



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

LUCAS TAYLAN PONTE MEDEIROS

**PROPOSTA DE CONTROLE DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA
FOTOVOLTAICA CONECTADA À REDE ELÉTRICA**

SOBRAL

2019

LUCAS TAYLAN PONTE MEDEIROS

PROPOSTA DE CONTROLE DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA
CONECTADA À REDE ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Adson Bezerra
Moreira

SOBRAL

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M1p

MEDEIROS, LUCAS TAYLAN PONTE.

PROPOSTA DE DE CONTROLE DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA
CONECTADA À REDE ELÉTRICA / LUCAS TAYLAN PONTE MEDEIROS. – 2019.

73 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral,
Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2019.

Orientação: Prof. Dr. ADSON BEZERRA MOREIRA.

1. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO. 2. MPPT. 3. PeO. 4. TOPOLOGIA DE ESTÁGIO ÚNICO. I.
Título.

CDD 621.3

LUCAS TAYLAN PONTE MEDEIROS

PROPOSTA DE CONTROLE DO SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA
CONECTADA À REDE ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Campus de Sobral da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof^a. Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Paulo Robson Melo Costa
Eng.^o Eletricista

A Deus

Ao meu pai José Waldeck

À minha mãe Socorro Maria

Aos meus irmãos Luann Wytor e Anna Layssa

À minha namorada Tayla Maia

Eu dedico esse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado força em minha vida acadêmica e pessoal.

Aos meus Pais José Waldeck e Socorro Maria, pelo amor e apoio incondicional a mim dedicados.

Aos meus irmãos Luann Wytor e Anna Layssa, pelo amor e por nunca me deixar enfraquecer nesta importante e árdua jornada.

À minha namorada Tayla Maia que esteve comigo durante essa jornada me motivando e dando todo apoio necessário e essencial à conclusão desse curso e por acreditar em meus sonhos e vivê-los junto comigo.

Agradeço, em especial, ao meu orientador Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira por aceitar me orientar, pela confiança em meu trabalho, pela paciência, pelo otimismo e por todos os ensinamentos a mim destinados.

Aos amigos e colegas do curso de Engenharia Elétrica, em especial Rodolfo Rodrigues, Gustavo Melo, Iara Sousa e Leonardo Pires por sempre me auxiliarem e prestarem ajuda nas disciplinas e em vésperas de provas. Também aos amigos Heitor Vasconcelos, Clévia Alves, Francinildo Costa, Danilo Fernandes, Denísia Vasconcelos, Saulo Cunha pelo companheirismo, momentos de descontração, colaboração e trocas de experiências durante essa jornada universitária.

A todos os meus demais amigos, em especial Renan Albuquerque, Lucas Couto, Willian Wildney, João Pedro, Maison Sousa, Francisco Tainan, Renan Farias, Thiago Marques que contribuíram direta ou indiretamente para que esse sonho se tornasse realidade.

Aos membros da banca examinadora pelos comentários, sugestões e contribuições que tornaram melhor a qualidade deste trabalho.

Ao Doutorando em Engenharia Elétrica, Ednardo Moreira Rodrigues, e seu assistente, Alan Batista de Oliveira, aluno de graduação em Engenharia Elétrica, pela adequação do *template* utilizado neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

“Entregue o seu caminho ao Senhor; confie nele,
e ele agir.”

(Bíblia Sagrada: Salmos 37:5)

RESUMO

Este trabalho apresenta a modelagem e simulação de um sistema de conversão fotovoltaico conectado à rede elétrica trifásica. Para modelagem do módulo FV foi utilizado o modelo de diodo único, os estudos e os parâmetros do modelo foram levantados para o módulo KD210GX - LPU do fabricante Kyocera. Os módulos foram associados em série e foi aplicada a técnica de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT - Maximum Power Point Tracking) baseado no algoritmo perturba e observa (PeO) que tem a função de obter a máxima potência do arranjo. Os terminais do arranjo fotovoltaico são conectados diretamente no barramento CC do conversor eletrônico de potência CC-CA, utilizando a topologia de estágio único, com as funções de realizar o fluxo de potência e manter a tensão do barramento CC estabilizada. A interface com a rede elétrica é realizada por meio de um filtro indutivo com o objetivo de reduzir as distorções harmônicas totais da corrente de saída. Apresenta-se também o controle do conversor CC-CA do sistema formada por duas malhas de controle em cascata: de controle de corrente e de controle da tensão do barramento CC. Todas as simulações foram realizadas através do *software* MatLab/Simulink®. Foram abordados dois cenários para irradiâncias de 1000 W/m^2 e 400 W/m^2 com a temperatura constante de 25°C e um terceiro cenário com irradiância de 800 W/m^2 e temperatura de $47,9^\circ\text{C}$. O sistema fotovoltaico se mantém controlado e injetando potência ativa na rede elétrica para os três cenários. O algoritmo de MPPT funciona de modo adequado melhorando a potência gerada para diferentes irradiâncias e temperaturas.

Palavras-chave: Sistema Solar Fotovoltaico (FV). Maximum Power Point Tracking (MPPT). Algoritmo Perturba e Observa (PeO). Topologia de Estágio Único. Filtro L.

ABSTRACT

This work presents the modeling and simulation of a photovoltaic conversion system connected into the three - phase electrical grid. For modeling of the PV module the single diode model was used, the studies and the parameters of the model were raised for the module KD210GX - LPU of the manufacturer Kyocera. The modules were associated in series and the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique was applied based on the Perturb and Observe (PeO) algorithm that has the function of obtaining the maximum power of the array. The PV array terminals are connected directly to the DC bus of the DC-AC power electronic converter using the single-stage topology with the functions of performing the power flow and keeping the DC bus voltage stabilized. The interface with the electric grid is realized by means of an inductive filter in order to reduce the total harmonic distortions of the output current. It also shows the control of the DC-AC converter of the system formed by two cascade control meshes: current control and DC bus voltage control. All simulations were performed through MatLab / Simulink® software. Two scenarios for irradiances of 1000 W/m^2 and 400 W/m^2 with the constant temperature of 25°C and a third scenario with irradiance of 800 W/m^2 and temperature of $47, 9^\circ\text{C}$. The photovoltaic system remains controlled and injecting active power into the grid for the three scenarios. The MPPT algorithm works properly by improving the power output for different irradiances and temperatures.

Keywords: Photovoltaic (PV) solar system. Maximum Power Point Tracking (MPPT). Algorithm Perturb and Observe . Single Stage Topology. Filter L.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz energética brasileira.	16
Figura 2 – Mercado fotovoltaico mundial	17
Figura 3 – Eficiência das células fotovoltaica.	21
Figura 4 – Declínio do preço da célula fotovoltaica.	21
Figura 5 – Modelo de uma célula fotovoltaica.	22
Figura 6 – Curva $V \times I$ característica de um dispositivo prático.	23
Figura 7 – Representação das curvas $I \times V$ relativas à associação de três módulos em série.	25
Figura 8 – Representação das curvas $I \times V$ relativas à associação de três módulos em paralelo.	26
Figura 9 – Representação das curvas $I \times V$ relativas à associação mista de três módulos.	27
Figura 10 – Representação das curvas fornecidas pelo fabricante do módulo.	28
Figura 11 – Representação das curvas obtidas a partir da simulação do módulo.	29
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de perturba e observa (PeO).	30
Figura 13 – Comportamento do sistema com o método PeO.	31
Figura 14 – Diagrama esquemático do controle de potência do CLR.	32
Figura 15 – Conversor eletrônico CC-CA trifásico conectado à rede por meio de filtro L.	33
Figura 16 – Diagrama de blocos de controle do PLL.	36
Figura 17 – Diagrama esquemático do PLL.	37
Figura 18 – Sistema de controle de corrente do conversor do lado da rede.	39
Figura 19 – Diagrama de blocos da malha de controle de tensão do barramento CC.	40
Figura 20 – Filtro RL na saída do conversor.	40
Figura 21 – Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente de eixo direto.	41
Figura 22 – Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente de eixo em quadratura.	41
Figura 23 – Resposta em frequência de malha aberta do controle das correntes elétricas i_d e i_q do CLR.	43
Figura 24 – Diagrama de blocos simplificado do controle de tensão elétrica do barramento CC.	44
Figura 25 – Resposta em frequência de malha aberta do controlador de tensão elétrica do barramento CC do CLR.	45
Figura 26 – Sistema de geração fotovoltaico completo.	47

Figura 27 – Curva característica da potência versus tensão para diferentes níveis de irradiação.	48
Figura 28 – Tensão da rede elétrica (V_{sa}), frequência da rede elétrica e ângulo θ obtido a partir do PLL.	49
Figura 29 – Tensões de eixo direto da rede elétrica (V_{sd}) e tensão de eixo em quadratura (V_{sq}).	50
Figura 30 – Correntes de eixo direto (I_d) e de eixo direto de referência (I_{dref}) para irradiação de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	51
Figura 31 – Correntes de eixo direto (I_d) e de eixo direto de referência (I_{dref}) para irradiação de $400 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	51
Figura 32 – Correntes de eixo em quadratura (I_q) e de eixo em quadratura de referência (I_{qref}) para irradiação de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	52
Figura 33 – Correntes de eixo em quadratura (I_q) e de eixo em quadratura de referência (I_{qref}) para irradiação de $400 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	52
Figura 34 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica para irradiação de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	53
Figura 35 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica para irradiação de $400 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	53
Figura 36 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica para irradiação de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	54
Figura 37 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica para irradiação de $400 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	54
Figura 38 – Tensão da rede (V_a) e Corrente (I_a) em detalhes para irradiação de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	55
Figura 39 – Tensão da rede (V_a) e Corrente (I_a) em detalhes para irradiação de $400 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	55
Figura 40 – Tensão V_{cc} seguindo a referência V_{ccref} em detalhes para irradiação de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	56
Figura 41 – Tensão V_{cc} seguindo a referência V_{ccref} em detalhes para irradiação de $400 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	57
Figura 42 – Tensão no barramento CC (V_{cc}) com o método do MPPT para irradiação de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^\circ C$	58

