

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Gilvan da Silva Alves Júnior

**ESTRUTURAS DE CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA E
CONTROLE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

João Pessoa – PB
Novembro de 2016

GILVAN DA SILVA ALVES JÚNIOR

**ESTRUTURAS DE CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA E
CONTROLE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como um dos
pré-requisitos para a obtenção do título de
Engenheiro Eletricista sob orientação dos
Profs. Darlan Alexandria Fernandes e Rogério
Gaspar de Almeida.*

João Pessoa - PB

Novembro de 2016

JÚNIOR, Gilvan da Silva Alves

Estruturas de Conexão com a Rede Elétrica e Controle de
Sistemas Fotovoltaicos

63 f. il.

Orientadores: Prof. Darlan Alexandria Fernandes, Dr e Prof.
Rogério Gaspar de Almeida, Dr.

Trabalho de Conclusão de Curso, 2016

1. Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede. 2. Controle. 3. Filtro
LCL.

GILVAN DA SILVA ALVES JÚNIOR

ESTRUTURAS DE CONEXÃO COM A REDE ELÉTRICA E CONTROLE DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal da Paraíba como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do título de Engenheiro
Eletricista.*

Aprovado em: **10/11/2016**

Prof. Dr. Darlan Alexandria (Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Rogério Gaspar de Almeida (Coorientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Alexandre César de Castro (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Fabiano Salvadori (Avaliador)
Universidade Federal da Paraíba

João Pessoa, Paraíba
Novembro de 2016

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus que sempre iluminou meu caminho e nunca me deixou desistir.

À minha família, em especial meus pais Gilvan e Maria José, que nunca mediram esforços para oferecer o melhor para seus filhos e que sempre depositaram total apoio e confiança aos meus projetos, sendo fonte de motivação e inspiração.

A minha irmã Camilla e minha namorada Jessica, que dividiram comigo os bons e maus momentos, sendo fonte de compaixão e segurança que muito colaboraram não apenas na realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Darlan Alexandria Fernandes pela paciência e competência com que orientou o meu trabalho de conclusão de curso e o tempo que generosamente me dedicou ensinando-me da melhor forma, sempre com muita clareza e compreensão.

Ao Professor Dr. Rogerio Gaspar de Almeida pela coorientação neste trabalho e pelas grandes contribuições deste no meu amadurecimento profissional.

À Tatiana pelas importantes contribuições e as várias horas de sono abdicadas, junto a mim, para colaborar com este trabalho. Deixo aqui toda minha gratidão e admiração.

Aos meus colegas de curso que sempre estiveram ao meu lado, em especial, Filipe, Paulo, Jonathan, Eduardo, Gabriel, Ramilo, Marcos, Lucas, Jessica, Higor, Wolney, Vanessa, Marcelo, Weyber, Thiago e todos os outros que fizeram parte da minha vida acadêmica. Foram anos inesquecíveis cujo apoio e companheirismo permitiram concluir este trabalho.

Por fim, gostaria de expressar neste espaço mais sinceros agradecimentos a todos aqueles que me transmitiram confiança, ajuda, carinho, amizade e que serviram de exemplo, onde pude encontrar força e inspiração para finalizar este trabalho.

Obrigado!

RESUMO

JUNIOR, Gilvan da Silva Alves. **Estruturas de conexão com à rede elétrica e controle de sistemas fotovoltaicos**. 2016. 63f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica – Área: Sistemas de Energia) – Universidade Federal da Paraíba, CEAR- Centro de Energias Alternativas e Renováveis, João Pessoa, 2016.

Este trabalho propõe o projeto de um filtro LCL para conexão de um sistema fotovoltaico com a rede elétrica, via simulação computacional. O objetivo é de filtrar as componentes de alta frequência produzidas pela comutação das chaves semicondutoras do lado do inversor de tensão, filtrar componentes harmônicas do lado da rede, e ainda, permitir a correta injeção de corrente do sistema PV à rede elétrica. O filtro LCL implementado é parte integrante do sistema fotovoltaico, que é composto por: conversor *push-pull* e um inversor CC-CA ponte completa monofásico. Este sistema opera combinado com a rede, isto é, quando o sistema fotovoltaico produz potência maior que a demanda da carga, o excedente é injetado na rede elétrica. O que se pode observar também é quando o sistema não produz energia suficiente para a carga, a rede supre a demanda, tornando assim o sistema híbrido com fluxo de potência bidirecional. Todas as simulações foram realizadas por meio do software comercial *Matlab/Simulink*[®].

Palavras-Chaves: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede; Filtro LCL; Harmônicos.

ABSTRACT

JUNIOR, Gilvan da Silva Alves. **Connection with the structures and control of photovoltaic systems.** 2016.631. Monograph (Electrical Engineering–Area: Energy Systems) – Federal University of Paraíba, CEAR- Center for Alternative and Renewable Energies, João Pessoa, 2016.

This paper proposes the design of an LCL filter for the connection of a photovoltaic system to the electric grid, via computer simulation. The goal is to filter the high-frequency components produced by switching semiconductor keys on the side of the inverter, filter harmonic components of the side of the grid, and still allow the correct current injection PV system to the mains. The LCL filter implemented is an integral part of the photovoltaic system, which consists of: push-pull converter, DC-AC Inverter full bridge single-phase and the power grid. This system operates combined with the network, that is, when the PV system produces power greater than the demand, the surplus is injected into the power grid. What can be seen is also when the system does not produce enough energy to the load, the network supplies the demand, thus making the hybrid system with bi-directional power flow. All simulations were performed by using commercial software *Matlab/Simulink*[®].

Keywords: Photovoltaic System. Control. Single-Phase Full Bridge Inverter. Harmonics

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Sistema de Energia Fotovoltaico Conectado à Rede | 7 |
| Figura 2: Diagrama de blocos do sistema fotovoltaico | 8 |
| Figura 3: Módulo PV Kyocera Solar KD 325 GX-LPB | 9 |
| Figura 4: Curva característica do Painel Fotovoltaico | 10 |
| Figura 5: Conversor Push-Pull Alimentado em Corrente | 11 |
| Figura 6: Sinais de Comando das Chaves | 12 |
| Figura 7: Etapas de operação do Conversor Push-Pull | 12 |
| Figura 8: Painel fotovoltaico conectado ao conversor push-pull | 13 |
| Figura 9: Inversor Ponte Completa | 14 |
| Figura 10: Circuito equivalente monofásico do Filtro L | 16 |
| Figura 11: Filtro LCL | 17 |
| Figura 12: Representação da carga modelada no sistema fotovoltaico | 19 |
| Figura 13: Modelo da Rede Elétrica | 19 |
| Figura 14: Sistema Completo | 22 |
| Figura 15: Diagrama de Blocos do Sistema Implementado controlado pelo MPPT | 23 |
| Figura 16: Representação do Controle de Máxima Potência no Matlab/Simulink® | 24 |
| Figura 17: Malha de Controle do Inversor Monofásico no Matlab/Simulink® | 25 |
| Figura 18: Relação da atenuação harmônica na frequência de comutação e a razão entre os indutores | 29 |
| Figura 19: Resposta em frequência do Filtro LCL e do Filtro L | 30 |
| Figura 20: Diagrama de Bode do Filtro LCL Projetado | 30 |
| Figura 21: Sinal de Saída sem Filtro | 33 |
| Figura 22: Tensão na carga com o sistema sem filtro de conexão | 34 |
| Figura 23: Destaque do Filtro L conectado ao sistema | 34 |
| Figura 24: a) Sinal de Saída do Filtro L; b) Destaque do Sinal de Saída | 35 |
| Figura 25: a) FFT do sinal de entrada; b) FFT do sinal de saída | 35 |
| Figura 26: Tensão na carga com Filtro L | 36 |
| Figura 27: a) Sinal de Saída do Filtro L=20 mH; b) Destaque do Sinal de Saída do Filtro L=20mH | 37 |

| | |
|--|----|
| Figura 28: a) Tensão na carga Filtro L=20 mH; b) Destaque da Tensão na carga Filtro L=20 mH..... | 37 |
| Figura 29: a) Sinal de entrada do Filtro LCL; b) Sinal de saída do Filtro LCL | 38 |
| Figura 30: Efeito do Filtro LCL com respectiva análise FFT | 39 |
| Figura 31: Destaque no Sinal de Saída do Filtro LCL..... | 40 |
| Figura 32: Tensão na carga com o Filtro LCL | 40 |
| Figura 33: Corrente de saída do inversor e Tensão da rede | 41 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Características Elétricas do Módulo PV Kyocera Solar KD 325 GX-LPB | 9 |
| Tabela 2: Características elétricas do conversor push-pull | 13 |
| Tabela 3: Parâmetros do sistema para o projeto do Filtro LCL | 27 |
| Tabela 4: Análise comparativa entre o Filtro LCL e o Filtro L..... | 31 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 | MOTIVAÇÃO..... | 2 |
| 1.2 | PROPOSTA DE TRABALHO | 2 |
| 1.3 | ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO | 2 |
| 2 | CONCEITOS E DEFINIÇÕES..... | 4 |
| 2.1 | ENERGIA SOLAR PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE | 4 |
| 2.2 | SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA..... | 5 |
| 2.3 | PRINCIPAIS COMPONENTES DO SISTEMA..... | 7 |
| 2.3.1 | Painel Fotovoltaico | 8 |
| 2.3.2 | Conversor CC/CC <i>Push-Pull</i> | 10 |
| 2.3.3 | Inversor CC/CA Monofásico..... | 14 |
| 2.3.4 | Filtros de Conexão..... | 15 |
| 2.4 | CARGA..... | 18 |
| 2.5 | REDE ELÉTRICA | 19 |
| 2.6 | SISTEMA COMPLETO | 20 |
| 3 | TÉCNICAS DE CONTROLE | 22 |
| 3.1 | CONTROLE DO CONVERSOR <i>PUSH-PULL</i> | 22 |
| 3.2 | CONTROLE DO INVERSOR MONOFÁSICO | 24 |
| 4 | PROJETO DO FILTRO LCL..... | 26 |
| 4.1 | METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO LCL | 26 |
| 5 | ANÁLISE DE RESULTADOS..... | 32 |
| 5.1 | RESULTADOS DE SIMULAÇÃO..... | 32 |
| 5.1.1 | Topologia Sem Filtro | 33 |
| 5.1.2 | Filtro L..... | 34 |
| 5.1.3 | Filtro LCL | 38 |
| 6 | CONCLUSÕES..... | 42 |
| 7 | PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 44 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 45 |
| 9 | APÊNDICE | 48 |

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fontes de energia tradicionais, tais como combustíveis fósseis e energia nuclear, perpetuam uma série de problemas ambientais (por serem altamente poluidoras), sociais e políticos. Devido a constante demanda energética do setor industrial, e o aumento na utilização de equipamentos elétricos, numa diversidade de atividades humanas, fizeram com que a procura por energia elétrica aumentasse de forma exponencial nas últimas décadas. Assim nasce a necessidade de novas formas de obtenção da energia elétrica, em especial, a energia solar fotovoltaica. Essa fonte apresenta uma capacidade única de oferecer soluções tanto para instalações de grande porte (grande usinas solares) quanto para geração distribuída (sistemas solares instalados em telhados de casas e empresas).

Geração Distribuída é uma expressão usada para designar a geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor(es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia. As tecnologias de geração distribuída têm evoluído para incluir potências cada vez menores. A geração distribuída inclui: Co-geradores, geradores que usam como fonte de energia resíduos combustíveis de processo, geradores de emergência, geradores para operação no horário de ponta, painéis fotovoltaicos e pequenas centrais hidrelétricas - PCH's [1].

Em termos gerais, a energia fotovoltaica pode ser utilizada para abastecer a demanda de eletricidade em qualquer região quando conectados à rede. Isto, se estiver de acordo com a Resolução normativa da ANEEL nº 482/2012¹.

Para análise do comportamento de módulos fotovoltaicos conectados à rede, utiliza-se modelos computacionais como ferramentas importantes. Através de simulações e testes em laboratório é possível monitorar variáveis como: tensão e corrente na entrada e saída do inversor, tensão e frequência da rede e a energia convertida.

A conexão de um sistema fotovoltaico com a rede elétrica pode ser realizada de diferentes formas, no tocante aos circuitos passivos [2] [3]. A escolha de uma topologia em conjunto com o controle adequado, podem melhorar o desempenho de funcionamento do

¹ Normatiza as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica.

sistema, principalmente em relação às perdas, ou seja, é importante que o conjunto topologia-controle deva operar com fator de potência elevado.

1.1 Motivação

Os sistemas de geração de energia elétrica têm se tornado cada vez mais descentralizados devido à expansão das gerações de energia renováveis na matriz elétrica. Assim, existe uma real preocupação com a forma que estes sistemas se conectam com a rede, pois o desempenho da inserção da potência depende tanto das estruturas de circuitos propostos para os filtros situados entre os inversores de tensão e a rede elétrica, bem como o sistema de controle que são escolhidos 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 utilizada no sistema proposto.

1.2 Proposta de Trabalho

Desta forma, este trabalho visa comparar topologias de filtros de conexão com a rede e implementar, a partir de modelização e simulação computacional, um sistema fotovoltaico interligado à rede elétrica. Assim, torna-se necessário realizar o estudo dos componentes que compõe o sistema fotovoltaico proposto, bem como suas técnicas de controle.

1.3 Organização do Trabalho

Este trabalho desenvolvido é aqui apresentado com a seguinte estrutura:

No capítulo 1, faz-se uma introdução sobre o panorama atual da energia solar fotovoltaica, a motivação do trabalho, objetivos e a apresentação da estrutura do texto.

No capítulo 2, é apresentado uma breve introdução sobre energia solar para geração de eletricidade, o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica e a descrição dos principais componentes que compõe o sistema proposto, bem como o comparativo entre duas topologias de conexão: Filtro LC e o Filtro LCL.

No capítulo 3, são abordados brevemente o controle utilizado para o conversor *push-pull* de corrente e o controle do inversor monofásico ponte completa. Onde o primeiro utiliza a técnica do rastreamento do ponto máximo de potência, através do algoritmo perturba e observa, e o segundo utiliza dois controladores: para o controle do barramento CC utiliza-se o proporcional integral (PI) e para o controle da corrente de saída do inversor utiliza-se o proporcional ressonante (PR).

No capítulo 4, são descritas a metodologia e as etapas do projeto do filtro LCL passivo ressonante que compõe o sistema fotovoltaico completo.

No capítulo 5, são apresentados as principais análises dos resultados de simulação obtidos para cada topologia de conexão com a rede elétrica do sistema fotovoltaico completo proposto. De posse dos resultados obtidos, pode-se então analisar as formas de onda na carga.

Finalizando, no capítulo 6, são apresentados as conclusões deste trabalho, desempenhando a análise sobre o projeto do filtro LCL e a previsão de trabalhos futuros.

2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Neste capítulo são abordados, de maneira introdutória, conceitos sobre energia solar fotovoltaica e os sistemas fotovoltaicos (categorias e aplicações). Assim como, trabalhos literários que serviram como base para consolidar o embasamento teórico para confecção deste trabalho. Face o exposto, faz-se necessário o estudo dos componentes que compõe o sistema fotovoltaico proposto, descritos neste capítulo, que consiste em: módulo solar, conversor *push-pull*, inversor ponte completa monofásico, filtro e rede elétrica.

2.1 Energia Solar para Geração de Eletricidade

Diariamente incide sobre a superfície da terra mais energia vinda do sol do que a demanda total de todos os habitantes de nosso planeta em todo um ano. Dentre as diversas aplicações da energia solar, a geração direta de eletricidade através do efeito fotovoltaico se apresenta como uma das mais elegantes formas de gerar potência elétrica [4].

Em aplicações terrestres, com a propagação da radiação solar na atmosfera, ocorre o espalhamento e a absorção de parte dessa radiação, o que resulta em aproximadamente em 1.000 W/m², de irradiância, em um dia sem nuvens, sendo esse valor considerado no dimensionamento de sistemas solares para a geração de eletricidade [5]. Em termos de aplicações terrestres, dentre os diversos semicondutores utilizados para produção de células solares fotovoltaicas, destacam-se por ordem decrescente de maturidade e utilização o silício cristalino (c-Si); o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou simplesmente a-Si); o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre (gálio) e índio (CuInSe₂ ou CIS e Cu(InGa)Se₂ ou CIGS) [4].

A célula fotovoltaica é um mecanismo elétrico que converge a energia proveniente da luz solar diretamente em energia elétrica (efeito fotovoltaico). Essas células são dispostas eletricamente em arranjos série ou em paralelo com intuito de construir um módulo fotovoltaico. Para gerar a energia requerida pela carga, módulos são associados (formando um painel FV) a fim de obter-se o nível de tensão e corrente desejados [6]. A geração fotovoltaica é dada com o uso de módulos fotovoltaicos planos (mais comuns) ou com o uso de módulos fotovoltaicos concentradores [7]. Isto é, os painéis estão conectados a estruturas de controle e

a conversores estáticos que processam esta energia enviam para inversores que disponibilizam para uma carga ou para a rede elétrica.

