

Felipe Zimmermann Severino

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INTERFERÊNCIA
ELETROMAGNÉTICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS
AUTÔNOMOS**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica para a obtenção do
Grau de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Orientador: Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária
da UFSC.

Severino, Felipe Zimmermann
Contribuição ao estudo da interferência
eletromagnética em sistemas fotovoltaicos autônomos
/ Felipe Zimmermann Severino ; orientador, Adroaldo
Raizer, 2018.
67 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Sistema fotovoltaico.
3. Interferência eletromagnética. 4.
Compatibilidade eletromagnética. I. Raizer,
Adroaldo. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III.
Título.

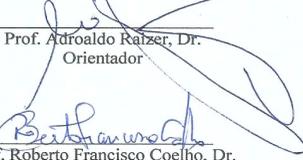
Felipe Zimmermann Severino

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS**

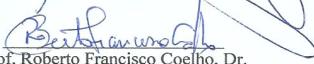
Este Trabalho de conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica, e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Florianópolis, 07 de Fevereiro de 2018.


Prof. Renato Lucas Pacheco, Dr.
Coordenador do Curso


Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Orientador

Banca Examinadora:


Prof. Roberto Francisco Coelho, Dr.
Presidente da Banca


Prof. Denizar Cruz Martins, Dr.
Membro da Banca


Eng. Kassia Toccolini
Membro da Banca

Este trabalho é dedicado aos meus pais
Ana Maria e Valdeci pelo amor e
suporte inesgotáveis e ao meu irmão
Vitor pela parceria constante.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Ana Maria e Valdeci pelo constante incentivo aos estudos e por todo o suporte nesta longa jornada. Ao meu irmão que sempre esteve comigo nos momentos em que precisei de alguém para conversar. A minha namorada Fran por incentivar a produção deste trabalho. Ao meu avô Juca (*in memoriam*) que uma vez me disse que um de seus sonhos era poder ver eu me tornar um engenheiro.

A Universidade Federal de Santa Catarina, por apresentar um ensino público e de excelente qualidade.

Ao meu orientador, professor Adroaldo Raizer pelo conhecimento passado, dedicação, disponibilidade e pela paciência despendida em mim para a realização deste trabalho.

Ao MagLab por disponibilizar todos os equipamentos utilizados para a realização deste projeto, e especialmente aos funcionários Mikael Pontes Fonseca e Mário João Bernardes Júnior pelo tempo e esforço dedicados a este trabalho.

Aos membros da banca avaliadora por se prontificarem a ajudar este trabalho se tornar ainda melhor.

Aos meus amigos de graduação, Arthur Merlo, Gabriel Piazero Hessmann, Guilherme Medeiros, Unirio, Hiago Murilo Horstmann, Jaqueline Clamer e Juliana Fernandes por todos os momentos que passamos juntos nesta etapa de nossas vidas. Em especial ao Ricardo Peruffo e Silva que foi um irmão que a vida me deu, OSS mestre.

Aos meus parceiros de jiu-jitsu que sempre estavam lá pra dar um treino no final de um dia exaustivo.

E claro, a todos que ajudaram de alguma forma a produção deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho aborda a realização de ensaios referentes a compatibilidade eletromagnética aplicados em diferentes pontos de operação de um sistema fotovoltaico. Três ensaios foram realizados: ensaio de distorção harmônica total de tensão, emissão de interferências eletromagnéticas conduzida e radiada. Para realização destes experimentos foi utilizado um sistema fotovoltaico não conectado à rede. Este estudo foi necessário devido ao fato do crescimento da utilização da tecnologia fotovoltaica como fonte de energia renovável. Os resultados obtidos neste trabalho têm a intenção de auxiliar os órgãos reguladores no desenvolvimento de normas que definam características técnicas de equipamentos utilizados nos sistemas fotovoltaicos para comercialização destes dispositivos.

Palavras-chave: Compatibilidade Eletromagnética. Interferência Eletromagnética. Sistema Fotovoltaico.

ABSTRACT

This paper discusses the performance of electromagnetic compatibility tests applied at different points of operation of a photovoltaic system. Three tests were performed: total voltage harmonic distortion test, conduction and radiated electromagnetic interference emission. To perform these experiments, an off-grid photovoltaic system was used. This study is required due to the fact that growth in the use of photovoltaic technology as a source of energy. The results obtained in this work are intended to assist standards and conformity assessment body in the development of standards that define technical characteristics of equipment used in photovoltaic systems for the commercialization of these devices.

Keywords: Electromagnetic Compatibility. Electromagnetic Interference. Photovoltaic System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparação entre as respostas de um sinal entre os detectores de pico, quase-pico e média.	38
Figura 2 - Componentes de um sistema fotovoltaico <i>off-grid</i>	39
Figura 3 - Diagrama de conexões dos instrumentos para ensaio de eficiência e distorção harmônica.	43
Figura 4 - Diagrama de conexões para realização de ensaios de emissão conduzida.	46
Figura 5 - Diagrama de conexões para realização do ensaio de emissão conduzida entre o painel fotovoltaico e um banco de cargas resistivas.	46
Figura 6 - Esquema de montagem para ensaio de emissão radiada para controlador de carga.	48
Figura 7 - Esquema de montagem para ensaio de emissão radiada para inversor.	49
Figura 8 - Forma de onda da saída do inversor (teste de 100%).	51
Figura 9 - Espectro de frequências dos harmônicos de tensão (teste de 100%).	51
Figura 10 - Resultado da medição de emissão conduzida do painel conectado ao banco de resistores (fase).	52
Figura 11- Estrutura do filtro passivo de EMI.	54
Figura 12 - Resultado da medição de emissão conduzida na saída do inversor (fase).	55
Figura 13 - Resultado da medição de emissão radiada do ruído de fundo.	57
Figura 14 - Resultado da medição de emissão radiada do controlador de carga.	59
Figura 15 - Resultado da medição de emissão radiada do inversor.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros da análise inicial de emissão conduzida.	45
Tabela 2 - Parâmetros da análise inicial de emissão radiada.....	47
Tabela 3 - Valores referentes ao ensaio de eficiência e distorção harmônica do inversor.....	50
Tabela 4 – Resultado dos valores do detector de Quase-Pico da medição de emissão conduzida na saída do inversor (fase).....	56
Tabela 5 – Resultado dos valores do detector de média da medição de emissão conduzida na saída do inversor (fase).....	56
Tabela 6- Medições finais de quase pico do ruído de fundo.	58
Tabela 7 - Medições finais de quase pico do controlador de carga.	59
Tabela 8- Medições finais de quase pico do inversor.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FV	Fotovoltaico
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LISN	<i>Line Impedance Stabilization Network</i>
GTEM	<i>Gigahertz Transversal Eletromagnetic Mode</i>
EMI	Interferência Eletromagnética
EMC	Compatibilidade Eletromagnética
RFI	Interferência de Radiofrequência
OATS	<i>Open Area Test Site</i>
MagLab	Laboratório de Eletromagnetismo e Compatibilidade Eletromagnética
THD	Distorção Harmônica Total
PWM	Modulação por Largura de Pulso
MPPT	Rastreador do Ponto de Máxima Potência
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
FM	Frequência Modulada
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Período [s]
f	Frequência [Hz]
c	Velocidade da Luz [m/s]
v	Velocidade da Onda [m/s]
λ	Comprimento de onda [m]
$THDv$	Distorção Harmônica Total de Tensão [%]
L_{cm}	Indutor de Modo Comum [mH]
C_Y	Capacitor de Modo Comum [nF]
C_X	Capacitor de Modo Diferencial [μ F]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	27
2	OBJETIVOS	29
2.1	OBJETIVO GERAL	29
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1	COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E ESTUDOS ASSOCIADOS	31
3.1.1	Interferência eletromagnética (EMI).....	31
3.1.2	Compatibilidade eletromagnética (EMC).....	31
3.1.3	Conceitos e definições de EMC e EMI.....	32
3.1.4	Compatibilidade eletromagnética e eletromagnetismo	33
3.1.5	Emissões conduzidas	34
3.1.6	Teoria sobre medição de emissões conduzidas	34
3.1.7	Emissões radiadas	35
3.1.8	Teoria sobre medição de emissões radiadas.....	35
3.1.9	Análise do Espectro.....	37
3.1.10	Componentes harmônicas.....	38
3.2	SISTEMA FOTOVOLTAICO	38
3.2.1	Painel Solar Fotovoltaico.....	39
3.2.2	Baterias.....	39
3.2.3	Controlador de Carga.....	40
3.2.4	Inversor de Tensão CC-CA	40
4	MATERIAL E MÉTODOS	43
4.1	MATERIAIS UTILIZADOS PARA ENSAIO DE EFICIÊNCIA E DISTORÇÃO HARMÔNICA	43
4.2	PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE EFICIÊNCIA E DISTORÇÃO HARMÔNICA	43
4.3	MATERIAIS UTILIZADOS PARA ENSAIO DE EMISSÃO CONDUZIDA	44
4.4	ENSAIO DE EMISSÃO CONDUZIDA.....	45

4.5	MATERIAIS UTILIZADOS PARA ENSAIO DE EMISSÃO RADIADA	47
4.6	ENSAIO DE EMISSÃO RADIADA.....	47
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
5.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO.....	49
5.2	EMISSÃO CONDUZIDA	51
5.3	EMISSÃO RADIADA.....	56
6	CONCLUSÃO.....	61
6.1	CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	63
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

Desde meados do século passado, organizações mundiais começaram a se preocupar com a influência do ser humano e seus impactos no meio ambiente. Um dos pontos mais visados neste assunto é a geração de energia. Como a humanidade se abastecia basicamente de fontes não renováveis e ao mesmo tempo poluentes, surgiu uma necessidade de investigar diferentes procedimentos para adquirir energia.

