

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

DANIEL LAVINO JUNIOR

**FILTROS DE EMI APLICADO A SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS**

VITÓRIA
2021

DANIEL LAVINO JUNIOR

FILTROS DE EMI APLICADO A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Daniel Lavino Junior**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

Coorientador: Eng. André Salume L. F. Leão

VITÓRIA
2021

DANIEL LAVINO JUNIOR

FILTROS DE EMI APLICADO A SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

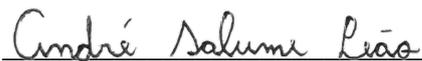
Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Daniel Lavino Junior**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 07 de outubro de 2021.

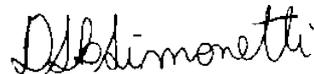
COMISSÃO EXAMINADORA:



Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Eng. André Salume L. F. Leão
Aruna Energia do Brasil LTDA
Coorientador



Prof. Dr. Domingos S. L. Simonetti
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador



Prof. Me. Adriano Fazolo Nardoto
Instituto Federal do Espírito Santo
Examinador

Dedico este trabalho aos meus pais, Angela e Daniel, pelo amor e suporte inesgotáveis e às minhas irmãs Daiani e Danieli que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado durante todo o meu período de graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelos privilégios que me foram dados desde o dia em que eu nasci.

Aos meus pais, Angela e Daniel, razão da minha existência.

Às minhas irmãs, Daiani e Danieli, meus exemplos de vida.

Ao meu orientador, Prof. Walbermark dos Santos, pela dedicação, paciência e competência excepcionais durante toda a orientação deste trabalho.

Ao meu amigo e coorientador, Eng. André Salume, por me acompanhar ao longo de todo o trabalho e por ser uma pessoa muito compreensiva.

Ao grupo de amigos: Fernanda Boechat, Nathalia Scardua, Vinícius Martins, Julia Siman, Guilherme (Jamal), Carol Tottola, Lucas Barros e Henrique Tamanini; que mesmo à distância (devido à pandemia) não hesitaram em estar presentes virtualmente e me trouxeram ótimos momentos de alegria. Vocês me fazem querer viver (às vezes não tanto... risos).

Aos amigos da UFES: Lucas Scart, Laila Sindra, Bruno Jevaux, Danilo Nunes; pela parceria constante durante todas as aulas (e intervalos na cantina do CT jogando baralho!).

A todos os meus amigos do LRE, por todo o aprendizado durante a fase mais incrível da minha graduação.

A todos os amigos da UFES não citados, mas que certamente muito contribuíram para que eu chegasse até o fim.

À Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) universidade pública, gratuita e de qualidade.

A todos que me estenderam a mão. Muito obrigado!

RESUMO

Com a regulamentação das minis e microgerações distribuídas (MMGD) e a redução do custo dos painéis fotovoltaicos a quantidade de conversores chaveados de energia (inversores) no meio urbano tem aumentado sem precedentes. Aliado a isso, com o avanço da eletrônica de potência, também se observa aumento nas frequências de chaveamento. Neste trabalho, mostra-se que o chaveamento de corrente/tensão está diretamente relacionado à emissão de ruídos eletromagnéticos em banda larga, ressaltando a importância do uso de filtros de interferência eletromagnética (EMI) para que os diversos equipamentos do meio urbano possam funcionar em harmonia. O trabalho também realiza uma simulação computacional a fim de relacionar como determinados elementos do sistema fotovoltaico afetam a emissão dos ruídos. É feita uma revisão bibliográfica acerca das principais topologias de filtros de EMI e uma estratégia prática é utilizada no projeto de cinco atenuadores. Os filtros são adicionados ao sistema fotovoltaico para que seu desempenho seja, então, avaliado com base nas normas regulamentadoras. Dentre certas considerações, os resultados finais obtidos das simulações se enquadram com a norma NBR IEC/CISPR 22.

Palavras-chave: Filtro. EMI. Inversor. Fotovoltaico. Simulação.

ABSTRACT

With the legal regulation of mini and micro generations and the reduction in the cost of photovoltaic panels, the number of switched energy converters (inverters) in urban areas has increased without precedent. Allied to this, with the advancement of power electronics, an increase in switching frequencies is also observed. In this work, it is shown that the current/voltage switching is directly related to the emission of electromagnetic noise in broadband, emphasizing the importance of using electromagnetic interference (EMI) filters so that the various equipment in urban areas can work in harmony. The work also performs a computer simulation in order to relate how certain elements of the photovoltaic system affect noise emission. A literature review is made about the main topologies of EMI filters and a practical strategy is used in the design of five attenuators. Filters are added to the photovoltaic system so that their performance is then evaluated based on regulatory standards. Among certain considerations, the final results obtained from the simulations comply with the NBR IEC/CISPR 22 standard.

Keywords: Filter. EMI. Inverter. Photovoltaic. Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Projeção de unidades consumidoras a adotarem microgeração	15
Figura 2 – Manifestação da EMI em um sistema fotovoltaico	16
Figura 3 – A decomposição básica do problema da EMC.....	19
Figura 4 – Vertentes de estudo da EMC	20
Figura 5 – Pulsos em PWM: comportamento ideal	20
Figura 6 – Pulsos em PWM: comportamento real.....	20
Figura 7 – Limites espectrais da forma de onda trapezoidal	21
Figura 8 – Limites espectrais da forma de onda trapezoidal	22
Figura 9 – Fonte de ruído de modo diferencial.....	23
Figura 10 – Fonte de ruído de modo comum. a) Tipo I. b) Tipo II	23
Figura 11 – Comportamento dos três tipos de detectores de EMI.....	25
Figura 12 – Limites estabelecidos pela NBR IEC/CISPR 22	27
Figura 13 – Rede Fictícia (LISN)	28
Figura 14 – Sistema fotovoltaico <i>on-grid</i> instalado em uma residência	30
Figura 15 – Subdivisões de um painel fotovoltaico.....	31
Figura 16 – Curva I-V e P-V para um módulo com potência nominal de 100Wp	31
Figura 17 – Curva P-V para um módulo (a) com variação da irradiação, (b) com variação da temperatura.	32
Figura 18 – Exemplo de esquemático simplificado de um inversor genérico.....	33
Figura 19 – Curva de atenuação em função da frequência de (a) filtro com componentes ideais e (b) mesmo filtro com componentes reais.....	35
Figura 20 – Circuito equivalente de um resistor.....	36
Figura 21 – Resposta em frequência do circuito equivalente de um resistor.	36
Figura 22 – Circuito equivalente de um capacitor.....	37
Figura 23 – Resposta em frequência do circuito equivalente de um capacitor.	37
Figura 24 – Circuito equivalente de um indutor.....	38
Figura 25 – Resposta em frequência do circuito equivalente de um indutor.....	38
Figura 26 – Circuito equivalente de um diodo.	39
Figura 27 – Circuito equivalente de um MOSFET (a) considerando suas capacitâncias de acoplamento (b) quando em condução.	40
Figura 28 – Acoplamento capacitivo (a) entre um semicondutor e um dissipador, (b) entre enrolamentos de um transformador e (c) acoplamento indutivo.	40

Figura 29 – Topologias de filtro monofásico para aplicação em EMC.....	41
Figura 30 – Fluxo em um filtro de modo comum (a) com corrente de modo comum e (b) com corrente de modo diferencial.	42
Figura 31 – Filtro de rede com poucas perdas	43
Figura 32 – Filtro de rede típico	43
Figura 33 – Filtro com topologia π balanceado	43
Figura 34 – Filtro de 2 estágios típico	44
Figura 35 – Filtro de 2 estágios típico de fontes chaveadas	44
Figura 36 – Filtro 1. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial.....	45
Figura 37 – Filtro 2. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial.....	46
Figura 38 – Filtro 3. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial.....	47
Figura 39 – Filtro 4. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial.....	48
Figura 40 – Filtro 5. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial.....	49
Figura 41 – Determinação da frequência de corte em MD.....	50
Figura 42 – Topologia do sistema fotovoltaico utilizado na simulação	52
Figura 43 – Conversor Zeta utilizado como MPPT.....	53
Figura 44 – Topologia do inversor VSI ponte completa	54
Figura 45 – Modulação PWM em 3 níveis.....	54
Figura 46 – Magnitude da EMI gerada pelo sistema sem filtros em MC com portadora (a) triangular, (b) dente de serra e (c) dente de serra invertido	55
Figura 47 – Topologia da rede fictícia (LISN)	56
Figura 48 – Analisador de sinal utilizado na simulação	56
Figura 49 – Corrente e tensão de saída do inversor.....	57
Figura 50 – Detalhe na curva de saída em corrente do inversor.....	57
Figura 51 – Magnitude da EMI gerada pelo sistema sem filtros em MC e MD com harmônicos críticos apontados pelas setas vermelhas	58
Figura 52 – Topologia do sistema fotovoltaico com filtro de EMI utilizado na simulação ...	60
Figura 53 – Resultado parcial da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 5 em MC e MD.....	60

Figura 54 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 1 em MC e MD	61
Figura 55 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 2 em MC e MD	62
Figura 56 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 3 em MC e MD	62
Figura 57 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 4 em MC e MD	63
Figura 58 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 5 em MC e MD	63
Figura 59 – Resultados das características dos filtros	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites da NBR IEC/CISPR 22.....	26
Tabela 2 – Parâmetros do sistema fotovoltaico	53
Tabela 2 – Dimensionamento dos elementos dos filtros	58
Tabela 3 – Resultado final do dimensionamento dos elementos dos filtros.....	61
Tabela 4 – THDi dos filtros	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AVG	<i>Average</i>
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CISPR	<i>Comité International Especial des Perturbações Radioélectriques</i>
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
ESE	Equipamento Sob Ensaio
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FV	Fotovoltaico
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LISN	<i>Line Impedance Stabilization Network</i>
MC	Modo Comum
MD	Modo Diferencial
MMGD	Mini e Micro Geração Distribuída
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
NBR	Norma Brasileira
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PK	<i>Peak</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QP	<i>Quasi-Peak</i>
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SFI	Sistema Fotovoltaico Isolado
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$ F(\omega) $	Módulo da transformada de Fourier (V)
t	Tempo (s)
T	Período da onda (s)
τ	Duração (s)
τ_r	Tempo de subida (s)
τ_f	Tempo de descida (s)
I_F	Corrente no terminal da fase (A)
I_N	Corrente no terminal do neutro (A)
I_{MC}	Corrente de modo comum (A)
I_{MD}	Corrente de modo diferencial (A)
$\vec{Z}(s)$	Impedância equivalente em função da frequência (Ω)
R	Resistência (Ω)
R_{RSE}	Resistência série equivalente (Ω)
R_{par}	Resistência parasita (Ω)
C	Capacitância (F)
C_{par}	Capacitância parasita (F)
L	Indutância (H)
L_{term}	Indutância nos terminais (H)
C_x	Capacitor de fase-neutro ou de modo diferencial (F)
C_y	Capacitor de fase/neutro-terra ou de modo comum (F)
L_{md}	Indutância de modo diferencial (H)
L_{mc}	Indutância de modo comum (H)
L_{disp}	Indutância de dispersão (H)
f_c	Frequência de corte (Hz)
a	Atenuação do filtro (dB/dec)
Y_2	Amplitude do harmônico crítico (dB/ μ V)
Y_1	Amplitude da norma (dB/ μ V)
X_2	Frequência do harmônico crítico (Hz)
$f_{c_{CM}}$	Frequência de corte de modo comum (Hz)
$f_{c_{DM}}$	Frequência de corte de modo diferencial (Hz)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contextualização.....	15
1.2	Definição do Problema e Contribuição.....	16
1.3	Resultados Esperados.....	17
2	INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA	18
2.1	Introdução	18
2.2	Modelagem Matemática.....	20
2.3	Correntes de Modo Comum e de Modo Diferencial.....	22
2.4	Normatização	24
2.5	Considerações Finais	28
3	SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	29
3.1	Introdução	29
3.2	Funcionamento Básico	29
3.3	Módulo Fotovoltaico.....	30
3.4	Inversor Fotovoltaico	32
3.5	Considerações Finais	34
4	FILTROS DE EMI	35
4.1	Introdução	35
4.2	Componentes Básicos e Seus Comportamentos.....	35
4.2.1	Resistores.....	36
4.2.2	Capacitores	37
4.2.3	Indutores	38
4.2.4	Diodos.....	39
4.2.5	MOSFET	39
4.2.6	Capacitâncias e Indutâncias Parasitas e de Acoplamento	40
4.3	Filtros Básicos	41
4.4	Topologias Utilizadas	42
4.5	Considerações Finais	44
5	MÉTODO E PROJETO DE FILTROS DE EMI	45

5.1 Circuitos Equivalentes de Modo Comum e de Modo Diferencial	45
5.2 Método de Dimensionamento dos Elementos Passivos	49
5.3 Topologia do Sistema Fotovoltaico Utilizado	51
5.4 Comportamento da EMI no Sistema Fotovoltaico Sem Filtro	56
5.5 Dimensionamento dos Filtros Utilizados	58
5.6 Considerações Finais	59
6 RESULTADOS.....	60
7 CONCLUSÕES	65
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
APÊNDICE A – CÓDIGO DO MATLAB UTILIZADO PARA PLOTAR O ESPECTRO EM FREQUÊNCIA	71
APÊNDICE B – CÓDIGO DO BLOCO C DO MPPT NO PSIM	73

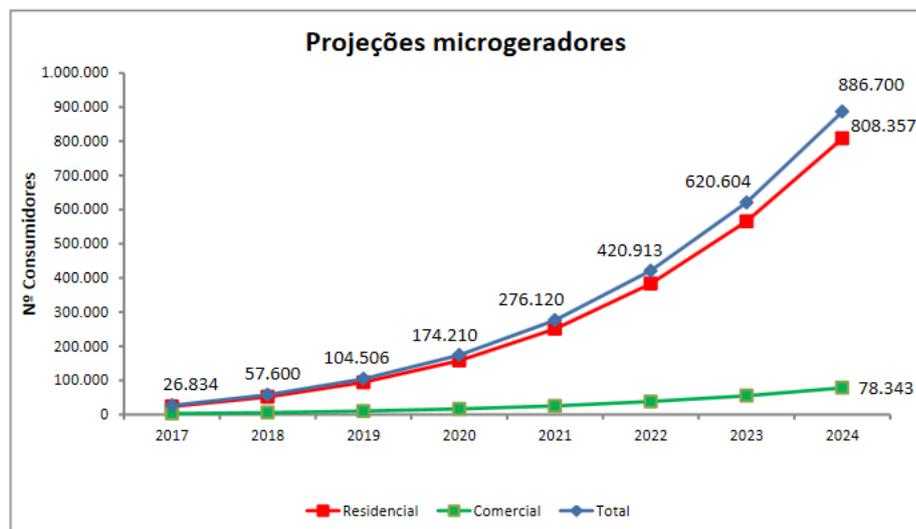
1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os esforços na busca pelo desenvolvimento e crescimento econômico geram indiscutivelmente uma enorme e ininterrupta demanda por energia elétrica. Em cenário mundial, isto mostra a necessidade cada vez maior da criação de novas usinas de geração de energia. Entretanto, há uma grande preocupação acerca dos impactos ambientais relacionados à construção de usinas hidroelétricas e à queima de combustíveis fósseis (BALBINO, 2017). Neste contexto, a utilização de fontes alternativas de energia, como a energia solar fotovoltaica (PV, do inglês *photovoltaic*), vem sendo cada vez mais estudada ao se mostrar uma ótima opção para suplementar a geração de energia elétrica.

Segundo o CRESESB (2014) a energia solar é uma das alternativas energéticas mais promissoras e considerada inesgotável na escala de tempo terrestre. Além disso, tem apresentado grande crescimento nos últimos anos devido à contínua queda nos preços dos painéis. Ao funcionar como pequenas unidades de geração de energia em residências, comércio e indústria ela se torna uma solução atrativa para a utilização em regiões urbanas e rurais. Na Figura 1 deixa-se evidente o crescimento exponencial da quantidade de microgeradores, principalmente de uso residencial, estimando um valor de quase 900 mil unidades consumidoras em 2024.

Figura 1 – Projeção de unidades consumidoras a adotarem microgeração



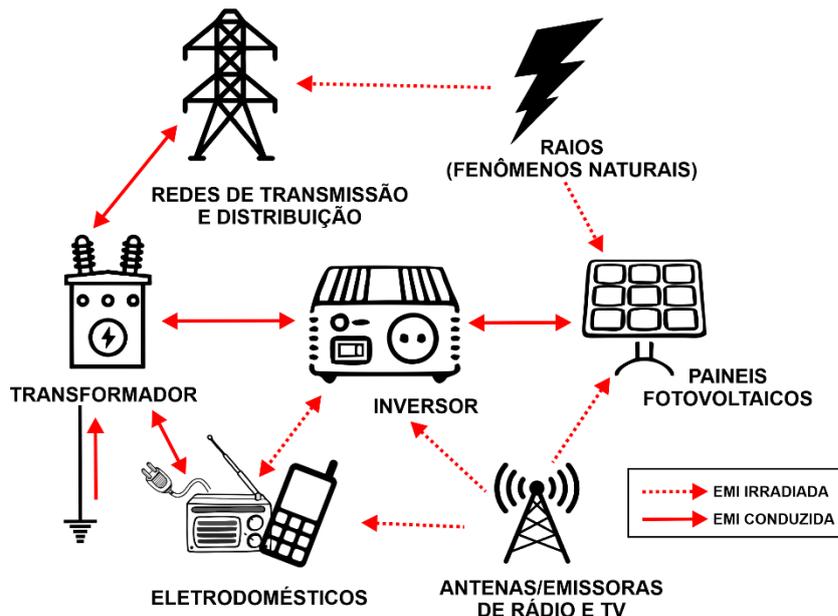
Fonte: Agência Nacional De Energia Elétrica (2017).

Uma das grandes medidas de incentivo à geração fotovoltaica no país foi a regulamentação das minis e microgeradoras distribuídas, normatizando um sistema de compensação de energia. Dessa forma, é permitido que os consumidores instalem pequenos geradores em suas unidades consumidoras e injetem a energia excedente em troca de créditos na conta de energia (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

1.2 Definição do Problema e Contribuição

Apesar de apresentar grandes vantagens como fonte alternativa de energia, a geração fotovoltaica possui pontos que necessitam de atenção. Nestes sistemas a conversão da corrente contínua (CC) para a corrente alternada (CA) geralmente é feita pelo equipamento denominado inversor (conversor CC-CA). Os inversores são circuitos eletrônicos capazes de chavear a tensão/corrente das placas fotovoltaicas em alta frequência, convertendo-a em um sinal modulado na frequência e tensão de alimentação da rede. Este chaveamento insere um enorme conteúdo harmônico (ruído) em uma ampla faixa de frequência, que pode ser conduzido para fora do equipamento por meio dos cabos ou até mesmo irradiado causando diversos tipos de interferência ou danos à saúde humana (SUELA, 2016). Na Figura 2 ilustra-se como a EMI pode se manifestar em um sistema fotovoltaico.

Figura 2 – Manifestação da EMI em um sistema fotovoltaico



Fonte: Produção do próprio autor.

É esperado que novos modelos de inversores operem com frequências maiores de chaveamento, levando a uma maior densidade de potência e com maiores tensões, o que reduz as perdas por efeito Joule e permite a utilização de cabos mais finos nas instalações (FRAUNHOFER ISE, 2015a). Como será visto, o aumento da frequência de comutação dos inversores está diretamente relacionado à emissão de ruído eletromagnético, ressaltando ainda mais a necessidade de abordar o tema.

Além disso, a legislação brasileira para sistemas fotovoltaicos especifica limites apenas para a quantidade de distorção harmônica total (THD) dos primeiros harmônicos, não exigindo a realização de testes específicos com o objetivo de normatizar os limites de radiações provenientes dos mesmos, e muito menos um controle de qualidade rigoroso dos conversores instalados no país, no que diz respeito a níveis de emissões eletromagnética (SUELA, 2016).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é realizar o estudo das interferências eletromagnéticas (EMI) conduzidas oriundas de um sistema fotovoltaico e, por meio de simulações computacionais, verificar o desempenho de diferentes tipos de filtros de EMI como elemento mitigador do fenômeno. Serão abordados a normatização, as topologias dos sistemas empregados, os métodos utilizados no projeto dos filtros e os resultados da aplicação do mecanismo de filtragem.