Os sistemas fotovoltaicos são divididos em três categorias com aplicações distintas, são elas:

- **Sistemas Isolados (SFI):** frequentemente utilizados em locais com difícil acesso a rede elétrica (ou sem acesso), e necessitam de banco de baterias;
- **Sistemas Híbridos (SFH):** é um sistema capaz de aproveitar simultaneamente recursos solares (módulos fotovoltaicos) e outra fonte de energia renovável. O mais utilizado é o sistema híbrido solar-eólico;
- **Sistemas Conectados à Rede (SFCR):** basicamente formado por um painel fotovoltaico e um inversor. Dispensa o uso de banco de baterias e contribuem para geração descentralizada de energia elétrica (geração distribuída).

O objeto de estudo deste trabalho foram os sistemas conectados à rede elétrica (SFCR).

2.2 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

O sistema de geração de energia fotovoltaica conectado à rede elétrica surge como fonte complementar ao sistema elétrico ao qual está conectado. Tem a vantagem de uma utilização mais eficaz da energia gerada, dispensando o uso de bancos de baterias e não poluindo o meio ambiente. No modelo mais comum utilizado, estes sistemas são instalados de tal maneira, quando o painel FV gera mais energia do que a carga necessita, o excesso é injetado na rede elétrica. Ou seja, a concessionária local emite um crédito de energia válido por até 60 meses conforme as regras estabelecidas pela Resolução ANEEL nº 482/2012.

Existem basicamente dois grandes grupos de SFCR: as grandes centrais fotovoltaicas e os SFCE de pequena e média potência, geralmente integrados a edificações.

As grandes centrais fotovoltaicas têm sido instaladas obedecendo a duas razões fundamentalmente: (i) como uma alternativa à geração centralizada de energia através de combustíveis de origem fóssil ou nuclear e (ii) como suporte aos sistemas de distribuição da concessionária, proporcionando-lhe maior estabilidade à tensão elétrica [8].

Da mesma forma das plantas de geração convencionais, as grandes centrais fotovoltaicas envolvem a produção de energia em larga escala de acordo com a disponibilidade do recurso solar.

A energia produzida pelas usinas fotovoltaicas, em corrente contínua, é transformada em corrente alternada a uma subestação elevatória, após passar por inversores. A energia é transportada em alta tensão até as unidades consumidoras, exigindo um sistema mais complexo e com custo mais elevado com transmissão e distribuição.

O custo da energia produzida em centrais fotovoltaicas não diminui em função da maior capacidade de produção, a exemplo do que ocorre, por exemplo, nas centrais hidrelétricas. Verifica-se que a queda no preço da energia fotogerada está mais ligada à melhoria da eficiência das células e aos ganhos de economia de escala no processo de fabricação dos módulos [9].

Já no caso do sistema fotovoltaico conectado à rede e integrado a edificações urbanas, EFCR, este gera a eletricidade de forma descentralizada, no local de consumo, aproveitando, desta maneira, as vantagens proporcionadas pela tecnologia, tais como a possibilidade de produzir energia de forma descentralizada e onde houver Sol [10].

Neste tipo de aplicação, a fachada ou o teto de uma edificação é utilizada como suporte aos geradores fotovoltaicos. Com a ajuda de um inversor, a energia produzida, inicialmente sob tensão e corrente contínua, passa a ser fornecida em tensão e corrente alternada, podendo ser inserida diretamente na rede de distribuição de eletricidade ou utilizada em qualquer um dos equipamentos elétricos instalados na edificação [11].

Conforme [11], a principal característica no que tange à operação destas instalações radica precisamente no fato destas serem instaladas para operar em paralelo com a rede de distribuição; ou seja, o consumidor está consumindo eletricidade de ambas as fontes simultaneamente. Caso se verifique um consumo de energia elétrica inferior à produção da EFCR, este excedente energético pode ser injetado na rede e, caso contrário, a rede convencional pode suprir parcial ou totalmente os requerimentos energéticos do consumidor (e.g. nos períodos de baixa irradiação, ou quando o recurso solar não estiver disponível) [10].

A Figura 1, mostra um EFCR instalado em uma edificação. O sistema é composto de um arranjo de painéis fotovoltaicos, um inversor CC/CA, quadros de proteção elétrica, medidores de energia e da própria rede elétrica.

O conjunto de módulos fotovoltaicos, geralmente instalado sobre o telhado da edificação, converte a energia solar em energia elétrica, a qual é disponibilizada em corrente contínua. Após passar pelo inversor, essa energia é então entregue em corrente alternada ao

quadro geral da instalação ou diretamente à rede elétrica, dependendo da finalidade da instalação fotovoltaica [12].

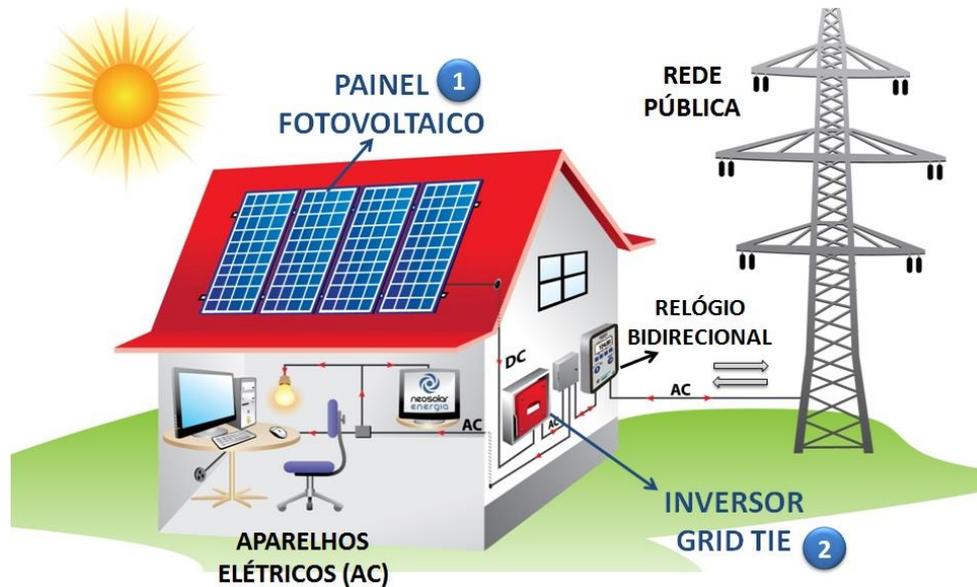


Figura 1: Sistema de Energia Fotovoltaico Conectado à Rede

Fonte: [13]

2.3 Principais Componentes do Sistema

O sistema implementado neste trabalho de conclusão de curso é composto, basicamente, por um conjunto de painéis fotovoltaicos, conversor *push-pull*, inversor monofásico e filtro LCL.

O diagrama de blocos mostrado na Figura 2 demonstra o sistema proposto.

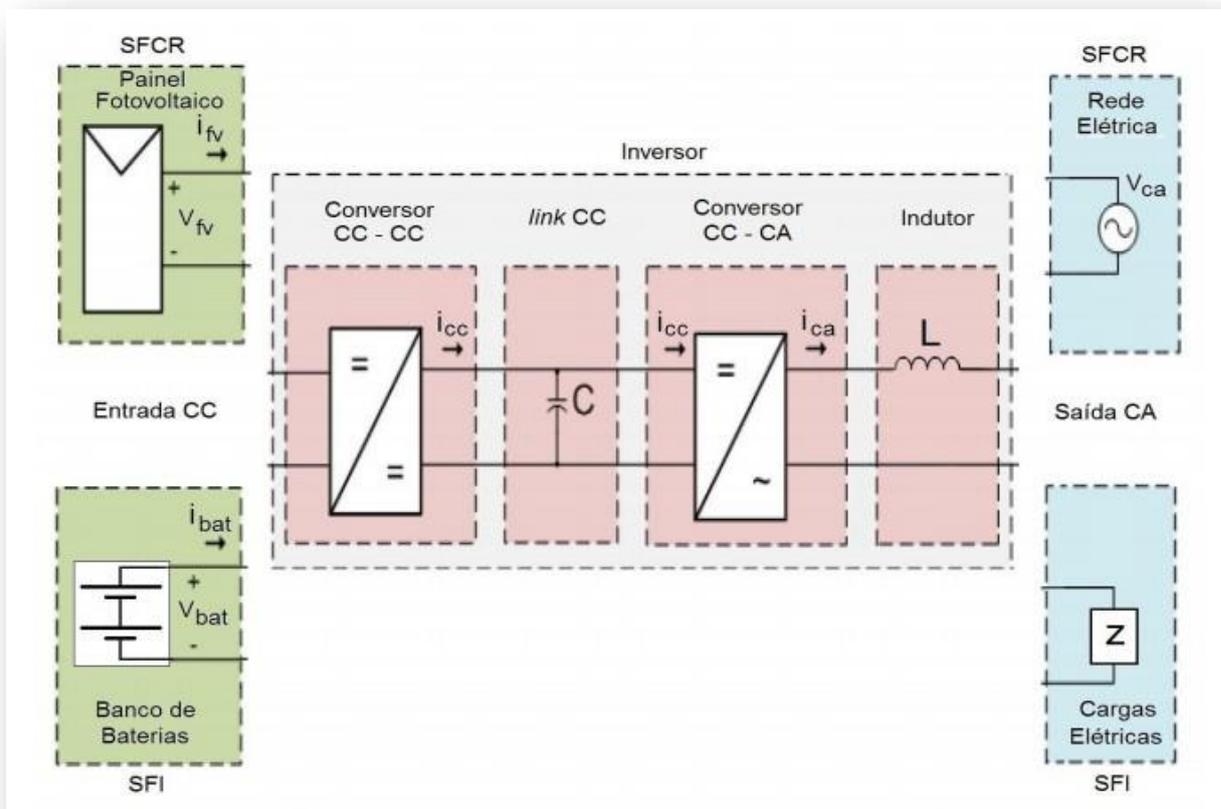


Figura 2: Diagrama de blocos do sistema fotovoltaico

Fonte: Do autor

2.3.1 Painel Fotovoltaico

O painel fotovoltaico é o dispositivo onde ocorre a transformação de energia luminosa em energia elétrica. Essa transformação é realizada por células, de material semicondutor, arranjadas em série e/ou paralelo para obtenção de alguns parâmetros, como: corrente, tensão e potência desejadas para a finalidade do projeto.

O modelo do painel no *Matlab/Simulink*[®] inclui parâmetros que são válidos para qualquer tipo de célula solar. No entanto, alguns parâmetros variam com as características construtivas da célula.

O software disponibiliza vários modelos de painéis fotovoltaicos reais no *toolbox SimPowerSystems*. O modelo utilizado foi *Kyocera KD 325 GX - LPB*. O módulo consiste em

80 células de silício, proporcionando uma potência nominal de 325 Watts. As especificações elétricas dadas pelo *software* são descritas na Tabela 1, o modelo foi implementado no *Matlab* com intuito de calcular e desenhar curvas de corrente (I), tensão (V), irradiação e temperatura. A Figura 3, mostra o bloco do painel solar fotovoltaico disponibilizado pelo *Simulink*[®].

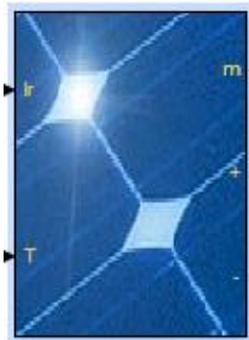


Figura 3: Módulo PV Kyocera Solar KD 325 GX-LPB

Fonte: Do Autor

Para o projeto foram utilizados 4 painéis em série e 3 em paralelo (Tabela 1), totalizando 12 painéis que resultaram em uma potência de 3840 W.

Tabela 1: Características Elétricas do Módulo PV Kyocera Solar KD 325 GX-LPB

| Parâmetros | Variável | Valor |
|--------------------------------------|------------|-----------------------|
| Potência Máxima | P_{max} | 325,22 W (watts) |
| Tensão de circuito aberto | V_{oc} | 49,7 V (volts) |
| Corrente de curto circuito | I_{sc} | 8,69 A (amperes) |
| Tensão no ponto de máxima potência | V_{pmax} | 40,34 V (volts) |
| Corrente no ponto de máxima potência | I_{pmax} | 8,07 A (amperes) |
| Temperatura padrão de operação | T_r | 25°C |
| Irradiação padrão de operação | G_r | 1000 W/m ² |
| Número de células | N_{cel} | 80 |
| Número de painéis em série | N_s | 4 |
| Número de painéis em paralelo | N_p | 3 |

Fonte: Do autor

A incidência de irradiação solar sobre o módulo proporciona tensão de circuito aberto (V_{oc}), aumentando com uma função logarítmica da intensidade luminosa. A corrente de curto circuito (I_{sc}), variando linearmente com a intensidade luminosa, pode ser medida através de amperímetro [14], podendo assim gerar um gráfico $I \times V$, como mostrado na Figura 4.

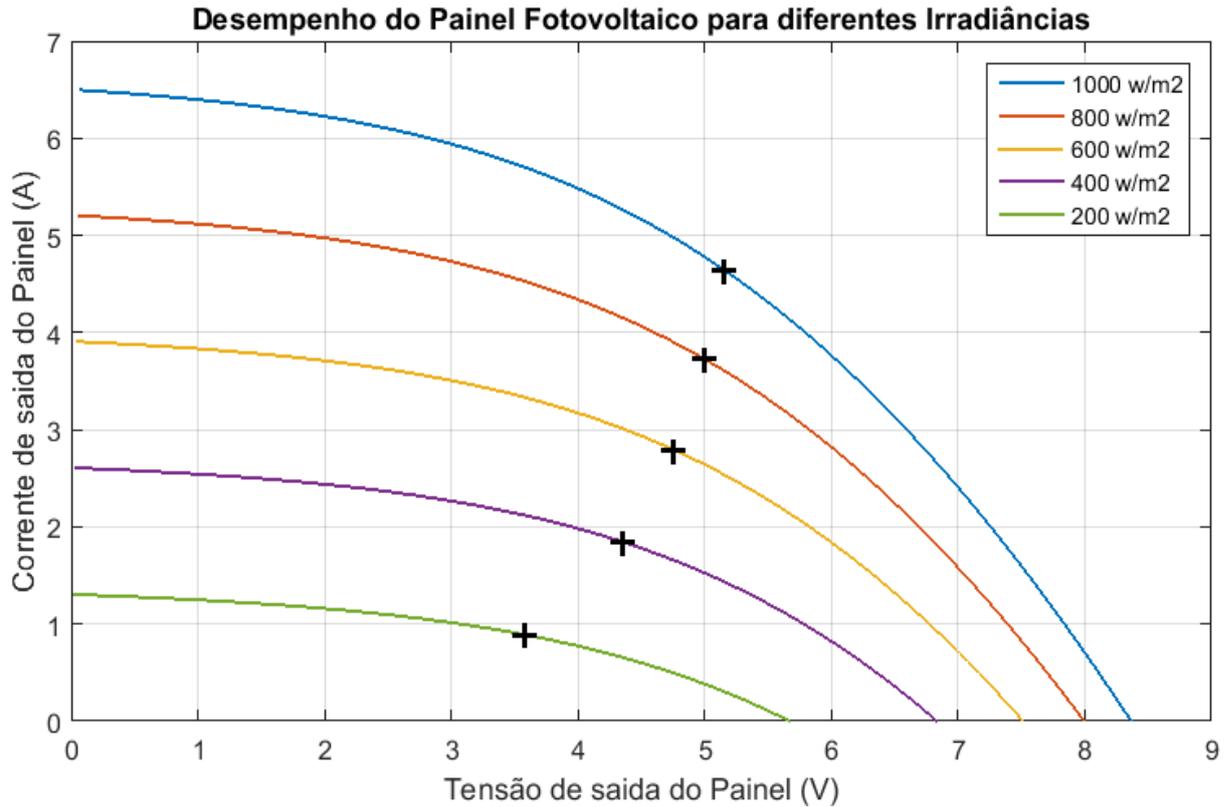


Figura 4: Curva característica do Painel Fotovoltaico

Fonte: Do autor

O ponto de potência máxima (P_{max}) corresponde ao produto da tensão de potência máxima (V_{pmax}) e corrente de potência máxima (I_{pmax}). Os valores são obtidos ligando-se aos módulos uma resistência de carga R ($R = V_{pmax} \times I_{pmax}$), em que R é a P_{max} dissipada pela resistência [14]. Os valores P_{max} , V_{pmax} , I_{pmax} , V_{oc} e I_{sc} são os cinco parâmetros que especificam o painel fotovoltaico, mostrados na Tabela 1. As curvas da Figura 4 mostram a curva característica $I \times V$ (curva de potência para análise dos parâmetros do controle).

A grandeza que expressa o quanto a curva característica se aproxima de um retângulo no diagrama $I \times V$ é o fator de forma (FF). Quanto melhor a qualidade das células do módulo, mais próxima da forma retangular será sua curva [15].

2.3.2 Conversor CC/CC *Push-Pull*

Os conversores são dispositivos utilizados, normalmente, para adaptar a potência gerada as necessidades da carga.