Uma das tecnologias que mais obteve destaque é a conversão de energia solar em energia elétrica por meio de módulos fotovoltaicos (FV) por se tratar de uma tecnologia silenciosa, limpa e cuja vida útil é de 20 a 30 anos.

Como os módulos fotovoltaicos disponibilizam energia elétrica em forma de corrente contínua (CC) e a maioria dos eletrodomésticos ainda necessitam da entrada em corrente alternada (CA), apesar possuírem barramento (CC), torna-se necessário a implantação de um inversor de tensão no sistema FV para a conversão da energia em (CA).

Sendo o inversor uma fonte chaveada, injeta correntes harmônicas nas redes de distribuição o que causa uma série de distorções, aumenta a perda de energia no sistema, e afeta equipamentos elétricos sensíveis à sua alimentação.

Além das harmônicas de tensão é fundamental realizar uma análise do comportamento do inversor perante a compatibilidade eletromagnética nos quesitos de emissões conduzidas e emissões radiadas provenientes deste aparelho.

Devido à carência de estudos realizados para determinação das normas reguladoras no que se refere à compatibilidade eletromagnética dos sistemas FV, este trabalho é focado na avaliação do desempenho de um sistema FV autônomo monofásico.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Contribuir com órgãos reguladores e com a comunidade científica por meio de uma análise inicial sobre o desempenho de um sistema FV autônomo monofásico quanto à compatibilidade eletromagnética.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar o desempenho de um sistema FV autônomo monofásico que fornece 220 V CA como saída por meio de ensaios de medição de geração de distorção harmônica total de tensão pelo inversor com a utilização de um analisador de energia; verificar as emissões conduzidas com o auxílio da “*Line Impedance Stabilization Network*” (LISN); e analisar as emissões radiadas com a utilização de uma célula “*Gigahertz Transversal Electromagnetic Mode*” (GTEM).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E ESTUDOS ASSOCIADOS

3.1.1 Interferência eletromagnética (EMI)

Nos dias de hoje, a sociedade vive imersa em um espaço denominado como ambiente eletromagnético. Muitos equipamentos como aparelhos de estações de rádio e televisão, torres de telecomunicação, sistemas de navegação e radares operam graças à radiação de energia em forma de ondas eletromagnéticas. Estes são exemplos de emissão de sinais eletromagnéticos via radiação intencional. Por outro lado, uma série de outros dispositivos como eletrodomésticos e sistemas de ignição eletrônica de automóveis também transmitem energia em forma de ondas eletromagnéticas, porém nestes casos a emissão de energia não é intencional, ou seja, ela não faz parte da finalidade do funcionamento do instrumento. Caso a emissão de ondas eletromagnéticas por estes aparelhos seja forte o suficiente, é possível que haja uma interferência que gera uma alteração no desempenho do funcionamento de certos dispositivos elétricos e eletrônicos que estejam no mesmo ambiente eletromagnético. Esta interferência é conhecida como interferência eletromagnética. (KODALI, 1996).

Interferência eletromagnética é a degradação de um equipamento, dispositivo ou sistema por uma perturbação eletromagnética. A interferência eletromagnética é um fenômeno conhecido desde a criação de instrumentos e sistemas elétricos há mais de um século, porém foi somente na Segunda Guerra Mundial que esta interação tornou-se relevante para a comunidade científica. (CHATTERTON, HOULDEN, 1992).

3.1.2 Compatibilidade eletromagnética (EMC)

A compatibilidade eletromagnética EMC é a área de estudo que visa a prática de métodos que permitam que dois ou mais aparelhos eletrônicos possam atuar de forma harmoniosa sem que nenhum deles cause interferências eletromagnéticas nos demais em um mesmo ambiente eletromagnético. Caso isto seja concebido, os aparelhos devem funcionar de forma satisfatória. (CHATTERTON, HOULDEN, 1992).

No final dos anos 1970, com a substituição do processamento

analogico de dados pelo processamento digital de dados, a maior parte dos sistemas eletrônicos começaram a ser implementados digitalmente tendo em vista que os circuitos integrados estavam se tornando cada vez menores e mais rápidos. Junto com esta mudança, a produção de aparelhos eletrônicos com processamento digital aumentou de forma acentuada, o que levou também a um aumento no volume de emissões de energia em forma de ondas eletromagnéticas. Este fato fez com que a incidência de interferências eletromagnéticas entre os aparelhos se tornasse um problema sério, e conseqüentemente os estudos para sanar este problema com compatibilidade eletromagnética também foram impulsionados. (PAUL, 1992).

3.1.3 Conceitos e definições de EMC e EMI

Uma perturbação eletromagnética é qualquer interação eletromagnética que pode atrapalhar o funcionamento de um dispositivo ou sistema. Ela pode ser gerada por um sinal não desejado ou pode apresentar a natureza de um ruído ou até mesmo ser causada pela mudança do meio de propagação.

Interferência de radiofrequência (RFI) é a degradação de um sinal devido à presença de outros sinais indesejados em uma potência suficientemente grande para causar perturbação de radiofrequência, esta perturbação deve pertencer por definição dentro da faixa de espectro de radiofrequências.

A interferência eletromagnética pode ser transferida de uma fonte para um receptor, que este pode ser um dispositivo, aparelho ou sistema. O termo receptor é dado ao dispositivo que sofre a interação de uma interferência eletromagnética proveniente da fonte.

As diferentes formas de a interferência eletromagnética se propagar da fonte para o receptor são:

- Radiada da fonte para o receptor;
- Conduzida pelos cabos da fonte que estão conectados em uma mesma rede que o receptor está conectado;
- Também possível que emissões radiadas gerem emissões conduzidas ao penetrarem em cabos de alimentação; e que emissões conduzidas gerem emissões radiadas quando ruídos se propagam dos cabos para o ar.

Conclui-se então, que a interferência eletromagnética pode ser transmitida da fonte para o receptor através de emissões radiadas e conduzidas, sendo que estas podem gerar umas as outras.

A interferência eletromagnética oriunda da fonte pode ser considerada incompatível com o receptor a partir do momento que a intensidade da interferência ultrapassar o limite tolerável de sinais indesejados e começar a prejudicar o bom funcionamento do receptor.

Desde o descobrimento da ciência associada à interferência eletromagnética e à compatibilidade eletromagnética, muitos métodos de análise e projetos de produtos vêm sendo desenvolvidos. Ainda assim, há muitos tópicos de estudos que necessitam de aprimoramento para que haja um amadurecimento desta área. (KODALI, 1996).

3.1.4 Compatibilidade eletromagnética e eletromagnetismo

No espaço livre, as ondas eletromagnéticas se propagam com velocidade c (299.792.458 m/s), valor comumente arredondado para $3 * 10^8$ m/s. A velocidade das ondas eletromagnéticas é conhecida como velocidade da luz, uma vez que a luz é uma onda eletromagnética. Sabendo que uma onda eletromagnética apresenta um caráter oscilatório, é possível verificar que há uma frequência associada a cada tipo de onda, sendo por definição, $T = 1/f$. O T é o período e f é a frequência da onda. O período descreve o tempo necessário para a onda realizar uma oscilação completa. Como a função da onda varia com o espaço e o tempo, o período está relacionado com o comprimento de onda.

A equação da velocidade da onda, $v = f\lambda$ toma importância uma vez que apresenta três características, talvez as mais relevantes, de uma onda. Considerando basicamente que os problemas de compatibilidade eletromagnética estão envolvidos com propagação de ondas eletromagnéticas, é possível fixar a velocidade na equação e assim perceber que a frequência é inversamente proporcional ao comprimento de onda, ou seja, há uma forte relação física entre estas duas grandezas.

Esta relação torna-se muito útil na análise da compatibilidade eletromagnética, uma vez que muitos efeitos eletromagnéticos variam com a frequência. Assim sendo um projeto visando à compatibilidade eletromagnética muitas vezes depende do tamanho físico do dispositivo em relação ao comprimento de onda dos campos em questão. Isto quer dizer que quando um problema associado à compatibilidade eletromagnética é identificado, é fundamental perceber que há uma faixa de frequência em que a interferência é mais intensa e que é especialmente nesta faixa em que devem ser focados os esforços para a solução dos problemas devido à interferência. (CHATTERTON,

HOULDEN, 1992).

3.1.5 Emissões conduzidas

As emissões conduzidas podem ser consideradas como o ruído eletromagnético que é transferido de um sistema para as linhas de alimentação de um sistema, seja ele em corrente contínua ou alternada. Este ruído pode ser prejudicial uma vez que podem haver outros dispositivos ou sistemas alimentados na mesma rede que podem absorvê-lo.

A emissão conduzida pode ser classificada de duas formas, são elas:

- Ruído de modo comum, medido entre fase e terra ou neutro e terra;
- Ruído de modo diferencial, medido entre fase e neutro.

Quando a análise da emissão conduzida é realizada, é necessário obter os valores correspondentes das duas classes de ruídos conduzidos e somar os valores entre eles para encontrar a resultante total.

3.1.6 Teoria sobre medição de emissões conduzidas

Nos ensaios de medição de emissões conduzidas é necessário um equipamento denominado “*Line Impedance Stabilization Network*” (LISN). Este equipamento é conectado no ponto de interesse para realizar medições no dispositivo sob teste. Na faixa de frequência em que é realizado o ensaio, a LISN apresenta o valor de 50Ω , e permite a medição de ruídos na linha. (KODALI, 1996)

A conexão de diferentes equipamentos em uma mesma rede pode gerar um excesso de ruídos de radiofrequência que pode prejudicar outros dispositivos conectados nesta mesma rede. A presença desses ruídos oriundos de relógios digitais, ou componentes de banda larga pode acoplar indutâncias ou capacitâncias na rede.

