

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURAS DE CONEXÃO COM
A REDE ELÉTRICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

TATIANA PONTUAL GUEDES

**JOÃO PESSOA - PB
2018**

TATIANA PONTUAL GUEDES

**ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURAS DE CONEXÃO COM
A REDE ELÉTRICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientadores:

Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes
Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida

**JOÃO PESSOA - PB
2018**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G924a Guedes, Tatiana Pontual.

Análise Comparativa de Estruturas de Conexão com a Rede Elétrica em Sistemas Fotovoltaicos / Tatiana Pontual Guedes. - João Pessoa, 2019.

110 f.

Orientação: Darlan Alexandria Fernandes.

Coorientação: Rogério Gaspar de Almeida.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. Sistemas Fotovoltaicos. 2. Filtros Passivos. 3. Conexão com a Rede Elétrica. 4. Distorção Harmônica. I. Fernandes, Darlan Alexandria. II. de Almeida, Rogério Gaspar. III. Título.

UFPB/BC

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGE

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a banca

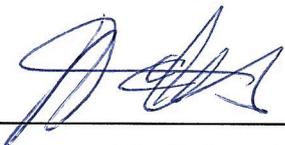
**ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURAS DE CONEXÃO COM
A REDE ELÉTRICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Elaborado por

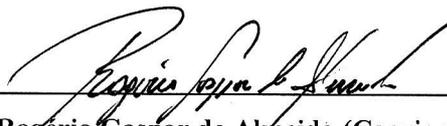
TATIANA PONTUAL GUEDES

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

COMISSÃO EXAMINADORA



Prof. Dr. Darlan Alexandria (Orientador) – UFPB/DEE



Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Coorientador) – UFPB/DEE



Prof. Dr. Romero Leandro Andersen (Avaliador) – UFPB/DEE



Prof. Dr. Kleber Carneiro de Oliveira (Avaliador) – UFPB/DEE

João Pessoa/PB, 23 de fevereiro de 2018.

À minha família

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, porque sei que nada alcançaria sem Sua presença em minha vida.

À minha família, que sempre está ao meu lado, especialmente ao meu pai Áureo e a minhas irmãs Adriana e Brenda que são a expressão mais verdadeira que conheço do amor.

À minha prima Isabela, que se mostra presente nos momentos em que mais preciso, estando perto ou longe e a quem tenho como uma irmã em meu coração.

Ao professor Edson Guedes, que soube ouvir além do que minhas palavras diziam e plantou em mim novos sonhos quando os antigos já não me serviam.

Aos professores Darlan Alexandria e Rogério Gaspar por todas as vezes que me receberam em sua sala, me ensinando, orientando e motivando com paciência e boa vontade.

Aos professores Kleber e Romero, por aceitarem participar da banca examinadora e gentilmente disponibilizarem seu tempo e conhecimento para a melhoria do trabalho.

Ao professor Fabiano Salvatori, por tornar possível a continuidade das atividades experimentais, disponibilizando meios e materiais para complementação da bancada.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica, os quais sempre me receberam prontamente em minhas dúvidas e pedidos de ajuda. Em especial aos professores Juan, Romero, Helon, Camila, Nady, Lucas, Iuri e Simplício.

Aos meus colegas de projeto, que trilharam comigo cada passo deste caminho com generosidade e companheirismo, em particular agradeço a Francisco Antônio Ferreira dos Santos Júnior cuja capacidade profissional, prestatividade e amizade foram fundamentais para o bom andamento do projeto.

Aos meus colegas do Laboratório de Otimização, que fizeram desse desafio momentos de aprendizado, satisfação e amizade; compartilhando respostas nas dúvidas e soluções nas dificuldades.

**“Não tenha medo do caminho,
tenha medo de não caminhar.”**

Augusto Cury

RESUMO

ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURAS DE CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA EM SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O aumento crescente da participação dos sistemas de geração de energia com fontes renováveis na matriz energética mundial vem motivando a discussão sobre o impacto ocasionado pela conexão desses sistemas com a rede elétrica de distribuição. Os filtros passivos, enquanto estruturas de conexão entre os sistemas de geração e a rede de distribuição, apresentam fundamental importância na prevenção de distúrbios ocasionados pela má qualidade da energia injetada. Uma análise comparativa da dinâmica dessas estruturas em sistemas fotovoltaicos monofásicos é apresentada neste trabalho, no qual são explanados os projetos, as simulações e a análise dos resultados de simulação para as topologias: L, LC e LCL. Com objetivo de validar os resultados de simulação obtidos, são apresentados resultados experimentais que corroboram com os de simulação. O sistema de controle utilizado é composto por uma estrutura convencional, com um proporcional-integral e um controle ressonante, utilizado com o objetivo de garantir um fator de potência próximo à unidade no ponto de acoplamento comum (PAC) à rede elétrica, para cada estrutura apresentada.

Palavras-chaves: Sistemas Fotovoltaicos, Filtros Passivos, Conexão com a Rede Elétrica, Distorção Harmônica.

ABSTRACT

COMPARATIVE ANALYSIS OF GRID-CONNECTION STRUCTURES IN PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

The growing increase in the participation of renewable energy generation systems in the worldwide energy matrix has led to a discussion in relation to the impact caused by the connection of these systems over the distribution grid. Passive filters, as connection structures between the generation systems and the distribution network, turn out to be fundamentally important in the prevention of disturbances caused by the poor quality of the injected energy. A comparative analysis of the dynamics of these structures in single-phase photovoltaic systems is highlighted in this research, in which the projects, simulations, and the analysis of the simulation results for the topologies L, LC and LCL are explained. In order to validate the obtained simulation results, we present experimental results that corroborate with those of the simulation results. The control system used is made up of a conventional structure, with a proportional-integral and a resonant control, used with the objective of ensuring a power factor close to the unit at the Point of Common Coupling (PCC) in the power grid, for each structure presented.

Key-words: Photovoltaic Systems, Passive Filter, Grid Connection, Harmonic distortion.

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	12
LISTA DE TABELAS	14
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
LISTA DE SÍMBOLOS	16
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 Motivação	21
1.2 Objetivos	22
1.2.1 Objetivo Geral	22
1.2.2 Objetivos Específicos	22
2 REVISÃO DA LITERATURA	24
3 CONCEITOS E DEFINIÇÕES	30
3.1 Sistemas Fotovoltaicos.....	30
3.1.1 Painéis Fotovoltaicos	30
3.1.2 Conversor CC/CC	32
3.1.3 Conversor CC/CA de Tensão (Inversor)	33
3.1.4 Conexão com a Carga / Rede Elétrica.....	36
3.2 Técnicas de Controle.....	37
3.2.1 Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.....	37
3.2.2 PLL	38
3.3 Estruturas de Filtragem de Harmônicos	39
3.3.1 Filtro L.....	40
3.3.2 Filtro LC	43
3.3.3 Filtro LCL	45
3.3.4 Atenuação dos Picos de Ressonância.....	47
4 MATERIAL E MÉTODO	50

4.1	Plataforma de Simulação	50
4.1.1	Técnica de Controle	58
4.2	Bancada Experimental	63
4.3	Métodos para Dimensionamento dos Filtros	69
4.3.1	Projeto dos Filtros L	69
4.3.2	Projeto dos Filtros LC.....	71
4.3.3	Projeto dos Filtros LCL.....	72
4.4	Critérios de Análise de Desempenho	77
4.4.1	Fator de Potência.....	77
4.4.2	Perda no Filtro Passivo	79
4.4.3	Componentes Harmônicas de Tensão.....	80
4.4.4	Componentes Harmônicas de Corrente.....	81
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....	83
6	ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	87
7	CONCLUSÃO	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
	APÊNDICE.....	95
	Projeto dos Filtros - Cálculos.....	100
	Projeto do Filtro L	100
	Projeto do Filtro LC	103
	Projeto do Filtro LCL	105

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Capacidade instalada mundial de energia renovável.....	19
Figura 2 - Crescimento anual e capacidade global da energia fotovoltaica	20
Figura 3 - Capacidade instalada de energia fotovoltaica no Brasil.....	21
Figura 4 - Equivalente monofásico do filtro LCL na harmônica h	27
Figura 5 - Estrutura genérica de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica	30
Figura 6 - Curva IV e PV painel fotovoltaico	31
Figura 7 - Exemplo de associação de painéis	32
Figura 8 - Circuito do conversor push-pull	33
Figura 9 - Representação de um inversor monofásico em ponte completa	34
Figura 10 - Geração do sinal PWM para modulação unipolar	35
Figura 11 - FFT da tensão de saída do inversor.....	36
Figura 12 - Variáveis MPPT	37
Figura 13 - Fluxograma do algoritmo P&O	38
Figura 14 - Estrutura clássica do PLL	39
Figura 15 - Topologia de filtros passivos: (a) filtro L, (b) filtro LC e (c) filtro LCL	40
Figura 16 - Filtro L	40
Figura 17 - Diagrama de Bode genérico filtro L	42
Figura 18 - Filtro LC	43
Figura 19 - Inversor conectado à rede via filtro LC e transformador isolador.....	44
Figura 20 - Diagrama de Bode do filtro LC	45
Figura 21 - Filtro LCL	45
Figura 22 - Comparativo filtro L / LC / LCL (Diagrama de Bode).....	46
Figura 23 - Diagrama de Bode de um filtro LCL	47
Figura 24 - Estrutura do filtro LCL com resistor de amortecimento	48
Figura 25 - Diagrama de Bode de um filtro LCL com atenuação do pico de ressonância	48
Figura 26 - Push-pull em ambiente de simulação.....	52
Figura 27 - Controle de máxima potência do painel em ambiente de simulação	53
Figura 28 - Inversor monofásico em ponte completa – simulação	53
Figura 29 - Malha de controle de tensão e de corrente do inversor	54
Figura 30 - Filtros passivos nas topologias L, LC e LCL.....	54
Figura 31 - Representação da rede elétrica com presença de harmônicas de corrente.....	55
Figura 32 - Representação da rede elétrica com presença de harmônicas de tensão	55
Figura 33 - Plataforma de simulação de sistema fotovoltaico em ambiente <i>Simulink</i>	57

Figura 34 - Diagrama de controle.....	58
Figura 35 - Controlador de tensão	59
Figura 36 - Controle de sincronização com a rede	61
Figura 37 - Malha de corrente	61
Figura 38 - Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico na bancada experimental	64
Figura 39 - Bancada experimental	64
Figura 40 - Conexão com a rede elétrica.....	65
Figura 41 - Curva IxV emulador solar	65
Figura 42 - Emulador solar modelo E4360A, fabricação <i>Keysight</i>	66
Figura 43 - Conversor push-pull.....	67
Figura 44 - Inversor IRAM™	67
Figura 45 - Inversor de tensão trifásico.....	68
Figura 46 - Componentes dos filtros passivos	68
Figura 47 - Estrutura de acesso à rede elétrica	69
Figura 48 - Gráfico para definição do parâmetro r	74
Figura 49 - Componentes harmônicas de tensão e corrente na frequência de chaveamento.	75
Figura 50 - Tensão e corrente no PAC para filtro indutivo.....	78
Figura 51 - Potência ativa (P) e reativa (Q) no bloco “Power” do <i>Simulink</i>	79
Figura 52 - FFT da tensão nas saídas do inversor e do filtro – componente fundamental	79
Figura 53 - FFT da tensão nas saídas do inversor e do filtro - componentes harmônicas.....	80
Figura 54 - Distribuição dos componentes. (a) filtro L (b) filtro LC (c) filtro LCL.....	83
Figura 55 - Corrente da rede e corrente injetada pelo sistema fotovoltaico	85
Figura 56 - Corrente da rede e corrente injetada pelo sistema fotovoltaico	86
Figura 57 - Tensão e corrente na saída do inversor para carga resistiva	87
Figura 58 - Tensão e corrente no PAC para: (a) filtro L (b) filtro LC (c) filtro LCL	88
Figura 59 - Diagrama de Bode do filtro LC projetado	105
Figura 60 - Parâmetro r do filtro LCL - 1	106
Figura 61 - Parâmetro r do filtro LCL - 2	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros do painel fotovoltaico.....	51
Tabela 2 - Componentes do push-pull	51
Tabela 3 - Parâmetros do sistema fotovoltaico da plataforma de simulação	56
Tabela 4 - Fator de potência por potência gerada	78
Tabela 5 - Limites de distorção de corrente	81
Tabela 6 - Componentes dos filtros passivos	83
Tabela 7 - Avaliação dos resultados de simulação.....	84
Tabela 8 - Componentes dos filtros passivos selecionados	86
Tabela 9 - Componentes dos filtros passivos	87
Tabela 10 - Avaliação dos resultados experimentais	89
Tabela 11 - Parâmetros de projeto para os filtros L.....	100
Tabela 12 - Parâmetros de projeto para o filtro LC.....	103
Tabela 13 - Parâmetros de projeto para os filtros LCL	105

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
D	<i>Duty Cycle</i> (Ciclo de Trabalho)
DSP	<i>Digital Signal Processor</i> (Processador Digital de Sinal)
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> (Transformada Rápida de Fourier)
FP	Fator de Potência
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> (Transistor Bipolar de Porta Isolada)
L	Indutor
LC	Indutor - Capacitor
LCL	Indutor - Capacitor - Indutor
MOSFET	<i>Metal Oxide Field Effect Transistor</i> (Transistor de Efeito de Campo Metal - Óxido – Semicondutor)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Máxima Potência)
NDU	Norma de Distribuição Unificada
P	Potência Ativa
PAC	Ponto de Acomplamento Comum
P&O	Perturba e Observa
PI	Controlador Proporcional-Integral
PLL	<i>Phase Locked Loop</i> (Laço de Sincronização de Fase)
PR	Controlador Proporcional Ressonante
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
Q	Potência Reativa
S	Potência Aparente
TDH	Taxa de Distorção Harmônica
TDHi	Taxa de Distorção Harmônica de Corrente
TDHv	Taxa de Distorção Harmônica de Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitor do barramento CC
C_b	Capacitância base
D	<i>Duty Cycle</i>
f_c	Frequência de corte do controlador de corrente
$f_{cv_{CC}}$	Frequência de corte do controlador de tensão
f_r	Frequência da rede
f_s	Frequência de chaveamento
I_1	Componente fundamental da corrente
I_{sc}	Corrente de curto circuito do painel fotovoltaico
I_{mp}	Corrente de máxima potência do painel fotovoltaico
i_{pv}	Corrente gerada pelo painel fotovoltaico
ΔI_p	Componente de ondulação da corrente
i_s	Corrente na saída do inversor
i_s^*	Corrente de referência na saída do inversor
K_P	Ganho proporcional
K_i	Ganho integral
K_{PWM}	Ganho do inversor para o controlador de corrente
$K_{PWM_{DC}}$	Ganho do inversor para o controlador de tensão
L_i	Indutância do filtro no lado do inversor
L_g	Indutância do filtro no lado da rede
m	Índice de modulação de amplitude
n	Relação de transformação
P	Potência ativa
P_{mp}	Máxima potência do painel fotovoltaico
R_{L_i}	Resistência da bobina do filtro do lado do inversor
R_{L_g}	Resistência da bobina do filtro do lado da rede
R_D	Resistência de amortecimento do pico de ressonância
R_{rede}	Reatância da rede
s	Operador de Laplace, $s=j\omega$
S	Potência aparente

T_2	Constante de tempo integrativa
V_{cc}	Tensão no barramento CC
V_{cc}^*	Tensão de referência no barramento CC
$V_{c_{rms}}$	Tensão no capacitor do filtro passivo
V_i	Tensão de entrada do push pull
V_{mp}	Tensão de máxima potência do painel fotovoltaico
V_o	Tensão de saída entrada do push pull
V_{oc}	Tensão de circuito aberto do painel fotovoltaico
V_{rede}	Tensão da rede
V_{ref}	Tensão de referência
V_{PAC}	Tensão eficaz no PAC
V_{PWM}	Tensão à saída do inversor de tensão
Z_b	Impedância de base
ω	Frequência angular

INTRODUÇÃO

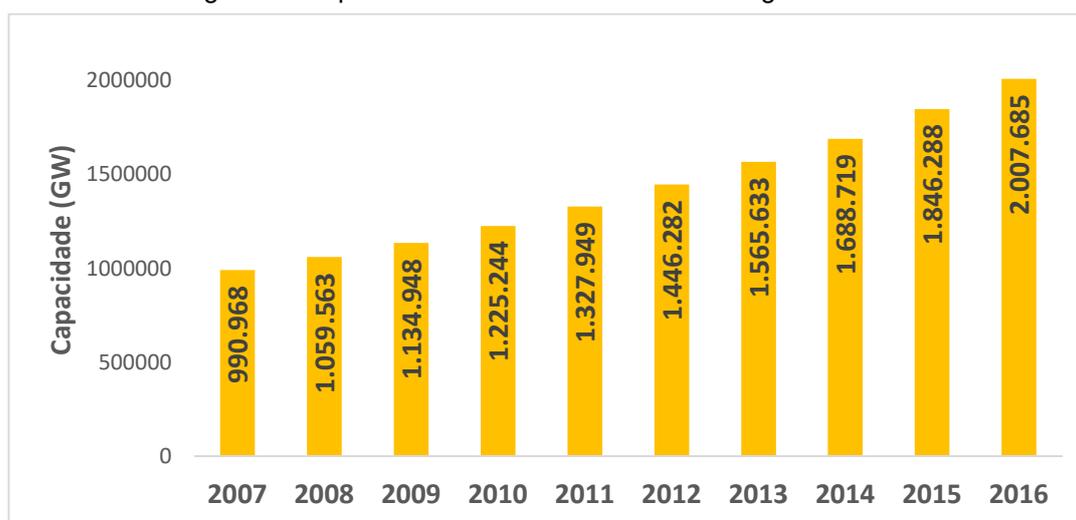
1 INTRODUÇÃO

Na década atual é cada vez mais frequente a presença do termo *fontes alternativas* quando o assunto abordado é energia elétrica. Isso é facilmente observado em textos acadêmicos, mas não é apenas nessa área que ele se sobressai. Em estudos direcionados ao mercado de energia, essas fontes vêm marcando fortemente sua presença.

Em décadas anteriores, o elevado investimento nas fontes renováveis promovia em primeira vista, a inviabilidade de utilização destas tecnologias nas redes elétricas. Além do alto investimento inicial, outros fatores também se apresentavam como obstáculo, tais como: alto custo da energia gerada, instabilidade em seu fornecimento e a concorrência com fontes já consolidadas no mercado, tais como as hidrelétricas, base do sistema gerador de energia no Brasil, e a indústria do petróleo, a qual possui até hoje grande influência econômica no mercado mundial.

Gradualmente, o cenário global da energia elétrica foi mostrando que essas fontes, não só ganhariam espaço, como se tornariam foco de investimento e pesquisa de instituições inicialmente vistas como suas principais concorrentes, obtendo um crescimento promissor nos últimos anos, como apontado na Figura 1.

Figura 1 - Capacidade instalada mundial de energia renovável



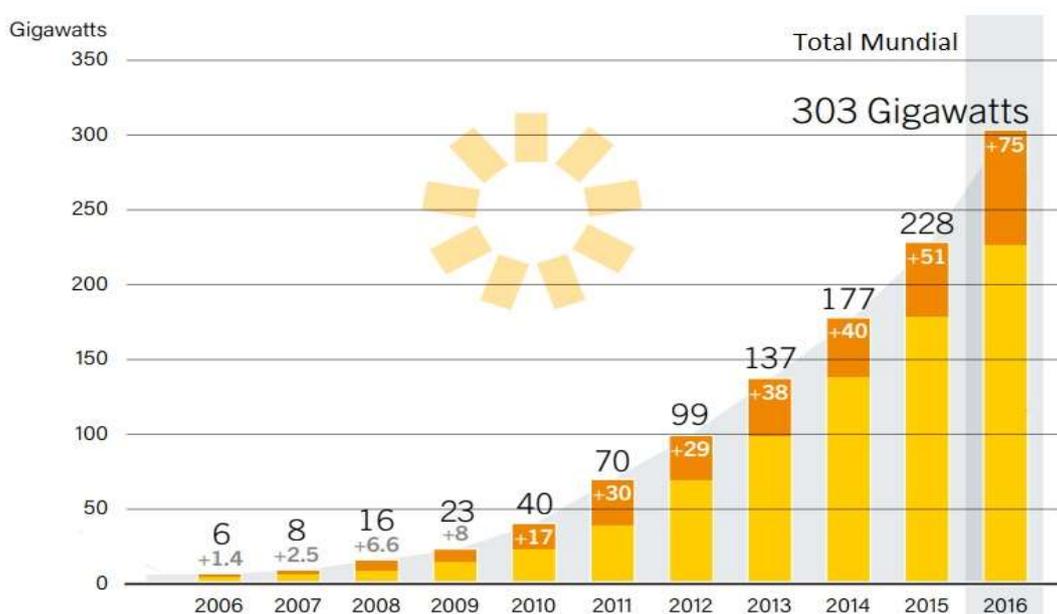
Fonte: (IRENA, 2017)

Dentre as fontes alternativas de maior crescimento, a energia solar vem se destacando no mercado mundial, sendo um dos principais alvos dos novos investimentos em energias renováveis, de acordo com o relatório *Global Status Report 2017* da REN21 (REN21, 2017).

Mesmo países cuja principal fonte de riqueza é o petróleo, vêm investindo fortemente nessas tecnologias. Um exemplo disso são os Emirados Árabes, que possuem em Abu Dhabi uma das maiores usinas de energia fotovoltaica concentrada do mundo, com capacidade de geração de 100 Megawatts, e tem como seu mais importante centro de pesquisa o *Masdar Institute of Science and Technology*, cujos projetos são exclusivamente direcionados para o estudo de energias alternativas, sustentabilidade e meio ambiente (SITE G1, 2016).

Nesse contexto, a geração fotovoltaica de energia vem apresentando um crescimento expressivo, como mostrado na Figura 2, e o desenvolvimento da tecnologia aparece como um fator fundamental para seu crescimento, viabilizando a redução no custo da energia gerada.

Figura 2 - Crescimento anual e capacidade global da energia fotovoltaica

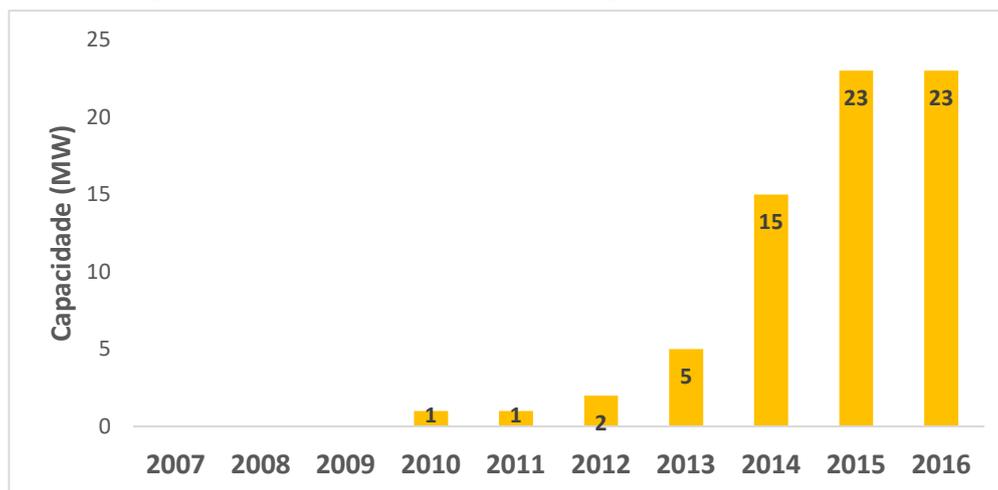


Fonte: (REN21, 2017)

Pesquisas sobre esse tema vem sendo desenvolvidas em instituições de todo o mundo e a cada dia novas propostas são apresentadas ofertando melhores resultados na eficiência, confiabilidade e custo do processo de geração da energia fotovoltaica.

No Brasil, essa realidade não é diferente. A alta redução no preço da energia solar nos últimos dez anos, somado ao aumento das tarifas de energia elétrica nesse período impulsionaram o crescimento da energia fotovoltaica no Brasil nos anos de 2013 a 2015 (IRENA, 2017), aumentando sua participação na matriz energética do país, como mostrado no gráfico da Figura 3.

Figura 3 - Capacidade instalada de energia fotovoltaica no Brasil



Fonte: (IRENA, 2017)

1.1 Motivação

Diante da atual conjuntura e da perspectiva de crescimento na participação dos sistemas fotovoltaicos de geração na matriz energética brasileira, existe uma real preocupação com a forma que estes sistemas se conectam com a rede, pois a má gestão da qualidade da energia injetada na rede elétrica pode ocasionar distúrbios, dentre os quais podemos citar: a variação de tensão, variação de frequência e presença de harmônicos.

Desta forma, a qualidade da energia injetada é fundamental na prevenção dos distúrbios ocasionados na rede pela injeção de energia por sistemas fotovoltaicos, a qual depende diretamente das estruturas de circuitos propostos para os filtros situados entre os inversores de tensão e a rede elétrica, bem como do sistema de controle que é escolhido para que sejam cumpridos os propósitos de controle. Diante deste cenário é importante que sejam estudadas e analisadas tanto a dinâmica como as características de filtragem das estruturas que venham a ser utilizadas no sistema de geração.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o desempenho de estruturas de conexão de sistemas de geração de energia fotovoltaica com a rede elétrica e desenvolver uma estratégia de controle adequada a estrutura selecionada, buscando otimizar seu desempenho.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Desenvolver plataforma de simulação em ambiente *Matlab/Simulink*, contemplando todas as etapas de um sistema fotovoltaico de geração de energia;
2. Estudar as metodologias propostas na literatura para projeto de filtros para conexão com a rede elétrica;
3. Demonstrar as etapas de projeto dos filtros passivos de conexão com a rede, nas topologias L, LC e LCL;
4. Estabelecer critérios para análise de desempenho dos filtros;
5. Realizar simulações com cada topologia e analisar os dados obtidos de acordo com os critérios estabelecidos;
6. Definir topologia com melhor desempenho e custo-benefício;
7. Desenvolver uma estratégia de controle que seja adequada para tornar o fator de potência, na conexão com a rede, próximo à unidade.

REVISÃO DA LITERATURA

2 REVISÃO DA LITERATURA

Na busca por uma metodologia de projeto para o desenvolvimento da estrutura de conexão do sistema de geração de energia com a rede elétrica, a decisão do melhor modelo a ser seguido não se restringe à definição de sua topologia.

Ainda que a disposição dos componentes dessa estrutura seja determinada com base nos parâmetros do sistema de geração, é possível encontrar diferentes métodos para a obtenção do valor dos elementos que constituem o filtro a ser projetado.

Essa diversidade não apresenta em si um motivo para questionamento, dado que não é incomum a existência de vários métodos para a obtenção de um mesmo resultado. No entanto, a variedade não está relacionada apenas com os passos a serem seguidos, mas também com os resultados que são obtidos, sendo possível a elaboração de filtros consideravelmente distintos para os mesmos parâmetros de projeto.