1.3 Resultados Esperados

Espera-se produzir um trabalho de forma clara e compreensiva acerca das radiações eletromagnéticas conduzidas e suas principais origens nos sistemas fotovoltaicos, além de estratégia para colocá-lo em conformidade com as normas regulamentadoras. A partir do referencial bibliográfico será possível compreender o comportamento de filtros reais quando submetidos a altas frequências e a aplicação de técnicas para filtrar as emissões na faixa indesejada. Acredita-se que ao final deste trabalho o mesmo poderá ser utilizado em projetos onde houver a intenção de se utilizar filtros para reduzir os efeitos da EMI.

2 INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA

2.1 Introdução

Segundo a ABNT (2021), a interferência eletromagnética (EMI) pode ser definida como a degradação do desempenho de um equipamento, canal de transmissão ou sistema; causada por uma perturbação eletromagnética. Uma perturbação eletromagnética pode ser um ruído eletromagnético, um sinal não desejado ou uma modificação do próprio meio de propagação.

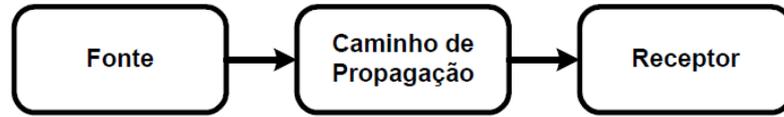
As emissões eletromagnéticas podem se manifestar de diversas formas, de maneira natural e também artificial. Algumas delas são ricas em conteúdo espectral (emissões em banda larga) como descargas atmosféricas e a abertura/fechamento de relés. Outras, como linhas de transmissão e sinais de televisão emitem um espectro de banda estreita (na frequência de transmissão) (LIZ, 2003).

Uma outra fonte de emissão eletromagnética, está associada aos inversores de energia elétrica existentes nos sistemas fotovoltaicos da atualidade. Estes equipamentos que estão cada vez mais presentes nas residências e no meio urbano são capazes de produzir um elevado conteúdo espectral devido ao chaveamento de altas correntes em altas frequências. Caso não seja dada a devida atenção a essas emissões o dispositivo poderá ocasionar interferências eletromagnéticas em outros sistemas como, por exemplo, nos de rádio e telecomunicação.

Neste contexto, surge a necessidade de se estudar a compatibilidade eletromagnética (EMC). Esta 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 (SEVERINO, 2018).

A EMC, como uma solução para o problema da EMI, tem seu foco na geração, transmissão e recepção da energia eletromagnética (LIZ, 2003), como é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – A decomposição básica do problema da EMC



Fonte: Liz (2003).

Sendo assim, uma fonte produz a emissão eletromagnética, que se propaga através de um caminho. Ao chegar no receptor, pode-se resultar em um comportamento desejado ou não.

Logo, existem três formas de se prevenir a interferência (LIZ, 2003):

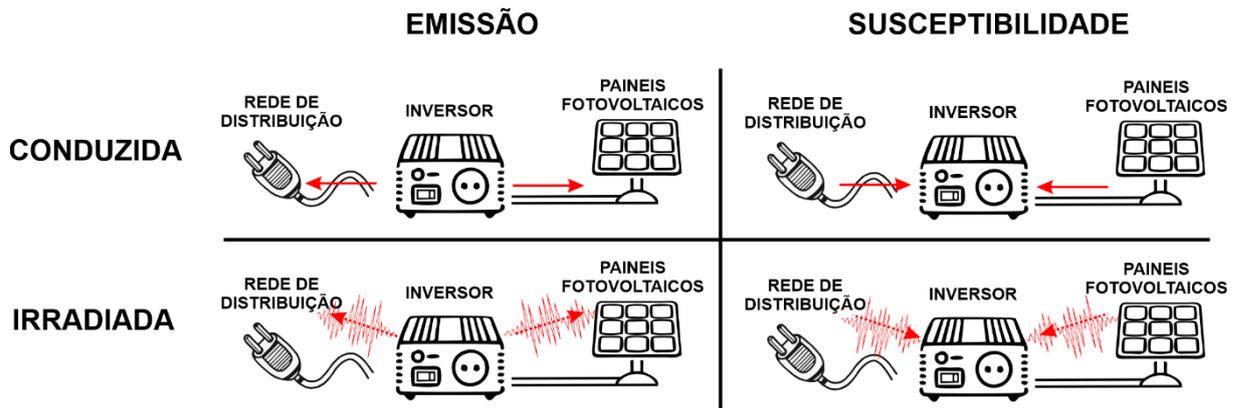
- a) Reduzindo a emissão na fonte;
- b) Tornando o caminho de propagação o mais ineficiente possível;
- c) Protegendo o receptor das emissões externas.

Além disso, segundo Severino (2018), existem três critérios que devem ser preenchidos para um sistema ser considerado eletromagneticamente compatível:

- a) Não causar interferência em outros sistemas;
- b) Não ser susceptível às emissões provenientes de outros sistemas;
- c) Não causar interferência para si mesmo.

Mostra-se na Figura 4 que a compatibilidade eletromagnética pode ser subdividida em dois grupos. A emissão trata da quantidade de ruído eletromagnético que o equipamento insere no ambiente, já a susceptibilidade diz respeito a robustez do mesmo às radiações presentes no ambiente. Ambas podem ser subdivididas em conduzidas ou radiadas. As conduzidas utilizam o condutor metálico ou os elementos parasitas como caminho de propagação da interferência, as irradiadas utilizam o próprio ar. Este trabalho se limita ao estudo das emissões conduzidas.

Figura 4 – Vertentes de estudo da EMC

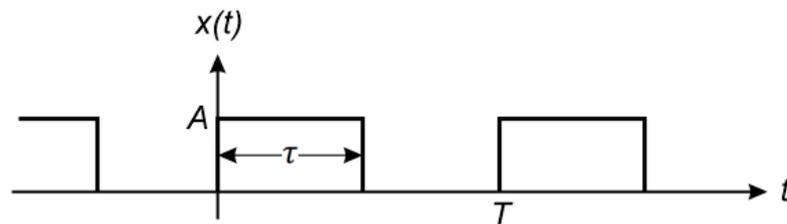


Fonte: Produção do próprio autor.

2.2 Modelagem Matemática

O PWM (*Pulse Width Modulation*) é frequentemente utilizado em conversores chaveados, onde produz-se um sinal retangular com largura variável, como é mostrado na Figura 5.

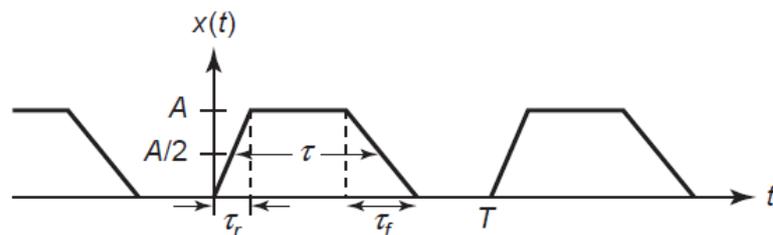
Figura 5 – Pulsos em PWM: comportamento ideal



Fonte: Produção do próprio autor.

Entretanto, em um conversor real, devido às capacitâncias parasitas dos componentes e a alta frequência de chaveamento, os tempos de subida e descida podem sem mostrar consideráveis em relação à largura do pulso e o sinal pode se aproximar de um trapézio, como ilustrado na Figura 6.

Figura 6 – Pulsos em PWM: comportamento real



Fonte: Wyatt (2013).

A análise de Fourier é uma ferramenta chave para entender os problemas causados pelos sinais de EMI e por meio da transformada de Fourier, em (1), é possível visualizar o espectro do sinal no domínio da frequência.

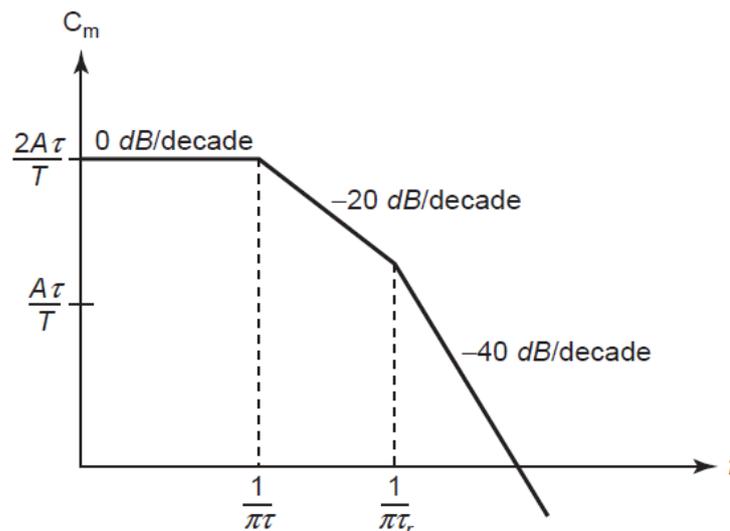
$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Assim, aplicando-se Fourier ao pulso trapezoidal, obtém-se o valor absoluto da função, mostrada na Equação (2) (LIZ, 2003).

$$|F(\omega)| = \frac{1}{\pi\omega^2\tau} \text{sen}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right) \text{sen}\left(\frac{\omega T}{2}\right) \quad (2)$$

Na Figura 7 mostra-se os limites espectrais da forma de onda trapezoidal. Observa-se que variando o período T , o duty cycle (associado a τ), e os tempos de subida e descida (τ_r e τ_f) pode-se adaptar a forma de onda a fim de se atender a requisitos de desempenho que possam ser necessários. Além disso, verifica-se que τ determina a primeira frequência de corte, enquanto τ_r determina a segunda (WYATT, 2013).

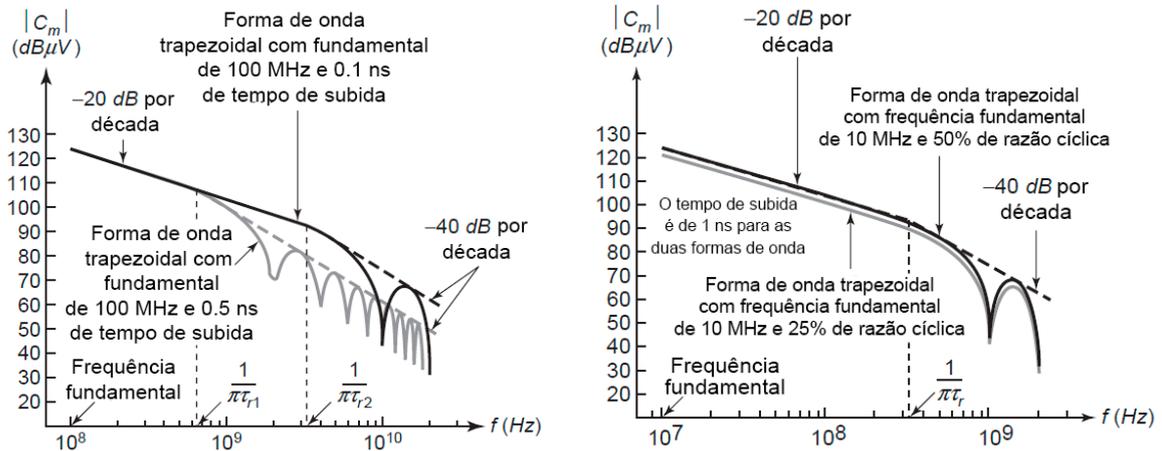
Figura 7 – Limites espectrais da forma de onda trapezoidal



Fonte: Wyatt (2013).

Na Figura 8 é mostrado que quanto menor o tempo de subida, maior a magnitude de harmônicos de ordens maiores e que a variação do *duty cycle* também influencia nos limites espectrais (WYATT, 2013).

Figura 8 – Limites espectrais da forma de onda trapezoidal



Fonte: Adaptado de Wyatt (2013).

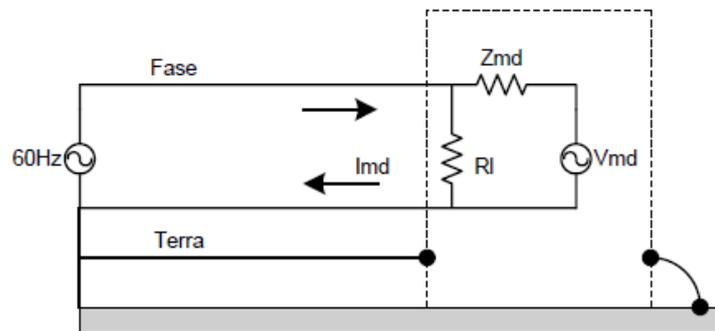
A magnitude do pulso trapezoidal é relativa. Como os harmônicos de alta frequência podem ter um valor muito baixo de amplitude, estes valores são normalmente convertidos para decibéis de unidades apropriadas para serem apresentados em um receptor de campos eletromagnéticos (LIZ, 2003). Essas unidades serão apresentadas posteriormente.

2.3 Correntes de Modo Comum e de Modo Diferencial

As perturbações eletromagnéticas conduzidas podem se propagar de duas formas diferentes: por correntes de modo comum e por correntes de modo diferencial. Ao se projetar um filtro para reduzir a EMI existem elementos diferentes capazes de reduzir as correntes de cada modo de forma independente.

Correntes de Modo Diferencial: Ocorre entre os terminais de alimentação (Fase-Neutro) com uma diferença de fase de 180° . É causado principalmente devido às indutâncias parasitas, muitas vezes atreladas aos capacitores de filtro e às trilhas da placa de circuito impresso (PCB). Mostra-se na Figura 9 o caminho da corrente diferencial em um equipamento genérico.

Figura 9 – Fonte de ruído de modo diferencial



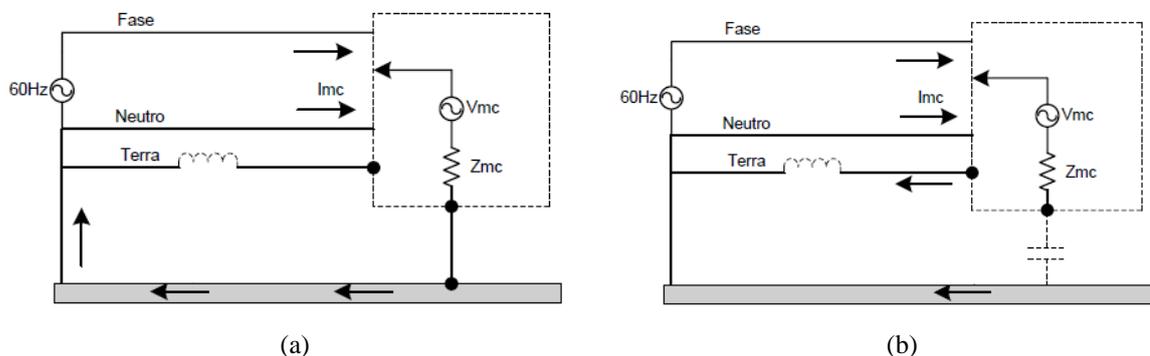
Fonte: Liz (2003).

Correntes de Modo Comum: Também ocorre entre os terminais Fase-Neutro, porém com uma diferença de fase 0° . Estão associadas às capacitâncias parasitas existentes entre os componentes do circuito e a carcaça, principalmente nas chaves comutadoras. Existem dois tipos de ruídos de modo comum:

- Tipo I: A fonte do ruído no circuito está referenciada à carcaça, que se encontra aterrada no plano de terra. A impedância do plano de terra é muito menor do que a do fio terra, o que faz a corrente de modo comum fluir para o plano de terra.
- Tipo II: A carcaça está isolada do plano de terra (alta impedância), obrigando a corrente a fluir pelo fio terra.

Os dois tipos são ilustrados na Figura 10.

Figura 10 – Fonte de ruído de modo comum. a) Tipo I. b) Tipo II



Fonte: Adaptado de Liz (2003).

Matematicamente, as correntes de fase e neutro podem ser definidas a partir das correntes de modo comum e modo diferencial de acordo com (3).

$$\begin{cases} I_F = I_{MC} + I_{MD} \\ I_N = I_{MC} - I_{MD} \end{cases} \quad (3)$$

Resolvendo-se (3), obtém-se (4).

$$\begin{cases} I_{MC} = \frac{I_F + I_N}{2} \\ I_{MD} = \frac{I_F - I_N}{2} \end{cases} \quad (4)$$

Dessa forma, pode-se obter tanto o ruído de modo comum quanto o ruído de modo diferencial a partir das correntes de fase e neutro.

2.4 Normatização

Muitas vezes, os sistemas eletrônicos necessitam de requisitos adicionais, além daqueles necessários para que o sistema seja funcional. Esses objetivos adicionais de projeto originam-se da necessidade de que o sistema tenha compatibilidade eletromagnética com o seu ambiente, daí a necessidade da criação de normas de compatibilidade eletromagnética. Existem basicamente duas classes de normas de EMC que são impostas em sistemas eletrônicos (LIZ, 2003):

- a) Aquelas impostas pelas agências governamentais;
- b) Aquelas ditadas pelo fabricante do equipamento.

As normas impostas pelas agências governamentais são normas legais e não podem ser desprezadas. Essas normas são impostas para controlar a susceptibilidade do equipamento e a interferência produzida por ele. Porém, se um equipamento estiver em conformidade com essas normas de EMC, não há garantias de que o equipamento não vá causar/receber interferência. Por outro lado, as normas de EMC que os fabricantes impõem nos seus equipamentos são criadas para satisfazer o consumidor. Elas são impostas com o propósito de garantir um equipamento confiável e de qualidade (LIZ, 2003).

A norma brasileira que trata da Compatibilidade Eletromagnética para fontes chaveadas é a NBR IEC/CISPR 22:2013 - Equipamento de tecnologia da informação - Características de radioperturbação - Limites e métodos de medição. Esta norma foi baseada na CISPR 22, que é considerada, praticamente, um consenso mundial e será adotada no decorrer deste trabalho. Observa-se que esta norma não está voltada diretamente à inversores fotovoltaicos, mas a uma gama muito maior de conversores e equipamentos que podem apresentar características de radioperturbação.

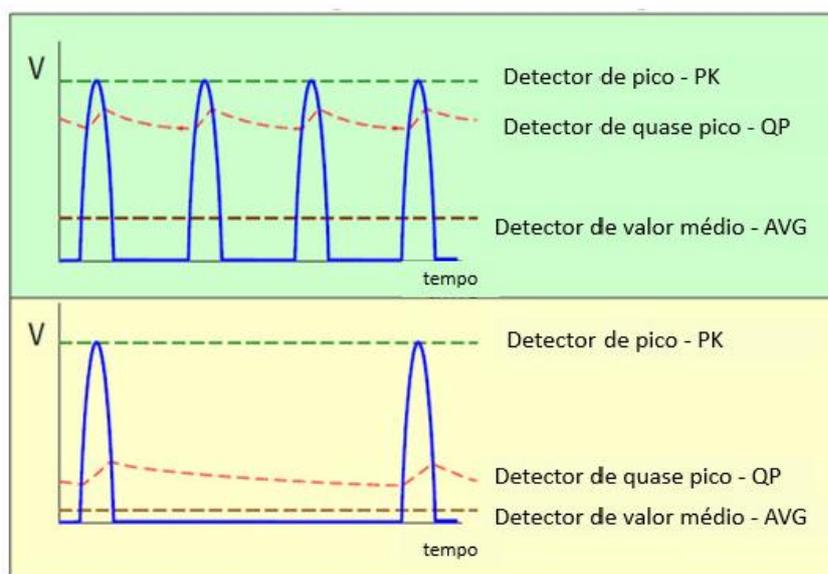
A NBR fornece os procedimentos para a medição dos níveis das emissões eletromagnéticas geradas pelos equipamentos. Nela os limites são impostos para a faixa de frequência de 0,15 a 1000MHz para aqueles de Classes A (industriais e comerciais) e B (residenciais).

A norma também menciona três tipos de detectores utilizados em receptores de EMI:

- a) Detector de Pico: mede a maior magnitude do sinal que ocorreu;
- b) Detector de Quase-Pico: se comporta como um detector de pico que se descarrega parcialmente entre os pulsos do sinal de entrada;
- c) Detector de Valor Médio: se comporta como um filtro passa baixas com frequência de corte suficientemente abaixo da frequência da rede.

Na Figura 11 mostra-se a diferença dos comportamentos dos detectores.

Figura 11 – Comportamento dos três tipos de detectores de EMI



Fonte: Pedroni (2017).