As medições de ruídos conduzidos na rede normalmente estão na faixa de frequência de 150 kHz e 30 MHz, porém nada impede que ruídos em outras faixas de frequência possam ser medidos dependendo da aplicação do equipamento sob teste. (MONTROSE, NAKAUCHI, 2004)

3.1.7 Emissões radiadas

As emissões radiadas, como o próprio nome sugere, são sinais eletromagnéticos que são emitidos por um dispositivo ou sistema que podem ser captados por outros dispositivos ou sistemas que estejam imersos no mesmo ambiente eletromagnético, causando neles interferência eletromagnética. Assim como na emissão conduzida, as emissões radiadas também podem ser subagrupadas:

- Ruídos associados ao campo elétrico: propagados quando há uma variação de tensão;
- Ruídos associados ao campo magnético: propagados por uma variação de corrente.

3.1.8 Teoria sobre medição de emissões radiadas

As medições de emissões radiadas de um dispositivo ou sistema e a imunidade radiada deste mesmo dispositivo ou sistema representam duas características básicas da compatibilidade eletromagnética. Os ensaios de imunidade radiada possuem como finalidade medir o nível de deterioração do funcionamento do equipamento por um determinado nível de interferência eletromagnética.

Equipamentos como transmissores de rádio, televisão e radares são responsáveis por transmitirem um sinal com potência considerável em uma faixa de frequência específica. Como estes equipamentos não são perfeitos, eles acabam propagando uma série de outros ruídos em diferentes frequências, devido às correntes harmônicas que neles circulam. Apesar de essas correntes harmônicas serem consideravelmente menores que a fundamental, esses ruídos ainda podem causar interferência eletromagnética em dispositivos próximos.

A propagação de energia em forma de ondas eletromagnéticas que originam tais ruídos pode ser modelada como fontes de pequenos dipolos elétricos e magnéticos. Cada fonte pode ser aproximada como três dipolos ortogonais com suas respectivas amplitudes e fases. Todos os vetores componentes dos campos devem ser combinados para simular de forma aproximada as emissões que são geradas pelo aparelho.

Uma série de medições deve ser realizada para caracterizar a fonte da radiação. Normalmente os aparelhos que de fato medem a propagação de campos pelo dispositivo sob teste ficam em uma distância específica para que se conheça o nível de interferência naquela distância.

Para a realização das medições existem alguns métodos, dos quais os principais são:

- Teste ao ar livre “*Open Area Test Site*” (OATS);
- Câmara Anecóica;
- Célula Transversal Eletromagnética (TEM);
- Célula Gigahertz Transversal Eletromagnética (GTEM).

OATS é o método mais aceito universalmente para medição de emissões radiadas ou imunidade radiada por um dispositivo. Para que as medições ao ar livre ocorram de forma adequada, são necessários os seguintes componentes:

- Antena receptora calibrada;
- Um aparelho medidor de campos;
- Cabos coaxiais para as conexões;
- Plano de terra apropriado;
- Equipamento sob teste;
- Filtro de linha para a alimentação do equipamento sob teste.

O método OATS também necessita que a área em que as medições são realizadas, esteja bem afastada de aparelhos externos que possam mascarar os resultados, como linhas de transmissão e antenas.

Como criar ambientes para utilização do método OATS não é muito viável, apesar de ser o mais aceito, outros métodos foram desenvolvidos com o tempo.

As câmaras anecóicas possuem um grande índice de isolamento de sinais externos, podendo ultrapassar a ordem de 100 dB de atenuação de campos externos. Estas câmaras apresentam um ambiente eletromagnético propício para medições de alto desempenho na captação de sinais extremamente fracos. A desvantagem da câmara anecóica deve-se ao fato de que é necessário o revestimento total de uma sala com um material que absorve campos eletromagnéticos, normalmente é utilizada uma espécie de espuma de poliuretano impregnada com carbono. O custo deste revestimento é consideravelmente alto, o que pode tornar este ambiente de ensaio economicamente inviável.

A célula TEM assemelha-se com um cabo coaxial expandido, sendo que nas duas pontas da célula, são conectados cabos coaxiais de 50 Ω para realizar um casamento de impedância. O condutor central e o externo facilitam a propagação de campos eletromagnéticos de uma ponta da célula a outra. A vantagem da utilização desta célula é o baixo custo em relação à câmara anecóica e OATS, além de ser menor, o que permite que seja instalada dentro de um laboratório sem exigir o espaço total que uma sala tem a oferecer. A desvantagem deve-se ao fato de que

a célula TEM não pode operar bem em frequências elevadas. (KODALI, 1996)

A célula GTEM, que foi utilizada no MagLab para desenvolvimento deste trabalho, é praticamente uma variação da célula TEM. A vantagem da célula GTEM em relação à célula TEM deve-se principalmente ao fato de que a GTEM, devido à sua geometria piramidal, pode operar com frequências na faixa de gigahertz.

3.1.9 Análise do Espectro

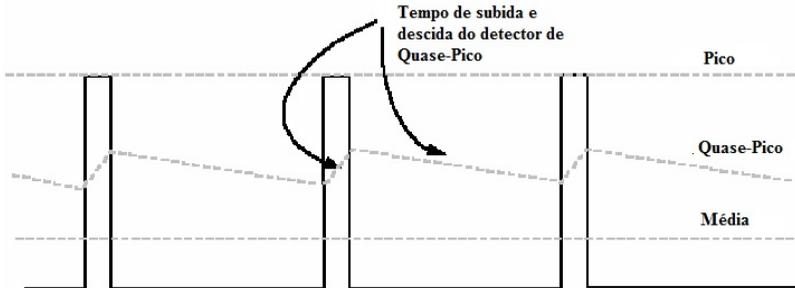
Tanto nos ensaios de emissão radiada quanto nos ensaios de emissão conduzida, os dispositivos de leitura executam uma “rápida” construção de um espectro inicial. Este espectro possui duas funções principais: a primeira função é a de representar o desempenho do equipamento sob teste para obter uma noção sobre quais faixas de frequência o equipamento está emitindo sinais indesejados com elevada amplitude. A segunda função é observar quais foram essas faixas de frequência, para que se possa realizar uma segunda análise mais completa sobre esses pontos específicos para verificar se o nível deles está em conformidade com os limites estabelecidos pelas normas vigentes.

Para realização dos ensaios, os dispositivos de leitura de sinais utilizam diferentes detectores de funções. Os detectores de funções utilizados nesse trabalho foram o detector de quase pico e o detector de valor médio.

- Detector de quase-pico: diferentemente do detector de pico que deve apresentar o maior valor lido a qualquer momento em que se realizou a análise, o detector de quase pico tem como função apresentar valores próximos do valor de pico, isto é possível devido à rápida constante de tempo de carga e lenta constante de tempo de descarga quando comparadas uma com a outra.
- Detector de média: possui como objetivo apresentar o valor médio de um sinal observado no tempo. (PAUL, 1992)

A Figura 1 representa bem as características de cada tipo de detector, sendo importante notar a diferença entre o tempo de subida e de descida do detector de quase-pico. O tempo de subida do detector de quase-pico é consideravelmente menor que o de descida. Além disso, vale ressaltar que os valores de quase-pico estão entre os valores de pico e médio, como é esperado.

Figura 1 - Comparação entre as respostas de um sinal entre os detectores de pico, quase-pico e média.



Fonte: Adaptado de Maniktala,(2003).

3.1.10 Componentes harmônicas

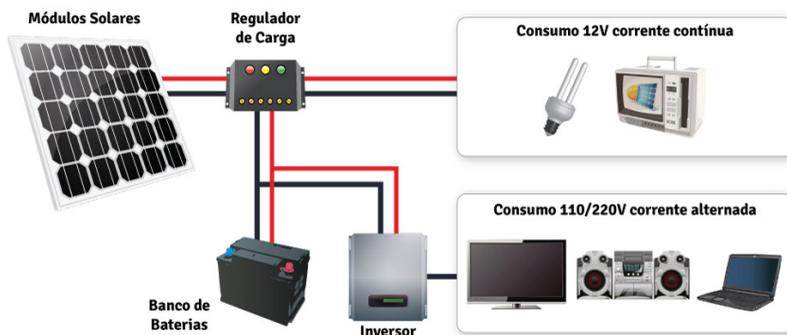
As componentes harmônicas de uma tensão ou corrente são componentes de frequência no sinal que estão em múltiplos inteiros da frequência do sinal principal. Este é o resultado básico que a análise de Fourier de um sinal periódico mostra. A distorção harmônica é a distorção do sinal devido a esses harmônicos.

Uma tensão ou corrente puramente senoidal não possui distorção harmônica porque é um sinal que consiste em uma única frequência. Um sinal periódico que não é puramente senoidal irá apresentar componentes harmônicas numa análise de espectro de frequências. As componentes harmônicas são sinais de frequência múltipla do sinal principal que possui uma frequência denominada como fundamental. A distorção harmônica total (THD) é uma análise que compara o somatório das componentes harmônicas em relação ao sinal principal. No caso de um sistema elétrico, quanto maior a THD pior será os impactos deste sistema quando acoplado à rede elétrica.

3.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para a conversão da energia solar em energia elétrica da forma com que é utilizada, há uma série de dispositivos e tecnologias envolvidas como representados na Figura 2. A seguir será apresentada uma breve explicação dos componentes que juntos constituem o sistema fotovoltaico.

Figura 2 - Componentes de um sistema fotovoltaico *off-grid*.



Fonte: Realsolar, (2017).

A Figura 2 representa um sistema fotovoltaico isolado da rede. O módulo solar alimenta o sistema e o controlador de carga regula o nível de tensão, além de controlar a carga e a descarga da bateria e o fornecimento de energia para o inversor; A bateria serve para armazenar o excedente de energia e fornecê-la ao sistema quando necessário; O inversor deve converter CC em CA e os aparelhos conectados a ele representam as cargas que necessitam de CA para funcionamento.