Na intenção de maximizar o sucesso dos sistemas PV, um bom desempenho, segurança para o usuário e um custo sustentável são fatores essenciais que deve implementar uma arquitetura de um conversor de potência [16]. Os sistemas geradores elétricos distribuídos que exploram a energia solar são continuamente baseados em processos de conversão onde os conversores de potência, avançadas técnicas de PWM (*Pulse Width Modulation*) e os sistemas de controle se integram para atingir grandes eficiências de conversão, grandes fatores de potência e baixo conteúdo harmônico THD [17].

Para aplicações de sistemas fotovoltaicos, pode-se utilizar diversos tipos de conversores CC/CC conectados em série com o gerador fotovoltaico.

Neste trabalho foi utilizado o Conversor CC/CC do tipo *Push-Pull* alimentado por corrente. Essa topologia, mostrada na Figura 5, é bastante utilizada em sistemas fotovoltaicos, apresenta característica de fonte de corrente na entrada e fonte de tensão na saída. Possui alta eficiência, contém um controle do ponto de máxima potência (MPPT) do gerador FV, medidas de segurança para desconexão da rede em condições adversas, medição de parâmetros elétricos, dentre outras funções.

Este conversor, funcionando como estágio pré-regulador, opera com frequência de chaveamento (f_{sw}) constante e com razão cíclica dos interruptores d variável. A tensão no

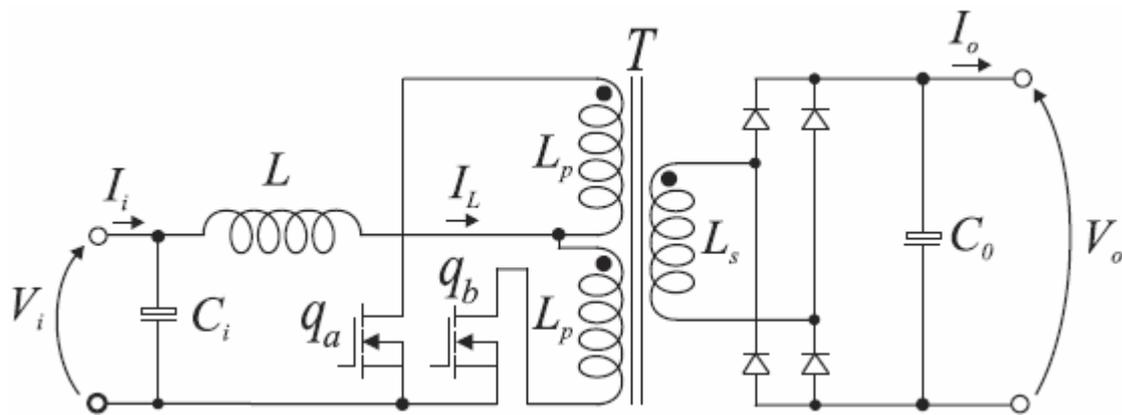


Figura 5: Conversor Push-Pull Alimentado em Corrente

Fonte: [19]

capacitor (C_i) e o indutor de entrada (L) funcionam como fonte de corrente, justificando o uso do termo “alimentado em corrente” [18].

Note a impossibilidade, na Figura 5, da abertura das chaves q_a e q_b de forma simultânea, pois existe energia acumulada no indutor L . Se isso acontecesse, acarretaria em sobretensões destrutivas às chaves [18].

O conversor possui quatro etapas de operação que serão descritas a partir do diagrama elétrico da Figura 5. O comando das chaves é apresentado na Figura 6. Onde distinguem-se as quatro etapas de chaveamento e seu tempo de duração.

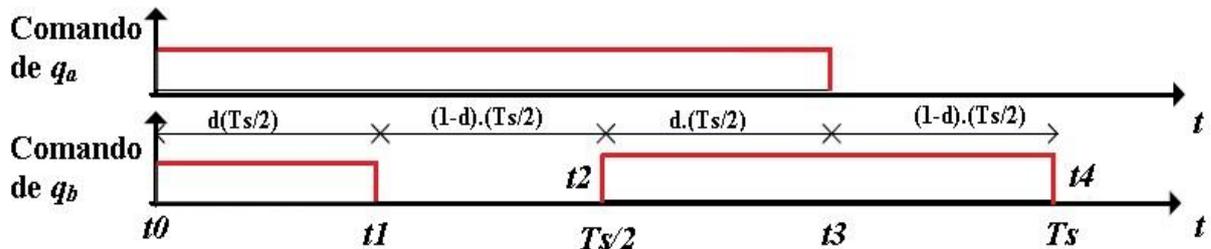


Figura 6: Sinais de Comando das Chaves

Fonte: Do Autor

Em cada uma dessas etapas, faz-se a análise do circuito equivalente, mostrados na Figura 7.

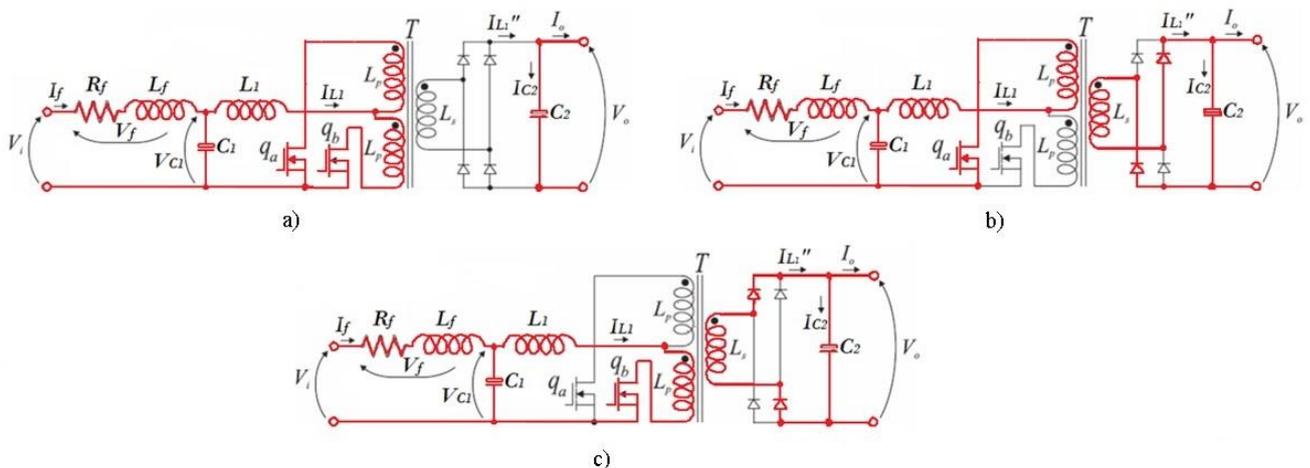


Figura 7: Etapas de operação do Conversor Push-Pull

Fonte: [20]

1ª Etapa: o estado topológico referente a esta etapa de operação pode ser visualizado na Figura 7(a). Assumem-se as seguintes condições iniciais: a chave q_b está conduzindo e o valor da corrente do indutor é I_m . No instante t_0 , a chave q_a é comandada a conduzir e assume metade da corrente do indutor de entrada. A orientação dos enrolamentos do transformador é tal que com q_a e q_b fechados, os fluxos gerados pela corrente em cada enrolamento no transformador se contrapõem, e consequentemente a tensão sobre o enrolamento se anula. Durante esta etapa a corrente cresce linearmente no indutor de entrada, até o instante em que a chave q_b é comandada a abrir [18].

Durante esta etapa não ocorre transferência de energia da fonte para a carga que é suprida através do capacitor de saída, ou seja, o barramento CC é alimentado pelo capacitor C_2 .

2ª Etapa: a segunda etapa está representada na Figura 7(b). No instante $t1$, a chave q_b é comandada a abrir, impondo no indutor a tensão de carga referida ao primário, subtraída da tensão de entrada. A tensão de saída referida ao primário é necessariamente superior à tensão de entrada, para garantir o equilíbrio de energia no indutor. Durante esta etapa a energia é transferida à carga através do indutor de entrada, que descarrega-se linearmente. Neste instante a corrente no indutor atinge o valor inicial da 1ª etapa: I_m [18].

3ª Etapa: o conversor assume comportamento da 1ª etapa de chaveamento. Assim, novamente o barramento CC será alimentado pelo capacitor C_2 .

4ª Etapa: por fim, a quarta etapa está representada na Figura 7(c). No instante $t3$, a chave q_a é comandada a abrir, impondo no indutor a mesma tensão da 2ª etapa, porém a polaridade nos enrolamentos do transformador é oposta. A energia transferida e os níveis iniciais e finais de corrente no indutor são idênticos à 2ª etapa [18].

O sistema da Figura 8, mostra o gerador fotovoltaico conectado ao conversor *push-pull* estudado.

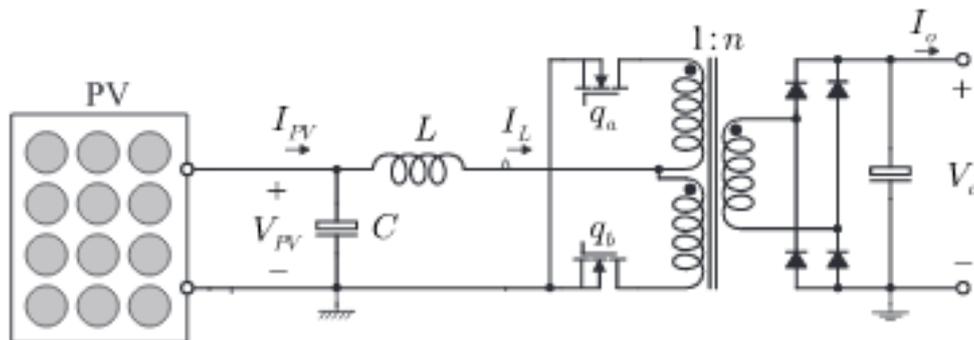


Figura 8: Painel fotovoltaico conectado ao conversor *push-pull*

Fonte: [19]

Assim, após feitos os cálculos utilizando as equações descritas, os valores obtidos para o conversor *push-pull*, proposto por [20] e utilizado neste trabalho, são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Características elétricas do conversor *push-pull*

| Parâmetros | Variável | Valor |
|-------------------|----------|---------------------|
| Potência | S | 1 kVA (volt-ampère) |
| Tensão de Entrada | E | V (volts) |
| Tensão de Saída | V_o | 311 V (volts) |

| | | |
|---------------------------|----------|--------------------|
| Frequência de Chaveamento | f_{sw} | 10 kHz (Hertz) |
| Capacitor de Entrada | C_1 | 1150 μF |
| Capacitor de Saída | C_2 | 2250 μF |
| Indutor | L | 150 μH |

Fonte: Do autor

2.3.3 Inversor CC/CA Monofásico

O inversor CC/CA converte a potência em corrente contínua, proveniente do conversor CC/CC, em potência em corrente alternada que, em condições normais, é injetada na rede elétrica.

Os inversores utilizam chaves estáticas compostas por semicondutores para realizar a comutação responsável pela conversão CC/CA. Essas chaves atuam em dois estados, ativo ou inativo. Desta forma, o sinal de saída gerado será formado por ondas quadradas, cujo valor médio acompanha a forma de onda senoidal da rede, através de técnicas de PWM (*Pulse Width Modulation*).

Inversores podem ser classificados de duas formas: Meia-Ponte ou Ponte Completa. No caso do sistema fotovoltaico proposto neste trabalho, utiliza-se um inversor monofásico ponte completa, onde sua configuração é mostrado na Figura 9.

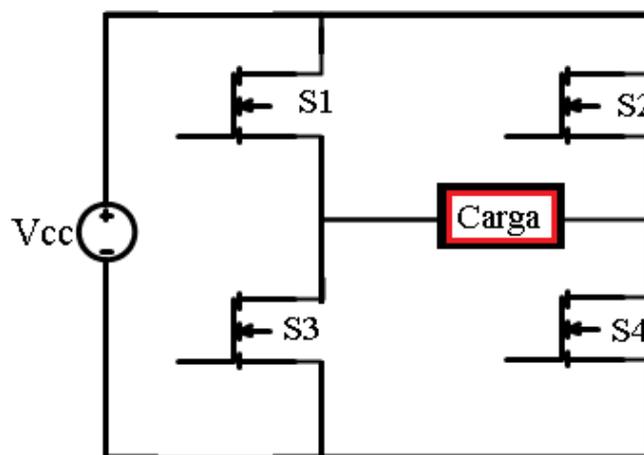


Figura 9: Inversor Ponte Completa

Fonte: Do Autor

A Figura 9, mostra o inversor ponte completa composto por 4 chaves semicondutoras conectadas à carga e uma fonte de tensão constante (V_{cc}) que normalmente é um capacitor de valor adequado, isto significa que a tensão em seus terminais não varia acima do valor predeterminado (*ripple*). Para este trabalho, optou-se por um controle proporcional-integral para manter a tensão no barramento CC.

O bloco inversor, criado no ambiente *Matlab/Simulink*[®], é composto por dois braços inversores. As chaves S1 e S3 formam um braço e as chaves S2 e S4 formam o outro. Quando o primeiro braço conduz a tensão de saída é positiva, por sua vez quando as chaves do primeiro braço são desligadas e o segundo braço conduz a tensão de saída é negativa. É dessa forma que se consegue alternar a polaridade da fonte de tensão CC nos terminais da carga.

2.3.4 Filtros de Conexão

Nesta subseção explica-se brevemente o modelo matemático de duas topologias do principal componente deste trabalho, o filtro. A primeira sendo representada pelo filtro L, tradicionalmente utilizado nas aplicações de conversores CC/CC e em inversores operando numa faixa de potência de poucas dezenas de kW. E a segunda o filtro LCL, no qual é mais frequentemente utilizado e opera com faixas superiores de potência do filtro L.

Outro filtro de conexão é o filtro LC, é utilizado para melhorar o fator de potência no ponto comum de conexão de inversores que utilizam apenas o filtro L. Entretanto, para inversores conectados à rede este não se mostra a melhor opção basicamente por dois problemas: a frequência de ressonância ser muito suscetível a indutância no ponto comum de conexão e altas correntes de carga na conexão com a rede [21].

Outro ponto importante sobre o estágio de saída é com relação a atenuação de harmônicos de saída, provenientes da comutação do inversor.

2.3.4.1 Filtro L

A partir do circuito monofásico equivalente do inversor com Filtro L de saída, mostrado na Figura 10, define-se a ordem harmônica da frequência de comutação do inversor conectado ao filtro em relação à frequência fundamental da rede.

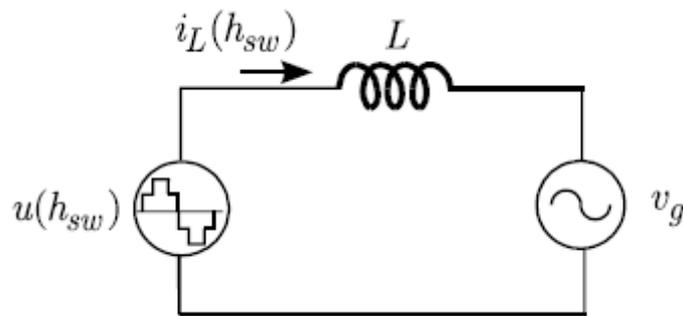


Figura 10: Circuito equivalente monofásico do Filtro L

Fonte: [21]

O objetivo proposto por [21] é encontrar a expressão da atenuação para a ordem harmônica referente a frequência de comutação das chaves do inversor. Para isto, será considerado que a tensão da rede na frequência de comutação seja igual a zero. Isto é, o lado da rede é visto como um curto-circuito para corrente harmônica, entretanto o outro lado o inversor é visto como gerador de harmônicos.

Desta forma, a expressão seguinte denota a atenuação do *ripple* na frequência de chaveamento da corrente de saída do inversor, dada por:

$$\frac{i_L(s)}{u(s)} = \frac{1}{sL} \quad (2.1)$$

Onde s é o operador de Laplace. A transformada de Fourier correspondente em (2.1) pode ser obtida pela substituição do operador de Laplace s por $j\omega$. Assim, o ganho do filtro L para cada harmônico pode ser descrito em (2.2):

$$\frac{i_L(jh\omega_g)}{u(jh\omega_g)} = \frac{1}{jh\omega_g L} \quad (2.2)$$

Onde ω_g representa a frequência fundamental da rede e h a ordem harmônica em relação a fundamental.

A equação (2.2) representa o inverso da impedância de saída do inversor. Observe que a impedância aumenta conforme aumentam a ordem harmônica envolvida e a indutância do filtro. Logo, uma vez definida a frequência de comutação do inversor, a atenuação dos harmônicos na corrente de saída é definida unicamente pelo projeto da indutância do filtro.

2.3.4.2 Filtro LCL

A conexão entre o inversor e a carga pode ser realizada através de uma impedância, onde o caso mais básico seria utilizar um indutor, o qual teria como objetivo filtrar os harmônicos de corrente gerados pela comutação das chaves semicondutoras do inversor.

Neste trabalho, foi utilizado um filtro LCL, mostrado na Figura 11, quando comparado ao filtro L, apresenta melhor atenuação dos harmônicos de corrente em alta frequência, desta forma torna-se melhor para aplicações em eletrônica de potência que trabalham com frequências de comutação menores. Além disso, quando dimensionado para obter a mesma atenuação, os indutores do filtro LCL tende a apresentar menor volume do que o indutor L [22]-[24].