Os valores limites estabelecidos pela norma e que são de interesse do atual estudo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Limites da NBR IEC/CISPR 22

Medição	Faixa de Frequência (MHz)					
	0,15 – 0,5		0,5 – 5		5 – 30	
	dB μ V		dB μ V		dB μ V	
	QP	AV	QP	AV	QP	AV
Alimentação CA, Classe A	79	66	73	60	73	60
Alimentação CA, Classe B	66-56	56-46	56	46	60	50

Fonte: ABNT (2013).

Nota: O travessão entre dois números indica que o limite diminui com o logaritmo da frequência.

Observa-se que devido às amplitudes extremamente pequenas dos sinais, estes são expressos em dB μ V, que é definido conforme a Equação (5).

$$U[dB\mu V] = 20 \log \left(\frac{U[V]}{1\mu V} \right) \quad (5)$$

Caso queira-se obter o valor em volts, pode-se utilizar a relação em (6) para realizar a conversão inversa.

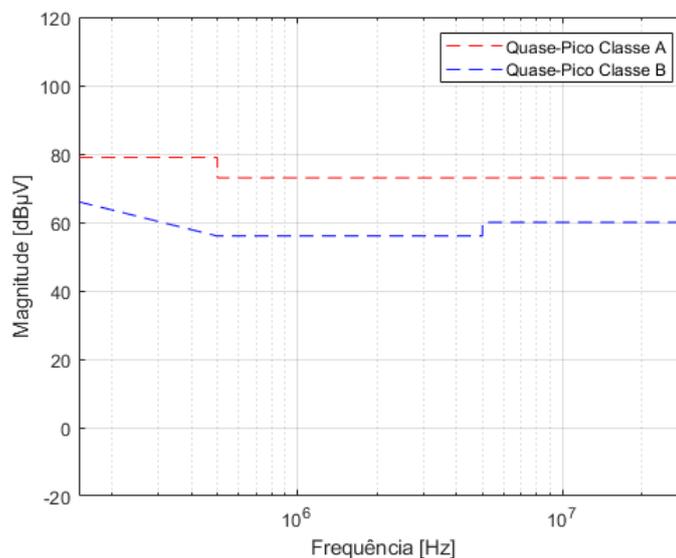
$$U[V] = 10^{\frac{U[dB\mu V]}{20}} * 1\mu V \quad (6)$$

É importante ressaltar que este trabalho visa fazer as medições por meio de simulações computacionais, que fornecem o valor de Pico do ruído. Entretanto, a norma fornece apenas os valores de Média e Quase-Pico. Ainda assim, para que o trabalho possa comparar os valores simulados com os normatizados adota-se os valores de Quase-Pico, o que não será um problema, uma vez que, como mostrado na Figura 11, esta referência possui valores sempre menores do que os de Pico, mantendo-se ainda uma pequena faixa de tolerância. A estratégia pode ser utilizada para testes de pré-conformidade, mas na certificação final devem ser utilizados os sensores corretos no equipamento físico.

Como este trabalho pretende fazer um estudo da EMI conduzida gerada por sistemas fotovoltaicos é interessante apresentar o traçado dos limites da norma em função do espectro de frequências, que é apresentado na Figura 12. Para que um equipamento sob ensaio (ESE)

esteja em conformidade com a norma, os ruídos gerados pelo mesmo devem se manter abaixo da curva durante toda a faixa estabelecida.

Figura 12 – Limites estabelecidos pela NBR IEC/CISPR 22

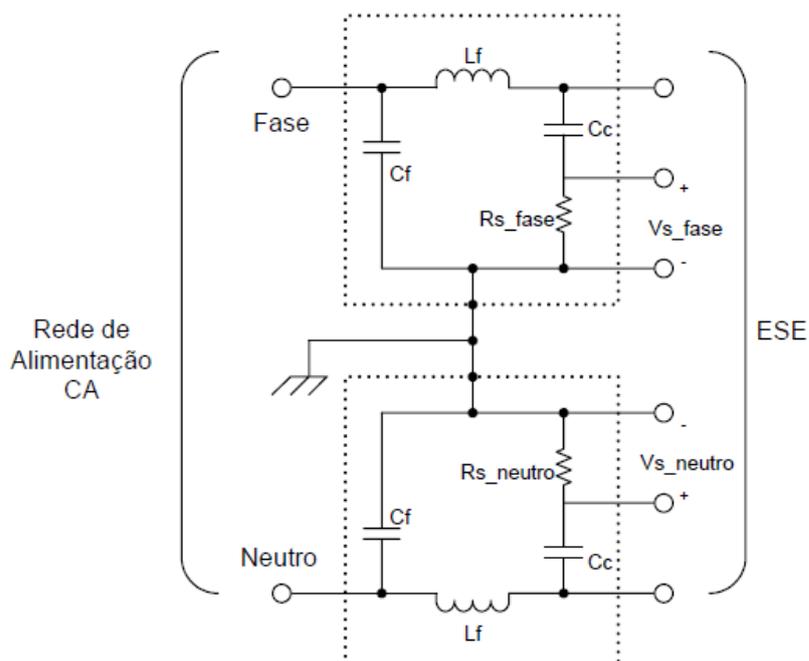


Fonte: Produção do próprio autor.

Para que seja estabelecida uma impedância definida em alta frequência entre os terminais do equipamento sob ensaio, e para desacoplar o circuito de medição dos sinais de radiofrequência indesejados presentes na rede de alimentação é necessário a utilização de uma rede fictícia, também conhecida como LISN (*Line Impedance Stabilization Network*) (ABNT, 2013).

Na Figura 13 mostra-se o esquemático simplificado de uma rede fictícia. Um filtro, representado por L_f e C_f , permite a passagem das correntes com a frequência da rede de alimentação, mas força emissões conduzidas geradas pelo ESE, que possuem frequências mais altas, a passar pelo capacitor de acoplamento C_c e pelo resistor sensor R_s . Um receptor de campos eletromagnéticos realiza a medida das correntes de emissão na forma de uma tensão fase-terra (V_{s_fase}) ou neutro-terra (V_{s_neutro}) (LIZ, 2003).

Figura 13 – Rede Fictícia (LISN)



Fonte: Liz (2003).

Os valores dos componentes adotados na rede fictícia devem estar em conformidade com especificação da FCC, que define que os capacitores (C_f e C_c) devem possuir $1\mu\text{F}$, os indutores (L_f) $50\mu\text{H}$ e os resistores (R_{s_fase} e R_{s_neutro}), que representam a impedância de entrada do receptor de campo, devem ser de 50Ω (ALMEIDA, 2013).

2.5 Considerações Finais

Como foi visto ao longo do capítulo, o estudo da EMC é uma área extremamente importante para garantir o correto funcionamento dos dispositivos eletrônicos no meio onde este se encontra inserido. Com o passar dos anos, estudos relacionados à compatibilidade eletromagnética ganham cada vez mais força através do estabelecimento de requisitos normativos. Diversos ensaios são realizados na atualidade, entretanto, este trabalho se limita a estudar as características de radioperturbação do equipamento, como definido na CISPR 22.

3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

3.1 Introdução

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados em duas categorias de acordo com a sua ligação à rede de distribuição:

- a) *Off-grid*: São os sistemas fotovoltaicos isolados (SFI), que não estão conectados à rede;
- b) *On-grid*: São os sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição (SFCR).

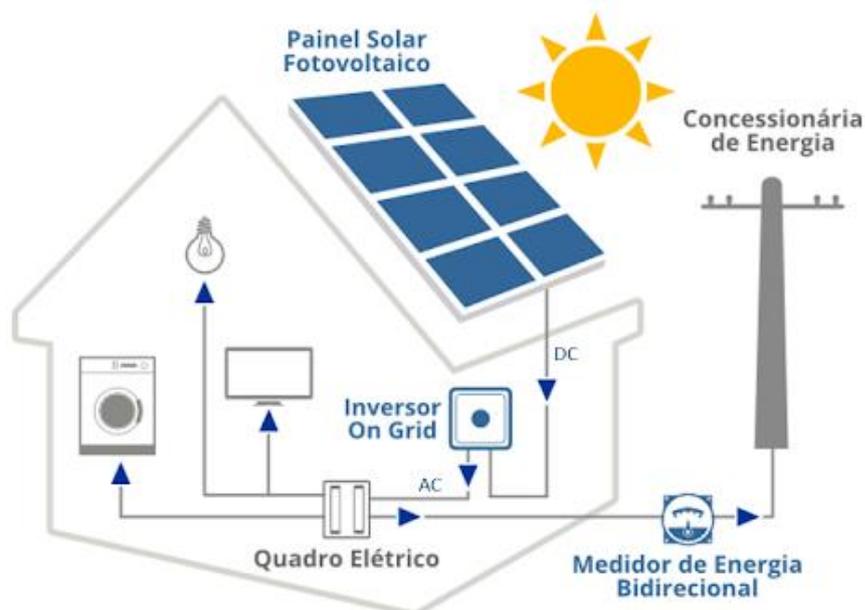
Nos primórdios da energia solar fotovoltaica os sistemas fotovoltaicos *off-grid* eram o único tipo que existiam, pois o foco era levar energia elétrica a locais onde as redes de distribuição não chegavam. O conceito de sistema fotovoltaico *on-grid* surgiu somente após a utilização da tecnologia dos inversores para ligar diretamente os painéis solares fotovoltaicos à rede, sem que a energia passasse por um banco de baterias; o que eliminaria um dos mais custosos (e menos duráveis) componentes de um sistema fotovoltaico isolado, a bateria. (SUNERGIA, 2018)

O Brasil apresenta grande potencial para geração de energia direta oriunda dos raios solares, quando comparado com outros países, devido aos elevados índices de radiação. Nesse contexto, o uso da energia solar é, sem dúvida, uma das melhores alternativas para geração de energia, visto que é limpa, ecológica e abundante (DIAS *et al.*, 2017).

3.2 Funcionamento Básico

Um sistema fotovoltaico é constituído basicamente por um bloco gerador, um bloco de condicionamento de potência e um bloco de armazenamento. O bloco gerador é constituído pelo arranjo dos módulos fotovoltaicos, em diferentes associações, o cabeamento elétrico e as estruturas físicas de suporte. O bloco de condicionamento de potência pode possuir conversores CC-CC (em caso de redes em CC), rastreadores de ponto de máxima potência (MPPT), inversores e controladores de carga. Por fim, o bloco de armazenamento, constituído por elementos acumuladores de energia (baterias), geralmente utilizado em sistemas *off-grid*, onde o mesmo não é conectado à rede de distribuição (CRESESB, 2014). No atual trabalho o sistema utilizado será *on-grid*, ou seja, conectado à rede e sem a utilização de banco de baterias, como ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Sistema fotovoltaico *on-grid* instalado em uma residência



Fonte: Minha Casa Solar (2019).

Estes sistemas não utilizam armazenamento de energia pois toda a geração é entregue diretamente na rede. Sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica representam uma fonte complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual estão conectados. Todo o arranjo é conectado em inversores e estes fazem a interface com a rede elétrica. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada, como sistema anti-ilhamento, distorção harmônica em consonância com as normas aplicáveis, saída CA com forma de onda senoidal pura, proteções contra sobretensões e sobrecorrente, dentre outras (CÂMARA, 2011).

3.3 Módulo Fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é constituído da associação série-paralelo de células fotovoltaicas. Elas são conectadas em arranjos para que produzam tensão e corrente suficientes para a utilização prática da energia. O material que constitui uma célula fotovoltaica geralmente é denominado de material semicondutor e segundo CARDOSO (2020), atualmente, as placas a base de silício monocristalino e policristalino representam mais de 85% do mercado.

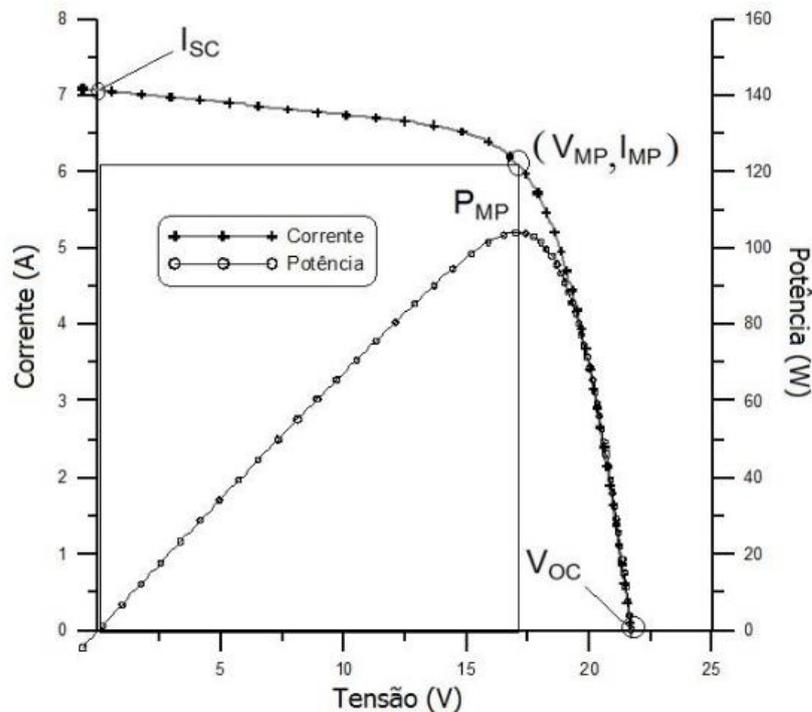
Figura 15 – Subdivisões de um painel fotovoltaico



Fonte: Adaptado de Eletrotécnica Aplicada (2010).

Quando um módulo está posicionado na direção do sol, uma tensão pode ser medida entre os terminais positivo e negativo usando um voltímetro. A tensão observada em um módulo desconectado é a tensão de circuito aberto (V_{oc}). Por outro lado, ao conectar os terminais desse módulo a um amperímetro mede-se sua corrente de curto-circuito (I_{sc}). Um dos ensaios mais completos para determinar as características elétricas de um módulo fotovoltaico é o traçado de sua curva característica I-V, mostrado na Figura 16. A mesma figura também mostra, uma curva de potência em função da tensão, chamada de curva P-V, que identifica o ponto com o máximo valor de potência.

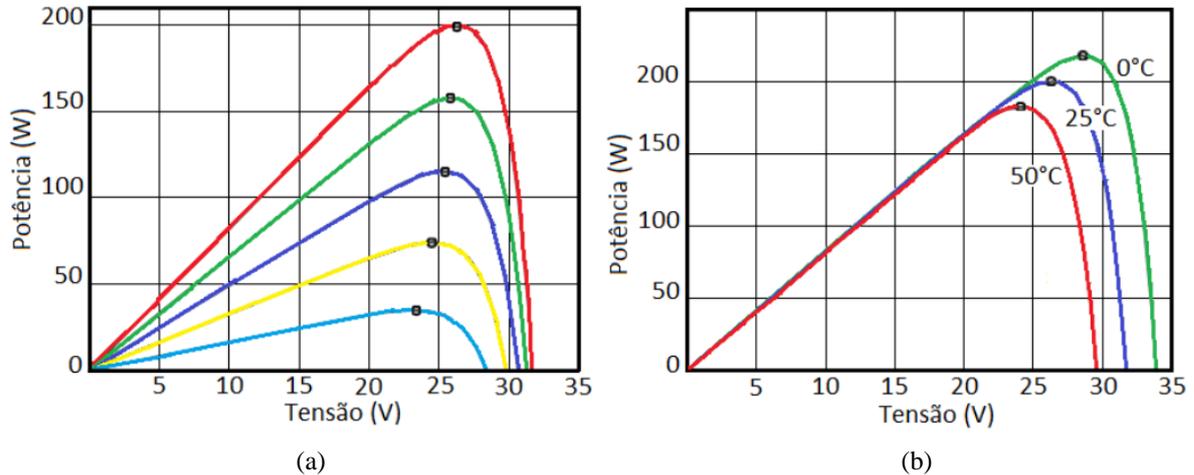
Figura 16 – Curva I-V e P-V para um módulo com potência nominal de 100Wp



Fonte: CRESESB (2014).

De maneira semelhante ao que ocorre com as células fotovoltaicas, o desempenho dos módulos fotovoltaicos é fundamentalmente influenciado pela irradiância solar e pela temperatura das células (CRESESB, 2014), como mostra a Figura 17 (a) e (b).

Figura 17 – Curva P-V para um módulo (a) com variação da irradiância, (b) com variação da temperatura.



Fonte: Adaptado de Genzler (2015).

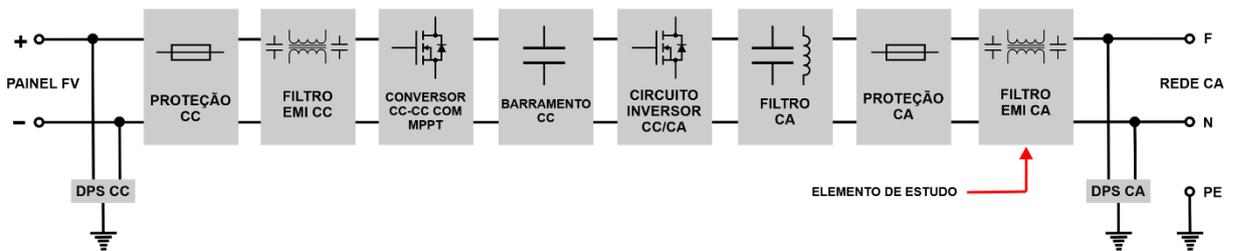
3.4 Inversor Fotovoltaico

Um inversor é um dispositivo eletrônico que fornece energia elétrica em corrente alternada (CA) a partir de uma fonte de energia elétrica em corrente contínua (CC). A energia CC pode ser proveniente, por exemplo, de baterias, células a combustível ou módulos fotovoltaicos. A tensão CA de saída deve ter amplitude, frequência e conteúdo harmônico adequados às cargas a serem alimentadas. Adicionalmente, no caso de sistemas conectados à rede elétrica a tensão de saída do inversor deve ser sincronizada com a tensão da rede (CRESESB, 2014).

Os inversores podem ser divididos em duas categorias, quanto à sua ligação a rede de distribuição (SFI – isolados, ou SFCR – conectados à rede). 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 (CRESESB, 2014).

Inversores modernos utilizam chaves eletrônicas de estado sólido e o seu desenvolvimento está diretamente ligado à evolução da eletrônica de potência, tanto em termos de componentes (especialmente semicondutores) quanto das topologias de seus circuitos de potência e controle (CRESESB, 2014). Mostra-se na Figura 18 o esquemático simplificado de um inversor.

Figura 18 – Exemplo de esquemático simplificado de um inversor genérico.



Fonte: Produção do próprio autor.

A seguir, é descrita a função básica de cada um dos blocos do esquemático.

- DPS CC e DPS CA (Dispositivo de Proteção Contra Surtos): Protege os componentes eletrônicos do inversor contra surtos de tensão provenientes tanto da rede CA quanto da rede CC vinda dos painéis FV.
- Proteção CC e Proteção CA: Além de proteger os componentes eletrônicos do inversor contra sobrecorrentes e sobretensões, são capazes de diagnosticar eventuais problemas na rede onde a desconexão é necessária (falta de energia, oscilações na frequência de operação, tensão inadequada, etc.). São compostos por elementos passivos (fusíveis), relés, e também por circuitos eletrônicos ativos capazes de identificar as anomalias e realizar procedimentos.
- Filtro EMI CC e Filtro EMI CA: São filtros especiais que visam atenuar as emissões eletromagnéticas geradas pelo inversor e torná-lo menos susceptível àquelas vindas do meio externo. Como já foi discutido anteriormente, por ser um equipamento que produz grande quantidade de ruído eletromagnético em banda larga é essencial que haja um projeto de filtro que atenda às normas de compatibilidade eletromagnética. Este trabalho abordará em simulação apenas o filtro do lado CA.
- MPPT (*Maximum Power Point Tracking*): É o conversor que realiza o rastreamento do ponto de potência máxima dos painéis solares. Podem ser utilizadas diversas topologias, como a SEPIC, Boost, Buck-Boost e a Zeta. Medindo a tensão e a corrente na entrada e então ajustando a razão cíclica do conversor, a máxima potência pode ser extraída dos módulos.