3.2.1 Módulo Solar Fotovoltaico

O módulo fotovoltaico é o principal componente do sistema fotovoltaico uma vez que cabe a ele a transformação da energia solar em energia elétrica devido ao efeito fotovoltaico.

A energia elétrica gerada pelo módulo solar é em formato de corrente contínua, e a potência gerada pode variar de acordo com a estação do ano, a hora do dia e as condições climáticas. Devido a estas variações no fornecimento de energia é necessária a interação do módulo com um controlador de carga.

3.2.2 Baterias

As baterias são frequentemente utilizadas em sistemas fotovoltaicos com o objetivo de armazenar energia produzida pelo módulo fotovoltaico durante o dia e fornecê-la para cargas elétricas conforme necessário (durante a noite e períodos de clima nublado). Na maioria dos casos, um controlador de carga é usado nestes sistemas para proteger a bateria de sobrecarga e descarga excessiva.

3.2.3 Controlador de Carga

Um controlador de carga gerencia a energia que é injetada no banco de baterias da matriz solar e garante que as baterias não sejam sobrecarregadas durante o dia. Alguns controladores de carga estão disponíveis com recursos adicionais, como iluminação e controle de carga, mas o gerenciamento da energia é a principal função deste equipamento. Controladores de carga solar estão disponíveis em duas tecnologias diferentes, PWM e MPPT.

Um controlador de carga solar PWM "Modulação de largura de pulso" opera fazendo uma conexão direta entre o módulo solar e o banco de baterias. Durante o carregamento, quando há uma conexão contínua do módulo para o banco de bateria, o nível de tensão de saída do módulo é reduzido para a tensão da bateria.

Um controlador de carga solar MPPT "Rastreador do ponto de máxima potência" mede a tensão do módulo e converte para o nível de tensão da bateria. Porém, nesta tecnologia quando o nível de tensão é reduzido para coincidir com o nível de tensão do banco de baterias, a corrente transmitida ao banco de baterias e à carga é elevada. Este processo busca o valor de corrente, que corresponde ao rastreamento da máxima potência, de acordo com curva de potência do módulo fotovoltaico. O controlador de carga utilizado neste estudo é da tecnologia MPPT.

3.2.4 Inversor de Tensão CC-CA

O inversor solar é um dispositivo capaz de converter CC em CA. Os inversores são componentes típicos dos sistemas fotovoltaicos, uma vez que os módulos solares geram eletricidade CC e a maioria dos dispositivos usados em casas ou escritórios operam com tensão CA.

Existem dois tipos principais de sistema solar: o que é vinculado à rede elétrica (*grid-tie*) e desconectado da rede (*off-grid*). Embora a função principal do inversor seja sempre a mesma, a conversão CC/CA. Esses dois tipos de sistemas usam diferentes modelos de inversores.

O inversor *grid-tie* converte a tensão CC da matriz solar em tensão CA que pode ser usada imediatamente ou exportada para a rede elétrica. O inversor *grid-tie* deve cumprir estritamente os requisitos e regulamentos da rede elétrica.

O inversor *off-grid*, devido ao seu baixo custo, normalmente fornece tensão senoidal modificada e alimenta sistemas de menor potência. A onda senoidal modificada, como será verificado neste

trabalho, é um sinal senoidal com fortes componentes harmônicas. Uma vez que os sistemas *off-grid* são desconectados da rede elétrica, os inversores *off-grid* não precisam corresponder aos requisitos e regulamentos da rede elétrica. O inversor utilizado neste estudo é um modelo *off-grid*.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Todos os equipamentos para a realização dos ensaios descritos neste trabalho, com exceção do módulo fotovoltaico, foram fornecidos pelo MagLab que também foi o local para execução destes mesmos ensaios.

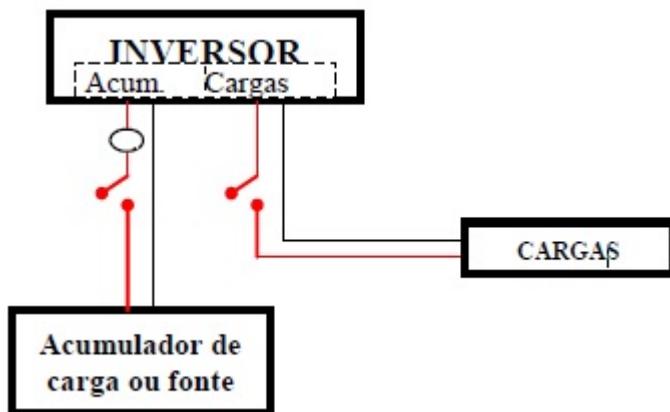
O painel fotovoltaico foi emprestado pelo Instituto de Eletrônica de Potência (INEP).

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS PARA ENSAIO DE EFICIÊNCIA E DISTORÇÃO HARMÔNICA

- Inversor de onda modificada CC/CA 12/220V de 800W-Hayonik.
- Bateria estacionária de 12V - Moura.
- Controlador de Carga MPPT *Epsolar Tracer-2210* 20A 12/24V.
- Medidor Remoto Digital para Controlador Epsolar – MT50.
- Banco de carga de resistores.
- Analisador de Qualidade de Energia – Fluke 43.
- *Software FlukeViewQualityAnalyser*.

4.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO DE EFICIÊNCIA E DISTORÇÃO HARMÔNICA

Figura 3 - Diagrama de conexões dos instrumentos para ensaio de eficiência e distorção harmônica.



Fonte: Portaria nº 004, INMETRO (2011).

A Figura 3 apresenta o diagrama de conexões dos instrumentos para ensaio de eficiência e de distorção harmônica, onde o acumulador de carga é uma bateria conectada na entrada de um inversor, cuja saída está conectada a um banco de cargas resistivas.

Segundo a portaria nº 004 de 2011 do INMETRO, o procedimento necessário para realização deste ensaio é o seguinte:

- a. Configurar os aparelhos e instrumentos de medição tal como aparece na Figura 3.
- b. Configurar a fonte como fonte de tensão, ajustando a tensão nominal do inversor.
- c. Conectar o acumulador de cargas ao inversor.
- d. Identificar as cargas resistivas puras equivalentes a 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 80% e 100% da potência nominal.
- e. Ligar a fonte com a tensão nominal de entrada do inversor e consecutivamente ligar as cargas com a distribuição antes mencionada. Para cada caso registrar os valores de corrente (média e de *ripple*) e tensão da entrada CC e, na saída CA, corrente, tensão, frequência e distorção harmônica total da tensão em relação à fundamental.
- f. Calcular a eficiência do inversor.
- g. Das medidas registradas, a eficiência deverá ser superior a 80% na faixa de operação entre 10% e 50% da potência nominal e igual ou superior a 85% na faixa entre 50% e 100% da potência nominal. Por outro lado, a distorção harmônica total deverá ser menor que 5% em qualquer potência de operação. (INMETRO, 2011)

4.3 MATERIAIS UTILIZADOS PARA ENSAIO DE EMISSÃO CONDUZIDA

- Módulo Fotovoltaico de 200 W Kyocera - KC200GT.
- Inversor de onda modificada CC/CA 12/220V de 800W-Hayonik.
- Bateria estacionária de 12V - Moura.
- Controlador de Carga MPPT *Epsolar Tracer-2210* 20A 12/24V.
- Medidor Remoto Digital para Controlador Epsolar – MT50.
- Banco de carga de resistores.
- LISN.

4.4 ENSAIO DE EMISSÃO CONDUZIDA

Para a realização do ensaio, foram seguidos os procedimentos descritos pela norma de consenso internacional CISPR11 com a classificação de equipamento como classe “A”, para medição de EMI.

Os seguintes parâmetros foram adotados para a realização dos ensaios de emissão conduzida como mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros da análise inicial de emissão conduzida.

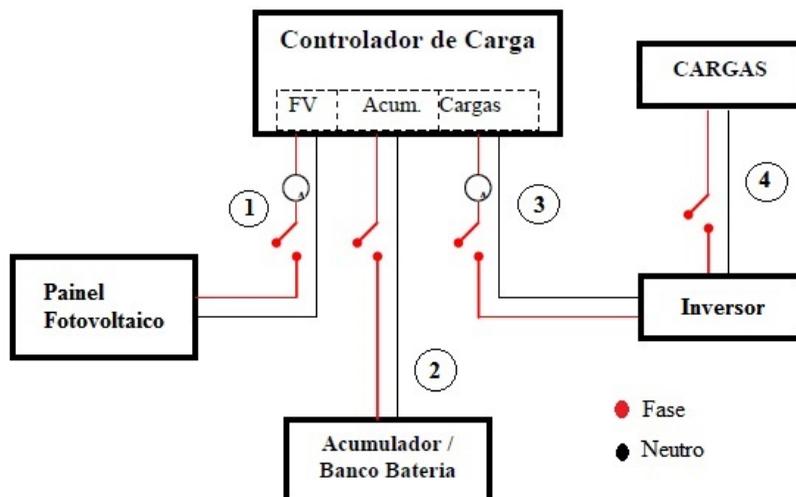
Faixa de frequência (MHz)	Detectores	Límites (dB μ V)	Tempo de medida (ms)
0,15 a 0,5	Quase-pico	79	20
0,15 a 0,5	Média	66	20
0,5 a 30	Quase-pico	73	20
0,5 a 30	Média	60	20

Fonte: Autor, (2017).

Para a produção do resultado final, até oito faixas de frequência são analisadas mais detalhadamente com um tempo de medida de 20 segundos, o que é mil vezes maior que na medição inicial. São os resultados desta segunda análise que determinam se o aparelho sob teste está ou não em conformidade com a norma. A existência de um único ponto desta segunda análise acima dos limites estabelecidos, já é o suficiente para a não conformidade do equipamento sob teste.

