements performed in this time interval. The measured values of the field strength generated by the used samples and by the PLCs are presented in Table 2.

Table 2: Electric and Magnetic Field Strength generated by devices used for Radiated Electromagnetic Interference Tests.

Device	E (V/m)	H (A/m)
PLCs	0.18	0.0075
AM01	0.39	0.0079
AM02	0.2	0.0084
AM05	20.17	0.0086
AM07	6.78	0.0088

Source: Authors, (2020).

It is possible to note that the CFLs (AM05 and AM07) are the ones with higher electric field strength. Based on a study already performed in [19], such behavior was expected for this lighting technology.

For measurements of data transmission rate under the influence of radiated electromagnetic interference, transmission time of 3 minutes was established. The measurements were performed considering two scenarios, where the distance between the interference source and the PLCs was modified. In the first scenario, a distance of 1 m was considered between the interference source and each of the PLCs, as shown in Figure 5; in the second scenario, this distance was reduced to 50 cm, as presented in Figure 6.

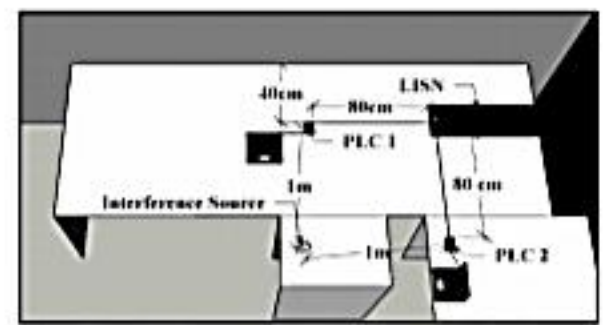


Figure 5: Measurement of the influence of radiated electromagnetic interference on the BB-PLC system performance - Scenario 1.

Source: Authors, (2020).

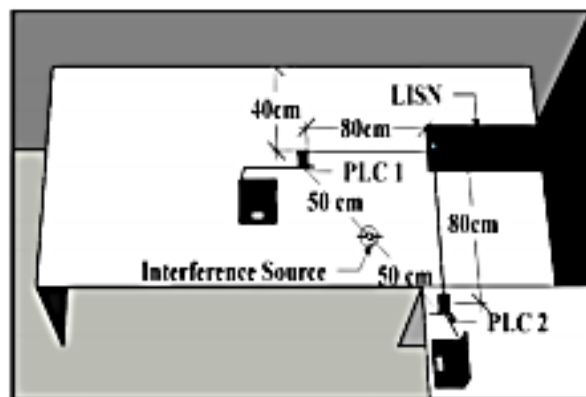


Figure 6: Measurement of the influence of radiated electromagnetic interference on the BB-PLC system performance - Scenario 2.
Source: Authors, (2020).

V. RESULTS AND DISCUSSIONS

In this section, results and discussions are presented, in order to analyze the performance of the BB-PLC system for each of the interference forms and scenarios discussed in this study.

V.1 BB-PLC SYSTEM PERFORMANCE WHEN SUBJECT TO CONDUCTED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CAUSED BY LIGHTING TECHNOLOGIES

Figures 7 and 8 present the results obtained for measurements of data transmission rate, when the BB-PLC system is subject to mains terminal electromagnetic interference caused by lighting devices.

Figure 7 shows the results for the system operating at the voltage of 127 V, with the bivalent samples and those operating only at 127V (AM04 and AM06). Figure 8 shows the results for the system operating at the voltage of 220 V, with the bivalent samples and those operating only at 220 V (AM05 and AM07).

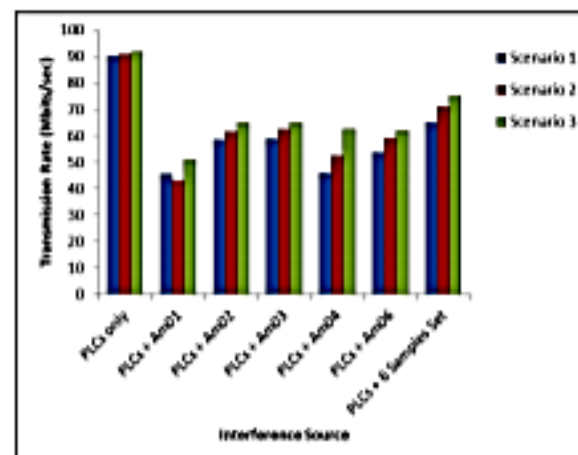


Figure 7: Transmission rate of the BB-PLC system operating at 127 V with insertion of conducted electromagnetic interference.
Source: Authors, (2020).