Figura 43 – Tensão no barramento CC (V_{cc}) com o método do MPPT para irradiância de $400W/m^2$, e temperatura de $25^{\circ}C$	58
Figura 44 – Curva de potência sem o método de MPPT em detalhes para irradiância de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^{\circ}C$	59
Figura 45 – Curva de potência sem o método de MPPT em detalhes para irradiância de $400 W/m^2$, e temperatura de $25^{\circ}C$	60
Figura 46 – Curva de potência com PeO em detalhes para irradiância de $1000 W/m^2$, e temperatura de $25^{\circ}C$	60
Figura 47 – Curva de potência com PeO em detalhes para irradiância de $400 W/m^2$, e temperatura de $25^{\circ}C$	61
Figura 48 – Tensão no barramento CC (V_{cc}) sem o método do MPPT para irradiância de $800 W/m^2$, e temperatura de $47,9^{\circ}C$	62
Figura 49 – Curva de potência sem o MPPT para irradiância de $800 W/m^2$, e temperatura de $47,9^{\circ}C$	62
Figura 50 – Tensão no barramento CC (V_{cc}) para o método PeO para irradiância de $800 W/m^2$, e temperatura de $47,9^{\circ}C$	63
Figura 51 – Curva de potência sem o MPPT para irradiância de $800 W/m^2$, e temperatura de $47,9^{\circ}C$	63
Figura 52 – Curva de potência do arranjo FV com definição do MPP para irradiância de $800 W/m^2$, e temperatura de $47,9^{\circ}C$	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do módulo fotovoltaico.	27
Tabela 2 – Parâmetros obtidos por ajuste visual da curva.	28
Tabela 3 – Parâmetros do sistema.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CLR	Controle do Lado da Rede
FV	Fotovoltaico
MF	Margem de Fase
MG	Margem de Ganho
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (Ponto de Máxima Potência)
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PQ	Ponto Quântico
PROCEL	Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
STC	<i>Standart Test Conditions</i> (Condições Normais de Ensaio)
TDH	<i>Total Harmonic Distortion</i>
VSC	Voltage Source Convert

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização	16
1.2	Motivação e Justificativa	18
1.3	Objetivos	18
1.4	Organização do Trabalho	19
2	COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA	20
2.1	Módulos fotovoltaicos	20
2.2	Equacionamento do painel fotovoltaico	22
2.3	Obtenção de parâmetros	27
2.4	Rastreamento do ponto de máxima potência	29
3	MODELAGEM E PROJETO DE CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE ELÉTRICA	32
3.1	Modelagem do conversor trifásico CC - CA com filtro L conectado à rede elétrica	33
3.1.1	<i>Circuito de sincronismo trifásico (PLL)</i>	35
3.1.2	<i>Controle de corrente</i>	37
3.1.3	<i>Controle de tensão elétrica do barramento CC</i>	39
3.1.4	<i>Filtro RL de saída</i>	40
3.2	Projeto dos controladores do sistema	41
3.2.1	<i>Projeto do controlador de Corrente</i>	41
3.2.2	<i>Projeto do controlador do barramento CC</i>	44
3.2.3	<i>Projeto do circuito de sincronismo trifásico (PLL)</i>	46
4	RESULTADOS	47
4.1	Curvas características do sistema FV e parâmetros do sistema	47
4.2	Comportamento do sistema para o conversor do lado da rede elétrica com filtro L	48
4.2.1	<i>Circuito de sincronismo PLL</i>	49
4.2.2	<i>Comportamento do Sistema FV para o Controle de Corrente do CLR</i>	50
4.2.3	<i>Análise do fator de potência</i>	54

4.2.4	<i>Análise do sistema de controle de tensão do barramento CC</i>	56
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	65
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	66
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICES	69
	APÊNDICE A – Sistema de geração fotovoltaica	69
	ANEXOS	71
	ANEXO A – Datasheet Kyocera KD210GX-LPU	71

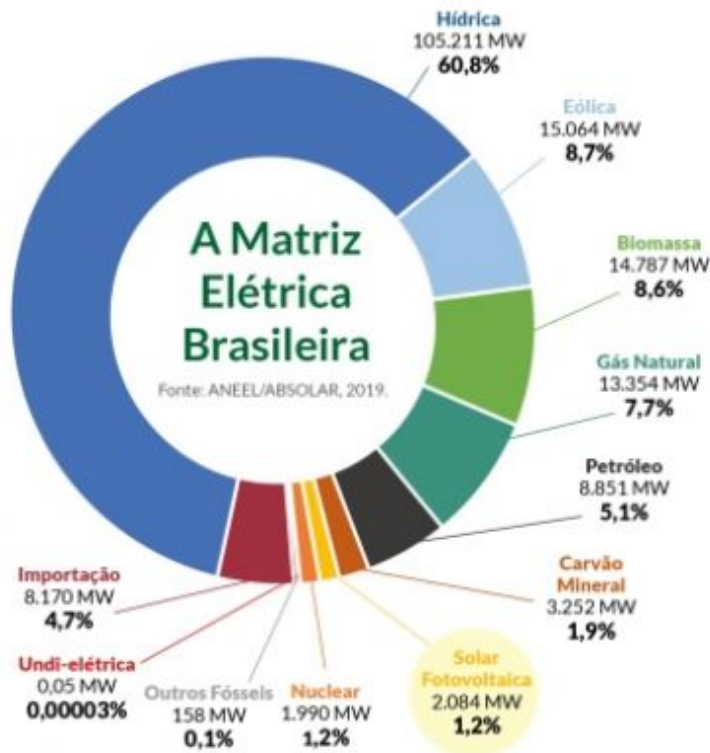
1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Na proporção que ocorrem grandes mudanças no mundo nas áreas tecnológicas, econômicas e energéticas, é natural que ocorra o crescimento na demanda de energia elétrica. Deste modo, buscar a diversificação da matriz energética é imprescindível. As energias renováveis, principalmente a energia solar, têm se destacado nesse contexto e passam por um momento histórico de ascensão no Brasil e no mundo.

Desde o início de 2019, o mercado de energia solar fotovoltaica apresenta uma trajetória animadora em que ultrapassa outras fontes de geração de energia, por exemplo, a energia nuclear. De acordo com o levantamento da Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR), a energia fotovoltaica (FV) representa, na matriz energética brasileira, mais de 2.000 MW de potência operacional como mostrado na Figura 1. A estimativa é que esta ultrapasse a marca de 3.000 MW ainda em 2019, atraindo mais investimentos privados para o país (ABSOLAR, 2019).

Figura 1 – Matriz energética brasileira.



Fonte: ABSOLAR (2019)

Não se trata apenas de fonte limpa e renovável, a energia solar Fotovoltaico (FV), torna-se cada vez mais competitiva e amplia a matriz energética do país, que tem como principal fonte de energia elétrica, as usinas hidráulicas e as termoelétricas fósseis.

Impulsionado pelas políticas de apoio, o mercado de energia FV global cresceu a uma taxa de 27% ao ano nos últimos cinco anos. A Figura 2 mostra os países que mais investiram em energia solar fotovoltaica e em 2018 o ranking mundial em potência instalada. Continuando nesse ritmo de implantação e investimento financeiro em instalação FV, a cada três anos o ritmo de crescimento seria duplicado e passaria de 200 GW em 2020 para 2100 GW em 2030, representando um crescimento que iria além de qualquer aplicação anterior, sendo mais de seis vezes a capacidade de todas as aplicações de 2015 (WANNER, 2019).

Figura 2 – Mercado fotovoltaico mundial

O Mercado Fotovoltaico no Mundo

O Brasil instalou 1,2 GW em 2018, totalizando 2,4 GW de capacidade instalada acumulada!



Quais países investiram mais em energia solar fotovoltaica em 2018?

	1ª China	45,0 GW
	2ª Índia	10,8 GW
	3ª USA	10,6 GW
	4ª Japão	6,5 GW
	5ª Austrália	3,8 GW
	6ª Alemanha	3,0 GW
	7ª México	2,7 GW
	8ª Coreia do Sul	2,0 GW
	9ª Turquia	1,6 GW
	10ª Holanda	1,3 GW

Quais países lideram o mundo em potência acumulada?

	1ª China	176,1 GW
	2ª EUA	62,2 GW
	3ª Japão	56,0 GW
	4ª Alemanha	45,4 GW
	5ª Índia	32,9 GW
	6ª Itália	20,1 GW
	7ª Reino Unido	13,0 GW
	8ª Austrália	11,3 GW
	9ª França	9,0 GW
	10ª Coreia do Sul	7,9 GW

Fonte: ABSOLAR (2019)

O crescimento do sistemas de conversão de energia solar está em ritmo acelerado em todo o mundo. A geração FV é intermitente, e só gera energia durante o dia. A vantagem em sistemas conectados à rede elétrica é devido a sua capacidade de compartilhamento de energia ativa e estratégia para utilização da rede elétrica nos momentos em que o sistema FV não está gerando energia elétrica.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regulamenta o segmento de geração distribuída, o Brasil ultrapassou a marca histórica de 1 GW em geração distribuída pelos seus próprios consumidores, sendo, em suma, produzido pelos sistemas de geração fotovoltaicos. Segundo ABSOLAR (2019), o forte crescimento dos últimos dois anos está relacionado aos módulos fotovoltaicos estarem com preços mais acessíveis, maiores tarifas de energia, linhas de financiamento e uma maior conscientização ambiental entre os consumidores.

