

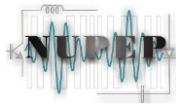


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM
A FUNÇÃO AUXILIAR DE FILTRO ATIVO PARA MITIGAÇÃO DE
HARMONICOS NA REDE**

Professor: Dr. Gustavo Brito de Lima
Aluno: Leonardo Henrique Pereira

UBERLÂNDIA - MG
2019



LEONARDO HENRIQUE PEREIRA

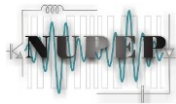
**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM
A FUNÇÃO AUXILIAR DE FILTRO ATIVO PARA A MITIGAÇÃO DE
HARMONICOS NA REDE**

Monografia apresentada à Universidade Federal De Uberlândia como parte das exigências à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Eletrônica de Potência / Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Brito de Lima

UBERLANDIA - MG
ABRIL– 2019



**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO COM
A FUNÇÃO AUXILIAR DE FILTRO ATIVO PARA A MITIGAÇÃO DE
HARMONICOS NA REDE**

Monografia aprovada para obtenção do título
de Bacharel em Engenharia Elétrica da
Universidade Federal De Uberlândia pela
banca examinadora formada por:

Uberlândia, 7 de maio de 2019.

Prof. Dr. Gustavo Brito de Lima

Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas

Msc. Marcus Evandro Teixeira Souza Junior

Msc. Ênio Costa Resende



*À minha mãe Solange e meu pai João Sergio, que sempre estiveram ao meu lado,
Aos meus avós (+) maternos Osvaldo e Laura,
À minha família, que sempre me ajudou quando eu precisei
E não menos importante, a Republica Beerzona, o melhor metro quadrado de
Uberlândia.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais pelos esforços e compreensão ao longo desses longos anos de Faculdade. Pois, somente eles sabem o tanto que foi difícil essa caminhada que, ao final, percebo que foi realmente uma corrida cheia de obstáculos.

A minha família deixo minha gratidão por todo o apoio e incentivo ao longo dos anos, em especial aos meus avós maternos (+) Oswaldo, que infelizmente não me viu concretizar o sonho da minha entrada na tão sonhada Universidade, e Laura, que esteve comigo nessa jornada e infelizmente não pode ver o final da nossa viagem.

Agradeço também a Universidade Federal de Uberlândia, por toda a estrutura dada a minha educação e formação como pessoa, como também por ter feito o intermédio de diversas amizades, que acredito que levarei para vida inteira, e experiências incríveis dentro e fora de sala.

Deixo aqui também expresso os meus agradecimentos a Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT), por todo o apoio e atenção durante toda a graduação, juntamente a todos os professores que tive o prazer de conhecer dentro e fora de sala. Em especial, ao Prof. Dr. Gustavo Brito de Lima, que ao final dessa corrida, se prontificou a ser meu orientador e sem ele este trabalho não teria se concretizado. Onde, ao decorrer do trabalho, me deu uma aula de compreensão, paciência e grandes ensinamentos.

Por fim, agradeço a grande República *Beerzona* e agregados pelos anos de alegria, camaradagem e incontáveis histórias que tivemos juntos durante esse período. Acredito que levarei todos no coração e nas memórias.

RESUMO

Esta monografia apresenta o projeto e simulação de um sistema fotovoltaico com a função auxiliar de mitigação de harmônicos. O presente sistema deve operar de modo que, caso exista uma fonte de harmônico (cargas não-lineares), o inversor do painel fotovoltaico atuará de tal forma que parte da energia antes produzida para consumo direto será utilizada para função de mitigação, atenuando assim o fenômeno dos harmônicos. Inicialmente foram estudadas as principais características que regem o funcionamento de um sistema fotovoltaico, ou seja, seus conceitos básicos. Quanto ao aspecto de projeto, foram-se estudados os principais tipos de Filtro para os sistemas fotovoltaicos (L e LCL), o tipo de controle para os inversores (Histerese e Proporcional Ressonante) e juntamente com as estratégias de controle também foram desenvolvidos estudos sobre os melhores métodos de extração dos sinais de harmônicos da rede. Sendo estes baseados nas estruturas da Transformada Direta de Fourier (TDF) e no Integrador Generalizado de Segunda Ordem em Loop Fechado, mais conhecido como SOGI-FLL. Para melhor resposta e implementação desse projeto foi utilizado o Software PSIM, onde, por meio deste, realizou-se uma combinação dos filtros, meios de controle e os meios de extração de harmônicos citados anteriormente. Assim, obtendo ao final deste estudo, o sistema de melhor resposta para a função auxiliar. Dentre os oito tipos de controle idealizados nesse trabalho, as melhores respostas obtidas foram: Filtro L + Proporcional Ressonante + TDF e o Filtro L + Proporcional Ressonante + SOGI-FLL. Sendo o primeiro o de melhor resposta entre todos. Portanto, atendendo a proposta desse trabalho.

Palavra Chave: Sistema Fotovoltaico, Mitigação Harmônicos, Proporcional Ressonante, SOGI-FLL, TDF

ABSTRACT

This monograph presents the design and simulation of a photovoltaic system with the auxiliary harmonic mitigation function. The present system must operate so that, if there is a harmonic source (non-linear loads), the inverter of the solar panel will act in such a way that part of the energy previously produced for direct consumption will be used for mitigation function, attenuating the phenomenon of harmonics. Initially, the main characteristics that govern the operation of a photovoltaic system, that is, its basic concepts, were studied. As for, the design aspect, the main types of filters for the photovoltaic systems, L and LCL, the type of control for inverters, Hysteresis and Proportional Resonant were studied and together with the control strategies were also developed studies on the best methods of extracting harmonic signals from the network. Being them based on the structures of the Direct Fourier Transform (DFT) and the Second Order Generalized Integrator Locked Loop, better known as SOGI-FLL. For a better response and implementation of this project, the PSIM Software was used, whereby we made a combination of the filters, control means and harmonic extractors mentioned above. Thus, obtaining at the end of this study, the best response system is to obtain the auxiliary function. Among the eight types of control idealized in this study, the best responses were: Filter L + Proportional Resonant + DFT and the Filter L + Proportional Resonant + SOGI-FLL. The first one being the best answer among all. Therefore, considering the proposal of this work.

Keyword: Photovoltaic System, Harmonic Mitigation, Proportional Ressonant, SOGI-FLL, DTF

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	14
1.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA	14
1.2 O SISTEMA FOTOVOLTAICO NO BRASIL	15
1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	17
1.4 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	19
1.4.1 Capítulo 1	19
1.4.2 Capítulo 2	19
1.4.3 Capítulo 3	19
1.4.4 Capítulo 4	19
1.4.5 Capítulo 5	19
CAPÍTULO 2 – SISTEMA FOTOVOLTAICO	20
2.2 CÉLULAS E MÓDULOS FOTOVOLTAICOS	20
2.2.1 Células Fotovoltaicas.....	21
2.2.2 Módulos Fotovoltaicos	21
2.3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÔNOMOS	24
2.3.1 Baterias	25
2.3.2 Controlador de Carga.....	26
2.3.3 Inversores	26
2.4 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA	26
2.4.1 Medidor Bidirecional.....	27
2.4.2 Inversores Para a Conexão à Rede Elétrica	28
CAPÍTULO 3 – DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	29
3.1 CONCEITOS BÁSICOS	29
3.2 ORIGEM DAS DISTORÇÕES	31
3.3 EFEITOS DANOSOS.....	32

3.4	REGULAMENTAÇÃO DE HARMÔNICOS SEGUNDO O PRODIST	33
3.5	MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS.....	35
3.5.1	Filtros Ativos	35
CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO		37
4.1	ESTRUTURA	37
4.1.1	Tipos de Filtros de Rede	37
4.1.2	Estratégias de Controle	41
4.1.2.1	P - Ressonante	41
4.1.2.2	Histerese	42
4.1.3	Extração de Harmônicos.....	44
4.1.3.1	Transformada Discreta de Fourier (TDF).....	44
4.1.3.2	Second Order Generalized Integrator Frequency Locked Loop (SOGI-FLL)	45
4.1.4	Rede e Cargas	49
4.2	FUNCIONAMENTO.....	50
4.3	ANÁLISES DAS RESPOSTAS DAS TÉCNICAS PROPOSTAS	52
4.3.1	Respostas do Controle Utilizando o Filtro L	52
4.3.2	Respostas do Controle Utilizando o Filtro LCL	54
4.3.3	Resultados.....	56
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES		59
ANEXO A.....		60
REFERÊNCIAS		66

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira 2015	14
Figura 2 - Matriz Energética Brasileira 2016	15
Figura 3 - Evolução da capacidade Instalada (MW) fotovoltaica no Brasil.....	17
Figura 4 - Diagrama de um SFCR.....	18
Figura 5 - Diagrama de um Filtro Ativo Conectado à Rede.....	18
Figura 6 - Efeito Fotovoltáico	20
Figura 7 - Hierarquia Fotovoltaica.	22
Figura 8 - Curvas Características de um Sistema Fotovoltaico.....	23
Figura 9 - Variação da Curva Característica em Relação a Temperatura e Radiação....	24
Figura 10 - Sistema Fotovoltaico Isolado.....	25
Figura 11 - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica.	27
Figura 12 - Forma de Onda Distorcida e Decomposição Harmônica.....	29
Figura 13 - Filtro Ativo em Paralelo	36
Figura 14 - Tipos de Controle.....	37
Figura 15 - Filtro LCL - Teórico	38
Figura 16 - Filtro L.....	39
Figura 17 - Filtro LCL.....	41
Figura 18 - PI Ressonante.....	42
Figura 19 - Faixa de Histerese.....	42
Figura 20 - Controle por Histerese	43
Figura 21 – Respostas dos Tipos de Transformadas de Fourier.....	44
Figura 22 - SOGI (SOGI-QSG).....	45
Figura 23 - Resposta SOGI-QSG	46
Figura 24 - Diagrama de Bode do E(s) e Q(s) do SOGI-QSG	47
Figura 25 - SOGI – FLL (Teórico).....	48
Figura 26 - SOGI - FLL.....	49
Figura 27 - Sistema Elétrico	50
Figura 28 - Corrente da Rede Sem Compensação	50
Figura 29 - Componentes Harmônicas da Rede	51
Figura 30 – Funcionamento.....	51

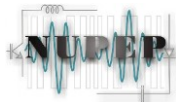


Figura 31 – Filtro L: Resposta Histerese com TDF	52
Figura 32 – Filtro L: Resposta Histerese com SOGI – FLL.....	53
Figura 33 – Filtro L: Resposta P - Ressonante com TDF.....	53
Figura 34 – Filtro L: Resposta P - Ressonante com SOGI – FLL.....	54
Figura 35 - Filtro LCL: Resposta Histerese com TDF	54
Figura 36 - Filtro LCL: Resposta Histerese com SOGI-FLL	55
Figura 37 - Filtro LCL: Resposta P - Ressonante com TDF	55
Figura 38 - Filtro LCL: Resposta P - Ressonante com SOGI - FLL	56
Figura 39 - Potencia Sem Compensação	57
Figura 40 - Potência Com Compensação	57

ÍNDICE DE ABREVIACÕES

A	- Ampères
AC	- Alternating Current
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
FINEP	- Financiadora de Estudos e Projetos
BNDES	- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
INMETRO	- Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
CONFAZ	- Conselho Nacional de Política Fazendária
ICMS	- Imposto sobre Circulação de Mercadoria e Serviços
PIS	- Programa de Integração Social
COFINS	- Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
SFCR	- Sistema Fotovoltaico Conectado a Rede
C	- Capacitor
$^{\circ}\text{C}$	- Graus Celsius
CA	- Corrente Alternada
CC	- Corrente Contínua
D	- Razão Cíclica
DC	- Direct Current
fs	- Frequência de Chaveamento
Ge	- Germânio
GWh	- GigaWatt - hora
H	- Henry
Hz	- Hertz
I	- Corrente elétrica
I_C	- Corrente no capacitor
I_{max}	- Corrente máxima
I_{min}	- Corrente mínima
I_{mp}	- Corrente máxima de pico
I_L	- Corrente fornecida pelo painel solar
I_L	- Corrente no indutor
I_R	- Corrente na resistência
J	- Joule
kWh/m ² /dia	- Quilowatt-hora por metro quadrado por dia
L	- Indutor
MG	- Minas Gerais
MME	- Ministério de Minas e Energia
MPP	- Maximum Power Point
MPPT	- Maximum Power Point Tracker
ms	- Milissegundo
MW	- Megawatt



mWh	- Miliwatt-hora
MWp	- Megawatt-Pico
P	- Potência
PR	- Proporcional Ressonante
P - Ressonante	-Proporcional Ressonante
PID	- Proporcional Integral Derivativo
PRODIST	-Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	- Pulse Width Modulation
Q	- Carga do capacitor
R	- Resistor representativo de carga
R_s	- Resistência da Carga
Si	- Silício
T	- Temperatura absoluta (K)
THD	- <i>Total Harmonic Distortion</i>
V	- Volts ou tensão
V_{ca}	- Tensão alternada
V_{cc}	- Tensão contínua
V_{IN}	- Tensão de entrada
V_O	- Tensão de Saída
V_{OUT}	- Tensão de Saída
V_C	- Tensão no capacitor
V_{DC}	- Tensão contínua
V_{OC}	- Tensão na saída do painel solar
V_{mp}	- Tensão máxima de Pico
V_{rms}	- Tensão eficaz
V_S	- Tensão da fonte
VSI	- Voltage Source Inverter
ZOH	- Zero order hold
Wp	- Watt-Pico
W/m^2	- Watts por metro quadrado
ΔI	- Ripple de corrente
ΔV	- Ripple de tensão
ΔV_O	- Ripple de tensão de saída

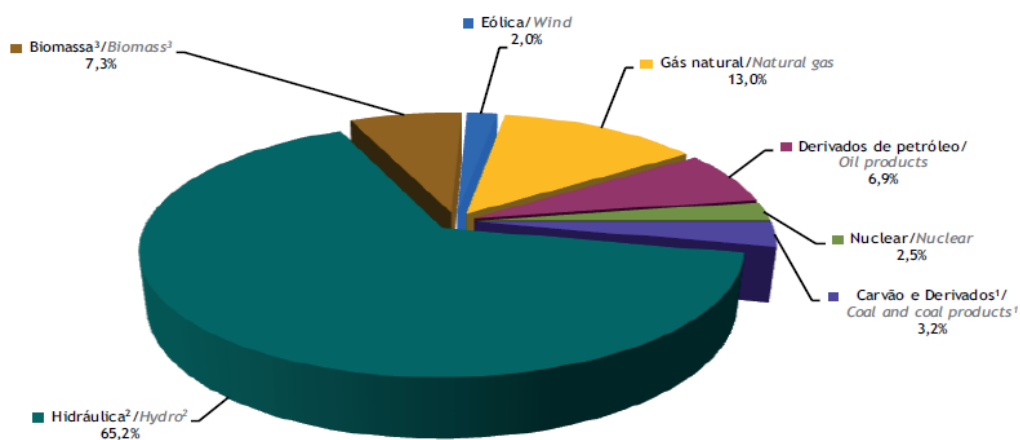
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Matriz Energética Brasileira

Matriz energética é um conjunto de fontes de energia ofertado no país para captar, distribuir e utilizar energia nos setores comerciais, industriais e residenciais. Ela representa a quantidade de energia disponível em um país e a origem dessa energia pode ser de fontes renováveis ou não renováveis.

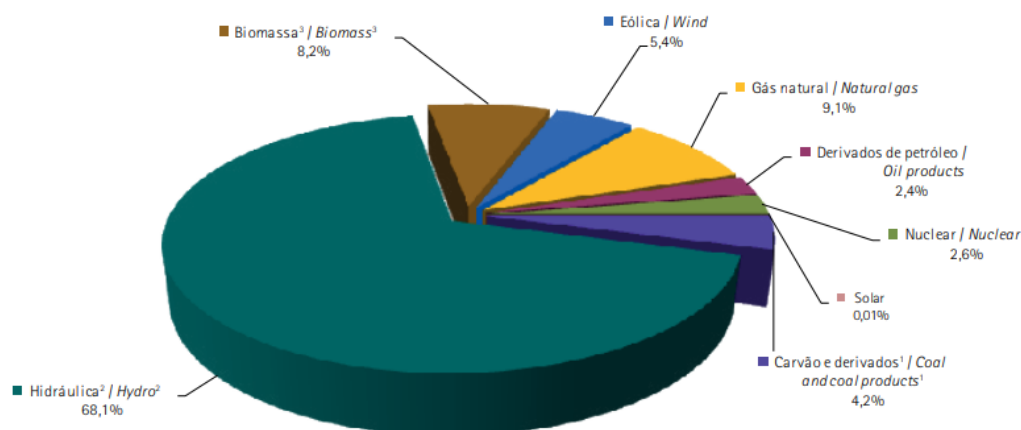
Diferente da matriz energética mundial que é composta, em sua maioria, por fontes não renováveis (combustíveis fósseis), a matriz energética brasileira possui sua base na produção hidrelétrica, uma fonte renovável [1]. A Figura 1 apresenta a matriz energética brasileira com base o ano de 2015 e a Figura 2 a matriz brasileira de 2016.