- e) Barramento CC: É composto por um banco de capacitores que realizam o acoplamento entre o circuito de MPPT e a ponte inversora.
- f) Circuito Inversor CC/CA: É o circuito que realiza o chaveamento da tensão CC a fim de convertê-la em uma tensão CA. Na literatura existem várias técnicas e topologias, aquela a ser utilizada neste trabalho será abordada posteriormente.
- g) Filtro CA: Juntamente com o circuito inversor, auxilia na geração da onda senoidal servindo como elementos acumuladores de energia.

3.5 Considerações Finais

O estudo do sistema fotovoltaico é muito importante para entender a origem e o percurso da EMI conduzida. Mesmo com a grande diversidade de topologias de inversores e sistemas fotovoltaicos, pode-se dizer que o uso de filtros de ruído eletromagnético é utilizado como o principal recurso para a mitigação do fenômeno. Diversos outros mecanismos de proteção também são utilizados a fim de que se atenda aos requisitos gerais de compatibilidade eletromagnética, entretanto, o filtro de EMI é o principal elemento de estudo deste trabalho.

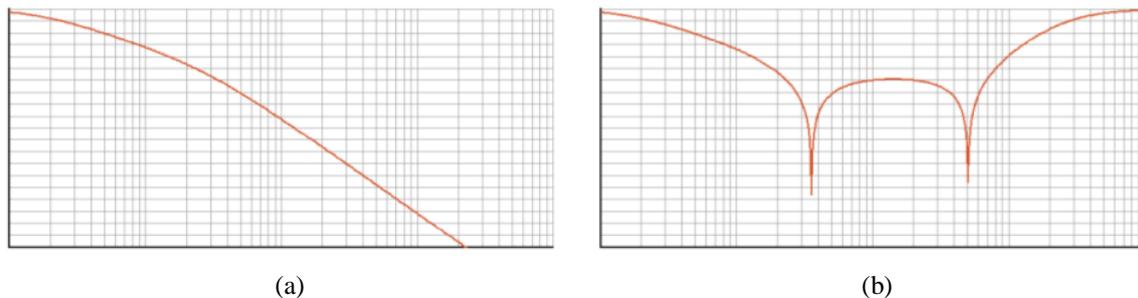
4 FILTROS DE EMI

4.1 Introdução

A aplicação de filtros de EMI constitui, na maioria das vezes, uma das principais técnicas corretivas para a redução da EMI. Eles são geralmente utilizados para atenuar sinais de frequências indesejáveis que estejam presente nos condutores e são caracterizados por curvas de atenuação em função da frequência. Projetar um filtro adequado pode parecer uma tarefa simples, porém devido às interferências eletromagnéticas abrangerem uma região muito grande do espectro de frequências, obter bons resultados pode não ser tão fácil.

Os componentes dos filtros possuem elementos parasitas que, fundamentalmente, afetam a performance e os seus efeitos podem ser devastadores. Observa-se na Figura 19 como a inserção de perdas utilizando modelos de componentes realistas afetam a curva de atenuação. Em frequências mais baixas o modelo pode ser adequado, porém na maior parte do intervalo o uso de componentes ideais mostra um comportamento totalmente diferente do filtro real.

Figura 19 – Curva de atenuação em função da frequência de (a) filtro com componentes ideais e (b) mesmo filtro com componentes reais.



Fonte: EMI Analyst (2017).

4.2 Componentes Básicos e Seus Comportamentos

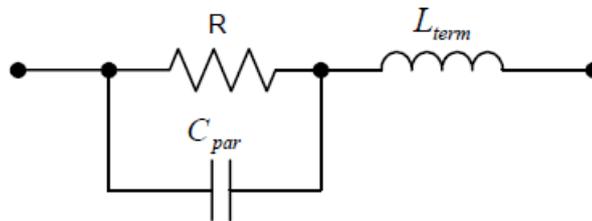
A maioria dos filtros de EMI são construídos utilizando componentes passivos como resistores, indutores e capacitores. Esses elementos alteram a sua impedância linearmente de acordo com a variação da frequência. Já os componentes reais podem ser modelados associando-se modelos ideais de diversas formas. Os modelos utilizados neste trabalho são apresentados nos tópicos a seguir e existem diversos outros na literatura.

4.2.1 Resistores

Os resistores são muito presentes em sistemas eletrônicos e podem ser construídos de diversas formas. Dependendo da técnica utilizada em sua construção, podem ter valores mais ou menos precisos. Em alta frequência os resistores podem ser afetados pela indutância nos terminais do elemento e capacitância parasita. Liz (2003), mostra que a função de transferência de um resistor pode ser expressa por (7) e o seu circuito equivalente de acordo com a Figura 20 (*apud* PAUL, 1992).

$$\vec{Z}(s) = \frac{\vec{V}(s)}{\vec{I}(s)} = L_{term} \frac{s^2 + \frac{s}{RC_{par}} + \frac{1}{L_{term}C_{par}}}{s + \frac{1}{RC_{par}}} \quad (7)$$

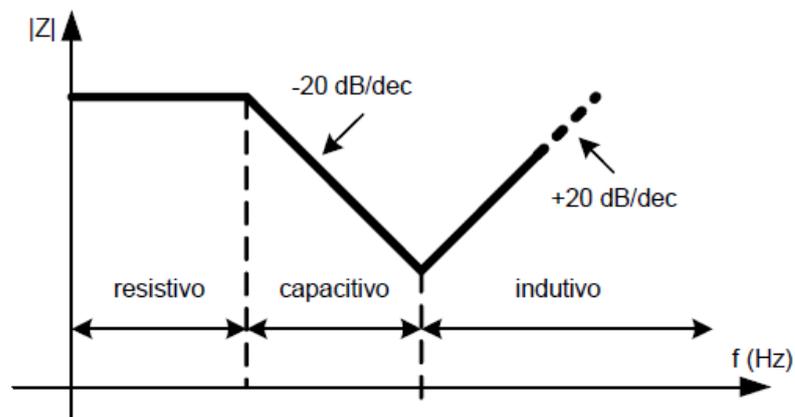
Figura 20 – Circuito equivalente de um resistor.



Fonte: Liz (2003).

Na Figura 21 mostra-se o comportamento do módulo da impedância do resistor em função da frequência.

Figura 21 – Resposta em frequência do circuito equivalente de um resistor.



Fonte: Liz (2003).

4.2.2 Capacitores

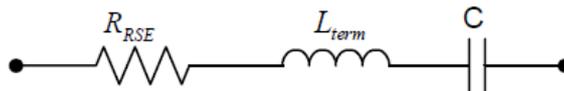
Dentre os diversos tipos de capacitores, os mais utilizados em filtros de EMI são os cerâmicos e os eletrolíticos. Eles, basicamente, podem ser divididos em duas classes (LIZ, 2003).

- a) Tipo X: São colocados entre os condutores fase e neutro e devem ser utilizados em aplicações onde uma avaria no capacitor não envolva perigo de choque elétrico. Conhecidos como capacitores de modo diferencial.
- b) Tipo Y: São colocados entre os condutores fase e terra ou neutro e terra e podem ser utilizados em aplicações onde uma avaria no capacitor possa envolver perigo de choque elétrico. Conhecidos como capacitores de modo comum

Esses capacitores podem ser representados de acordo com a Figura 22, onde R_{RSE} representa as perdas por resistência série equivalente (resistência do dielétrico e das placas), L_{term} representa a indutância nos terminais e C a sua capacitância. A Equação (8) representa a sua resposta em frequência (LIZ, 2003).

$$\vec{Z}(s) = \frac{\vec{V}(s)}{\vec{I}(s)} = L_{term} \frac{s^2 + \frac{R_{RSE}s}{L_{term}} + \frac{1}{L_{term}C}}{s} \quad (8)$$

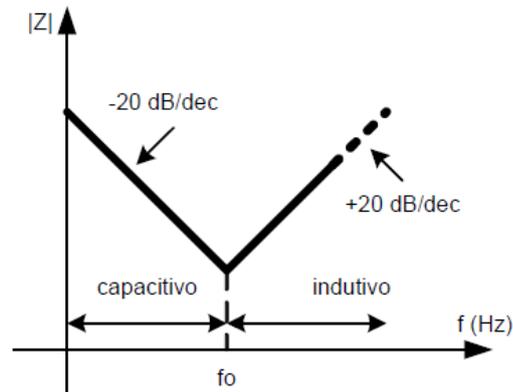
Figura 22 – Circuito equivalente de um capacitor.



Fonte: Liz (2003).

Na Figura 23 observa-se o comportamento da impedância em função da frequência.

Figura 23 – Resposta em frequência do circuito equivalente de um capacitor.



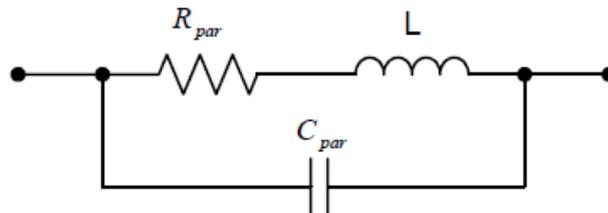
Fonte: Liz (2003).

4.2.3 Indutores

Assim como os outros componentes, a técnica de fabricação de um indutor é que definirá o valor dos elementos parasitas no modelo real. Neste caso, a indutância e capacitância ocasionada pelos terminais do componente podem ser desprezadas, pois seus valores costumam ser muito menores do que as indutâncias e capacitâncias parasitas das espiras. Portanto, o modelo pode ser representado como na Figura 24 e dado por (9) (LIZ, 2003).

$$\vec{Z}(s) = \frac{\vec{V}(s)}{\vec{I}(s)} = R_{par} \frac{1 + \frac{sL}{R_{par}}}{s^2LC_{par} + sR_{par}C_{par} + 1} \quad (9)$$

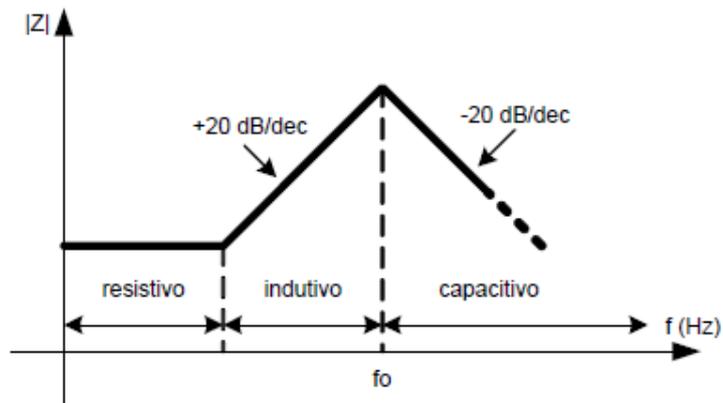
Figura 24 – Circuito equivalente de um indutor.



Fonte: Liz (2003).

Para o indutor, o comportamento da impedância em função da frequência é mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Resposta em frequência do circuito equivalente de um indutor.

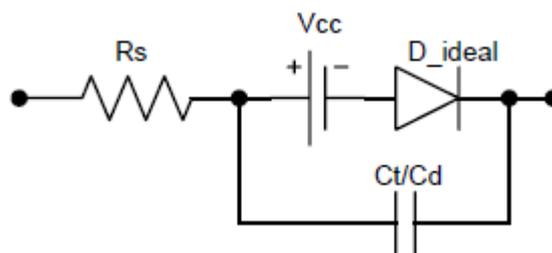


Fonte: Liz (2003).

4.2.4 Diodos

Principalmente devido às características da junção PN e da camada de depleção do diodo, alguns elementos são acrescentados ao modelo ideal para melhor representar o seu comportamento real. Dentre eles estão uma fonte de tensão, uma resistência série e um capacitor cuja capacitância varia com o estado de operação do diodo. A Figura 26 representa o modelo (LIZ, 2003).

Figura 26 – Circuito equivalente de um diodo.

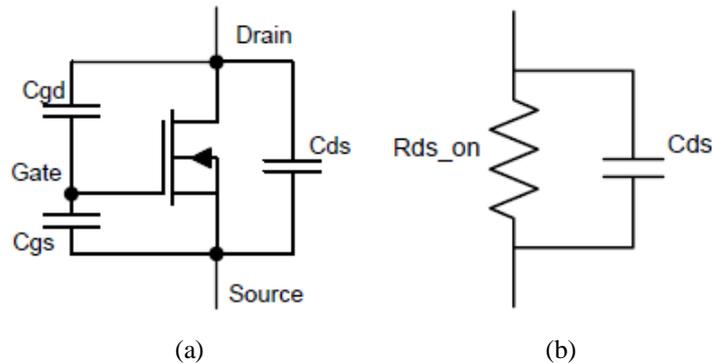


Fonte: Liz (2003).

4.2.5 MOSFET

Devido à sua constituição (semicondutores) o modelo real de um MOSFET também é composto de algumas capacitâncias parasitas que aparecem entre os seus terminais. Essas capacitâncias podem ser consultadas na folha de dados (*datasheet*) do componente, fornecido pelo fabricante. Quando em condução, o MOSFET adquire um comportamento resistivo, que também pode ser consultado no *datasheet*. Mostra-se na Figura 27a o modelo real do componente considerando suas capacitâncias de acoplamento, enquanto na Figura 27b mostra-se o modelo quando em condução.

Figura 27 – Circuito equivalente de um MOSFET (a) considerando suas capacitâncias de acoplamento (b) quando em condução.

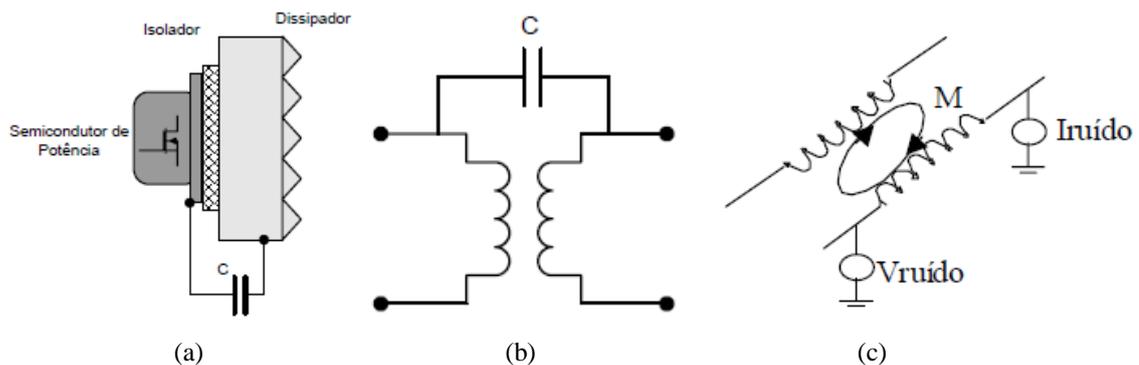


Fonte: Adaptado de Liz (2003).

4.2.6 Capacitâncias e Indutâncias Parasitas e de Acoplamento

Além das capacitâncias de acoplamento presentes entre os terminais dos componentes, geralmente, também está presente a capacitância de acoplamento entre o elemento e as outras peças do circuito, como dissipadores, conectores e até mesmo componentes adjacentes. Já as indutâncias de acoplamento costumam surgir principalmente entre condutores e trilhas, como é ilustrado na Figura 28 (LIZ, 2003).

Figura 28 – Acoplamento capacitivo (a) entre um semicondutor e um dissipador, (b) entre enrolamentos de um transformador e (c) acoplamento indutivo.



Fonte: Adaptado de Liz (2003).

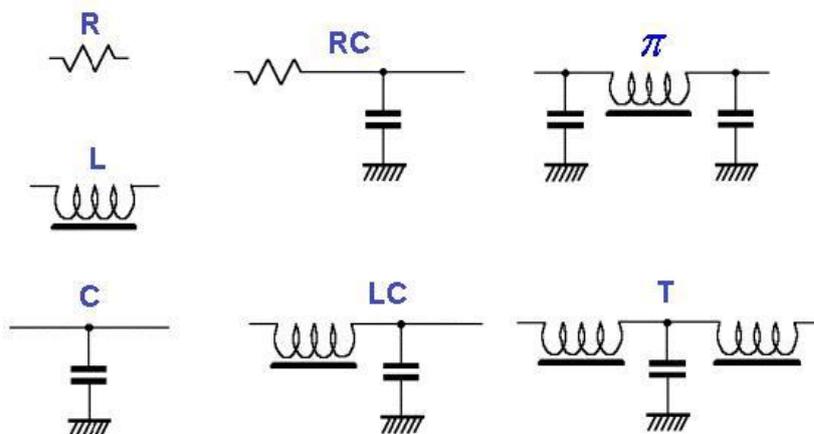
Esses acoplamentos capacitivos são capazes de criar caminhos para correntes parasitas e os acoplamentos indutivos geram tensões induzidas parasitas.

4.3 Filtros Básicos

Os filtros operam criando uma descontinuidade na impedância “vista” por um sinal se propagando em um condutor, ou seja, o filtro gera um descasamento de impedância. Quanto maior for esta descontinuidade, maior será a atenuação. Portanto, se a impedância de um sinal indesejado for de 100Ω e for colocada uma impedância de $1 \text{ k}\Omega$ em série com ela, somente cerca de 10% do sinal chega até a impedância elevada, tendo uma atenuação de aproximadamente 20 dB. Um efeito similar pode ser criado ao se derivar o condutor de 100Ω com uma baixa impedância: 10Ω , que também vai fornecer uma impedância de atenuação de 20 dB (LIZ, 2003).

Existem diversas topologias de filtros monofásicos que se aplicam a compatibilidade eletromagnética, na Figura 29 são apresentados os tipos de filtros mais utilizados na EMC.

Figura 29 – Topologias de filtro monofásico para aplicação em EMC.



Fonte: Almeida (2013).

As topologias de filtros mais simplificadas são do tipo R ou tipo L, que criam uma elevada impedância e são utilizados onde a impedância dos sinais indesejados é baixa. Tem-se também, o filtro simples do tipo C que cria uma impedância em derivação baixa e é aplicado onde a impedância do sinal indesejado é alta (LIZ, 2003).

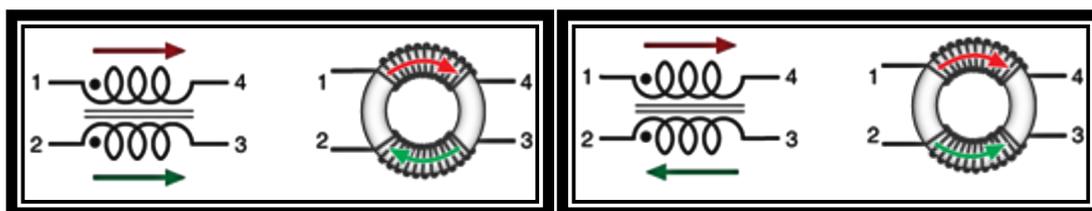
Os filtros RC são bastante utilizados para acoplar uma fonte de baixa impedância a um circuito de alta impedância, onde R é conectado ao lado de baixa impedância (fonte) e C ao lado de alta

(circuito). Uma vantagem dos filtros RC é o fato de não entrarem em ressonância com muita facilidade (LIZ, 2003).

Os filtros LC nas configurações tipo T e π podem fornecer melhor desempenho do que filtros que utilizam resistores, entretanto, por serem circuitos ressonantes eles são mais sensíveis às impedâncias nas quais estão conectados. Além disso, se o filtro for ressonante o ruído pode ser levado de volta ao circuito. Isso não ocorre com os filtros que utilizam resistores, pois os resistores dissipam o ruído na forma de calor (LIZ, 2003).

Também existem filtros que são destinados a reduzir as correntes de modo comum e de modo diferencial. Basicamente, estes filtros são constituídos de dois ou mais indutores acoplados a um mesmo núcleo magnético. No modo comum, a corrente flui numa mesma direção, dessa forma, este filtro dispõe o fluxo magnético de forma que as bobinas induzam, mutuamente, uma tensão oposta a fim de bloquear o ruído, como ilustrado na Figura 30. Nesse filtro o ruído diferencial é pouco atenuado, uma vez que os fluxos magnéticos se cancelam quase em sua totalidade, ocorrendo apenas devido à indutância de dispersão, muitas vezes induzida propositalmente para fazer o dispositivo absorver tanto os ruídos em modo comum como diferenciais.

Figura 30 – Fluxo em um filtro de modo comum (a) com corrente de modo comum e (b) com corrente de modo diferencial.



Fonte: Adaptado de Coilcraft (2021).