1.2 Motivação e Justificativa

O sistema de geração solar FV apresenta várias vantagens como a de ampliar a capacidade de geração do sistema elétrico, contribuir para a manutenção da característica renovável da matriz energética, baixo custo de manutenção, proporciona alta confiabilidade, impulsiona o desenvolvimento tecnológico, cria empregos e move a economia nacional (VILLALVA, 2012).

Diante do exposto, fez-se necessário estudar o sistema FV conectado à rede elétrica, para compreender sua operação, sendo possível analisar seu desempenho em diferentes condições de temperatura e irradiância a fim de obter um melhor aproveitamento da energia disponível.

1.3 Objetivos

O principal objetivo é compreender a operação do sistema de geração FV, entregando potência à rede elétrica, analisando seu comportamento para diferentes cenários.

Como objetivos específicos propôs-se:

- estudar os modelos dos componentes (painel, conversor) de um sistema FV para geração de energia elétrica;
- projetar e implementar o projeto dos controladores a partir do método de resposta em frequência;
- estudar a técnica de controle do conversor eletrônico de potência;
- estudar e implementar a técnica de MPPT com algoritmo PeO;
- desenvolver a simulação do sistema FV no ambiente Matlab/Simulink;
- verificar o comportamento da operação do sistema FV conectado à rede elétrica com filtro L;
- avaliar e discutir os resultados obtidos.

1.4 Organização do Trabalho

O restante do trabalho está organizado em quatro capítulos.

No capítulo dois, é realizado um breve enquadramento da composição e do princípio de funcionamento das células FV, há ainda a representação do equacionamento do painel FV, obtenção dos parâmetros que o compõem, bem como a apresentação do método de extração de máxima potência do sistema FV através do algoritmo de MPPT.

No capítulo três é realizada a modelagem do Controle do Lado da Rede (CLR), que é um conversor eletrônico trifásico CC-CA conectado à rede elétrica através de um filtro indutivo, com o sistema de sincronismo do conversor com a rede elétrica a partir do *Phase Locked Loop* (PLL), bem como o projeto dos controladores de corrente e de tensão.

No capítulo quatro, é realizado os resultados obtidos na simulação computacional do sistema FV, utilizando as estratégias propostas para variações de irradiância e temperatura.

Finalmente, no capítulo cinco, é realizada as conclusões referentes aos resultados obtidos e as propostas para trabalhos futuros.

2 COMPONENTES DO SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

2.1 Módulos fotovoltaicos

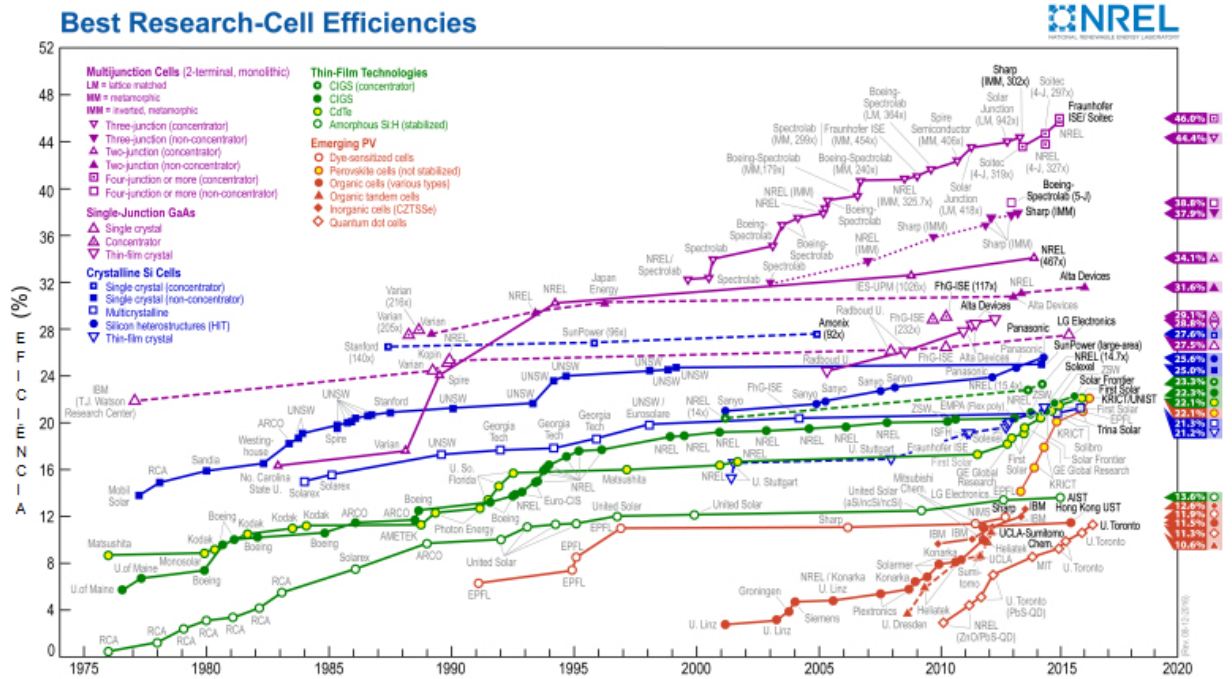
Os painéis ou módulos FV constituem-se da junção de pequenas células FV. Tais células são responsáveis por converterem luz solar em energia elétrica. As primeiras células FV foram fabricadas a partir da utilização de silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si) denominadas de células cristalinas. São os tipos de tecnologias mais populares, representando 85% do mercado devido os menores custos e tecnologia mais consolidada. As policristalinas têm eficiência média em torno de 14% e as monocristalinas uma eficiência média de 18% (CASARO; MARTINS, 2008).

Atualmente, diversos fabricantes de painéis FV estão atuando no mercado de energia elétrica. Esses painéis se diferem quanto à eficiência, custo e material utilizado. O Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética (PROCEL) apresenta a tabela atualizada com as marcas e fornecedores que atuam no Brasil, bem como sua eficiência energética na produção de energia nas condições laboratoriais.

Todos os dias, novas descobertas científicas demonstram maior eficiência na tecnologia FV. No cenário atual, as células de fotovoltaicas que incluem materiais orgânicos e a utilização de Ponto Quântico (PQ) exibem grande potencial e diversas vantagens sobre as tecnologias citadas. Dentre essas vantagens estão: o processamento de baixo custo, flexibilidade mecânica e baixo peso (ELY; SWART, 2014). Na Figura 3, os avanços registrados em laboratório para diversos tipos de tecnologia de células fotovoltaicas são apresentados.

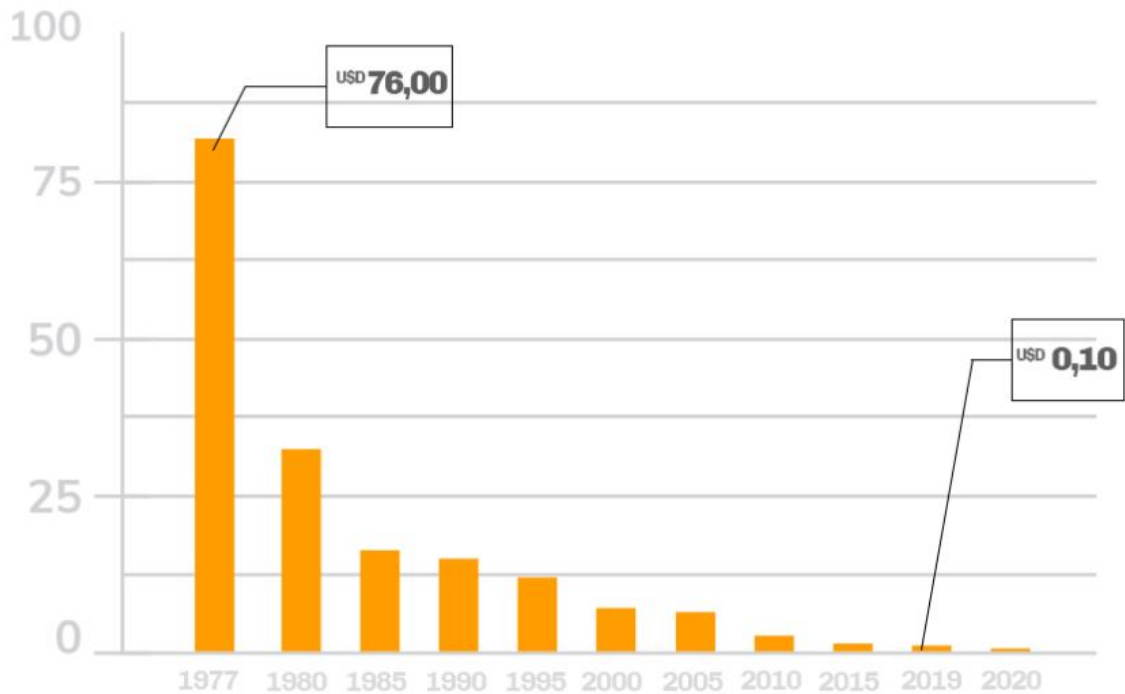
Diversos fatores resultam na queda do preço das células fotovoltaicas, como os avanços da tecnologia, incentivos governamentais, aumento de demanda e incentivo por conta do custo elevado da energia elétrica. A Figura 4 mostra o declínio no preço das células fotovoltaica nas últimas décadas.

Figura 3 – Eficiência das células fotovoltaica.