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira 2015



Fonte: [38]

Figura 2 - Matriz Energética Brasileira 2016



Fonte: [2]

Assim, como visto nas Figuras 1 e 2, foi a primeira vez que a energia solar fotovoltaica foi representada no Balanço Energético Nacional. Seu crescimento foi incentivado por ações regulatórias, tais como a que estabelece a possibilidade de compensação da energia excedente produzida por sistemas de menor porte (*net metering*). Em 2016, a micro e mini geração distribuída atingiam 104,1 GWh com uma potência instalada de 72,4 MW, com destaque para a fonte solar fotovoltaica, com 53,6 GWh e 56,9 MW de geração e potência instalada respectivamente [2]. Devido ao crescimento da geração de energia fotovoltaica no âmbito nacional, é de extrema importância entender como se encontra esse sistema no Brasil.

1.2 O Sistema Fotovoltaico no Brasil

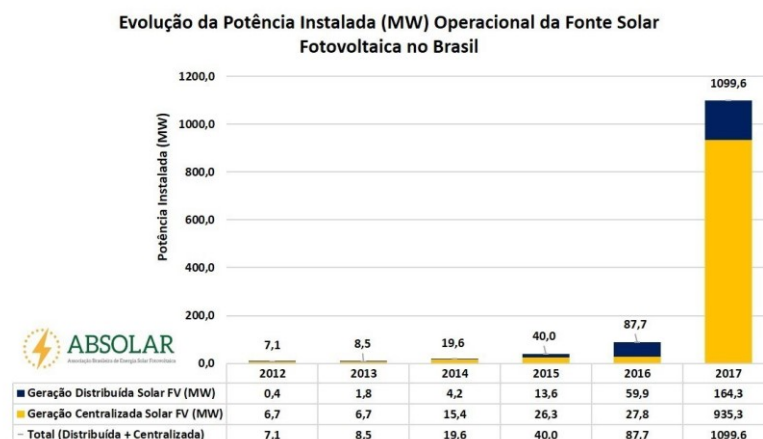
Em 2012, a EPE publicou a nota técnica intitulada “Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira”[4], contemplando as principais aplicações da energia solar para a geração de eletricidade no Brasil, dando especial enfoque aos SFCR. Os estudos mostraram que a inserção fotovoltaica estaria mais próxima de se realizar naturalmente via geração distribuída, especialmente na autoprodução residencial e comercial, dada a iminência da ocorrência da paridade tarifária, ou seja, a equiparação do custo da energia gerada por um SFCR e as tarifas praticadas pelas distribuidoras. Concomitantemente, em 2012, a ANEEL publicou a Resolução Normativa nº 482 [39], posteriormente alterada pela Resolução Normativa nº 517 [40] e agora a atual Resolução Normativa nº687 [41], estabelecendo as condições gerais para a micro e mini geração

distribuída no país, assim como o sistema de compensação de energia elétrica através do sistema conhecido como *net metering* [3].

O Brasil, embora possua uma pequena capacidade instalada em comparação a outros países, tem buscado superar suas barreiras através de múltiplas ações, dentre elas a regulatória, tributária, normativa, de pesquisas e desenvolvimento e econômicas. Assim, pode-se ter como maior avanço da geração distribuída as Resoluções Normativas da ANEEL vistas anteriormente, assim como o Plano de Ação Conjunta Inova Energia, iniciativa da FINEP, BNDES e ANEEL, que tem como de suas finalidades o apoio a empresas brasileiras no desenvolvimento e domínio tecnológico da geração fotovoltaica, termosolar e eólica. Há também o Instituto Ideal, que difunde a tecnologia fotovoltaica no país por meio de ferramentas de informação ao consumidor (catálogos e guias didáticos). Já no quesito de certificações e normatização, o INMETRO publicou em 2011 a portaria nº 004 [42] que define os “Requisitos de Avaliação da Conformidade para Sistemas e Equipamentos para a Energia Fotovoltaica”, que regem todos os equipamentos envolvidos no SFCR a partir de 2012. Na área de pesquisa, observa-se, ao longo dos últimos anos, um crescimento considerável no número de estudos na área de geração fotovoltaica. Universidades, laboratórios e instituições de todas as regiões do país vêm desenvolvendo pesquisas na área. Já com a relação à tributação, é um assunto complicado, pois o CONFAZ estabelece que não seja recolhido ICMS de módulos e células fotovoltaicas em nenhum estado da Federação. Porém, esta medida não se estende a outros equipamentos, como inversores e medidores. No aspecto tributário, participa também a União, implicando no pagamento de impostos federais (Imposto de importação, PIS e COFINS) que aumentam o valor final dos sistemas fotovoltaicos. [3]

A partir das políticas de desenvolvimento para a energia fotovoltaica citadas anteriormente, pode-se observar na Figura 3 a grande evolução da contribuição da energia fotovoltaica ao longo dos anos.

Figura 3 - Evolução da capacidade Instalada (MW) fotovoltaica no Brasil.

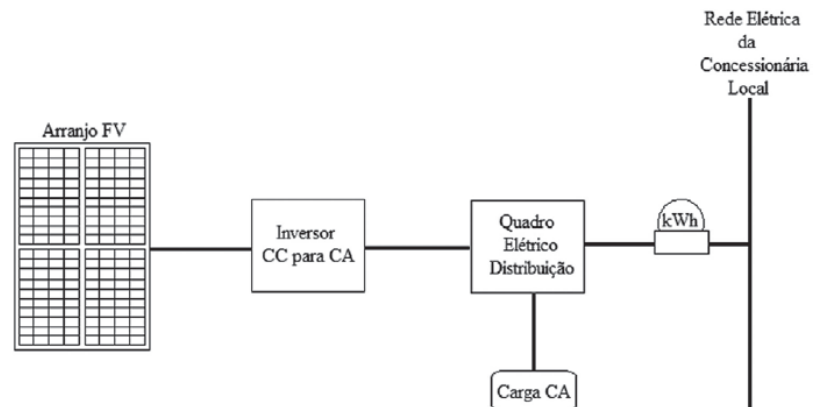


Fonte: [4]

1.3 Justificativa e Relevância do Trabalho

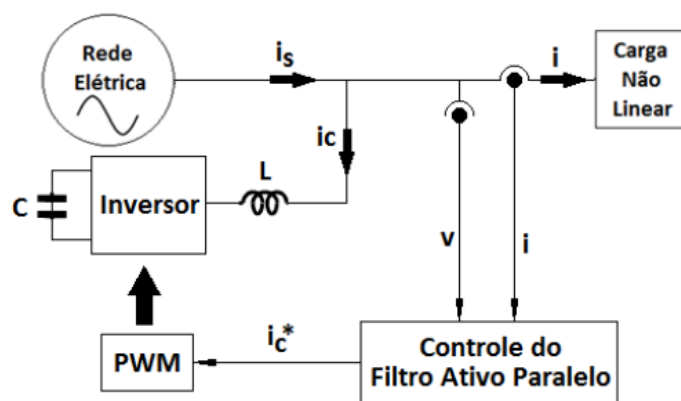
Conforme visto nos itens anteriores, o crescimento dos sistemas fotovoltaicos é iminente. No entanto, mesmo com barateamento dos seus componentes ao longo dos anos, o seu preço é ainda alto se comparado com outros países. Assim, surgiu a ideia de maximizar o seu uso e combinar o seu crescimento com a área de qualidade da energia. Ou seja, em vez implementá-lo apenas com uma função, geração de potência ativa para o consumidor, será adicionado também uma função auxiliar de mitigação de harmônicos na rede elétrica. Nesta condição, parte da potência ativa gerada pelo sistema será utilizada para compensação de harmônicos. Esse novo funcionamento adicional se baseia no funcionamento do filtro ativo, que, de certo modo, muito se assemelha a nosso sistema de geração distribuída, já utilizado na rede elétrica. As Figuras 4 e 5 ilustram a semelhança entre os dois sistemas.

Figura 4 - Diagrama de um SFCR



Fonte: [5]

Figura 5 - Diagrama de um Filtro Ativo Conectado à Rede



Fonte: [6]

Deste modo, como exemplificado nas Figuras 4 e 5, a partir de modificações no controle do inversor do sistema fotovoltaico será possível implementar um filtro ativo para mitigação de conteúdo harmônico na rede.

1.4 Estrutura da Monografia

Esta monografia está dividida em 5 capítulos, incluindo este introdutório.

1.4.1 Capítulo 1

O presente capítulo apresenta uma introdução ao assunto abordando a justificativa e relevância do tema escolhido. Além disso, é feita ainda uma análise da matriz energética nacional, assim como os benefícios e empecilhos da implementação do sistema fotovoltaico.

1.4.2 Capítulo 2

O Capítulo 2 trata do estudo do sistema fotovoltaico. Ou seja, o “Estado da Arte” desses sistemas, seus conceitos, fundamentos, componentes e funcionamento.

1.4.3 Capítulo 3

O Capítulo 3 deste trabalho versa sobre as distorções harmônicas. São abordadas suas causas, consequências e de que maneira se lida com elas seguindo a normalização do PRODIST, Módulo 8 - ANEEL.

1.4.4 Capítulo 4

O Capítulo 4 apresentará as simulações computacionais do sistema fotovoltaico com a função auxiliar de filtro ativo para a mitigação dos harmônicos na rede elétrica.

Dentro dessas simulações, apresenta-se as diferentes configurações de controle do sistema. Assim, ao final, será evidenciado a escolha do controle mais robusto e de melhor resposta para implementação prática.

1.4.5 Capítulo 5

Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais do trabalho, esclarecendo pontos de melhoria que podem ser realizados em um trabalho futuro. É feito, ainda, a conclusão final da monografia.

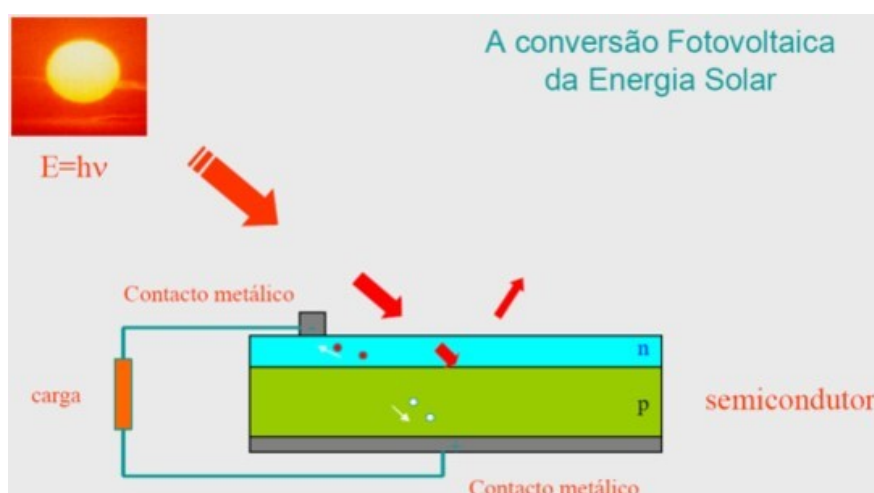
CAPÍTULO 2 – SISTEMA FOTOVOLTAICO

A fim de entender melhor o sistema fotovoltaico, será explicado agora sua constituição e a diferença sobre os dois tipos de sistema existentes, os isolados e os conectados à rede elétrica, juntamente com os equipamentos utilizados em sua implementação.

2.1 Células e Módulos Fotovoltaicos

O efeito fotovoltaico, que é a base dos sistemas de energia solar fotovoltaicos para a produção de eletricidade, consiste na transformação da radiação eletromagnética do Sol em energia elétrica através da criação de uma diferença de potencial, ou uma tensão elétrica, sobre uma célula formada por um sanduiche de materiais semicondutores. Se a célula for conectada a dois eletrodos, haverá um caminho elétrico entre os dois, surgirá uma corrente elétrica [7]. Isto pode ser visto na figura 6.

Figura 6 - Efeito Fotovoltaico



Fonte: [9]

2.1.1 Células Fotovoltaicas

Na atualidade diversos tipos de tecnologias são utilizados para a fabricação de células e módulos fotovoltaicos. As mais comuns encontradas no mercado são: de silício monocristalino, silício policristalino e a do filme fino de silício. A seguir serão apresentadas algumas características dessas tecnologias.

As células de silício monocristalino são as mais eficientes e consequentemente as mais difundidas comercialmente. Alcançam eficiências de 15% a 18%, mas tem um custo de produção mais elevado, se comparado aos outros tipos citados. Por serem rígidas e quebradiças, precisam ser montadas em módulos para adquirir resistência mecânica para o uso prático.

Já as células de silício policristalino tem eficiências comerciais entre 13% e 15%, no entanto, seu custo de fabricação é menor que a monocristalina, compensando assim sua eficiência. Elas são, também, rígidas e quebradiças, precisando assim ser montadas em módulos para adquirir resistência mecânica para o uso prático.

As de filmes fino, tem um custo relativamente baixo, contudo, possui baixa eficiência entorno de 7,9% e 9,5%. Assim, necessitam de maior área de modulo para produzir a mesma energia que produzem as tecnologias cristalinas, no entanto, possuem a vantagem de melhor aproveitamento da luz solar com baixo nível de radiação e para radiações do tipo difusa[7].

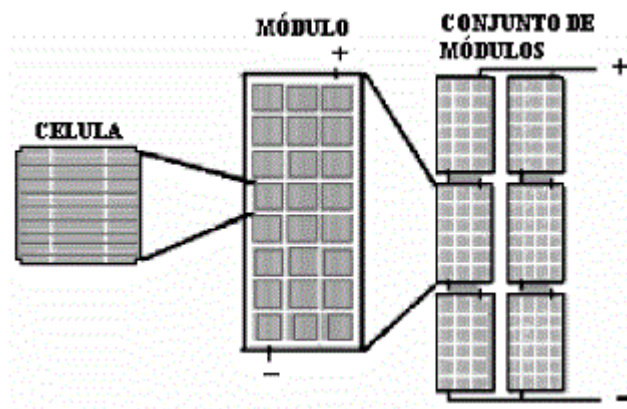
2.1.2 Módulos Fotovoltaicos

Inicialmente uma simples célula fotovoltaica é capaz de produzir, aproximadamente, 0,6V e 3W de tensão e potência respectivamente. Assim, para uma aplicação pratica, ou seja, alimentação de algum sistema residencial ou industrial é necessário o agrupamento de diversas células em uma estrutura rígida e conectadas eletricamente, surgindo, portanto, os Módulos Fotovoltaicos ou também conhecido os Painéis Fotovoltaicos.

Os módulos fotovoltaicos de silício cristalino, normalmente encontradas no mercado, produzem entre 50W e 250W de potência, apresentam tensões máximas de até aproximadamente 37V e podem fornecer em torno de 8A de corrente. Assim, é necessário

realizar arranjos com mais módulos para obter uma potência e tensão substancial[7]. Isto pode ser visto na Figura 7.

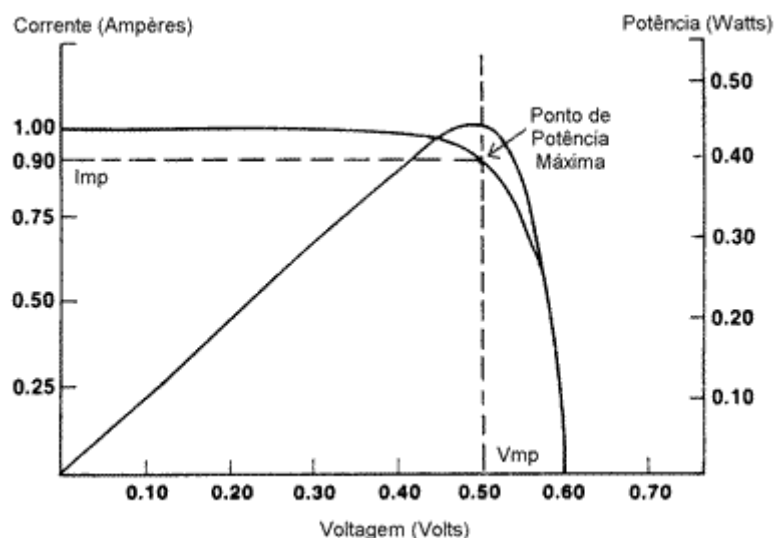
Figura 7 - Hierarquia Fotovoltaica.



Fonte: [22]

A partir da instalação dos painéis, pode-se levantar as curvas características que regem o funcionamento do sistema fotovoltaico. Como exemplificado na Figura 8.