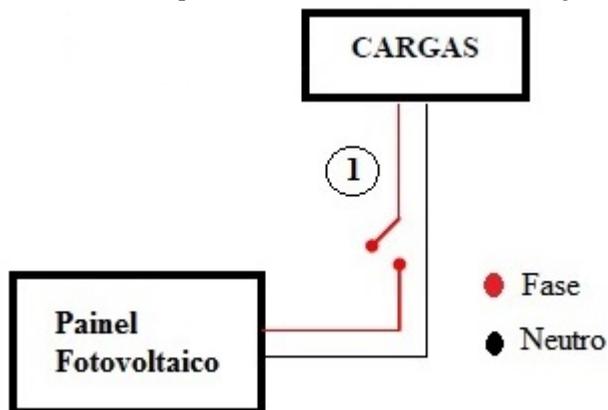
A Figura 4 representa o diagrama de conexões para realização de ensaios de emissão conduzida. O ponto 1 representa a conexão entre o módulo fotovoltaico e o controlador de carga; o ponto 2 representa a conexão entre a bateria e o controlador de carga; o ponto 3 representa a conexão entre a entrada do inversor (12 V CC) e o controlador de carga; e o ponto 4 representa a conexão entre a saída do inversor (220 V AC) com o banco de cargas resistivas. Todos os quatro pontos são os locais nos quais a LISN foi acoplada em série tanto no percurso fase quanto neutro para realização das medições. As medições foram realizadas uma a uma em cada ponto do sistema para a análise.

Figura 4 - Diagrama de conexões para realização de ensaios de emissão conduzida.



Fonte: Adaptado de Portaria nº 004 Inmetro, (2011).

Figura 5 - Diagrama de conexões para realização do ensaio de emissão conduzida entre o painel fotovoltaico e um banco de cargas resistivas.



Fonte: Adaptado de Portaria nº 004 Inmetro, (2011).

4.5 MATERIAIS UTILIZADOS PARA ENSAIO DE EMISSÃO RADIADA

- Módulo Fotovoltaico de 200 W Kyocera - KC200GT.
- Inversor de onda modificada CC/CA 12/220V de 800W-Hayonik.
- Bateria estacionária de 12V - Moura.
- Controlador de Carga MPPT *Epsolar Tracer-2210* 20A 12/24V.
- Medidor Remoto Digital para Controlador *Epsolar* – MT50.
- Banco de carga de resistores.
- Célula GTEM.

4.6 ENSAIO DE EMISSÃO RADIADA

Assim como nos ensaios de emissão conduzida, nos ensaios de emissão radiada, foram seguidos os procedimentos descritos pela norma CISPR11 com a classificação de equipamento como classe “A”.

Os seguintes parâmetros foram adotados para a realização dos ensaios de emissão radiada como mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros da análise inicial de emissão radiada.

Faixa de frequência (GHz)	Limites (dB μ V/m)
0,03 a 0,23	40
0,23 a 1,0	46

Fonte: Autor, (2017).

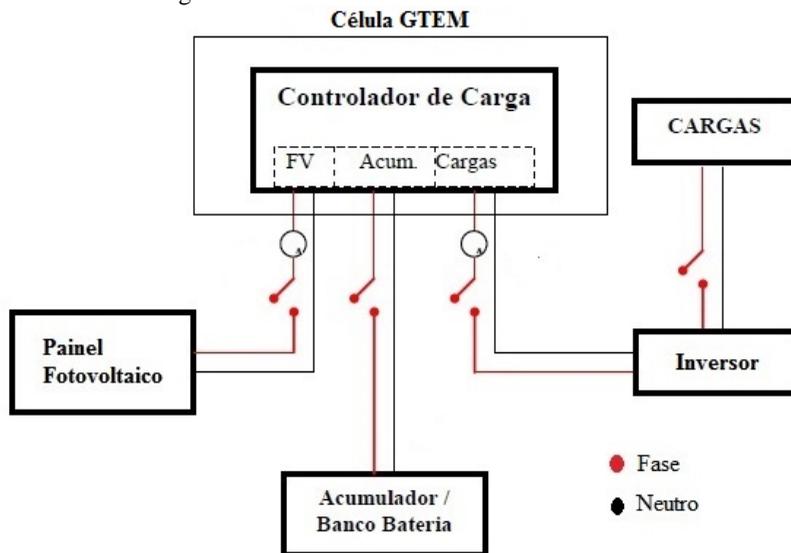
Para a produção do resultado final, algumas frequências são analisadas mais detalhadamente com um tempo de medida de 20 segundos. São os resultados desta segunda análise que determinam se o aparelho sob teste está ou não em conformidade com a norma. Um único ponto desta segunda análise acima dos limites estabelecidos, já é o suficiente para a não conformidade do equipamento sob teste.

Para a realização dos ensaios de emissão radiada, foram necessários dois tipos de montagem do sistema como representadas nas figuras 6 e 7. Na figura 6 o sistema fotovoltaico está devidamente conectado como na descrição da Figura 2, porém as cargas são estritamente resistivas e conectadas na saída do inversor. Esta mesma figura mostra que o único equipamento alocado dentro da célula GTEM é o controlador de carga. A Figura 7 apresenta a mesma configuração da Figura 6, porém neste caso o único equipamento que foi alocado dentro

da célula GTEM foi o inversor.

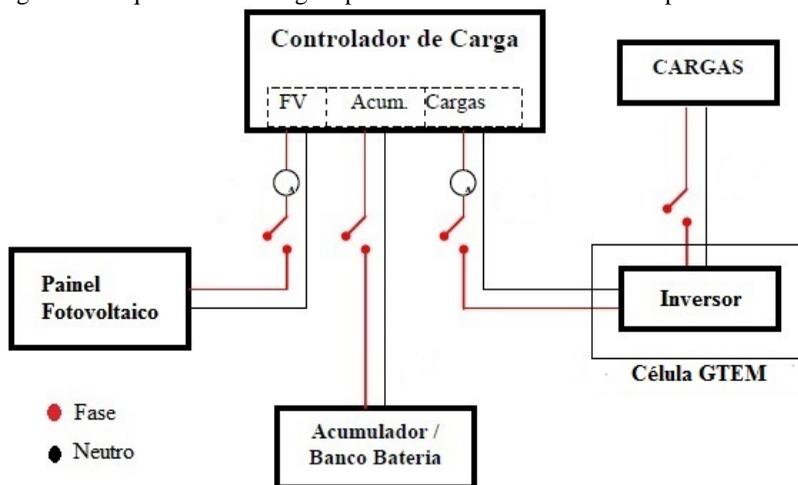
É importante lembrar que como o sistema possui um tamanho consideravelmente grande para a célula e como o módulo fotovoltaico necessita de exposição ao sol para funcionar, não foi viável a inclusão de todos os componentes dentro da célula.

Figura 6 - Esquema de montagem para ensaio de emissão radiada para controlador de carga.



Fonte: Adaptado de Portaria nº 004 Inmetro, (2011).

Figura 7 - Esquema de montagem para ensaio de emissão radiada para inversor.



Fonte: Adaptado de Portaria nº 004 Inmetro, (2011).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL DE TENSÃO

Com os dados obtidos da tabela 3, é possível observar que o inversor de tensão utilizado está aprovado nos requisitos mínimos exigidos pela portaria nº 004 de 2011 do INMETRO no que se refere à eficiência energética. O mesmo não é possível ser dito sobre o desempenho no ensaio de distorção harmônica total de tensão.

Tabela 3 - Valores referentes ao ensaio de eficiência e distorção harmônica do inversor.

Ensaio (%)	Tensão na saída do inversor (V_{rms})	Tensão na entrada do inversor (V)	Corrente na entrada do inversor (A)	THDv (%)	Eficiência (%)	Mínimo de eficiência por norma (%)
10	220,5	11,35	8,8	23,25%	80,46	80
20	221,1	11,17	16,7	23,97%	86,78	80
30	220,7	11,01	24,7	27,26%	88,81	80
40	221,5	11,58	30,8	29,05%	90,95	80
50	222,3	11,62	40,1	26,02%	87,65	85
60	219,9	11,60	48,2	27,75%	86,49	85
80	220,4	11,50	57,6	29,58%	96,98	85
100	220,5	11,37	74,8	32,13%	94,46	85

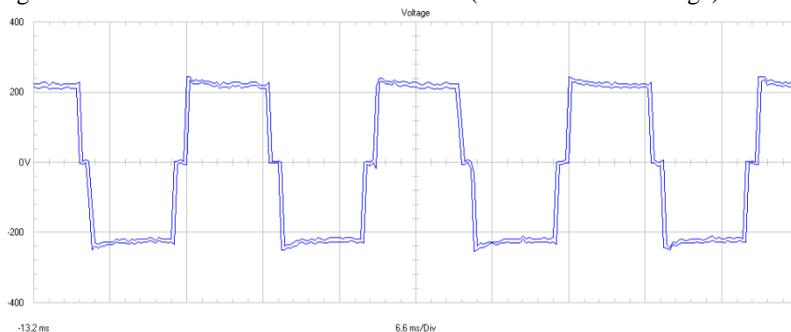
Fonte: Autor, (2017).

O inversor ainda apresentou uma forma de onda de tensão bem similar para os diferentes pontos de operação, sendo assim, os espectros de frequências dos harmônicos de tensão também apresentaram resultados parecidos. Os dois formatos podem ser observados nas figuras 8 e 9. Como na Figura 8, o formato de onda do inversor que é catalogado como um inversor de tensão cuja saída apresenta uma onda senoidal modificada, que se assemelha bastante com o formato de uma onda quadrada.