Estudos comparativos que analisam o desempenho entre as topologias L e LCL são comuns na literatura, no entanto não é exposta de forma clara a motivação para a utilização de determinado método em detrimento de outros que poderiam obter melhores resultados naquelas condições.

Filtro L

Para o filtro L, foram observadas diferentes abordagens apresentadas por Samuel, Neves e Cabral (2006) e Paukner et al. (2015).

Samuel, Neves e Cabral (2006) apresentam a Equação 1 para o cálculo da indutância, a qual relaciona o valor do indutor com a tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), a frequência de chaveamento (f_s) e a ondulação da corrente que irá passar pelo filtro (ΔI_p).

$$L_i = \frac{V_{PAC}}{2\sqrt{6}f_s\Delta I_p} \quad (1)$$

De acordo com Samuel, Neves e Cabral (2006), a indutância série de todas as topologias de filtro analisadas neste estudo podem ser calculadas utilizando a Equação 1, buscando obter um filtro passa-baixas, o qual deverá ter

uma frequência de corte definida no intervalo que se encontra entre uma década acima da frequência da rede e uma década abaixo da frequência de chaveamento.

Paukner et al. (2015) apresenta outra metodologia para o cálculo do valor da indutância para o filtro L, a qual embora seja igualmente desenvolvida com base na ondulação da corrente de saída do inversor, leva também em consideração a definição da potência mínima injetada na rede e vincula a expressão do cálculo do indutor ao uso de uma modulação unipolar, resultando na redução do valor da indutância, quando comparado com a Equação 1. Neste caso, a indutância é obtida segundo a Equação 2.

$$L_i = \frac{m V_{CC} (1 - m)}{\Delta I_p 2f_s} \quad (2)$$

Onde m é o índice de modulação do inversor e V_{CC} é a tensão no barramento, sendo a demais variáveis iguais as da Equação 1.

No filtro com a topologia L é onde se encontra a menor diferença entre os valores obtidos, pois as metodologias têm seus cálculos baseados na mesma referência, que é a ondulação da corrente na saída do inversor de tensão.

Filtro LC

No filtro LC, a metodologia de projeto apresentada em Martins e Barbi (2011) toma como referência os seguintes critérios:

1. O fator de amortecimento ζ deve ser maior que 0,707 para evitar amplificações de harmônicos em baixa frequência;
2. A frequência de corte deve estar posicionada uma década abaixo da frequência de chaveamento mínima e ser pelo menos trinta vezes maior que a frequência da componente fundamental da tensão alternada de saída;
3. Deve ser observada a influência do capacitor de filtragem sobre a componente fundamental da corrente na entrada do filtro e do indutor de filtragem sobre a regulação de tensão.

Esses critérios, embora apresentados como recomendações para a topologia LC, são citados em diversos textos como recomendação para qualquer

filtro passivo com característica ressonante, com o objetivo reduzir o impacto do pico de ressonância na resposta do filtro.

Uma desvantagem do filtro LC, está relacionada com sua característica ressonante. De acordo com Aguiar (2014), Araújo (2012), Barbosa (2014) e Machado (2016), a presença do pico de ressonância pode ocasionar problemas na conexão com a rede elétrica, visto que a estrutura LC conectada diretamente à rede configura um circuito de ressonância juntamente com a reatância da rede (ENSLIN; HESKES, 2014), a qual sofre influência das demais cargas conectadas ao PAC. Essa característica pode resultar em uma frequência de ressonância variável, proporcional à variação da reatância da rede, o que dificulta a aplicação de estratégias de redução do pico de ressonância.

Para Prodanovic e Green (2003) e para Carvalheiro e Castro (2005) a topologia LC pode ser considerada para a conexão com a rede, no entanto a recomendação é para que essa topologia seja utilizada em conexões realizadas através do uso de um transformador.

Filtro LCL

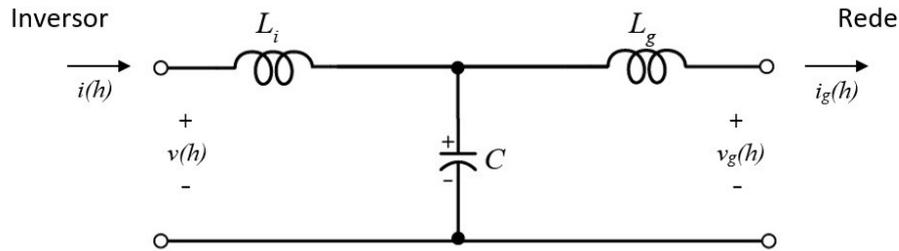
Quando se fala da estrutura LCL, há uma maior variação entre as diretrizes, métodos e resultados obtidos. Nas análises comparativas realizadas por Araújo (2012) e Samuel, Neves e Cabral (2006), embora o indutor do lado do inversor (L_i) tenha seguido o modelo da Equação 1, pois ambos defendem que a expressão utilizada para obter o filtro L pode ser usada para obter a indutância do lado do inversor em qualquer topologia, o cálculo dos demais componentes seguiram a metodologia apresentada por Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005).

Em Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005), o sistema de geração conectado à rede elétrica através da estrutura com topologia LCL, pode ser representada segundo o modelo da Figura 4.

Se o modelo da Figura 4 for analisado, considerando que as componentes harmônicas de tensão provenientes do PWM do inversor se encontram em altas frequências, é possível assumir que para esta condição a capacitância se comporta de forma similar a um curto circuito. Portanto, tomando a frequência de

chaveamento (f_s) como referência, tem-se que para uma componente harmônica de tensão do lado do inversor $v(h_s) \neq 0$, ocorrerá uma $v_g(h_s) = 0$.

Figura 4 - Equivalente monofásico do filtro LCL na harmônica h



Fonte: Adaptado de (LISERRE; BLAABJERG; HANSEN, 2005)

Nessas condições, a relação entre a componente harmônica de corrente na frequência de chaveamento $i(h_s)$ e a componente harmônica de tensão nessa mesma frequência $v(h_s)$ é dada de forma aproximada pela Equação 3:

$$\frac{i(h_s)}{v(h_s)} \cong \frac{1}{2\pi f_s L_i} \quad (3)$$

Desta forma, a indutância L_i pode ser calculada de acordo com o valor da relação entre a componente harmônica de corrente na frequência de chaveamento e a de tensão nessa mesma frequência. Em Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005) o valor de relação sugerido é de 10%, resultando na Equação 4.

$$L_i = \frac{1}{2\pi f_s 0,1} \quad (4)$$

No entanto, em Gabe (2008) é mostrado que o cálculo dessa relação pode ser realizado analisando os valores das componentes harmônicas de tensão e corrente próximas à frequência de chaveamento para cada caso.

Outra metodologia de projeto para o filtro LCL é apresentada por Sampaio (2013). Neste modelo, Sampaio (2013) sugere que seja inicialmente projetado um filtro LC para atenuar as componentes harmônicas de alta frequência e em seguida seja utilizada a equação de transferência de potência ativa com o objetivo de encontrar um valor de indutância adequado para conectar o filtro LC com a rede elétrica, sendo L_g resultante da Equação 5.

$$L_g = \frac{V_{C_{rms}} V_{PAC}}{2\pi f_r P} \text{sen}(\theta) \quad (5)$$

Na qual $V_{C_{rms}}$ é a tensão RMS no capacitor, f_r é a frequência da rede e P é a potência injetada na rede.

As metodologias apresentadas na revisão da literatura serão explanadas de forma mais detalhada nos tópicos 3.3 e 4.3 desta dissertação.

CONCEITOS E DEFINIÇÕES

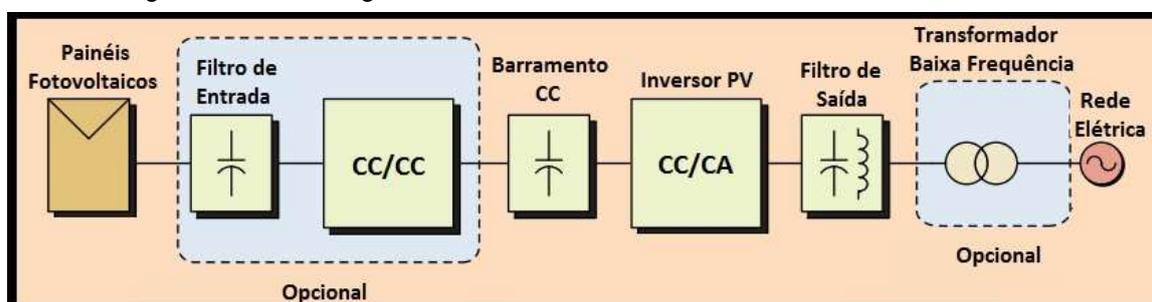
3 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

3.1 Sistemas Fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos de geração de energia são sistemas que têm por finalidade gerar eletricidade através da captação da energia da luz solar. No entanto, a energia fornecida pelos terminais de um painel fotovoltaico tem como característica ser em corrente contínua, o que a torna inapropriada para utilização em equipamentos de alimentação alternada, assim como para a injeção dessa energia na rede de distribuição. Por este motivo, é necessário que a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos passe por etapas de processamento objetivando adequá-la ao uso nessas aplicações.

Na Figura 5 é apresentada uma estrutura genérica de um sistema fotovoltaico de geração de energia conectado à rede elétrica, a qual será usada como base para o desenvolvimento das plataformas de simulação e experimental utilizadas nesta dissertação.

Figura 5 - Estrutura genérica de sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica



Fonte: Adaptado de (ARAÚJO, 2012)

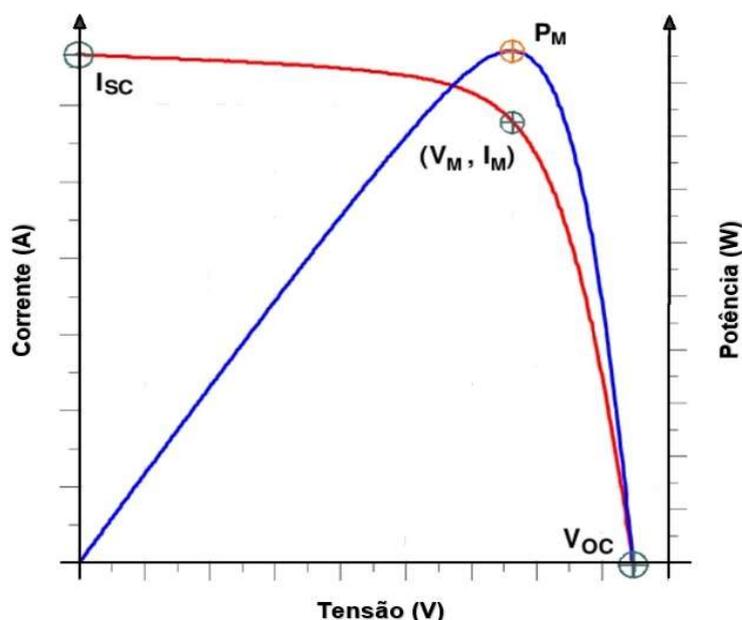
3.1.1 Painéis Fotovoltaicos

A primeira etapa do processo consiste na utilização de células fotovoltaicas para produzir energia elétrica através do efeito fotovoltaico, o qual ocorre quando surge uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura de matéria semicondutora devido à incidência de luz (CRESESB, 2017).

Para a obtenção de uma maior potência, as células são agrupadas em uma estrutura formando um painel fotovoltaico, o qual fornece em seus terminais a energia gerada pelo conjunto de células.

A relação entre a tensão e a corrente existentes nos terminais de um painel segue o padrão de comportamento mostrado na Figura 6, sendo possível observar a existência de um ponto na curva no qual o painel trabalha fornecendo sua máxima potência.

Figura 6 - Curva IV e PV painel fotovoltaico



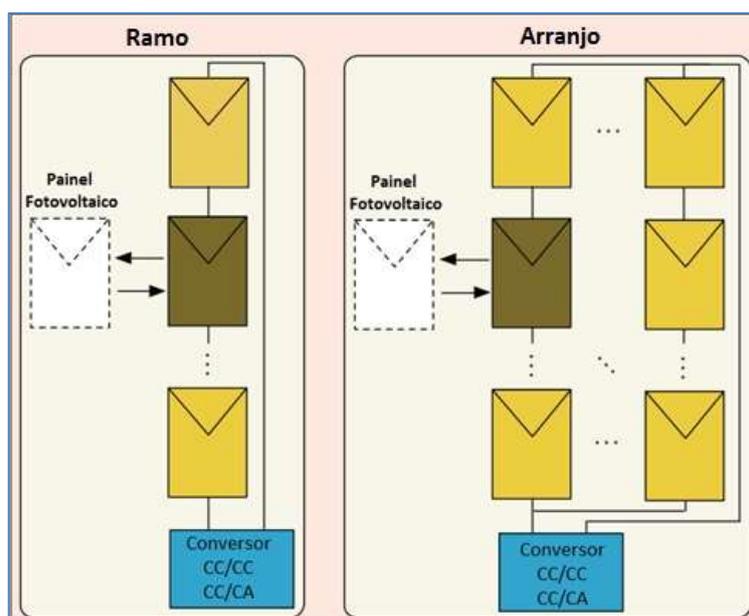
Fonte: (BÜHLER; KREZINGER, 2007)

Onde: I_{sc} = corrente de curto circuito;
 V_{oc} = tensão de circuito aberto;
 I_M = corrente de máxima potência;
 V_M = tensão de máxima potência.

Assim como as células fotovoltaicas, os painéis também podem ser organizados de forma associada para a obtenção de um valor de tensão, corrente ou potência desejada. Nessas associações os painéis podem ser conectados em série, objetivando aumentar a tensão nos terminais do conjunto, ou em paralelo, obtendo assim o aumento da corrente fornecida.

O conjunto de painéis conectados em série é conhecido como ramo ou *string* e a combinação desses ramos em paralelo é conhecido como arranjo ou *array*, como apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Exemplo de associação de painéis



Fonte: (AGUIAR, 2014)

3.1.2 Conversor CC/CC

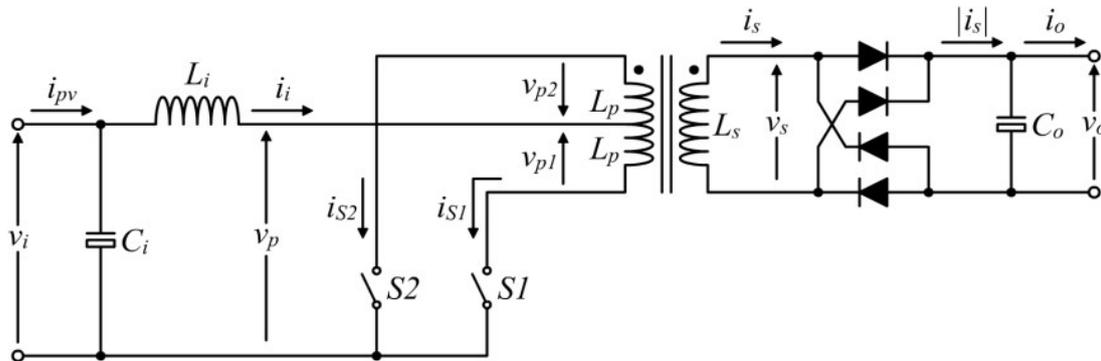
Os conversores CC/CC são circuitos que amplificam ou reduzem a magnitude de uma tensão ou corrente contínua aplicada em sua entrada. Embora esse conversor seja um elemento opcional no modelo genérico apresentado na Figura 5, sua utilização se faz necessária para os casos em que há a demanda de uma redução ou elevação do valor da tensão fornecida nos terminais do conjunto de painéis fotovoltaicos para o valor mínimo exigido para o barramento CC na entrada do inversor.

Para este trabalho será abordado apenas o conversor CC/CC do tipo *Push Pull* alimentado em corrente. Este conversor apresenta vantagens na aplicação em sistemas fotovoltaicos, onde a tensão de entrada tende a ser baixa. Devido à presença de um transformador de alta frequência em sua estrutura, o *Push Pull* apresenta um ganho de tensão elevado com relação a sua entrada, além de proporcionar um isolamento galvânico, protegendo o usuário contra choques na parte de baixa tensão (HARTMANN, 2007).

A Figura 8 apresenta a formação do circuito de um conversor elevador *Push-Pull*, no qual i_{pv} é a corrente de alimentação desse conversor e tem como

origem um conjunto de painéis fotovoltaicos, segundo o modelo de sistema de geração adotado.

Figura 8 - Circuito do conversor push-pull



Fonte: Adaptado de (HARTMANN, 2015)

A relação entre a tensão V_o em sua saída e a tensão V_i na entrada, é obtida através da Equação 6, demonstrando o ganho do conversor quanto a sua relação de transformação (n) e ao ciclo de trabalho (D).

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{n(1-D)} \quad (6)$$

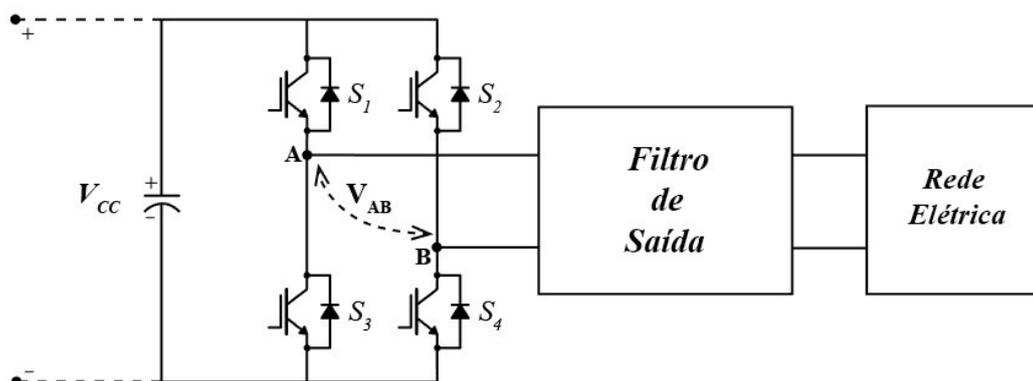
Sendo $n = N_1/N_2$, onde N_1 é o número de espiras do enrolamento primário e N_2 o número de espiras do enrolamento secundário.

3.1.3 Conversor CC/CA de Tensão (Inversor)

O conversor CC/CA de tensão, também conhecido como inversor de tensão, fornece em sua saída uma corrente senoidal como resposta para uma entrada em corrente contínua, sendo possível o controle da frequência e dos níveis de amplitude dessa saída.

O sistema de geração proposto para a análise das estruturas tem como característica ser monofásico, por este motivo o inversor utilizado na plataforma de simulação e na bancada experimental foi um inversor monofásico em ponte completa, o qual consiste em dois braços inversores compostos por um par de chaves comandadas para cada braço, como exposto na Figura 9.

Figura 9 - Representação de um inversor monofásico em ponte completa



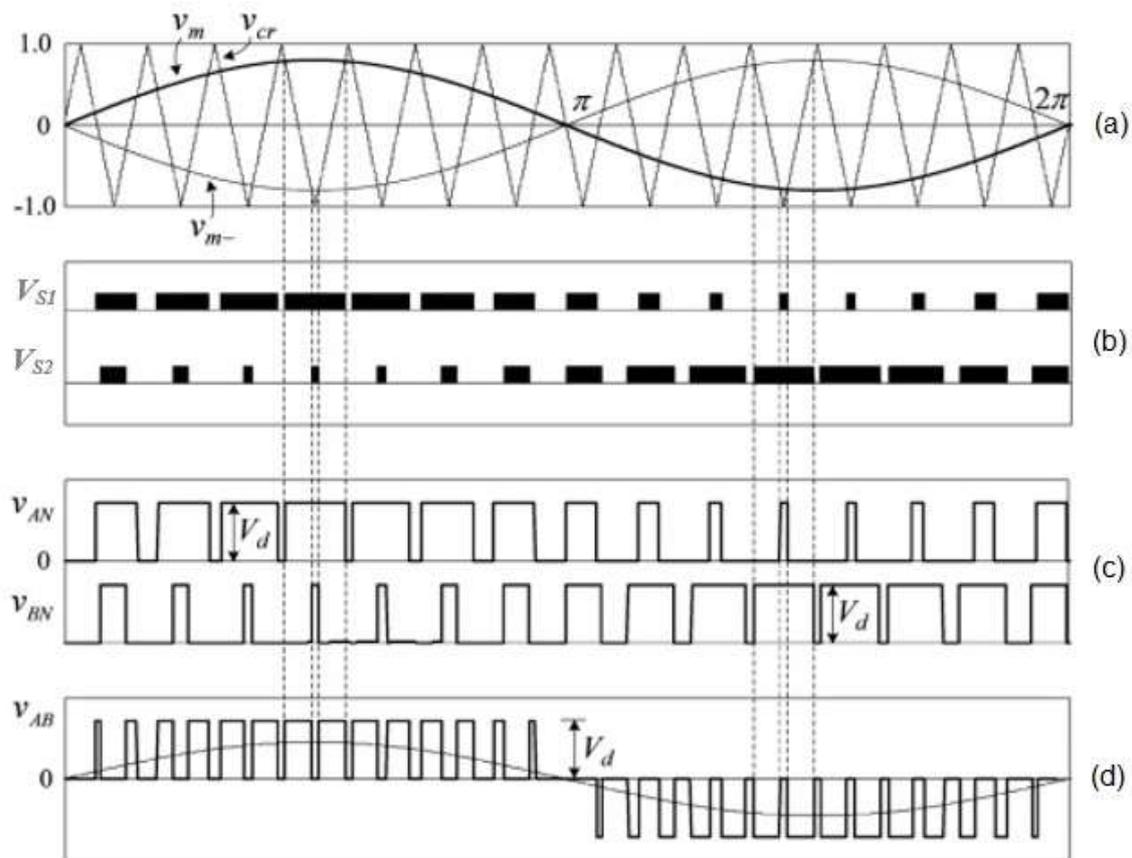
Fonte: Autora

A frequência e amplitude da tensão na saída do inversor é definida de acordo com o chaveamento em cada braço, sendo sua dinâmica determinada por um sinal de controle. O método usado para a obtenção desse sinal de controle foi a modulação por largura de pulso (PWM) unipolar. Na modulação unipolar, a geração dos sinais de comando das chaves S_1 e S_2 é feita pela comparação de dois sinais senoidais de referência, os quais normalmente são duas ondas moduladoras sinusoidais V_m e V_m^- que são da mesma magnitude e frequência, mas 180° fora de fase, com uma onda portadora triangular V_{cr} (NAMBOODIRI; WANI, 2014), como pode ser observado nas Figuras 10(a) e 10(b).

As chaves alocadas em um mesmo braço são fechadas de uma forma complementar e o controle dessas chaves determinam a forma e amplitude da tensão na saída do inversor (V_{AB}). Deste modo a forma de onda na saída do inversor, resultante da diferença entre os dois braços, é uma onda quadrada com amplitude igual ao valor da tensão contínua em sua entrada e a frequência definida pela frequência do sinal de referência.

Como é possível observar na Figura 10(d), a tensão V_{AB} na saída do conversor embora seja alternada, ainda não possui característica senoidal. Isso ocorre devido à presença de componentes harmônicos que causam deformação na forma de onda e que podem ocasionar uma série de efeitos indesejados, tais como: vibrações, ruídos, sobreaquecimento de componentes eletrônicos, erros de medição, entre outros.

Figura 10 - Geração do sinal PWM para modulação unipolar

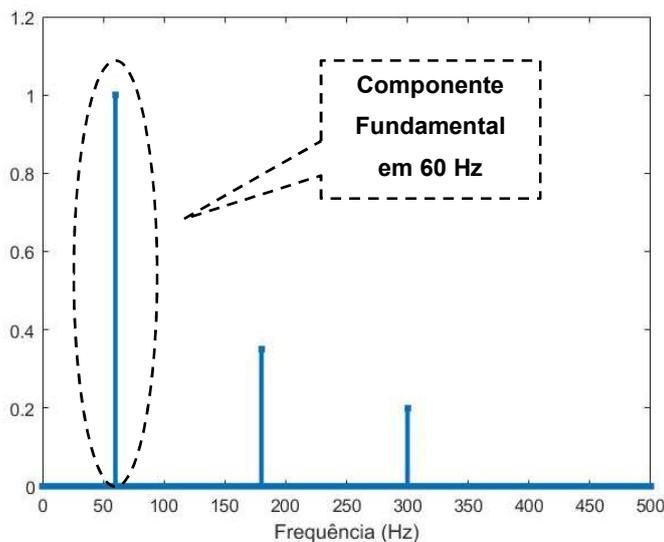


Fonte: (NAMBOODIRI; WANI, 2014)

Para uma melhor compreensão do que significa afirmar que a saída V_{AB} possui componentes harmônicas, é possível partir do conceito difundido pelo teorema de Fourier, que define que qualquer forma de onda periódica pode ser representada por um somatório de várias senóides ou cossenóides, com uma componente CC (SCHNEIDER ELECTRIC, 2013). Ou seja, a saída do conversor pode ser representada pela soma de componentes senoidais em diversas frequências diferentes.

No entanto, para que essa corrente possa ser injetada na rede, apenas a componente fundamental deve ser mantida, sendo necessária a atenuação das componentes harmônicas para garantir uma energia de qualidade. Se a corrente de saída do inversor for observada no domínio da frequência, como exposto na Figura 11, as componentes que se encontram em uma frequência diferente da fundamental devem ter sua amplitude maximamente reduzida, restando apenas a componente fundamental em 60 Hz.

Figura 11 - FFT da tensão de saída do inversor



Fonte: Autora

Uma forma de medir o nível de distorção é o cálculo da taxa de distorção harmônica (TDH), a qual relaciona a amplitude das componentes harmônicas em relação à componente fundamental. Neste caso, quanto menor o valor da TDH, mais próximo de uma senóide se encontra o sinal de saída do inversor.

3.1.4 Conexão com a Carga / Rede Elétrica

Na fase de conexão com a rede é essencial garantir a qualidade da corrente a ser injetada, evitando assim a geração de distúrbios. Variações provenientes da rede elétrica também podem ocasionar impacto no funcionamento do sistema gerador de energia. Dessa forma é de grande importância a utilização de estruturas adequadas no processo de conexão.

Quando falamos sobre a qualidade da energia gerada por um sistema fotovoltaico e conectado à rede, este padrão de qualidade não é definido aleatoriamente. Existem normas nacionais e internacionais, tais como a NDU-013 (Norma de Distribuição Unificada da Energisa-PB) (ENERGISA, 2015) ou IEEE 519 do *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos), que estabelecem requisitos básicos de qualidade para que essa energia possa ser entregue à rede elétrica.

Neste trabalho esta etapa será discutida detalhadamente, buscando analisar modelos propostos para essas estruturas e avaliando as metodologias utilizadas em seus projetos.