Figura 8 - Curvas Características de um Sistema Fotovoltaico.

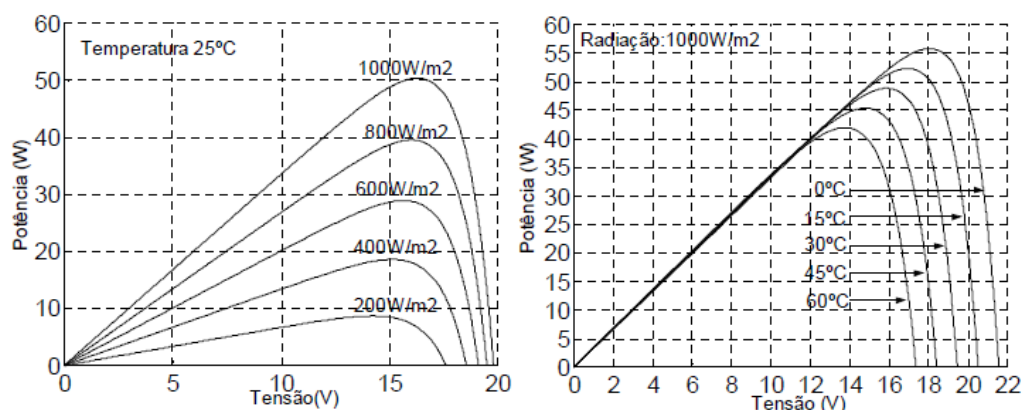


Fonte: [23]

A capacidade de um módulo fotovoltaico é dada pela potência de pico em W_p . A condição padrão para determinação desta potência é definida para o módulo exposto a uma radiação solar de 1000 W/m^2 (radiação recebida na superfície da Terra em dia claro, ao meio dia) e temperatura da célula de 25°C [42]. A potência elétrica é o produto da tensão pela corrente, onde a corrente é obtida com a variação da irradiação solar, ou seja, variando com a intensidade da luz recebida. Assim, ao final, pode-se obter os pontos de máximo fornecimento do sistema, I_{mp} , V_{mp} e o Ponto de Potência Máxima

No entanto, alguns fatores, como temperatura e radiação solar, podem alterar o funcionamento da instalação como é visto na Figura 9. Isto porque as variações desses parâmetros influenciam as características construtivas dos sistemas, ou seja, no caso da radiação solar, sua variação está diretamente ligada com a corrente elétrica produzida, como explicado anteriormente. Enquanto que a temperatura atua nos aspectos construtivos da célula fotovoltaica, diminuindo a eficiência da mesma [42].

Figura 9 - Variação da Curva Característica em Relação a Temperatura e Radiação.



Fonte: [22]

Portanto, pode-se concluir da Figura 9 que caso ocorra uma variação na radiação solar, como é no caso na primeira curva, devido a um sombreamento, por alguma nuvem ou objeto, a eficiência do sistema é diminuída. O mesmo ocorre com a variação de temperatura, segunda curva, onde quanto maior a temperatura sobre o painel, maior será a perda de sua eficiência e em certos casos, de extrema temperatura, haverá dano ao equipamento da instalação.

2.2 Sistemas Fotovoltaicos Autônomos

Sistemas fotovoltaicos autônomos ou também conhecidos como sistemas isolados (*off-grid*), são empregados em locais não atendidos por uma rede elétrica. Podem ser usados para fornecer energia para residências em zonas rurais, praias, camping, ilhas, por exemplo. Além disso, eles também podem ser aplicados em sistemas ou equipamentos pontuais, como: iluminação pública, veículos elétricos, satélites entre outros[7].

Sua composição básica se baseia nos módulos fotovoltaicos, como visto anteriormente, controladores de cargas, baterias e inversores. Como visto na Figura 10.

Figura 10 - Sistema Fotovoltaico Isolado



Fonte: [24]

A partir dessa configuração, será discursado a seguir esses novos equipamentos e suas funcionalidades.

2.2.1 Baterias

Na maioria dos sistemas fotovoltaicos autônomos a presença da bateria ou de um banco de baterias tem por função a estabilização da tensão fornecida aos equipamentos ou ao inversor, uma vez que a tensão de saída do painel não é constante e pode variar durante o dia [7], como visto anteriormente.

No mercado atual existem diversas tecnologias que envolvem as baterias próprias para os sistemas fotovoltaicos, conhecidas como baterias estacionárias, ou seja, elas possuem a capacidade de descarregar completamente várias vezes sem a ocorrência de problemas. Diferente das usadas no meio automobilísticos, onde elas são projetadas para descarregar aproximadamente 20 % do seu total [7].

Alguns exemplos de bateria usados nos sistemas off-grid são as de níquel (NiCd e NiMH), as de chumbo ácido com eletrólito líquido ou com eletrólito em gel e as mais avançadas como as baseadas em AGM (Absorbed Glass Mat). Onde o custo/benefício varia de aplicação para aplicação[42].

2.2.2 Controlador de Carga

O controlador de carga, tem como função o intermédio entre o painel e a bateria, ou seja, é o dispositivo que faz correta conexão entre esses dois equipamentos, evitando que a bateria seja sobrecarregada ou descarregada excessivamente. Isso quer dizer que ele promove um sensoramento tanto do painel como da bateria. Portanto, caso a bateria tenha atingido o seu máximo de carga, o controlador realiza o desligamento do painel, evitando o seu sobrecarregamento. O mesmo vale para caso da bateria com o nível de carga baixo, onde ele religa o painel para retomar o seu carregamento e evitar sua descarga total, aumentando assim a vida útil da bateria[43].

2.2.3 Inversores

O inversor é um equipamento eletrônico que converte as tensões e correntes contínuas (CC), produzidas pelos painéis e armazenadas nas baterias, em corrente alternada (CA). O seu uso se faz necessário pois a maioria dos equipamentos alimentados pelo sistema autônomo são motores, bombas, geladeiras, iluminação etc.. Ou seja, equipamentos baseados em corrente e tensão alternada.

No entanto, existe uma diferença entre os inversores utilizados pelos sistemas autônomos e os conectados na rede, os utilizados nos autônomos fornecem tensões elétricas alternadas nos seus terminais, preferencialmente na forma de onda de senoidal pura, enquanto os usados nos conectados à rede funcionam como fontes de correntes[7]. Como os inversores tem um papel de suma importância nesse trabalho ele será melhor retratado a frente juntamente com os sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

2.3 Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

O sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica, opera em paralelismo com a concessionária. O seu objetivo é a geração de eletricidade para o consumo local, podendo reduzir ou eliminar o consumo da rede de distribuição ou mesmo vender o seu excedente.

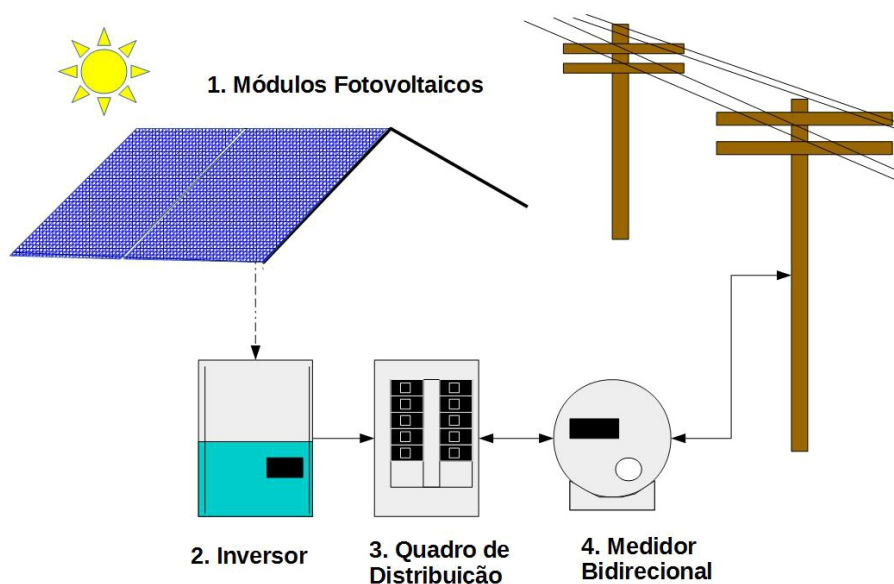
Esses sistemas podem ser categorizados em três tipos [41]:

- Microgeração: Com potência instalada de até 75 kW.

- Minigeração: Com potência instalada entre 75 kW e 3MW.
- Usinas de Eletricidade: com potência acima de 3MW.

Neste trabalho, foi escolhido o desenvolvimento para sistemas entre a Microgeração e Minegeração, ou seja, os sistemas instalados nos telhados de residências, indústrias, empresas e *shopping centers*, que podem suprir totalmente ou parcialmente o consumo de eletricidade dos consumidores. Esse estilo de instalação pode ser representado como segue na Figura 11.

Figura 11 - Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica.



Fonte: [25]

Assim, como visto nos sistemas isolados, tem-se o painel, já estudado anteriormente, e dois novos componentes o inversor, que se difere das instalações autônomas, e o medidor bidirecional, que será descrito a partir de agora.

2.3.1 Medidor Bidirecional

O medidor bidirecional registra a energia que o consumidor consome da rede de distribuição e a energia que o próprio consumidor produz e eventualmente exporta para a rede elétrica. No entanto, o registro do consumo e da produção não precisa ser feito

necessariamente por um único medidor, pois isso acarretaria em um aumento do preço do equipamento usado, sendo possível usar medidores comuns para realização de cada medida[44].

2.3.2 Inversores Para a Conexão à Rede Elétrica

A função de um inversor consiste em converter uma tensão de entrada CC em uma tensão de saída CA simétrica de amplitude e frequência desejadas. A tensão de saída pode ser fixa ou variável em uma frequência também fixa ou variável. Uma tensão variável de saída pode ser obtida variando-se a amplitude da tensão CC de entrada e mantendo-se o ganho do inversor contante. Por outro lado, se a tensão CC de entrada for fixa e não - controlável, como no caso dos sistemas fotovoltaicos, uma tensão variável de saída pode ser obtida pela variação do ganho do inversor, a qual é normalmente realizada pelo controle de modulação por largura de pulso (PWM) dentro do inversor. [26]

Os inversores usados nos sistemas conectados à rede não possuem a capacidade de fornecer tensão, ou seja, eles só fornecem corrente elétrica quando conectado. No entanto, a definição vista ainda agora vale para esse tipo de equipamento. Esse tipo de inversor se difere dos usados nos sistemas isolados por possuir um sistema de controle eletrônico sofisticado que o transforma em uma fonte de corrente. Sua principal função é fazer com que a corrente nos terminais de saída do inversor, ou seja, a corrente injetada na rede elétrica, tenha o formato senoidal e esteja em sincronismo com a tensão da rede[7].

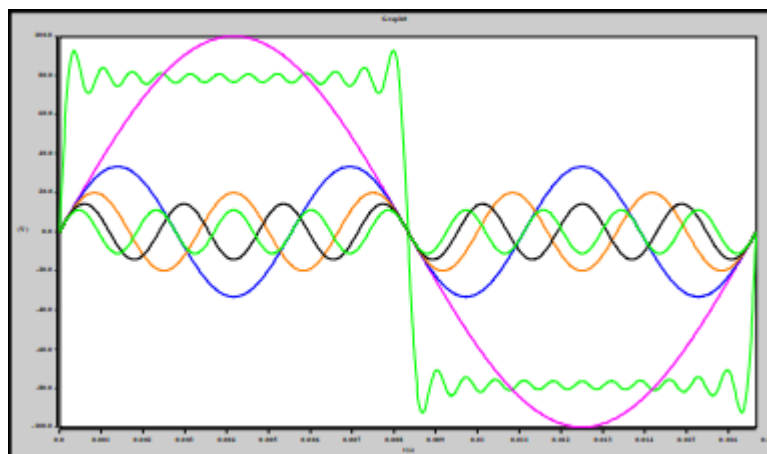
Dentre outras funções importantes presentes nesses inversores tem-se, o rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), que tem o objetivo de garantir que os módulos operem em seu ponto de máxima potência, qualquer que seja ele, independente das condições de operação, e a detecção de ilhamento, um recurso exigido pelas normas de instalação, que garante a segurança de pessoas e equipamentos e instalações nas situações de interrupções do fornecimento da energia da rede de distribuição[42].

CAPÍTULO 3 – DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A palavra “harmônico” tem origem na área de acústica e de instrumentos musicais, com significados de múltiplos inteiros ou componentes de um tom, bem como múltiplos não inteiros denominados sub e sobre – tons. [27]

Na engenharia elétrica, esse fenômeno promove deformações das tensões e correntes elétricas, deixando de possuir a característica de onda senoidal pura, como visto na Figura 12. A perda dessa característica ocasiona diversos problemas, como explicitado a frente, no sistema elétrico, pois todos os equipamentos utilizados ou ligados à rede foram projetados para um suprimento senoidal. Portanto, a necessidade da existência de normas de regulação para poder controlar esse fenômeno.

Figura 12 - Forma de Onda Distorcida e Decomposição Harmônica.



Fonte: [28]

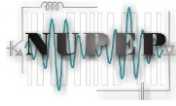
Assim como visto na Figura 12, pode-se ver a forma de onda distorcida (em verde) e as demais componentes harmônicas que deformaram a onda.

3.1 Conceitos Básicos

As harmônicas são múltiplos inteiros da frequência fundamental, ou seja:

$$f = h \times f_1 \quad (4)$$

Onde,



f = Componente Harmônica.

h = um número inteiro maior que zero.

f_1 = Componente Fundamental, frequência em 60Hz.

No entanto, os harmônicos podem se dividir em:

- Sub – Harmônicos: com $0 < h < 1$
- Inter – Harmônicos: Onde o h = número não inteiro maior que zero.

Assim, para identificar as componentes harmônicas presentes em uma onda não senoidal, normalmente, utiliza-se a análise de Fourier. Ela estabelece que qualquer forma de onda periódica não senoidal (distorcida) pode ser substituída por um somatório de uma série de ondas senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, como visto a seguir [29]:

$$V(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(n\omega t) + B_n \cdot \sin(n\omega t) \quad (5)$$

Onde,

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{Frequência Fundamental}) \quad (6)$$

$$A_0 = \frac{1}{T_0} \int_{T_0}^T x(t) dt \quad (7)$$

$$A_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0}^T x(t) \cdot \cos(n\omega t) \quad (8)$$

$$B_n = \frac{2}{T_0} \int_{T_0}^T x(t) \cdot \sin(n\omega t) \quad (9)$$

V_0 = Componente Continua da Onda;

T = Período da Onda (Radianos).

Portanto, a partir dos parâmetros anteriores, pode-se encontrar os valores eficazes verdadeiros dos sistemas distorcidos [30]:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} V^2(t) dt} \quad (10)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_t^{t+T} I^2(t) dt} \quad (11)$$

Desenvolvendo as equações (10) e (11), chega-se a novas formulas de fácil aplicação para os cálculos matemáticos.

$$V_{rms} = \sqrt{V_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \quad (12)$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (13)$$

O índice (1) que acompanha as equações (12) e (13) significa a componente fundamental das respectivas tensões e corrente

3.2 Origem das Distorções

As distorções harmônicas têm como origens os elementos não lineares, tais como: diodos, tiristores, chaves controladas, etc., pois uma vez aplicada uma tensão senoidal, haverá o surgimento de uma corrente não – senoidal. Esta corrente não senoidal pode, por sua vez, levar a forma de onda de tensão à perda de suas características senoidais.

Estas cargas têm aumentado de forma substancial nos sistemas elétricos durante as últimas décadas. Estudos apontam que atualmente cerca de 70% das cargas conectadas na rede são potencialmente geradoras de harmônicos [30].

Elas podem ser classificadas em dois grandes grupos como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Cargas Geradoras de Harmônicos.

Cargas de Conexão Direta no Sistema	Cargas Conectadas Via Conversores
• Transformadores • Geradores e Motores • Fornos a Arco • Compensadores Tipo Reator Saturado • Lâmpadas de Descarga • Lâmpadas Fluorescentes Magnéticas • Micro-ondas; etc.	• Retificadores (para cargas CC) • Inversores (Para Motores de Indução) • Soft – Starters • Fornos de Indução • Dimmers • Lâmpadas Fluorescentes Compactas e Eletrônicos) • Lâmpadas Led • Eletrodomésticos com Fontes Chaveadas; etc.

Fonte: [30]

3.3 Efeitos Danosos

Podem ser classificados de dois tipos diferentes:

- Efeitos imediatos.
- Efeitos de Longo Prazo.