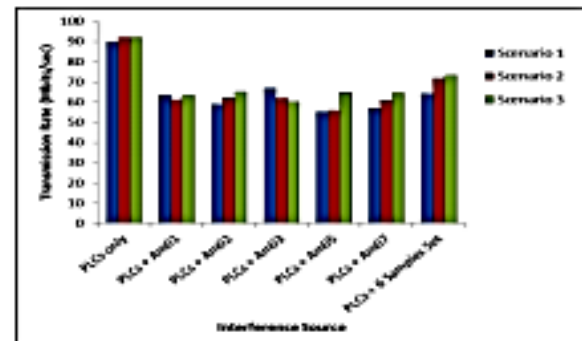


Figure 8: Transmission rate of the BB-PLC system operating at 220 V with insertion of conducted electromagnetic interference.
Source: Authors, (2020).

The columns identified in the figures as "PLCs only" refer to the BB-PLC system transmitting data without insertion of interference source into its power circuit. The other columns sets in the figures refer to the system transmitting data with the individual insertion of each of the interference sources shown in Table 1.

It is possible to observe by analyzing the graphs that the data transmission rate variation among the different scenarios is small for both analyzed voltage levels. The largest results difference among scenarios was found for insertion of the interference source AM04, in the 127 V voltage level, between scenarios 1 and 3, corresponding to 18%, calculated relative to the maximum transmission rate value, measured for the BB-PLC system transmitting data without the insertion of an interference source. The other variations of the transmission rates among the scenarios were lower than 11%, for both voltage levels.

The interference source that most affected the data transmission rate of the BB-PLC system was the AM01 source, for the system operating at 127 V, in the second scenario. Such interference source caused a transmission rate reduction of 53%, due to conducted electromagnetic interference.

V.2 BB-PLC SYSTEM PERFORMANCE WHEN SUBJECT TO RADIATED ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE CAUSED BY LIGHTING TECHNOLOGIES

Figure 9 shows the results of the data transmission rate obtained for the BB-PLC system, when operating under influence of radiated electromagnetic interference caused by LED and CFL lamps technologies.

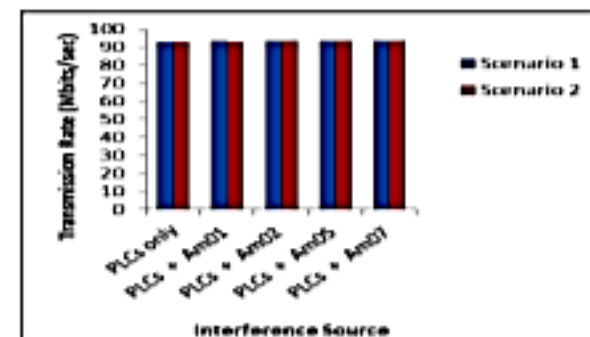


Figure 9: Transmission rate of the BB-PLC system operating with insertion of radiated electromagnetic interference.
Source: Authors, (2020).

It is possible to observe by analyzing the graph presented in Figure 9 that the data transmission rate variation among the analyzed scenarios of radiated electromagnetic interference conditions, when existing, is small, occurring only in two occasions: insertion of the interference source AM01 and the interference source AM05; where, 0.43% and 0.11% are the variation values for each occasion, respectively, calculated relative to the maximum transmission rate value that was measured for the system operating without insertion of interference source.

It is possible to note also that the radiated electromagnetic interference, caused by the used lighting devices, does not interfere significantly in data transmission of the BB-PLC system, which maintained its transmission rate around 90 Mb/s/sec, even when approximating the radiated interference sources in scenario 2.

VI. CONCLUSIONS

This work presented a series of tests performed in order to evaluate the BB-PLC system performance, when it is subject to adverse conditions of electromagnetic interference present in the data transmission channels in power distribution networks.