Fonte: NREL (2017).

Figura 4 – Declínio do preço da célula fotovoltaica.

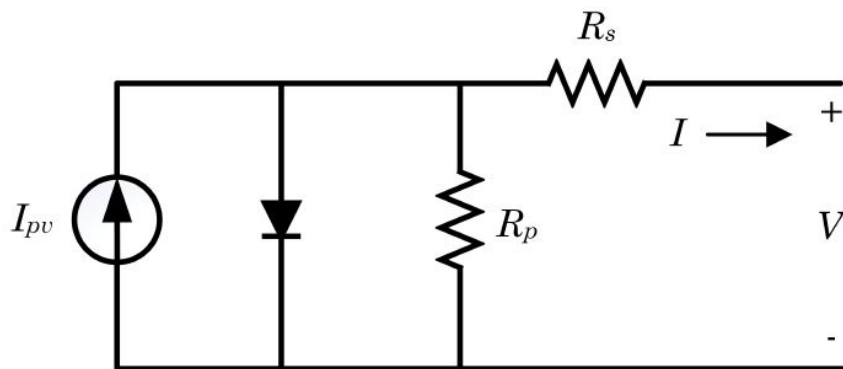


Fonte: Portal Solar (2019).

2.2 Equacionamento do painel fotovoltaico

O painel FV gera energia elétrica e a configuração desse sistema é constituída por um conjunto de células FV. Acrescente-se, ainda, que as células são conectadas em série ou em paralelo para obter a tensão de saída necessária. A Figura 5 mostra o modelo de diodo único da célula FV.

Figura 5 – Modelo de uma célula fotovoltaica.



Fonte: O autor.

O circuito equivalente é composto por uma fonte de corrente (I_{pv}) em paralelo com diodo, uma resistência paralelo, R_p , e uma resistência série, R_s . A equação básica que descreve matematicamente a característica da curva de potência $I \times V$ da célula de modelo ideal é dada por:

$$I = I_{pv,cell} - I_{o,cell} \left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

e

$$I_d = I_{o,cell} \left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

em que $I_{pv,cell}$ é a corrente gerada pela incidência da luz, I_d é a corrente do diodo Shockley, I_o é a corrente de saturação reversa ou corrente de fuga do diodo, q é a carga elementar do elétron, k a constante de Boltzmann, a é o fator de idealidade do diodo e T é a temperatura da junção $P - N$ dos semicondutores.

A equação (2.1) da célula FV não representa as características da curva $I \times V$ de um sistema FV real pois não leva em consideração as resistências R_s e R_p . As células conectadas em série fornecem maior tensão de saída e as células conectadas em paralelo aumentam a corrente.

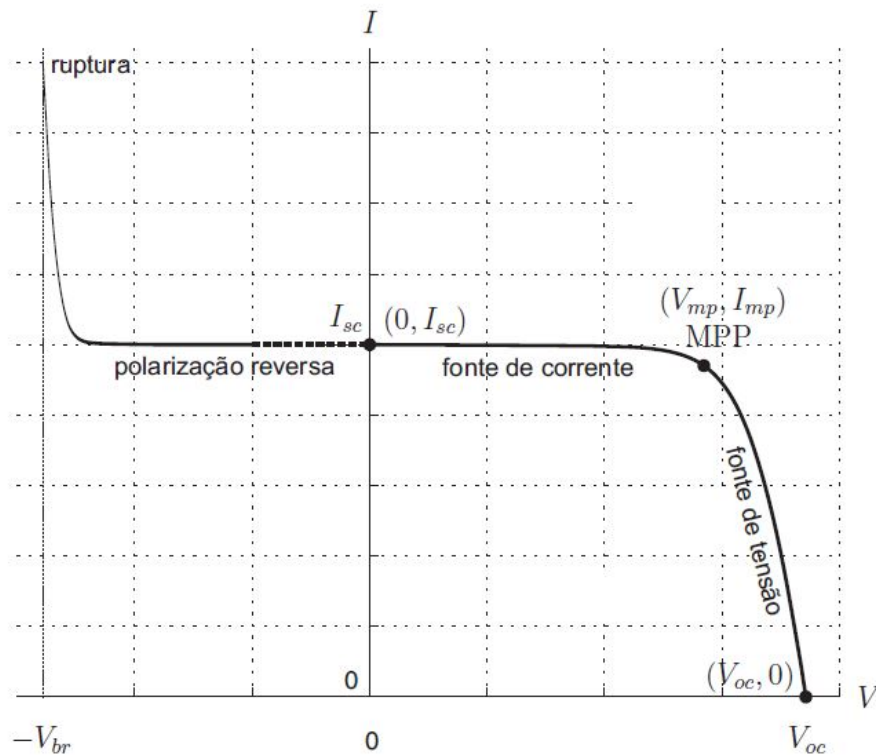
Para a célula FV prática, apresentada na Figura 5 é necessário a adição de alguns parâmetros na (2.1), e a equação modificada é dada por (2.3):

$$I = I_{pv} - I_o \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_t \cdot a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (2.3)$$

em que I_o é a corrente de saturação, V e I são a tensão e corrente dos terminais do painel, respectivamente, $V_t = \frac{N_s \cdot k \cdot T}{q}$ é a tensão térmica do painel, N_s é o número de células conectadas em série.

A Figura 6 apresenta a curva $I \times V$ traçada a partir da equação (2.3). Na curva observa-se três pontos em destaque: curto-circuito ($0, I_{sc}$), máxima potência (V_{mp}, I_{mp}) e circuito aberto ($V_{oc}, 0$) (VILLALVA; GAZOLI, 2009).

Figura 6 – Curva $V \times I$ característica de um dispositivo prático.



Fonte: Villalva e Gazoli (2009).

Um outro aspecto a ser mencionado é que os fabricantes dos arranjos FV fornecem curvas e tabelas com dados experimentais sobre suas características. Os *datasheets* apresentam alguns dados em *Standart Test Conditions* (Condições Normais de Ensaio) (STC) como: a tensão nominal de circuito aberto ($V_{oc,n}$), a corrente nominal de curto-circuito ($I_{sc,n}$), a tensão de máxima potência (V_{mp}), a corrente de máxima potência (I_{mp}), o coeficiente de tensão e

temperatura de circuito aberto (K_V), o coeficiente de corrente e temperatura (K_I) e a máxima potência de pico ($P_{max,e}$). Estas informações são apresentadas em STC com valores de irradiância de $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ e temperatura de 25°C .

Cabe salientar que, além dos efeitos das características construtivas do sistema FV, existem os fatores externos como a irradiação e temperatura que afetam diretamente a geração. A quantidade de luz incidente têm como consequência a corrente fotoelétrica I_{pv} gerada pelo dispositivo cujo valor é difícil de ser determinado. Em vista disso, a suposição $I_{pv} \approx I_{sc}$ é geralmente utilizada para modelagem dos dispositivos FV práticos, dessa forma se despreza as influências das resistências série e paralelo. A equação 2.4 representa a corrente fotoelétrica de uma célula FV (SUMATHI *et al.*, 2015):

$$I_{pv} = (I_{pv,n} + K_I \cdot \Delta T) \left(\frac{G}{G_n} \right) \quad (2.4)$$

em que $I_{pv,n}$ é a corrente fotoelétrica nas condições padrões de teste, $\Delta T = T - T_n$ (sendo a temperatura de operação T e temperatura nominal T_n), G e G_n são a irradiação solar na superfície do módulo FV e a irradiação nominal, respectivamente.

A equação (2.5) expressa a corrente de saturação do diodo I_o que é dependente da temperatura e os efeitos causados no ajuste da tensão de circuito aberto do sistema de acordo com os coeficientes K_I e K_V , que relacionam as variações de tensão e corrente, respectivamente (VILLALVA; GAZOLI, 2009).

$$I_o = \frac{I_{sc,n} + K_I \cdot \Delta T}{\exp\left(\frac{V_{oc,n} + K_V \cdot \Delta T}{aV_t}\right) - 1} \quad (2.5)$$

Ainda em relação a essa situação, vale mencionar que a R_s afeta principalmente a inclinação da curva $I \times V$ nos níveis de tensão de circuito aberto, ou seja, dependendo da qualidade da célula FV, quanto pior for a qualidade, menor será a inclinação da curva afetada pela queda de tensão em R_s . Em virtude disso, sua definição aproximada é mostrada na equação (2.6). Por outro lado, a resistência paralela R_p afeta a inclinação da curva nos níveis de curto circuito, pois quanto menor for o valor de R_p , maior será a corrente consumida por ela, constatando uma inclinação da curva para baixos valores de tensão. Esse fator tem sua definição aproximada na

equação (2.7) (FEMIA. *et al.*, 2013).