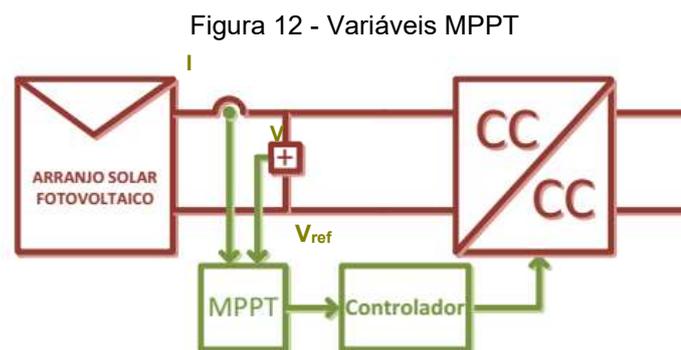
3.2 Técnicas de Controle

Para a obtenção de um melhor desempenho na geração de energia, o sistema fotovoltaico deve conter em seu projeto estratégias de controle que obtenham como resposta do sistema o seu melhor resultado, com base nas diretrizes definidas para o referido projeto.

3.2.1 Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

O *Maximum Power Point Tracking (MPPT)* é um algoritmo de busca do ponto de máxima potência. Na literatura é possível encontrar diversos métodos para implementar as técnicas de MPPT, no entanto neste tópico será abordado apenas o método Perturba e Observa (P&O).

Nesse método a tensão V e a corrente I nos terminais do painel fotovoltaico são medidos, como mostrado na Figura 12, e através desses valores é calculado o valor da potência fornecida.



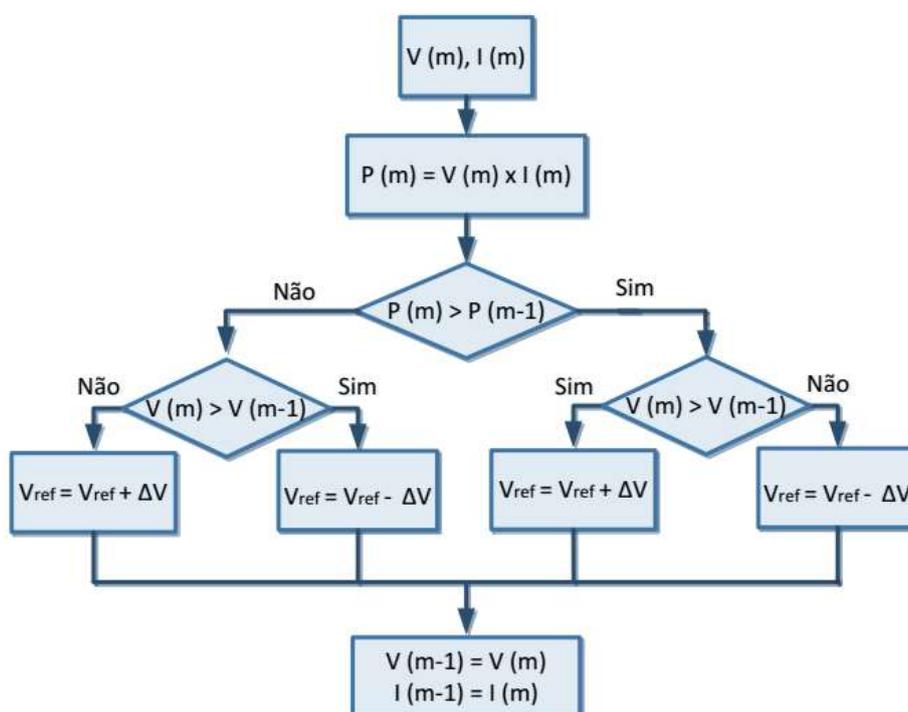
Fonte: (SOBREIRA JR., 2011)

Essa informação serve como entrada para o MPPT que vai gerar um novo sinal de referência (V_{ref}), resultando em um pequeno incremento ou decremento no valor de tensão ou de corrente nos terminais do painel. Caso ocorra o aumento da potência fornecida pelo painel, o algoritmo segue com perturbações no mesmo

sentido, caso contrário a perturbação seguinte irá ocorrer no sentido contrário (SOBREIRA JR., 2011).

O fluxograma da Figura 13 demonstra a dinâmica de funcionamento da técnica P&O, sendo $V(m)$, $I(m)$ e $P(m)$ os valores de tensão, corrente e potência respectivamente para a iteração atual do algoritmo, $V(m-1)$, $I(m-1)$ e $P(m-1)$ os valores da iteração anterior para as mesmas variáveis e ΔV a taxa de incremento ou decremento da tensão. O valor de ΔV utilizado neste trabalho foi de $0,001V$ para uma taxa de amostragem de $100 \times 10^{-6} s$.

Figura 13 - Fluxograma do algoritmo P&O



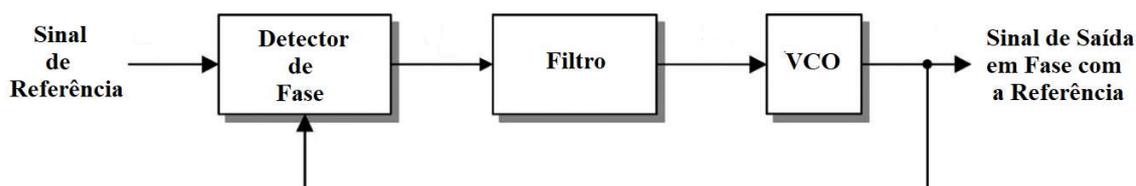
Fonte: (SOBREIRA JR., 2011)

3.2.2 PLL

O PLL (*Phase-Locked Loop*), também conhecido com Malha de Captura de Fase, é um sistema de controle que gera um sinal de saída em fase com o sinal em sua entrada.

Existem diversos tipos de PLL, no entanto todos os algoritmos PLL derivam de uma estrutura padrão (SANTOS et al., 2008). Essa estrutura é formada por um detector de fase, um filtro e um oscilador controlado a tensão, como mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Estrutura clássica do PLL



Fonte: (SANTOS et al., 2008)

3.3 Estruturas de Filtragem de Harmônicos

As estruturas de circuitos capazes de atenuar as componentes harmônicas indesejadas, as quais são responsáveis pela distorção da corrente e/ou tensão na saída dos inversores, podem ser classificadas em filtros passivos ou filtros ativos.

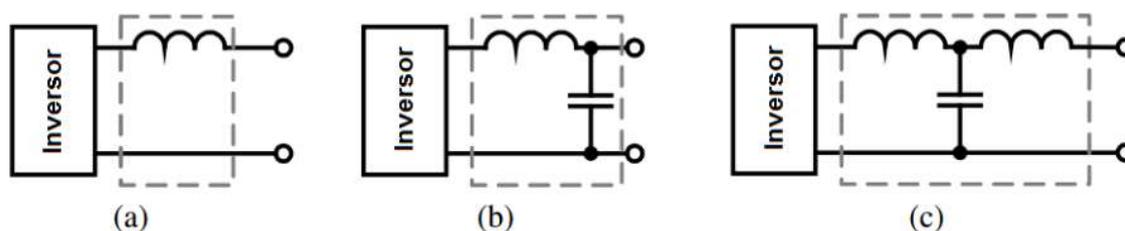
Os filtros passivos são circuitos elétricos que, através da associação de componentes passivos (resistor, capacitor e indutor), possibilitam a filtragem em frequência das componentes de corrente e/ou tensão, restringindo a faixa de passagem de acordo com a relação entre os componentes e sua organização estrutural. No que se refere à banda de passagem, os filtros podem ser classificados em: passa baixas, passa-altas, passa-faixa ou rejeita-faixa, sendo uma característica do filtro passivo a baixa flexibilidade com relação à variação dessas bandas de passagem.

Nos filtros ativos, além dos componentes passivos citados no parágrafo anterior, as estruturas são formadas também por componentes ativos amplificadores, tais como o transistor, o amplificador operacional ou outro elemento ativo. Para os filtros ativos, a sintonia na faixa de frequência desejada é mais flexível, no entanto seu custo de implementação é mais elevado que o do filtro passivo (KJAER; PEDERSEN; BLAABJERG, 2005).

Em alguns casos, a estrutura de filtragem é composta pela combinação dos dois tipos de filtros, formando um filtro híbrido.

Neste estudo serão utilizados filtros passa-baixas nas topologias apresentadas na Figura 15.

Figura 15 - Topologia de filtros passivos: (A) filtro L, (B) filtro LC e (C) filtro LCL



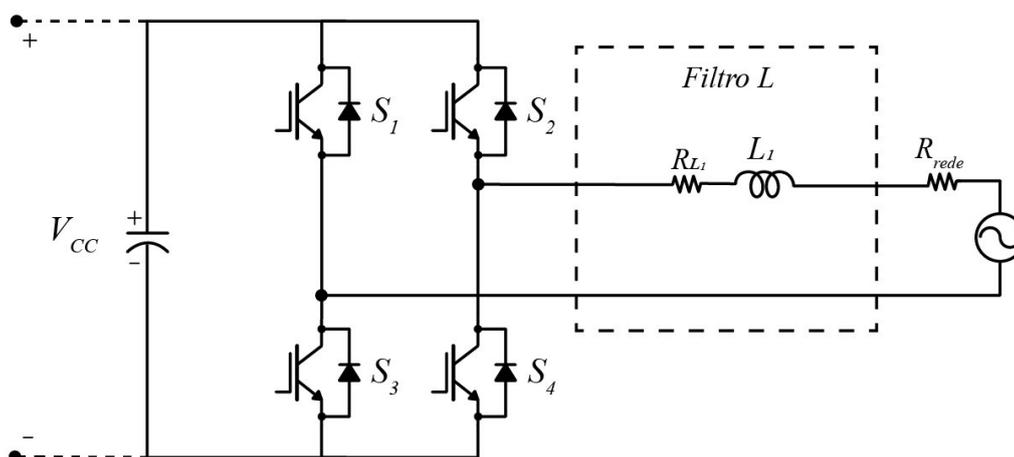
Fonte: (AGUIAR, 2014)

3.3.1 Filtro L

O filtro L é um filtro de primeira ordem, sendo sua topologia a de maior simplicidade entre as utilizadas para conexão de um sistema fotovoltaico de geração de energia com a rede elétrica. São tradicionalmente utilizados nas aplicações de conversores operando numa faixa de poucas dezenas de kW (ARAÚJO, 2012), não sendo recomendados para altas potências devido ao aumento do valor da indutância e conseqüentemente de seu volume.

Sua estrutura consiste na instalação de um indutor em série com a fase, como apresentado na Figura 16, estando o valor dessa indutância diretamente relacionado com a ondulação da corrente de saída do inversor.

Figura 16 - Filtro L



Fonte: adaptado de (AGUIAR, 2014)

Essa ondulação deve ser determinada no projeto do filtro, de acordo com a TDH definida para a corrente de saída. Para a aplicação definida neste projeto, no qual o filtro é utilizado como elemento conector entre um inversor monofásico e a rede de energia elétrica, a definição desse parâmetro é determinada por

norma, tal como a NDU-013, e deverá ter como referência os limites estipulados para as componentes harmônicas de corrente injetadas no sistema elétrico.

Com relação à atenuação dos harmônicos de tensão, o filtro L é menos eficiente que os demais filtros, isto ocorre devido a sua contribuição para a redução das componentes harmônicas se restringir à queda de tensão que ocorre na indutância para cada frequência. Desta forma, com relação à redução da taxa de distorção harmônica de tensão (TDHv), o filtro com maior valor de indutância apresenta um melhor desempenho, visto que sua reatância alcança um maior valor para cada frequência, ocasionando uma maior queda na amplitude das componentes harmônicas.

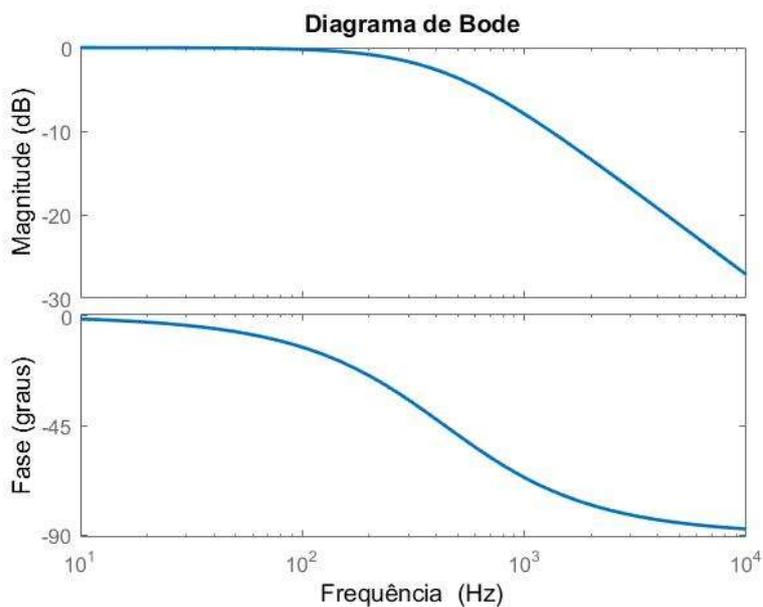
Outro fator relevante a ser considerado durante a definição do componente indutivo é o seu valor de reatância na frequência fundamental, sendo essa frequência definida de acordo com cada aplicação. Uma reatância alta na frequência de interesse ocasiona uma alta queda de tensão no indutor, gerando perda de potência. Samuel, Neves e Cabral (2006) recomendam que seja tolerada uma queda máxima de 10% do valor de tensão da fundamental para manter uma boa relação entre dinâmica, volume, custo e perdas no indutor.

Analisando o circuito da Figura 16, é possível obter-se a equação da dinâmica do filtro, a qual aplicando-se a transformada de Laplace, resulta na função de transferência em malha aberta (FTMA) para o Filtro L (AGUIAR, 2014).

$$H_L(s) = \frac{1}{L_i s + R_{L_i} + R + R_{rede}} \quad (7)$$

Com a FTMA da Equação 7, após definidos os valores dos componentes do filtro, o diagrama de Bode demonstra o comportamento do circuito com relação à frequência, como visto na Figura 17.

Figura 17 - Diagrama de Bode genérico filtro L



Fonte: Autora

A atenuação do filtro L é de aproximadamente 20 dB/década, na região de altas frequências, não apresentando atenuação relevante nas baixas frequências, o que dificulta seu uso em aplicações de potência elevada, nas quais as frequências de chaveamento tendem a ser menores (SAMUEL; NEVES; CABRAL, 2006).

Por possuir uma atenuação em altas frequências menor do que em outras topologias, a correta definição da frequência de corte é fundamental para garantir que a faixa de maior atenuação esteja na faixa de frequência das componentes harmônicas, no entanto, embora essa recomendação seja relevante, alguns fatores que definem seu valor dependem de parâmetros que são prioritariamente definidos pelo sistema de geração de energia, tais como potência gerada e frequência de chaveamento. Portanto, em muitos casos não é possível definir um valor de indutância para o filtro que resultará em uma frequência de corte dentro do intervalo desejado.

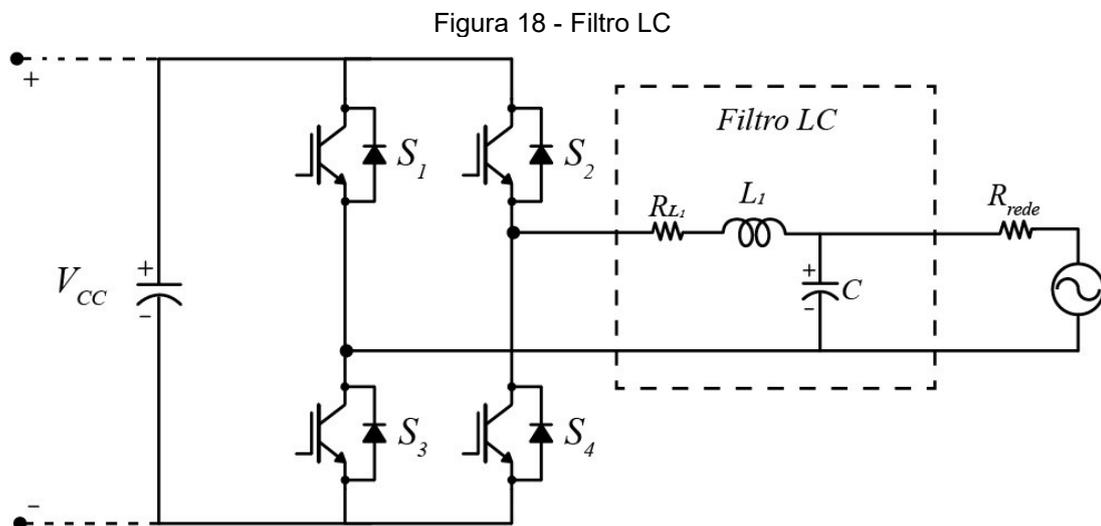
Para contornar esse problema, a solução proposta no método é o uso de uma resistência *shunt* para um maior controle sobre o valor da frequência de corte, utilizando para isto a relação entre resistor, indutor e frequência de corte observada na Equação 8.

$$f_c = \frac{R}{2\pi L} \quad (8)$$

3.3.2 Filtro LC

A topologia LC, apresentada na Figura 18, consiste na inclusão de um capacitor em paralelo com a saída do inversor, com o objetivo de criar um caminho de baixa impedância para as componentes de alta frequência que se encontram próximas aos múltiplos da frequência de chaveamento.

A inserção dessa capacitância resulta na redução de algumas limitações apresentadas pelo filtro L, mostrando uma melhor atuação na redução das harmônicas de tensão e o aumento da atenuação das componentes harmônicas em alta frequência. No entanto, com relação ao filtro puramente indutivo, a topologia LC, assim como as demais que como ela possuem característica ressonante, possuem como desvantagem a presença de pico de ressonância que podem ocasionar problemas na conexão com a rede elétrica.

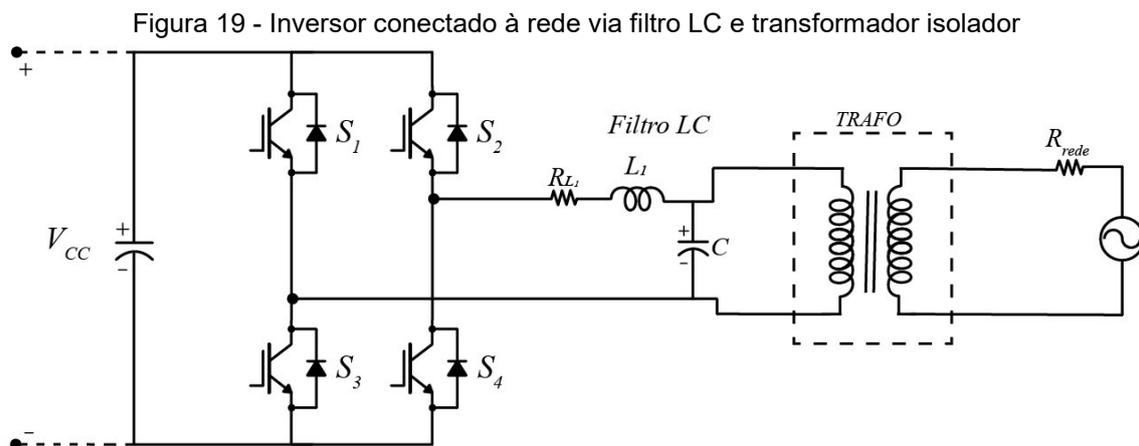


Fonte: Adaptado de (AGUIAR, 2014)

Para o filtro LC especificamente, ocorre um agravamento desses problemas, com relação aos filtros de topologia L e LCL, pois a conexão direta do capacitor em paralelo com a rede elétrica pode ocasionar altas correntes de carga na conexão com a rede, resultando em transitórios significativos de conexão, além de dificultar o uso de métodos para atenuação do pico de ressonância, devido à

frequência de ressonância do filtro ser muito suscetível à impedância no ponto de conexão (AGUIAR, 2014) (ARAÚJO, 2012) (BARBOSA, 2014) (MACHADO, 2016).

Considerando que o capacitor de saída do filtro LC, conectado à rede elétrica configura um circuito de ressonância juntamente com a reatância da rede (ENSLIN; HESKES, 2014) e que a impedância da rede sofre influência das demais cargas conectadas ao PAC, a frequência de ressonância do filtro LC pode sofrer influência dessa variação na impedância da rede, ocasionando uma indefinição em seu valor. Para Prodanovic e Green (2003) e para Carvalheiro e Castro (2005) a utilização do filtro LC para conexão com a rede elétrica deve ser considerada para os casos em que a conexão é realizada através de um transformador, visto que a impedância do transformador, por possuir valor superior à da rede, reduz a influência da reatância da rede. A instalação de um transformador isolador entre o filtro LC e o PAC é mostrada na Figura 19.

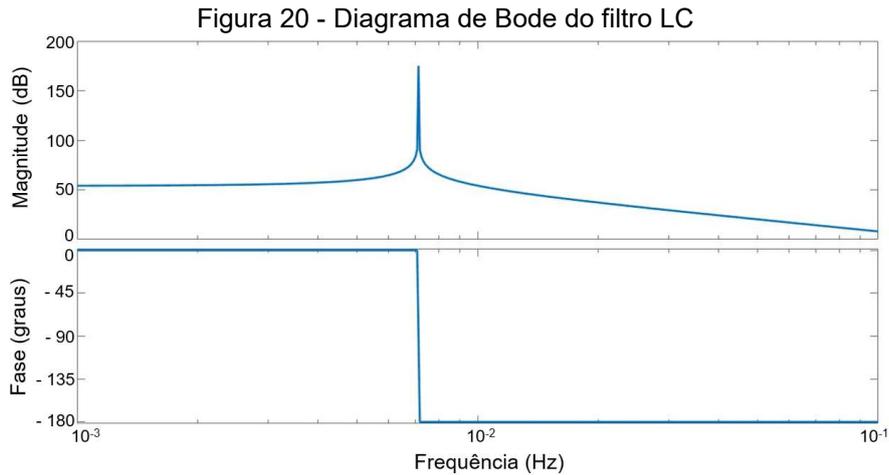


Fonte: Adaptado de (PRODANOVIC; GREEN, 2003)

A função de transferência para o filtro LC apresentado na Figura 19 é mostrada na Equação 9 (AGUIAR, 2014).

$$H_{LC}(s) = \frac{1}{L_i s + R_{L_i} + \frac{R_{rede} L_i}{C} + \frac{R_{rede} R_{L_i}}{C s} + \frac{R_{rede}}{C s}} \quad (9)$$

Sendo sua dinâmica de atenuação representada na Figura 20.

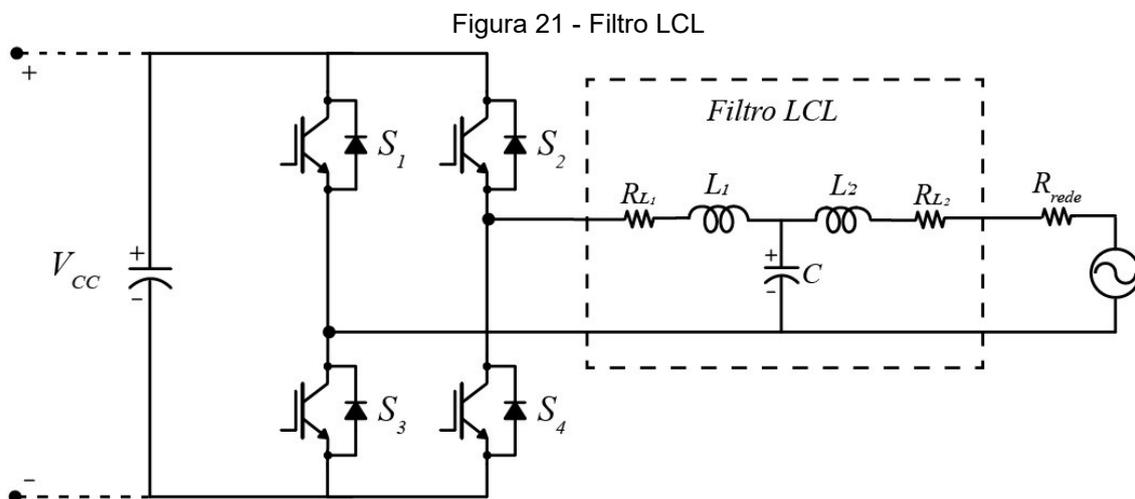


Fonte: Autora

3.3.3 Filtro LCL

O filtro LCL é um filtro de 3ª ordem e, embora seja a estrutura mais complexa das três convencionais apresentadas, é amplamente utilizado na conexão de conversores estáticos com a rede elétrica (VIEIRA et al., 2014).

A Figura 21 mostra a estrutura do filtro de topologia LCL conectado à saída de um inversor monofásico.



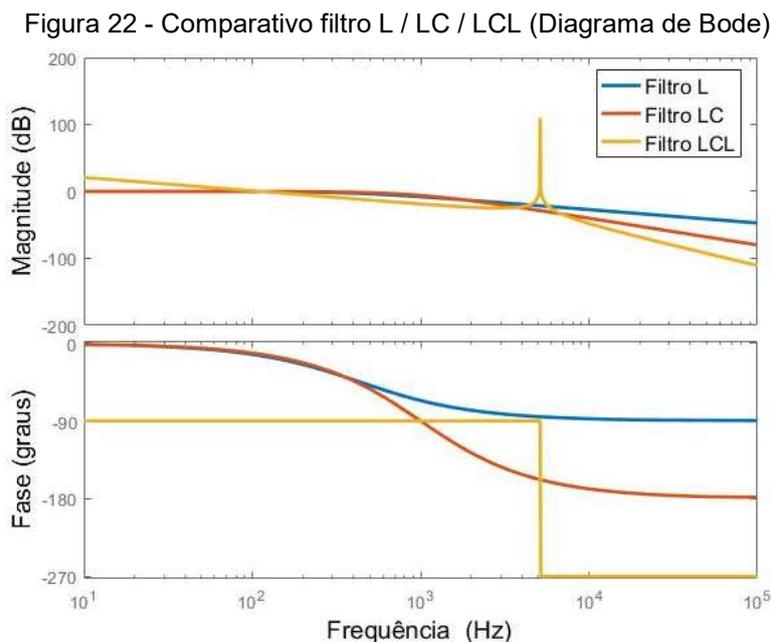
Fonte: Adaptado de (AGUIAR, 2014)

Na topologia LCL, além da presença do indutor e capacitor característicos do filtro LC, é incluída uma segunda indutância entre o filtro LC e a rede. A presença dessa segunda indutância reduz os transitórios de conexão citados anteriormente como uma deficiência do filtro LC, além de reduzir

significativamente a influência da impedância da rede na frequência de ressonância do filtro.

Quando comparado às demais topologias descritas anteriormente, o filtro LCL apresenta vantagens em sua utilização, principalmente quando se trabalha em aplicações de alta potência, pois serão necessários indutores menos volumosos e de menor custo para a obtenção de uma resposta similar ou superior às obtidas com o filtro L ou filtro LC.

Através do diagrama de Bode apresentado na Figura 22, é possível observar o comportamento dos filtros L, LC e LCL com relação à atenuação ocasionada por cada filtro para as altas frequências, sendo possível comparar o desempenho de cada topologia, no que se refere à redução das componentes harmônicas produzidas próximas à frequência de chaveamento.