Contudo, devido à necessidade de controlar os efeitos de ressonância, projeto de filtros e controle de corrente exigem ser mais complexos [25]. O uso destes filtros permite ao inversor operar em sistemas conectados à rede, podendo-se tornar em inversores universais para sistemas de geração de energia distribuídos [26].

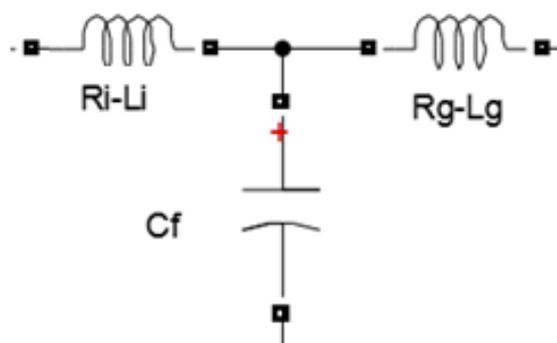


Figura 11: Filtro LCL

Fonte: Do Autor

O circuito do filtro LCL da Figura 11 apresenta um indutor ligado ao inversor (L_i) e outro à rede elétrica (L_g). Note que além dos indutores, existem dois resistores (R_i e R_g) com valores praticamente nulos para facilitar a análise posterior e um capacitor (C_f) localizado no ramo central conectado ao neutro.

Além disso, resistências são inseridas em série com os indutores do filtro, com propósito de mostrar que existe perda nos enrolamentos do indutor. Para efeito de simulação são consideradas, as resistências, com valor baixo cerca de 0,5 ohms.

Com as resistências de amortecimento consideradas nulas, obtém-se a função de transferência da tensão de entrada V_i pela corrente da rede I_g utilizando as leis de Kirchhoff

$$\frac{L_g(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{s(s^2 L_g C_f + L_i + L_g)} \quad (2.3)$$

Para o caso ideal ($L_g = 0$), equação (2.3), torna-se de um filtro de primeira ordem L. Nesse caso, a função de transferência em (2.3) do filtro LCL é idêntica ao do filtro L, ou seja, a capacitância não reduz os valores das indutâncias, quando o valor de L_g não é significativo.

Assim, em situações de inversores conectados à rede têm-se utilizado filtros de terceira ordem (LCL) devido a menor indutância total em relação aos filtros de primeira ordem (L) e melhoria da resposta dinâmica [23].

Para o controle, geralmente, são utilizados dois controladores, PI (proporcional integral) e PR (proporcional ressonante). Um para controlar a tensão no barramento CC e o outro para controlar a corrente de saída do inversor de saída, que deve ser filtrada, quando equipado com um filtro passivo (este controle será descrito no capítulo 3).

Para isto, é necessário o uso de uma malha de controle externa e outra interna. A malha externa com função de garantir o bom funcionamento em regime permanente (*steady-state*) e a malha de controle interna para garantir a compensação dinâmica às perturbações rápidas do sistema, incluindo mudanças de referência e de carga, garantindo a estabilidade [27].

2.4 Carga

É considerada uma boa estimativa com relação ao consumo de energia elétrica residencial a potência em torno de 4 kVA, pois, com base na produtividade dos sistemas fotovoltaicos e da potência média dos sistemas fotovoltaicos instalados até o primeiro semestre de 2014 no Brasil [28] [29]. Assim, neste trabalho, optou-se por uma carga de 4 kVA e tensão eficaz de 220 V.

A carga foi representada, genericamente no ambiente *Simulink*[®], por uma resistência em série com uma indutância. A Figura 12 mostra a carga conectada à rede.

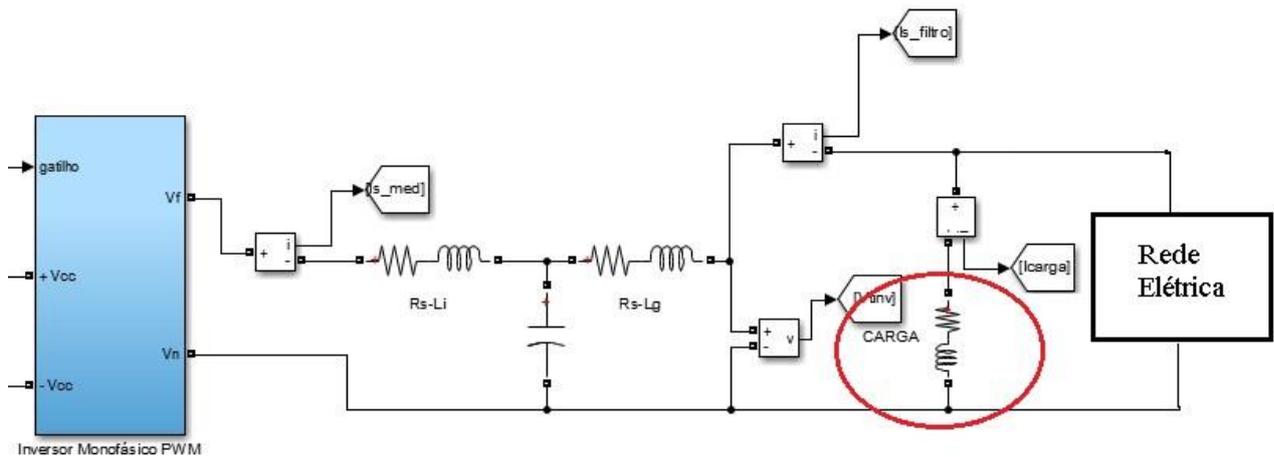


Figura 12: Representação da carga modelada no sistema fotovoltaico

Fonte: Do Autor

2.5 Rede Elétrica

O modelo descrito por [29] para a rede elétrica escolhida pode ser visualizado na Figura 13. Optou-se por representar por uma fonte de tensão senoidal com valor de 13,8 kV e 60 Hz para rede de distribuição. Devido a configuração da carga, onde a tensão eficaz de conexão requerida é de 220 V, para a adequada representação do modelo carga-rede, faz-se necessário a utilização de um transformador monofásico abaixador 13,8kV-230V de 25 kVA.

O modelo da rede elétrica é mostrado na Figura 13.

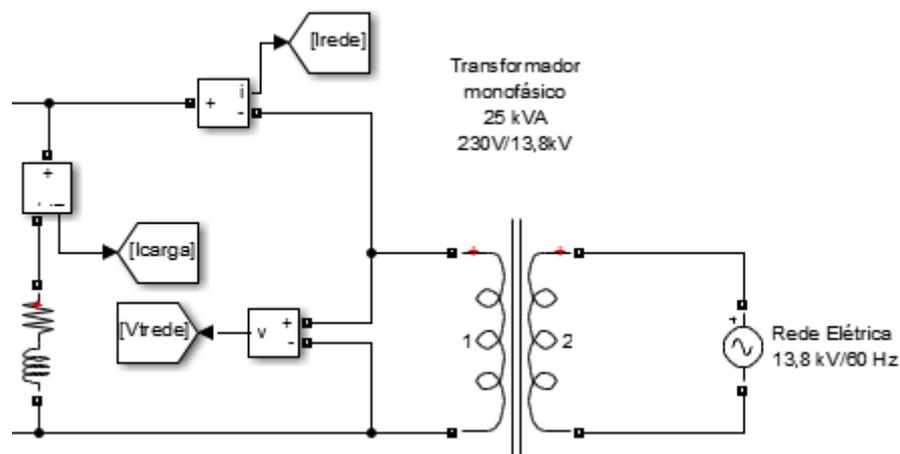


Figura 13: Modelo da Rede Elétrica

Fonte: Do Autor

O uso do transformador é exigido por normas¹ do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) e Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) quanto a conexão do inversor fotovoltaico ligado à rede, isto é, o transformador é utilizado para isolamento galvânico [29].

2.6 Sistema completo

Face ao exposto e de posse dos componentes que constituem o sistema completo fotovoltaico, pode-se então conectar todos os componentes, simultaneamente, à rede elétrica na plataforma de simulação do *Matlab/Simulink*[®], como mostrado na Figura 14.

As técnicas de controle utilizadas no conversor *push-pull* e no inversor ponte completa monofásico estão descritas a posteriori (item 3).

¹IEEE 929/2000 – *Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic(PV) Systems*, IEEE 1547 – *Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems*, o IEC 61727 – *Characteristics of the Utility Interface* das concessionárias [28].

Painel Fotovoltaico de 4kVA ligado a rede elétrica monofásica

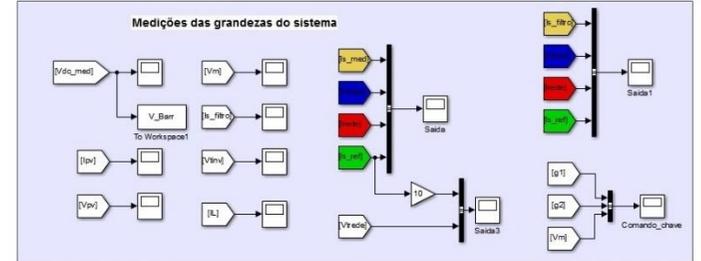
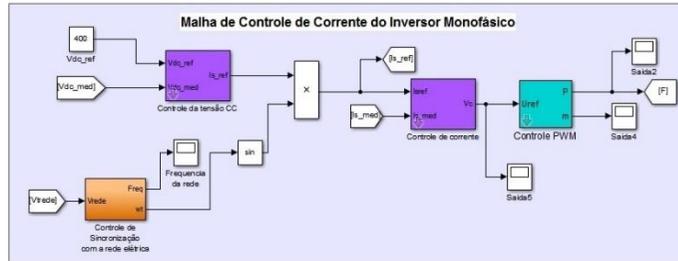
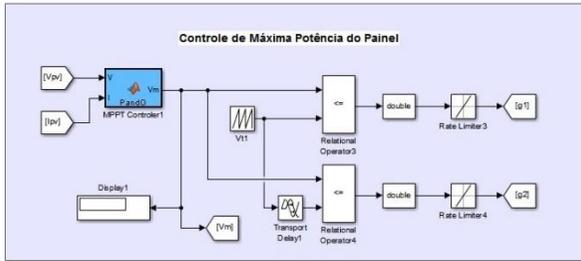
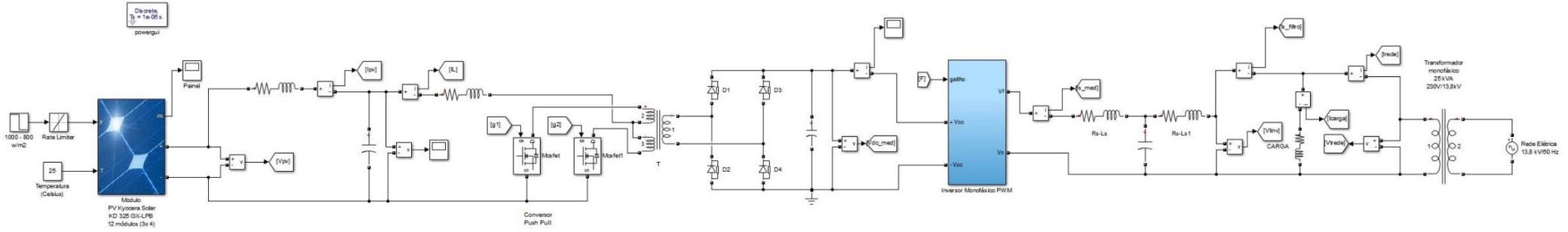


Figura 14: Sistema Completo

Fonte: Do Autor

3 TÉCNICAS DE CONTROLE

Neste capítulo será apresentada a metodologia de controle utilizado no conversor *push-pull* e no inversor monofásico ponte completa. Todas as técnicas descritas neste capítulo visam a máxima eficiência energética do sistema fotovoltaico. Para isto, foi utilizado na modelagem desses sistemas o *Simulink*[®] que acompanha o software MATLAB[®].

3.1 Controle do Conversor *Push-Pull*

O conversor *push-pull* utilizado neste trabalho extrai do painel fotovoltaico a máxima potência que está sendo gerada, devido ao mecanismo de controle conhecido por seguimento do ponto de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*).

Um gerador fotovoltaico submetido a uma irradiância solar uniforme (sem sombreamentos parciais) tem uma curva *I-V* com o formato semelhante ao apresentado na Figura 4, na qual existe um único ponto com derivada nula, ou seja, onde atinge um máximo. Este ponto particular da curva é o chamado PPM- ponto de potência máxima, no qual o produto da corrente pela tensão tem o seu valor máximo [30].

Os valores de corrente e tensão de máxima potência dependem das condições de irradiância solar, pois a corrente produzida pelo PV é diretamente proporcional a irradiância. Ou seja, sombreamentos parciais causados por nuvens ou qualquer outro motivo, podem causar distorções na curva característica do gerador fotovoltaico.

Assim sendo, é conveniente que haja um mecanismo de controle eletrônico que observe continuamente as modificações na curva característica *I-V* e atue sobre o conversor CC/CC, de modo a manter o gerador fotovoltaico operando na tensão correspondente à tensão de máxima potência, maximizando a transferência de potência e evitando perdas nas células, que surgiriam se o acoplamento ocorresse em outra tensão que não a ótima [31].

O algoritmo de seguimento do ponto de máxima potência adotado neste trabalho foi o método perturba e observa (P&O).

Este método é o mais utilizado em sistemas conectados à rede elétrica e possui arranjo simples. Seu funcionamento consiste em forçar o deslocamento do ponto de operação em uma dada direção (perturbar) e observar o resultado na potência de saída do gerador fotovoltaico. A modificação no ponto de operação é feita através de pequenos incrementos na tensão em intervalos de tempo determinados. Um incremento positivo de tensão, por exemplo, refletindo-se em um aumento da potência, indica que o ponto de operação se deslocou em direção ao ponto de máxima potência e a perturbação deve prosseguir no mesmo sentido. Quando a potência de saída começar a diminuir, significa que a tensão de máxima potência foi ultrapassada e a próxima perturbação de tensão deve ser no sentido oposto. O processo se repete e, como resultado, o ponto de operação fica oscilando em torno do valor exato da tensão de máxima potência [31].

Como mostra a Figura 15, o MPPT resumem-se a técnicas de controle associadas a um conversor comutado, que força o arranjo PV a otimizar o seu ponto de funcionamento [29].

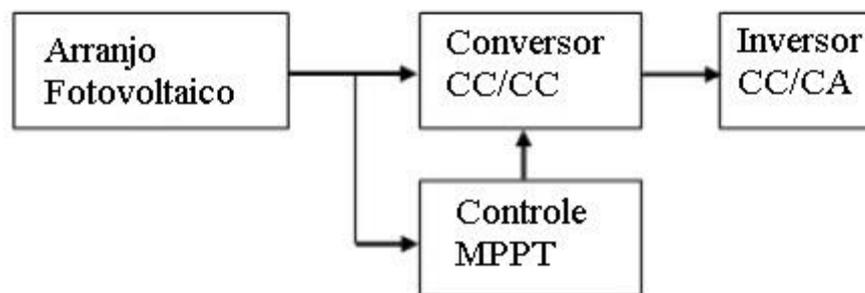


Figura 15: Diagrama de Blocos do Sistema Implementado controlado pelo MPPT

Fonte: Do Autor

A modelagem do conversor *push-pull* depende do estudo entre o tempo em que as chaves estão fechadas e o tempo total do chaveamento (*Duty-cycle, D*), mencionado na seção 2.3.2. Isto é, conhecendo os intervalos de condução dos interruptores (Figura 6), é possível então determinar a forma de onda de diferentes correntes e tensões.

Este trabalho se baseia no controle proposto por [20] e [29], onde o *PWM* para controle do chaveamento do conversor *Push-Pull* no *Simulink*® consistiu em implementar, a partir de blocos presentes na biblioteca do programa, a técnica de comparação entre um sinal modulante CC com um sinal dente-de-serra (portadora). A frequência de comutação *PWM* para o conversor utilizado é de 10 kHz.

Desta forma, foram utilizados blocos configurados para fornecer uma saída triangular e o bloco *Relational operator*, onde é possível comparar dois sinais de entrada e fornecer em

sua saída um sinal lógico de acordo com o resultado de sua comparação. O modelo construído possui uma entrada por onde é informado o valor da razão cíclica desejada para o sinal *PWM*, o qual é disponibilizado em sua saída.