Ambos os efeitos têm a ver com a contribuição das harmônicas para o aumento do valor eficaz de tensão e corrente (ver equação (12) e (13)), ou seja, para os efeitos imediatos, tem-se: os disparos indevidos ou queima dos relés de proteção, o mau funcionamento de controladores, aumento das vibrações das máquinas, ruídos, queima de fusíveis, e dependendo de capacitores, ressonâncias série ou paralelas e interferência em sistemas de comunicação. Já para os efeitos de longo prazo, tem-se: Aquecimento (Perdas) de transformadores, capacitores, cabos e dentre outros equipamentos, que com isso ocasionará a redução de sua vida útil [30].

3.4 Regulamentação de Harmônicos Segundo o PRODIST

Os procedimentos de distribuição têm como objetivo reger a qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações.

Para a qualidade do produto, foco desse trabalho, o Módulo 8 do PRODIST nos apresenta as terminologias, os indicadores e o que caracteriza os fenômenos. Além dos seus limites ou valores de referência, juntamente com a metodologia de medição, a gestão das reclamações, as perturbações na forma de onda e os estudos específicos da qualidade da energia elétrica [31].

Assim, como visto no parágrafo anterior, a quantificação das distorções harmônicas presentes no sistema seguirá as normas, sendo elas quantificadas de modo individual para cada ordem harmônica ou de forma total, para tensão e para corrente, como visto nas equações a seguir:

$$DIT(h)\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (14)$$

$$DII(h)\% = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100 \quad (15)$$

$$DTT(h)\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (16)$$

$$DTI(h)\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (17)$$

Onde,

$DIT(h)\%$ = Distorção Harmônica Individual de Tensão de Ordem h .

$DII(h)\%$ = Distorção Harmônica Individual de Corrente de Ordem h ;

$DTT(h)\%$ = Distorção Harmônica Total de Tensão;

$DTI(h)\%$ = Distorção Harmônica Total de Corrente.

E ainda pode-se subdividir essas quantificações em:

$DTT(i)\%$ = Distorção Harmônica Total de Tensão para as Componentes Ímpares não Múltiplas de 3.

$DTT(p)\%$ = Distorção Harmônica Total de Tensão para as Componentes Pares não Múltiplas de 3.

$DTT(3)\%$ = Distorção Harmônica Total de Tensão para as Componentes Pares Múltiplas de 3.

Assim, a partir dessas novas formulações, pode-se reescrever as equações (12) e (13) como:

$$V_{rms} = V_1 \sqrt{1 + DTT^2} \quad (18)$$

$$I_{rms} = I_1 \sqrt{1 + DTI^2} \quad (19)$$

Com o desenvolvimento das equações acima, a normalização definiu os parâmetros limites para cada tipo de distorção. Assim sendo, em uma determinada amostragem dos sinais elétricos os valores encontrados não devem ser ultrapassados os indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites das Distorções Harmônicas Totais (% da Tensão Fundamental)

INDICADOR	TENSÃO NOMINAL		
	$V_n \leq 1,0kV$	$1,0kV \leq V_n \leq 69kV$	$69kV \leq V_n \leq 230kV$
DTT95%	10%	8%	5%
DTT(p) 95%	2,5%	2%	1%
DTT(i) 95%	7,5%	6%	4%
DTT(3) 95%	6,5%	5%	3%
Observação: Os 95% citados acima, são conhecidos como percentil. Ponto no qual ou abaixo do qual se situa uma determinada percentagem de casos. Neste caso, significa que 95% dos resultados medidos se situam nesse ponto ou abaixo dele, ou seja, o valor do indicador foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas.			

Fonte: [31]

3.5 Métodos de Mitigação de Harmônicos

A literatura sobre os métodos de mitigação dos harmônicos é extensa, no entanto, todos têm o mesmo objetivo, atuar somente quando as leituras ultrapassam os limites normalizados. As opções mais comuns para o controle desse fenômeno são[30]:

- Reduzir ou eliminar as correntes harmônicas em equipamentos instalados na rede, como, por exemplo: conversores, inversores, transformadores, motores e geradores. Utilizando bobinas *Chokes*, associação de conversores estáticos por meio de transformadores com polarização subtrativa (Arranjo de 12 pulsos, 24 pulsos ...), conexões dos transformadores (O uso $\Delta - Y$ já atua na mitigação dos harmônicos múltiplos de 3)
- Pode-se também modificar a resposta em frequência dos sistemas elétricos, ou seja, realizar a realocação de cargas capacitivas, mudar tap's de transformadores, alterar as impedâncias das linhas ou níveis de curto-circuito
- Por último, pode-se realizar a instalação de filtros para drenar as correntes harmônicas (filtros passivos) ou anular (Filtro ativo), retirando-as do sistema, bloqueando-as ou impedindo de entrar na rede, ou suprimindo-as localmente.

Estes últimos sendo de suma importância para esse trabalho, pois estes servem de base de projeto para o desenvolvimento posterior, detalhado melhor a seguir.

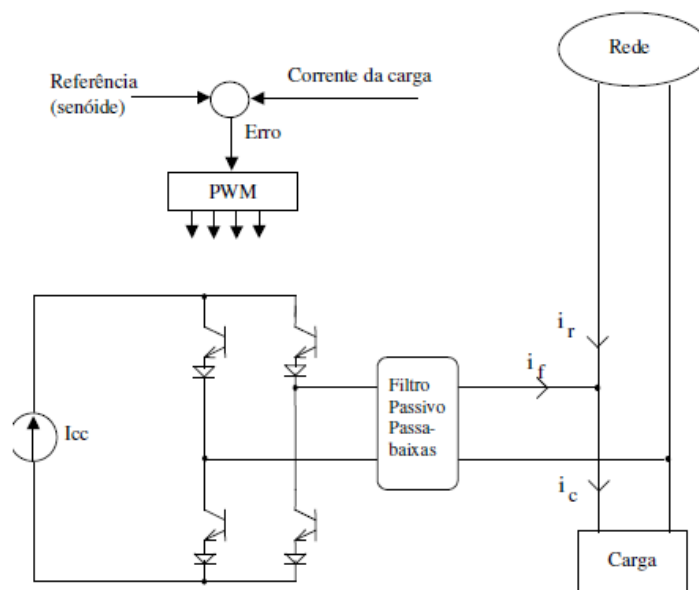
3.5.1 Filtros Ativos

Filtros harmônicos são arranjos elétricos destinados a oferecer meios para que as correntes harmônicas e, por conseguinte, as tensões, presentes nos sistemas elétricos, sejam atenuadas. [30]

A realização de um filtro ativo de potência utiliza a capacidade de um conversor CC – CA para produzir uma tensão ou corrente alternada com qualquer forma de onda, sendo que tal capacidade de síntese limitada em termos de frequência a um valor aproximadamente de 0,1 da frequência fundamental, admitindo-se ainda a existência de um filtro de saída que minimize a penetração de componentes de alta frequência na rede elétrica. A função dos inversores é fazer com que se produza uma corrente ou tensão que siga uma dada referência, a qual está relacionada com as componentes da corrente (ou tensão) que se quer compensar. [32] São possíveis implementações de filtros serie ou filtros em derivação, este último sendo a base deste estudo.

O objetivo de um filtro em derivação, ou também conhecido como *shunt*, é o de minimizar a distorção da corrente que flui pela rede elétrica, como visto na Figura 13. Este filtro deve ser capaz de injetar uma corrente que, somada à corrente da carga, produza uma corrente limpa na rede.

Figura 13 - Filtro Ativo em Paralelo

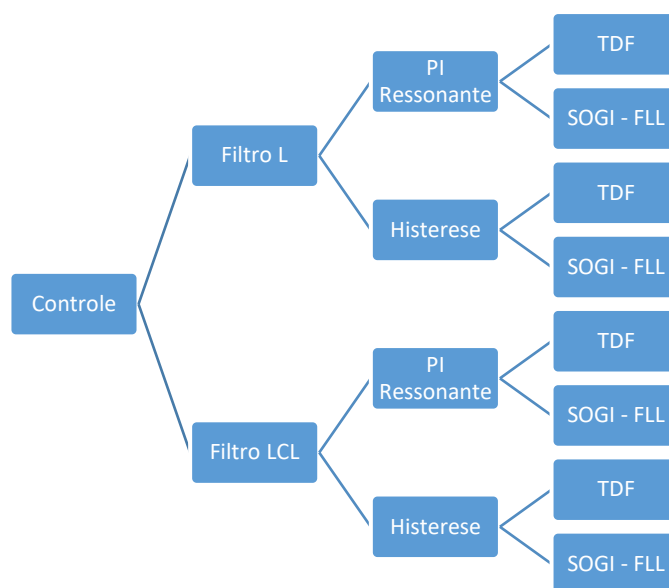


Fonte: [32]

CAPÍTULO 4 – DESENVOLVIMENTO

Visando a implementação da função auxiliar de mitigação de harmônicos em um sistema fotovoltaico, foi idealizado o desenvolvimento de alguns tipos de controle com diferentes estratégias de implementação. Pode-se exemplificá-los pelo seguinte histograma.

Figura 14 - Tipos de Controle



Fonte: Autor

4.1 Estrutura

4.1.1 Tipos de Filtros de Rede

No âmbito deste trabalho, é considerada a ligação do conversor à rede através dos filtros do tipo L e do tipo LCL.

A ligação do conversor à rede através um filtro do tipo L, é a solução mais atrativa em termos de simplicidade. Contudo, para aplicações à rede eléctrica, a ligação de filtros do tipo LCL é mais comum, pela razão de permitirem uma maior atenuação dos harmónicos produzidos à frequência de comutação.

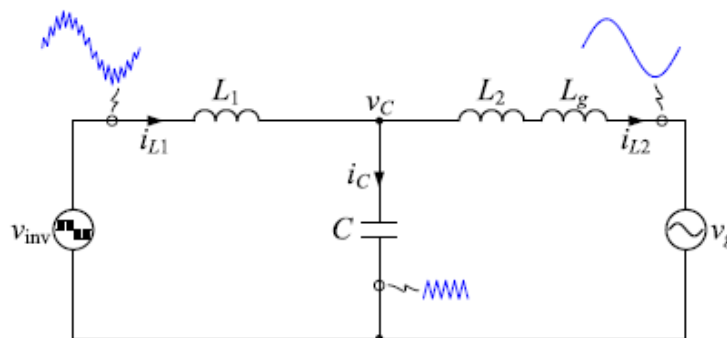
Comparativamente, a ligação com um filtro do tipo LCL representa uma solução mais favorável em termos da relação custo-benefício pois consegue, com indutâncias

mais reduzidas, ter o mesmo poder de atenuação que um filtro do tipo L. O único revés está na existência de um sistema mais complexo a controlar, devido ao problema de estabilidade que existe com o efeito de ressonância do filtro

A modelação das indutâncias do filtro considera não só as perdas no cobre, mas também as perdas magnéticas das indutâncias, através de resistências em série e paralelo respectivamente [45].

O funcionamento básico de um Filtro de rede pode ser demonstrado na Figura 15, onde o sinal, possuindo o ruído devido ao chaveamento do inversor, é filtrado para um sinal próximo do senoidal puro.

Figura 15 - Filtro LCL - Teórico



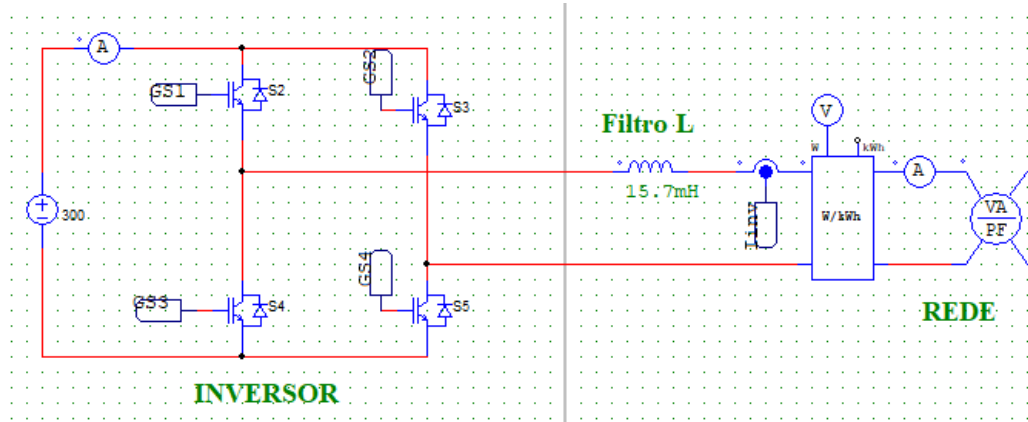
Fonte: [33]

Portanto, seguindo essa ideia, foi elaborado para esse trabalho os dois filtros citados. Sendo eles descritos abaixo:

- **Tipo L**

O presente filtro foi estabelecido em 15,7 mH, seu uso é devido a disponibilidade laboratorial para futuras implementações. Assim, obtém-se o seguinte circuito da Figura 16:

Figura 16 - Filtro L



Fonte: Autor

- **Tipo LCL**

Para esse determinado filtro, deve-se seguir uma determinada parametrização [36], como visto adiante:

a) **Impedância de base do sistema:**

$$Z_b = \frac{V_{rms}^2}{P_n} = \frac{127^2}{1000} = 16,13 \, \Omega \quad (20)$$

b) **Capacitância base do sistema:**

$$C_b = \frac{1}{\omega g \times Z_b} = \frac{1}{377 \left[\frac{rad}{s} \right] \times 16,13 [\Omega]} = 164,4 \, \mu F \quad (21)$$

Portanto;

$$C_f = 0,03 \times C_b = 0,03 \times 164,4 = 4,93 \mu F \quad (22)$$

c) **Indutância de acoplamento da rede elétrica (L2):**



$$L2 = \frac{Vbar}{4fs \Delta ILmax} = \frac{300}{4 \times 50 \cdot 10^3 \times 0,167} = 9 \text{ mH} \quad (23)$$

Para o $\Delta ILmax$, o estipulado é 1,5% da corrente de pico do inversor:

$$I_{rms} = \frac{1000}{127} = 7,87 \text{ A} \quad (24)$$

$$I_{pico} = \sqrt{2} \times I_{rms} = \sqrt{2} \times 7,87 = 11,13 \text{ A} \quad (25)$$

$$\Delta ILmax = 1,5\% \text{ de } I_{pico} = 0,167 \text{ A} \quad (26)$$

d) Indutância de acoplamento do inversor (L1):

$$L1 = r \cdot L2 = 0,08 \times 6 \text{ m} = 0,48 \text{ mH} = 480 \mu\text{H} \quad (27)$$

Sendo que o parâmetro de atenuação de corrente “r” é escolhido a partir da relação da corrente harmônica na rede com a corrente harmônica do inversor bidirecional. Ou seja, por meios práticos 0,08.

e) Resistência de Atenuação:

É um resistor ligado em serie com o capacitor, sua principal função é reduzir as oscilações e instabilidade do filtro. Sendo assim, uma solução simples e confiável, no entanto, ele aumenta as perdas por calor e diminui a eficiência do filtro.

Portanto tem-se:

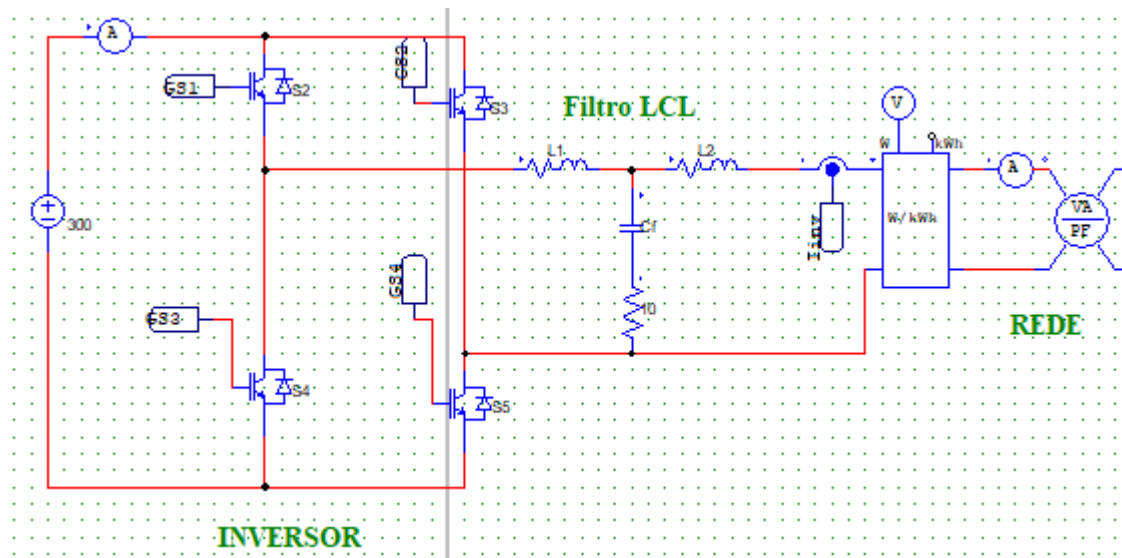
$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{L1 + L2}{L1 \cdot L2 \cdot Cf}} = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{6 \text{ mH} + 480 \mu\text{H}}{6 \text{ mH} \cdot 480 \mu\text{H} \cdot 4,93 \mu\text{F}}} = 3386,36 \text{ rad/s} \quad (28)$$

$$Rd = \frac{1}{3 \cdot \omega_{res} \cdot Cf} = \frac{1}{3 \cdot 3386,36 \cdot 4,93 \mu\text{F}} = 20 \Omega \quad (29)$$

Contudo, levando em conta as perdas por efeito térmico, adota-se uma resistência de 10Ω , metade da calculada.