Fonte: Autora

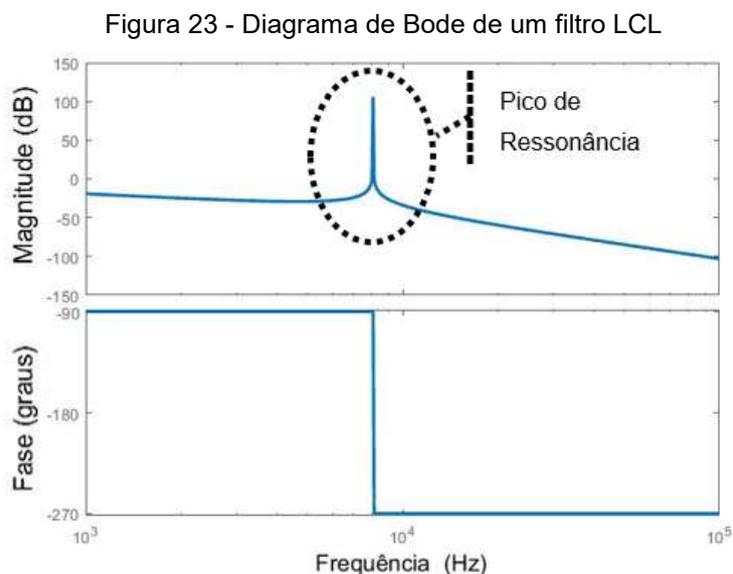
Para a topologia LCL a função de transferência em malha aberta está apresentada na Equação 10 (AGUIAR,2014).

$$H_{LCL}(s) = \frac{1}{s(sL_g + R_{rede}) sL_i C + sL_i + sL_g + R_{rede}} \quad (10)$$

3.3.4 Atenuação dos Picos de Ressonância

Como foi explicado nos tópicos anteriores, durante a descrição das propriedades dos filtros LC e LCL, uma característica comum às duas topologias e às demais que possuem em sua formação componentes indutivos e capacitivos, é a presença de um pico de ressonância em frequências próximas à frequência de corte do filtro. A existência desse pico, mostrada na Figura 23 pode gerar problemas relativos ao controle do sistema, ocasionando um mau funcionamento.

Embora, durante o projeto dos filtros, sejam tomadas precauções para que o pico de ressonância seja definido em uma faixa de frequência na qual sua influência sobre as componentes harmônicas seja reduzida, é recomendado o uso de alguma estratégia para a redução do ganho nessa faixa de frequência. Esta recomendação se deve ao alto valor do ganho no pico de ressonância, podendo gerar componentes de magnitude significativa, para os casos em que haja a presença de componentes nessa faixa de frequência.



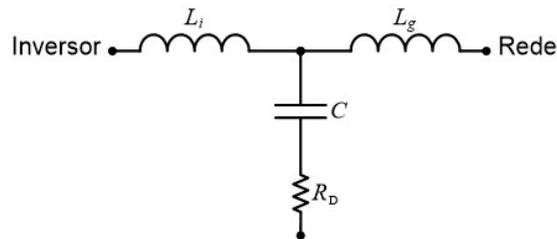
Fonte: Autora

Técnicas de amortecimento do pico de ressonância podem ser encontradas na literatura abordadas de diversas formas, tais como em: Freitas (2013), Gabe (2008), Kouro et al. (2015), Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005), Melo (2008) e Nardi et al (2015). Para a aplicação no projeto dos filtros LC e LCL, foi utilizada uma técnica apresentada em Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005), a qual recomenda que seja conectada em série com o capacitor uma resistência no valor

de um terço da reatância do capacitor para a frequência de ressonância, como mostrado na Equação 11 e na Figura 24.

$$R_D = \frac{1}{3} X_{C_{ress}} = \frac{1}{3} \frac{1}{2\pi f_{ress} C} \quad (11)$$

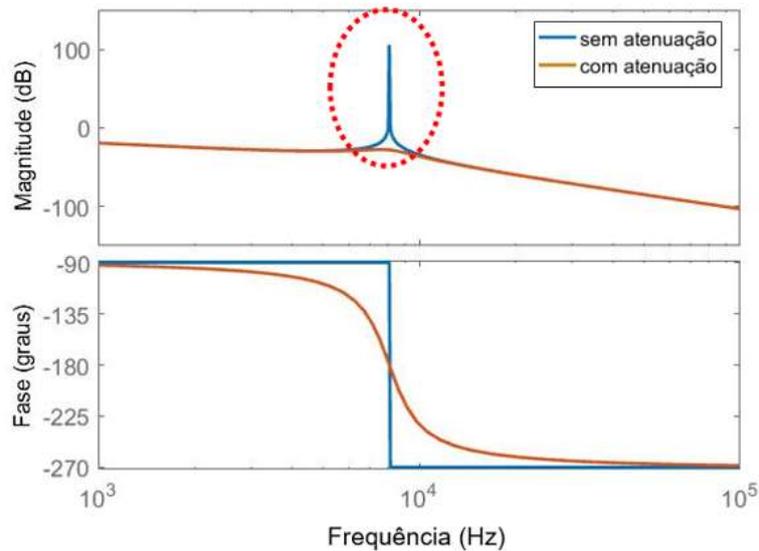
Figura 24 - Estrutura do filtro LCL com resistor de amortecimento



Fonte: Autora

Com a inclusão dessa resistência na função de transferência do ganho, há uma redução no valor do ganho no pico de ressonância, que pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 - Diagrama de Bode de um filtro LCL com atenuação do pico de ressonância



Fonte: Autora

MATERIAL E MÉTODO

4 MATERIAL E MÉTODO

A comparação entre o desempenho das estruturas foi realizada para dois filtros da topologia L, um da topologia LC e três da topologia LCL, sendo utilizados métodos de projeto distintos para cada formação.

Para cada filtro, foi analisado o desempenho com relação à eliminação ou atenuação das componentes harmônicas relativas ao chaveamento do inversor de tensão. Foi abordada também a atuação dos filtros na eliminação de harmônicas de corrente e de tensão providas da rede elétrica.

O projeto foi dividido em duas etapas, tendo em um primeiro momento como foco a análise dos sinais filtrados, usando como ferramenta uma plataforma de simulação desenvolvida em ambiente *Matlab/Simulink*®, com o objetivo de selecionar as topologias que apresentaram o melhor desempenho na atenuação das harmônicas de alta frequência, assim como na eliminação da interferência de harmônicas da rede elétrica na corrente injetada. Na segunda etapa do projeto, as estruturas selecionadas segundo a melhor relação custo/desempenho, foram montadas em laboratório para a realização dos procedimentos experimentais, buscando validar os dados de simulação. Paralelo a esse processo, foi desenvolvida uma estratégia de controle com o objetivo de atender demandas propícias ao melhor funcionamento da estrutura e otimizar o desempenho do sistema de geração na injeção da potência na rede.

Após a definição dos valores dos componentes e da formatação da estrutura para cada filtro, o passo seguinte foi a obtenção de resultados através do processo de simulação.

4.1 Plataforma de Simulação

Para a realização das simulações foi utilizada uma plataforma computacional, a qual foi adaptada para representar o sistema fotovoltaico de geração de energia que foi desenvolvido na bancada do Laboratório de Otimização de Sistemas Elétricos (LOSE) do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, visando projetos de pesquisa relativas ao assunto.

A plataforma de simulação foi desenvolvida em ambiente *Matlab/Simulink*® e representa o funcionamento de um sistema de geração de 1 kVA de potência, cujo modelo pode ser representado pela Figura 5, descrita no tópico 3.1.

Painel Fotovoltaico

Para representar a geração da energia fotovoltaica foi utilizado um arranjo de quatro painéis fotovoltaicos, sendo dois em série, formando um ramo e dois ramos em paralelo. O módulo utilizado foi o Kyocera Solar KD325GX-LPB, cujas características se encontram na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros do painel fotovoltaico

Parâmetros Elétricos	Painel Solar	Arranjo Fotovoltaico
Tensão de Máxima Potência (V_{mp})	40,3 V	80,6 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp})	8,07 A	16,14 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	49,7 V	99,4 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	8,69 A	17,38 A

Fonte: Autora

Conversor CC/CC

O conversor CC-CC utilizado foi um push-pull alimentado por corrente, o qual foi desenvolvido seguindo o modelo descrito no tópico 3.1.2 e possui sua estrutura representada pela Figura 8.

Na Tabela 2 estão listados os valores dos componentes utilizados em seu circuito.

Tabela 2 - Componentes do push-pull

Componente	Valor
L_i	150 μ H
R_{Li}	0,001 Ω
C_i	1150 μ F
C_o	2250 μ F

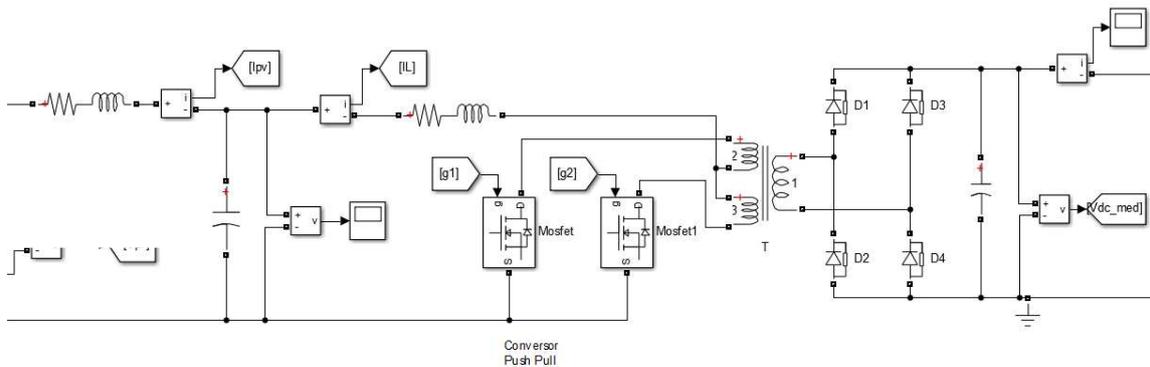
Fonte: Autora

Para o transformador de alta frequência a relação de transformação (n) foi definida como de três vezes a entrada, resultando em ganho representado pela Equação 12.

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{3}{(1 - D)} \quad (12)$$

A representação do conversor em ambiente de simulação pode ser vista na Figura 26, na qual é possível observar o uso de dois Mosfets para a realização do chaveamento. A saída do conversor está conectada ao barramento CC que servirá como entrada para o inversor de tensão.

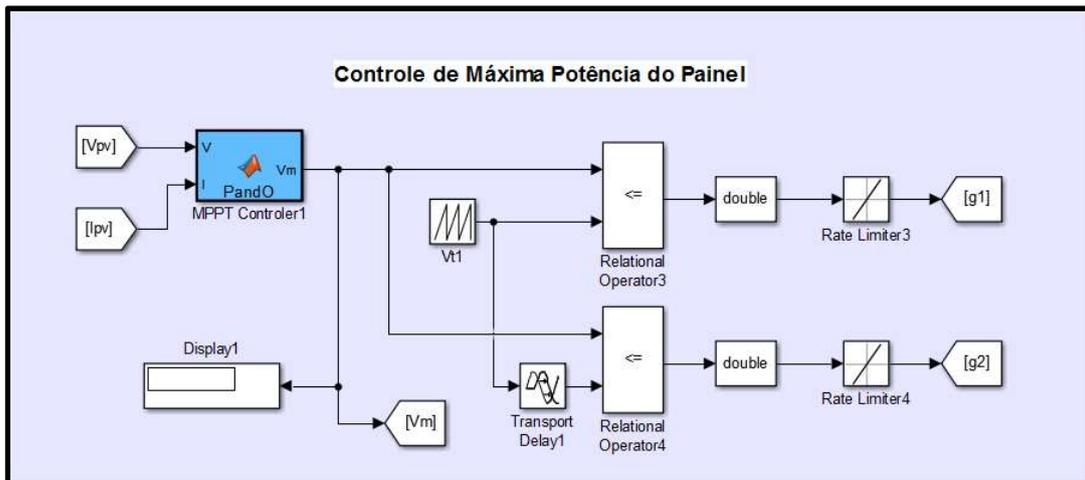
Figura 26 - Push-pull em ambiente de simulação



Fonte: Autora

O controle do chaveamento do push-pull foi realizado utilizando um método de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) conhecido como P&O, no qual a tensão e a corrente nos terminais do painel fotovoltaico são medidos e através desses valores é calculado o valor da potência gerada. Essa informação serve como entrada para o MPPT que vai gerar um sinal V_{ref} e esse sinal é comparado a uma onda triangular para a geração do chaveamento de cada chave. A estrutura do controle pode ser observada na Figura 27.

Figura 27 - Controle de máxima potência do painel em ambiente de simulação

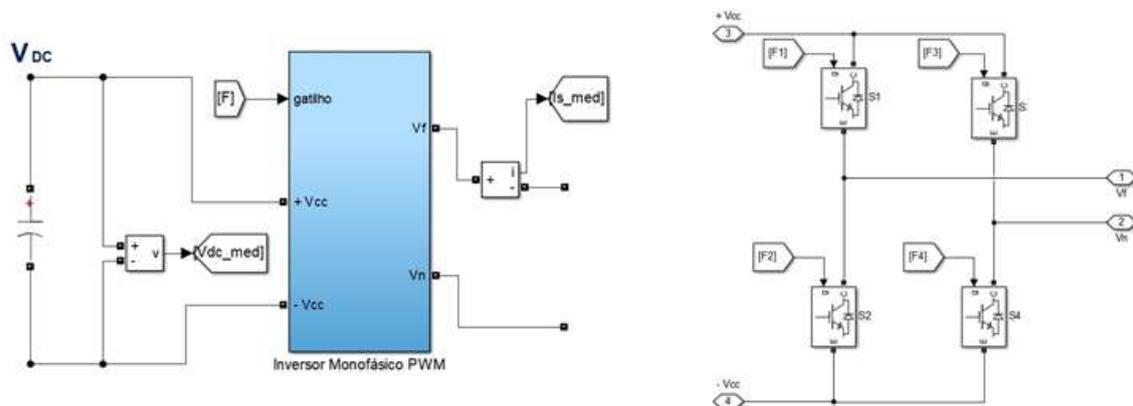


Fonte: Autora

Conversor CC/CA

O conversor CC/CA utilizado na simulação foi um inversor monofásico de dois braços, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Inversor monofásico em ponte completa – simulação

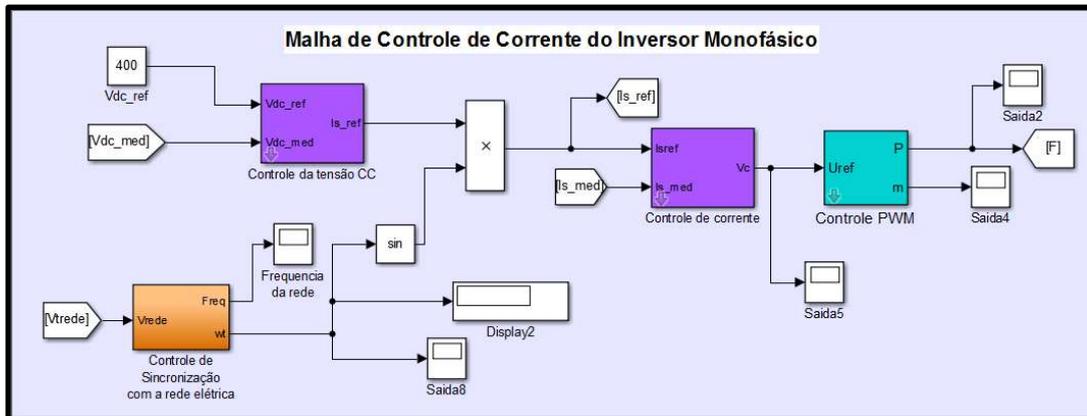


Fonte: Autora

O controle do inversor foi baseado em um controle apresentado em Freitas (2013). A estrutura do controle é formada por uma malha de corrente, a qual fornece o sinal de referência responsável pela geração do sinal PWM que controla o chaveamento do inversor. Através do chaveamento resultante do sinal PWM o inversor busca manter o sinal de corrente em sua saída similar à referência fornecida pela malha de controle da tensão do barramento CC.

A Figura 29 apresenta as malhas de controle do inversor monofásico, as quais serão explicadas mais detalhadamente no tópico 4.1.1.

Figura 29 - Malha de controle de tensão e de corrente do inversor

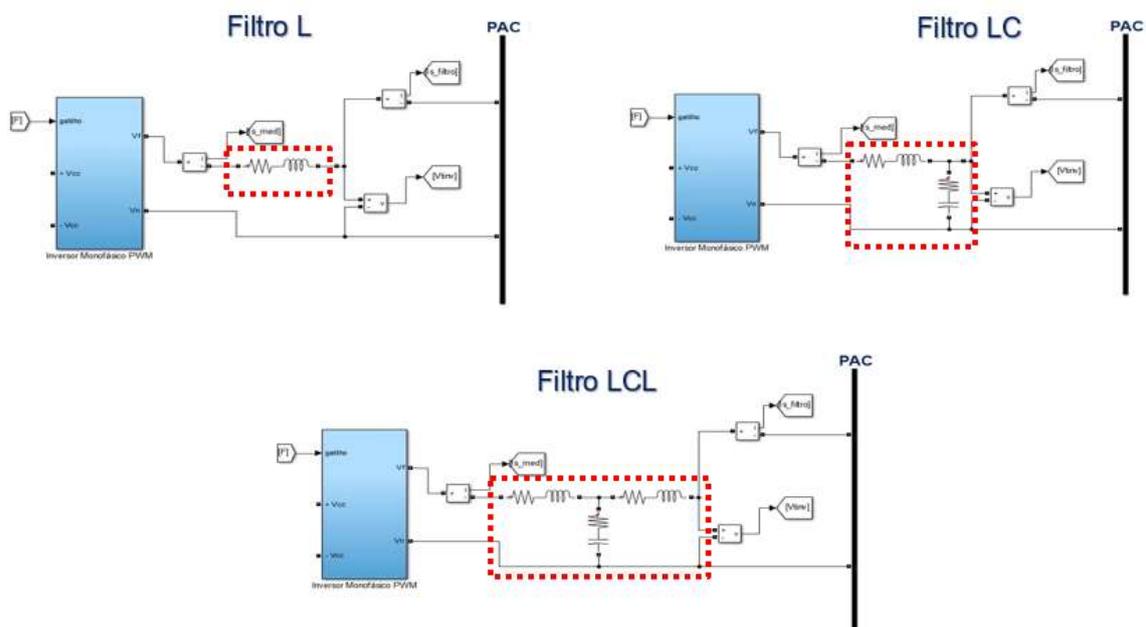


Fonte: Autora

Estruturas de Conexão com a Rede Elétrica

As estruturas de conexão com a rede elétrica tiveram suas representações de acordo com a Figura 30. Para os indutores foram acrescentadas resistências em série no valor de $0,01 \Omega$ com o objetivo de melhor representar sua estrutura física. A resistência em série com o capacitor, nas topologias LC e LCL, representa o resistor calculado para a atenuação do pico de ressonância para essas duas estruturas.

Figura 30 - Filtros passivos nas topologias L, LC e LCL



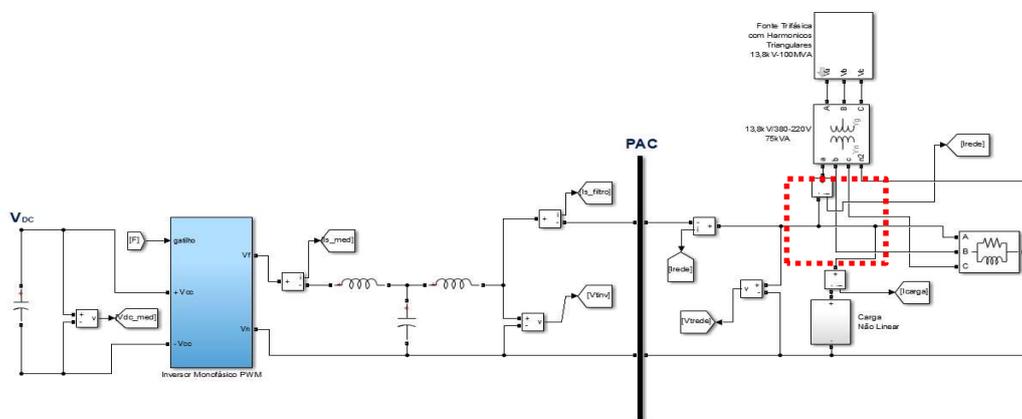
Fonte: Autora

Rede Elétrica

Para a representação da rede elétrica, foram construídos dois cenários, visando avaliar a atuação das estruturas analisadas com relação às harmônicas de corrente e de tensão providas da rede de forma individual.

No primeiro cenário, apresentado na Figura 31, foi incluído um bloco com a presença de cargas não-lineares, conectado à rede elétrica, gerando harmônicas em sua corrente. A inclusão do bloco ocorre no tempo de 1 segundo da simulação.

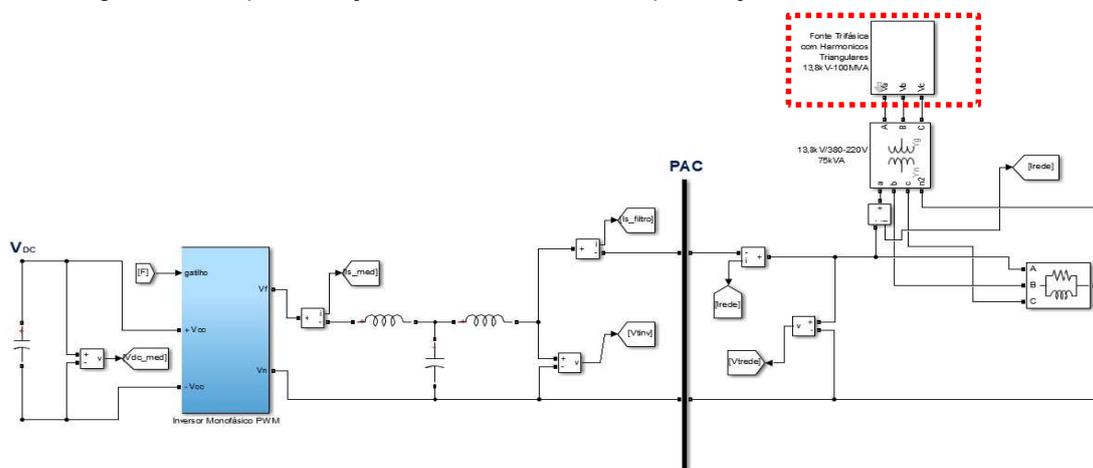
Figura 31 - Representação da rede elétrica com presença de harmônicas de corrente



Fonte: Autora

No segundo cenário, não há a presença de cargas não-lineares, no entanto a fonte trifásica destacada na Figura 32 foi configurada para incluir harmônicas de tensão.

Figura 32 - Representação da rede elétrica com presença de harmônicas de tensão



Fonte: Autora

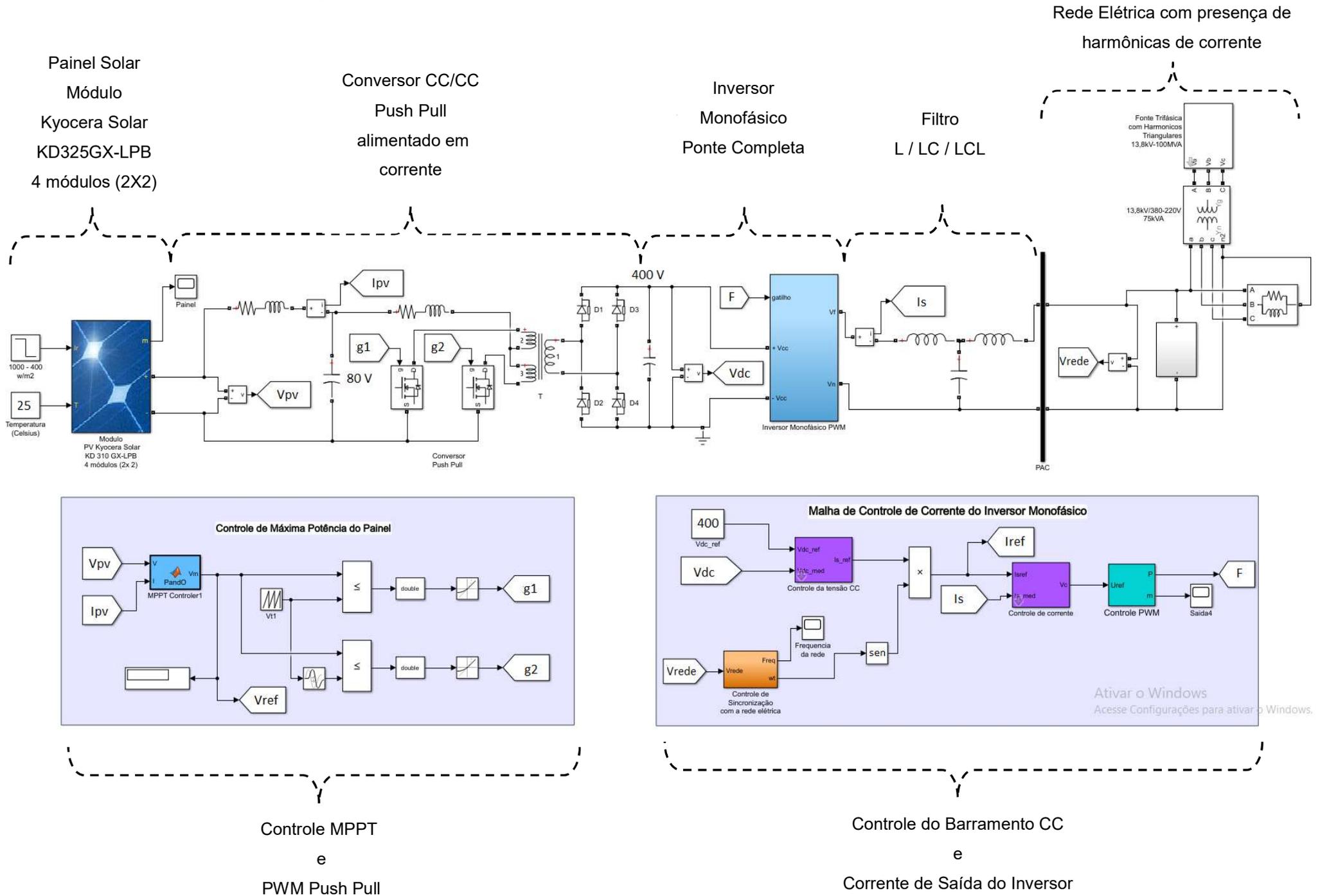
Para uma melhor visão da representação do sistema como um todo, com a interligação de todas as etapas, a Figura 33 apresenta a estrutura completa da plataforma utilizada nas simulações, a qual tem seus principais parâmetros definidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros do sistema fotovoltaico da plataforma de simulação

Tensão eficaz no PAC (V_{PAC})	220 V
Tensão no barramento CC (V_{CC})	400 V
Frequência de chaveamento do push-pull (f_{ch})	80 kHz
Frequência de chaveamento do inversor (f_s)	10 kHz
Potência injetada na rede (S)	1 kVA
Frequência da rede (f_r)	60 Hz

Fonte: Autora

Figura 33 - Plataforma de simulação de sistema fotovoltaico em ambiente *Simulink*

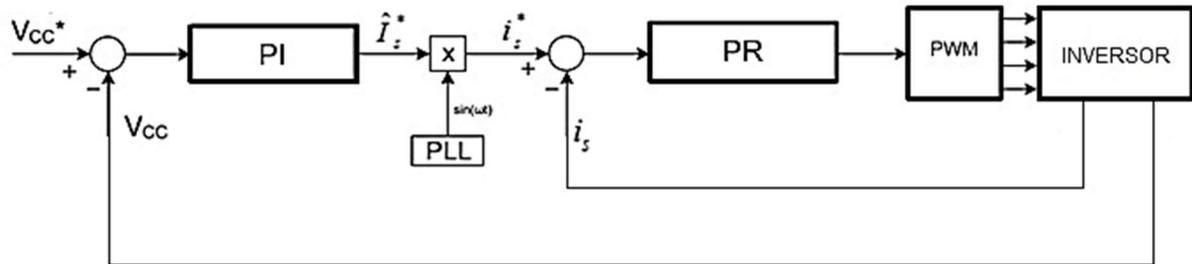


Fonte: Autora

4.1.1 Técnica de Controle

Para o controle do inversor foi utilizado um controlador proporcional-integral (PI) e um controlador proporcional ressonante (PR), como mostrado na Figura 34.