O modelo final é mostrado na Figura 16, onde é possível analisar todos os blocos descritos por [20] e [29]

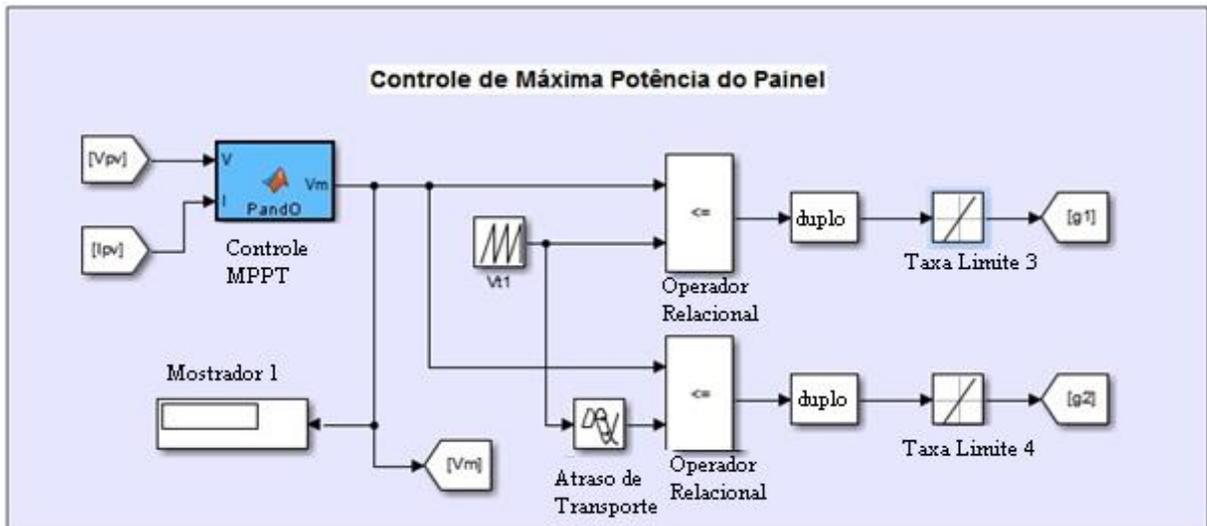


Figura 16: Representação do Controle de Máxima Potência no Matlab/Simulink®

Fonte: Do Autor

3.2 Controle do Inversor Monofásico

Existem várias estruturas de controle de corrente possíveis de implementar num inversor fotovoltaico ligado à rede, como o caso de um controlador proporcional ressonante (PR), controlador PI, ou apenas proporcional.

Para este trabalho optou-se pelo controle proposto por [29], onde utiliza dois controles: o primeiro, PI, controla a tensão no barramento CC e o segundo, PR, controla a corrente de saída do inversor e providencia potência para a linha com fator de potência unitário.

A malha de corrente também é responsável, pela proteção e a dinâmica geral do sistema [32]. Já a malha de controle de tensão do barramento CC tem dinâmica menor que a de corrente. Sua principal função é manter a tensão em um nível de tensão fixo, que para este trabalho foi de 400 V, e balancear o fluxo de potência do sistema.

Segundo [29], o controle do barramento faz-se a medindo o valor de tensão atual no barramento e compara com um valor de referência projetado. Assim, a diferença entre estes dois valores de tensão e o resultado é a entrada do controlador (PI). O sinal I_{sref} que sai do controlador PI de tensão é multiplicado por uma onda senoidal pura em fase com a rede, obtida pelo PLL (do inglês – *Phase Locked Loop*), cuja amplitude é de 1 V.

Quanto ao controlador PR de corrente, o mesmo compara uma corrente de referência com o valor que a rede está fornecendo. O erro desta operação consiste na entrada I_{sref} deste controlador. Por fim, a saída deste controlador gera o sinal que de fato atua na modulação da largura de pulsos (PWM), anteriormente explicada.

A Figura 17 mostra o sistema de controle completo do inversor monofásico.

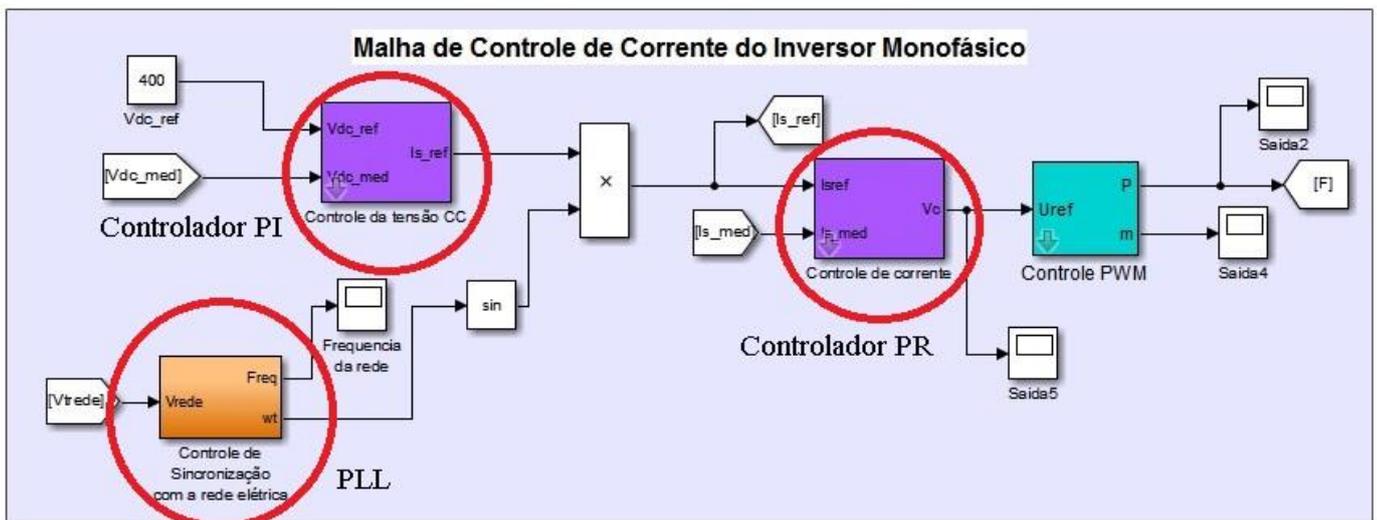


Figura 17: Malha de Controle do Inversor Monofásico no Matlab/Simulink®

Fonte: Do Autor

4 PROJETO DO FILTRO LCL

Neste capítulo será apresentado toda a metodologia estudada, a partir do seu modelo matemático, para dimensionar o filtro LCL utilizado no sistema fotovoltaico proposto conectado à rede, com enfoque nas características construtivas do filtro.

Para isto, foi utilizado a ferramenta *MathCad* para cálculo dos parâmetros e para desenhar as diferentes curvas do filtro.

4.1 Metodologia de projeto do Filtro LCL

Em 2005, [23] propôs em seu trabalho uma metodologia para o projeto do filtro de conexão LCL. Conforme o autor, alguns procedimentos devem ser adotados para se obter um bom desempenho do filtro. Isto é, os indutores devem estar bem projetados para atenuar o *ripple* de corrente do lado da rede, diminuindo o custo e minimizando o efeito de ressonância.

Outras metodologias para projetar filtros LCL podem ser baseadas no índice de atenuação da ondulação de corrente injetada na rede elétrica pelo filtro LCL e na análise da distorção harmônica total de corrente (*THD*) [14], bem como à frequência de ressonância do filtro, a atenuação de harmônicos de corrente, melhoria do volume do filtro, ondulação de corrente, e a potência consumida pelo capacitor do filtro [21] [24] [33]-[37]. Desta forma, ambos os autores procuram obter uma relação de compromisso entre custo e desempenho.

O procedimento escolhido para este trabalho de conclusão de curso foi do autor [23], onde o mesmo descreve a metodologia de projeto do filtro impondo, inicialmente, as seguintes limitações:

- O valor do capacitância do filtro LCL é limitada pela potência reativa máxima que circula no sistema (deve ser menor que 5% da potência base).
- O valor total da indutância dever ser limitado, a fim de reduzir a queda de tensão durante a operação (dever ser menor que 10% da indutância base).

- A frequência de ressonância do filtro deve ser maior que 10 vezes a frequência da rede e menor que a metade da frequência de chaveamento f_{sw} ($10f_n < f_{res} < 0.5f_{sw}$).
- O valor do resistor de atenuação deve ser otimizado, levando em consideração a resposta dinâmica do filtro, a frequência de ressonância e as perdas geradas em baixas frequências.

O método utiliza os seguintes parâmetros:

- A potência do conversor (S_I);
- A frequência de chaveamento (f_{sw});
- A tensão de linha da rede (V_L);
- A frequência da rede (f_g).

Na Tabela 3, são apresentados os valores dos parâmetros que foram considerados para o cálculo dos componentes do filtro LCL neste trabalho.

Tabela 3: Parâmetros do sistema para o projeto do Filtro LCL

| Parâmetros do Projeto – Filtro LCL | |
|---|--------|
| Potência do Conversor | 1 kVA |
| Tensão de linha da Rede | 230 V |
| Frequência de Chaveamento | 10 kHz |
| Frequência da Rede | 60 Hz |

Fonte: Do autor

Após levantamento dos parâmetros iniciais do projeto, calcula-se o valor da indutância do lado do inversor (L_i). De acordo com a função de transferência descrita em (3.1) obtém-se o *ripple* de corrente em I_i com 10% da tensão de saída do inversor V_i no harmônico da frequência de chaveamento h_{sw} [23].

$$\frac{I_i(h_{sw})}{V_i(h_{sw})} \approx \frac{1}{(\omega_{sw})L_i} \quad (3.1)$$

$$L_i = \frac{1}{(2\pi)(f_{sw})(0,1)} = 160\mu H \quad (3.2)$$

Os parâmetros do filtro serão normalizados em relação aos valores base, calculados através de (3.4) e (3.5).

$$Z_b = \frac{(V_L)^2}{S_1} \quad (3.3)$$

$$Z_b = \frac{(230)^2}{1000} = 52,9 \Omega \quad (3.4)$$

O máximo valor da capacitância é permitida pela limitação da potência reativa do sistema e é obtida através do valor da impedância de base já calculada em (3.4), assim temos:

$$C_b = \frac{1}{(\omega_g)(Z_b)} = 50 \mu F \quad (3.5)$$

A partir do valor do calculado da capacitância de base, limita-se o capacitor a $x=5\%$ de C_b desta forma, obtemos:

$$C = x \cdot C_b = 0,05 \cdot 50 \mu F = 2,51 \mu F \quad (3.6)$$

A indutância do lado do inversor (L_i) se relaciona com a indutância do lado da rede (L_g) através do parâmetro r , mostrado em (3.7).

$$L_g(h_{sw}) = r \cdot L_i(h_{sw}) \quad (3.7)$$

$$r = \frac{L_i(h_{sw})}{L_g(h_{sw})} \quad (3.8)$$

Da mesma forma, na Equação (3.9) a corrente harmônica da rede se relaciona com a corrente harmônica do inversor.

$$\frac{I_g(h_{sw})}{I_i(h_{sw})} = \frac{1}{|1+r(L_i \cdot C \cdot \omega_{sw}^2)|} \quad (3.9)$$

sendo ω_{sw} a frequência de chaveamento em radianos por segundo.

Assim, selecionando um *ripple* de corrente no lado da rede com valor que seja 20% da corrente de saída do inversor (I_i), pode-se obter o valor de L_g juntamente determinando o adequado valor de r [23]. Isto é, relacionando a Equação (3.8) com a função de transferência da Equação (3.9), pode-se escolher o valor de r em que I_g é 20% de I_i , como mostrado na Figura 18.

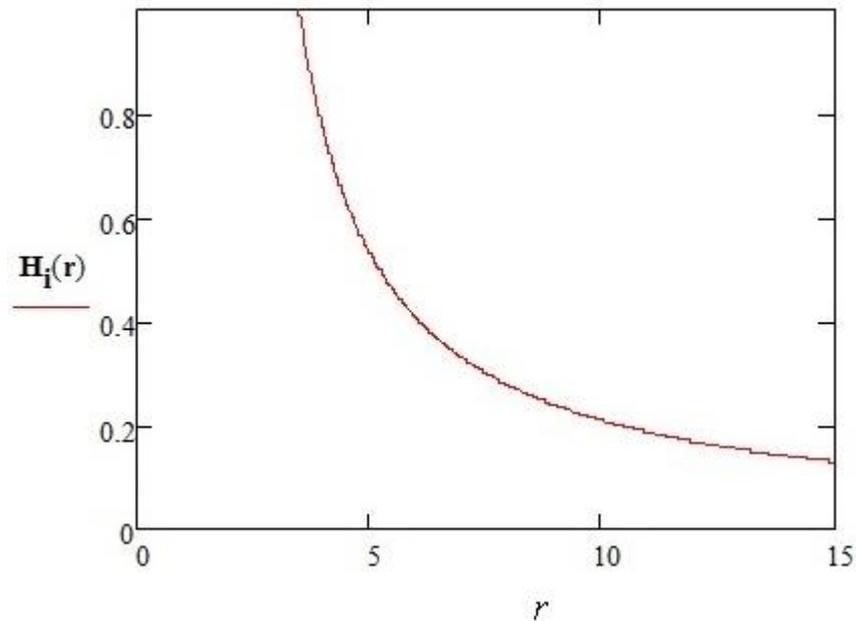


Figura 18: Relação da atenuação harmônica na frequência de comutação e a razão entre os indutores

Fonte: Do Autor

A Figura 18 apresenta a curva de atenuação da corrente na frequência de chaveamento em relação ao fator r , que foi de 10,43 que está abaixo dos 20%.

Substituindo o valor de r na Equação (3.7), tem-se que a indutância L_g é:

$$L_g(h_{sw}) = 1,66 \text{ mH} \quad (3.10)$$

Assim, atendendo a limitação que a frequência de ressonância do filtro deve ser 10 vezes maior que a frequência da rede e menor que a metade da frequência de chaveamento, têm-se:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_g + L_i}{L_i L_g C}} = 8315,8 \text{ Hz} \quad (3.11)$$

Desta forma, os valores descritos atendem as condições necessárias com intuito de evitar problemas causados por ressonância em baixas e altas frequências do espectro.

A resposta em frequência do Filtro LCL ideal está ilustrado na Figura 19, onde é comparado a um Filtro L de magnitude igual a $L_T = L_i + L_g$.

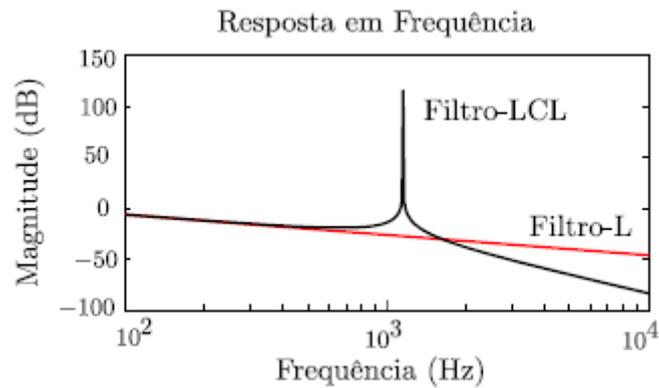


Figura 19: Resposta em frequência do Filtro LCL e do Filtro L

Fonte: [21]

Apesar do filtro LCL apresentar vantagens significativas em comparação ao filtro L, a existência do capacitor faz com que exista interação entre este e as indutâncias do filtro, causando assim o fenômeno de ressonância, como pode ser observado na Figura 19.

Assumindo como exemplo a resposta em frequência de ambos os filtros dada na Figura 19. Trata-se da resposta em frequência da função de transferência da corrente de entrada pela corrente de saída para os dois filtros com valores relativos de indutância iguais. Observe que a resposta em frequência de ambos os filtros é semelhante antes do pico de ressonância, ou seja, ambos têm uma atenuação de 20 dB por década, após atenuação do filtro LCL passa para 60dB por década [21].

O diagrama de Bode do filtro LCL projetado é ilustrado na Figura 20.

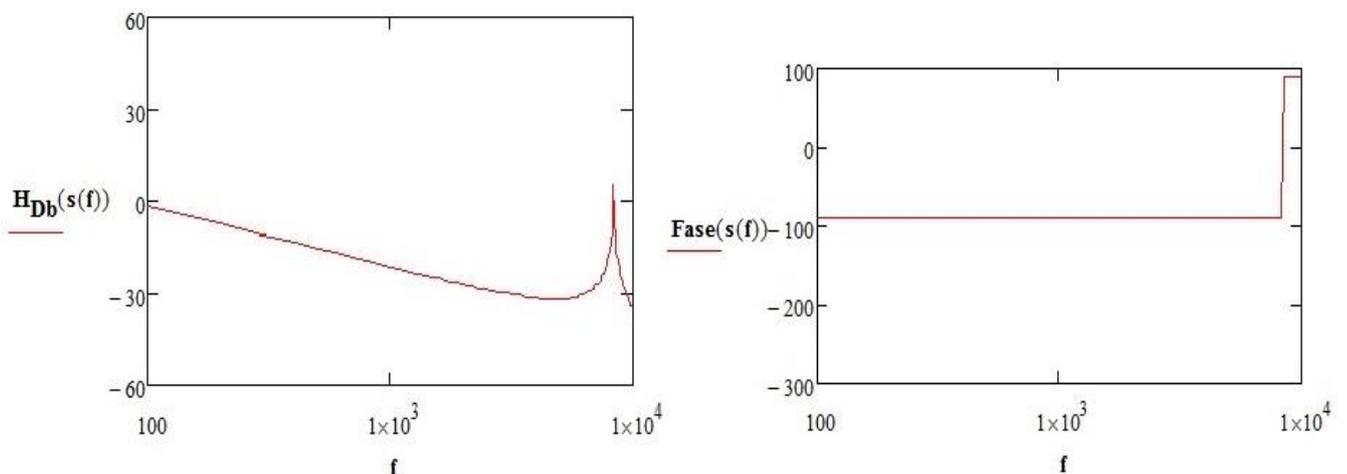


Figura 20: Diagrama de Bode do Filtro LCL Projetado

Fonte: Do Autor

A Figura 20 apresenta a resposta em frequência da função de transferência que relaciona a corrente da rede e a razão cíclica do retificador para o filtro LCL. Desta forma, pode-se observar a frequência de ressonância do filtro LCL próximo de 8 kHz, para os respectivos valores projetados pra esse filtro. É possível ainda verificar na Figura 20 que para os 60 Hz a corrente ainda está a ser amplificada em relação a tensão, como esperado.