Os resultados obtidos no ensaio de medição de THDv apresentaram resultados que ultrapassaram valores de 30% o que é inadmissível segundo a portaria nº 004 de 2011 do INMETRO .

Como neste ensaio as cargas são resistivas, os mesmos índices de THDv podem ser assumidos para THDi e com isto é possível observar que diferentemente dos resultados obtidos nos estudos realizados por (OLIVEIRA *et al.*, 2016) em três pequenos sistemas fotovoltaicos conectados à rede, o desempenho do inversor no quesito de THDi piorou com o aumento da potência injetada, ao invés de reduzir para valores menores que 5%.

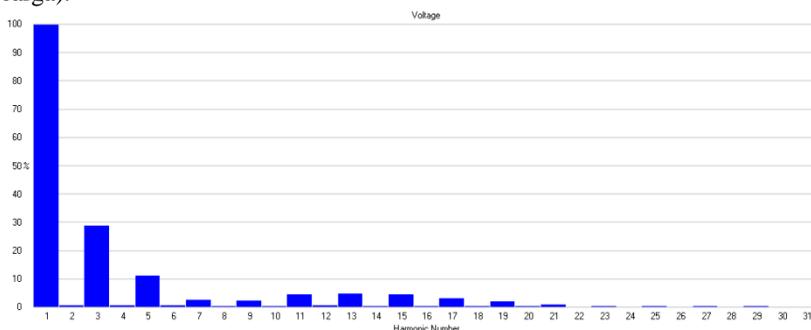
Figura 8 - Forma de onda da saída do inversor (teste de 100% de carga).



Fonte: Autor, (2017).

A Figura 8 apresenta o resultado do formato de onda de tensão na saída do inversor sob teste. Esta forma de onda foi descrita pelo *software* do analisador de energia utilizado no ensaio de eficiência energética e THDv.

Figura 9 - Espectro de frequências dos harmônicos de tensão (teste de 100% de carga).



Fonte: Autor, (2017).

A figura 9 apresenta o resultado do espectro de frequências obtido do formato de onda de tensão na saída do inversor sob teste.

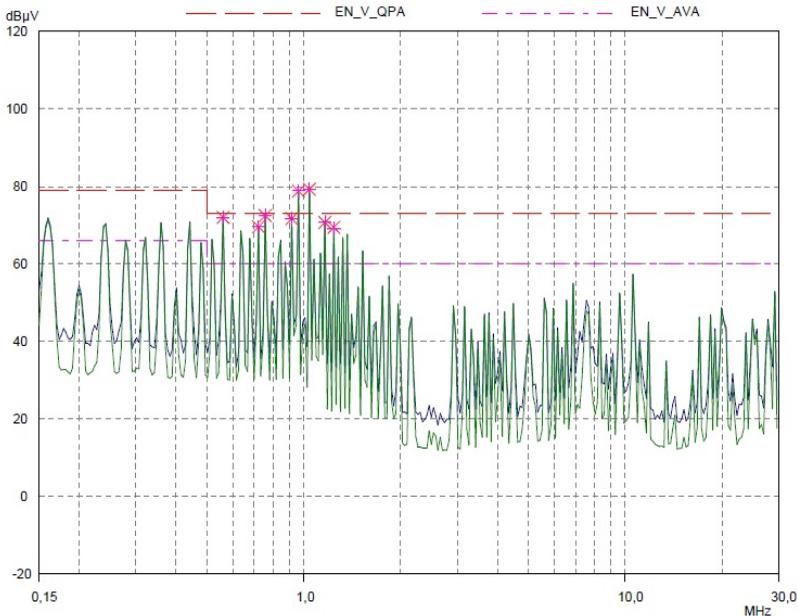
5.2 EMISSÃO CONDUZIDA

Dos resultados adquiridos nos ensaios de emissão conduzida, em todos os quatro pontos apresentados na Figura 4 e no único ponto da Figura 5 houve ruídos que ultrapassavam os limites estabelecidos pelas normas. Mas, dois desses ensaios apresentam uma maior relevância para

a contribuição de estudos. Estes foram os ensaios referentes à emissão conduzida do inversor para a carga e o ensaio em que o módulo fotovoltaico é conectado somente a um banco de cargas resistivas.

De acordo com a Figura 10 pode-se concluir que o sistema fotovoltaico composto por um painel fotovoltaico ligado a um banco de cargas resistivas apresenta uma faixa de frequência entre 0,5 e 1,1 MHz em que os ruídos conduzidos ultrapassam os limites estabelecidos na norma o que deixa este sistema fotovoltaico em estado de não conformidade.

Figura 10 - Resultado da medição de emissão conduzida do painel conectado ao banco de resistores (fase).



Fonte: Autor, (2017).

A Figura 10 representa o resultado obtido de um ensaio de emissão conduzida do módulo conectado ao banco de cargas resistivas no segmento fase de acordo com a norma CISPR 11 classe A. O eixo vertical representa a intensidade do ruído medido em dBμV numa escala de -20 a 120 e o eixo horizontal representa diferentes valores de frequência em MHz numa escala que vai de 0,15 a 30. Dois limites são observados: a linha tracejada superior definida como EN_V_QPA representa o limite para o sinal que está desenhado na cor azul

(intensidade de ruídos medidos pelo detector de quase-pico); a linha tracejada inferior definida como EN_V_AVA representa o limite para o sinal que está desenhado na cor verde (intensidade de ruídos medidos pelo detector de sinal médio).

Para que o sistema apresente um resultado melhor, há duas soluções possíveis: a primeira solução seria modificar a topologia do inversor visando uma redução na emissão de ruídos conduzidos e a segunda solução seria a aplicação de filtros.

É fundamental perceber que a aplicação de filtros no sistema encarece o projeto além de poder deteriorar o desempenho do sistema. Isto ocorre uma vez que os filtros refletem sinais de volta para o equipamento podendo causar degradação na operação de certos componentes, como também podem aumentar o nível dos ruídos provenientes de emissões radiadas.

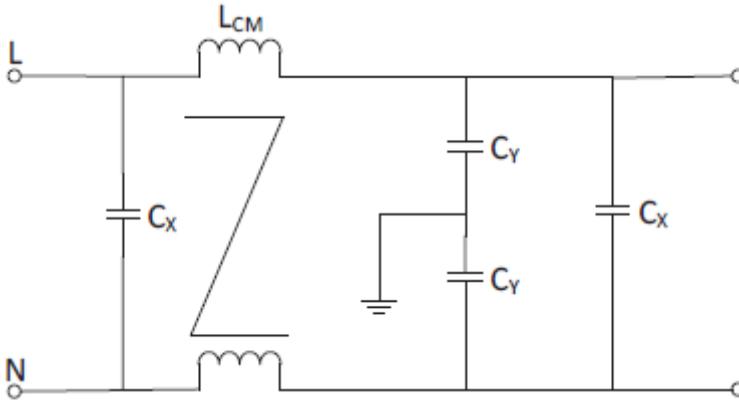
O ideal é que fabricantes procurem desenvolver o produto visando à compatibilidade eletromagnética desde as primeiras etapas do projeto. Há uma série de técnicas observadas em livros e artigos que auxiliam a elaboração de um projeto para que este não apresente altos índices de interferência eletromagnética.

Para os produtos que já estão sendo comercializados, a solução mais evidente acaba sendo a inserção de filtros como solução para o excesso da intensidade dos ruídos conduzidos.

Segundo (JIRAPRASERTWONG; JETTANASEN, 2014), é possível diminuir o nível desses ruídos pela aplicação de um filtro passivo como descrito na Figura 11. Quando o filtro é aplicado, os ruídos tornam-se menores que os limites exigidos pela norma configurando um atrativo principalmente quando há a utilização da tecnologia fotovoltaica somente para geração de energia CC.

A Figura 11 apresenta os componentes deste filtro que são: um indutor de modo comum (L_{cm}) de 3,1 mH, dois capacitores de modo comum (C_Y) de 48 nF, e dois capacitores de modo diferencial (C_X) de 2.2 μ F. (JETTANASEN; THONGSUK, 2013). O indutor e os capacitores de modo comum são utilizados para reduzir o ruído de modo comum, assim como os capacitores de modo diferencial servem para minimizar os ruídos de modo diferencial. (JIRAPRASERTWONG; JETTANASEN, 2014)

Figura 11- Estrutura do filtro passivo de EMI.

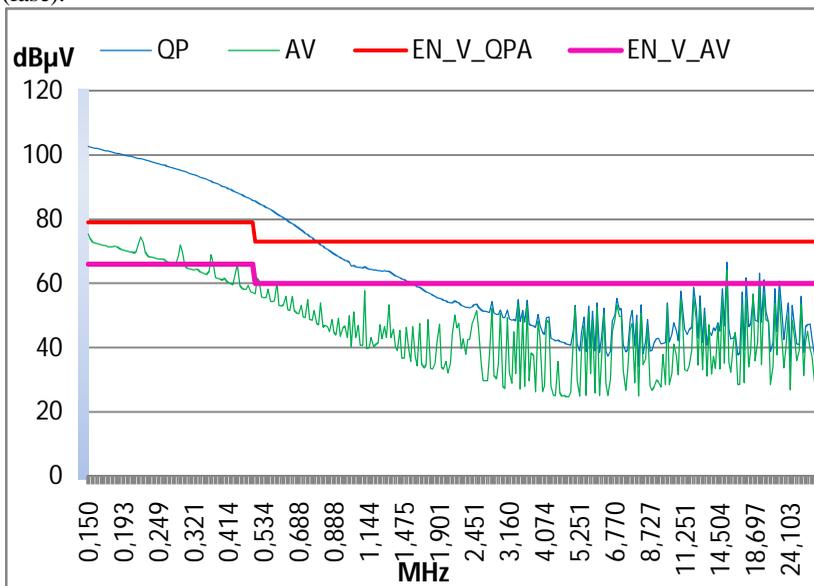


Fonte: JIRAPRASERTWONG; JETTANASEN, (2014).