Figura 34 - Diagrama de controle



Fonte: Adaptado de (FREITAS, 2013)

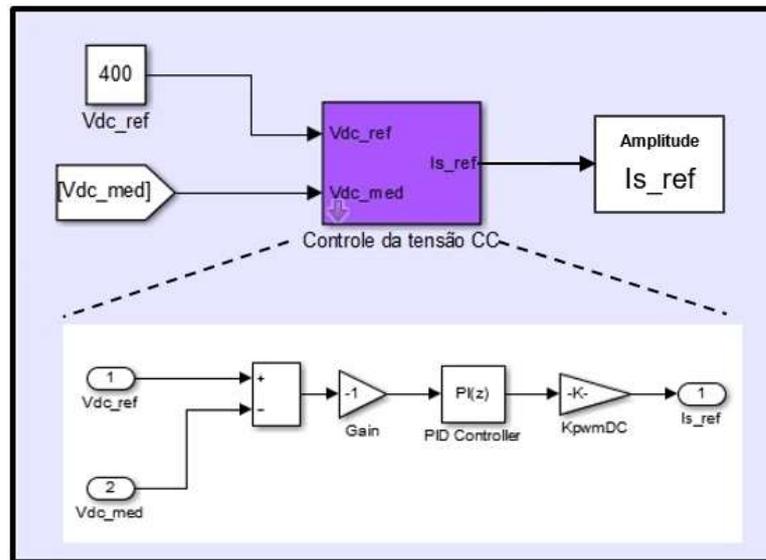
A malha de tensão é a malha mais externa, sua função está relacionada com o controle da tensão no barramento CC do inversor. Para isso ela fornece um valor de amplitude para o sinal de referência da corrente, o qual será multiplicado pelo sinal senoidal fornecido pelo PLL, gerando um sinal de referência que deverá ser seguido pela malha de corrente.

Na malha de tensão foi utilizado um controlador PI que possui como entrada a diferença entre a tensão de referência (400 V) e a tensão medida no barramento CC do inversor. Na Figura 35 o bloco do controle de tensão CC é mostrado de forma mais detalhada, sendo sua estrutura constituída por um controlador PI que possui em sua saída um fator relativo ao ganho do inversor. Esse ganho representa a relação entre o valor eficaz do sinal de saída do inversor (V_{PAC}) e a tensão do barramento CC (V_{CC}), ou seja:

$$K_{pwmDC} = \frac{V_{PAC}}{\sqrt{2}V_{CC}} = \frac{220}{400\sqrt{2}} \quad (13)$$

O valor fornecido na saída do controlador PI será um valor proporcional ao valor médio da corrente do barramento CC. No entanto, para obter o sinal de corrente desejado na saída do inversor, gerando uma referência senoidal, esse valor de amplitude é vinculado a uma senóide de amplitude unitária e em fase com a tensão da rede (FREITAS, 2013).

Figura 35 - Controlador de tensão



Fonte: Autora

Para o cálculo dos ganhos K_p e K_i do controlador PI de tensão, foi seguido o procedimento de cálculo apresentado em Freitas (2013), no qual foi definida inicialmente a constante de tempo integrativa T_2 , para uma frequência de corte de um décimo da frequência de chaveamento do inversor, ou seja, a frequência de corte f_{cc} do controlador de tensão foi de 1000 Hz. Para o cálculo de T_2 foi utilizada a Equação 14:

$$T_2 = \frac{\tan \frac{-2\pi}{3}}{2\pi f_{cc}} = 2,76 \text{ ms} \quad (14)$$

Os ganhos do PI utilizado no modelo de controle de tensão do barramento CC foram obtidos considerando o ganho em malha aberta (H_{MA}) apresentado pelas Equações 15 e 16 (FREITAS; 2013).

$$H_{MA} = \frac{V_{CC}}{V_{CC}^*} = \text{controlador} \times \text{sistema} \quad (15)$$

$$H_{MA} = K_p \left(\frac{1 + sT_2}{sT_2} \right) K_{pwmDC} \left(\frac{1}{sC} \right) \quad (16)$$

Através da manipulação da Equação 16, obtem-se a Equação 17.

$$-\frac{K_p K_{pwmDC}}{\omega^2 T_2 C} + j \frac{K_p K_{pwmDC} s T_2}{-\omega^2 T_2 C} = -\frac{K_{pwmDC}}{\omega^2 T_2 C} - j \frac{K_p K_{pwmDC} s T_2}{\omega^2 T_2 C} \quad (17)$$

Para a qual são consideradas as condições apresentadas na Equação 18.

$$\begin{cases} |H_{MA}|_{s=j\omega} = 1 \\ \angle |H_{MA}|_{s=j} = -180^\circ + \text{Margem de fase} \end{cases} \quad (18)$$

Resultando nas equações 19 e 20, para o cálculo dos ganhos K_p e K_i . Para o cálculo do K_p foi utilizada a Equação 19, na qual C é o capacitor do barramento CC, com o valor de 2,250 μF .

$$K_p = \frac{\omega^2 T_2 C}{K_{pwmDC}(1 + T_2 \omega)} = 2,94 \quad (19)$$

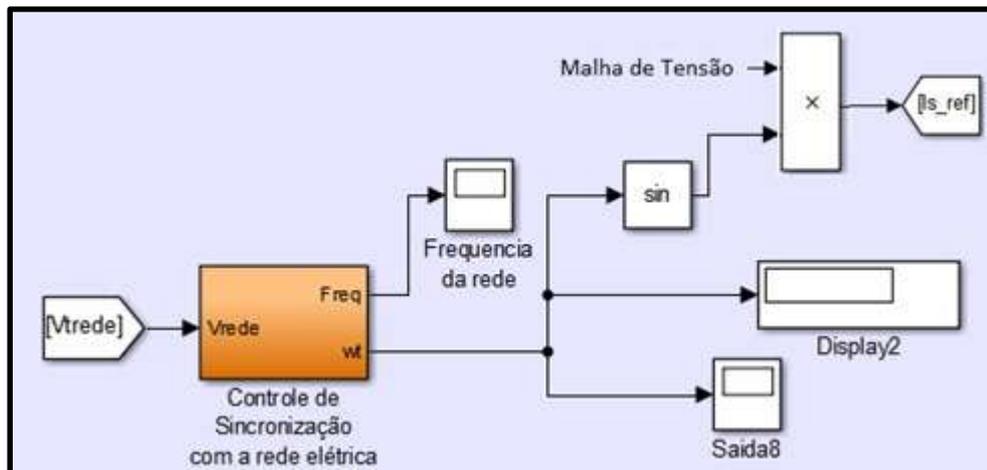
O ganho K_i é obtido através da relação de K_p com a constante de tempo integrativa.

$$K_i = \frac{K_p}{T_2} = 1065,2 \quad (20)$$

Na Figura 36 é mostrado o controle de sincronização com a rede, no qual o PLL identifica a fase do sinal de tensão da rede e gera uma senoide que será multiplicada pela amplitude fornecida pela malha de controle de tensão. Desta forma, o sinal de referência (I_{s_ref}) é gerado buscando garantir o cumprimento da demanda de controle que estabelece que o sinal de corrente na saída do inversor deve estar em fase com a tensão da rede, garantindo um fator de potência próximo da unidade.

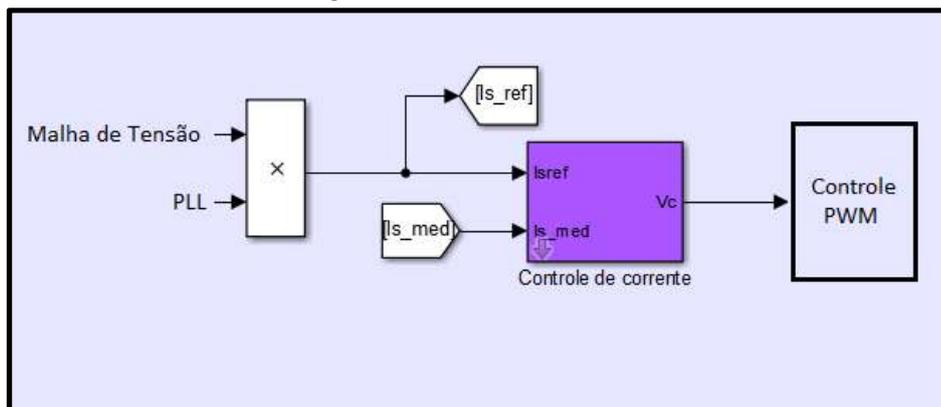
A malha de corrente, mostrada na Figura 37, recebe em sua entrada a corrente medida na saída do inversor e o sinal de referência para a corrente. A diferença entre os dois gera um erro que o controlador tende a converter para zero, ou seja, o controle busca gerar um sinal PWM que tem como resultado uma corrente na saída do inversor similar a corrente de referência.

Figura 36 - Controle de sincronização com a rede



Fonte: Autora

Figura 37 - Malha de corrente



Fonte: Autora

Para obter esse resultado, é recomendada a utilização de um controlador PR na malha de corrente, pois o sinal de referência para o controle é um sinal senoidal, sendo recomendado o uso de um PR. A estrutura do ganho para o modelo ressonante tem em sua formação uma parcela referente ao ganho proporcional e outra ao ganho ressonante.

A parcela ressonante do controlador tem um papel, com relação à referência senoidal, semelhante ao papel do controle integrador para uma referência em degrau, buscando reduzir o erro a zero. No entanto isso só ocorre se a frequência angular do controlador for igual à frequência angular do sinal de referência.

Com base nas relações apresentadas em (ZMOOD, 2003), é possível afirmar que o controlador ressonante pode ser relacionado com o controlador PI de acordo com a Equação 21.

$$G_{ress}(s) = \frac{G_{PI}(s + j\omega_0) + G_{PI}(s - j\omega_0)}{2} \quad (21)$$

Onde ω_0 é a frequência angular de referência para a qual o controlador é calculado.

Para os casos em que a largura de banda do sinal de referência é pequena em comparação com a própria frequência de referência, a Equação 21 pode ser representada da seguinte forma:

$$G_{ress}(s) = G_{PI} \left(\frac{s^2 + \omega_0^2}{2s} \right) \quad (22)$$

Considerando que:

$$G_{PI}(s) = K_p + \left(\frac{K_i}{s} \right) \quad (23)$$

O desenvolvimento da Equação 22 resulta em:

$$G_{ress}(s) = \frac{K_p s^2 + 2K_i s + K_p \omega^2}{s^2 + \omega^2} \quad (24)$$

Ou seja, uma forma de obter os valores para os ganhos do controlador ressonante é fazendo uma relação com os ganhos de um controlador PI, representando a Equação 24 da seguinte forma:

$$G_{ress} = \frac{K_a s^2 + K_b s + K_c}{s^2 + \omega^2} \quad (25)$$

Com base nas equações 24 e 25, já havendo definido o valor de ω , é possível projetar um controlador PI e utilizar as seguintes relações para obter K_a , K_b e K_c .

$$K_a = K_p \quad (26)$$

$$K_b = 2K_i \quad (27)$$

$$K_c = \omega^2 K_p \quad (28)$$

Para o cálculo dos parâmetros de controle, foi definido que a frequência angular do controlador seria calculada para a frequência da rede elétrica, sendo utilizado o valor de 60 Hz para os cálculos, resultando em uma frequência angular de 377 rad/s.

Para a malha de corrente, os valores definidos para K_p e K_i respectivamente, com base no controlador projetado em Freitas (2013), foram 0,5 e 2500, resultando em um controlador ressonante com a seguinte função de transferência.

$$G_{ress} = \frac{0.5s^2 + 5000s + 71064,5}{s^2 + 142129} \quad (29)$$

Com o ressonante projetado, a saída é um sinal que serve como entrada para o controle PWM, o qual utiliza modulação unipolar para gerar o sinal de controle para o chaveamento do inversor.

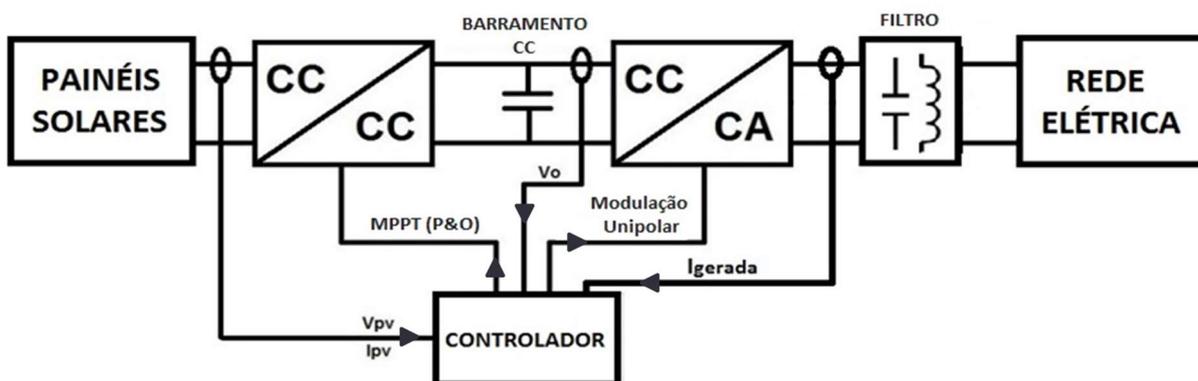
4.2 Bancada Experimental

Embora o campo de atuação desse estudo seja focado nas estruturas de conexão com a rede, para que os procedimentos experimentais se tornassem viáveis, fornecendo dados mais próximos da realidade comercial, foi necessária a construção de uma estrutura capaz de emular todas as etapas de um sistema fotovoltaico de geração de energia.

Portanto, foi desenvolvida uma bancada de trabalho no Laboratório de Otimização de Sistemas de Energia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), a qual viabiliza análises de estruturas cuja carga demande até 1 kW de potência, sem que seja necessária a utilização de outras fontes de alimentação para complementar a potência exigida.

A organização da bancada seguiu o modelo proposto na Figura 38, havendo alteração apenas dos filtros utilizados na conexão com a rede elétrica, para cada topologia analisada.

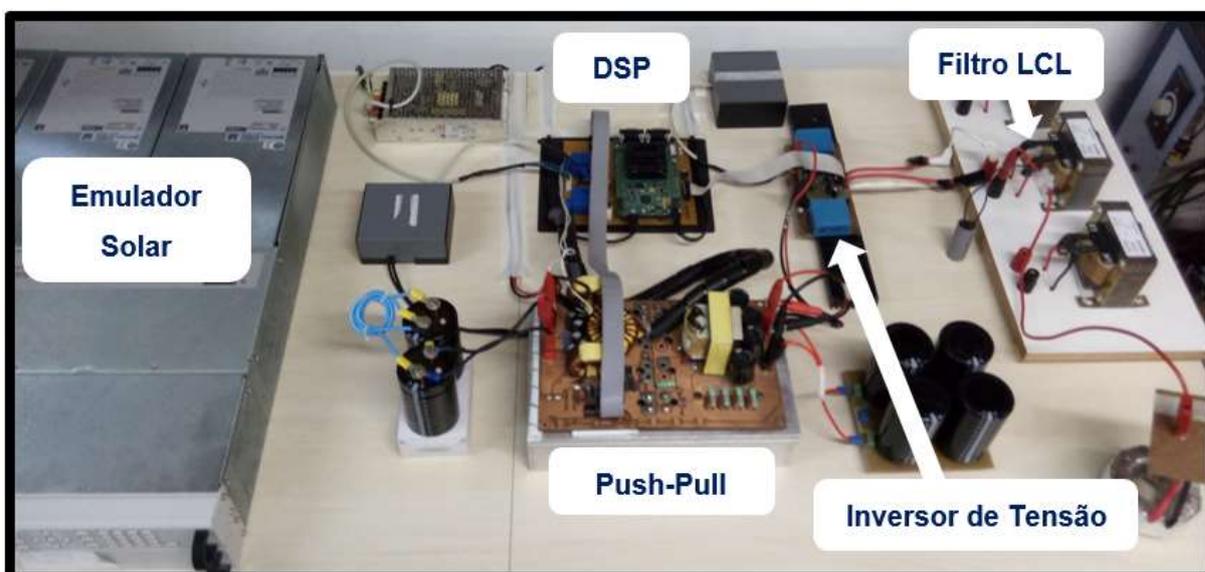
Figura 38 - Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico na bancada experimental



Fonte: adaptado de (SANTOS JR., 2016)

A composição da estrutura física da bancada foi dividida em duas partes. A primeira, apresentada na Figura 39, foi desenvolvida com a finalidade de replicar as funções de um sistema de geração de energia fotovoltaico.

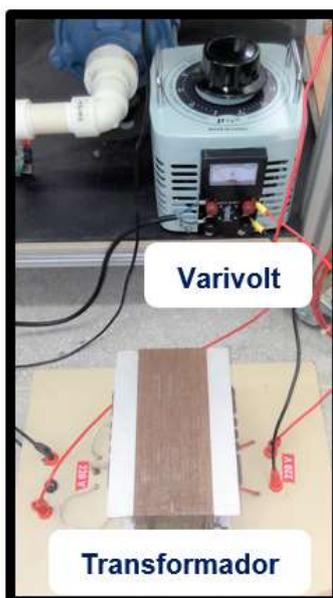
Figura 39 - Bancada experimental



Fonte: Autora

A segunda parte, mostrada na Figura 40, foi elaborada de forma a possibilitar o acesso à rede elétrica para diferentes valores de tensão nos terminais do inversor. A presença de um transformador de ganho unitário exerceu função apenas de isolamento, com exceção para a topologia LC.

Figura 40 - Conexão com a rede elétrica

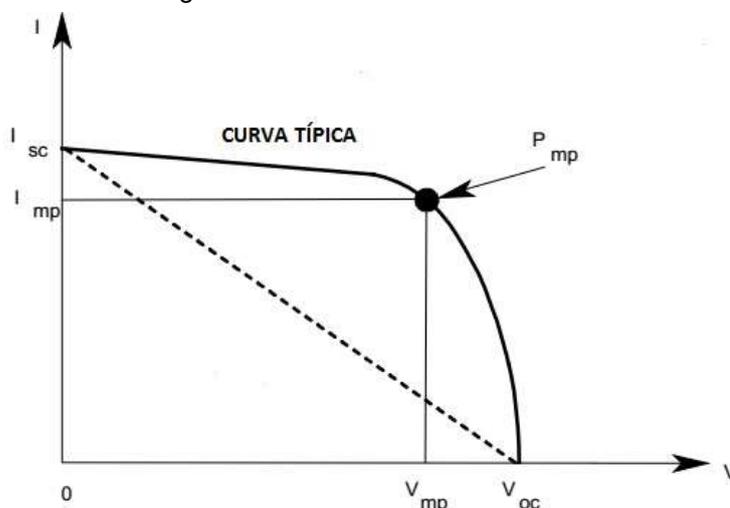


Fonte: Autora

Emulador Solar

O emulador solar é um equipamento capaz de emular o comportamento de um ou mais painéis fotovoltaicos, inclusive simulando variação de irradiância através da mudança de curvas cadastradas em seu modo lista.

A energia em seus terminais segue o mesmo padrão e a mesma relação $I \times V$ da energia disponível nos terminais dos painéis fotovoltaicos, como apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Curva $I \times V$ emulador solar

Fonte: (E4360 USER'S GUIDE, 2017)

O equipamento utilizado na bancada, mostrado na Figura 42, opera com três modos de trabalho: o Fixo, SAS e *Table*. No modo fixo, o dispositivo atua como uma fonte CC comum, com ajuste de tensão e corrente; no modo SAS, a relação IxV da energia em seus terminais ocorre segundo a curva apresentada na Figura 41, a qual é moldada segundo os parâmetros de tensão de circuito aberto (V_{oc}), corrente de curto circuito (I_{sc}), tensão e corrente de máxima potência (V_{mp} e I_{mp}); no modo *Table*, a curva que define o comportamento da tensão com relação à corrente é obtida através da inserção de uma tabela com os pontos da curva.

Figura 42 - Emulador solar modelo E4360A, fabricação *Keysight*



Fonte: (KEYSIGHT, 2017)

O uso do emulador possibilita simular combinações diversas de painéis para valores de irradiância variáveis, pois sua programação permite a definição de até 512 curvas, as quais podem ser trabalhadas individualmente ou em lista, sendo permitida a alternância das curvas em um período determinado pelo usuário. Com essas características, o equipamento possibilita a replicação de situações cotidianas para os sistemas fotovoltaicos, tornando possível testes de novas tecnologias propostas.

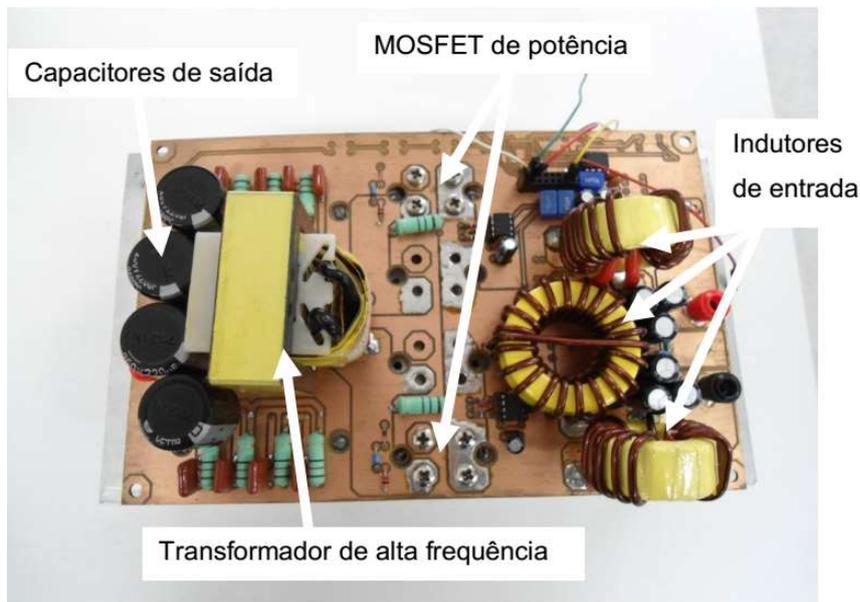
O equipamento foi utilizado no modo SAS, sendo inserido como parâmetros da curva os valores expostos na Tabela 1 para o arranjo fotovoltaico, todos na condição padrão de 1000 W/m^2 de irradiância e temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Conversor CC/CC

O conversor utilizado na bancada é um push-pull alimentado em corrente com capacidade para trabalhar com potência de até 1 kW. Seu chaveamento é realizado por dois Mosfets de potência e controlado pelo sinal PWM fornecido pelo dispositivo

de controle (DSP), chaveando em uma frequência de 80 kHz. Na Figura 43 está descrita a estrutura física do conversor.

Figura 43 - Conversor push-pull



Fonte: (SANTOS JR., 2016)

Conversor CC/CA

Para o conversor CC/CA foi utilizado o inversor de fabricação IRAM™ mostrado na Figura 44, de referência IRAMS20UP60A com máxima corrente eficaz de fase de 20 A a 25 °C. Devido a aplicação ser de natureza monofásica, apenas dois dos três braços disponíveis nesse modelo de inversor foram usados.

Figura 44 - Inversor IRAM™

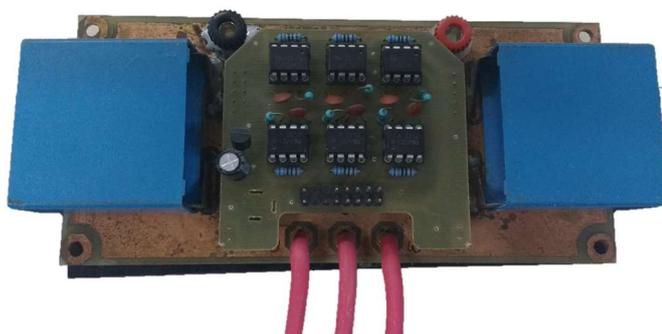


Fonte: (IRAM, 2017)

O chaveamento é realizado por IGBTs que suportam uma tensão limite de 600V, os quais são controlados pelo sinal PWM de 10 kHz originado no DSP TMS320F28335 da Texas Instruments™, onde é realizado todo o processo de controle.

O barramento CC de entrada do inversor é composto por dois capacitores eletrolíticos de 1000 μF conectados em paralelo fora da placa do circuito inversor apresentado na Figura 45.

Figura 45 - Inversor de tensão trifásico

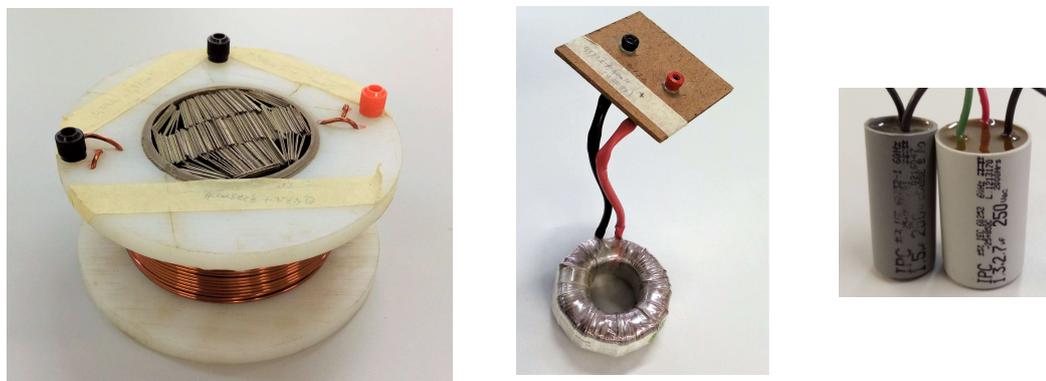


Fonte: Autora

Filtros Passivos

Para a composição dos filtros passivos, foram realizadas combinações com indutores nos valores de 7,2 mH, 1,5 mH e 1 mH. Os capacitores utilizados foram no valor de 0,87 μF e 1,5 μF . Na Figura 46 estão expostos os componentes utilizados na composição dos filtros analisados.