Portanto, pode-se implementar a seguinte estrutura para simulação conforme a Figura 17.

Figura 17 - Filtro LCL



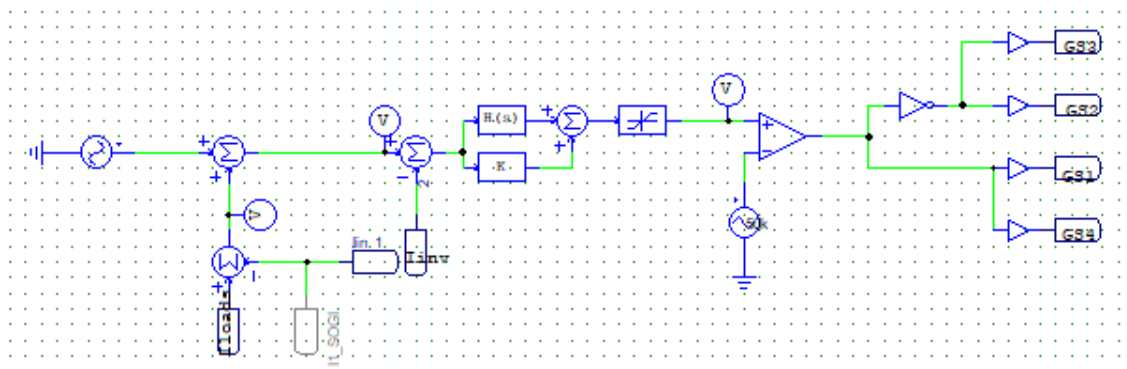
Fonte: Autor

4.1.2 Estratégias de Controle

4.1.2.1 P - Ressonante

A ideia deste controlador é inserir na malha de controle uma função transferência que ao ser submetida a um sinal de erro periódico, o controlador apresentará uma dinâmica parecida ao compensador PI quando este é aplicado um sinal de erro constante, porém aquele garante erro de regime permanente nulo seguindo sinais de referências senoidais, desde que o sinal de referência possua mesma frequência para o qual foi projetado o controlador. Porém, um problema da estrutura do compensador é que para frequências diferentes daquele que foi projetado para funcionar, apresenta resultados ruins em relação a THD, pois não atenua distúrbios com componentes harmônicos produzidos por cargas não linear [34]. Por isso a necessidade de decompor a carga em uma série de componentes senoidais com harmônicos múltiplos daquela fundamental. Conforme é visto na Figura 18, tem-se o P – Ressonante idealizado neste trabalho.

Figura 18 - PI Ressonante



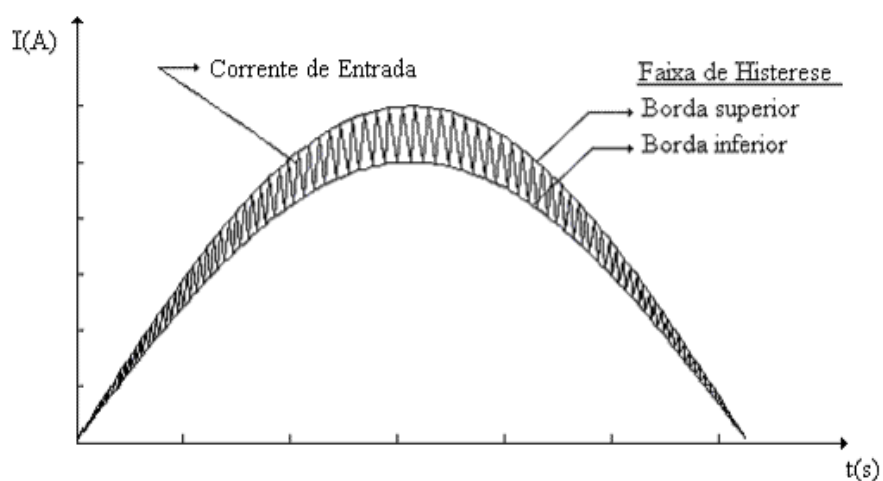
Fonte: Autor

O seu devido funcionamento e interligação com o sistema estudado será melhor abordado a frente.

4.1.2.2 Histerese

Esta técnica de modulação baseia-se no monitoramento da corrente de entrada ao longo de uma determinada faixa, denominada faixa de histerese. A corrente de entrada, obtida a partir de um sensor de corrente, é comparada com as referências senoidais que compõem os extremos desta faixa. Quando a corrente de entrada atinge o limite exterior ou inferior da mesma, o conversor é comutado para a próxima etapa de operação, e a corrente então a oscilar dentro do limite estabelecido pela faixa de histerese [35], conforme a Figura 19.

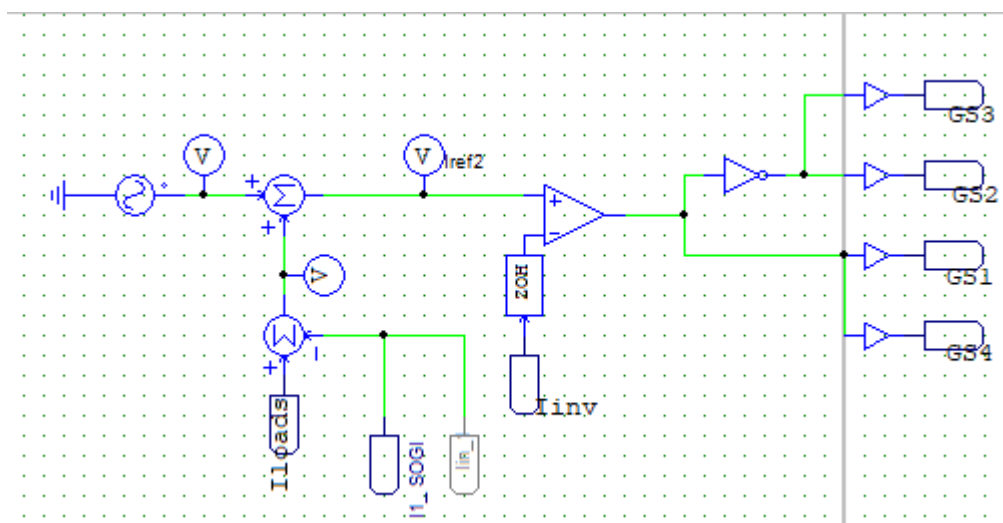
Figura 19 - Faixa de Histerese



Fonte: [35]

Assim, pode-se implementa-la conforme a Figura 20, onde o seu devido funcionamento e interligação com o sistema estudado será melhor abordado à frente.

Figura 20 - Controle por Histerese



Fonte: Auto

4.1.3 Extração de Harmônicos

4.1.3.1 Transformada Discreta de Fourier (TDF)

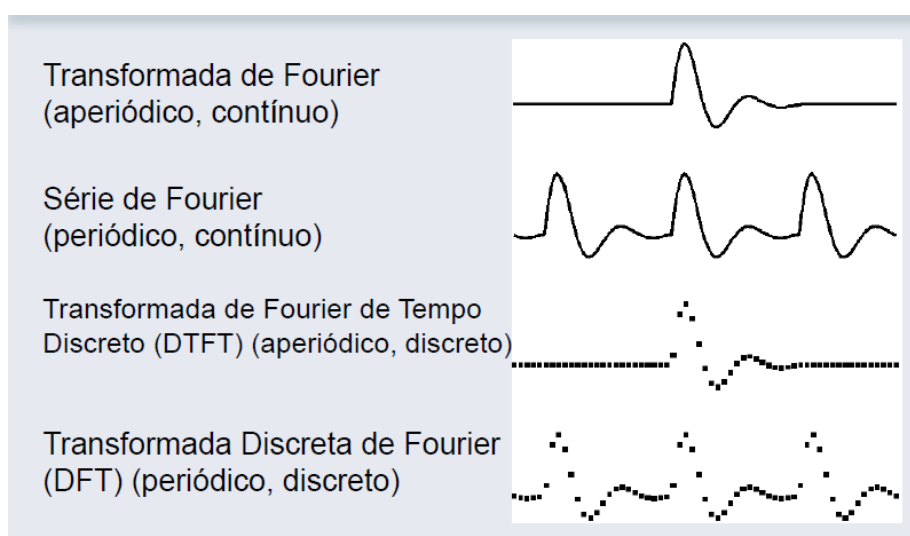
A transformada de Fourier é uma ferramenta matemática, baseada na decomposição de sinais em senóides. Onde a transformada discreta de Fourier é o tipo utilizado em sinais digitalizados discretos e periódicos.

As transformadas de Fourier assumem que os sinais, sob análise, têm duração infinita. Assim, para analisar os sinais com um computador, os sinais têm necessariamente que ter duração finita. Desta forma, tem-se que fazer com que os sinais “pareçam” ter duração infinita, para isso considera-se que o sinal se repete periodicamente.

Para um melhor entendimento, pode-se analisar a Figura 21 e comparar o funcionamento básico dos diferentes tipos de transformada existente.

O seu funcionamento se baseia em converter um sinal de N pontos no domínio do tempo em 2 sinais de $(N/2+1)$ pontos no domínio da frequência. O sinal de entrada (tempo) contém as amostras do sinal a ser decomposto, e os sinais de saída (frequências) contém as amplitudes dos senos e cossenos [37].

Figura 21 – Respostas dos Tipos de Transformadas de Fourier



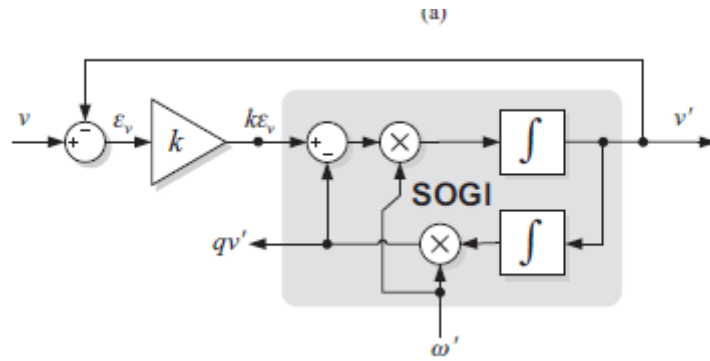
Assim, para implementação do bloco do TDF utilizado neste estudo foi idealizado o código apresentado no ANEXO A

4.1.3.2 Second Order Generalized Integrator Frequency Locked Loop (SOGI-FLL)

- Second Order Generalized Integrator (SOGI)

O integrador generalizado de segunda ordem é uma abordagem diferente das usadas nas estruturas de controle baseadas em um filtro adaptativo, visto que em vez de estar na função do ganho K e também da frequência de centro (ω'), que é um inconveniente para sistemas com frequências variáveis, ele somente depende do ganho K [46].

Figura 22 - SOGI (SOGI-QSG)



Fonte: [46]

Assim sendo, pode-se determinar as funções de transferência dessa estrutura como se segue:

$$SOGI(s) = \frac{v'}{k\varepsilon_v}(s) = \frac{\omega's}{s^2 + \omega'^2} \quad (30)$$

$$D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (31)$$

$$Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (32)$$

Além disso, caso a frequência de centro seja igual a frequência de entrada ($\omega' = \omega$), a amplitude dos sinais em quadratura (v' e qv') será igual ao sinal de entrada (v).

Já no quesito tempo de resposta, toma-se como referência que o tempo de estabilização para um sistema de segunda ordem sendo como $ts = 4,6\tau$, onde $\tau = 2/k\omega'$ e, portanto, calcula-se o ganho como:

$$k = \frac{9,2}{ts \times \omega'} \quad (33)$$

Assim sendo, pode-se adotar os parâmetros abaixo como exemplo de aplicação e ao final observa-se os valores encontrados na simulação.

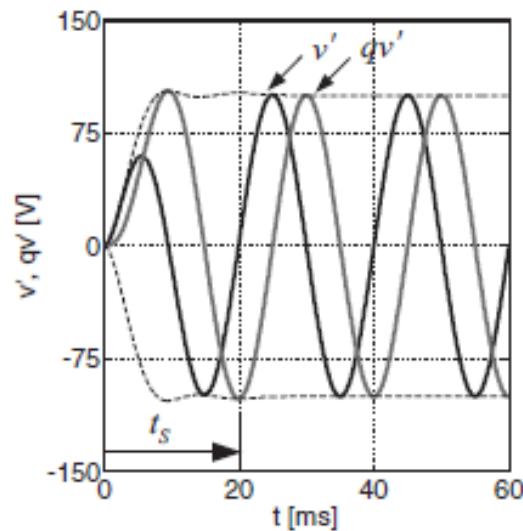
$$v = V \cdot \sin(\omega t) \quad (34)$$

$$\omega = \omega' = 2\pi \cdot 60 \text{ rad/s} \quad (35)$$

$$k = \sqrt{2} \quad (36)$$

$$ts = 20 \text{ ms} \quad (37)$$

Figura 23 - Resposta SOGI-QSG



Fonte: [46]

- **SOGI Frequency – Locked Loop (SOGI-FLL)**

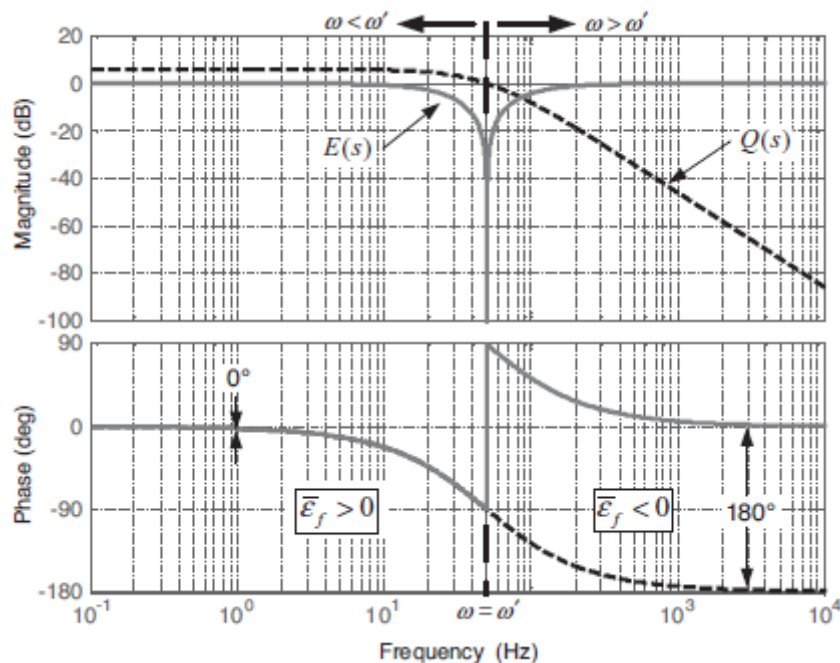
O SOGI visto anteriormente é usado para gerar um sinal em quadratura que promove uma melhoria na detecção do ângulo de fase em um PLL convencional. Assim, visando um controle mais simples onde pode-se descartar o uso do bloco PLL, foi idealizado o SOGI-FLL, apresentando apenas um loop simples que se auto adapta a frequência central do SOGI ressonante para uma determinada frequência de entrada.

Deste modo, para seu projeto, foi analisado como o erro $\mathcal{E}v$ do SOGI-QSG influencia na frequência central e, a partir dessa relação, promover sua regulação. Sendo a função transferência do sinal de entrada em relação ao erro, tem-se que:

$$E(s) = \frac{\mathcal{E}v}{v}(s) = \frac{s^2 + \omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (38)$$

Assim, pela função de transferência anterior, foi elaborado um diagrama de Bode do $E(s)$ e $Q(s)$, onde foi evidenciado a relação entre o erro ($\mathcal{E}v$) e o qv' .