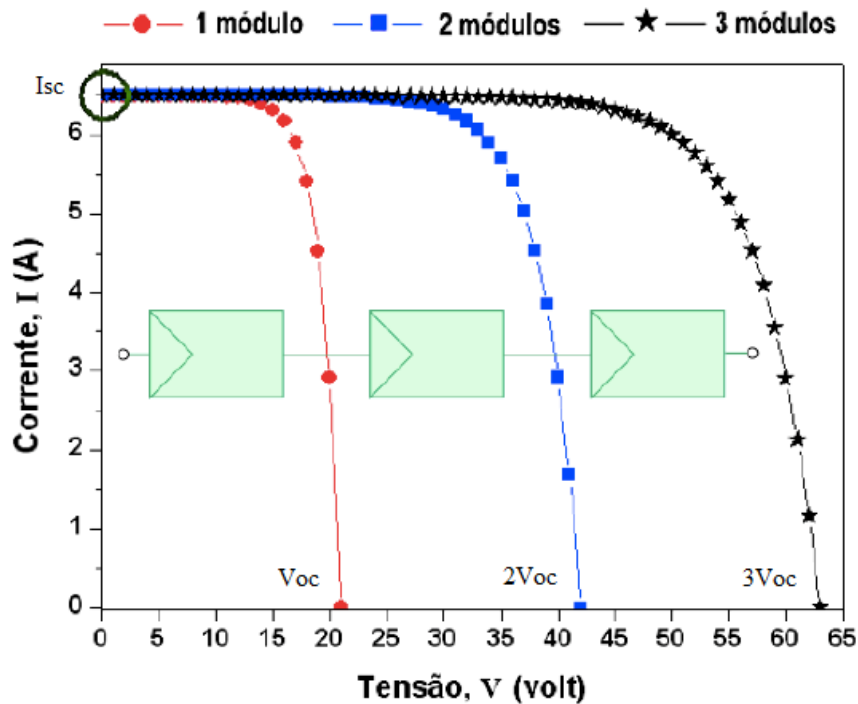
$$R_s \approx -\frac{dV}{dI}\bigg|_{V=V_{oc}} \quad (2.6)$$

$$R_p \approx -\frac{dV}{dI}\bigg|_{I=I_{sc}} \quad (2.7)$$

Ainda no que diz respeito as características do sistema, o arranjo FV é representado pela associação de módulos em série ou em paralelo, com o objetivo de produzir a quantidade de energia elétrica desejada.

Quando os módulos são conectados em série, a tensão terminal da associação corresponde a soma das tensões fornecidas por cada módulo e o fluxo de corrente permanece o mesmo. A Figura 7 ilustra uma associação de três módulos e apresenta as curvas $I \times V$. Nessas condições, a tensão de circuito aberto do sistema é três vezes a tensão de circuito aberto (V_{oc}) do módulo e a corrente de curto-circuito se mantém igual a corrente de um módulo único (CARNEIRO, 2010).

Figura 7 – Representação das curvas $I \times V$ relativas à associação de três módulos em série.

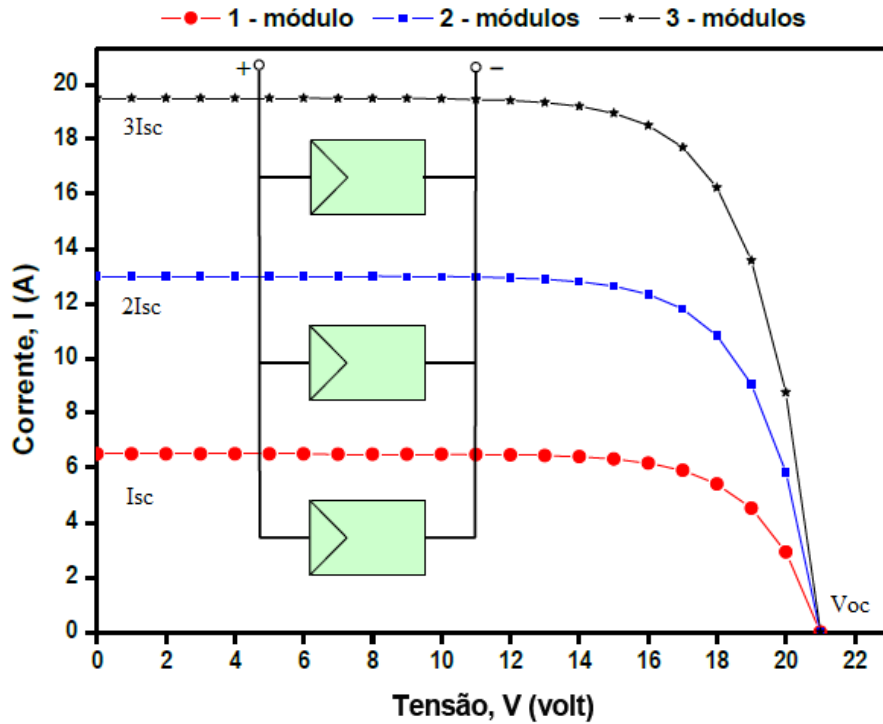


Fonte: Carneiro (2010).

Outra configuração é a associação em paralelo dos módulos. Nesse caso a tensão nos

terminais do sistema é a mesma fornecida por um único módulo, já a corrente de curto-circuito será a soma das correntes dos módulos. A Figura 8 ilustra a associação de três módulos em paralelo e sua curva característica $I \times V$ obtida a partir dessa associação.

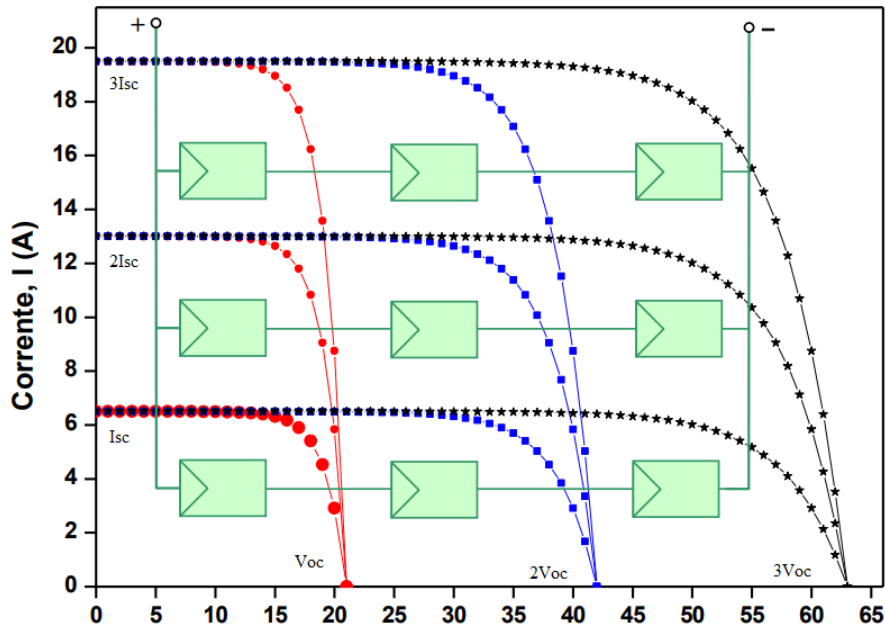
Figura 8 – Representação das curvas $I \times V$ relativas à associação de três módulos em paralelo.



Fonte: Carneiro (2010).

Além disso, os módulos podem ser compostos por associações em série e em paralelo, conhecida como associação mista, fornecendo sua tensão terminal definida pela soma das tensões dos módulos em série assim como a corrente total é dada pela soma das corrente das associações em paralelo. A Figura 9 representa a curva $I \times V$ de uma associação mista de três módulos.

Figura 9 – Representação das curvas $I \times V$ relativas à associação mista de três módulos.



Fonte: Carneiro (2010).

2.3 Obtenção de parâmetros

O dispositivo FV possui diversos parâmetros que compõem o modelo matemático. Como mencionado na seção 2.2, alguns parâmetros elétricos de irradiância e temperatura do módulo são fornecidos pelo fabricante. A Tabela 1 apresenta os dados do módulo FV da Kyocera KD 210 GX – LPU. Para o modelo de diodo único adotado é necessário obter algumas incógnitas tais como: R_s , R_p , I_{pv} , I_o e a para modelagem matemática de um dispositivo prático.

Tabela 1 – Parâmetros do módulo fotovoltaico.

Potência máxima (P_{max})	210 W (+5 W/ -0W)
Tensão de máxima potência (V_{mpp})	26,6 V
Corrente de máxima potência (I_{mpp})	7,90 A
Tensão de circuito aberto (V_{oc})	33,2 V
Corrente de curto circuito (I_{pv})	8,58 A
Tensão máxima do sistema	600 V
Coefficiente de temperatura da (V_{oc})	-0,12 V/°C
Coefficiente de temperatura da (I_{pv})	0,0055 A/°C
*STC - Irradiância 1000 W/m^2 , temperatura 25°C	

Fonte: Kyocera KD 210 GX – LPU.

Baseado na Tabela 1 e utilizando as Equações (2.3), (2.4) e (2.5), determina-se a corrente fotovoltaica (I_{pv}). Alguns autores propõem métodos de ajustes empregando modelos simplificados que ignoram as resistências, utilizando um algoritmo iterativo e outros métodos.

Esse trabalho se baseia no ajuste visual da curva $I \times V$ para obter os parâmetros de R_s , R_p e a constante de idealidade a .