Figura 46 - Componentes dos filtros passivos



Fonte: Autora

Estrutura de acesso à Rede Elétrica

O acesso à rede elétrica foi realizado através do variador de tensão monofásico (varivolt) mostrado na Figura 47. Os valores eficazes de tensão em seus terminais variam de 0 a 250 volts, sendo a corrente limite de 8 A.



Fonte: Autora

Com o objetivo de realizar um isolamento entre a rede e o sistema de geração foi utilizado um transformador de relação de transformação unitária, sendo a corrente gerada pelo sistema fotovoltaico entregue nos terminais do transformador.

4.3 Métodos para Dimensionamento dos Filtros

Os métodos utilizados para dimensionamento dos filtros foram extraídos da literatura especializada e serão explanados mais detalhadamente neste tópico. Serão apresentadas equações e considerações que não foram detalhadas na revisão da literatura, para melhorar o entendimento de cada método. No entanto, o desenvolvimento dos cálculos, definição de valor das variáveis e resultados obtidos nas fases do projeto de cada filtro estão apresentados no apêndice.

4.3.1 Projeto dos Filtros L

Nesse tópico serão abordadas duas estratégias de projeto para o filtro L, as quais são direcionadas à aplicação do filtro como estrutura de conexão de um sistema de geração de energia monofásico com a rede elétrica.

Para o projeto do primeiro filtro indutivo foi utilizada a metodologia apresentada por Samuel, Neves e Cabral (2006), cuja Equação 1 para o cálculo da indutância foi citada na revisão da literatura.

A segunda metodologia de projeto segue as etapas definidas em Paukner et al. (2015). São realizados cálculos relativos a vários parâmetros vinculados ao funcionamento do inversor e à capacidade de fornecimento do sistema gerador.

O primeiro passo é conhecer a corrente eficaz mínima gerada pelo sistema fotovoltaico que será injetada na rede, a qual pode ser calculada através da relação entre a potência mínima injetada (S) e a tensão no ponto de acoplamento comum (V_{PAC}).

$$I_{1rms} = \frac{S}{V_{PAC}} \quad (30)$$

Sendo a distribuição dessa corrente observada no domínio da frequência, há uma componente fundamental na frequência de interesse (60 Hz) e as demais componentes estão distribuídas no restante do espectro, podendo a relação entre o valor do somatório das componentes restantes e o valor da fundamental ser definida pela TDH desse sinal.

No segundo passo deve-se estabelecer um valor para a TDH, sendo habitualmente utilizado o valor definido pelas normas de qualidade de energia, tal com a NDU-013, para correntes injetadas na rede elétrica, que é de 5% para a TDH total.

Com o valor da TDH da corrente, obtém-se a parcela de corrente relativa à presença das componentes harmônicas.

$$I_{hrms} = TDH \times I_{1rms} \quad (31)$$

Em seguida a ondulação da corrente é calculada, considerando para isto o pior cenário. Nesta condição, a ondulação da corrente pode ser descrita como um sinal triangular.

$$\Delta I_p = I_{hrms} \sqrt{3} \quad (32)$$

O último parâmetro a ser obtido é o índice de modulação, que é dado pela relação entre a amplitude da tensão no PAC (V_{PAC}) e o valor de tensão no barramento CC (V_{CC}) na entrada do inversor, como mostrado na Equação 33.

$$m = \frac{V_{PAC} \sqrt{2}}{V_{CC}} \quad (33)$$

Após a definição de todos os parâmetros, é possível definir o valor da indutância do filtro através da Equação 2 apresentada na revisão da literatura.

4.3.2 Projeto dos Filtros LC

A metodologia de projeto do filtro LC passa baixa, extraída de Martins e Barbi (2011), segue os critérios apresentados na revisão da literatura para o filtro LC.

Com base nesses critérios, inicialmente é calculado o valor da resistência da carga (R_0) admitindo o fator de potência do sinal de corrente gerado como unitário, ou seja, considerando que o conjunto inversor/filtro visualiza a carga como resistiva. Essa impedância é obtida através da relação entre a tensão eficaz de saída (V_{PAC}), potência gerada (S) e fator de potência ($\cos \phi$), como mostrado na Equação 34:

$$R_0 = \frac{V_{PAC}^2}{S} \cos \phi \quad (34)$$

Em seguida, é definido o fator de amortecimento, que pode assumir um valor dentro do intervalo entre 0,707 e 1,0; estando o fator de amortecimento relacionado com os componentes do filtro LC pela Equação 35.

$$\zeta = \frac{1}{2 R_0} \sqrt{\frac{L_i}{C}} \quad (35)$$

Através dessa relação, é possível obter a Equação 36 que define a indutância de filtragem em função da capacitância.

$$L_i = 4R_0^2 \zeta^2 C \quad (36)$$

Outro parâmetro que se relaciona diretamente com o valor dos componentes do filtro é a frequência de corte. Segundo o critério 2, essa frequência deve assumir um valor dentro do intervalo determinado para garantir que as componentes harmônicas de amplitude elevada próximas à frequência de chaveamento sejam atenuadas. A relação da frequência de corte com os valores dos componentes do filtro é apresentada na Equação 37.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C}} \quad (37)$$

Desta forma, após a definição da frequência de corte, a substituição da Equação 37 na Equação 36 resulta na Equação 38, a qual define o valor do capacitor de filtragem.

$$C = \frac{1}{4\pi \zeta f_c R_0} \quad (38)$$

Possibilitando o retorno à Equação 36 para a obtenção do valor da indutância de filtragem.

4.3.3 Projeto dos Filtros LCL

Neste tópico serão apresentadas as metodologias para o desenvolvimento do projeto de três filtros na topologia LCL, com o objetivo de tornar clara a proposta de cada método e possibilitar o entendimento do cálculo dos componentes para cada estrutura a ser avaliada.

Filtro LCL-1

O primeiro procedimento é apresentado por Matos et al. (2010), sendo este baseado na referência (LISERRE; BLAABJERG; HANSEN, 2005), amplamente citada por autores de trabalhos relacionados a inversores, filtros LCL e redução de harmônicos.

De acordo com Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005), algumas limitações devem ser consideradas no cálculo dos componentes de um filtro LCL, para garantir um bom desempenho na mitigação dos harmônicos sem ocasionar perdas consideráveis para o sistema.

1. O valor do capacitor do filtro está diretamente relacionado com o fator de potência da energia entregue à carga. Portanto há uma recomendação de que a potência reativa máxima seja de 5%, pois o aumento desse valor ocasiona uma redução significativa no fator de potência.
2. O valor da indutância total, que é dado pela soma do valor da indutância do lado do conversor com o valor da indutância do lado da rede, deve ser limitado de forma que sua reatância na frequência da rede seja baixa.

Essa restrição se deve ao esforço para que a queda de tensão durante a operação seja mínima.

3. A frequência de ressonância deve estar dentro de uma faixa que não crie problemas de ressonância nas frequências mais baixas e mais altas, isto é, deverá ser maior que 10 vezes a frequência da rede e menor que a metade da frequência de chaveamento.

Para o cálculo do indutor do lado do conversor, Matos et al. (2010) utiliza a mesma equação indicada por Samuel, Neves e Cabral (2006) para o cálculo do filtro indutivo, a qual foi proposta por Krug, Malinowski e Bernet (2004).

$$L_i = \frac{V_{PAC}}{2\sqrt{6}f_s\Delta I_p} \quad (39)$$

Após a definição da indutância (L_i) do lado do conversor, a capacitância deve ser calculada considerando que seu valor máximo será 5% do valor definido para a capacitância de base, cumprindo a determinação definida na limitação 1.

O valor da capacitância de base (C_b) é obtido pela seguinte equação:

$$C_b = \frac{S}{2\pi f_r V_{PAC}^2} \quad (40)$$

Na qual temos a relação entre a potência (S), frequência da rede (f_r) e tensão eficaz (V_{PAC}) no ponto de acoplamento.

Portanto o valor de capacitância estabelecido dentro da limitação 1 é obtido por:

$$C = 0,05 C_b \quad (41)$$

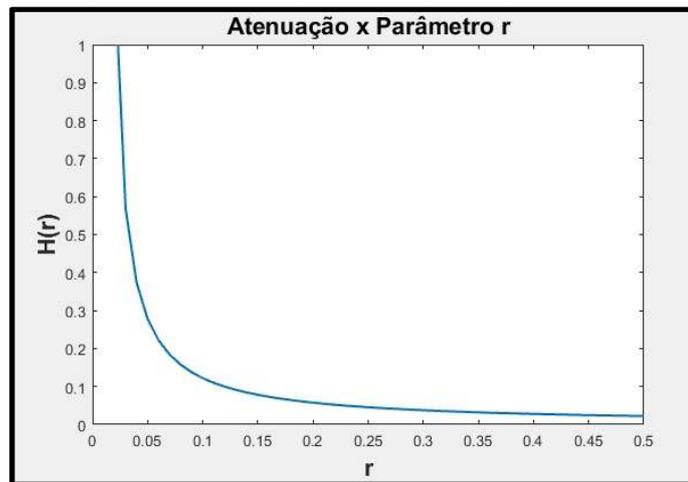
Para o cálculo do valor da indutância do lado da rede, é assumido um valor de atenuação com base na relação da corrente harmônica da rede (I_{Hrede}) com a corrente harmônica no conversor (I_h), que normalmente assume o valor de 20%. Para isto é utilizada a função de transferência da Equação 42.

$$H(r) = \frac{I_{Hrede}}{I_h} = \frac{1}{|1 + r(1 - L_i C (2\pi f_s)^2)|} \quad (42)$$

Sendo f_s a frequência de chaveamento e r o parâmetro que define a relação entre a indutância do lado do conversor e a indutância do lado da rede.

A correlação entre a atenuação e o parâmetro r pode ser observada na Figura 48.

Figura 48 - Gráfico para definição do parâmetro r



Fonte: Autora

A obtenção do valor de r , ocorre definindo o ponto para o qual a relação I_{Hrede}/I_h , ou seja, o valor de r para o qual o $H(r)$ assume o valor de 20%.

Com o parâmetro definido, o valor de L_g é obtido através da aplicação direta dos valores na Equação 43.

$$L_g = r L_i \quad (43)$$

Filtro LCL-2

No método 02, a metodologia sugerida por Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005) é seguida integralmente, inclusive no cálculo da indutância do lado do conversor (L_i). O modelo utilizado foi apresentado na revisão bibliográfica e se baseia na análise do comportamento do filtro LCL em altas frequências. Segundo Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005), a indutância L_i pode ser calculada de acordo com o valor da relação entre a componente harmônica de corrente na frequência de chaveamento e a de

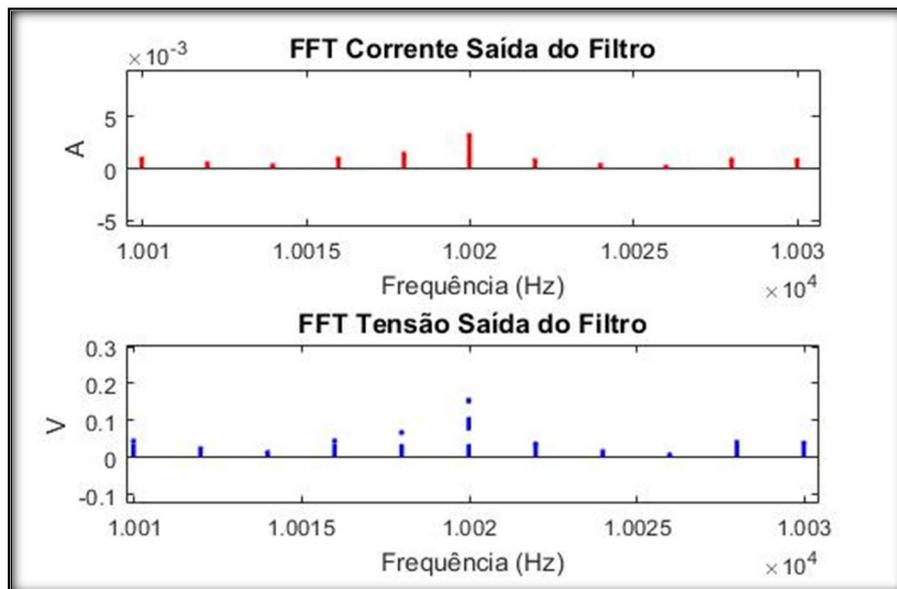
tensão nessa mesma frequência. Em Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005), o valor de relação recomendado é de 10%, resultando na Equação 44.

$$L_i = \frac{1}{2\pi f_s 0,1} \quad (44)$$

No entanto, ainda se baseando na proposta de Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005) para o cálculo de L_i , Gabe (2008) demonstra que o valor de 10%, sugerido inicialmente, pode ser substituído analisando os valores das componentes harmônicas de tensão e corrente próximas à frequência de chaveamento para cada caso, o que resulta em um filtro mais adequado para o sistema em questão.

A Figura 49 mostra a FFT da corrente e da tensão na saída do inversor para o sistema de geração trabalhado neste projeto, obtido através da plataforma de simulação, cuja relação é de 0,02.

Figura 49 - Componentes harmônicas de tensão e corrente na frequência de chaveamento



Fonte: Autora

Portanto, para o novo valor da relação $\frac{i(h_s)}{v(h_s)}$, L_i é calculado por:

$$L_i = \frac{1}{2\pi f_s 0,02} \quad (45)$$

Com o valor de L_i definido, o cálculo dos demais componentes seguirão as mesmas etapas do método anterior, as quais foram realizadas seguindo o método sugerido por Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005).

Filtro LCL-3

No terceiro método, Sampaio (2013) sugere que inicialmente seja projetado um filtro LC passa-baixa, estando a frequência de corte desse filtro dentro do intervalo que vai de dez vezes a frequência da rede a um quarto de década da frequência de chaveamento.

A frequência de corte do filtro de segunda ordem é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_i C}} \quad (46)$$

Após a definição dos valores dos componentes do filtro LC, ou seja, do indutor do lado do conversor (L_i) e da capacitância (C), o próximo passo é a definição do valor da indutância de conexão com a rede (L_g). Em seu texto, Sampaio (2013) afirma que é possível determinar esse valor pela equação de transferência da potência ativa, sendo a relação entre o indutor (L_g) e a potência ativa (P) dada pela Equação 47.

$$L_g = \frac{V_{C_{rms}} \times V_{PAC}}{2\pi f_r P} \sin(\theta) \quad (47)$$

Onde:

- $V_{C_{rms}}$ é a tensão eficaz no capacitor;
- V_{PAC} é a tensão eficaz na rede;
- f_r é a frequência da rede;
- P é a potência ativa transferida;
- θ é o ângulo para máxima transferência de potência.

Com a inserção de L_g na estrutura do filtro $L_i C$, o conjunto $L_i C L_g$ configura um filtro de terceira ordem, tendo assim sua frequência de ressonância dada pela Equação 48.

$$f_{re} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i C L_g}} \quad (48)$$

É importante considerar essa alteração na frequência de ressonância, pois há concordância entre Sampaio (2013) e os demais autores da área de que a frequência de ressonância do filtro LCL obtido deve ser mantida dentro da faixa de frequência que vai de 10 vezes a frequência da rede elétrica até a metade da frequência de chaveamento, garantindo dessa forma que a atenuação das componentes harmônicas geradas pelo chaveamento irá ocorrer sem conseqüente distorção ou atenuação da componente fundamental de corrente.

4.4 Critérios de Análise de Desempenho

A análise de desempenho de cada estrutura foi realizada com base em critérios definidos para os tópicos apresentados a seguir:

- Fator de Potência;
- Perda no Filtro Passivo;
- Componentes Harmônicas de Tensão;
- Componentes Harmônicas de Corrente.

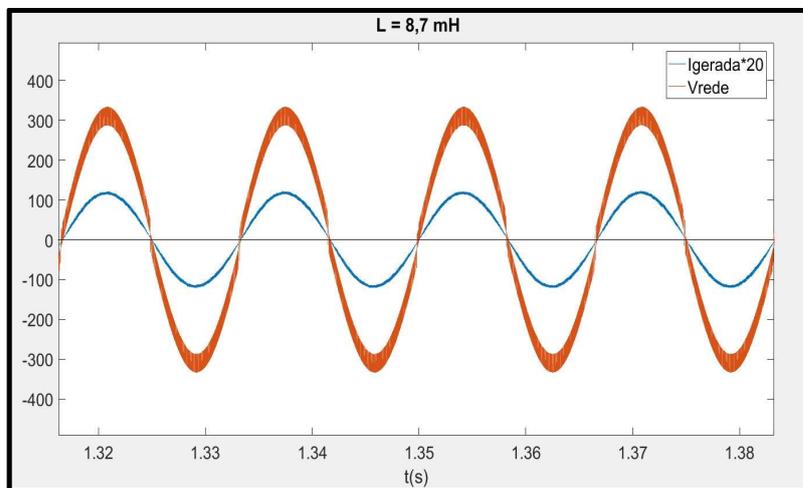
A avaliação de cada topologia, segundo os critérios apresentados a seguir, foi realizada considerando o funcionamento do sistema gerador em sua potência nominal, com o conjunto de painéis atuando na curva de 1000 W/m².

4.4.1 Fator de Potência

Entre os objetivos de controle definidos neste trabalho, para o sistema de geração de energia ao ser conectado à rede elétrica, se encontra a busca pelo fator de potência unitário, ou seja, a realização da máxima transferência de potência ativa para a rede elétrica.

Para atingir esse objetivo, o inversor deve gerar uma corrente senoidal em fase com a tensão da rede, de acordo com o exemplo apresentado na Figura 50.

Figura 50 - Tensão e corrente no PAC para filtro indutivo



Fonte: Autora

Tomando como base os valores aceitos por norma para o fator de potência, a análise do desempenho dos filtros e do controle foi realizada considerando a tolerância apresentada na Tabela 4, a qual foi retirada da NDU-013 (ENERGISA:2015).

Tabela 4 - Fator de potência por potência gerada

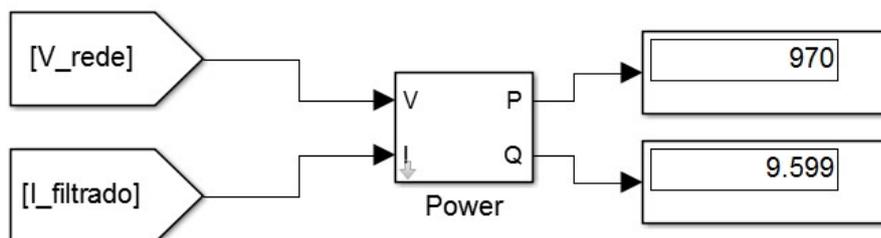
Potência Nominal (GD)	Fator de Potência
< 3,0 kW	FP = 1 com tolerância de 0,90 indutivo até 0,90 capacitivo
> 3,0 kW < 6,0 kW	FP = 1 ajustável de 0,90 indutivo até 0,90 capacitivo
> 6,0 kW	FP = 1 ajustável de 0,90 indutivo até 0,90 capacitivo

Fonte: NDU-013 (ENERGISA:2015)

Para o cálculo do fator de potência foi utilizado o bloco “Power” do *Simulink*, o qual relaciona a tensão na rede elétrica (V_rede) com a corrente gerada pelo sistema

fotovoltaico (I_{filtrado}), fornecendo em sua saída os valores das potências ativa (P) e reativa (Q) gerada pelo sistema, segundo a Figura 51.

Figura 51 - Potência ativa (P) e reativa (Q) no bloco "Power" do Simulink



Fonte: Autora

Com a obtenção desses valores, foi possível o cálculo do fator de potência através do uso das Equações 49 e 50.

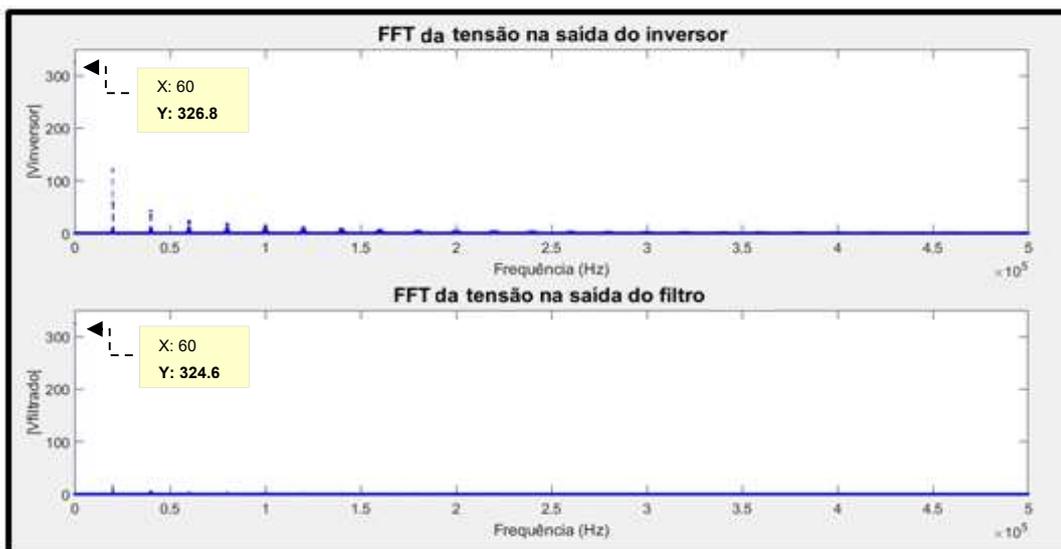
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (49)$$

$$FP = \frac{P}{S} \quad (50)$$

4.4.2 Perda no Filtro Passivo

Para a avaliação deste critério, foi analisado o gráfico da FFT da tensão antes e após o filtro, como apresentado no exemplo da Figura 52. O cálculo da perda foi realizado obtendo a magnitude dos sinais na frequência fundamental e calculando sua diferença.

Figura 52 - FFT da tensão nas saídas do inversor e do filtro – componente fundamental



Fonte: Autora

Devido à conexão do sistema fotovoltaico a uma rede representada por um barramento infinito, a tensão na saída do filtro deve se manter relativamente constante, sendo observada uma alteração apenas na tensão da saída do inversor, a qual precisa alcançar um valor maior para compensar a queda de tensão no filtro.

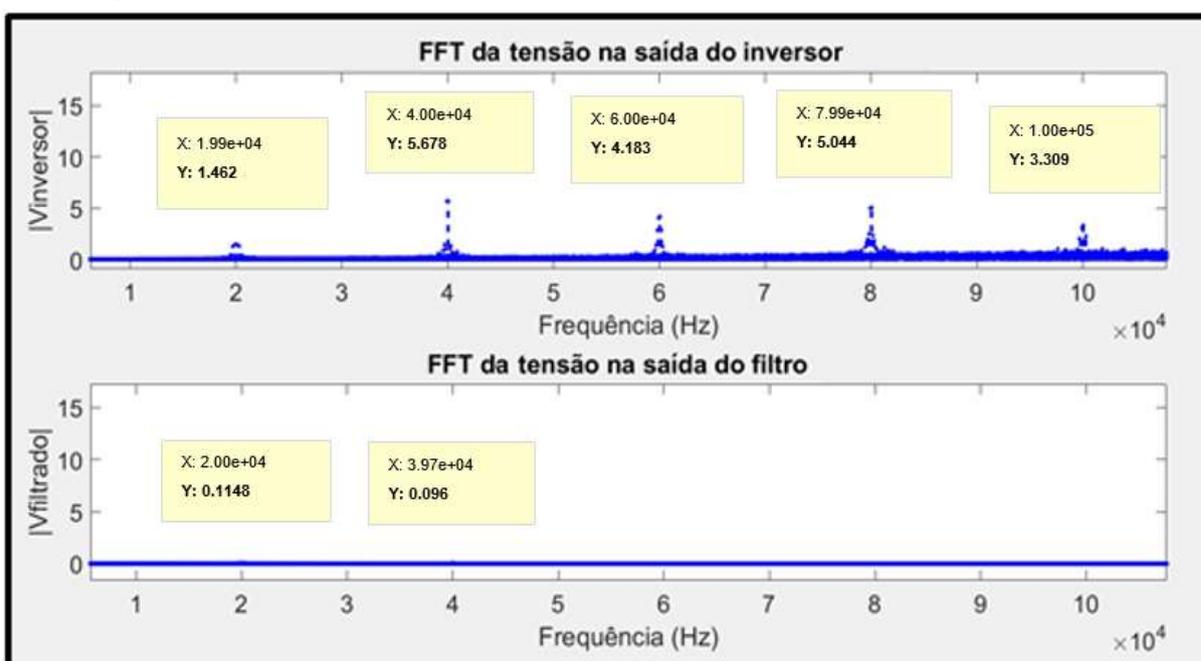
De acordo Samuel, Neves e Cabral (2006), a queda máxima de tensão recomendada, para uma boa relação entre a dinâmica, custo, volume e perdas, é de 10% no valor da componente fundamental, portanto este valor foi usado como referência para avaliação desse tópico.

4.4.3 Componentes Harmônicas de Tensão

O desempenho dos filtros com relação às componentes harmônicas de tensão foi avaliado de acordo com a redução da TDH de tensão (TDHv);

A redução da taxa de distorção harmônica de tensão tomou como referência os valores da TDHv na saída do inversor e na saída do filtro, como apresentado na Figura 53. Embora a NDU-013 não defina limites para a TDH de tensão na conexão com a rede, nesse tópico foi avaliada a redução percentual da TDHv e verificado o nível de distorção da tensão após o filtro.

Figura 53 - FFT da tensão nas saídas do inversor e do filtro - componentes harmônicas



Fonte: Autora

4.4.4 Componentes Harmônicas de Corrente

Para que seja autorizada a conexão em baixa tensão de um sistema de geração distribuída ao sistema de distribuição da Energisa, a NDU-013 (ENERGISA:2015) define que a taxa de distorção harmônica total da corrente deve ser inferior a 5%, na potência nominal do sistema de geração.

Na análise da taxa de distorção harmônica de corrente (TDHi) foram observadas, para cada filtro, as TDHs das correntes injetadas na rede, sendo possível avaliar se o valor da corrente filtrada está dentro do definido em norma.