No Anexo é apresentado os parâmetros utilizados, no *MathCad*, para obtenção da Figura 20.

Um comparativo entre os filtros L e LCL, com base nas literaturas estudadas, é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4: Análise comparativa entre o Filtro LCL e o Filtro L

| Análise Comparativa | |
|--|--|
| Filtro LCL | Filtro L |
| Filtro passa-baixa de terceira ordem | Filtro passa-baixa de primeira ordem |
| Indutores de menor volume | Indutor de maior volume |
| Projeto complexo | Projeto Simples |
| Existência do fenômeno de ressonância | Não existe o fenômeno de ressonância |
| Controle Complexo | Controle mais simplificado |
| Melhor resposta dinâmica | Pior resposta dinâmica |
| Melhor desempenho para baixa frequência de comutação | Pior desempenho para baixa frequência de comutação |

Fonte: Do Autor

Face o exposto optou-se por utilizar o filtro LCL por ter indutores de menor volume, um melhor desempenho para baixa frequência de comutação e por atenuar de maneira bem mais satisfatórias, mostrado nos resultados, os harmônicos gerados pela comutação das chaves do inversor.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

Após o estudo dos componentes do sistema abordado no Capítulo 2, o dimensionamento e projeto do filtro implementado no Capítulo 3, bem como a escolha da arquitetura de controle para os componentes, no Capítulo 4, surge então a análise do comportamento da plataforma estudada, descritas neste capítulo, com algumas topologias de conexão com a rede e também sem filtro. Alterando as configurações de conexão, analisa-se a resposta do sistema conectado à rede. Como também, algumas especificações normativas que esta conexão deve cumprir durante o seu funcionamento.

Uma análise dos harmônicos individuais mais significativos será efetuada para cada topologia de conexão e também para topologia sem filtro. A eficácia e eficiência das respectivas conexões implementadas serão abordadas através da apresentação de resultados da simulação.

Os testes realizados nessa seção foram no Laboratório de Otimização em Sistemas Elétricos do curso de Engenharia Elétrica da UFPB.

5.1 Resultados de Simulação

As simulações dos tipos de conexão foram realizadas no programa *Matlab/Simulink*[®], baseado nos componentes descritos no Capítulo 2.

Nas simulações realizadas foram consideradas três condições de conexões, sendo a primeira condição sem conexão (sem filtro), a segunda com a topologia L (filtro L) e a terceira a topologia proposta LCL (filtro LCL). Para as três condições foram obtidos resultados em regime permanente e transitório decorrente da modificação de irradiação no módulo solar.

O circuito de potência corresponde ao arranjo fotovoltaico mencionado no Capítulo 2, na seção 2.3.1, onde os parâmetros do painel *Kyocera Solar KD 325 GX-LPB* estão descritos na Tabela 1.

5.1.1 Topologia Sem Filtro

O termo “sem filtro” é apenas para efeito de simulação, pois o programa *Matlab/Simulink*[®] não permite a conexão do inversor diretamente com a carga. Desta forma, foi utilizado uma indutância muito pequena no valor de 30 μH .

Analisando a Figura 21 é possível observar a corrente de saída do inversor, onde contém um grande conteúdo de harmônicos.

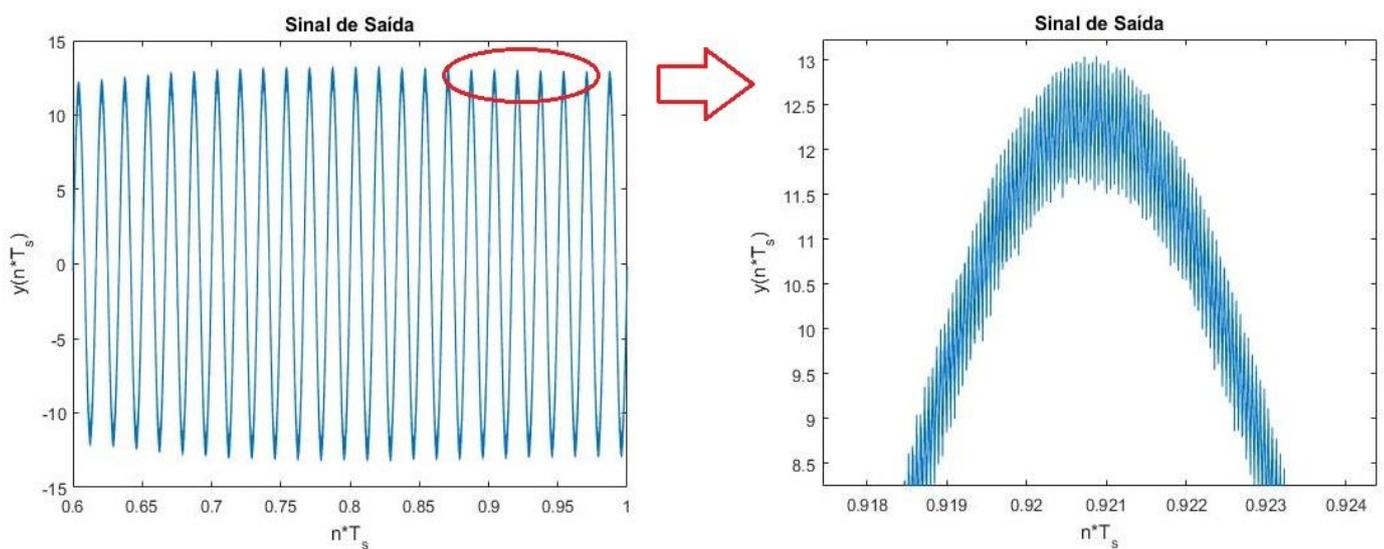


Figura 21: Sinal de Saída sem Filtro

Fonte: Do Autor

A presença de harmônicos, gerados pelo chaveamento do inversor, faz com que apareça distorções indesejáveis no sinal da forma de onda da saída do inversor.

A Figura 22 mostra a tensão na carga. É importante observar a forma de onda obtida, pois mostra o tipo de comportamento que causaria imperfeições no funcionamento da carga. Por isso a necessidade de filtros de conexão. Posteriormente, os resultados irão mostrar a melhoria da tensão na carga com o uso de filtros.

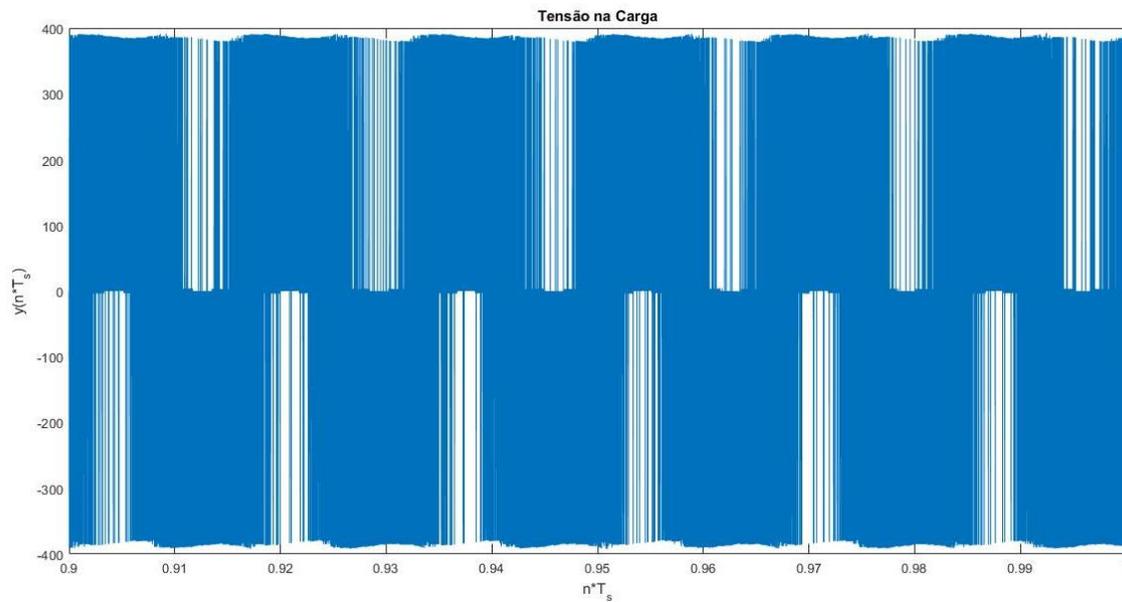


Figura 22: Tensão na carga com o sistema sem filtro de conexão

Fonte: Do Autor

5.1.2 Filtro L

O caso mais básico para conexão entre o inversor e a rede é através do Filtro L, conforme a Figura 23. O indutor (L_l) utilizado nessa topologia foi de 1,82 mH. Esse valor foi proveniente da soma dos dois indutores ($L_i + L_g$) do projeto do filtro LCL, ou seja, o valor da indutância total.

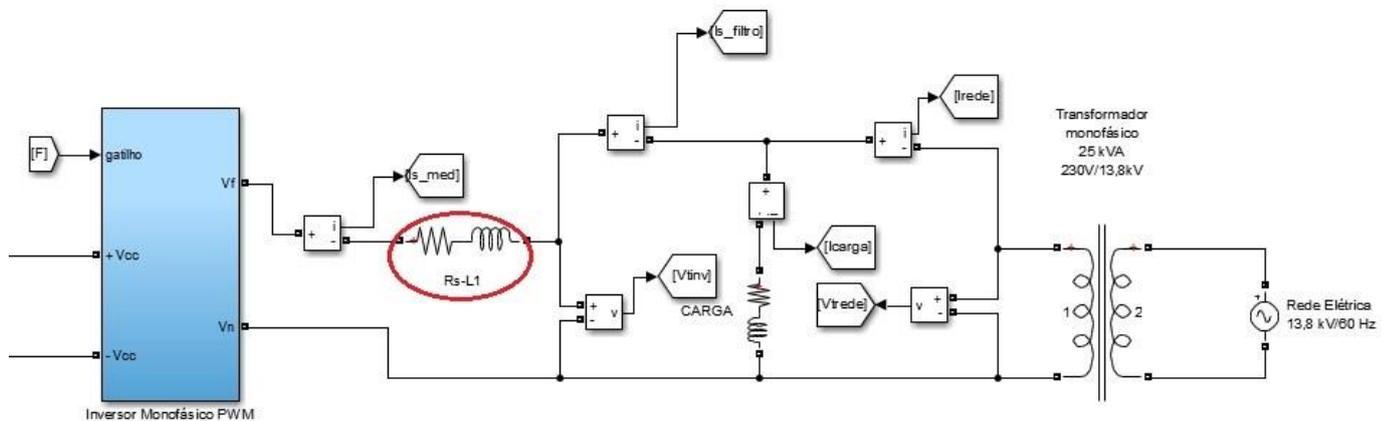


Figura 23: Destaque do Filtro L conectado ao sistema

Fonte: Do Autor.

Note a presença de uma resistência (R_s) conectado ao filtro L, ela é necessária apenas para efeito de simulação e representar as perdas nos enrolamentos do indutor (apresenta valor baixo, nesse caso $0,5\Omega$). O filtro L é um passa baixa de primeira ordem, onde sua saída é mostrada na Figura 24.

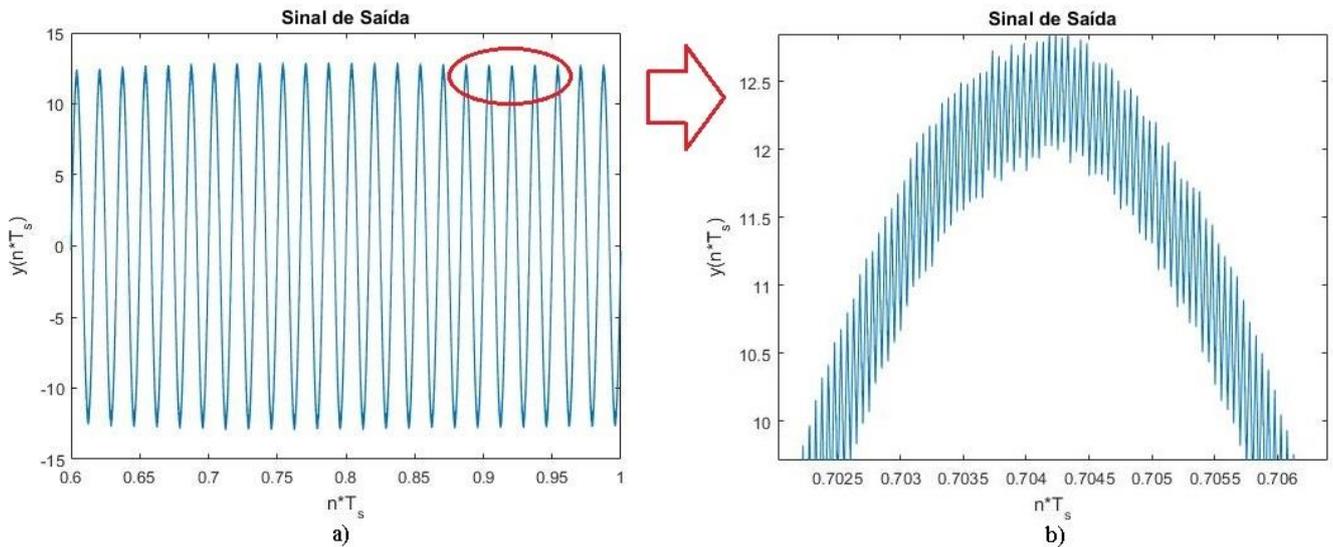


Figura 24: a) Sinal de Saída do Filtro L; b) Destaque do Sinal de Saída

Fonte: Do Autor.

No caso do Filtro L o sinal de entrada será igual ao sinal de saída, devido a corrente ser a mesma. É possível na Figura 24(b), observar a ondulação de corrente significativa no sinal de corrente de saída.

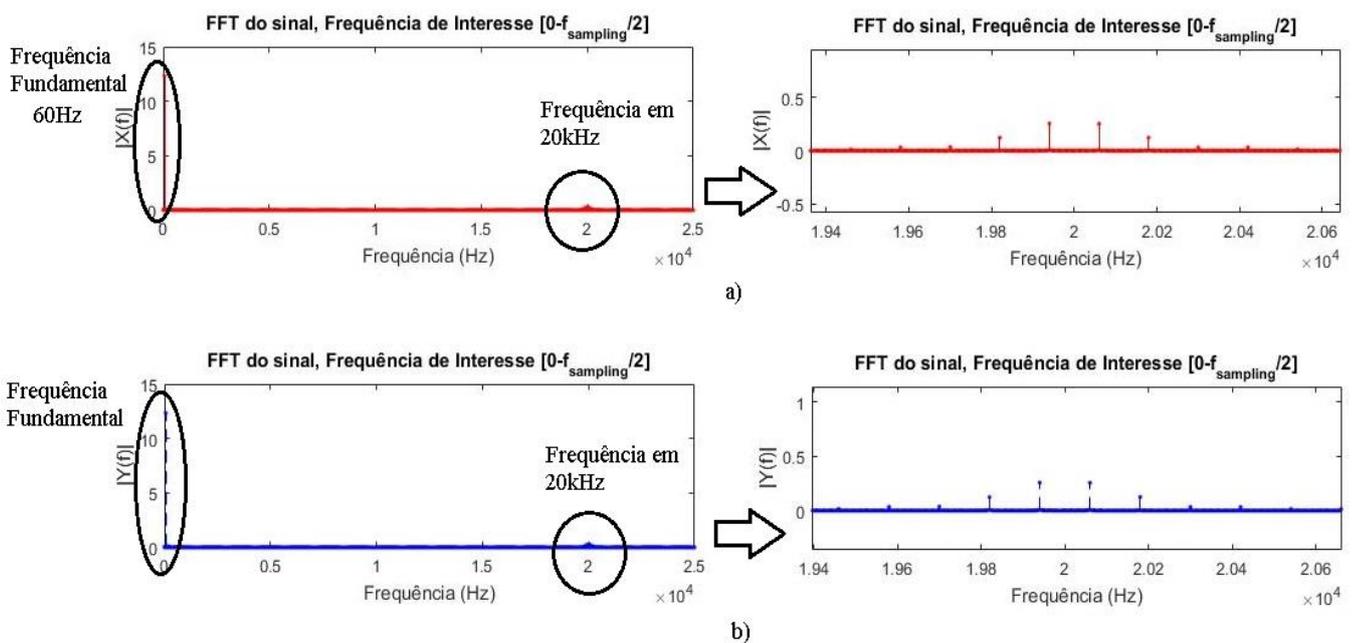


Figura 25: a) FFT do sinal de entrada; b) FFT do sinal de saída

Fonte: Do Autor

A Figura 25 apresenta as FFT de entrada e saída, simultaneamente, do Filtro L. Os sinais apresentam um pico correspondente a componente fundamental e outro, de menor amplitude, na frequência de 20 kHz. Expandindo a imagem, Figura 25 (b), é possível observar novos picos de menor amplitude. A FFT foi obtida analisando a corrente no filtro.