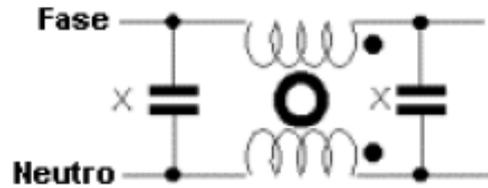
Pode-se combinar os diversos tipos de filtros citados com técnicas de modo comum e diferencial de forma a criar topologias com melhor atenuação.

4.4 Topologias Utilizadas

Neste trabalho serão abordadas cinco diferentes topologias de filtros, que são apresentadas nas figuras que se seguem. O filtro da Figura 31 utiliza um indutor de modo comum para ruídos de

modo comum (e diferencial pela indutância de dispersão) e capacitores do tipo X para filtrar ruídos do modo diferencial em ambos os lados.

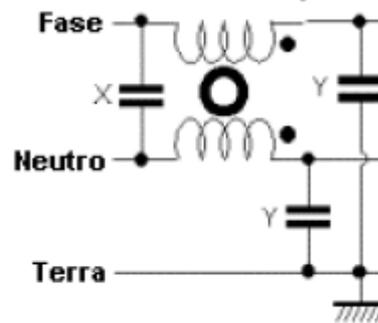
Figura 31 – Filtro de rede com poucas perdas



Fonte: Adaptado de Liz (2003).

Na Figura 32 um filtro semelhante, porém utiliza capacitores do tipo Y para filtrar ruídos de modo comum do lado do dispositivo.

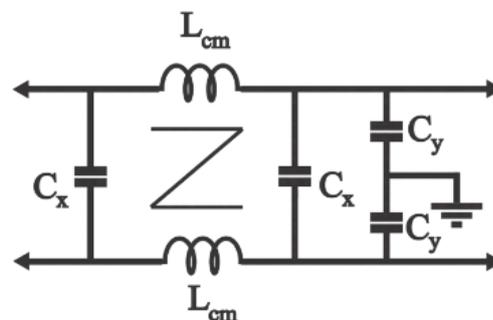
Figura 32 – Filtro de rede típico



Fonte: Adaptado de Liz (2003).

Na Figura 33 é mostrado o que seria a junção dos dois filtros anteriores, utilizando capacitores dos tipos X e Y para filtrar ambos tipos de ruído do lado direito.

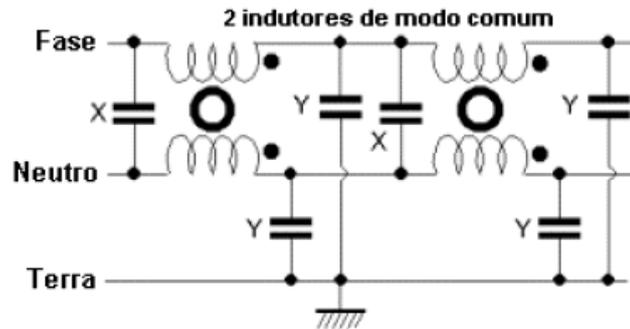
Figura 33 – Filtro com topologia π balanceado



Fonte: Cancian *et. al* (2013).

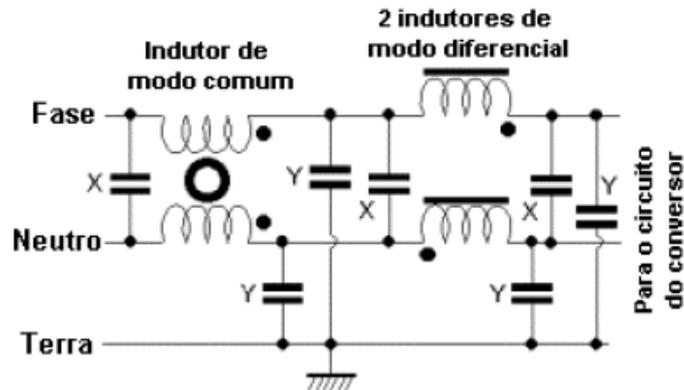
Já na Figura 34 e na Figura 35 são mostrados filtros de 2 estágios, que costumam ser maiores e mais caros, entretanto possuem algumas vantagens. Esses filtros mantêm um nó interno do circuito em um valor de impedância que não depende muito das impedâncias da fonte e da carga, de maneira que fornece uma melhor performance (LIZ, 2003).

Figura 34 – Filtro de 2 estágios típico



Fonte: Adaptado de Liz (2003).

Figura 35 – Filtro de 2 estágios típico de fontes chaveadas



Fonte: Adaptado de Liz (2003).

4.5 Considerações Finais

Como foi visto neste capítulo, os elementos parasitas dos componentes passivos do filtro podem ser responsáveis por comprometer a curva de atenuação em altas frequências. Isto sugere que a escolha dos componentes reais influencia diretamente a sua performance. O mesmo é válido para o circuito eletrônico do inversor, onde tais elementos contribuem diretamente para a geração de ruído eletromagnético. Como este trabalho utilizará um modelo ideal para o filtro de EMI, os resultados obtidos serão uma estimativa, sendo imprescindível que o teste em bancada seja sempre realizado com o dispositivo real.

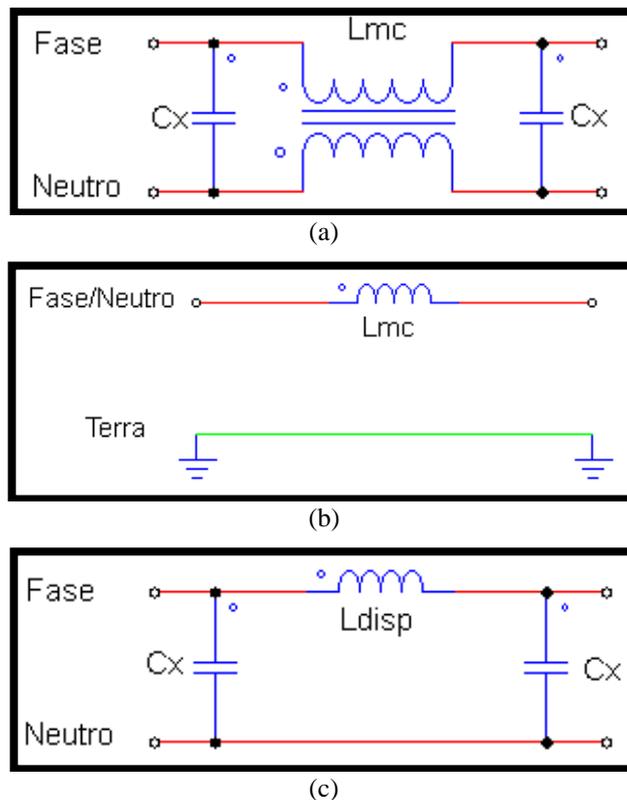
5 MÉTODO E PROJETO DE FILTROS DE EMI

5.1 Circuitos Equivalentes de Modo Comum e de Modo Diferencial

Segundo Cancian *et. al* (2013), basicamente, todos os filtros podem ser projetados a partir de um circuito equivalente para o ruído de modo comum e o de modo diferencial. Além disso, para o correto projeto destes filtros equivalentes, é fundamental que se tenha de forma separada os espectros harmônicos de cada um dos ruídos (MC e MD).

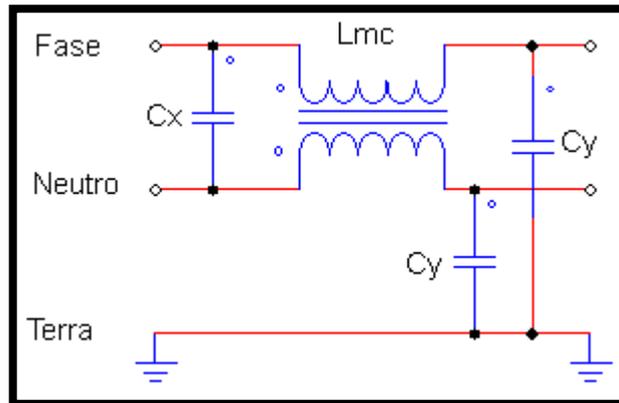
Da Figura 36 à Figura 40 são mostrados os circuitos equivalentes das cinco topologias abordadas anteriormente, onde verifica-se que alguns elementos do filtro afetam somente o ruído de MD ou MC e alguns afetam tanto o ruído de MD quanto o de MC. A fim de facilitar a identificação dos filtros ao longo do trabalho, as cinco topologias serão nomeadas aqui como Filtros de 1 a 5. Neste trabalho os filtros são considerados ideais e os elementos parasitas são considerados no restante do sistema fotovoltaico.

Figura 36 – Filtro 1. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial

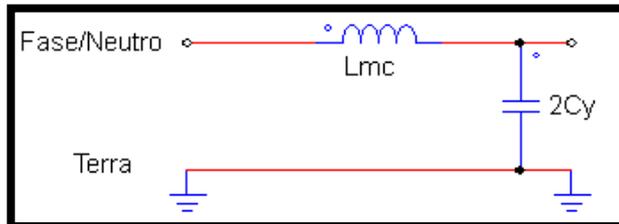


Fonte: Produção do próprio autor.

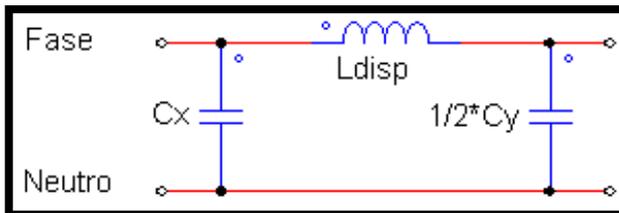
Figura 37 – Filtro 2. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial



(a)



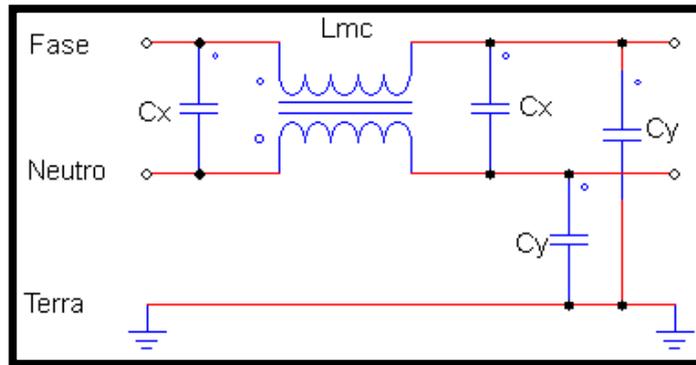
(b)



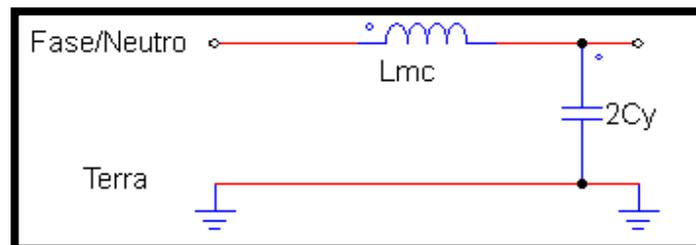
(c)

Fonte: Produção do próprio autor.

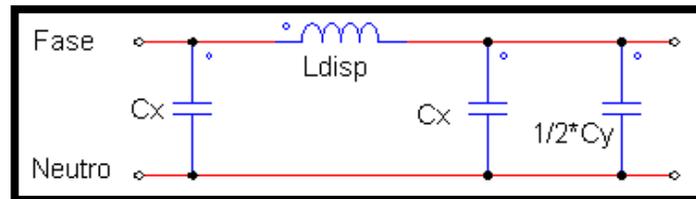
Figura 38 – Filtro 3. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial



(a)



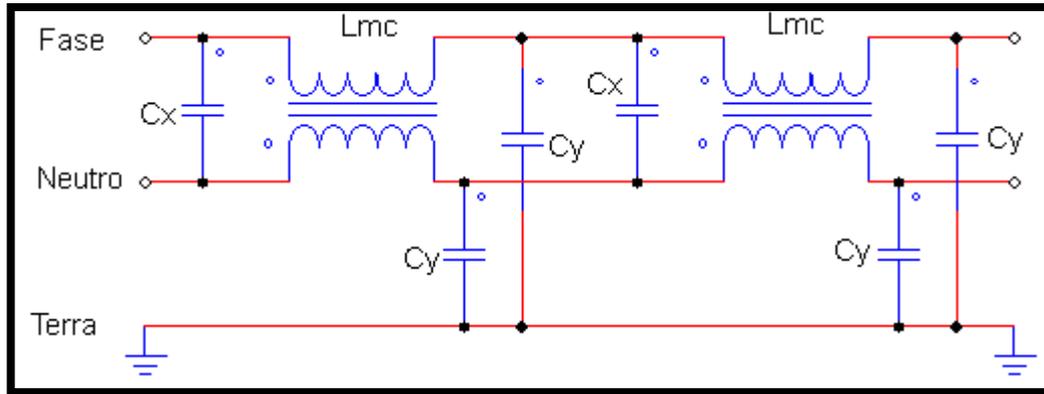
(b)



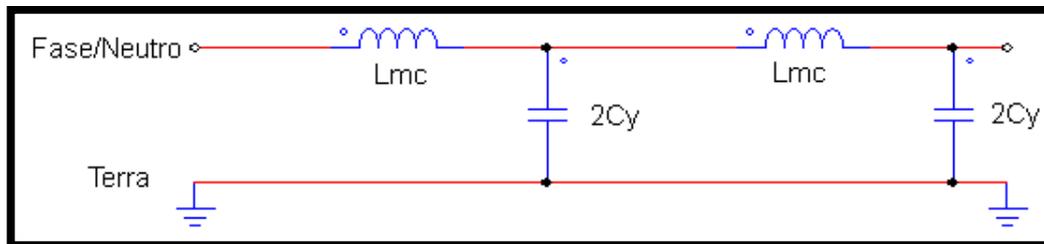
(c)

Fonte: Produção do próprio autor.

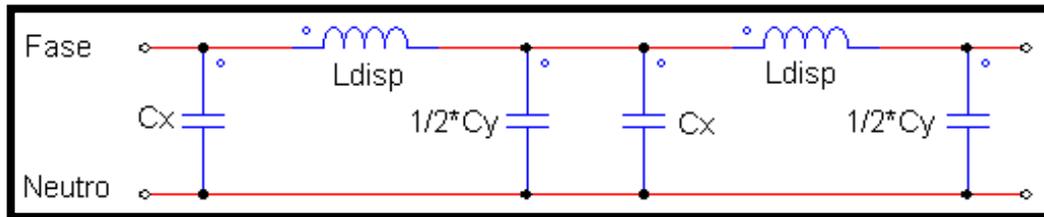
Figura 39 – Filtro 4. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial



(a)



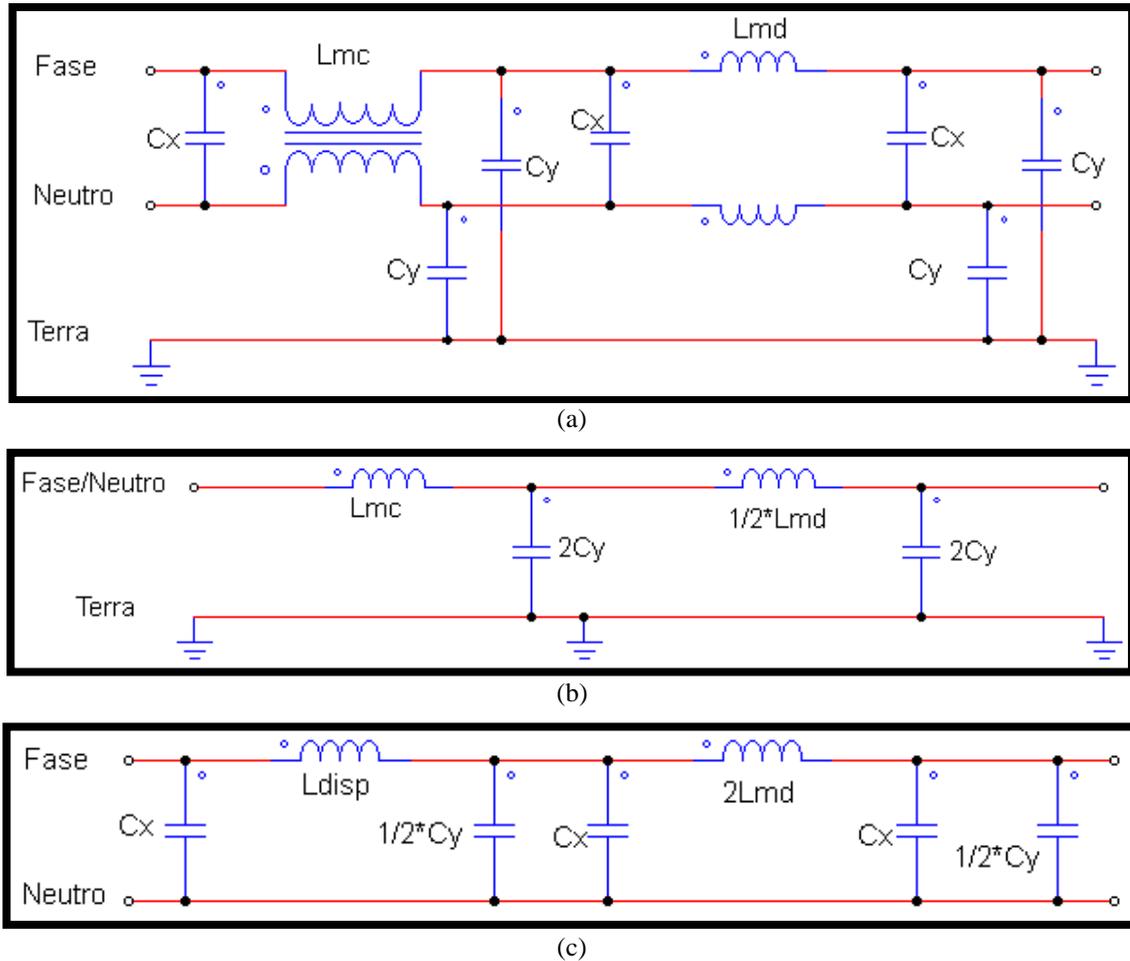
(b)



(c)

Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 40 – Filtro 5. (a) Topologia original. (b) Circuito Equivalente de Modo Comum. (c) Circuito Equivalente de Modo Diferencial



Fonte: Produção do próprio autor.

5.2 Método de Dimensionamento dos Elementos Passivos

É extremamente difícil obter um projeto de filtro de EMI analiticamente. Entretanto, existem algumas estratégias que podem auxiliar nessa tarefa. Com base em Cancian *et. al* (2013), criou-se um procedimento prático para lidar com essa questão (*apud* FU-YUAN, 1996).

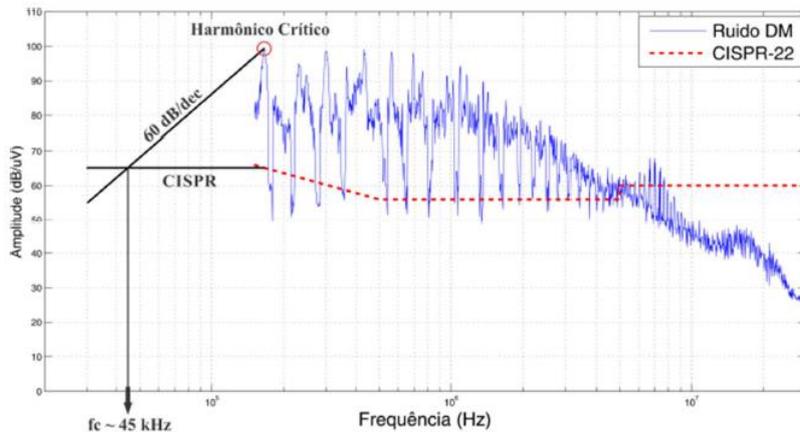
Passo 1: A partir do filtro, obter os seus circuitos equivalentes conforme cada tipo de ruído conduzido. Por definição, cada componente passivo proporciona uma atenuação de 20dB/dec a partir de sua frequência de corte. Por exemplo: o circuito equivalente de modo comum do Filtro 1 possui apenas 1 elemento passivo, logo este proporciona uma atenuação de 20dB/dec. Já o circuito equivalente de modo diferencial do mesmo filtro possui 3 elementos passivos, proporcionando atenuação de 60dB/dec.

Passo 2: Medir a interferência eletromagnética gerada pelo equipamento, sem a aplicação de nenhuma técnica de supressão de ruído eletromagnético, obtendo-se os espectros harmônicos dos ruídos de modo comum e diferencial.