Electromagnetic interference conducted by the mains terminal and radiated electromagnetic interference were considered in this study. As interference sources, CFLs and LED lamps were used, once these devices emit noise in a frequency range that overlaps the transmission band of BB-PLC systems, besides being equipment with possibility of operation in the same circuit and environment of such system.

In the analyzed data transmission system, two PLCs devices of the same manufacturer and specifications were used. Such PLCs use OFDM signal modulation technology and are designed for use in low voltage.

The analyzed BB-PLC system presented good performance when subject to radiated electromagnetic interference caused by the used lamps technologies; however, it showed considerable sensitivity to conducted electromagnetic interferences caused by such devices in the mains terminals, since, a reduction of up to 53% in data transmission rate could be found for insertion of this interference form.

By analyzing the different scenarios discussed, it is also possible to conclude that the BB-PLC system suffers small variation with the length of the power cable between the two PLCs devices, and presented a low oscillation in the data transmission rate among the scenarios discussed.

As mentioned in item I of this work, data transmission technology through power grids is promising for both telecommunication and electric power systems, due to its applicability, among others, to smart grids. Therefore, it is pertinent to dedicate attention to topics involving existing limitations for such technology, in order to mitigate obstacles to its advancement.

Limitations of the BB-PLC system involving electromagnetic interference may be moderated by measures to be adopted in the transmission channels, the power grids, through filter application, for example; or by adopting improvements in the PLC technology, which may be done through the implementation of bit allocation algorithms aiming the maximization of data transmission rate, considering transmission channels with noisy characteristic spectrum and low signal-to-noise ratio (SNR).

Algorithms that provide adaptive modulation according to the transmission channel conditions, in order to maximize the reachable margin and/or data rate, have been proposed by several researchers in the last decades [20]–[31], and may represent a promising technique to implement improvements in data transmission technology through power distribution networks.

VII. REFERENCES

- [1] H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert. Broadband powerline communications networks: network design, 2004, Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd..
- [2] A. Usman and S. H. Shami. Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 19, p.p. 191–199, 2013.
- [3] N. Graf, I. Tsokalo, and R. Lehnert. Validating broadband PLC for smart grid applications with field trials, in 2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Dresden, Germany, p.p. 497–502, 2017.
- [4] Institute of Electrical and Electronics Engineers and IEEE-SA Standards Board. IEEE standard for broadband over power line networks: medium access control and physical layer specifications, 2010, New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [5] Telecommunication Standardization Sector of ITU. Unified high-speed wire-line based home networking transceivers – System architecture and physical layer specification, 2010, International Telecommunication Union.
- [6] A. Mengi, S. Ponzelar, and M. Koch. The ITU-T G.9960 broadband PLC communication concept for smartgrid applications, in 2017 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Dresden, Germany, p.p. 492–496, 2017.
- [7] C. R. Paul. Introduction to electromagnetic compatibility, 2006, 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Interscience.
- [8] European Committee for Electrotechnical Standardization. Information technology equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement, 2010, CENELEC.
- [9] Federal Communications Commission – FCC. FCC Part 15 – Radio Frequency Devices, FCC.
- [10] Agência Nacional de Telecomunicações – Anatel. Resolução no 527, de 8 de abril de 2009, 2009, Anatel.
- [11] Agência Nacional de Telecomunicações – Anatel. Requisitos técnicos e procedimentos de ensaios aplicáveis à certificação de produtos para telecomunicações de categoria II, 2018, Anatel.
- [12] M. Muhaimin and S. P. Majumder. Performance analysis of an OFDM broadband power line communication (BPLC) system using multipath channel models, in 2014 International Conference on Electrical Engineering and Information & Communication Technology, Dhaka, Bangladesh, p.p. 1–5, 2014.
- [13] M. M. Rahman and S. P. Majumder. Performance improvement of a power line communication system using OFDM under the effect of fading and impulsive noise with diversity reception, in 7th International Conference on Broadband Communications and Biomedical Applications, Melbourne, Australia, p.p. 30–34, 2011.
- [14] Electricity metering – Data exchange over powerline – Part 2: Lower layer profile using OFDM modulation type 2. Available online: http://www.erdf.fr/sites/default/files/documentation/G3_Specifications_%20low_%20layers.pdf (Accessed November 22, 2018).
- [15] N. Hadasschick. Techniques for UWB-OFDM, Institute for Communication Technologies and Embedded Systems (ICE). Available online: <https://www.ice.rwth-aachen.de/>

aachen.de/research/algorithms-projects/entry/detail/techniques-for-uwfb-otdm/ (Accessed November 22, 2018).