A tensão na carga, mostrada na Figura 26, apresenta melhoria considerável, mesmo utilizando o Filtro L com valor 1,82 mH, comparado ao sistema sem filtro da Figura 22. Em aplicações práticas, este tipo de sinal acarretaria em um mau funcionamento da carga.

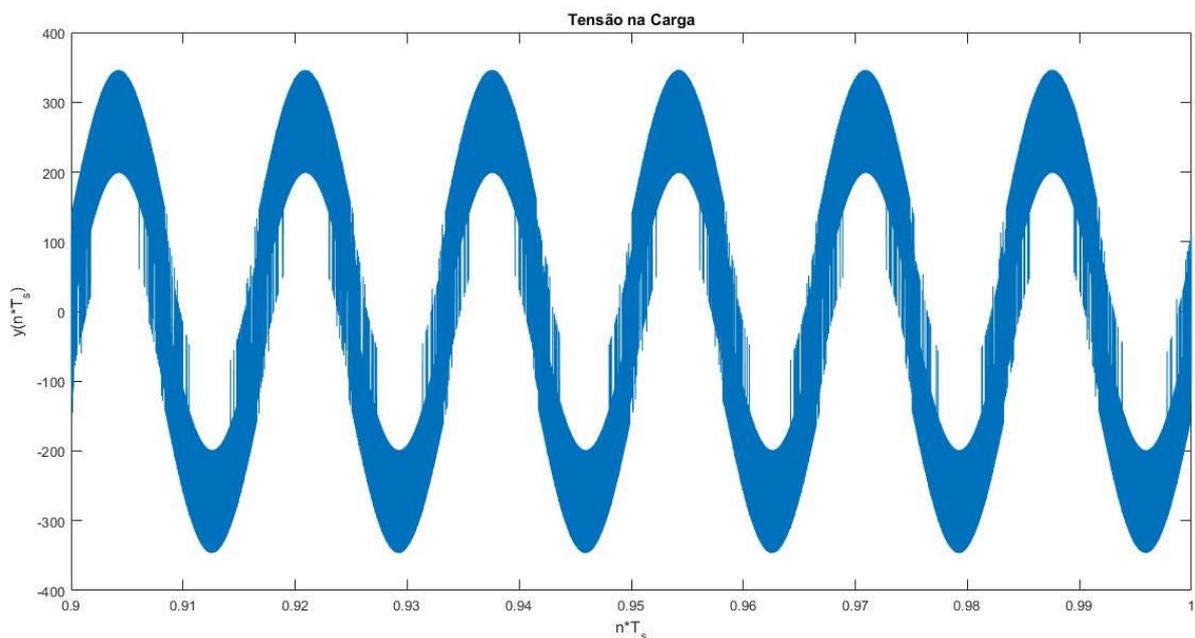


Figura 26: Tensão na carga com Filtro L

Fonte: Do Autor

De posse dos resultados obtidos com o filtro L de 1,82 mH, optou-se por aumentar o valor da indutância com intuito de analisar os impactos no sistema quando se projeta um Filtro L com um indutor de alto volume.

Aumentando, gradativamente, o valor de indutância pode-se chegar no valor de 20 mH, pois, com valores superiores a este o controle da plataforma não desempenhava a sua função. Isto é, o controle do barramento CC e da corrente de saída do inversor não estava alcançando os objetivos para os quais foram projetados.

A Figura 27, mostra a corrente de saída do filtro com indutor no valor de 20 mH.

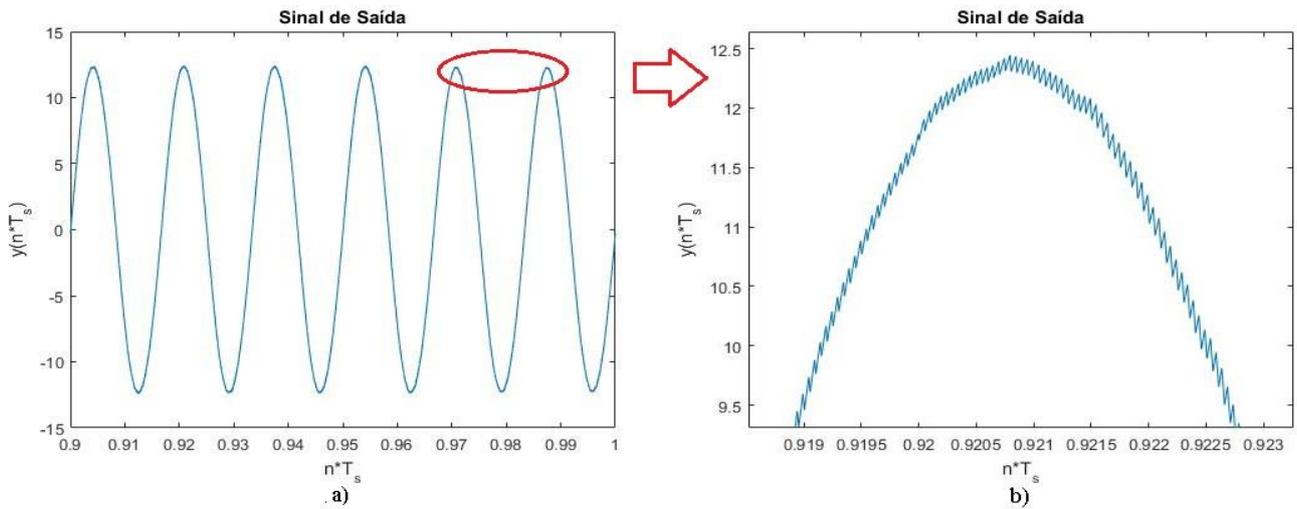


Figura 27: a) Sinal de Saída do Filtro $L=20$ mH; b) Destaque do Sinal de Saída do Filtro $L= 20$ mH

Fonte: Do Autor

O sinal apresentado na Figura 27(a) mostra a melhoria que se obtém com o aumento do valor do indutor do Filtro L. O conteúdo de distorção também diminui, como mostrado na Figura 27(b).

Assim, pode-se então analisar a tensão na carga, mostrada na Figura 28.

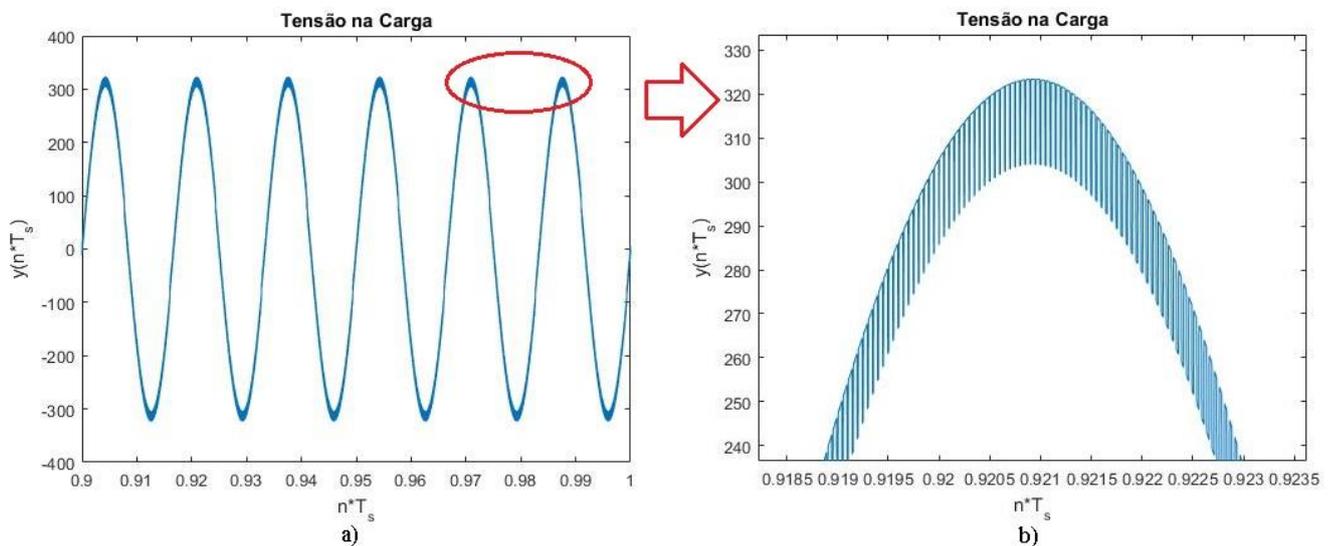


Figura 28: a) Tensão na carga Filtro $L=20$ mH; b) Destaque da Tensão na carga Filtro $L=20$ mH

Fonte: Do Autor

As Figuras 28(a) e 28(b), são apresentadas a tensão nos terminais da carga e o destaque da tensão, respectivamente, onde pode-se observar que mesmo aumentando o indutor do filtro ainda contém alto conteúdo de harmônicos.

5.1.3 Filtro LCL

A escolha do Filtro LCL, foi baseada no compromisso entre atenuação de harmônicos e tamanho dos componentes. Apesar do filtro LCL apresentar ressonância indesejável, mencionado no Capítulo 4, a atenuação em altas frequências é significativamente maior. Além disso o Filtro LCL oferece melhor resposta na redução de harmônicos causados pelo chaveamento do inversor.

Face o exposto, pode-se então analisar o comportamento do Filtro LCL. Analisando o inversor em regime permanente e de modo a obter o funcionamento à carga nominal, pode ser analisado o comportamento do Filtro LCL e a respectiva atenuação dos harmônicos da frequência de comutação. A Figura 29 mostra um comparativo entre a corrente de entrada e a corrente de saída do filtro.

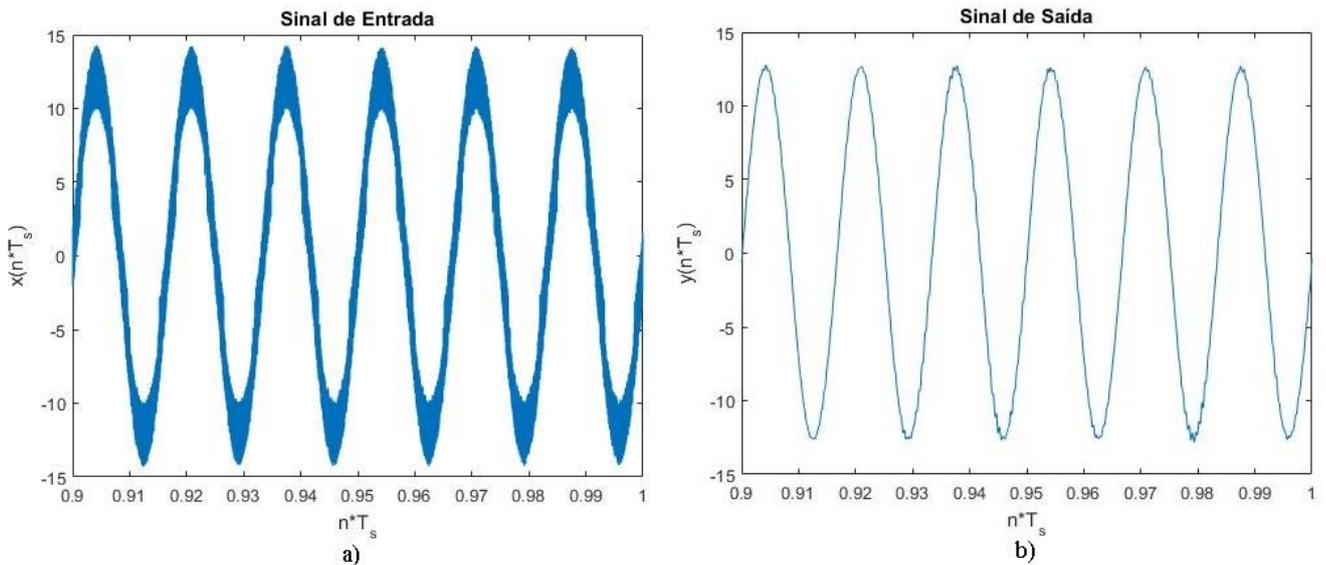


Figura 29: a) Sinal de entrada do Filtro LCL; b) Sinal de saída do Filtro LCL

Fonte: Do Autor

A Figura 29(a), mostra o sinal de corrente de entrada do filtro com grande conteúdo de oscilações provocadas pelo inversor. Após filtragem, Figura 29(b), a corrente apresenta pequenas distorções. O estudo é melhor observado na Figura 30, onde é feita a análise da FFT de corrente dos sinais.

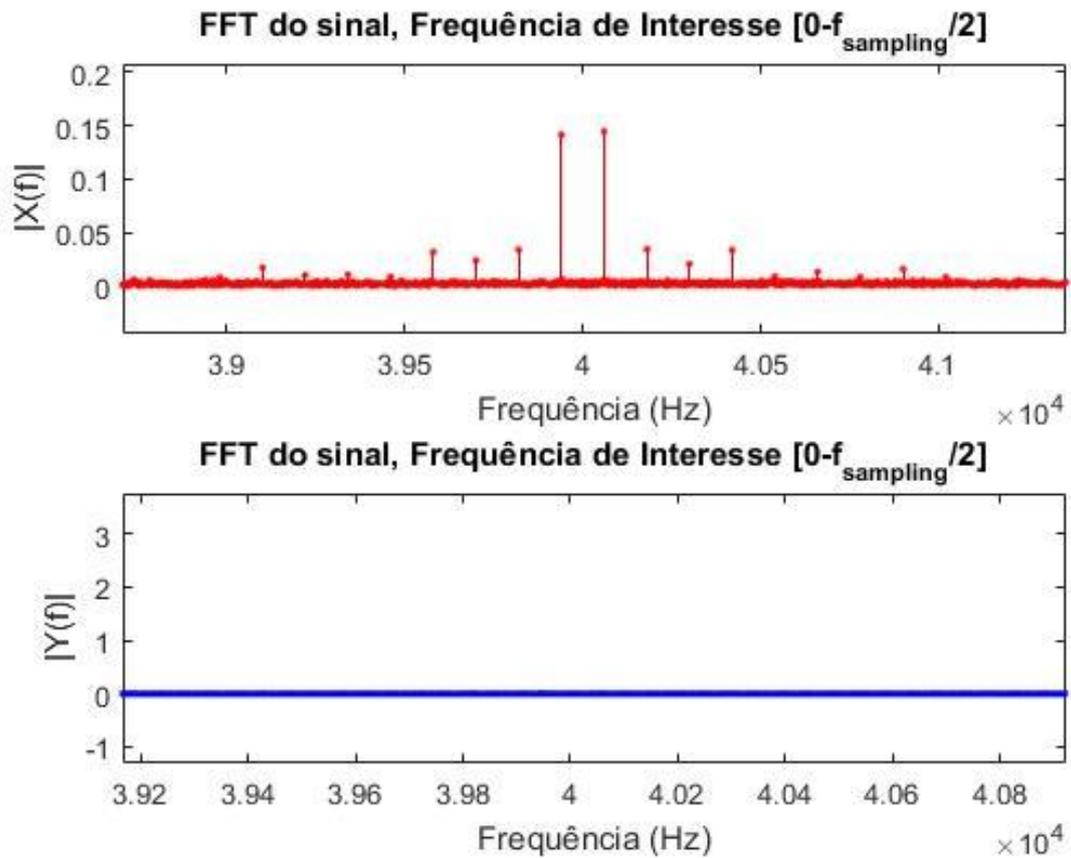


Figura 30: Efeito do Filtro LCL com respectiva análise FFT

Fonte: Do Autor

A Figura 30, apresenta o efeito do filtro na corrente de saída do inversor. Pode-se observar a grande quantidade de harmônicos começando em 20 kHz e se propagando em seus múltiplos. Existem também harmônicos, de baixas frequências, resultantes do controle de corrente. Estes são responsáveis pela pequena distorção no sinal de saída, observados na Figura 31.