Figura 24 - Diagrama de Bode do $E(s)$ e $Q(s)$ do SOGI-QSG



Fonte: [46]

E como visto na Figura 24, nota-se que os sinais $\mathcal{E}v$ e qv' estão em fase para $\omega < \omega'$ e em fases contrárias para $\omega > \omega'$. De modo que a variável de erro de frequência ($\mathcal{E}f$)

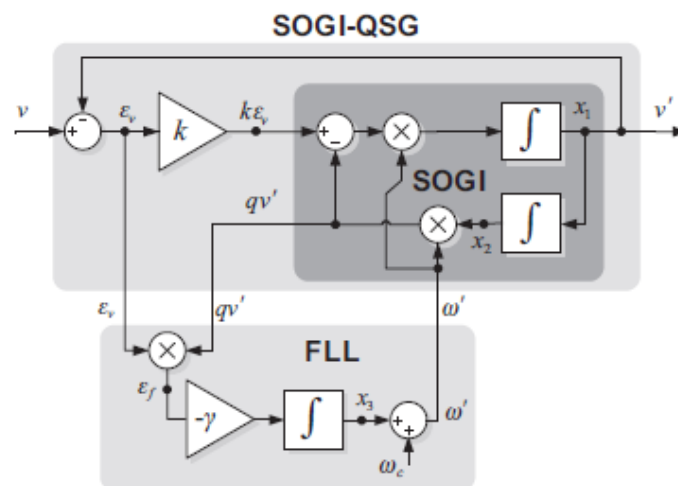
pode ser obtida como o produto de ε_v e qv' . Conforme a Figura 24, percebe-se que para $\omega < \omega'$ obtém-se um ε_f médio positivo, já para $\omega = \omega'$ tem-se um ε_f nulo e finalmente para $\omega > \omega'$ um ε_f médio negativo.

Assim sendo, esta variável de erro de frequência nos permite criar um loop de travamento de frequência (FLL). Onde, nesse loop, há um controlador integral com ganho negativo ($-\gamma$) que é usado para a componente CC do ε_f ser zero, por meio do deslocamento da frequência de centro, ω_c , até coincidir com a frequência de entrada, ω . Além disso, existe o valor nominal da frequência da rede (ω_c) adicionada a saída do FLL que serve para acelerar o processo inicial da sincronização. Portanto, a frequência de entrada é diretamente detectada pelo FLL enquanto o ângulo de fase e a amplitude da entrada pode ser indiretamente calculada pelos valores do SOGI.

$$|v'| = \sqrt{(v')^2 + (qv')^2} \quad (39)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{qv'}{v'} \quad (40)$$

Figura 25 - SOGI – FLL (Teórico)



Fonte: [46]

Analisando mais a fundo a estrutura do SOGI-FLL, percebe-se que para uma resposta dinâmica ele depende tanto do parâmetro K , como do γ . Assim, para um melhor desempenho deve-se estipula-los do melhor jeito que atenda às necessidades existentes, para isso utiliza-se as equações abaixo:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = Ax + Bv = \begin{bmatrix} -k\omega' & -\omega'^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k\omega' \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v \quad (41)$$

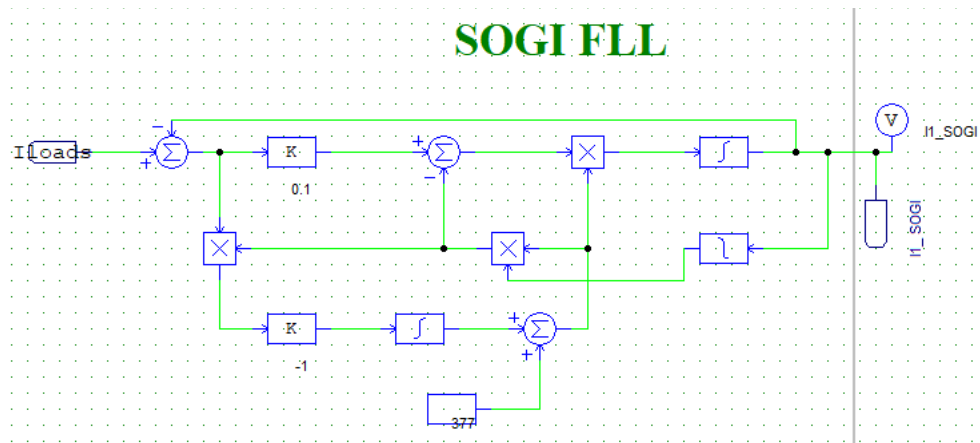
$$y = \begin{bmatrix} v' \\ qv' \end{bmatrix} = Cx = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \omega' \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (42)$$

$$\dot{\omega}' = -\gamma \cdot x_2 \cdot \omega' \cdot (v - x_1) \quad (43)$$

Onde, $x = [x_1, x_2]^T$ e $y = [v', qv']^T$ são os vetores de estado e saída do SOGI-QSG. Sendo que a equação de estado descreve o comportamento do FLL dada pela equação (41). Portanto, para a elaboração do K e γ citados, usa-se o meio matricial visto acima, que nos dá uma exatidão maior, ou também por meio empírico ou mesmo pela tentativa e erro, que nos apresentará valores aceitáveis para o projeto.

Sendo esse SOGI –FLL implementado conforme a Figura 26.

Figura 26 - SOGI - FLL



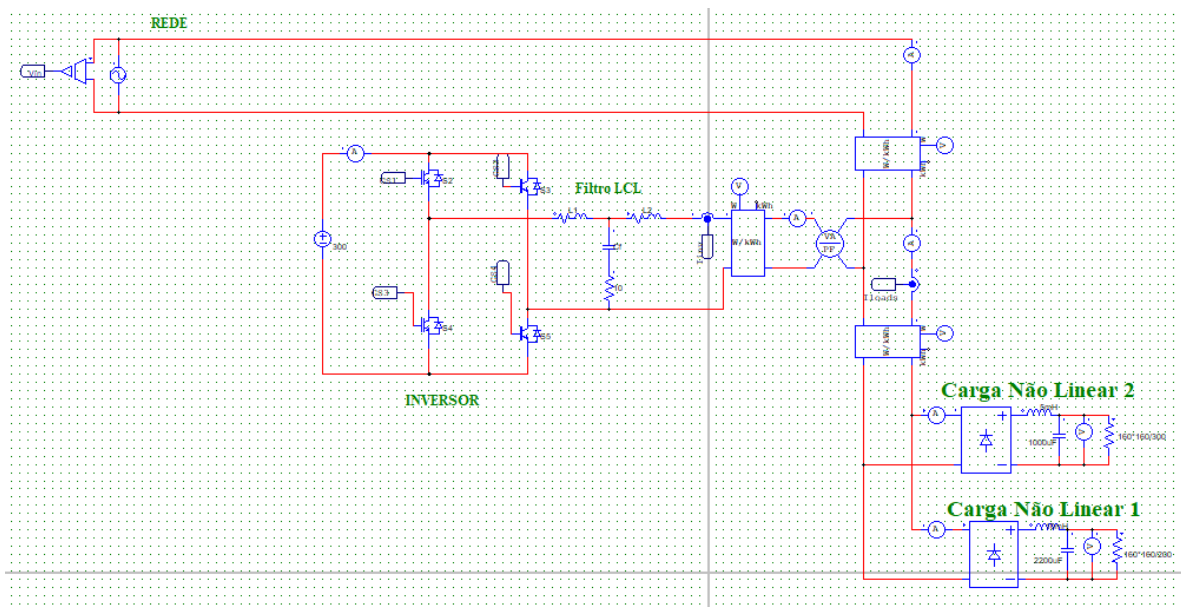
Fonte: Autor

4.1.4 Rede e Cargas

Para estudar o comportamento de compensação de harmônicos por meio de um painel fotovoltaico, foi idealizado uma rede juntamente com suas cargas não lineares, estas quais serão as fontes de harmônicos que se deseja a mitigação. Uma observação importante, antes não citada, é que o inversor e a fonte de tensão acoplada a ele, representa o conjunto fotovoltaico completo, ou seja, painéis, conversor Boost, Rastreamento de Máxima Potência etc. Isto porque foi optado por dar uma ênfase melhor sobre a malha de

controle em si. Assim, ficando resumido apenas no fornecimento de tensão de 300V e potência de 1000W. Como visto na Figura 27.

Figura 27 - Sistema Elétrico

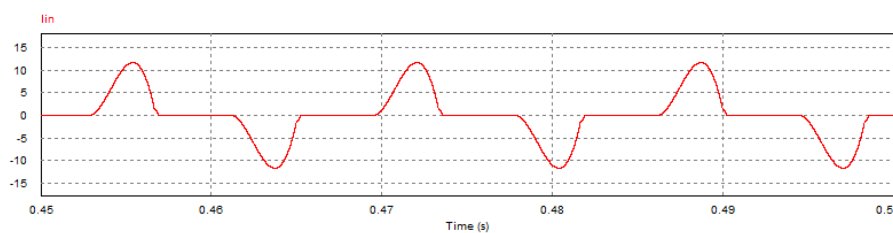


Fonte: Autor

4.2 Funcionamento

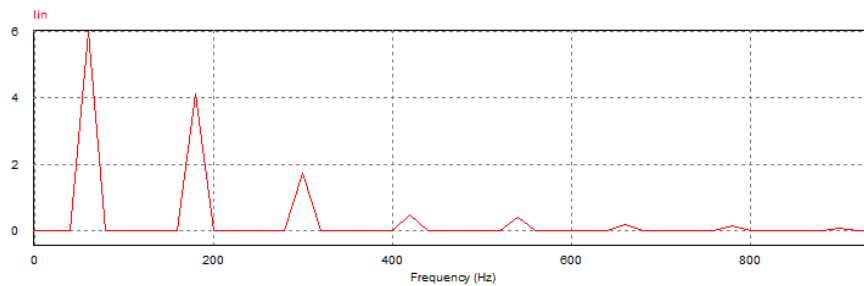
A partir da rede energizada e, consequentemente, suas cargas não – lineares, tem-se o fornecimento de componentes harmônicas no sistema elétrico e assim a deformação da onda de corrente, como visto nas Figuras 28 e 29:

Figura 28 - Corrente da Rede Sem Compensação



Fonte: Autor

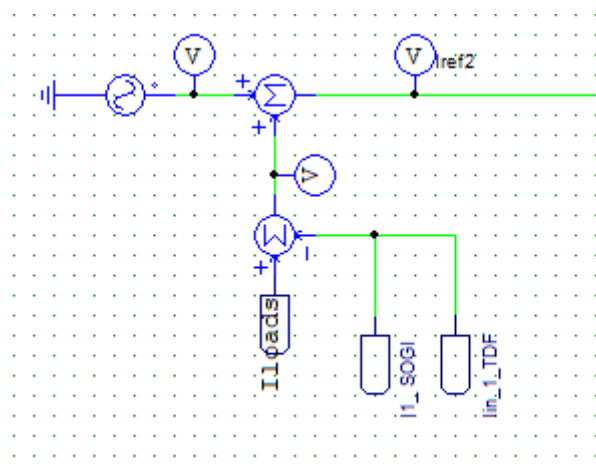
Figura 29 - Componentes Harmônicas da Rede



Fonte: Autor

Para realizar o devido controle do inversor fotovoltaico, primeiramente utiliza-se uma das estruturas de extrações de harmônicos, citadas anteriormente, para a obtenção da componente fundamental do sistema. Com o sinal em mãos, realiza-se sua subtração do sinal da corrente de carga, obtendo desta forma as componentes harmônicas injetadas no sistema. Seguindo o projeto, adiciona-se um sinal base referente a corrente injetada pelo painel fotovoltaico no inversor e, ao final, obtém-se o sinal de referência que será usado no controle (Histerese ou P - Ressonante) do inversor. Este funcionamento pode ser demonstrado conforme a Figura 30,

Figura 30 – Funcionamento



Fonte: Autor

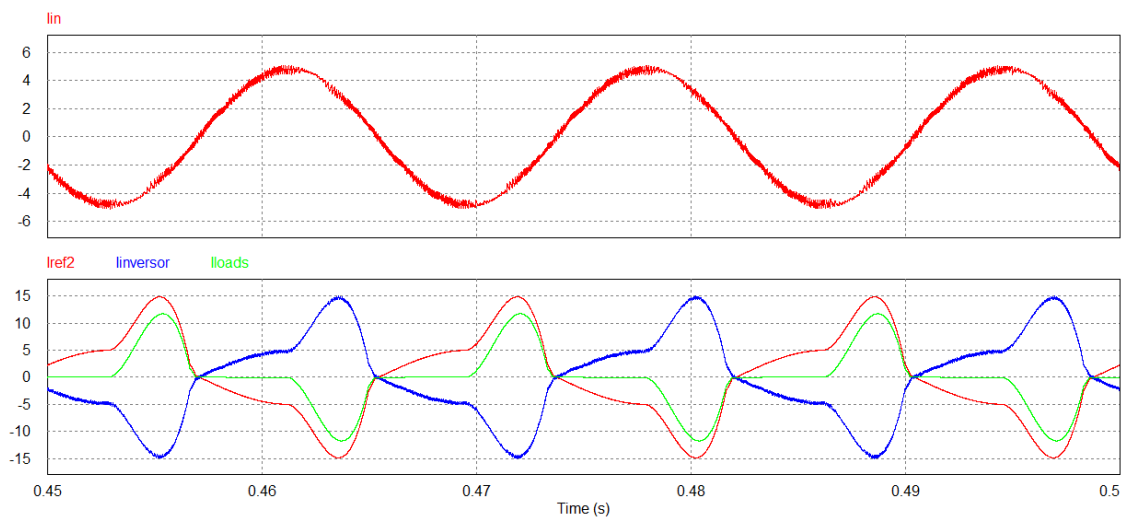
4.3 Análises das Respostas das Técnicas Propostas

A partir do histograma citado anteriormente, realiza-se uma análise para cada estrutura utilizada no desenvolvimento do controle do sistema. A avaliação é dividida em dois grupos inicialmente, o primeiro com o Filtro L e posteriormente com o Filtro LCL. Assim, ao final desse estudo pode-se determinar a melhor estratégia de controle para obter a mitigação de harmônicos desejada.

4.3.1 Respostas do Controle Utilizando o Filtro L

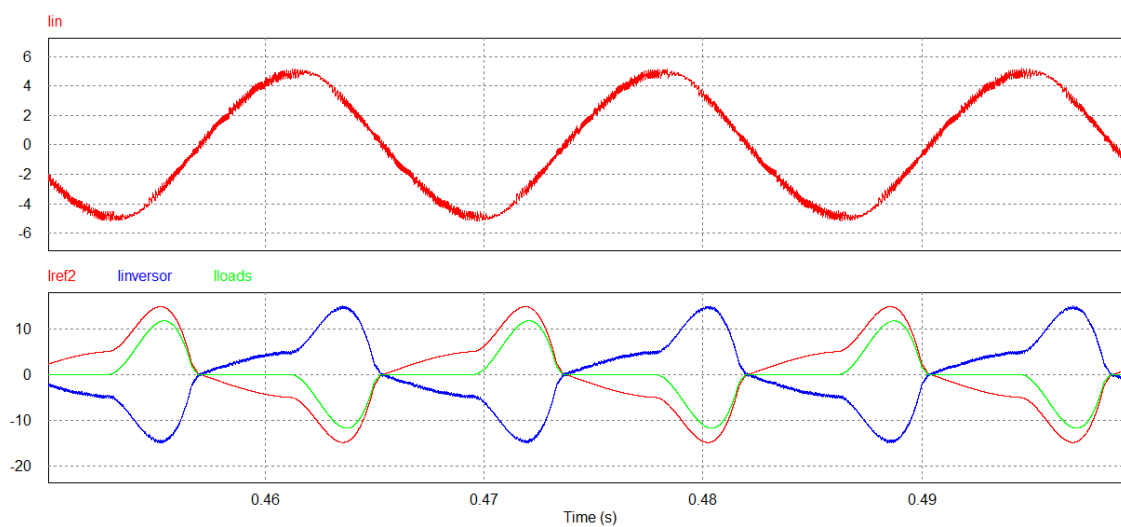
- Histerese (TDF x SOGI – FLL)

Figura 31 – Filtro L: Resposta Histerese com TDF



Fonte: Autor

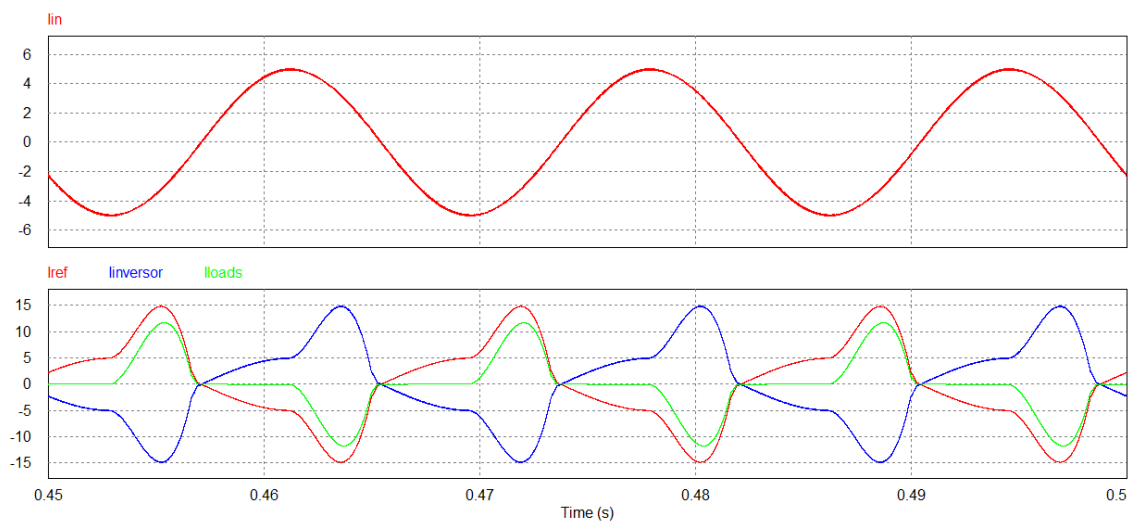
Figura 32 – Filtro L: Resposta Histerese com SOGI – FLL