A Figura 12 apresenta a resposta do ruído conduzido do inversor para o banco de cargas resistivas. Fica claro que há um nível excessivo na faixa de frequência entre 0,15 e 0,9 MHz. As tabelas 4 e 5 apresentam os dados em que há a confirmação de que o sistema não está em conformidade com a norma.

No estudo realizado por (LIZ, 2003) há uma série de filtros que podem ser aplicados com a intenção de reduzir os ruídos conduzidos a níveis aceitáveis por norma. Alguns desses filtros apresentam uma melhoria considerável, outros nem tanto. É necessária a aplicação de diferentes filtros para analisar qual apresenta o melhor resultado, uma vez que cada inversor apresenta características próprias.

Figura 12 - Resultado da medição de emissão conduzida na saída do inversor (fase).



Fonte: Autor, (2017).

A Figura 12 representa o resultado obtido de um ensaio de emissão conduzida no ponto 4 do diagrama representado na figura 4. O padrão do ensaio é de acordo com a norma CISPR 11 classe A. O eixo vertical representa a intensidade do ruído medido em dBμV numa escala de 0 a 120 e o eixo horizontal representa diferentes valores de frequência em MHz numa escala que vai de 0,15 a 30. Dois limites são observados: a linha definida como EN_V_QPA representa o limite para o sinal que está definido como QP (intensidade de ruídos medidos pelo detector de quase-pico); a linha definida como EN_V_AVA representa o limite para o sinal que está definido como AV (intensidade de ruídos medidos pelo detector de sinal médio).

Tabela 4 – Resultado dos valores do detector de Quase-Pico da medição de emissão conduzida na saída do inversor (fase).

Frequência (MHz)	Valor de Quase-pico (dB μ V)	Limite de Quase-pico (dB μ V)	Diferença entre valor e limite (dB)
0,15	102,66	79	-23,66
1,02383	65,58	73	7,42
1,1084	65,36	73	7,64
1,27862	63,99	73	9,01
15,21108	66,62	73	6,38
17,54703	61,92	73	11,08
19,30038	63,22	73	9,78
30	62,64	73	10,36

Fonte: Autor, (2017).

Tabela 5 – Resultado dos valores do detector de média da medição de emissão conduzida na saída do inversor (fase).

Frequência (MHz)	Valor de Média (dB μ V)	Limite de Quase-pico (dB μ V)	Diferença entre valor e limite (dB)
0,15	75,39	66	-9,39
0,1758	71,42	66	-5,42
0,18147	71,62	66	-5,62
0,21955	74,38	66	-8,38
0,29216	71,91	66	-5,91
0,33172	64,31	66	1,69
0,36487	69,05	66	-3,05
0,44143	66,05	66	-0,05

Fonte: Autor, (2017).

5.3 EMISSÃO RADIADA

Com os dados obtidos da Figura 13 e da tabela 6, que são os resultados do ensaio de emissões radiadas do ruído de fundo, é possível verificar que até mesmo o ruído de fundo do sistema fotovoltaico já é suficiente para que haja uma não conformidade. Os valores negativos da última coluna da tabela indica uma não conformidade do equipamento sob teste. Uma característica importante destes resultados, assim como foi observado nos estudos de (SUENAGA, 2005) é a aparição de picos de sinais nas faixas de frequência que compreende sinais de rádio de frequência modulada (FM). Os cabos do sistema fotovoltaicos acabam

Tabela 6- Medições finais de quase-pico do ruído de fundo.

Frequência (MHz)	Nível do Ruído (dBμV/m)	Limite (dBμV/m)	Diferença entre ruído e limite (dB)
31,981749	35,3	40,0	4,7
67,275333	40,7	40,0	-0,7
106,438175	44,0	40,0	-4,0
187,406769	16,0	40,0	24,0

Fonte: Autor, (2017).

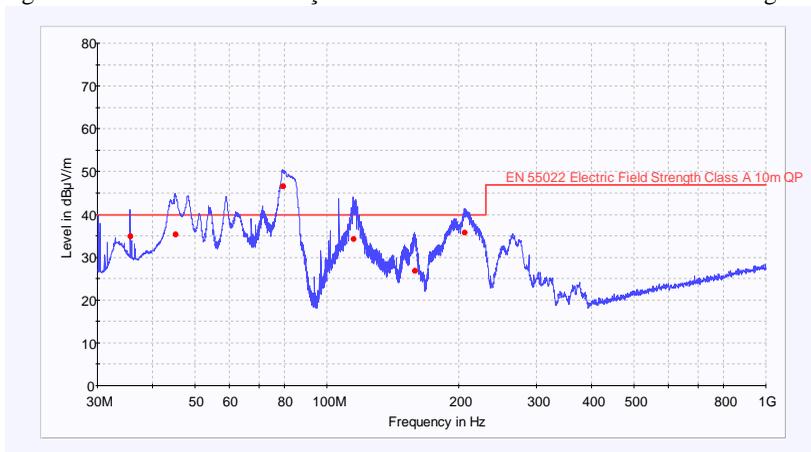
As Figuras 14 e 15 juntamente com as tabelas 7 e 8 apresentam os resultados dos ensaios realizados com o controlador de carga e com inversor. É importante lembrar que equipamento sob teste é considerado todo o sistema fotovoltaico. O resultado final deve ser a sobreposição dos pontos dos dois gráficos, mas para uma questão de análise, é melhor observar cada elemento separadamente para que haja uma melhor percepção de como tentar resolver o problema da melhor forma possível. O inversor apresentou valores elevados na faixa de 47 MHz enquanto controlador de carga apresentou na faixa de 80 MHz.

Para amenizar o nível de ruído gerado no sistema fotovoltaico também há duas maneiras clássicas: a primeira é modificando a topologia dos equipamentos que compõem o sistema fotovoltaico (preventiva) e a segunda maneira seria pelo uso de blindagem (corretiva).

Assim como nos problemas das emissões conduzidas, a melhor solução é que os fabricantes desenvolvam seus protótipos desde as etapas iniciais observando sempre as normas referentes à compatibilidade eletromagnética.

A aplicação de blindagens, além de encarecer o projeto, pode interferir negativamente no desempenho do produto. Isto ocorre devido ao fato de que as ondas eletromagnéticas são refletidas na superfície da blindagem e assim podem retornar aos componentes do produto, deteriorando o funcionamento dos mesmos.

Figura 14 - Resultado da medição de emissão radiada do controlador de carga.



Fonte: Autor, (2017).

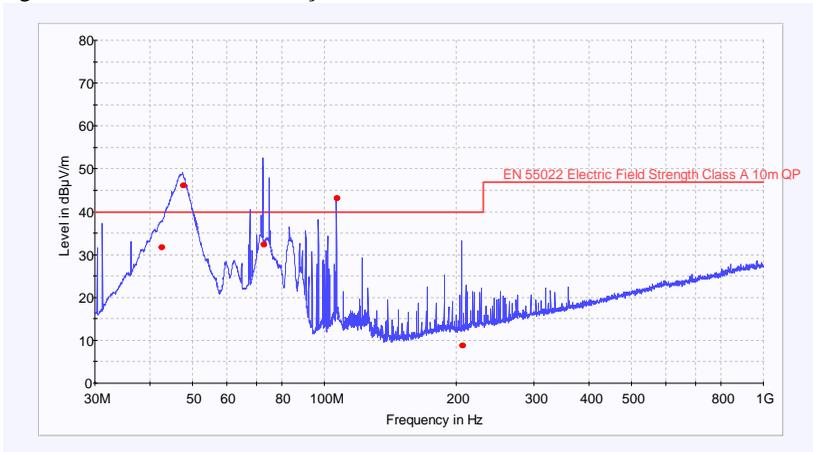
A Figura 14 representa o resultado obtido de um ensaio de emissão radiada de acordo com o diagrama representado na Figura 6. O padrão do ensaio é a norma CISPR 11 classe A. O eixo vertical representa a intensidade do ruído medido em $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ numa escala de 0 a 120 e o eixo horizontal representa diferentes valores de frequência numa escala que vai de 30 MHz a 1 GHz. A linha definida como “EM 55022 Electric Field Strength Class A 10m QP” representa o limite para o sinal que está desenhado em azul (intensidade de ruídos medidos pelo detector de quase-pico). Os pontos em vermelho acima da linha limite indicam uma não conformidade do equipamento sob teste.

Tabela 7 - Medições finais de quase-pico do controlador de carga.

Frequência (MHz)	Nível do Ruído ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	Limite ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	Diferença entre ruído e limite (dB)
35,627273	35,1	40,0	4,9
45,195274	35,4	40,0	4,6
79,337524	46,7	40,0	-6,7
114,838447	34,4	40,0	5,6
158,280051	27,0	40,0	13,0
205,662201	35,9	40,0	4,1

Fonte: Autor, (2017).

Figura 15 - Resultado da medição de emissão radiada do inversor.



Fonte: Autor, (2017).

A Figura 15 representa o resultado obtido de um ensaio de emissão radiada de acordo com o diagrama representado na Figura 7. O padrão do ensaio é de acordo com a norma CISPR 11 classe A. O eixo vertical representa a intensidade do ruído medido em $\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$ numa escala de 0 a 120 e o eixo horizontal representa diferentes valores de frequência numa escala que vai de 30 MHz a 1 GHz. A linha definida como “EM 55022 *Electric Field Strength Class A 10m QP*” representa o limite para o sinal que está desenhado em azul (intensidade de ruídos medidos pelo detector de quase-pico). Os pontos em vermelho acima da linha limite indicam uma não conformidade do equipamento sob teste.