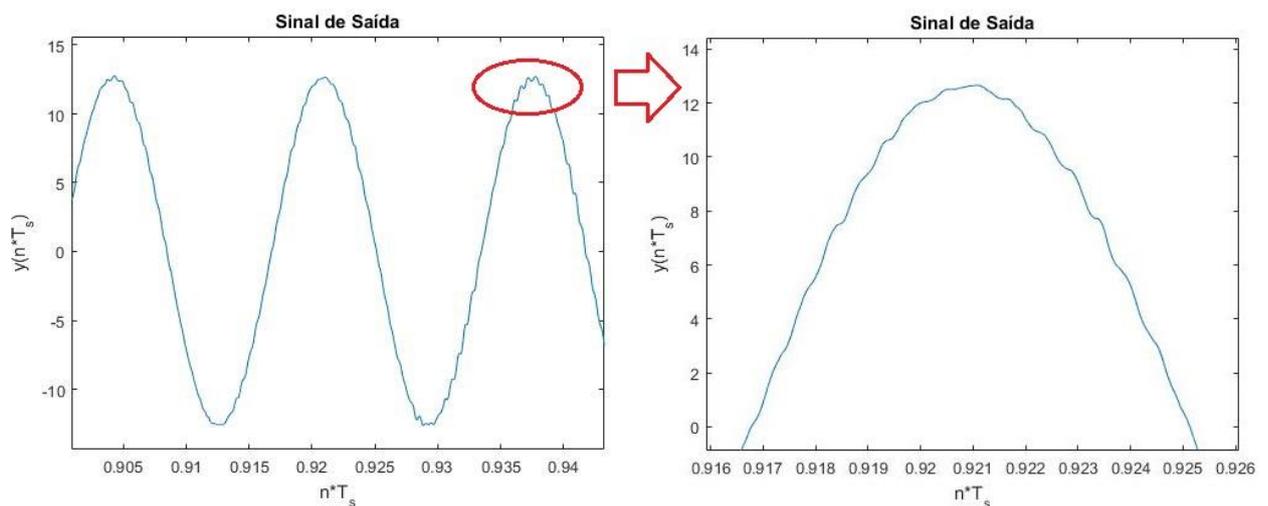


Figura 31: Destaque no Sinal de Saída do Filtro LCL

Fonte: Do Autor

Ainda sobre a Figura 31, é possível observar uma propagação de ruído da frequência de ressonância, podendo significar que possa existir ruído ressonante do controle de corrente (PR).

Com intuito de comparar com os outros resultados, gera-se a Figura 32, onde é possível analisar a tensão nos terminais de carga.

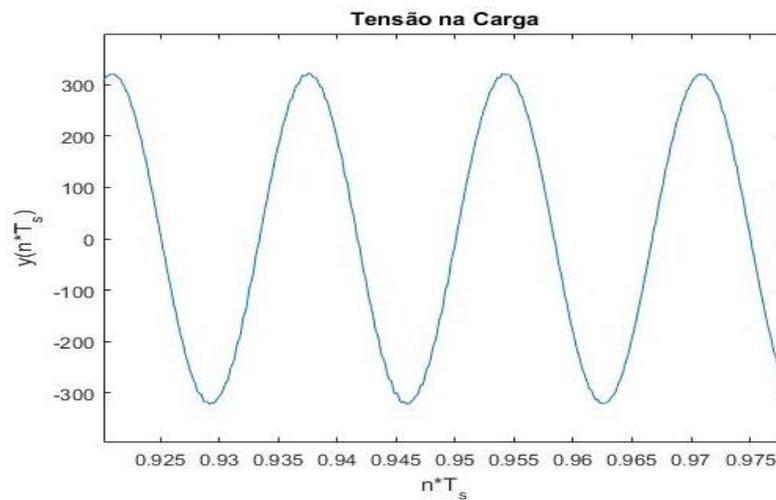


Figura 32: Tensão na carga com o Filtro LCL

Fonte: Do Autor

Como consequência do filtro LCL de conexão, é notável, que a topologia exibe uma corrente injetada na rede com qualidade superior à de todos os outros métodos simulados.

Na Figura 33 são visualizadas as formas de onda da corrente de saída do inversor e da tensão na rede, ou seja, tensão na carga. Onde a onda da cor vermelha corresponde a corrente de saída do inversor e a onda na cor azul corresponde a tensão da rede elétrica.

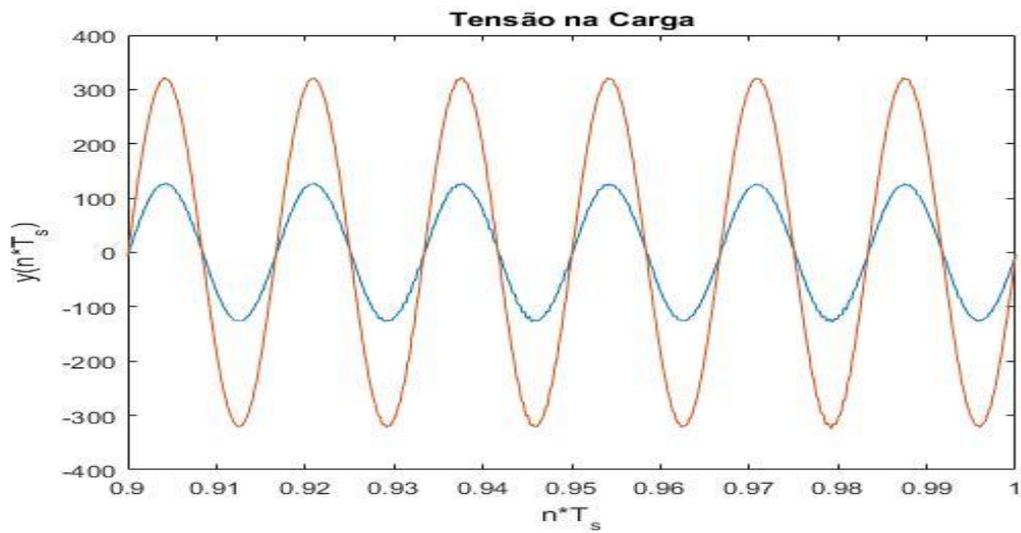


Figura 33: Corrente de saída do inversor e Tensão da rede

Fonte: Do Autor

Em regime permanente, como podemos observar na Figura 33, o sistema fornece potência puramente ativa. Com isso, o sistema garante que o PV injeta o máximo de potência ativa na carga, o que diminui a potência proveniente da rede e reduzindo a tarifa de energia do consumidor.

6 CONCLUSÕES

O presente trabalho contribuiu com o controle de conversores conectados à rede elétrica através de um Filtro LCL. Do exposto anteriormente, pode-se extrair as seguintes conclusões gerais.

Expuseram-se os conceitos teóricos sobre os componentes que integram o sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica e os métodos de controle de um conversor *push-pull* e de um inversor monofásico de tensão.

Atualmente a instalação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica está em crescente expansão, em parte devido aos incentivos e apoios que o governo tem oferecido. Assim, reduzindo os custos para a implantação de tecnologias desse porte em novos empreendimentos, e, por consequência diminuir no futuro o consumo de energia de fontes mais poluentes. Com a crescente potência instalada nos grandes centros e o surgimento de novos equipamentos que necessitam de uma energia elétrica de qualidade, é necessário ter melhores sistemas de controle, de forma a permitir que o sinal injetado na rede tenha os devidos padrões.

O sistema foi implementado em ambiente de simulação *Simulink/MatLab* para validar todos os algoritmos desenvolvido durante este trabalho. Para a realização das simulações, com o inversor conectado à rede elétrica, foi projetado um filtro ressonante passivo LCL para atenuar os efeitos indesejáveis dos harmônicos gerados pelos chaveamento em altas frequências do inversor.

Os componentes utilizados deste trabalho foram modelados de forma separada, analisando individualmente a função que cada um exerce. De posse dessa análise, foi feita a conexão destes elementos no sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica.

Em seguida, foram abordados os controles para o conversor *push-pull* e para o inversor ponte completa monofásico. Para o controle do conversor utilizou-se a técnica de rastreamento da máxima potência através do algoritmo conhecido como Perturba e Observa. Onde a mesma é capaz de extrair a máxima potência produzida pelo painel fotovoltaico. Para o controle do inversor, foram utilizadas duas estratégias: a primeira para controlar a tensão do barramento CC, através de um PI (Proporcional Integral), e a segunda para controlar a corrente de saída do inversor, através de um PR (Proporcional Ressonante), com o propósito de controlar a potência ativa e reativa de forma independente e providenciar potência para a linha com fator de potência unitário.

A terceira parte foi descrito um método para projetar um filtro LCL passivo ressonante, daqui resultaram os parâmetros construtivos para a representação computacional do filtro. A qualidade do sinal é algo bastante importante neste tipo de tecnologia onde a qualidade da energia injetada pela rede é normatizada.

Por fim, foram discutidos os resultados obtidos na simulação em *MATLAB/Simulink* dos filtros estudados. Nesta parte a dificuldade estava em validar a eficácia do filtro LCL, no entanto conseguiu-se demonstrar o bom funcionamento através das técnicas analisadas e projetadas.

7 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Como proposta para trabalhos futuros, é sugerido:

- Projetar e implementar em uma bancada de testes experimentais o filtro LCL em condições de carga adversas onde possa fornecer, através de um sistema supervisorio de aquisição de dados, a quantidade de harmônicos injetados na rede elétrica, controle e proteção do sistema proposto.
- Análise de estabilidade do sistema considerando inversores conectados à redes de distribuição de baixa tensão com influência de diferentes tipos de cargas.
- Estudo comparativo entre diferentes técnicas de amortecimento ativo aplicadas a inversores conectados à rede.
- Aplicação de um controle, utilizando a retroação parcial robusta de estados, para amortecimento do pico ressonante do Filtro LCL.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] INEE, “<http://www.inee.org.br>,” acessado em: 13 Julho,2016. [Online]. Available: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp.
- [2] ROMERO-CADAVAL, E., FRANCOIS, B., MALINOWSKI, M., & ZHONG, Q. C. (2015). Grid-connected photovoltaic plants: An alternative energy source, replacing conventional sources. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 9(1), 18-32.
- [3] KOURO, S., LEON, J. I., VINNIKOV, D., & FRANQUELO, L. G. (2015). Grid-connected photovoltaic systems: An overview of recent research and emerging PV converter technology. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 9(1), 47-61.
- [4] RÜTHER, RICARDO. Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil, Florianópolis: LABSOLAR, 2004
- [5] PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D.; RÜTHER, R. Atlas Brasileiro de Energia Solar, São José dos Campos: 2006.
- [6] URBANETZ JUNIOR, JAIR. Sistemas fotovoltaicos conectados a redes de distribuição urbanas: sua influência na qualidade da energia elétrica e análise dos parâmetros que possam afetar a conectividade - Florianópolis, SC, 2010.
- [7] VIANA, T. S. Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil. (Tese de Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis, 2010.
- [8] IEA – PVPS – International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme “Added Values of Photovoltaic Power Systems” Report IEA-PVPS 1-09: 2001. 33p.
- [9] LISITA, O. Sistemas fotovoltaicos conectados à rede: estudo de caso – 3kWp instalados no estacionamento do IEE – USP. São Paulo, 2005. 87p. Dissertação (Mestrado em Energia) - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- [10] CERVANTES, C., *Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 118 p. Dissertação (Mestrado).
- [11] ZILLES, R., OLIVEIRA, S. H. F. & BURANI, G. F. “Distributed Power Generation with Photovoltaic Systems at USP” IEEE/PES T&D 2002 Latin America Conference. 18 - 22 de Março de 2002 Centro de Convenções Anhembi, São Paulo.
- [12] BENEDITO, R. S. Caracterização da Geração Distribuída de eletricidade por meio de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, no Brasil, sob os aspectos técnico, econômico e regulatório. 2009. 108 p. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Energia. Universidade de São Paulo.

- [13]NEO SOLAR, <http://www.neosolar.com.br>. Acesso em: 13 de julho,2016. [Online]. Available:<http://www.neosolar.com.br/aprenda/saiba-mais/sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica-e-seus-componentes>.
- [14]ESTOR GNOATTO, RIVANILDO DALLACORT, REINALDO PRANDINI RICIERI, SUEDEMIO DE LIMA SILVA E YURI FERRUZI. Determinação da curva característica de um painel fotovoltaico em condições reais de trabalho. *Maringá*, v. 27, n. 2, p. 191-196, July/Dec., 2005.
- [15]PALZ, W. Energia solar e fontes alternativas. São Paulo: Hemus, 1995.
- [16]L. G. FRANQUELO, J. M. CARRASCO, J. T. BIALASIEWICZ, E. GALVAN, R. C. P. GUISSADO, M. A. M. PRATS, J. I. LEON, AND N. MORENO-ALFONSO, "Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1002-1016, 2006.
- [17]M. CACCIATO, A. CONSOLI, AND V. CRISAFULLI, "Power converters for photovoltaic generation systems in smart grid applications," in *Power Electronics Conference, 2009. COBEP '09. Brazilian*, 2009, pp. 26-31.
- [18]BARBI, IVO. Família de Conversores Boost para a Correção de Fator de Potência de Retificadores Monofásicos– Relatório Interno, INEP/UFSC-2003.
- [19]D. A. FERNANDES, M. VIEIRA, M. VITORINO, F. F. COSTA, AND P. C. RIBEIRO. Modeling and state-space feedback control of a dc-dc converter for photovoltaic systems. In *Proc. of ECCE*, volume 01, pages 1119–1128, 2014.
- [20]FERREIRA DOS SANTOS, FRANCISCO A. JR. Modelagem e Análise de Sistema Fotovoltaico Isolado Baseado em Plataforma de Simulação com Diagrama de Blocos – João Pessoa, 2016.
- [21]GABE, IVAN JORGE. *Contribuição Ao Controle de Inversores PWM Alimentados Em Tensão Conectados À Rede Através de Filtro-LCL*. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Dissertação de Mestrado, mar. 2008.
- [22]DANNEHL, JOERG; FUCHS, FRIEDRICH WILHELM; HANSEN, STEFFAN. *PWM Rectifier With LCL-Filter Using Different Current Control Structures*, European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1 – 10, set. 2007.
- [23]LISERRE, MARCO; BLAABJERG, FREDE; HANSEN, STEFFAN. *Design And Control Of An LCL Filter Based Three-Phase Active Rectifier*. IEEE Transaction Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1281 – 1291, set./out. 2005.
- [24]KARSHENAS, HAMID R.; SAGHAFI, HADI. *Basic Criteria In Designing LCL Filters For Grid Connected Converters*. IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), vol. 4, pp. 1996 – 2000, jul. 2006.
- [25]J. AGORRETA, M. BORREGA, J. LOPEZ, AND L. MARROYO, "Modelling and Control of N Paralleled Grid-Connected Inverters with LCL Filter coupled due to Grid Impedance in PV plants," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. PP, pp. 1-1, 2010.
- [26]C. CHIEN-LIANG, L. JIH-SHENG, W. YU-BIN, P. SUNG-YEUL, AND H. MIWA, "Design and Control for LCL-Based Inverters with Both Grid-Tie and Standalone Parallel

- Operations," in Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE, 2008, pp. 1-7.
- [27] L. POH CHIANG AND D. G. HOLMES, "Analysis of multiloop control strategies for LC/CL/LCL-filtered voltage-source and current-source inverters," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 41, pp. 644-654, 2005.
- [28] KONZEN, Gabriel. The diffusion of residential grid-connected photovoltaic systems in Brazil: a simulation via Bass model. 2014. 108 p. M. Sc. Diss. Post-Graduate Program in Energy. University of São Paulo. São Paulo, 2014.
- [29] SOUSA, KARLA KEITIANNE FERREIRA DE. Controle da Tensão do Barramento CC pelo Inversor Monofásico Ponte Completa em um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica – João Pessoa, 2016.
- [30] H. P. DESAI AND H. K. PATEL, "Maximum Power Point Algorithm in PV Generation: An Overview," in *Power Electronics and Drive Systems, 2007. PEDS '07. 7th International Conference on*, 2007, pp. 624-630.
- [31] TAVARES PINHO, J., ANTONIO GALDINO, M. Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos, CEPTEL – CRESESB; Edição Revisada e Atualizada; Rio de Janeiro – Março – 2014.
- [32] F. BLAABJERG, R. TEODORESCU, M. LISERRE, AND A. V. TIMBUS, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 53, pp. 1398-1409, 2006.
- [33] BINA, M. TAVAKOLI; PASHAJAVID, E. *An Efficient Procedure To Design Passive LCL-Filters For Active Power Filters*. *Electronic Power Systems Research*, vol. 79, n. 4, pp. 606 – 614, abr. 2009.
- [34] JALILI, KAMRAN; BERNET, STEFFEN. *Design Of LCL Filters Of Active-Front-End Two-Level Voltage-Source Converters*, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, n. 5, pp. 1674 – 1689, maio. 2009.
- [35] LANG, YONGQIANG; XU, DIANGUO; HADIANAMREI, S. R.; MA, HONGFEI. *A Novel Design Method of LCL Type Utility Interface For Three-Phase Voltage Source Rectifier*, 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference (PESC), pp. 313 – 317, jun. 2005.
- [36] LIU, FEI; ZHA, XIAOMING; ZHOU, YAN; DUAN, SHANXU. *Design And Research On Parameter Of LCL Filter In Three-Phase Grid-Connected Inverter*, IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), pp. 2174 – 2177, maio. 2009.
- [37] SUN, WEI; CHEN, ZHE; WU, XIAOJIE. *Intelligent Optimize Design of LCL Filter For Three-Phase Voltage-Source PWM Rectifier*, IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), pp. 970 – 974, maio. 2009.

9 APÊNDICE