Passo 3: Detectar o harmônico crítico dos espectros. Esse harmônico é o primeiro abrangido pela faixa de frequência dos limites da norma (150 kHz – 30 MHz), e sendo assim, sua amplitude é a de pior caso.

Passo 4: A partir do pico do harmônico crítico, traça-se uma reta em direção à origem, com inclinação determinada pela ordem do filtro. Também é feita outra reta, sendo esta a prolongação da norma a partir da frequência do harmônico crítico, paralelamente ao eixo cartesiano X. Assim, uma vez que se tenham estas duas retas traçadas no espectro harmônico, a frequência de corte do filtro será exatamente a intersecção entre elas, como mostra o exemplo da Figura 41 (*apud* WANG, 2005).

Figura 41 – Determinação da frequência de corte em MD



Fonte: Cancian *et. al* (2013).

A partir da Equação (10) também pode-se definir o valor exato da frequência de corte (CANCIAN *et. al*, 2013).

$$f_c = X_2 \cdot 10^{\left(\frac{Y_1 - Y_2}{a}\right)} \quad (10)$$

Onde: f_c é a frequência de corte (Hz), a é a atenuação do filtro (dB/dec), Y_2 é a amplitude do harmônico crítico (dB/μV), Y_1 é amplitude da norma (dB/μV) e X_2 é a frequência do harmônico crítico (Hz).

Passo 5: Após o cálculo das frequências de corte dos filtros de MD e MC, estipula-se um valor para os capacitores C_y . De acordo com Liz (2003), devido a restrições de segurança (corrente de fuga para terra), C_y fica limitado a um valor máximo de 3,3nF para operação em 60Hz.

Passo 6: Mede-se o valor da indutância de dispersão magnética (L_{DM}) dos indutores de modo comum, geralmente na faixa de 0,5% a 2% do valor da indutância de modo comum (LIZ, 2003).

Passo 7: Por fim, é possível, então, determinar o valor do indutor de modo comum e dos capacitores de modo diferencial a partir das Equações (11) e (12).

$$L_{CM} = \left(\frac{1}{2\pi f_{c_{CM}}} \right)^2 \frac{1}{2C_y} \quad (11)$$

$$C_x = \left(\frac{1}{2\pi f_{c_{DM}}} \right)^2 \frac{1}{L_{DM}} \quad (12)$$

Onde: L_{CM} é a indutância de modo comum (H), $f_{c_{CM}}$ é a frequência de corte de modo comum (Hz), C_y é o capacitor de modo comum (F), L_{DM} é a indutância de modo diferencial (H), $f_{c_{DM}}$ é a frequência de corte de modo diferencial (Hz) e C_x é o capacitor de modo diferencial (F).

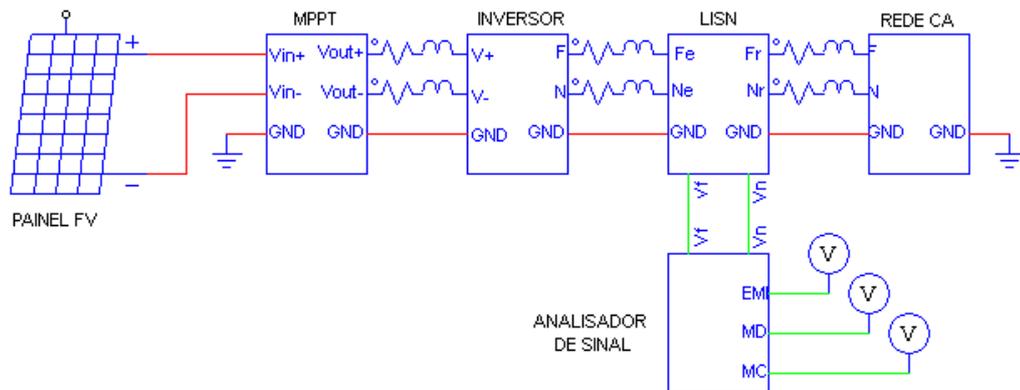
5.3 Topologia do Sistema Fotovoltaico Utilizado

Como já é de conhecimento, antes que se comece a projetar um filtro, é preciso medir a interferência eletromagnética gerada pelo sistema sem a aplicação dos mecanismos de supressão de ruído. Para isso, utilizando o *software* PSIM, foi desenvolvido um circuito de simulação capaz de representar os principais elementos presentes em um sistema fotovoltaico.

Sabe-se que recriar a realidade em uma simulação é algo extremamente difícil de ser feito. Neste trabalho, o objetivo desta simulação não é de recriar a realidade, mas sim de utilizá-la como uma forma de relacionar o impacto dos elementos parasitas, comutação das chaves e transitórios com os ruídos de modo comum e modo diferencial. Assim, os resultados podem ser utilizados como uma base para o projeto dos filtros de EMI.

Na Figura 42 mostra-se a topologia do sistema fotovoltaico utilizado na simulação. Inicialmente, tem-se um modelo funcional de painel fotovoltaico responsável por gerar a energia do sistema. O painel está ligado a um conversor Zeta controlado por meio de um algoritmo P&O que realiza automaticamente a busca pelo máximo ponto de potência do painel. O circuito MPPT injeta, então, a potência na entrada do barramento CC de um inversor VSI (*Voltage Source Inverter*) com topologia de ponte completa (*full bridge*). Antes de alcançar a rede de alimentação CA o sinal passa por uma rede fictícia (LISN), na qual a sua função já foi abordada em capítulo anterior. Finalmente, o circuito analisador de sinal reúne as informações de tensão de fase e neutro para fornecer a medição do ruído de modo comum e de modo diferencial.

Figura 42 – Topologia do sistema fotovoltaico utilizado na simulação



Fonte: Produção do próprio autor.

O conversor Zeta utilizado no projeto está presente na Figura 43 e o inversor é mostrado na Figura 44. Os parâmetros dos conversores foram intencionalmente projetados para operarem juntos na potência nominal do painel. Observa-se que foram adicionados ao circuito, além dos elementos parasitas dos capacitores e indutores, os capacitores de modo comum e as capacitâncias das chaves de comutação. Na Tabela 2 encontra-se os principais parâmetros do sistema fotovoltaico utilizado na simulação.

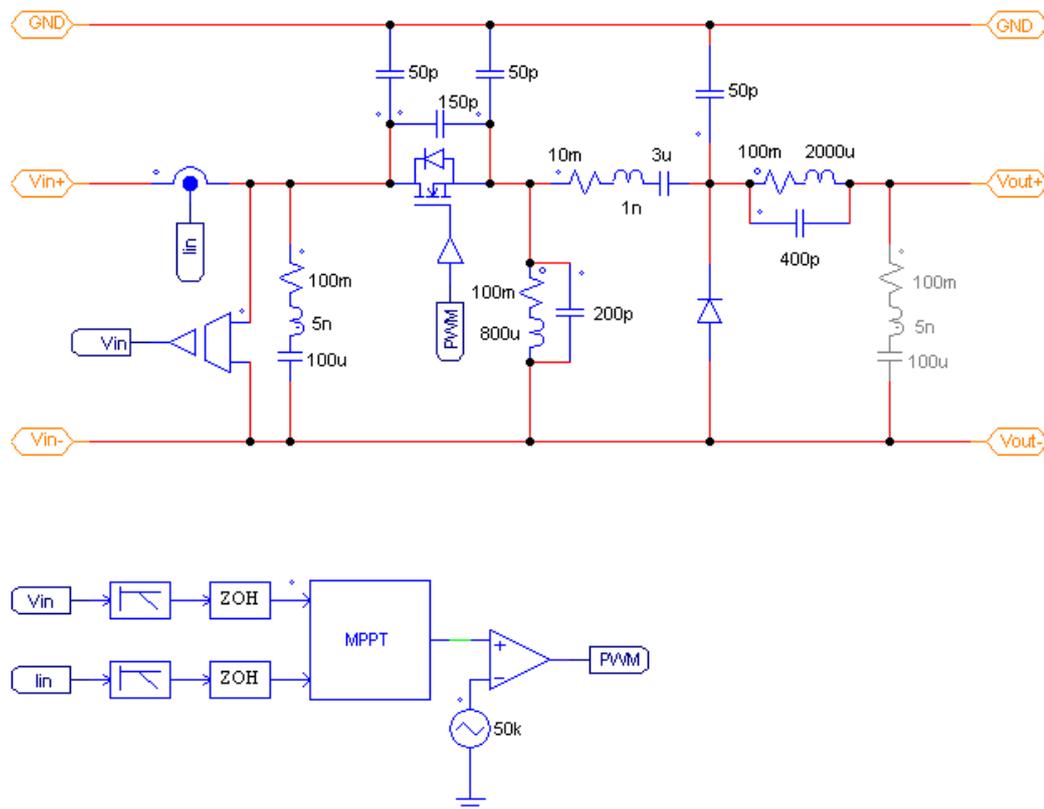
Tabela 2 – Parâmetros do sistema fotovoltaico

Gerador Fotovoltaico	
Tensão máxima	240 V
Corrente máxima	10 A
Potência máxima	2400 W
Conversor CC-CC MPPT	
Topologia	Zeta
Portadora	Triangular
Frequência de operação	50 kHz
Inversor	
Topologia	VSI Full Bridge
Modulação	PWM 3 Níveis
Portadora	Triangular
Frequência de operação	20 kHz
Tensão do barramento CC	240 V
Tensão de saída	127 V
Rede CA	
Frequência de operação	60 Hz
Tensão de operação	127 V
Resistência	1 Ω
Indutância	1 μH

Fonte: Produção do próprio autor.

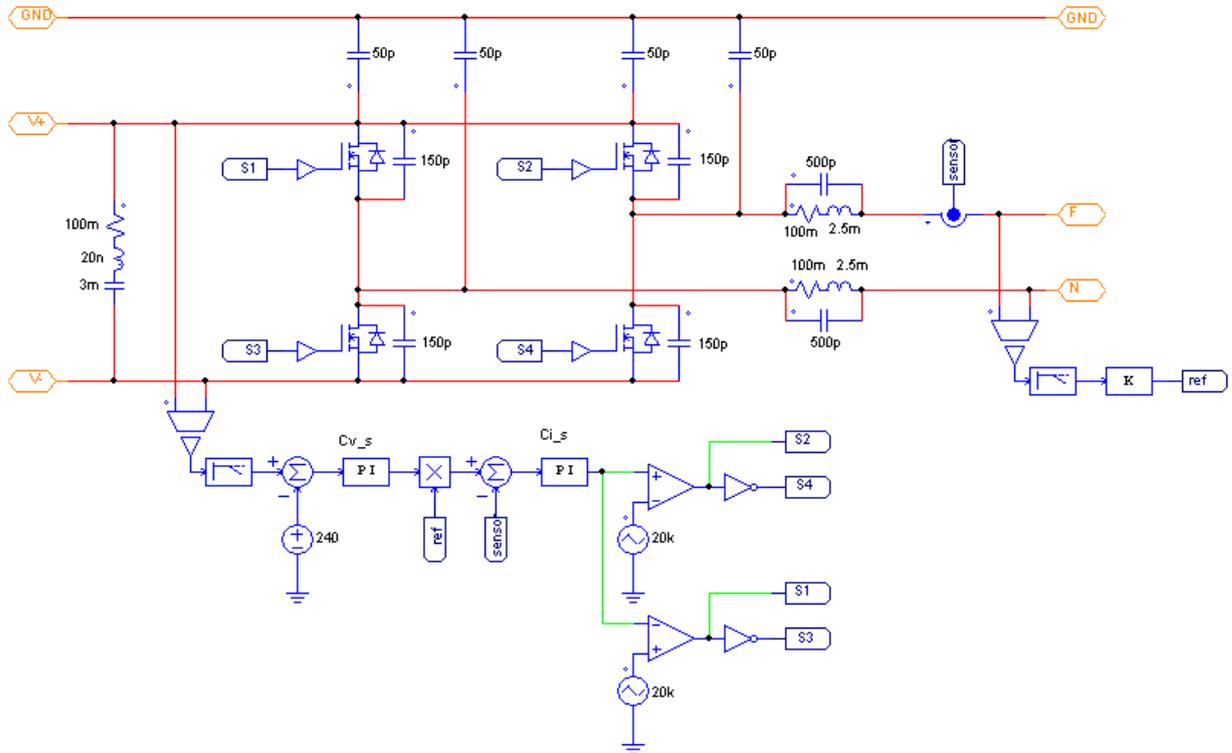
Nota: Valores eficazes de tensões e correntes.

Figura 43 – Conversor Zeta utilizado como MPPT



Fonte: Produção do próprio autor.

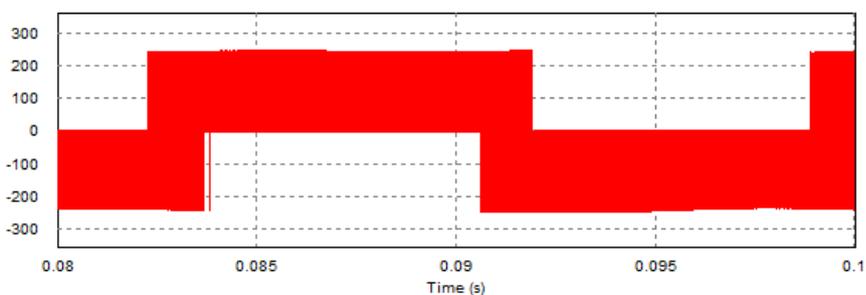
Figura 44 – Topologia do inversor VSI ponte completa



Fonte: Produção do próprio autor.

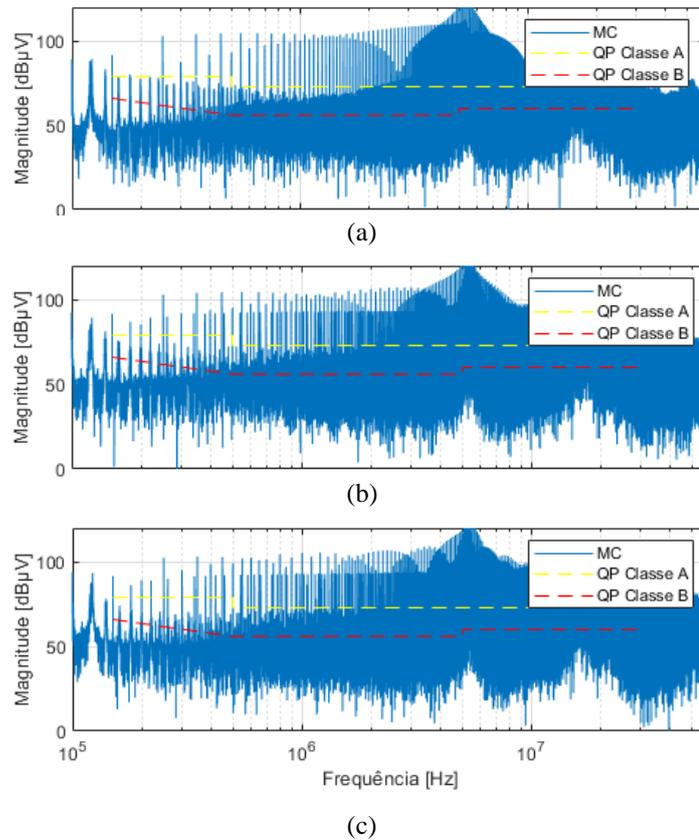
O inversor utilizado é VSI (*Voltage Source Inverter*) com topologia de ponte completa (*full bridge*). Na Figura 45 mostra-se a tensão nos terminais de saída da ponte inversora, onde observa-se que a modulação é feita com PWM de 3 níveis. Também é importante salientar que a portadora pode interferir no surgimento de frequências de bandas laterais, e consequente alteração no espectro de frequências, o que pode ser observado por meio da Figura 46. Neste trabalho o inversor opera com a portadora triangular.

Figura 45 – Modulação PWM em 3 níveis



Fonte: Produção do próprio autor.

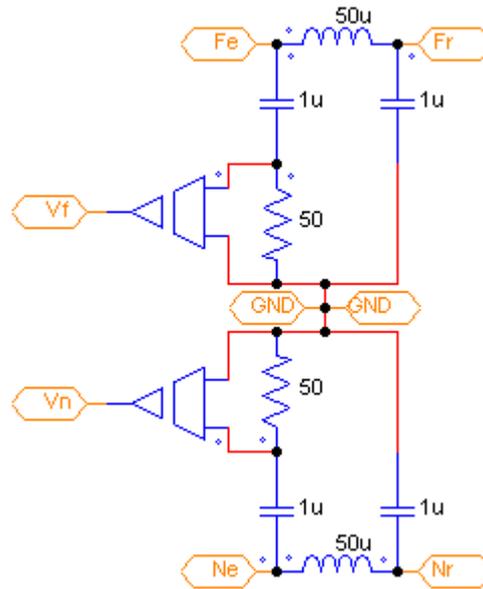
Figura 46 – Magnitude da EMI gerada pelo sistema sem filtros em MC com portadora (a) triangular, (b) dente de serra e (c) dente de serra invertido



Fonte: Produção do próprio autor.

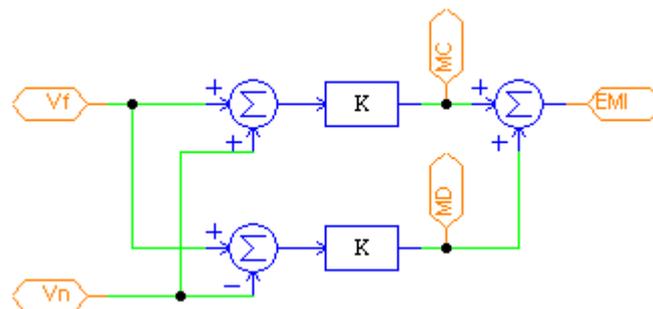
Na Figura 47 é exibido a rede fictícia. Os ramos com os resistores de 50 ohms são responsáveis por criar um caminho de baixa impedância para a EMI produzida pelo dispositivo e sobre essas resistências são medidos os ruídos. Por meio do sistema de equações abordado em (4), o analisador de sinal da Figura 48 separa os ruídos de modo comum e modo diferencial. Ao somar os dois, obtém-se o módulo da interferência eletromagnética total.

Figura 47 – Topologia da rede fictícia (LISN)



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 48 – Analisador de sinal utilizado na simulação

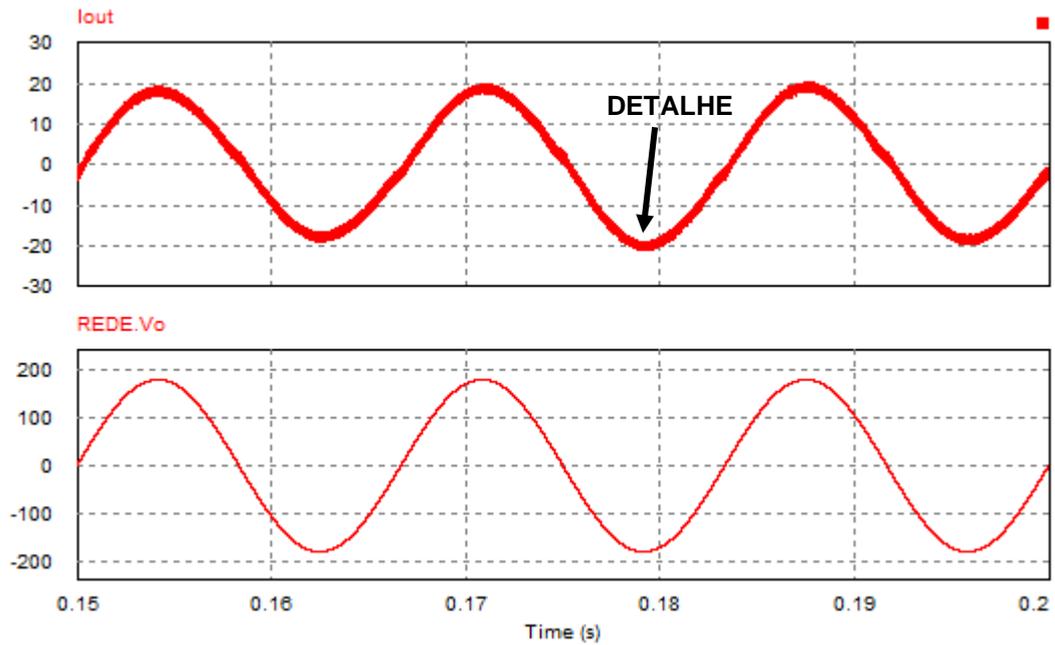


Fonte: Produção do próprio autor.