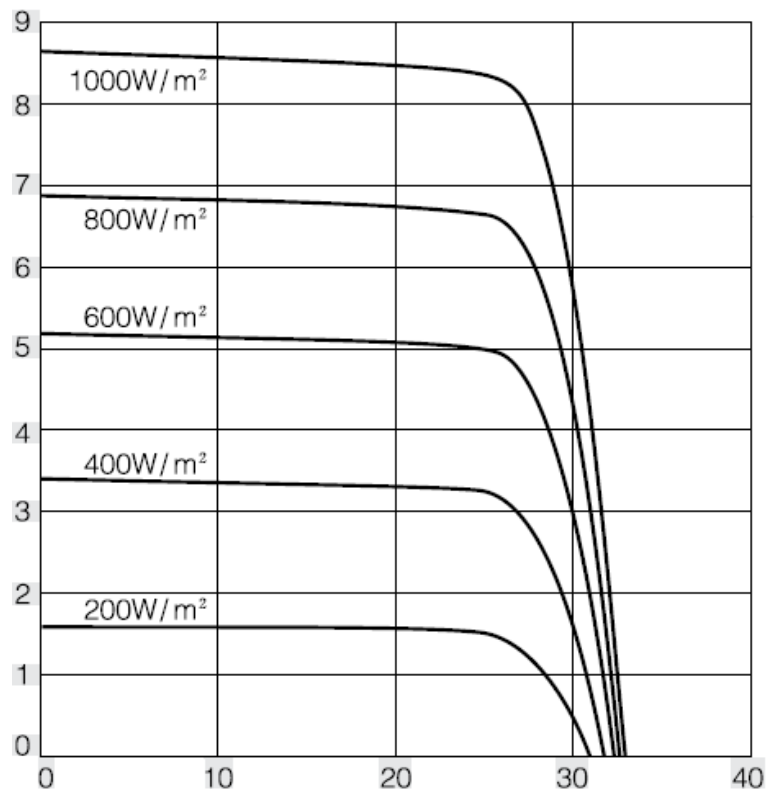
Após sucessivos ajustes, obtém-se os valores de R_s , R_p e a , apresentados na Tabela 2. A Figura 10, representa as curvas do fabricante com variação de irradiância e temperatura constante de 25°C. A Figura 11, representa as curvas obtidas na simulação para vários valores de irradiação e temperatura constante de 25°C com a utilização dos parâmetros obtidos, e quando comparado as curvas da Figuras 10, mostram-se semelhantes.

Tabela 2 – Parâmetros obtidos por ajuste visual da curva.

Resistência série (R_s)	0.138 Ω
Resistência paralelo (R_p)	3000 Ω
Coefficiente de idealidade (a)	1.54

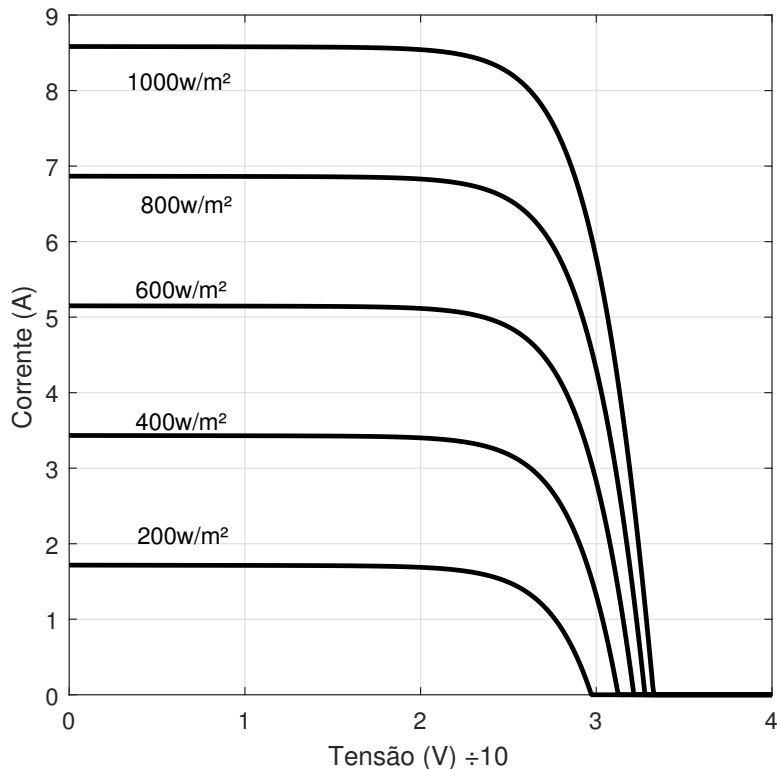
Fonte: O autor.

Figura 10 – Representação das curvas fornecidas pelo fabricante do módulo.



Fonte: Adaptado de Kyocera KD 210 GX – LPU.

Figura 11 – Representação das curvas obtidas a partir da simulação do módulo.



Fonte: O autor.

2.4 Rastreamento do ponto de máxima potência

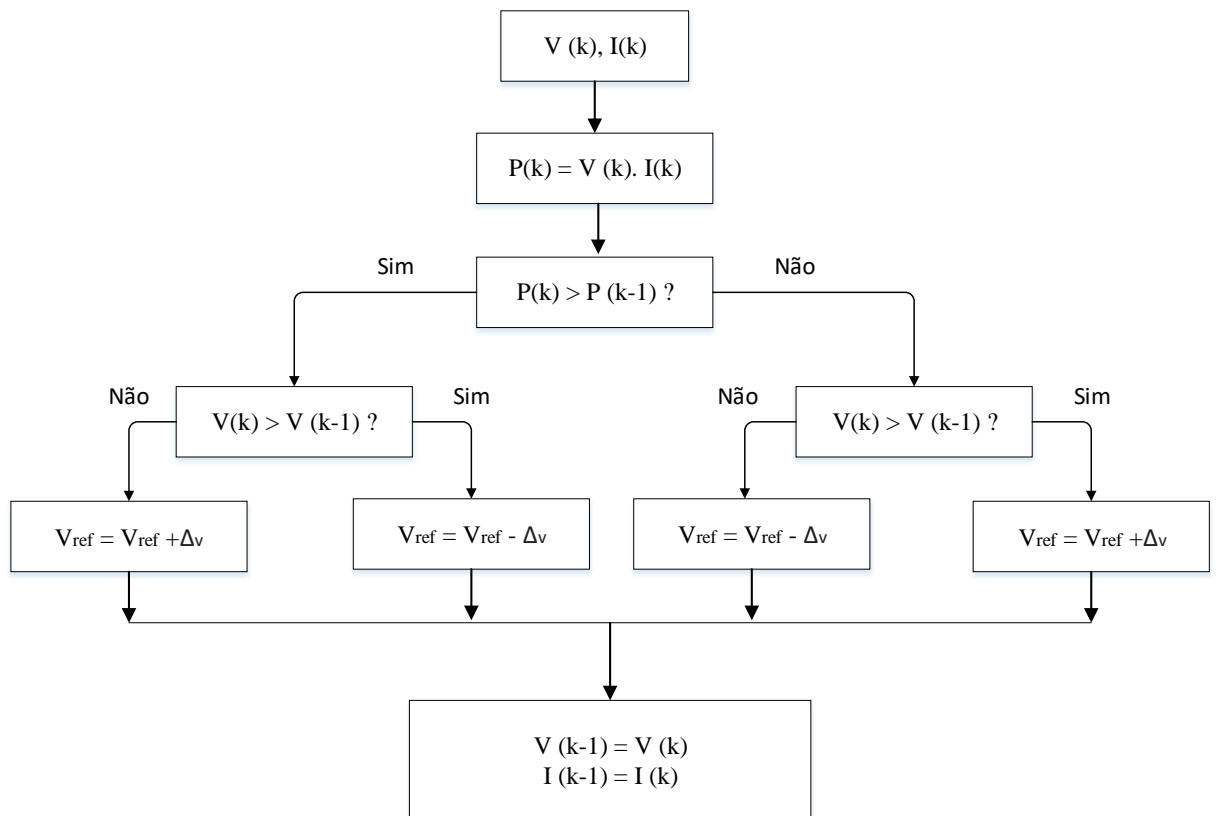
A potência gerada pelo painel FV varia em função das condições climáticas que ao longo do dia apresentam variação de irradiação solar incidente e de temperatura, modificando a curva de potência $P \times V$ do sistema como apresentado pela seção 2.2. É natural que se deseje a extração da máxima potência instantânea dos painéis portanto, a utilização de uma função de rastreamento do ponto de máxima potência, frequentemente chamada de *Maximum Power Point Tracking* (MPPT), ajusta o ponto de operação do sistema às diversas condições atmosféricas obtendo uma maximização da geração.

Vários métodos podem ser aplicados para se obter o MPP *Maximum Power Point* (Ponto de Máxima Potência) (MPP). Esses métodos diferem em aspectos, como a necessidade de utilização de sensores, custo, complexidade, eficácia, entre outros. A dificuldade encontrada pelos métodos de MPPT é a presença de múltiplos pontos de máxima potência, isto é, quando o sistema está sujeito às condições de operação não uniformes, devido as diferenças físicas dos módulos, falhas de painéis, presença de sombreamento. Nestas situações, os algoritmos de MPPT convencionais tendem a não serem eficientes. Em razão desta realidade, será apresentado

apenas situações de sistemas FV com um único pico de potência na curva $P \times V$.

A Figura 12 ilustra o algoritmo perturba e observa (PeO) que é considerado um dos métodos de MPPT mais simples e popular. Esse tem o princípio de funcionamento caracterizado pela injeção de uma pequena perturbação na tensão e na corrente do sistema FV e se observa a potência resultante a fim de buscar o ponto de MPP. Ou seja, se a potência aumentar, a aplicação da perturbação é no mesmo sentido para o próximo passo do algoritmo. Se a potência diminuir, o próximo passo do algoritmo perturba o sistema no sentido oposto (VILLALVA; GAZOLI, 2009). A desvantagem dessa técnica é a presença de oscilação de regime permanente e na resposta dinâmica do sistema.