[16] International Electrotechnical Commission (IEC). Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - CISPR 16 Part 1-2: Radio disturbance and immunity measuring apparatus - Coupling devices for conducted disturbance measurements, 2014, IEC CISPR.

[17] Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. ABNT NBR IEC CISPR 15 - Limites e métodos de medição das radioperturbações características dos equipamentos elétricos de iluminação e similares, 2014, Associação Brasileira de Normas Técnicas.

[18] International Electrotechnical Commission (IEC). Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods - CISPR 16 Part 2-1: Methods of measurement of disturbances and immunity - Conducted disturbance measurements, 2014, IEC.

[19] S. Aerts et al. Exposure to electric and magnetic fields at intermediate frequencies of household appliances. in 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy (ACES), Florence, p.p. 1-2, 2017.

[20] P. S. Chow, J. M. Cioffi, and J. A. C. Bingham. A practical discrete multitone transceiver loading algorithm for data transmission over spectrally shaped channels, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 43, no. 2/3/4, p.p. 773-775, 1995.

[21] A. Leke and J. M. Cioffi. A maximum rate loading algorithm for discrete multitone modulation systems," in *GLOBECOM 97*, in *IEEE Global Telecommunications Conference. Conference Record*, Phoenix, AZ, USA, vol. 3, p.p. 1514-1518, 1997.

[22] E. Bedeer, O. A. Dobre, M. H. Ahmed, and K. E. Baddour. Optimal bit and power loading for OFDM systems with average BER and total power constraints, in 2012 *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Anaheim, CA, USA, p.p. 3685-3689, 2012.

[23] E. Guerrini, G. Dell'Amico, P. Bisaglia, and L. Guerrieri. Bit-loading algorithms and SNR estimate for HomePlug AV, in 2007 *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, Pisa, Italy, pp. 77-82, 2007.

[24] E. Guerrini, L. Guerrieri, D. Veronesi, P. Bisaglia, and R. Cappelletti. LLR-based Bit-loading Algorithm and its Applications to HomePlug AV over OPERA Power-line Channels with Impulsive Noise, *J. Commun.*, vol. 4, no. 7, 2009.

[25] K. S. Al-Mawali, A. Z. Sadik, and Z. M. Hussain. Simple discrete bit-loading for OFDM systems in power line communications, in 2011 *IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, Udine, Italy, p.p. 267-270, 2011.

[26] Y. George and O. Amrani. Bit loading algorithms for OFDM," in *International Symposium on Information Theory - ISIT 2004. Proceedings*, Chicago, Illinois, USA, 2004, p.p. 391-391.

[27] D. Daly, C. Heneghan, and A. D. Fagan. Power- and bit-loading algorithms for multitone systems, in 3rd *International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. ISPA 2003. Proceedings of the*, Rome, Italy, 2003, vol. 2, p.p. 639-644.

[28] H. Rohling and C. Fellenberg. Successive bit loading scheme, *Electron. Lett.*, vol. 45, no. 4, p. 214, 2009.

[29] L. Yang, M. Yu, L. Zhou, and Y. Xu. Adaptive bit loading algorithm of shortwave broadband OFDM system, in 2011 *Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering*, Inner Mongolia, China, p.p. 49-52, 2011.

[30] S. Nagaraj. Improving power efficiency of coded OFDM with feedback, *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 9, p.p. 2541-2544, 2009.

[31] Y. Li and G. Su. An adaptive modulation and power-allocation algorithm in OFDM system, in 2004 *International Conference on Communications, Circuits and Systems (IEEE Cat. No.04EX914)*, Chengdu, p.p. 339-343 Vol.1, 2004.