5.4 Comportamento da EMI no Sistema Fotovoltaico Sem Filtro

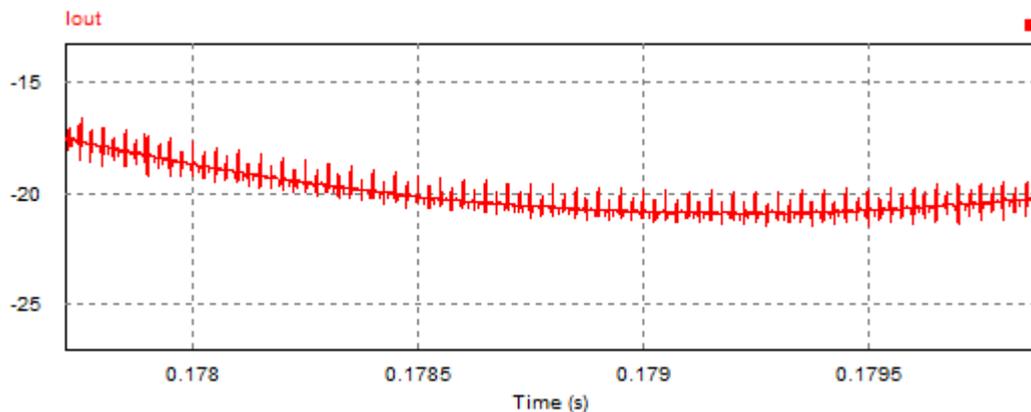
Os sinais mostrados na Figura 49 representam a corrente e tensão de saída gerados pelo inversor e podem parecer senoides perfeitas. Entretanto, ao aproximar-se da curva supostamente senoidal, percebe-se a presença de oscilações e descontinuidades causadas pelo chaveamento, elementos parasitas, etc. (Figura 50). Como já se sabe, este fenômeno insere enorme quantidade de conteúdo harmônico na rede, podendo ser extremamente prejudicial de diversas formas.

Figura 49 – Corrente e tensão de saída do inversor



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 50 – Detalhe na curva de saída em corrente do inversor

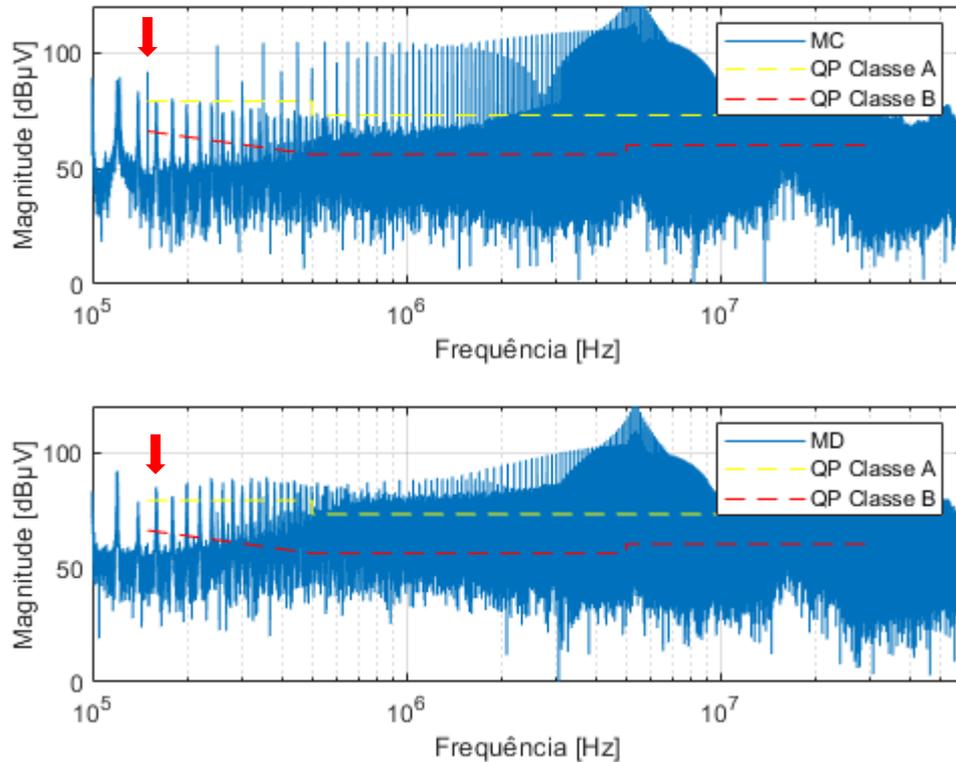


Fonte: Produção do próprio autor.

Para o projeto de filtros utiliza-se os sinais de ruído de MC e MD da saída do analisador os transformando para o domínio da frequência através da transformada de Fourier. Mostra-se na Figura 51 a magnitude dos ruídos, onde pode-se comparar com os limites da norma.

Observa-se que no sistema proposto tanto os ruídos de modo comum quanto os de modo diferencial encontram-se acima dos limites da norma para equipamentos de ambas as classes. A frequência do harmônico crítico encontrada é de 150kHz para o MC com uma magnitude de 91,71dB μ V. Para o MD a frequência é de 159,5kHz com 88,52dB μ V de magnitude.

Figura 51 – Magnitude da EMI gerada pelo sistema sem filtros em MC e MD com harmônicos críticos apontados pelas setas vermelhas



Fonte: Produção do próprio autor.

5.5 Dimensionamento dos Filtros Utilizados

Em posse dos dados apresentados na Figura 51, utilizou-se o método de dimensionamento dos elementos passivos, abordado anteriormente, para calcular o valor dos componentes das cinco topologias de filtro apresentadas. Os resultados encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Dimensionamento dos elementos dos filtros

Filtro	L _{mc}	L _{md}	C _y	C _x
Filtro 1	63,5 mH	635,2 µH	3,3 nF*	9,17 nF
Filtro 2	3,3 mH	32,9 µH	3,3 nF	428,3 nF
Filtro 3	3,3 mH	32,9 µH	3,3 nF	177,0 nF
Filtro 4	749,3 µH	7,5 µH	3,3 nF	500,0 nF
Filtro 5	749,3 µH	749,3 nH	3,3 nF	3,8 µF

Fonte: Produção do próprio autor.

Nota: * O Filtro 1 não possui capacitor C_y, o valor é adotado apenas para fins de projeto inicial do indutor.

O valor do capacitor C_y foi inicialmente escolhido igual a 3,3 nF. Esse é o valor de capacitância limite devido a restrições de segurança (corrente de fuga para terra) de acordo com as normas mais restritivas – ou seja, são permitidos valores menores. O Filtro 1 não possui capacitores C_y , logo o valor adotado é utilizado apenas para estimar um valor inicial para o indutor de modo comum por meio do método de projeto aqui abordado.

Quando a topologia não possui um indutor de modo diferencial foi considerada apenas a indutância de dispersão do indutor de modo comum, adotando-se neste trabalho um valor igual a 1% do valor de L_{mc} . No caso do Filtro 5 (que possui indutor de modo diferencial) adota-se 0,1% de L_{mc} , pois segundo Liz (2003), indutores de modo diferencial das mesmas dimensões de um indutor de modo comum geralmente possuem essa ordem de grandeza de diferença nos valores de suas indutâncias.

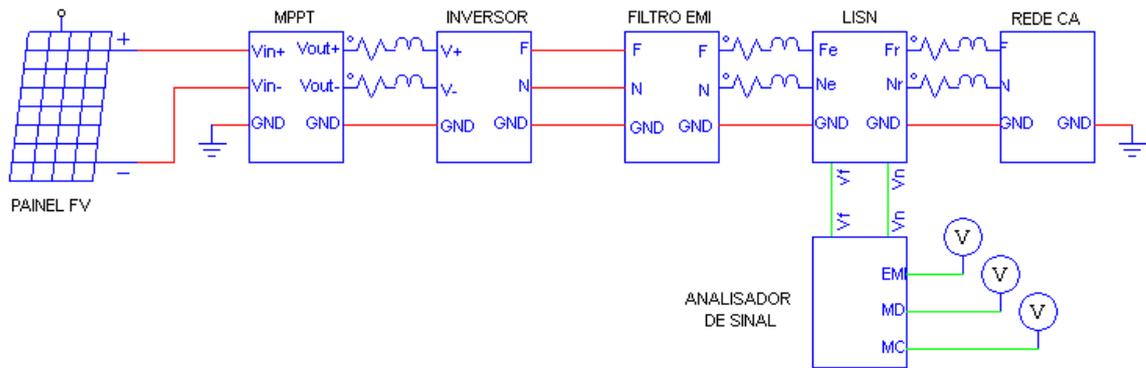
5.6 Considerações Finais

A magnitude da EMI gerada pelo sistema sem filtros mostra claramente a necessidade de um mecanismo de supressão de ruídos para o enquadramento à norma. Além disso, é preciso ressaltar que as topologias utilizadas nos conversores podem influenciar significativamente nos resultados obtidos, exigindo filtros com diferentes níveis de robustez.

6 RESULTADOS

Os filtros de EMI foram conectados à saída do inversor, como mostrado na Figura 52.

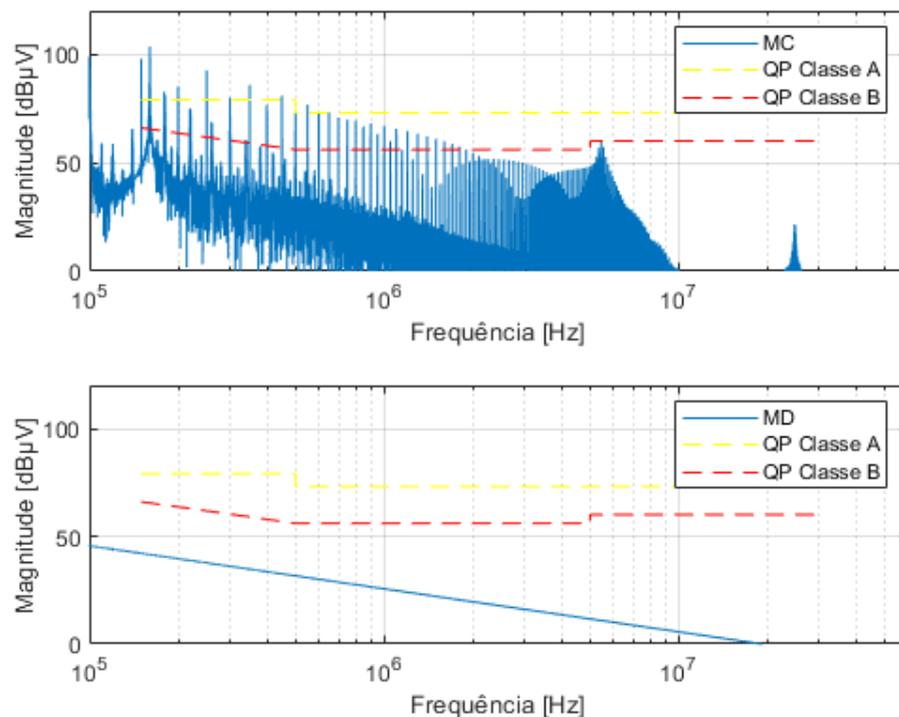
Figura 52 – Topologia do sistema fotovoltaico com filtro de EMI utilizado na simulação



Fonte: Produção do próprio autor.

As primeiras simulações com capacitores C_y de $3,3nF$ não surtiram bons resultados. Como pode-se observar na Figura 53 o ruído de modo diferencial foi totalmente atenuado, entretanto o de modo comum continua muito acima da norma principalmente nas frequências mais baixas.

Figura 53 – Resultado parcial da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 5 em MC e MD



Fonte: Produção do próprio autor.

Devido a este comportamento, foi necessário ajustar os parâmetros do projeto. Percebeu-se que o problema poderia ser resolvido reduzindo o valor do capacitor C_y , individualmente para cada filtro, de forma a elevar o valor do indutor de modo comum. Após diversas etapas de simulação foi possível obter os resultados finais da magnitude da EMI gerada pelo sistema com filtros presentes na Figura 54 a Figura 58. Na Tabela 4 é mostrado o resultado final do dimensionamento dos filtros.

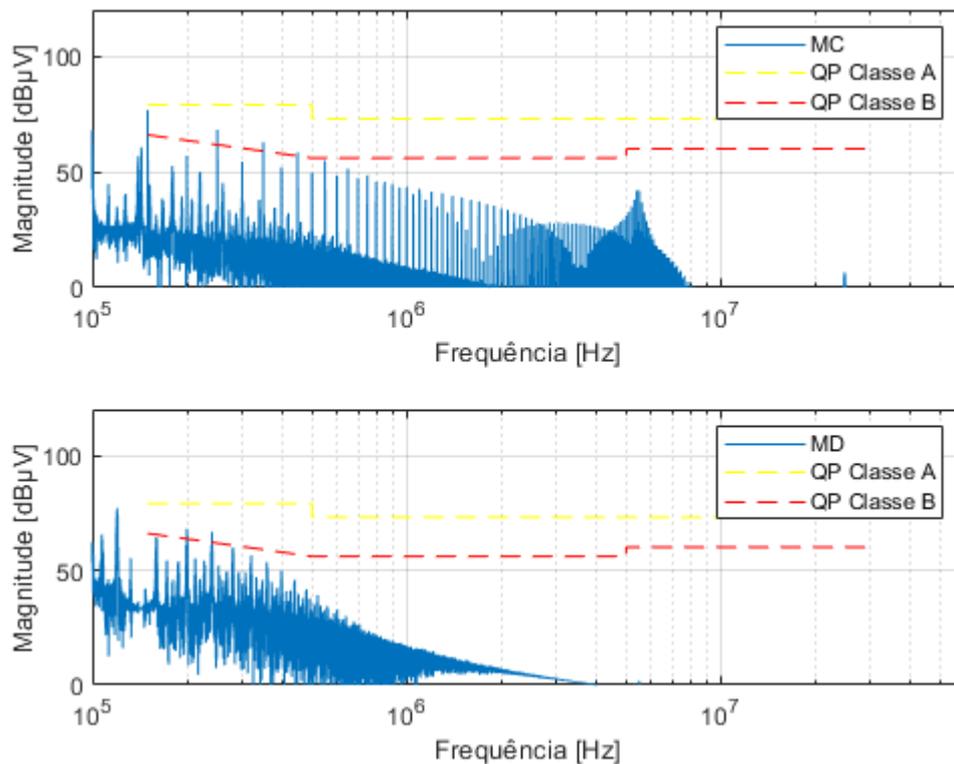
Tabela 4 – Resultado final do dimensionamento dos elementos dos filtros

Filtro	L_{mc}	L_{md}	C_y	C_x
Filtro 1	95,3 mH	952,8 μ H	2,2 nF*	6,1 nF
Filtro 2	49,4 mH	493,7 μ H	220 pF	11,8 nF
Filtro 3	49,4 mH	493,7 μ H	220 pF	11,8 nF
Filtro 4	22,5 mH	224,8 μ H	110 pF	12,8 nF
Filtro 5	74,9 mH	74,9 μ H	33 pF	38,4 nF

Fonte: Produção do próprio autor.

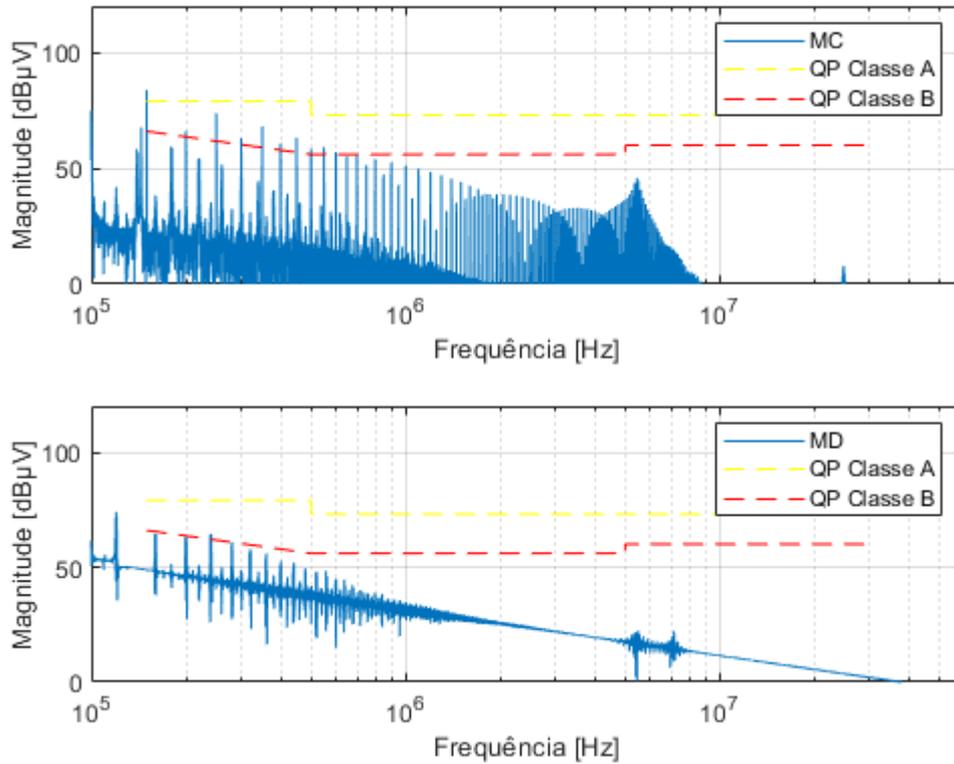
Nota: * O Filtro 1 não possui capacitor C_y , o valor é adotado apenas para fins de projeto inicial do indutor.