Para as harmônicas individuais, os valores de tolerância definidos na NDU-013 são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Limites de distorção de corrente

Harmônicas Ímpares	Limite de Distorção
3° a 9°	< 4,0%
11° a 15°	< 2,0%
17° a 21°	< 1,5%
23° a 33°	< 0,6%
Harmônicas Pares	Limite de Distorção
2° a 8°	< 1,0%
10° a 32°	< 0,5%

Fonte: (DAHONO, 2002)

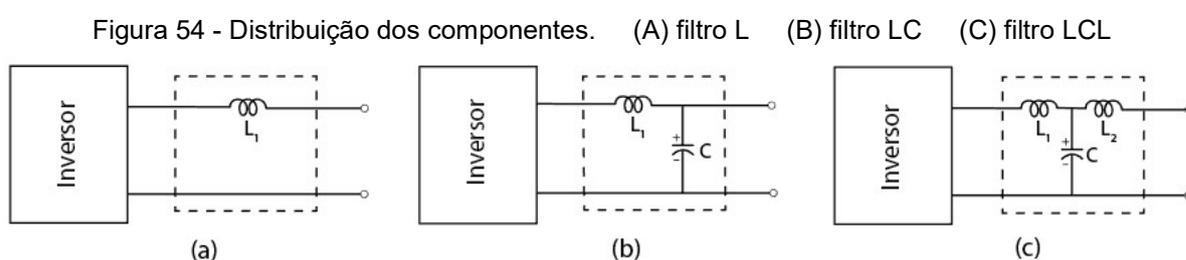
Neste caso, foi observada a FFT da corrente na saída do filtro para cada topologia e verificado se havia a existência de alguma componente harmônica com valores relativos à fundamental acima do definido na Tabela 5.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

As avaliações das estruturas projetadas foram realizadas em parte na plataforma de simulação desenvolvida em ambiente Simulink. Cada estrutura foi analisada com relação a sua dinâmica e resultados, tendo como referência os critérios definidos no tópico 4.4.

A topologia e o valor dos componentes para cada filtro são apresentados na Tabela 6, estando as indutâncias e a capacitância organizadas nas estruturas segundo o modelo da Figura 54.



Fonte: Adaptado de (PATEL; WEI; NASIRI, 2014)

Para a melhor representação das estruturas físicas dos indutores, na plataforma de simulação, foram incluídas as resistências R_{L_i} e R_{L_g} em série com cada indutor. Para cada resistência foi arbitrado o valor de $0,1 \Omega$.

Tabela 6 - Componentes dos filtros passivos

Topologia	L_i	C	L_g
L_1	11,4 mH		
L_2	8,7 mH		
LC_1	7,68 mH	0,82 μ F	
LCL_1	11,4 mH	2,74 μ F	0,57 mH
LCL_2	0,79 mH	2,74 μ F	0,63 mH
LCL_3	7,68 mH	0,82 μ F	5,74 mH

Fonte: Autora

Os resultados de simulação e a avaliação de cada estrutura com relação aos critérios definidos podem ser observados na Tabela 7.

Tabela 7 - Avaliação dos resultados de simulação

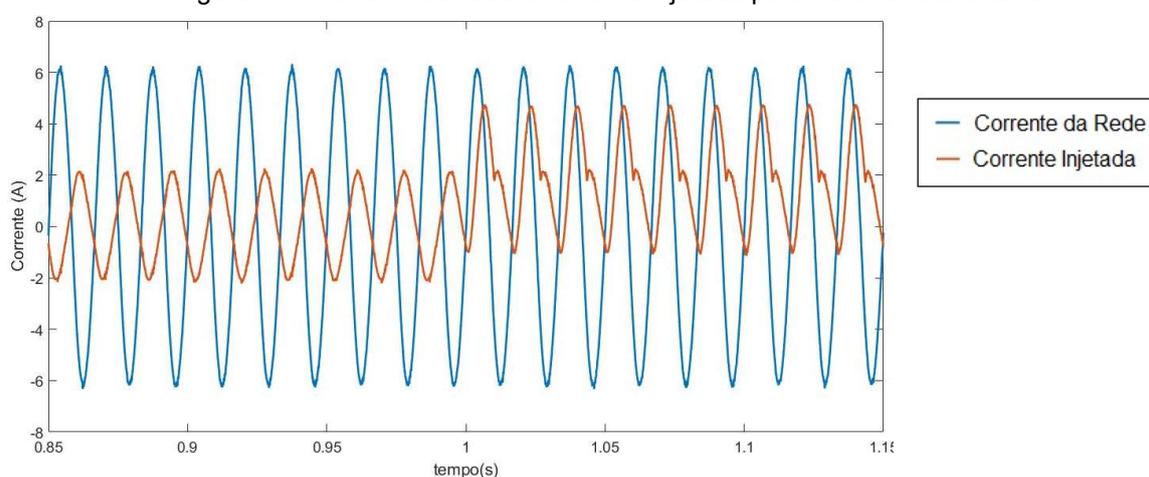
Avaliação	Dados														
<p>1º Critério</p> <p>O fator de potência obtido para a corrente injetada na rede foi próximo ao unitário para todos os filtros avaliados, apresentando resultados acima do valor mínimo de 0,92 definido em norma e atendendo a exigência estabelecida. A diferença de valores entre os resultados é pouco significativa, mostrando que o controle pode ser utilizado para inversores que utilizem qualquer uma das estruturas analisadas.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Topologia</th> <th>Fator de Potência (FP)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L₁</td> <td>0,99997</td> </tr> <tr> <td>L₂</td> <td>0,99997</td> </tr> <tr> <td>LC₁</td> <td>0,99997</td> </tr> <tr> <td>LCL₁</td> <td>0,99900</td> </tr> <tr> <td>LCL₂</td> <td>0,99990</td> </tr> <tr> <td>LCL₃</td> <td>0,99996</td> </tr> </tbody> </table>	Topologia	Fator de Potência (FP)	L ₁	0,99997	L ₂	0,99997	LC ₁	0,99997	LCL ₁	0,99900	LCL ₂	0,99990	LCL ₃	0,99996
Topologia	Fator de Potência (FP)														
L ₁	0,99997														
L ₂	0,99997														
LC ₁	0,99997														
LCL ₁	0,99900														
LCL ₂	0,99990														
LCL ₃	0,99996														
<p>2º Critério</p> <p>A queda de tensão para os filtros avaliados apresentou um percentual máximo de 1,28%, com relação ao valor da fundamental. Nenhum dos filtros chegou próximo a alcançar o valor definido como máximo tolerável, que é de 10%.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Topologia</th> <th>Queda de Tensão (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L₁</td> <td>0,90</td> </tr> <tr> <td>L₂</td> <td>0,74</td> </tr> <tr> <td>LC₁</td> <td>0,71</td> </tr> <tr> <td>LCL₁</td> <td>1,12</td> </tr> <tr> <td>LCL₂</td> <td>0,96</td> </tr> <tr> <td>LCL₃</td> <td>1,28</td> </tr> </tbody> </table>	Topologia	Queda de Tensão (%)	L ₁	0,90	L ₂	0,74	LC ₁	0,71	LCL ₁	1,12	LCL ₂	0,96	LCL ₃	1,28
Topologia	Queda de Tensão (%)														
L ₁	0,90														
L ₂	0,74														
LC ₁	0,71														
LCL ₁	1,12														
LCL ₂	0,96														
LCL ₃	1,28														
<p>3º Critério</p> <p>Com relação à redução dos harmônicos de tensão, nos filtros puramente indutivos foi observado uma atuação menos eficiente que nos demais filtros. Isto ocorre devido à presença do capacitor nas demais topologias, que terá sua reatância reduzida com o aumento da frequência, fazendo com que a tensão nesse capacitor, para altas frequências, seja praticamente nula.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Topologia</th> <th>TDH (%) – Tensão</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L₁</td> <td>3,89</td> </tr> <tr> <td>L₂</td> <td>5,02</td> </tr> <tr> <td>LC₁</td> <td>0,84</td> </tr> <tr> <td>LCL₁</td> <td>0,27</td> </tr> <tr> <td>LCL₂</td> <td>0,57</td> </tr> <tr> <td>LCL₃</td> <td>0,23</td> </tr> </tbody> </table>	Topologia	TDH (%) – Tensão	L ₁	3,89	L ₂	5,02	LC ₁	0,84	LCL ₁	0,27	LCL ₂	0,57	LCL ₃	0,23
Topologia	TDH (%) – Tensão														
L ₁	3,89														
L ₂	5,02														
LC ₁	0,84														
LCL ₁	0,27														
LCL ₂	0,57														
LCL ₃	0,23														
<p>4º Critério</p> <p>Todas as topologias analisadas obtiveram resultados dentro do estabelecido pela NDU-013. Os valores de TDH para a potência nominal foram abaixo de 5%, mesmo para o filtro LCL-2, que possui indutores com valores bastante reduzidos, com relação aos demais filtros.</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Topologia</th> <th>TDH (%) - Corrente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L₁</td> <td>2,98</td> </tr> <tr> <td>L₂</td> <td>3,42</td> </tr> <tr> <td>LC₁</td> <td>1,66</td> </tr> <tr> <td>LCL₁</td> <td>1,32</td> </tr> <tr> <td>LCL₂</td> <td>2,29</td> </tr> <tr> <td>LCL₃</td> <td>1,39</td> </tr> </tbody> </table>	Topologia	TDH (%) - Corrente	L ₁	2,98	L ₂	3,42	LC ₁	1,66	LCL ₁	1,32	LCL ₂	2,29	LCL ₃	1,39
Topologia	TDH (%) - Corrente														
L ₁	2,98														
L ₂	3,42														
LC ₁	1,66														
LCL ₁	1,32														
LCL ₂	2,29														
LCL ₃	1,39														

Fonte: Autora

A atuação dos filtros foi observada não apenas com relação às componentes de alta frequência relativas ao PWM do inversor, mas também com relação a sua capacidade de eliminar o impacto que harmônicas provenientes da rede elétrica possam ocasionar na corrente injetada.

Na Figura 55 é mostrada a corrente da rede, na qual é possível constatar uma alteração em sua forma de onda após 1 segundo, período no qual foram conectadas à rede cargas não lineares, no entanto embora a corrente da rede tenha apresentado distorção, a corrente injetada no PAC não sofreu nenhuma alteração, mostrando um desempenho satisfatório na atuação dos filtros neste requisito.

Figura 55 - Corrente da rede e corrente injetada pelo sistema fotovoltaico

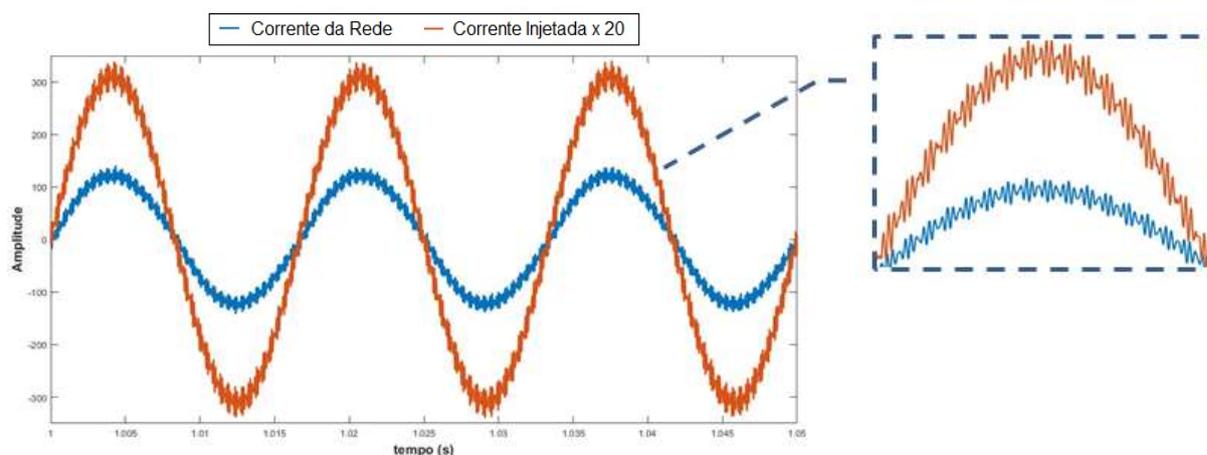


Fonte: Autora

Para o cenário no qual as harmônicas provenientes da rede são de tensão, observou-se que a corrente injetada apresenta componentes harmônicas análogas às da tensão da rede. Desta forma, é possível verificar que nenhum dos filtros, nas configurações propostas neste trabalho, atua na eliminação da influência de harmônicas de tensão provindas da rede, apresentando em todos os casos analisados comportamento similar ao mostrado na Figura 56.

Após a análise dos resultados obtidos na simulação, foi possível observar que todas as estruturas apresentaram desempenho satisfatório, segundo os critérios definidos. Embora os filtros indutivos tenham obtido um resultado de TDHv superior aos das demais topologias, os valores alcançados se encontram próximos aos 5%, valor definido em norma para a corrente injetada, o qual pode ser considerado como referência para um valor aceitável de distorção.

Figura 56 - Corrente da rede e corrente injetada pelo sistema fotovoltaico



Fonte: Autora

Na avaliação dos resultados de simulação relativos às componentes harmônicas provenientes da rede elétrica, foi demonstrado que os filtros passivos projetados neste trabalho, embora sejam eficazes na atenuação de harmônicos de corrente, não apresentam nenhuma atuação sobre as harmônicas de tensão da rede, promovendo a distorção da corrente injetada.

Ao considerar que todos os filtros atingiram resultados que cumpriram com os requisitos definidos para uma boa qualidade de energia, a definição das estruturas para o desenvolvimento da análise experimental considerou também o volume e custo de cada estrutura para selecionar um filtro de cada topologia. Na Tabela 8 estão listados os filtros selecionados para cada topologia.

Tabela 8 - Componentes dos filtros passivos selecionados

Topologia	L_i	C	L_g
L	8,7 mH		
LC	7,68 mH	0,82 μ F	
LCL	0,79 mH	2,74 μ F	0,63 mH

Fonte: Autora

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais apresentados no desenvolvimento deste tópico foram obtidos utilizando os filtros passivos nas topologias L, LC e LCL escolhidos de acordo com seus desempenhos na etapa de simulação.

Foram realizados alguns ajustes nos valores dos componentes projetados, devido à adequação aos valores comerciais e/ou valores de componentes disponíveis em laboratório. Os valores dos componentes utilizados em cada topologia se encontram dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 - Componentes dos filtros passivos

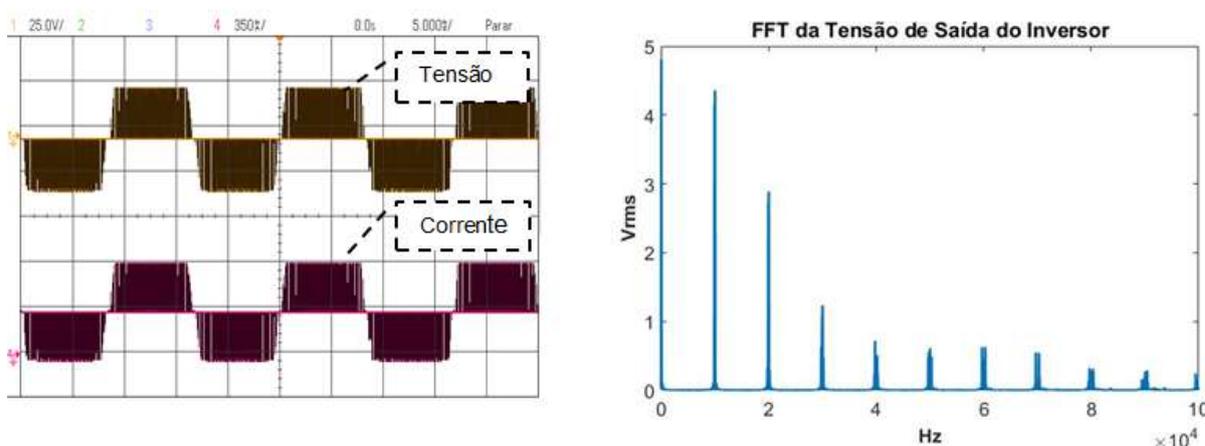
Topologia	L_i	C	L_g
L	8,7 mH		
LC	8,0 mH	0,87 μ F	
LCL	2,0 mH	1,5 μ F	1,0 mH

Fonte: Autora

Durante o procedimento experimental, cada filtro foi utilizado como estrutura de conexão entre a bancada experimental apresentada no tópico 4.2, a qual desempenha o papel de um sistema de geração fotovoltaico, e a rede elétrica.

Para observar as componentes harmônicas de tensão e de corrente na saída do inversor, inicialmente foi conectada ao inversor uma carga resistiva sem a utilização de filtros, sendo os resultados mostrados na Figura 57. Como esperado, a FFT da tensão e da corrente tiveram comportamento similar, apresentando diferença apenas em suas magnitudes.

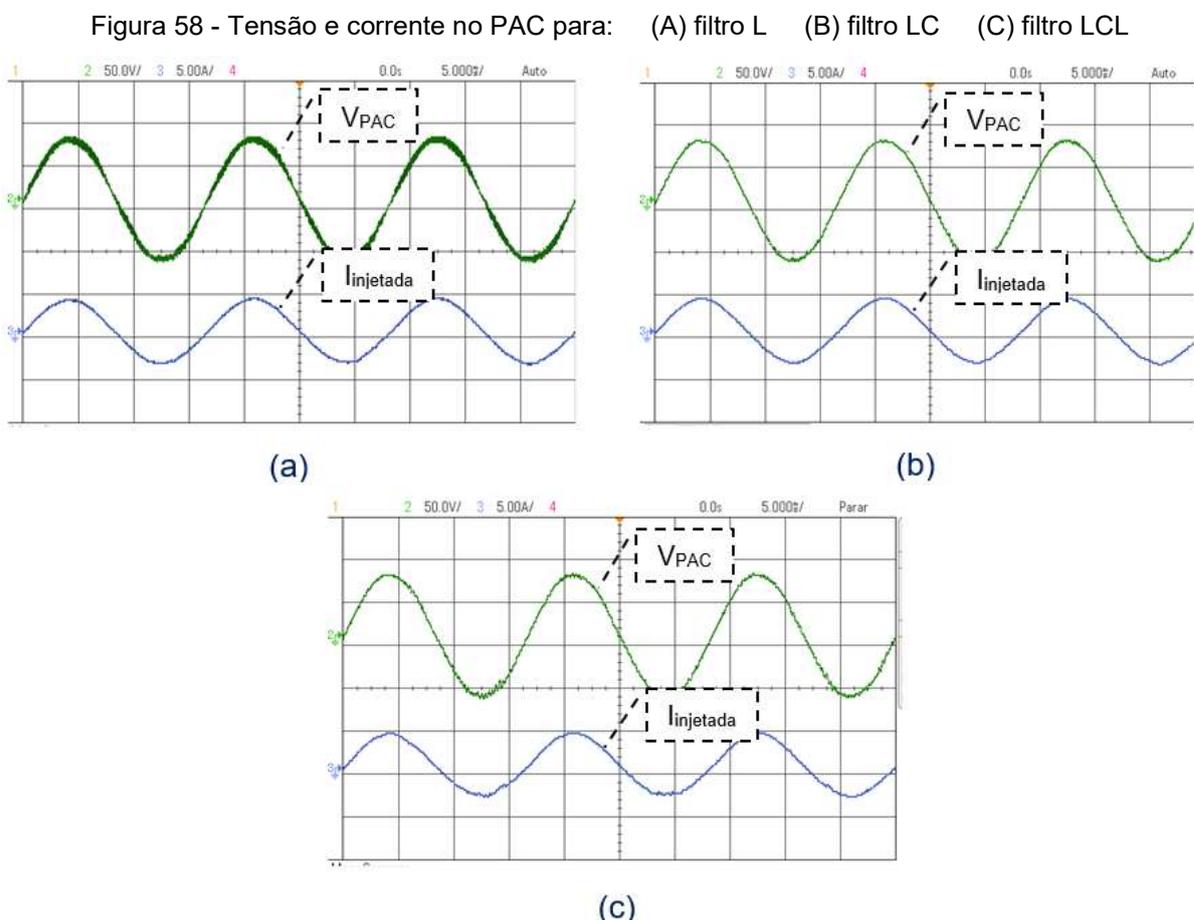
Figura 57 - Tensão e corrente na saída do inversor para carga resistiva



Fonte: Autora

O procedimento experimental foi realizado buscando observar o comportamento da tensão e corrente nas saídas dos filtros, considerando sua operação na potência para os quais foram projetados. No entanto, devido à limitação dos componentes eletrônicos do protótipo existente que foi utilizado para a extração de resultados experimentais, não foi possível a obtenção de resultados na potência nominal. Os resultados experimentais foram obtidos para uma tensão de rede de 70V de pico e uma tensão de barramento de 100 V.

Na Figura 58 são apresentadas as formas de onda da tensão no PAC e da corrente injetada na rede para as três topologias propostas. Sendo possível observar que a distorção da corrente injetada é similar para as três topologias.



Fonte: Autora

As medições foram realizadas nos terminais de entrada do transformador, sendo possível a observação no osciloscópio dos dados necessários para o cálculo dos parâmetros apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Avaliação dos resultados experimentais

Avaliação	Dados								
1º Critério									
Na etapa experimental os valores do fator de potência para cada filtro avaliado manteve-se próximo ao valor obtido em simulação, validando desta forma as considerações de projeto dos filtros e a correta atuação do controle.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Topologia</th> <th>Fator de Potência (FP)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>0,99996</td> </tr> <tr> <td>LC</td> <td>0,99966</td> </tr> <tr> <td>LCL</td> <td>0,99863</td> </tr> </tbody> </table>	Topologia	Fator de Potência (FP)	L	0,99996	LC	0,99966	LCL	0,99863
Topologia	Fator de Potência (FP)								
L	0,99996								
LC	0,99966								
LCL	0,99863								
2º Critério									
A queda de tensão nos filtros para a frequência de 60 Hz apresentou valores percentuais maiores que nas simulações, no entanto isto se deve à redução do valor da componente fundamental, a qual é usada como referência para o cálculo do percentual.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Topologia</th> <th>Queda de Tensão (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>4,30</td> </tr> <tr> <td>LC</td> <td>4,73</td> </tr> <tr> <td>LCL</td> <td>4,10</td> </tr> </tbody> </table>	Topologia	Queda de Tensão (%)	L	4,30	LC	4,73	LCL	4,10
Topologia	Queda de Tensão (%)								
L	4,30								
LC	4,73								
LCL	4,10								
3º Critério									
Na análise dos filtros com relação à TDH de tensão, as três topologias mantiveram o índice abaixo dos 5%, havendo um aumento pouco significativo, com relação ao esperado, nos valores para os filtros LC e LCL.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Topologia</th> <th>TDH (%) – Tensão</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>2,5</td> </tr> <tr> <td>LC</td> <td>1,8</td> </tr> <tr> <td>LCL</td> <td>1,9</td> </tr> </tbody> </table>	Topologia	TDH (%) – Tensão	L	2,5	LC	1,8	LCL	1,9
Topologia	TDH (%) – Tensão								
L	2,5								
LC	1,8								
LCL	1,9								
4º Critério									
As três topologias obtiveram resultados para a TDH de corrente dentro do limite de 5% definido pela NDU-013. Uma diferença relativa ao controle foi observada no filtro LCL, o qual mostrou maior sensibilidade à sintonia do controle.	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Topologia</th> <th>TDH (%) - Corrente</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>L</td> <td>2,2</td> </tr> <tr> <td>LC</td> <td>2,7</td> </tr> <tr> <td>LCL</td> <td>3,8</td> </tr> </tbody> </table>	Topologia	TDH (%) - Corrente	L	2,2	LC	2,7	LCL	3,8
Topologia	TDH (%) - Corrente								
L	2,2								
LC	2,7								
LCL	3,8								

Fonte: Autora

CONCLUSÃO

7 CONCLUSÃO

Este trabalho desenvolveu um estudo sobre estruturas de conexão de um sistema fotovoltaico com a rede de distribuição, tendo como foco a análise do desempenho de filtros passivos nas topologias L, LC e LCL na atenuação de componentes harmônicas em alta frequência.

No capítulo 2 foram explanadas metodologias de projeto encontradas na literatura, no qual foi possível observar uma diversidade de métodos para o cálculo dos elementos que integram os filtros. Diante dessa variedade, a definição do melhor método para elaboração das estruturas tornou-se objeto de investigação, junto à dinâmica característica de cada topologia.

Em sequência, particularidades referentes a cada topologia, em aplicações de conexão com a rede, foram explanadas de forma a destacar pontos críticos para cada estrutura, com base teórica apresentada no capítulo 3 e validada nos resultados de simulação.

Com base no conhecimento adquirido, foram projetados cinco filtros, sendo dois da topologia L, um da LC e três da LCL. Para sua avaliação foi desenvolvido em ambiente de simulação e experimental um sistema de geração fotovoltaico que foi conectado à rede através de cada um dos filtros analisados.

Segundo os critérios estabelecidos nesses projetos, inerentes a atuação dos filtros com relação ao fator de potência, queda de tensão no filtro, atenuação de harmônicas de corrente e atenuação de harmônicas de tensão, todas as topologias apresentaram resultados de simulação dentro do especificado pelos critérios, os quais foram embasados na NDU-013. Um fator a ser ressaltado entre as metodologias de projeto dos filtros é a obtenção de componentes com relevante diferença de valor para uma mesma topologia.

Para os resultados experimentais obtidos foi observada uma melhora na atuação dos filtros a medida que houve o aumento na potência de operação. No entanto, as considerações apresentadas a seguir estão baseadas principalmente nos resultados obtidos através da plataforma de simulação, visto que não foi possível a obtenção de resultados experimentais para os filtros, em sua potência nominal, em razão das limitações dos componentes eletrônicos da bancada experimental utilizada.

Desta forma, a validação dos resultados de simulação através de resultados experimentais fica como proposta para trabalhos futuros.

Para os filtros da topologia L, as correntes em suas saídas apresentaram TDHi abaixo do valor de 5%, definido em norma. Embora para a tensão no PAC, fosse esperada uma TDHv de maior valor que para as demais topologias, como observado nos resultados de simulação; a prática experimental apresentou uma tensão na saída do filtro com taxa de distorção abaixo dos 5%. Como fator desfavorável, a topologia L necessita de indutores de maior valor, conseqüentemente de maior volume e peso, para a obtenção de resultados aceitos por norma, na maioria das configurações de inversores. O uso dessa topologia se torna mais favorável para os casos em que o conversor trabalha com altas frequências de chaveamento ou para conversores que apresentem em sua saída um baixo índice de distorção harmônica, pois os dois fatores contribuem para a redução do valor da indutância.

O filtro LC apresenta melhor relação custo/benefício que o filtro L, pois com a inclusão do capacitor há uma melhora na atenuação para altas frequências, tanto para as componentes de corrente quanto para as de tensão. No entanto a susceptibilidade de sua frequência de ressonância à impedância da rede pode ocasionar problemas na conexão com a rede, desestabilizando o controle, além de dificultar o uso de métodos para o amortecimento do pico de ressonância, visto que o valor da frequência de ressonância pode alterar diante da variação da impedância da rede. Uma forma de contornar essa deficiência é a utilização de um transformador na conexão entre o filtro e a rede elétrica, o que proporciona o isolamento entre os dois, reduzindo a influência da impedância da rede sobre a estrutura, contudo essa prática resulta em um aumento no custo e volume da estrutura.