Tabela 8- Medições finais de quase pico do inversor.

Frequencia (MHz)	Nível do Ruído ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	Limite ($\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$)	Diferença entre ruído e limite (dB)
42,394748	31,8	40,0	8,2
47,606368	46,3	40,0	-6,3
72,512298	32,4	40,0	7,6
106,438175	43,3	40,0	-3,3
205,456745	8,8	40,0	31,2

Fonte: Autor, (2017).

6 CONCLUSÃO

Segundo o Módulo 3 do PRODIST (ANEEL, 2017) para que qualquer sistema que seja conectado à rede, por meio de inversores, é necessário que o inversor em questão seja ensaiado e aprovado de acordo com normas brasileiras ou internacionais, ou ainda o número de registro de concessão do INMETRO.

Apesar de existirem duas normas nacionais que apresentam requisitos mínimos da operação de um sistema fotovoltaico conectado à rede (NBR. 16149 e NBR. 16150), nada é mencionado relativo a ensaios de emissão radiada e conduzida.

Segundo a portaria nº 004 de 2011 do INMETRO, os ensaios de emissão conduzida e radiada para inversores *off-grid* e *grid-tie* ainda estão sob estágio de estudos para futura inclusão no programa.

Apesar dos dois sistemas, *off-grid* e *grid-tie*, não compartilharem as mesmas normas referentes aos seus requisitos, foi realizada uma comparação entre os dois sistemas para poder observar as diferenças entre eles.

O desenvolvimento deste trabalho apresentou uma análise de um sistema fotovoltaico autônomo sob as perspectivas da compatibilidade eletromagnética. O estudo realizado teve como finalidade contribuir para o desenvolvimento de normas que sejam aplicadas aos equipamentos que compõem o sistema fotovoltaico.

Ainda segundo a portaria nº 004 de 2011 do INMETRO, os únicos ensaios exigidos de um inversor *off-grid* são os ensaios em condições nominais e os ensaios em condições extremas.

Os ensaios em condições nominais abrangem os seguintes ensaios:

- Autoconsumo;
- Eficiência, distorção harmônica, regulação da tensão e frequência;
- Sobrecarga.

Os ensaios em condições extremas abrangem os seguintes ensaios:

- Proteção contra inversão de polaridade;
- Proteção contra curto-circuito na saída;
- Eficiência, distorção harmônica, regulação da tensão e frequência em ambiente a 40°C.

O único ensaio realizado dentre estes foi o ensaio de eficiência e distorção harmônica, uma vez que este é o mais voltado à qualidade de energia gerada pelo sistema e seus impactos em equipamentos que

estejam conectados o sistema fotovoltaico.

No quesito de eficiência energética, o inversor apresentou um resultado condizente com o que está em seu catálogo e também está em conformidade com os requisitos mínimos descritos na portaria.

Ao verificar a distorção harmônica de tensão, foi possível observar um excesso na intensidade das componentes não fundamentais. O valor máximo de THDv aceito pelo que é descrito na portaria é 5% para qualquer um dos níveis de carga. Como foi possível observar, no ensaio com carga absorvendo 100% da potência nominal do inversor, o inversor apresentou um total de 32,13% de THDv o que chega a ser seis vezes mais que o máximo aceito pela portaria. Há um destaque para as harmônicas de terceira e quinta ordem, pois cada uma apresentou individualmente uma distorção de 29% e 11% respectivamente, o que já é o suficiente para deixar o inversor em estado de não conformidade.

Nos ensaios de emissão conduzida, ficou verificado que tanto os ruídos na entrada do inversor como na saída do mesmo, apresentaram valores superiores dos que os permitidos pela norma CISPR 11 para equipamentos de classe A.

Ao realizar a medição dos ensaios de emissões radiadas, foi observado que o sistema se comportou como uma antena e captou fortes níveis de ruídos nas faixas de frequência de ondas FM. Este resultado observa a crescente utilização de sistemas fotovoltaicos, podendo num futuro próximo começar a acarretar em uma fonte de interferência eletromagnética dentro de residências.

Ambos os ensaios de emissão radiada com o controlador de carga dentro da célula GTEM e com o inversor dentro da célula GTEM apresentaram ruídos com intensidade acima do limite estabelecido pela norma CISPR 11 para equipamentos de classe A. Este resultado deixa evidente de que há uma necessidade de observar os fenômenos da interferência eletromagnética para a inserção de futuros equipamentos no mercado.

É interessante, que para a futura produção de equipamentos que compõem o sistema fotovoltaico, as empresas fabricantes procurassem investir recursos no âmbito da compatibilidade eletromagnética para que seus equipamentos estejam de acordo com futuras normas.

A etapa inicial de um projeto é o momento principal para modificações em um futuro produto. Uma mudança simples na topologia de um equipamento pode ser a diferença na necessidade ou não de aplicar filtros ou blindagens nas etapas finais, o que encarece consideravelmente o produto.

6.1 CONSIDERAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de caso realizado neste trabalho visa servir como uma fundamentação teórica que busca contribuir para trabalhos relacionados que possam ser desenvolvidos.

Alguns temas sugeridos para trabalhos futuros são:

- A avaliação da interferência eletromagnética de um sistema fotovoltaico conectado à rede, para que haja uma comparação do desempenho dos dois modelos de sistemas fotovoltaicos existentes;
- A avaliação da imunidade quanto à interferência eletromagnética em sistemas fotovoltaicos conectados à rede e autônomos;
- Continuidade dos estudos de outras áreas da compatibilidade eletromagnética dos sistemas fotovoltaicos, como por exemplo estudo dos efeitos de surtos;
- Estudos sobre os efeitos causados nos sistemas fotovoltaicos com a aplicação de diferentes métodos de redução da interferência eletromagnética por meio de emissões conduzidas e radiadas.

REFERÊNCIAS

KODALI, V. Prasad. **Engineering electromagnetic compatibility: principles, measurements, and technologies**. New York: IEEE Press, 1996. xvi, 369p.

CHATTERTON, Paul A.; HOULDEN, M. A. (Michael A.). **EMC : electromagnetic theory to practical design**. Chichester: J. Wiley, c1992. (reimpressão 1998) xiv, 295p.

PAUL, Clayton R. **Introduction to electromagnetic compatibility**. New York: John Wiley, c1992. 765p.

MONTROSE, Mark I.; NAKAUCHI, Edward M. **Testing for EMC compliance: approaches and techniques**. John Wiley & Sons, 2004. 460 p.

WILLIAMS, Tim. **EMC for product designers**. 4th ed. Oxford, UK: Elsevier, c2007 xiv, 498 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **World energy outlook**. Paris: International Energy Agency, 2013. 687 p.

BACKUS, Charles E. **Solar cells..** New York: IEEE, 1976. 504 p.

BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase estática**. 3. ed. rev. Florianópolis: Editora da UFSC, 2012. 396 p.

SADIKU, Matthew N. O. **Elements of electromagnetics**. 2nd. ed. New York: Oxford University, c1995. xv, 821 p.

RIES, Adriano Kieling. **Contribuição ao estudo da interferência eletromagnética em fontes chaveadas para uso comercial**. Florianópolis, 2008. xxi, 194 f. Tese (Doutorado) -

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

LIZ, Muriel Bittencourt de. **Contribuição para a redução da interferência eletromagnética em fontes chaveadas.** Florianópolis, 2003. ix, 168 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

NYLAND, Felipe. **Contribuição ao ensaio de proficiência em compatibilidade eletromagnética.** Florianópolis, 2007. xv, 157 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.

PEREIRA, Philipe et al. **Comparative analysis of PWM techniques: An electromagnetic compatibility study on the inverter operation within photovoltaic systems.** In: Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC), 2015 IEEE 13th Brazilian. IEEE, 2015. p. 1-6.

JIRAPRASERTWONG, Jukkrit; JETTANASEN, Chaiyan. **Analysis and mitigation of conducted electromagnetic interference in a photovoltaic single-phase inverter.** In: TENCON 2014-2014 IEEE Region 10 Conference. IEEE, 2014. p. 1-5.

JIRAPRASERTWONG, Jukkrit; JETTANASEN, Chaiyan. **Electromagnetic interference in photovoltaic system and mitigation of conducted noise at DC side.** In: Region 10 Conference (TENCON), 2016 IEEE. IEEE, 2016. p. 915-920.

OLIVEIRA, Luís Guilherme Monteiro et al. **Assessment of Harmonic Distortion in small grid-connected photovoltaic systems.** In: Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2016 17th International

Conference on. IEEE, 2016. p. 810-816.

JETTANASEN, Chaiyan; THONGSUK, Surakit. **Attenuation of high-frequency electromagnetic noise in a single-phase AC motor drive**. In: Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013 International Conference on. IEEE, 2013. p. 1367-1370.

SUENAGA, S. et al. **Electromagnetic noise from solar cells**. In: Photovoltaic Specialists Conference, 2005. Conference Record of the Thirty-first IEEE. IEEE, 2005. p. 1820-1822.

ABNT, **NBR. 16149-Sistemas fotovoltaicos (FV)-Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**. 2013.

ABNT, **NBR. 16150-Sistemas fotovoltaicos (FV)-Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição - Procedimento de ensaio de conformidade**. 2013.

BRASIL. ANEEL. Resolução nº 724, de 2016. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/PRODIST-M%C3%B3dulo3_Revis%C3%A3o7/ebfa9546-09c2-4fe5-a5a2-ac8430cbca99>. Acesso em: 21 dez. 2017.

INMETRO. Portaria nº 004 de 2011. **Requisitos de avaliação da conformidade para sistemas e equipamentos para energia fotovoltaica (módulo, controlador de carga, inversor e bateria)** Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001652.pdf>>. Acesso em: 21 dez. 2017.