Figura 54 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 1 em MC e MD



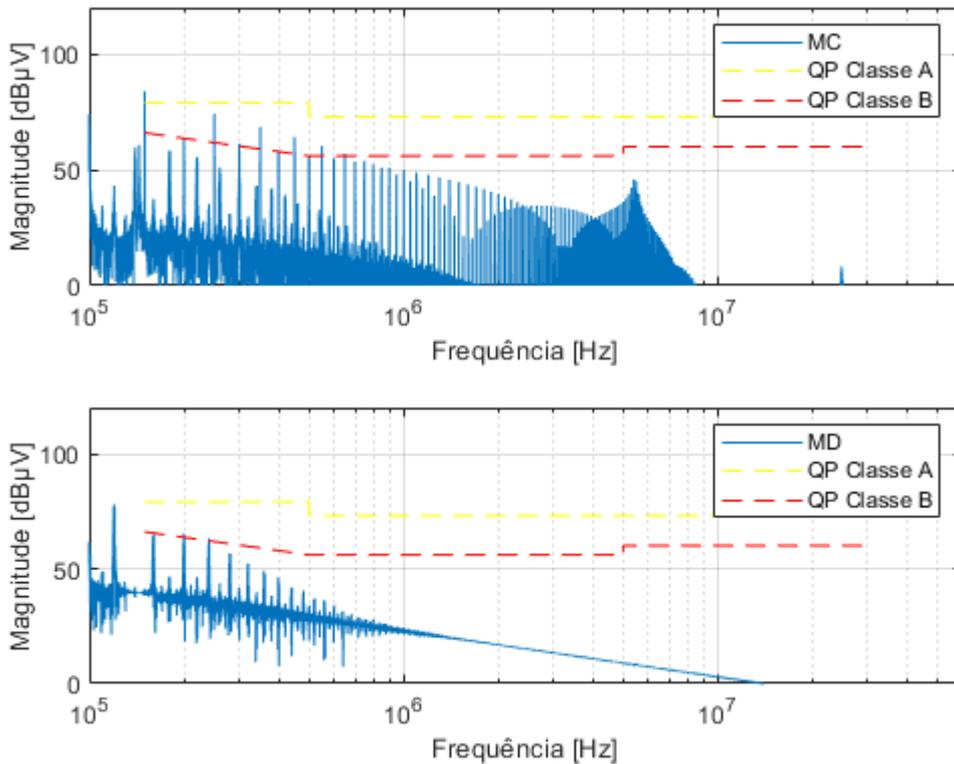
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 55 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 2 em MC e MD



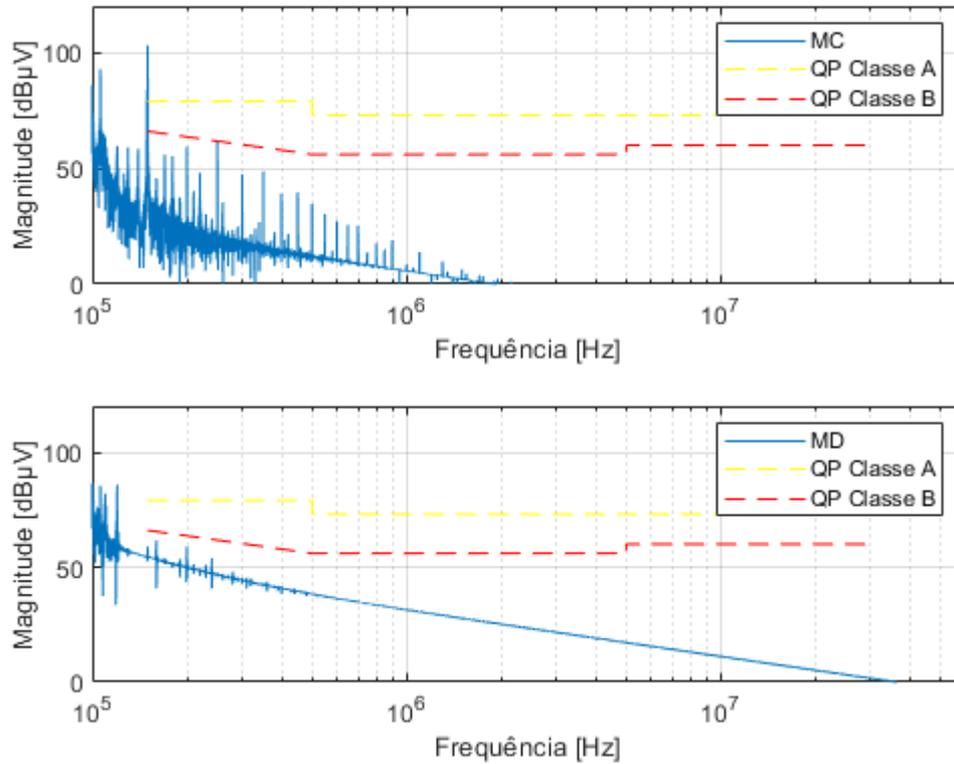
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 56 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 3 em MC e MD



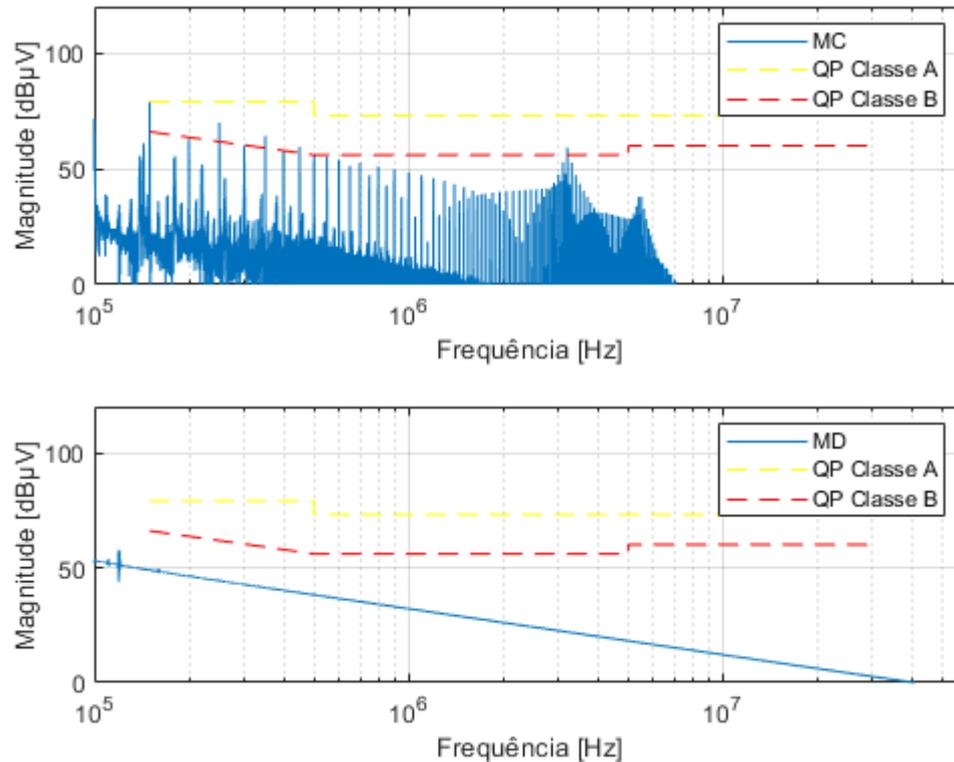
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 57 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 4 em MC e MD



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 58 – Resultado final da magnitude da EMI gerada pelo sistema com o Filtro 5 em MC e MD



Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que todos os filtros apresentaram atenuação suficiente para manter os ruídos de modo comum abaixo dos limites da norma para os equipamentos de Classe A, porém apenas o filtro 4 se manteve abaixo dos limites para os de Classe B ao longo de toda a faixa definida. Ainda assim, é preciso ressaltar que a norma define seus limites em medições de Quase-Pico e os resultados computacionais as expressam em Pico, mantendo certa faixa de tolerância que aqui pode ser considerada. Esses picos se apresentam em pequena quantidade e com banda extremamente estreita, sugerindo grande possibilidade de os picos serem atenuados e enquadrados à norma ao utilizar-se de um sensor de Quase-Pico nas medições em laboratório.

Para os ruídos de modo diferencial os filtros apresentaram ótimo desempenho no geral. Apenas os filtros 1 e 2 ultrapassaram sutilmente o limite estabelecido pela norma para equipamentos de Classe B, o que pode ser justificado pela simplicidade da topologia.

Ao comparar os resultados dos filtros 2 e 3, presentes na Figura 55 e Figura 56, nota-se que a presença do capacitor de modo diferencial foi capaz de reduzir as componentes de ruído diferencial, enquadrando os resultados à norma. Além disso, é muito perceptível a redução do ruído principalmente nas frequências mais altas, comprovando a sua aplicação na topologia.

De acordo com a ABNT NBR 16149 (2013), a distorção harmônica total (THD) de corrente deve ser inferior a 5% em relação à corrente fundamental na potência nominal do inversor. Como pode-se verificar na Tabela 5, o THDi de todos os filtros permaneceu abaixo do nível estabelecido pela norma.

Tabela 5 – THDi dos filtros

Filtro	THDi
Filtro 1	3,10%
Filtro 2	2,84%
Filtro 3	2,87%
Filtro 4	4,62%
Filtro 5	2,71%

Fonte: Produção do próprio autor.

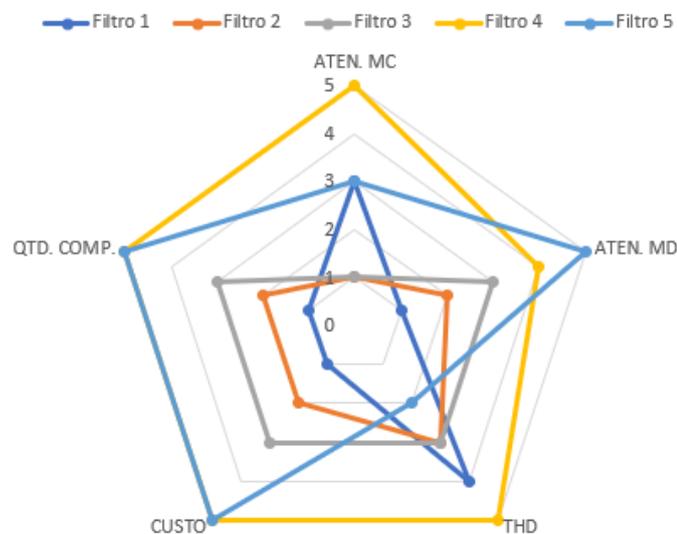
7 CONCLUSÕES

No decorrer deste trabalho foi estudado e analisado como o chaveamento de corrente/tensão e os elementos parasitas do circuito se relacionam com emissão de ruídos eletromagnéticos em banda larga e o motivo deles serem tão prejudiciais. Além disso, foram apresentadas as normas regulamentadoras e seus requisitos pertinentes ao ensaio de interferências eletromagnéticas. Com isto, verificou-se que é de extrema importância a aplicação de mecanismos de filtragem, onde sem os mesmos, os ruídos, principalmente o de modo comum, se situavam acima dos limites da norma utilizada.

A atenuação decorrente da inserção dos filtros de EMI no sistema foi suficiente para que as emissões ficassem dentro dos limites da norma para equipamentos Classe A. Para equipamentos Classe B alguns filtros permitiram que os ruídos ultrapassassem levemente os limites, porém, devido à margem de segurança adotada, sugere-se que os resultados estão de acordo com a NBR IEC/CISPR 22.

A partir dos resultados obtidos das simulações, relacionou-se as informações de atenuação em modo comum, em modo diferencial, distorção harmônica total, custo e quantidade de componentes. Para isso, classificou-se os filtros em uma escala de 1 a 5 para cada característica analisada e os resultados estão representados no gráfico presente na Figura 59.

Figura 59 – Resultados das características dos filtros



Fonte: Produção do próprio autor.

O filtro 4, apesar de ter mais componentes e exigir maior custo, foi o que demonstrou melhor performance em atenuação. Isso confirma a eficácia da presença do nó interno que depende pouco das impedâncias da fonte e da carga no circuito, como já foi mencionado no trabalho. Um fato peculiar a ser observado é que mesmo com melhor desempenho em atenuação este filtro obteve a maior THD; como a frequência fundamental é de 60 Hz as atenuações na faixa de 150 kHz a 30 MHz na ordem dos dB μ V pouco influenciam no THD o que sugere que a distorção harmônica esteja sendo causada por outros motivos, como ressonância entre filtro-inversor, porém fora da faixa definida na norma.

Mesmo com muitos componentes, o filtro 5 não demonstrou ganho de performance notável quando comparado com os filtros mais simples para o ruído de modo comum. Entretanto, foi o que apresentou melhor atenuação do modo diferencial dentre todos os filtros, onde constata-se os benefícios dos indutores de modo diferencial. Além disso, obteve o melhor desempenho em distorção harmônica.

Como foi observado neste trabalho, o projeto dos filtros precisou ser refeito diversas vezes, logo, conclui-se que a realização de simulações computacionais pode permitir a redução da quantidade de protótipos físicos a serem testados em laboratório, reduzindo tempo e custo. Entretanto, é preciso ressaltar que os ensaios em laboratório permanecem indispensáveis para satisfazer a norma, considerando problemas do mundo real como aspectos construtivos e elementos parasitas dos filtros, que não foram considerados neste trabalho.

Também é interessante observar que diferentes filtros produzem comportamentos diferentes em um mesmo sistema e o melhor filtro a ser o utilizado é aquele que atende, além da atenuação necessária, à diversas outras variáveis de projeto como custo, tamanho, eficiência, etc.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Finalmente, são sugeridos alguns tópicos para trabalhos futuros, tais como:

- a) Realização da análise do desempenho em simulação considerando os elementos parasitas dos filtros de EMI.
- b) Estudo do filtro de EMI do lado CC do inversor, destacando suas particularidades para com os filtros CA.
- c) Relacionar as diferentes topologias de conversores com a emissão de ruídos em MC e MD.
- d) Comparação dos resultados obtidos com outros tipos de modulações, como SVPWM (*Space Vector PWM*).
- e) Aplicadas as técnicas de redução da EMI, verificar o seu impacto em termos da imunidade (susceptibilidade).
- f) Estudo dos efeitos causados pela aplicação das técnicas de redução da EMI nas emissões radiadas.
- g) Simular outros conversores CC-CC no MPPT com variação no nível de irradiância.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024**. Brasília: ANEEL, 2017. Disponível em: https://www.aneel.gov.br/documents/656827/15234696/Nota+T%C3%A9cnica_0056_PROJE%C3%87%C3%95ES+GD+2017/. Acesso em: 11 jul. 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa n. 482**. Brasília: ANEEL, 2012.
- ALMEIDA, C. C. **Análise das emissões conduzidas utilizando técnicas de separação de ruído de modo comum e modo diferencial**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16149:2013**. Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC 60050-161:2021**. Vocabulário eletrotécnico internacional – Capítulo 161: Compatibilidade eletromagnética. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR IEC/CISPR 22**. Equipamento de tecnologia da informação - Características de radioperturbação - Limites e métodos de medição. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- BALBINO, I. M. **Análise de impactos de um sistema fotovoltaico conectado à rede em Mossoró/RN**. 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Comunicação e Automação) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2017.
- CÂMARA, C. F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. 2011. Monografia (Pós-Graduação em Formas Alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- CANCIAN, E. C.; BELTRAME, F.; PINHEIRO, J. R. Projeto e implementação de filtros de interferência eletromagnética. In: Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 25., 2013, Passo Fundo. **Anais [...]**. Passo Fundo: 2013.
- CARDOSO, K. R. **Análise de interferência eletromagnética conduzida provocada por inversor de sistema fotovoltaico operando com baixa geração**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Telecomunicações) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações – Escola de Engenharia – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CRESESB, 2014. Disponível em:

http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf.

Acesso em: 11 jul. 2021.

COILCRAFT. **A Guide to Understanding Common Mode Chokes**. 2021. Disponível em:

<https://www.coilcraft.com/en-us/edu/series/a-guide-to-understanding-common-mode-chokes>.

Acesso em 17 jul. 2021.

DIAS, C.; SILVA, W. K.; FREITAS, G.; DO NASCIMENTO, J. F. Energia Solar no Brasil.

Revista InterScientia, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 153-165, 4 dez. 2017.

ELETROTÉCNICA APLICADA. **Painel Solar Fotovoltaico**. 2010. Disponível em:

<http://eletrotecnicasimplificada.blogspot.com/2010/12/painel-solar-fotovoltaico-muito-bom.html>.

Acesso em: 12 jul. 2021.

EMI ANALYST. **Improve EMC Testing Results with Realistic EMI Filter Modeling**.

2017. Disponível em: <https://emianalyst.wordpress.com/2017/03/24/improve-emc-testing-results-with-realistic-emi-filter-modeling/>.

Acesso em 16 jul. 2021.

FRAUNHOFER ISE. *Current and Future Cost of Photovoltaics: Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems. Study on behalf of Agora Energiewende*, 2015a. Disponível em:

https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/AgoraAgoraEnergie_Current_and_Future_Cost_of_PV_Feb2015_web.pdf. Acesso em 11 jul. 2021.

FU-YUAN, S.; CHEN, D. Y.; YAN-PEI, W.; YIE-TONE, C. A procedure for Designing EMI Filters for AC Line Applications. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [s. l.], v. 11, 1996.

GENZLER, J. **Estudo comparativo de topologias de inversores para a conexão de painéis fotovoltaicos com a rede elétrica sem o uso de transformador**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2015.

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

MINHA CASA SOLAR. **Inversor Solar: Tudo o que você precisa saber está aqui**. 2019.

Disponível em: <http://blog.minhacasasolar.com.br/inversor-solar-tudo-o-que-voce-precisa-saber-esta-aqui/>. Acesso em 12 jul. 2021.

PAUL, C. R. *Introduction to Electromagnetic Compatibility*. New York: Wiley-Interscience, 1992.

PEDRONI, R. **Técnicas de mitigação de interferência eletromagnética em equipamentos de iluminação a LED**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica – Centro de Tecnologia – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2017.

SEVERINO, F. Z. **Contribuição ao estudo da interferência eletromagnética em sistemas fotovoltaicos autônomos**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SUELA, F. **Medição de Ruídos Eletromagnéticos Irrradiados em Sistemas de Geração Fotovoltaica**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica – Escola de Engenharia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SUNERGIA. **Energia Solar Off Grid: Sistema Isolado desconectado da Rede**. 2018. Disponível em: <https://sunergia.com.br/blog/energia-solar-off-grid-sistema-isolado-desconectado-a-rede/>. Acesso em 13 jul. 2021.

WANG, S. *Characterization and Cancellation of High-Frequency Parasitics for EMI Filters and Noise Separators in Power Electronics Applications*. 2005. *Dissertation (Doctor of Philosophy) – Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, 2005.*

WYATT, K.; JOST, R. J. *EMC Pocket Guide: Key EMC Facts, Equations and Data*. New Jersey: SciTech Publishing, 2013.

APÊNDICE A – CÓDIGO DO MATLAB UTILIZADO PARA PLOTAR O ESPECTRO EM FREQUÊNCIA

```

close all

% Carrega os sinais exportados pelo PSIM
filename = 'dados.txt';
opts = detectImportOptions(filename);
dados = readmatrix(filename, opts);
t = dados(:,1);
Vemi = dados(:,2);
Vmc = dados(:,3);
Vmd = dados(:,4);
clear dados;

T = 2E-009; % Período de Amostragem (igual do PSIM)
Fs = 1/T;   % Frequência de Amostragem

figure

L = size(Vmc,1);
Y = fft(Vmc);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
subplot(2,1,1)
semilogx(f,20*log10(P1/(1E-6)))

xlabel('Frequência [Hz]')
ylabel('Magnitude [dBµV]')
hold on
semilogx([150000, 500000, 500000, 5000000, 5000000, 30000000], [79, 79, 73,
73, 73, 73], '--y')
hold on
semilogx([150000, 500000, 500000, 5000000, 5000000, 30000000], [66, 56, 56,
56, 60, 60], '--r')
xlim([100000 60000000])
ylim([0 120])
grid on
legend('MC', 'QP Classe A', 'QP Classe B')

subplot(2,1,2)
L = size(Vmd,1);
Y = fft(Vmd);
P2 = abs(Y/L);
P1 = P2(1:L/2+1);
P1(2:end-1) = 2*P1(2:end-1);
f = Fs*(0:(L/2))/L;
semilogx(f,20*log10(P1/(1E-6)))

xlabel('Frequência [Hz]')
ylabel('Magnitude [dBµV]')
hold on
semilogx([150000, 500000, 500000, 5000000, 5000000, 30000000], [79, 79, 73,
73, 73, 73], '--y')

```

```
hold on
semilogx([150000, 500000, 500000, 5000000, 5000000, 30000000], [66, 56, 56,
56, 60, 60], '--r')
xlim([100000 60000000])
ylim([0 120])
grid on
legend('MD', 'QP Classe A', 'QP Classe B')
```

APÊNDICE B – CÓDIGO DO BLOCO C DO MPPT NO PSIM

```

double Vin;
double Vin_ant = 0;

double Iin;
double Iin_ant = 0;

double Pin; // Potência de entrada
double Pin_ant_1 = 0; // Potência de entrada 1 passo atrás
double Pin_ant_2 = 0; // Potência de entrada 2 passos atrás

double D = 0;
double D_ant = 0.5;

double dD = 0.0001; // Taxa de variação da razão cíclica inicial
double dDmin = 0.0001; // Taxa de variação da razão cíclica máxima
double dDmax = 0.0025; // Taxa de variação da razão cíclica mínima
double dDtx_dw = 0.7; // Taxa de redução do passo ao encontro de um
pico
double dDtx_up = 1.02; // Taxa de aumento do passo ao encontro de um
pico (deve ser muito mais lenta que a taxa de redução)

// Entradas
Vin = in[0];
Iin = in[1];

Pin = Vin * Iin;

// Reduz o passo ao identificar um pico e aumenta o passo
(lentamente) quando não identifica um pico
dD = (Pin_ant_1 > Pin) && (Pin_ant_1 > Pin_ant_2) || (Pin_ant_1 <
Pin) && (Pin_ant_1 < Pin_ant_2) ? dD*dDtx_dw : dD*dDtx_up;

// Limita dD entre dDmin e dDmax
dD = dD < dDmin ? dDmin : (dD > dDmax ? dDmax : dD);

// Algoritmo P&O tradicional (porém faz o uso do passo variável)
D = Pin > Pin_ant_1 ? (Vin < Vin_ant ? D_ant + dD : D_ant - dD) :
(Vin < Vin_ant ? D_ant - dD : D_ant + dD);

// Limita D entre 1 e 0
D = D < 0 ? 0 : (D > 1 ? 1 : D);

// Saída
out[0] = D;

```

```
// Atribuições temporais (memória)
D_ant = D;
Vin_ant = Vin;
Pin_ant_2 = Pin_ant_1;
Pin_ant_1 = Pin;
```