A topologia que apresentou a melhor relação custo benefício foi a LCL. Foram alcançados resultados de TDHi e TDHv dentro do especificado em norma para valores de indutância menores que os das demais topologias. O método de projeto do filtro LCL, apresentado por Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005) resultou em indutores menores que os encontrados pelos outros métodos para esta mesma topologia, no entanto os três filtros apresentaram resultados de acordo com os critérios estabelecidos para a qualidade da energia. Adicionado ao uso da metodologia proposta por Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005), o ajuste da relação $i(h_s)/v(h_s)$ para 2% aperfeiçoou o projeto do filtro, melhorando o resultado obtido. Um fator negativo

observado na prática experimental com relação à topologia LCL foi a sensibilidade da resposta do filtro de acordo com os parâmetros de sintonia do controle.

Durante o desenvolvimento deste estudo, mais dois temas se mostraram interessantes para o desenvolvimento de novos trabalhos. O primeiro relacionado à busca de uma solução para a instabilidade da frequência de ressonância no filtro LC, relativa à sua dependência da impedância da rede e o segundo tema está relacionado ao desenvolvimento de estratégias de controle que garantam a atuação dos filtros passivos, quando conectados em redes com a presença de harmônicas de tensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, V. H. A. **Otimização de Microprodução em Redes Inteligentes de Energia**. Dissertação de Mestrado, Universidade da Madeira, Centro de Competência das Ciências Exatas e da Engenharia, Funchal – Ilha da Madeira, março 2014.

ARAÚJO, R. D. **Projeto e Simulação de Filtros L e LCL para Interconexão de Inversor NPC Trifásico à Rede**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Ceará, março 2012.

BARBOSA, R. B. **Projeto de Filtro Passivo para Conexão de Conversores Fonte de Tensão ou Voltage Source Converters (VSCs) às Redes Elétricas**. Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Rio de Janeiro, fevereiro 2014.

BERNET, S.; PONNALURI, S.; TEICHMANN, R. **Design and Loss Comparison os Matrix Converters and Voltage-Source Converters for Modern AC Drives**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 49, n. 2, abril 2002.

BÜHLER, A. J.; KREZINGER, A. **Estudo do Coeficiente de Variação da Tensão de Circuito Aberto de Módulos Fotovoltaicos com a Temperatura a partir de Ensaios no Escuro**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, v. 11, 2007.

CARVALHEIRO, J.; CASTRO, R. **Power Conditioning Performance Analysis for a Fuel Cell Power Plant**. 9th Spanish-Portuguese Congress on Electrical Engineering, Marbella, 2005.

CRESESB **Energia Solar Fotovoltaica**. Disponível em: <http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=321>. Acesso em: 04/01/2017.

DAHONO, P. A. **A Control Method to Damp Oscillation in the Input LC Filter of AC-DC PWM Converters**. IEEE Power Electronics Specialists Conference, v. 4, p. 1630-1635, 2002.

ENERGISA; Norma de Distribuição Unificada (NDU-013). **Critérios para Conexão de Acessantes de Geração Distribuída ao Sistema de Distribuição da Energisa – Conexão em Baixa Tensão**, abril 2015.

ENSLIN, J. H. R.; HESKES, P. J. M. **Harmonic Interaction Between a Large Number of Distributed Power Inverters and the Distribution Network**. IEEE Transactions on Power Electronics, v.19, n. 6, novembro 2014.

E4360 USER'S GUIDE. **Keysight Technologies Series E4360 Modular Solar Array Simulator**, 2017.

FREITAS, D. N. S. **Controlo de um Inversor Monofásico para Ligação à Rede de um Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes**. Dissertação de Mestrado, Instituto

Politécnico de Bragança (IPB), Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Bragança, setembro 2013.

GABE, I. J. **Contribuição ao Controle de Inversores PWM Alimentados em Tensão Conectados à Rede através de Filtro LCL**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM-RS), 2008.

HARTMANN, L. **Otimização de Sistemas Fotovoltaicos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande – PB, 2007.

IRAM **Site HK Dazelone Eletronic**. Disponível em: <http://www.ecupart.com/sdp/1250141/4/pd-5577586/11833835-2608554/IRAM136-1060BS_IRAM136-1061A2_IRAMS10UP60A_IRAMS10.html>. Acesso em: 04/01/2017.

KEYSIGHT **Site da Keysight Technologies**. Disponível em: <<http://www.keysight.com/en/pd-1370006-pn-E4360A>>. Acesso em: 04/01/2017.

KJAER, S. B., PEDERSEN J. K.; BLAABJERG, F. **A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 41, n. 5, pp. 1292-1306, setembro/outubro 2005.

KOURO, S.; LEON, J. I.; VINNIKOV, D.; FRANQUELO, L. G. **Grid-Connected Photovoltaic Systems - An Overview of Recent Research and Emerging PV Converter Technology**. IEEE Industrial Electronics Magazine, março 2015.

KRUG, D.; MALINOWSKI, M.; BERNET, S. **Design and Comparison of Medium Voltage Multi-Level Converters for Industry Applications**. IEEE Industry Applications Conference, 2004.

LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; HANSEN, S. **Design and Control of LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 41, n. 5, setembro/outubro 2005.

MACHADO, S. J. M. **Uma Proposta de Controle com Alta capacidade de Rejeição Harmônica para Inversores Monofásicos Conectados à Rede Elétrica através de Filtro LCL Amortecido para Sistemas de Energia Renovável**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina - PR, 2016.

MALINOWSKI, M.; KAZMIERKOWSKI, M. P.; BERNET, S. **New simple Active Damping of Resonance in Three-Phase PWM Converter with LCL Filter**. IEEE International Conference on Industrial Technology, 2005.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Eletrônica de Potência: Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA**. 3 ed. rev., Florianópolis: Ed. dos Autores, 2011, 490 p.

MATOS, F. F.; SOUZA, C. V.; REZENDE, G. M.; TOLEDO, R. A. N.; SELEME, S. I.; SILVA, S. R. **Projeto e Construção de Filtro LCL para Conversores PWM**. Congresso Brasileiro de Automática (CBA), setembro 2010.

MELO, M. O. V. C. **Avaliação do Impacto da Qualidade de Energia Elétrica na Produção Industrial: Proposta de Metodologia.** Produto & Produção, v. 9, n. 3, p. 15-25, outubro 2008.

NARDI, C.; STEIN, C. M. O.; CARATI, E. G.; COSTA, J. P.; CARDOSO, R. **A Methodology of LCL Filter Design for Grid-Tied Power Converters.** Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) e Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2015.

NAMBOODIRI, A.; WANI, H. S. **Unipolar and Bipolar PWM Inverter.** International Journal for Innovative Research in Science & Technology (IJIRST), v.1, dezembro 2014.

PATEL, Y. P.; WEI, L.; NASIRI, A. **LCL Filter Resonance Mitigation Technique for Voltage Source Converters.** International Conference on Renewable Research and Applications, outubro 2014.

PAUKNER, F. L.; NARDI, C.; CARATI, E. G.; STEIN, C. M. O., CARDOSO, R.; COSTA, J. P. **Inductive Filter Design for Three-Phase Grid Connected Power Converters.** IEEE Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) e Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2015.

PRODANOVIC, M.; GREEN, T. C. **Control and Filter Design of Three-Phase Inverters for High Power Quality Grid Connection.** IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 18, no. 1, janeiro 2003.

SAMPAIO, L. P. **Controle da Injeção de Potências Ativa e Reativa em Inversor de Geração Distribuída Conectado à Rede de Distribuição em Corrente Alternada em Baixa Tensão, empregando LMIs com Realimentação de Estados e Critérios de D-estabilidade.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia UNESP, Campus de Ilha Solteira-SP, 2013.

SAMUEL, A. N.; NEVES, F. A. S.; CABRAL, M. **Projeto de Filtro Passivo para Conexão de Conversores de Frequência a Sistemas Elétricos de Potência.** IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON), 2006.

SANTOS JR., F. A. F. **Modelagem, Análise e Experimentação de Sistema Fotovoltaico Isolado Baseado em Plataforma de Simulação de Blocos.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba – PB, 2016.

SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE. **Qualidade de Energia – Harmônicas.** Workshop Instalações Elétricas de Baixa Tensão, março 2013.

SITE G1. **Abu Dhabi constrói cidade do futuro, com tudo movido a energia solar** Disponível em: <<http://g1.globo.com/globo-reporter/noticia/2016/04/abu-dhabi-constrói-cidade-do-futuro-com-tudo-movido-energia-solar.html>> Acesso em: 10/12/2016.

SOBREIRA JR., P. A. **Conversor CC-CC Boost Entrelaçado Aplicado no Processamento de Energia de Arranjo Solar Fotovoltaico.** Dissertação de Mestrado Universidade Federal do Juiz de Fora, 2011.

VIEIRA, R. P.; STEFANELLO, M.; TAMBARA, R. V.; GRUNDLING, H. A. **Controle de Corrente por Modos Deslizantes e Abordagem Multi-Malhas para Conversores com Filtro LCL.** XX Congresso Brasileiro de Automática Belo Horizonte, MG, 20 a 24 de Setembro de 2014.

ZMOOD, D. N.; Holmes, D. G. **Stationary Frame Current Regulation of PWM Inverters With Zero Steady-State Error.** IEEE Transactions on Power Electronics, v. 18, n. 3, maio 2003.

IRENA. **Renewable Energy Statistics 2017.** The International Renewable Energy Agency, ISBN 978-92-9260-033-4, Abu Dhabi, 2017.

REN21. **Renewables 2017 Global Status Report.** ISBN 978-3-9818107-6-9, Paris, 2017.

APÊNDICE

APÊNDICE

Projeto dos Filtros - Cálculos

Nesta seção serão apresentados os cálculos dos componentes que formam a estrutura dos filtros cujo desempenho foi analisado nesse estudo.

Projeto do Filtro L

Os parâmetros necessários para o projeto do Filtro L utilizando as metodologias apresentadas no tópico 4.3.1, se encontram na tabela a seguir:

Tabela 11 - Parâmetros de projeto para os filtros L

Tensão no PAC (V_{PSC})	220 V
Frequência de Chaveamento (f_s)	10 kHz
Potência Injetada na Rede (S)	1 kVA
Tensão no Barramento CC (V_{CC})	400 V

Fonte: Autora

Para o caso do Filtro L, o cálculo de sua indutância foi iniciado com a utilização do segundo método explanado, pois o parâmetro obtido em sua 3ª etapa foi utilizado no primeiro método.

Cálculos - Método 02 - Filtro L1

1 - Inicialmente foi calculada a corrente que será injetada na rede pelo sistema fotovoltaico:

$$I_{1_{rms}} = \frac{S}{V_{PAC}}$$

$$I_{1_{rms}} = \frac{1000}{220} = 4,54 \text{ A}$$

2 – Após obter esse valor, tomando como base uma TDH de 5%, foi possível determinar a parcela dessa corrente que é responsável pela ondulação do sinal de corrente, ou seja, a parcela que está distribuída entre as componentes harmônicas.

$$I_{h_{rms}} = THD I_{1_{rms}}$$

$$I_{h_{rms}} = 0,05 \cdot 4,54 = 0,227 \text{ A}$$

3 – Os valores obtidos nas duas etapas anteriores são valores RMS, desta forma para calcular o valor de pico da ondulação foi considerada a pior condição, que é a de conceituar a ondulação como um sinal triangular, ficando o cálculo de sua amplitude dado por:

$$\Delta I_p = I_{h_{rms}} \sqrt{3}$$

$$\Delta I_p = 0,227 \sqrt{3} = 0,394 \text{ A}$$

4 - O último parâmetro necessário para o cálculo da indutância nesse método é o índice de modulação.

$$m = \frac{V_{PAC} \sqrt{2}}{V_{CC}}$$

$$m = \frac{220 \sqrt{2}}{400} = 0,78$$

5 – Para a obtenção do valor da indutância foi utilizada a equação a seguir, a qual correlaciona os parâmetros calculados nas etapas anteriores.

$$L = \frac{m V_{DC} (1 - m)}{\Delta I_p 2f_s}$$

$$L = \frac{0,78 \cdot 400 \cdot (1 - 0,78)}{0,394 \cdot 2 \cdot 10000} = 8,7 \text{ mH}$$

6 – Queda de tensão teórica

Para o cálculo da queda teórica de tensão no indutor, inicialmente foi calculada a reatância do indutor para a frequência da fundamental.

$$X_L = 2\pi f_r L_i = 2\pi \cdot 60 \cdot 8,7m = 3,28\Omega$$

Em seguida é calculada a corrente que passa pelo indutor.

$$I = \frac{S}{V_{PAC}} 0,95 = \frac{1000}{220} 0,95 = 4,32 A$$

Portanto, a queda de tensão teórica será de:

$$\Delta V = R I = 3,28 \cdot 4,32 = 14,17 V$$

Cálculos - Método 01 - Filtro L2

No primeiro método, o valor da indutância do Filtro L pode ser obtido através da substituição direta dos parâmetros na equação a seguir:

$$L = \frac{V_{pac}}{2\sqrt{6}f_s\Delta I_p}$$

O valor de pico da corrente de ondulação foi obtido na etapa 3 do método 02, desta forma ΔI_p (método 01) = ΔI_p (método 02), ou seja:

$$\Delta I_p = 0,394 A$$

Portanto:

$$L = \frac{220}{2\sqrt{6} \cdot 10000 \cdot 0,394}$$

$$L = 11,4 mH$$

Queda de tensão teórica

Para o cálculo da queda teórica de tensão no indutor, inicialmente foi calculada a reatância do indutor para a frequência da fundamental.

$$X_L = 2\pi f_r L_i = 2\pi \cdot 60 \cdot 11,4m = 4,30\Omega$$

Em seguida é calculada a corrente que passa pelo indutor.

$$I = \frac{S}{V_{PAC}} 0,95 = \frac{1000}{220} 0,95 = 4,32 A$$

Portanto, a queda de tensão teórica será de:

$$\Delta V = R I = 4,30 \cdot 4,32 = 18,6 V$$

Projeto do Filtro LC

Para o projeto do filtro LC, a metodologia seguida foi a apresentada no tópico 4.3.2 e aplicada segundo a sequência a seguir:

Tabela 12 - Parâmetros de projeto para o filtro LC

Tensão no PAC (V_{rms})	220 V
Frequência de Chaveamento (f_s)	10 kHz
Potência Injetada na Rede (S)	1 kVA
Frequência da Rede (f_r)	60 Hz
Fator de Potência ($\cos \phi$)	1
Fator de Amortecimento (ζ)	1

Fonte: Autora

1 – Definição da frequência de corte:

A frequência de corte foi definida com referência no limite inferior do intervalo estabelecido no critério 2, que se encontra na frequência de 1800 Hz. Embora o limite

superior seja definido uma década abaixo da frequência de chaveamento, o limite inferior superou esse valor, desta forma o valor escolhido para a frequência de corte foi de 2kHz, estando esse valor acima do limite mínimo e a uma distância aceitável da frequência de chaveamento.

$$f_c = 2 \text{ kHz}$$

2 – Cálculo da impedância da carga:

$$R_0 = \frac{V_{rms}^2}{S} \cos \phi = \frac{220^2}{1000} \cdot 1 = 48,4 \Omega$$

3 – Cálculo da capacitância de filtragem:

$$C = \frac{1}{4\pi \zeta f_c R_0} = \frac{1}{4\pi \cdot 1 \cdot 2000 \cdot 48,4} = 0,82 \mu F$$

4 – Cálculo da indutância de filtragem:

$$L_i = 4R_0^2 \zeta^2 C = 4 \cdot 48,4^2 \cdot 1^2 \cdot 0,82 \mu = 7,68 \text{ mH}$$

5 – Cálculo da frequência de ressonância:

$$f_{ress} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_i C}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{7,68 \text{ m} \cdot 0,82 \mu}} = 2005,7 \text{ Hz}$$

6 – Queda de tensão teórica

Para o cálculo da queda teórica de tensão no indutor, inicialmente foi calculada a reatância do indutor para a frequência da fundamental.

$$X_L = 2\pi f_r L_i = 2\pi \cdot 60 \cdot 7,68 \text{ m} = 2,89 \Omega$$

Em seguida é calculada a corrente que passa pelo indutor.

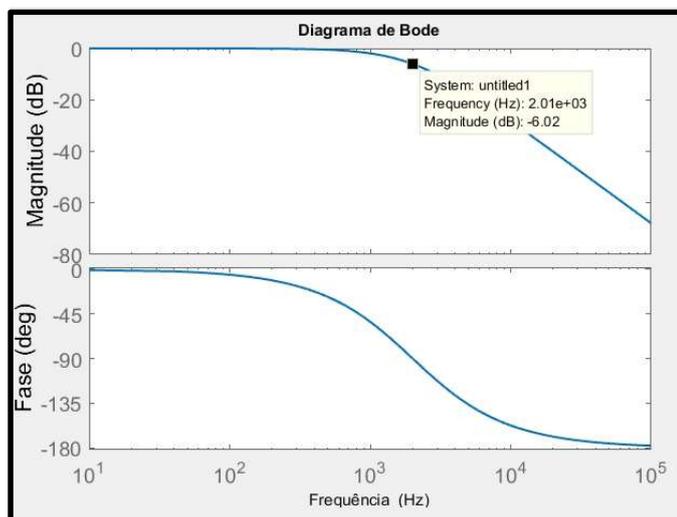
$$I = \frac{S}{V_{PAC}} \cdot 0,95 = \frac{1000}{220} \cdot 0,95 = 4,32 \text{ A}$$

Portanto, a queda de tensão teórica será de:

$$\Delta V = R I = 2,98 \cdot 4,32 = 12,87 \text{ V}$$

7 – Diagrama de Bode do Filtro LC

Figura 59 - Diagrama de bode do filtro LC projetado



Fonte: Autora

Projeto do Filtro LCL

No projeto dos filtros LCL utilizados em nosso estudo, com o objetivo de avaliar seu desempenho, os cálculos foram realizados de acordo com os passos definidos para cada metodologia apresentada no tópico 4.3.3.

Na tabela 8 estão descritas as informações necessárias, sobre o sistema de geração fotovoltaico, para a determinação dos valores dos componentes dos filtros.

Tabela 13 - Parâmetros de projeto para os filtros LCL

Tensão no PAC (V_{PAC})	220 V
Tensão no Capacitor (V_{Crms})	220 V
Frequência de Chaveamento (f_s)	10 kHz
Potência Injetada na Rede (S)	1 kVA
Tensão no Barramento CC (V_{CC})	400
Frequência da Rede Elétrica (f_r)	60 Hz

Fonte: Autora

Método 1

No primeiro método, o cálculo do indutor do lado do conversor é idêntico ao cálculo utilizado para projetar o filtro indutivo L2, utilizando a seguinte equação:

$$L = \frac{V_{PAC}}{2\sqrt{6}f_s\Delta I_p}$$

Portanto o valor de L_i para este filtro LCL é igual ao valor do indutor (L) para o filtro L2.

$$L_i = 11,4 \text{ mH}$$

O segundo passo é o cálculo da capacitância do filtro (C) através do valor da capacitância base, sendo o valor máximo de C igual a 5% de C_b .

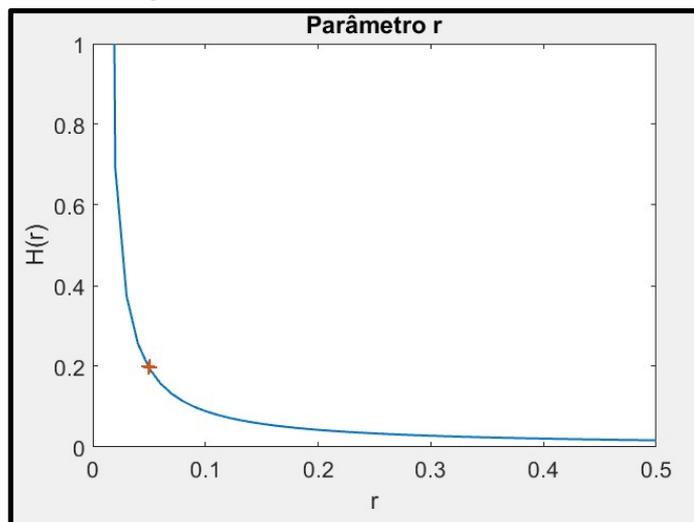
$$C_b = \frac{S}{2\pi f_r V_{PAC}^2} = \frac{1000}{2\pi \cdot 60 \cdot 220^2} = 54,8 \mu F$$

$$C = 0,05 C_b = 2,74 \mu F$$

Para o cálculo da indutância do lado da rede (L_g), é preciso definir primeiramente o parâmetro r que define a relação entre L_g e L_i . Para isto, é necessário encontrar o valor de r para o qual a relação abaixo assuma um valor de 20%.

$$H(r) = \frac{I_{Hrede}}{I_h} = \frac{1}{|1 + r(1 - L_i C (2\pi f_s)^2)|} = 0,2$$

Figura 60 - Parâmetro r do filtro LCL - 1



Fonte: Autora

No gráfico da Figura 60, o valor de r para um $H(r)$ igual a 20% é de 0,05, logo o valor de L_g pode ser obtido através da sua relação com L_i .

$$L_g = r L_i = 0,05 \cdot 11,4 \text{ mH} = 0,57 \text{ mH}$$

Para o cálculo da frequência de ressonância do filtro projetado, é utilizada a equação a seguir:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i C L_g}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{11,4\text{m} + 0,57\text{m}}{11,4\text{m} \cdot 2,74\mu \cdot 0,57\text{m}}} = 4,13 \text{ kHz}$$

Embora a frequência de ressonância esteja na faixa indicada para não haver problemas com relação às frequências das harmônicas ou da fundamental, foi inserida uma resistência física no valor de 1/3 da reatância do capacitor para a frequência de ressonância, com o objetivo de amortecer o pico de ressonância. Sendo a frequência de ressonância (f_{ress}) igual a 4,13 kHz, X_c é dado por:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f_{ress} C} = \frac{1}{2\pi \cdot 4,13\text{k} \cdot 2,74\mu} = 14,06\Omega$$

Desta forma:

$$R_D = \frac{X_c}{3} = 4,7\Omega$$

Método 2

Os passos do método 2 se diferenciam do método 1 apenas na definição do indutor do lado do conversor, que de acordo com Liserre, Blaabjerg e Hansen (2005), pode ser calculado segundo a seguinte equação:

$$L_i = \frac{1}{2\pi f_s \cdot 0,02} = \frac{1}{2\pi \cdot 10\text{k} \cdot 0,02} = 0,79 \text{ mH}$$

Após obter o valor de L_i no primeiro passo, as etapas seguintes são todas iguais as do método 1.

Passo 2 – Cálculo do capacitor

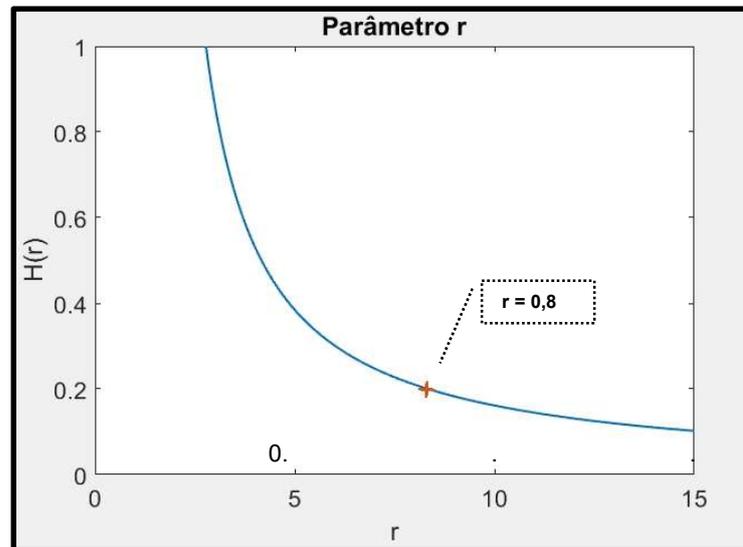
$$C_b = \frac{S}{2\pi f_r V_{PAC}^2} = \frac{1000}{2\pi \cdot 60 \cdot 220^2} = 54,8 \mu F$$

$$C = 0,05 C_b = 2,74 \mu F$$

Passo 3 – Definição do parâmetro r

$$H(r) = \frac{I_{Hrede}}{I_h} = \frac{1}{|1 + r(1 - L_i C (2\pi f_s)^2)|} = 0,8$$

Figura 61 - Parâmetro r do filtro LCL - 2



Fonte: Autora

Passo 4 - Definição do indutor do lado da rede (L_g)

$$L_g = r L_i = 0,8 \cdot 0,79 \text{ mH} = 0,63 \text{ mH}$$

Passo 5 – Cálculo da frequência de ressonância

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_i + L_g}{L_i C L_g}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{0,79\text{m} + 0,63\text{m}}{0,79\text{m} \cdot 2,74\mu \cdot 0,63\text{m}}} = 5,14 \text{ kHz}$$

Passo 6 – Cálculo da resistência de atenuação do pico de ressonância

$$R_D = \frac{1}{3} X_c = \frac{1}{3} \frac{1}{2\pi f_{ress} C} = \frac{1}{3} \frac{1}{2\pi \cdot 5,14k \cdot 2,74\mu} = 3,8\Omega$$

Método 3

Como sugerido no método 03, o primeiro passo foi projetar um filtro LC compatível com o sistema fotovoltaico de geração de energia retratado na plataforma de simulação (ambiente *Simulink*). A sequência de projeto utilizada por Sampaio (2013) para obtenção dos valores dos componentes do filtro LC não foi claramente exposta em seu texto, portanto optou-se por seguir a metodologia proposta por Denizar Cruz Martins e Ivo Barbi no livro “Introdução ao Estudo dos Conversores”.

Os valores dos componentes L_i e C para este método foram calculados no tópico “Projeto do Filtro LC” na página 103 deste apêndice, portanto foram adotados os mesmos valores definidos para a topologia LC.

$$L_i = 7,68mH \quad e \quad C = 0,82\mu F$$

Para a definição do indutor L_g , inicialmente foi definido o valor mínimo da indutância para garantir a estabilidade do sistema, que é dado pela equação:

$$L_g \geq \frac{100}{\pi f_a}$$

Na equação a seguir o parâmetro f_a está relacionado com a frequência de amostragem, que para o DSP TMS320F28335 é de 100kHz.

$$L_g \geq \frac{100}{\pi f_a} = \frac{100}{\pi \cdot 100k} = 0,32mH$$

Após a definição do valor mínimo, a indutância de conexão com a rede é definida pela equação abaixo:

$$L_g = \frac{V_{C_{rms}} V_{rms}}{2\pi f_r P_{at}} \sin(\delta)$$

O parâmetro θ é o ângulo para máxima transferência de potência, portanto para um fator de potência unitário tem-se:

$$\theta = \text{acos}(0.999) = 2,56 \text{ graus}$$

Desta forma, o passo seguinte é a substituição dos valores na equação para a obtenção do valor de L_g .

$$L_g = \frac{V_{C_{rms}} V_{r_{rms}}}{2\pi f_r P_{at}} \sin(\theta) = \frac{220 \ 220}{2\pi \ 60 \ 1000} \sin(2,56) = 5,74 \text{mH}$$