Fonte: Autor

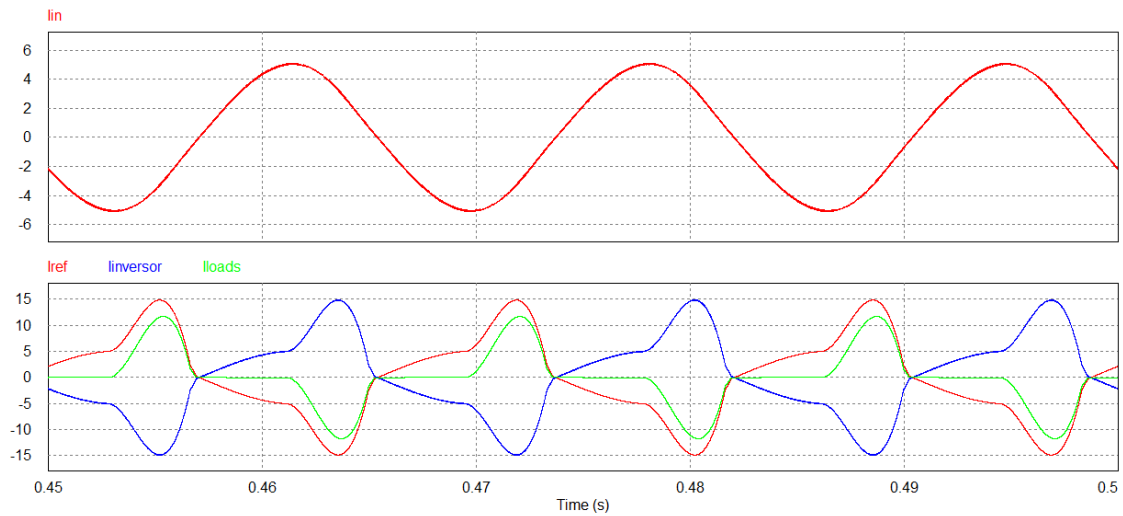
- P - Ressonante (TDF x SOGI – FLL)

Figura 33 – Filtro L: Resposta P - Ressonante com TDF



Fonte: Autor

Figura 34 – Filtro L: Resposta P - Ressonante com SOGI – FLL

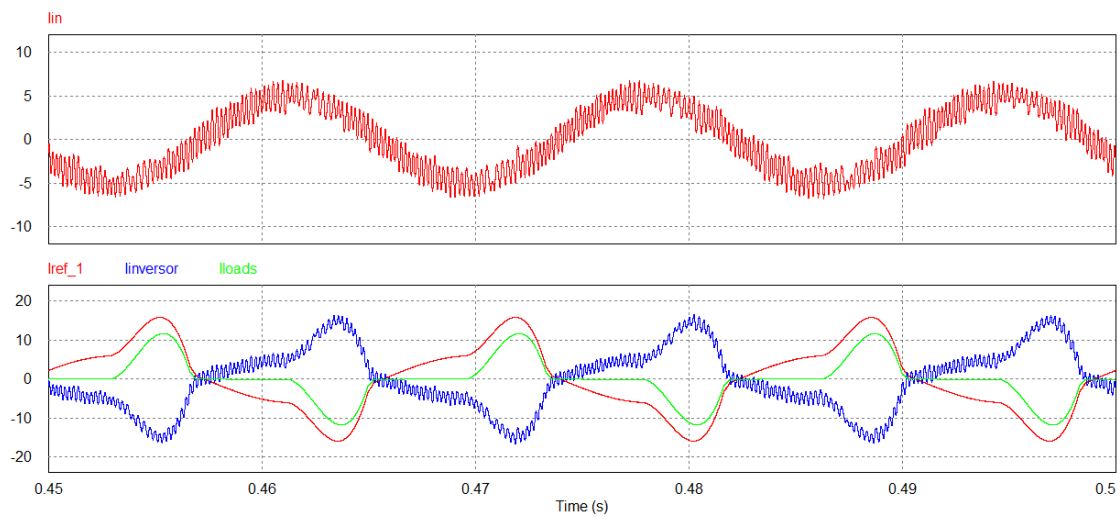


Fonte: Autor

4.3.2 Respostas do Controle Utilizando o Filtro LCL

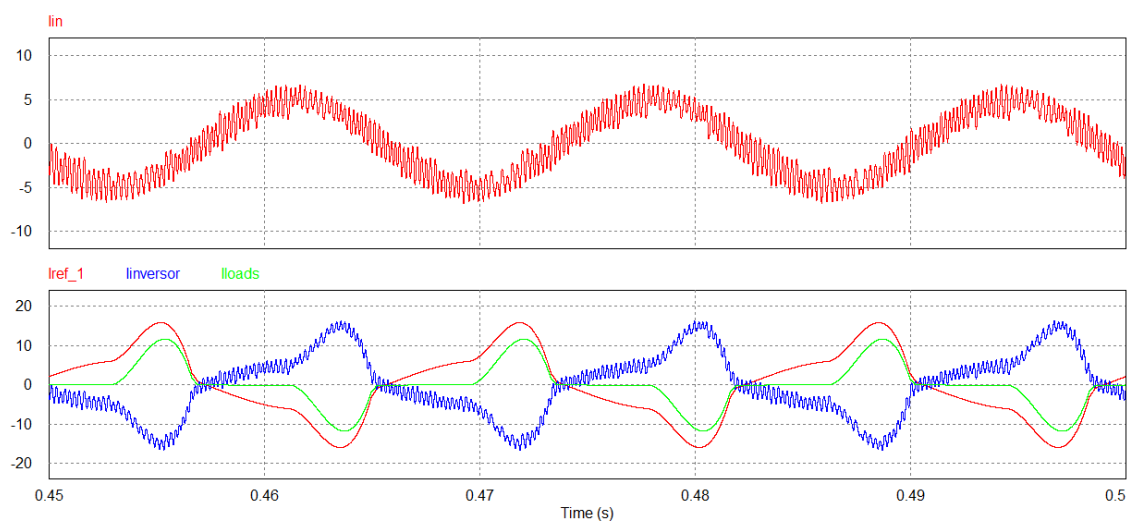
- Histerese (TDF x SOGI – FLL)

Figura 35 - Filtro LCL: Resposta Histerese com TDF



Fonte: Autor

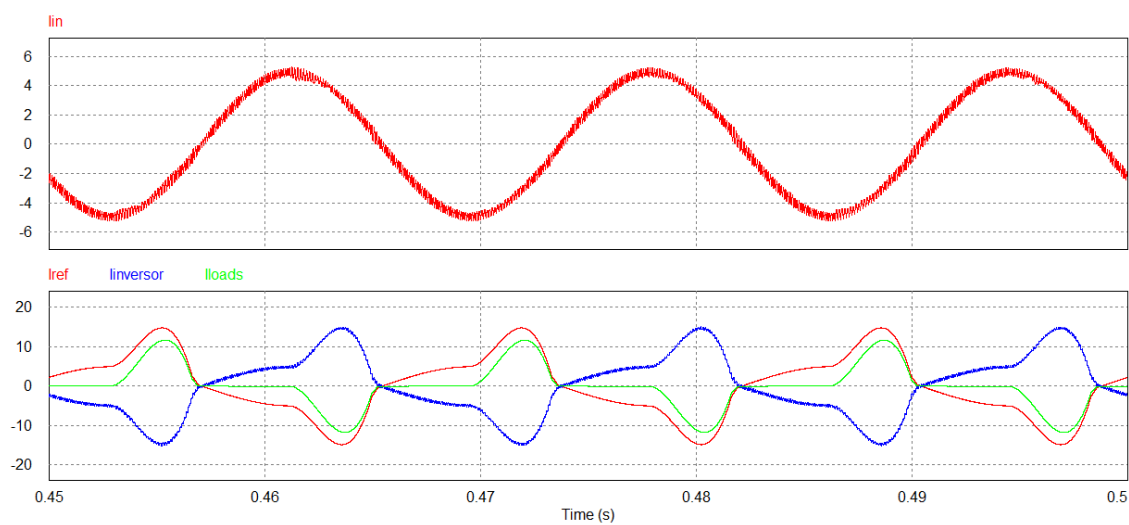
Figura 36 - Filtro LCL: Resposta Histerese com SOGI-FLL



Fonte: Autor

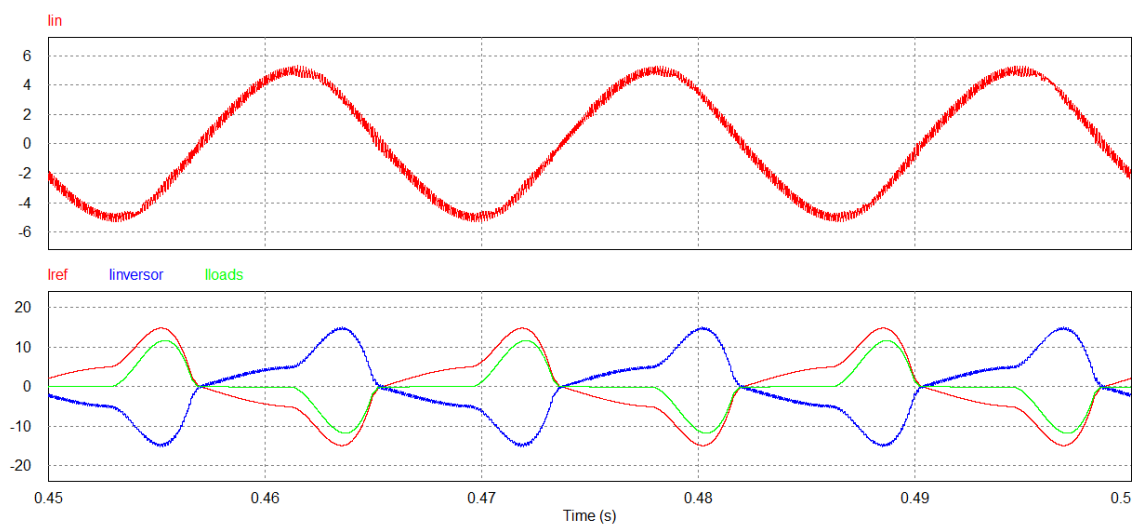
- P - Ressonante (TDF x SOGI – FLL)

Figura 37 - Filtro LCL: Resposta P - Ressonante com TDF



Fonte: Autor

Figura 38 - Filtro LCL: Resposta P - Ressonante com SOGI - FLL



Fonte: Autor

4.3.3 Resultados

Tendo analisado as respostas de cada controle citados acima, pode-se concluir que as melhores respostas para a mitigação dos harmônicos é o controle usando o Filtro L, juntamente com o P - Ressonante e o TDF, pois apresenta a menor THD, como visto na Tabela 4, além de uma frequência de chaveamento mais atenuada em comparação aos outros sistemas desenvolvidos.

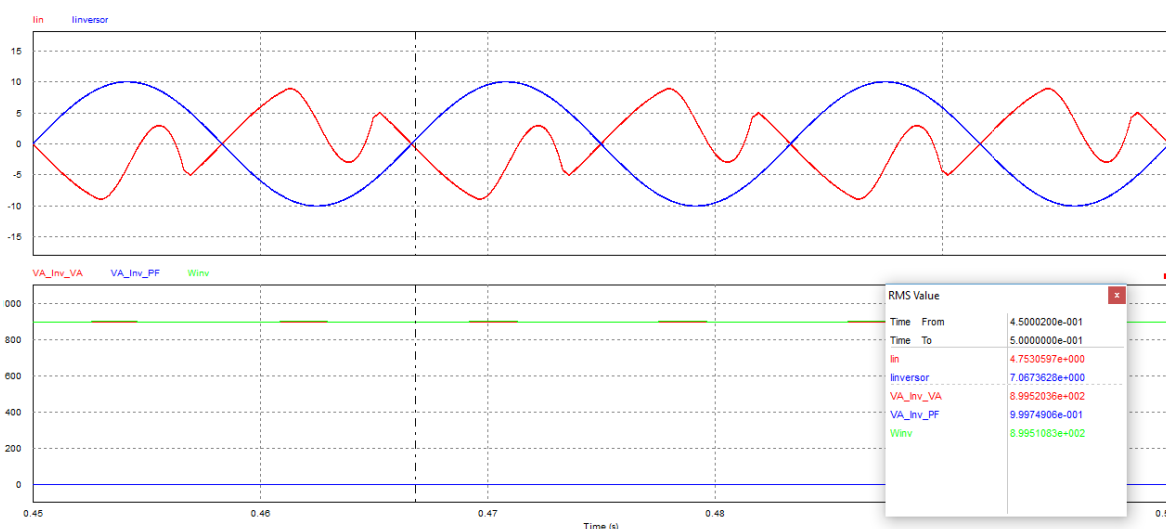
Tabela 3 - Estratégia de Controle x THD

Estratégia de Controle	THD (Distorção Harmônica Total)
Filtro L – Controle por Histerese e TDF	0,04175
Filtro L – Controle por Histerese e SOGI FLL	0,05526
Filtro L – Controle por P - Ressonante e TDF	0,00815
Filtro L – Controle por P - Ressonante e SOGI FLL	0,02710
Filtro LCL – Controle por Histerese e TDF	3,28151
Filtro LCL – Controle por Histerese e SOGI FLL	3,28952
Filtro LCL – Controle por P - Ressonante e TDF	0,06971
Filtro LCL – Controle por P - Ressonante e SOGI FLL	0,07418

Fonte: Autor

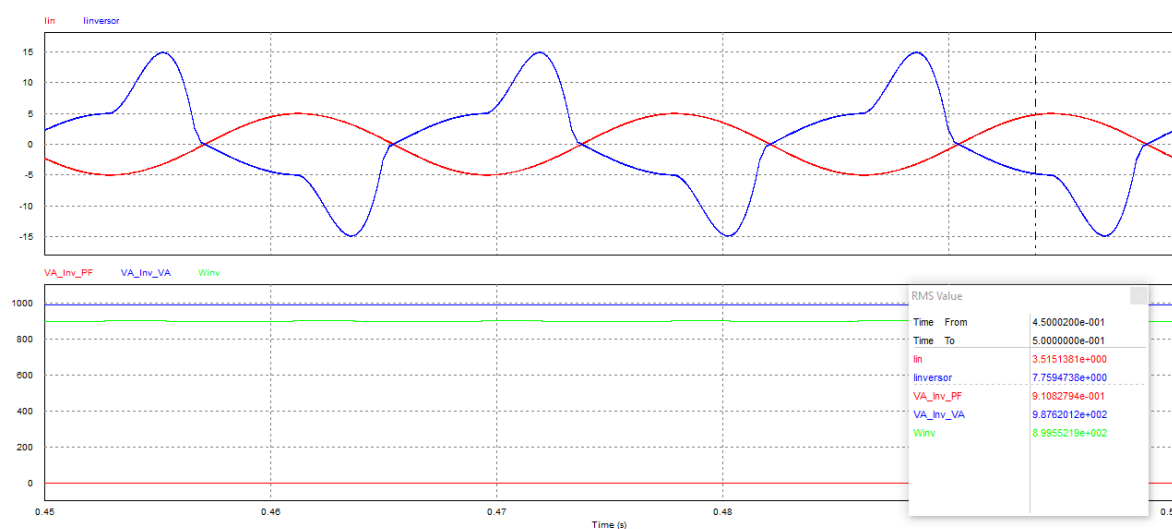
A partir da escolha do tipo de controle para o objetivo desejado, realiza-se agora uma análise da “perda” que existe com a criação dessa função auxiliar adicionada ao sistema fotovoltaico. Ou seja, quantificar-se a parcela de energia que deixa de ser produzida para o consumo (Potência Ativa) para que possa proporcionar a mitigação. Isso ocorre devido a transformação de parte dessa energia produzida em reativos, onde estes proporcionaram a compensação necessária para a rede.