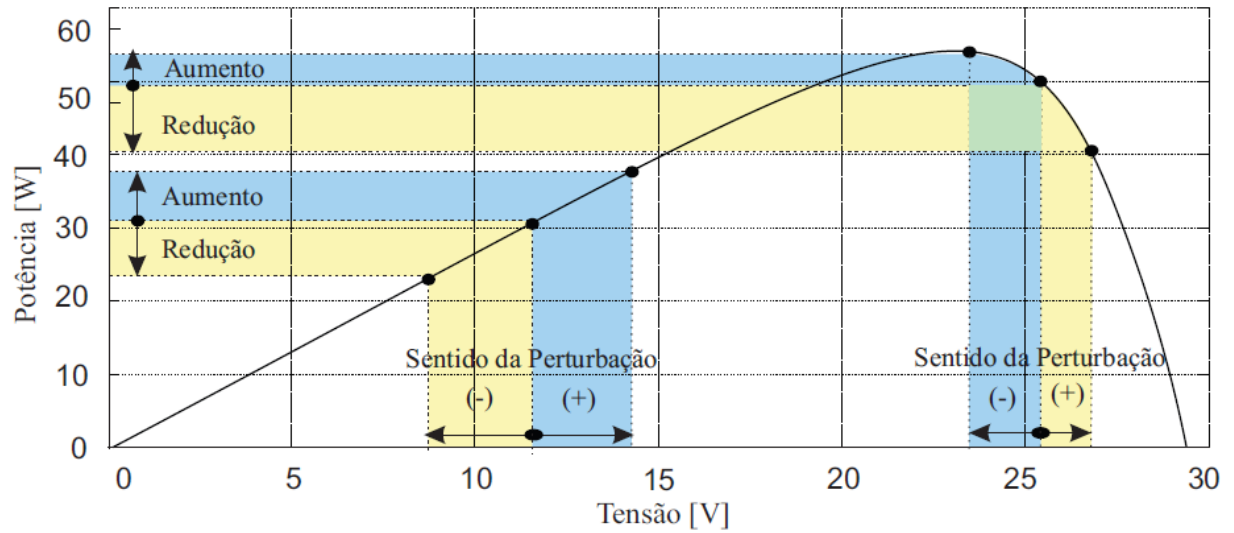
Figura 12 – Fluxograma do algoritmo de perturba e observa (PeO).



Fonte: O autor.

A Figura 13, ilustra a resposta do sistema com a variação de potência a partir da perturbação na tensão para dois pontos de operação distintos.

Figura 13 – Comportamento do sistema com o método PeO.



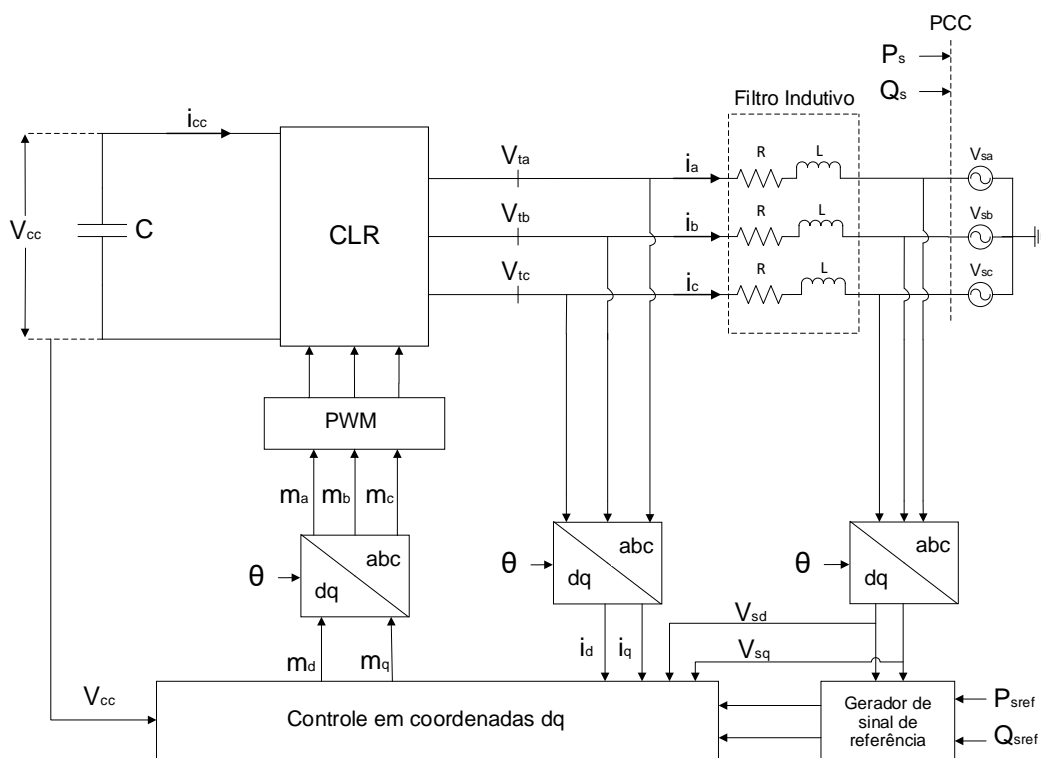
Fonte: Barreto (2014).

3 MODELAGEM E PROJETO DE CONTROLE DO CONVERSOR DO LADO DA REDE ELÉTRICA

Este capítulo aborda as etapas da modelagem do conversor do CLR que pode ser denominado também de Voltage Source Convert (VSC) e que se comporta como uma fonte de corrente, injetando corrente na rede elétrica com frequência imposta pela rede elétrica, sendo necessária para implementação do sistema FV. Apresentado na Figura 14, o conversor têm diversas funções e dentre elas estão a de realizar o controle do fluxo de potência ativa entregue à rede elétrica (MARTINS, 2017).

Inicialmente, para facilitar a compreensão, dividiu-se o texto em duas seções: na seção 3.1 é abordada a modelagem do conversor conectado à rede elétrica e na seção 3.2, o projeto dos controladores do sistema.

Figura 14 – Diagrama esquemático do controle de potência do CLR.

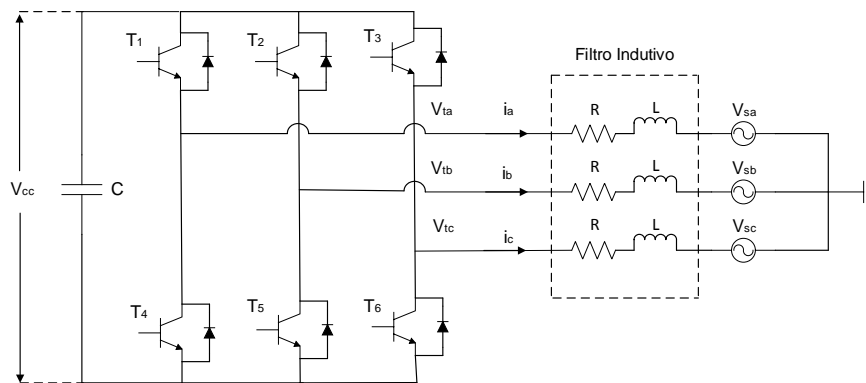


Fonte: O autor.

3.1 Modelagem do conversor trifásico CC - CA com filtro L conectado à rede elétrica

O conversor eletrônico trifásico, apresentado na Figura 15, é formado por um barramento CC, que é responsável por absorver ou filtrar o elevado *ripple* de tensão do barramento CC e com um filtro indutivo, atuando como um passa-baixa para atenuar os harmônicos na saída, fazendo à conexão do conversor com a rede elétrica.

Figura 15 – Conversor eletrônico CC-CA trifásico conectado à rede por meio de filtro L.



Fonte: O autor.

As tensões da rede elétrica são representadas por V_{sa} , V_{sb} e V_{sc} e cada fase do conversor é conectada ao sistema por uma impedância em série, RL , que representa o filtro indutivo, sendo L a indutância do filtro e R a sua resistência elétrica. V_{ta} , V_{tb} e V_{tc} são as tensões nos terminais do conversor e V_{cc} é a tensão nos terminais do capacitor.

Com base na Figura 15, e aplicando a segunda Lei de Kirchhoff, as tensões da rede trifásica são dadas por:

$$V_{ta} = R \cdot I_a + L \frac{d}{dt} \cdot I_a + V_{sa} \quad (3.1)$$

$$V_{tb} = R \cdot I_b + L \frac{d}{dt} \cdot I_b + V_{sb} \quad (3.2)$$

$$V_{tc} = R \cdot I_c + L \frac{d}{dt} \cdot I_c + V_{sc} \quad (3.3)$$

As equações (3.1), (3.2) e (3.3) são definidas no sistema trifásico abc . O modelo matemático do sistema elétrico abc pode ser representado em coordenadas $dq0$, que se baseia na representação do sistema com duas variáveis em quadratura, assumindo formas de ondas contínuas no estado estacionário. Este, por sua vez, torna o sistema menos complexo por possibilitar o controle de apenas duas variáveis contínuas ao invés de três e facilitando o projeto de controle, a partir da utilização de compensadores com estruturas mais simples e de menor ordem (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

As matrizes de transformadas diretas e inversas de $abc \rightarrow dq0$ e $dq0 \rightarrow abc$ são definidas, segundo (YAZDANI; IRAVANI, 2010) pelas equações (3.4) e (3.5).

$$T_{abc \rightarrow dq} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$T_{dq \rightarrow abc} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

em que ω é a frequência angular da rede elétrica, obtido através da equação (3.6), e θ é o ângulo entre o eixo de referência do sistema de coordenadas $dq0$ e o sistema de coordenadas abc . Têm-se (3.6):

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega(t) \quad (3.6)$$

Aplicando a transformação das coordenadas $abc \rightarrow dq0$ nas equações (3.1), (3.2) e (3.3) e substituindo adequadamente (3.6), a dinâmica do sistema passa a ser representada em coordenadas $dq0$ pela equação simplificada (3.7).

$$V_{tdq} = R \cdot I_{dq} + L \frac{d}{dt} \cdot I_{dq} - jL\omega I_{dq} + V_{sdq} \quad (3.7)$$

A equação (3.7) é desmembrada em duas parcelas de acordo com a expressão (3.8).

$$V_{tdq} = V_{td} + jV_{tq} \quad (3.8)$$

Em referência ao eixo direto e em quadratura, modelou a equação (3.8) e obtêm-se em coordenadas $dq0$ a equação (3.9):

$$L \frac{d}{dt} \cdot I_d = V_{td} - R \cdot I_d + L\omega I_q - V_{sd} \quad (3.9)$$

$$L \frac{d}{dt} \cdot I_q = V_{tq} - R \cdot I_q - L\omega I_d - V_{sq} \quad (3.10)$$

3.1.1 Circuito de sincronismo trifásico (PLL)

Para realizar a conexão entre o sistema de geração fotovoltaico com a rede elétrica é preciso que ocorra o sincronismo entre as tensões da rede elétrica e as tensões geradas pelo inversor. Esse sincronismo é feito pelo bloco PLL que gera, a partir de um sinal de entrada, um sinal de saída com fase e frequência em sincronia com o sinal amostrado que é utilizado para realizar a transformação do sistema de coordenadas (GUAN-CHYUN; JAMES, 1996).