Figura 39 - Potencia Sem Compensação



Fonte: Autor

Figura 40 - Potência Com Compensação



Fonte: Autor

Tabela 4 - Relação de Potência Entre os Sistemas

Potências Sistemas	Pot. Aparente (VA)	Pot. Ativa (W)	Pot. Reativa (Var)
Sem Compensação	900	900	0
Com Compensação	988	900	408

Fonte: Autor

Sendo os sistemas estudados possuidores da corrente de referência em 60 Hz com o valor de 10A, as potências ativas em ambos devem se manter em 900W. No entanto, o sistema com compensação de harmônicos possui em sua constituição a soma das componentes harmônicas nesta referência de 10 A, ou seja, isto equivale à potência reativa utilizada para mitigação. Assim, a potência ativa deve manter nos 900 W (porque a referência em 60 Hz continua 10 A), mas a potência aparente deve aumentar (porque somados as outras referências em frequências diferentes).

Tomando a ideia de eficiência na transformação e, assim, comparar esses dois sistemas, adota-se a premissa de que um sistema fotovoltaico normal (sem compensação de harmônicos), Figura 39, transforma 100% de sua potência aparente em potência útil, ou seja, neste estudo 900VA se transformou em 900W. Agora para o sistema cujo a função de mitigação foi instalada, nem toda a sua potência aparente vai ser transformada em potência ativa, pois parte dessa energia será utilizada para a compensação desejada, Figura 40. Assim, realizando a comparação com o item anterior tem-se o resultado visto na Tabela 6.

Tabela 5 - Eficiência dos Sistemas

Sistemas	Eficiência $\left(\frac{Pot.Ativa}{Pot.Aparente} \times 100\% \right)$
Sem Compensação	100%
Com Compensação	91%

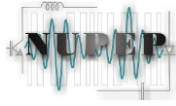
Fonte: Autor

Portanto, percebe-se que para possuir essa função auxiliar atrelada ao sistema fotovoltaico deve-se ter em mente a perda de uma parcela da produção, ou seja, deixa-se de produzir potência útil para, assim, melhorar a qualidade da energia elétrica da rede.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES

A partir deste trabalho, percebe-se o grande potencial que o sistema fotovoltaico possui. Pois, o Brasil possui uma localização geográfica que nos permite extrair, de forma constante, uma grande quantidade de energia, durante praticamente todo o ano. Além disso, com um pouco de inovação e criatividade, pode-se também anexar novas funções a esses sistemas, de forma a tirar o melhor proveito tanto em produção quanto em um melhoramento da própria rede elétrica.

Sendo a função auxiliar de mitigação de harmônicos o objeto de estudo, obtém-se, ao final, resultados de caráter positivo, ou seja, a partir do sacrifício de um pouco do rendimento do painel, no quesito de produção de energia, consegue-se trazer grandes benefícios para a qualidade da energia elétrica da rede. Entende-se também que, com essa perda de rendimento traria, de certo modo, prejuízos financeiros para o consumidor, estes quais quando adquirem um sistema fotovoltaico querem a produção total daquela contratada. No entanto, com o advento e barateamento dos equipamentos, existe uma prospecção positiva para o futuro onde essa tecnologia estará mais disseminada na sociedade brasileira e, assim, o sacrifício citado anteriormente poderá ser dividido entre os sistemas instalados, diminuindo as perdas dos consumidores e aumentando a qualidade da energia nacional.



ANEXO A

Código para implementação de Uma Transformada Discreta de Fourier, para utilização no Software Psim.

Código:

```
static int h = 1;
```

```
static float Vin = 0;
```

```
static float Vin_ant = 0;
```

```
static float delta_PI = 0.007542839504417270;
```

```
static float PI_2 = 6.2831853071795864;
```

```
static float ang_faseA = 0;
```

```
static float cos_alfa_faseA = 0;
```

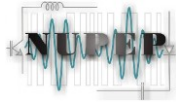
```
static float sen_alfa_faseA = 0;
```

```
static float theta_h_faseA = 0;
```

```
static float PI_THD_faseA = 0;
```

```
static float Iin_filt_faseA = 0;
```

```
static float Iin_abs_faseA = 0;
```



```
static float Iin_rms_fund_faseA = 0;
```

```
static float ha1_faseA = 0;
```

```
static float hb1_faseA = 0.0001;
```

```
static float mult_PLL_faseA = 0;
```

```
static int cruza_faseA = 0;
```

```
Vin_ant = Vin;
```

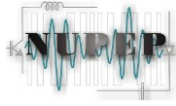
```
Vin = x1;
```

```
Iin_filt_faseA = x2;
```

```
ang_faseA = ang_faseA + delta_PI;
```

```
if (ang_faseA >= PI_2)
```

```
    {ang_faseA = ang_faseA - PI_2;}  
}
```



```
cos_alfa_faseA = cos(h*ang_faseA);
```

```
sen_alfa_faseA = sin(h*ang_faseA);
```

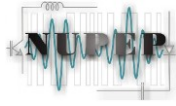
```
//***** Atualização do THD*****
```

```
//Detecta o cruzamento por zero
```

```
mult_PLL_faseA = Vin*Vin_ant;
```

```
if (mult_PLL_faseA <= 0)
```

```
{cruza_faseA = cruza_faseA + 1;}
```



```
if (cruza_faseA == 2) //Cruzamento por ciclo
```

```
{
```

```
    //Calcula a componente fundamental aritmeticamente
```

```
        hal_faseA      =      hal_faseA*0.0024;           //
```

```
hal*2/(Fs/freq_sinal_faseA) //--> DEPENDE DE FS
```

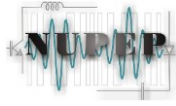
```
        hbl_faseA      =      hbl_faseA*0.0024;           //
```

```
hbl*2/(Fs/freq_sinal_faseA) //--> DEPENDE DE FS
```

```
    //Fundamental usando valor aritimético
```

```
        Iin_rms_fund_faseA = sqrt(hal_faseA*hal_faseA +  
hbl_faseA*hbl_faseA)/(sqrt(2));
```

```
        theta_h_faseA = -atan(hbl_faseA/hal_faseA) + PI_2/4;
```



```
hal_faseA = 0;
```

```
hbl_faseA = 0;
```

```
}
```

```
//***** Cálculo do THD
```

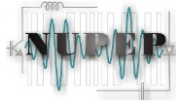
```
*****
```

```
//----- Parte 1/2 do THD -----
```

```
-----
```

```
//Integração numérica
```

```
hal_faseA = hal_faseA + lin_filt_faseA*cos_alfa_faseA;
```


$$hbl_faseA = hbl_faseA + Iin_filt_faseA * sen_alfa_faseA;$$

//-----Fim do Parte 1/2 do THD -----

if (*cruza_faseA* == 2)

{*cruza_faseA* = 0;}

$$y1 = Iin_rms_fund_faseA * sqrt(2) * sin(h * ang_faseA + theta_h_faseA);$$

REFERÊNCIAS

1. RIBEIRO, Amarolina. **O que é matriz energética?** Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/geografia/o-que-e-matriz-energetica.htm>>. Acesso em: 19 novembro 2018.
2. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2017: Relatório Síntese - Ano Base 2016**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2017.
3. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Inserção da geração fotovoltaica distribuída no brasil – condicionantes e impactos**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2014.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Brasil Ultrapassa 1GW em Usinas Solares em Operação**. Disponível em <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/brasil-ultrapassa-1-gw-em-usinas-solares-em-operacao-diz-associacao-do-setor.html>>. Acesso em: 20 novembro. 2018.
5. JUNIOR, Luiz Mauricio Lopes. A. ; MENDES, Luiz Fernando Rosa. **Microgeração fotovoltaica conectada à rede elétrica: considerações a cerca de sua difusão e implementação no Brasil**. Em: VÉRTICES, Campos dos Goytacazes/RJ, v.18, n. 2, p. 31-51, maio/ago. 2016. Disponível em <<http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/vertices/article/view/1809-2667.v18n216-03/5244>> Acesso em: 20 novembro 2018.
6. SILVIERA, Rafael Franco ; PEREIRA, André Luiz Silva.. **Estudo sobre as técnicas de controle em filtros ativos de potência**. Em: Relatório Final do PIBIC/PIBITI/CNPq/IFG - agosto/2012-julho/2013. Disponível em: <https://www.ifg.edu.br/attachments/article/3018/IC_2012_Rafael%20Franco%20Silveira.pdf>. Acesso em: 20 novembro 2018.

7. VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica. Conceitos e Aplicações: Sistemas Isolados e Conectados à Rede.** 2. ed. Campinas: Saraiva, 2015. 224 p.
8. KHAN ACADEMY. **Luz: ondas eletromagnéticas, espectro eletromagnético e fótons.** Disponível em: <<https://pt.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>>. Acesso em: 21 novembro 2018.
9. STROM BRASIL. **Efeito fotovoltaico.** Disponível em: <<http://www.strombrasil.com.br/efeito-fotovoltaico/>>. Acesso em: 21 novembro 2018.
10. FARIA, Carolina. **Massas de Ar.** Disponível em: <<https://www.infoescola.com/meteorologia/massas-de-ar/>>. Acesso em: 21 novembro 2018.
11. QUADRADO, José Carlos. **Dossier: Medição da Radiação Solar.** Disponível em: <http://energiasrenovaveis.com/DetalheNoticias.asp?ID_conteudo=102&ID_area=15>. Acesso em: 21 novembro 2018.
12. ZAMBOTI, Márcio, et al. **Conceitos iniciais para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos em residências.** Disponível em: <http://www.ufjf.br/flavio_gomes/files/2013/05/Projeto-Solar-_Introdu%C3%A7%C3%A3o-a-Engenharia-Eletrica.pdf>. Acesso em: 22 novembro 2018.
13. CRESESB. **Potencial Solar - SunData v 3.0.** Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em: 22 novembro 2018.
14. SECRETARIA DE ENERGIA DO GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Energia Solar Paulista - Levantamento Do Potencial.** Disponível em: <http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalecv2/intranet/BiblioVirtual/renovaveis/atlas_energia_solar.pdf>. Acesso em 22 novembro 2018.

15. FLANDOLI, Fabio. **Conceitos Básicos de Energia Solar**. Disponível em: <<http://www.eletricistaconsciente.com.br/pontue/fasciculos/1-introducao-e-conceitos-basicos-de-energia-fotovoltaica/conceitos-basicos-de-energia-solar/>>. Acesso em: 22 novembro 2018.
16. FERNANDES, João. **Equinócio de Outono: Quando a Noite e o Dia se Encontram**. Disponível em: <<http://www.reconquista.pt/articles/equinocio-de-outono-quando-a-noite-e-o-dia-se-encontram>>. Acesso em: 22 novembro 2018.
17. GOVERNO DOS AÇORES - SECRETARIA REGIONAL DA EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E CULTURA. **Solstício De Dezembro**. Disponível em:<<http://centrosciencia.azores.gov.pt/content/solst%C3%ADcio-de-dezembro>>. Acesso em: 22 novembro 2018.
18. JUSTINIANO, Artur, et al. **Astro 3D: um simulador do movimento de corpos celestes**. Em: Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 39, nº 4, e4505 (2017). Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbef/v39n4/1806-1117-rbef-39-04-e4505.pdf>>. Acesso em 22 novembro 2018.
19. BOSCH. *Installation and Safety Manual for the c-Si M60(S) NA 30117 and NA 42117 Families of Crystalline Photovoltaic Modules*. Disponível em: <http://www.boschsolarenergy.de/media/bosch_se_serviceorganisation/kundendienst/north_america/crystalline_solar_modules/Bosch_Solar_Module_NA30117_NA42117_V11_29052013.pdf>. Acesso em 22 novembro 2018.
20. PINTO, Aimé, et al. **Descrição De Seguidores Solares E Sua Aplicação Em Centrais Fotovoltaicas Conectadas À Rede**. Em: III Congresso Brasileiro de Energia Solar. Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2010/Trabalhos/pintonetodescricao.pdf>>. Acesso em 22 novembro 2018.
21. LUSOSOL. **Calculador da Distância Mínima entre fileiras de Coletores**. Disponível em: < <http://www.lusosol.com/fileiras.htm>>. Acesso em: 22 novembro 2018.
22. DE LEVA, Flávia Fernandes, et al. **Modelo de um projeto de um sistema fotovoltaico**. Disponível em: <

- http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022004000200020&script=sci_arttext>. Acesso em: 22 novembro 2018.
23. CRESESB. **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica - 5. Módulos Fotovoltaicos.** Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331>. Acesso em: 22 novembro 2018.
24. SOLARFINGER. **Sistemas fotovoltaicos autônomos: dimensionamento simplificado.** Disponível em: <<https://solarfinger.com.br/blog/sfv-autonomos/>>. Acesso em: 23 novembro 2018.
25. NEXSOLAR. **Soluções.** Disponível em: <<http://nexsolar.com.br/solucoes/>>. Acesso em: 24 novembro 2018.
26. RASHID, Muhammad. H. **Eletrônica de Potência - Dispositivos, Circuitos e Aplicações.** Pearson; Edição 1 (29 de Setembro de 2014). 880p.
27. LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva. **Harmônicos em Sistemas Elétricos.** Elsevier, 2013. 376p.
28. GARCIA, Flávio Resende. **HARMONICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.** Disponível em: <http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosepCap.pdf>. Acesso em 26 novembro 2018.
29. SANTOS, Fabiano J. **INTRODUÇÃO ÀS SERIES DE FOURIER.** Disponível em: < http://www.matematica.pucminas.br/profs/web_fabiano/calculo4/sf.pdf>. Acesso em: 26 novembro 2018.
30. NUNES, Ivan. **Apostila de Qualidade de Energia Elétrica 2018** – Faculdade de Engenharia Elétrica – UFU.
31. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.** Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo_8-Revis%C3%A3o_10/2f7cb862-e9d7-3295-729a-b619ac6baab9>. Acesso em: 27 novembro 2018.

32. POMILIO, José Antenor; DECKMANN, Sigmar Maurer. **IT - 741 Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS - UNICAMP/FEEC/DSCE.** Disponível em: <
<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/IT741.html>>. Acesso em 29 novembro 2018.
33. PAN, Donghua; XING, Zhongwei; YU, Hui. **Analysis and Design of Current Control Schemes for LCL-Type Grid - Connected Inverter Based on a General Mathematical Model.** Disponível em: <
https://www.researchgate.net/publication/310824507_Analysis_and_Design_of_Current_Control_Schemes_for_LCL-Type_Grid-Connected_Inverter_Based_on_a_General_Mathematical_Model>. Acesso em: 07 janeiro. 2019.
34. SCHILDT, Alessandro Nakoneczny. **Síntese de controladores ressonantes baseados em dados aplicado a fontes ininterruptas de energia.** Disponível em: <
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/109164/000947569.pdf;jsessionid=50150605AE9B0DBBDA3872D0517B0C27?sequence=1>>. Acesso em: 07 janeiro 2019.
35. GALELLI, Marcos Tadeu. **Controle por histerese com frequência quase constante de um pré-regulador boost.** Disponível em:<
<http://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14375/1/MTGalelliDISSPRT.pdf>>. Acesso em: 07 janeiro 2019.
36. PIRES, Lucas Pereira. **Projeto e desenvolvimento de um inversor solar ponte completa bidirecional para microrredes cc conectadas à rede ca em baixa tensão.** Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/18078>>. Acesso em: 12 janeiro 2019.
37. YNOGUTI, Carlos Alberto. **Processamento de Sinais Digitais: Transformada Discreta de Fourier.** Disponível em: <
<https://www.inatel.br/docentes/ynoguti/downloads/dsp-s886637-1/20-dft-s244331-1/file>> Acesso em 12 janeiro 2019.

38. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2016: Relatório Síntese - Ano Base 2015**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 2016.
39. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 482 de 17 de Abril de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Normativa%20482,%20de%202012%20-%20bip-junho-2012.pdf>> Acesso em maio 2019.
40. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 517 de 11 de Dezembro de 2012**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>>. Acesso em maio 2019.
41. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução Normativa nº 687 de 24 de Novembro de 2015**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em maio 2019.
42. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA - INMETRO. **Portaria nº 004 de 04 de Janeiro de 2011**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001652.pdf>>. Acesso em maio 2019
43. VOLT. **Manual de Instruções: Controlador Solar MPPT Evolution**. Disponível em: <http://www.volt.ind.br/manuais/ctrl_mppt_solar_ev.pdf>. Acesso em maio 2019.
44. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Nota Técnica nº 0129/2012-SRD/ANEEL 27 de Agosto de 2012**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Nota_Tecnica_0129_SRD.pdf>. Acesso em maio 2019.
45. SENA LOPES, Afonso G. Portugal. **Controlo Avançado de Conversores para Sistemas Fotovoltaicos**. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/143399136.pdf>> Acesso em maio 2019.



46. TEODORESCU, Remus; LISERRE, Marcos; RODRIGUEZ, Pedro. **Grid converters for photovoltaic and wind power systems**. This edition first published 2011. 407 p.