Após a aplicação da transformação de $abc \rightarrow dq$ as tensões da rede elétrica, são dadas pelas equações (3.11) e (3.12), descritas em eixo direto e no eixo de quadratura da rede elétrica:

$$V_{sd} = V_s \cos(\omega_0 t + \theta_0 - \theta), \quad (3.11)$$

$$V_{sq} = V_s \sin(\omega_0 t + \theta_0 - \theta); \quad (3.12)$$

em que V_s é a tensão de pico de linha-neutro e θ_0 é o ângulo de fase inicial fonte.

Para garantir que $\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0$, faz-se $V_{sq} = 0$ por meio da equação (3.12). Baseado na lei de controle de realimentação expressa pela equação (3.13), utiliza-se um mecanismo para regular o valor de V_{sq} . O diagrama de blocos do controle do PLL é mostrado na Figura 16 (MARTINS, 2017).

$$\omega(t) = H(s) \cdot V_{sq}(t) \quad (3.13)$$

em que $H(s)$ é a relação entre a entrada e a saída do sistema e s é o operador de derivação em função do tempo. A partir da substituição e manipulação da equação (3.12) em (3.13) e por conseguinte (3.13) em (3.6), tem-se a representação de um sistema dinâmico não linear:

$$\frac{d\theta}{dt} = H(s) V_s \text{sen}(\omega_0 t + \theta_0 - \theta) \quad (3.14)$$

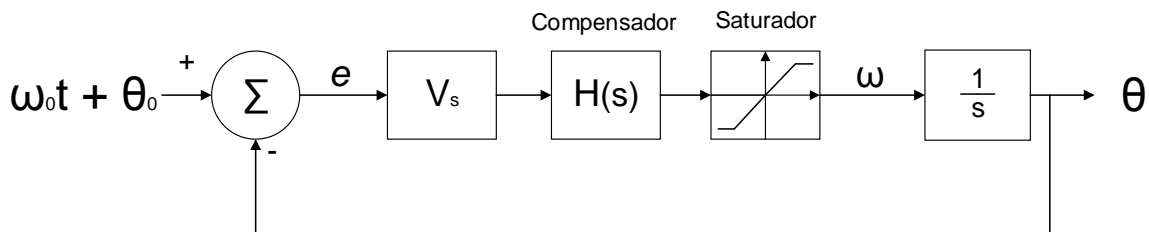
A equação (3.14) é o PLL, possui características não lineares devido a presença do termo $\text{sen}(\omega_0 t + \theta_0 - \theta)$, não atende ao princípio de superposição e seu desempenho torna-se insatisfatório em determinadas condições de variação de $\omega(t)$. Desse modo, a lei de controle pode ser manipulada e reescrita como:

$$\omega(t) = H(s) V_{sq}(t), \text{ em que } \omega(0) = \omega_0 \text{ e } \omega_{min} \leq \omega \leq \omega_{max}. \quad (3.15)$$

Considerando a função do PLL regular θ para que seja $\omega_0 t + \theta_0$, o termo $\omega_0 t + \theta_0 - \theta$ aproxima-se de zero e pode-se considerar que $\text{sen}(\omega_0 t + \theta_0 - \theta) \approx \omega_0 t + \theta_0 - \theta$. Por conseguinte, a equação (3.15) é simplificada pela equação (3.16) que descreve o sistema de controle de realimentação clássico com entrada de referência $(\omega_0 t + \theta_0)$, $V_s H(s)$ a função transferência do compensador e θ a saída, sendo ilustrada no diagrama de blocos da Figura 16 (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

$$\frac{d\theta}{dt} = V_s H(s)(\omega_0 t + \theta_0 - \theta) \quad (3.16)$$

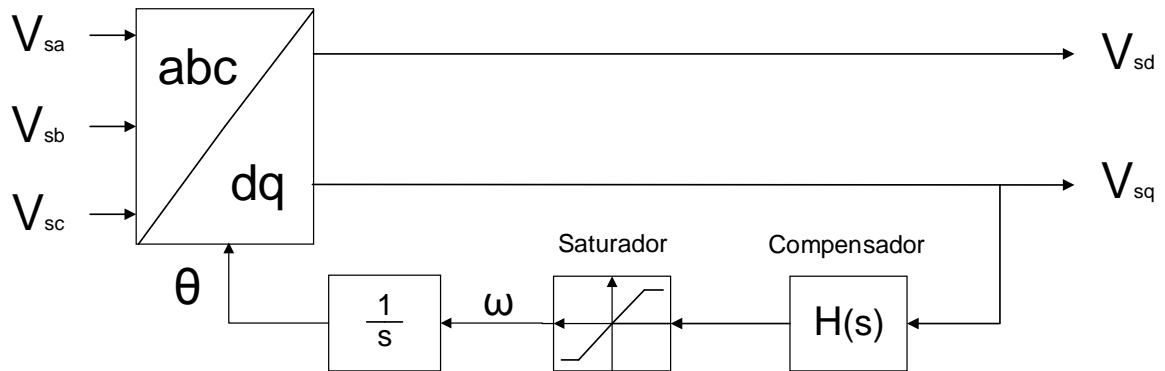
Figura 16 – Diagrama de blocos de controle do PLL.



Fonte: Adaptado de YAZDANI e IRAVANI (2010).

O esquemático do PLL apresentado na Figura 17 ilustra a transformação das tensões V_{sa} , V_{sb} e V_{sc} em V_{sq} e V_{sd} , e representa o processo de ajuste de velocidade de rotação (ω) em coordenadas dq , ajustando o valor de V_{sq} para zero e assegurando que $\theta(t) = \omega_0 t + \theta_0$ e $V_{sd} = V_s$.

Figura 17 – Diagrama esquemático do PLL.



Fonte: Adaptado de YAZDANI e IRAVANI (2010).

3.1.2 Controle de corrente

O controle de corrente do conversor eletrônico conectado à rede elétrica influencia diretamente nas potências ativa e reativa, entregues ou absorvidas pelo sistema CA. Essas potências são descritas conforme as equações (3.17) e (3.18):

$$P_s = \frac{3}{2} [V_{sd} i_d + V_{sq} i_q], \quad (3.17)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} [-V_{sd} i_q + V_{sq} i_d]. \quad (3.18)$$

Sabendo que a tensão de eixo em quadratura é igual a zero quando o PLL se estabiliza, e tomando o valor de tensão de $V_{sq} = 0$, as equações (3.17) e (3.18) podem ser reescritas como (3.19) e (3.20).

$$P_s = \frac{3}{2} (V_{sd} i_d), \quad (3.19)$$

$$Q_s = \frac{3}{2} (-V_{sd} i_q), \quad (3.20)$$

desta maneira, isolando as corrente i_d e i_q em (3.19) e (3.20), tem-se:

$$i_d = \frac{2}{3 V_{sd}} P_s, \quad (3.21)$$

$$i_q = -\frac{2}{3 V_{sd}} Q_s. \quad (3.22)$$

Com o controle de corrente fornecendo $i_{dref} \approx i_d$ e $i_{qref} \approx i_q$, obtêm-se $P_{sref} \approx P_s$ e $Q_{sref} \approx Q_s$, visto que as potências P_{sref} e Q_{sref} podem ser controladas pelas correntes de referência. Portanto, obtêm-se o controle de modo independente de P_s e Q_s (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

O controle de corrente do conversor eletrônico em coordenadas dq é realizado em função das equações (3.9) e (3.10), nas quais as tensões nos terminais V_{td} e V_{tq} dependem da tensão do barramento CC (V_{cc}) e dos índices de modulação m_d e m_q , de modo que:

$$V_{td} = \frac{V_{cc}}{2} m_d, \quad (3.23)$$

$$V_{tq} = \frac{V_{cc}}{2} m_q \quad (3.24)$$

em que m_d e m_q apresentam as componentes de desacoplamento das correntes elétricas e anulam o efeito de distúrbios. A definição destes índices de modulação são apresentadas em (3.25) e (3.26).

$$m_d = \frac{2}{V_{cc}} (u_d - L\omega i_q + V_{sd}), \quad (3.25)$$

$$m_q = \frac{2}{V_{cc}} (u_q + L\omega i_d + V_{sq}), \quad (3.26)$$

em que u_d e u_q são as tensões a serem sintetizada pelo VSC, e ω é a frequência da rede elétrica em radianos por segundo (MOREIRA, 2017).

Substituindo e manipulando as equações (3.25) e (3.26) em (3.23) e (3.24), e substituindo V_{td} e V_{tq} em (3.9) e (3.10), respectivamente, obtêm-se:

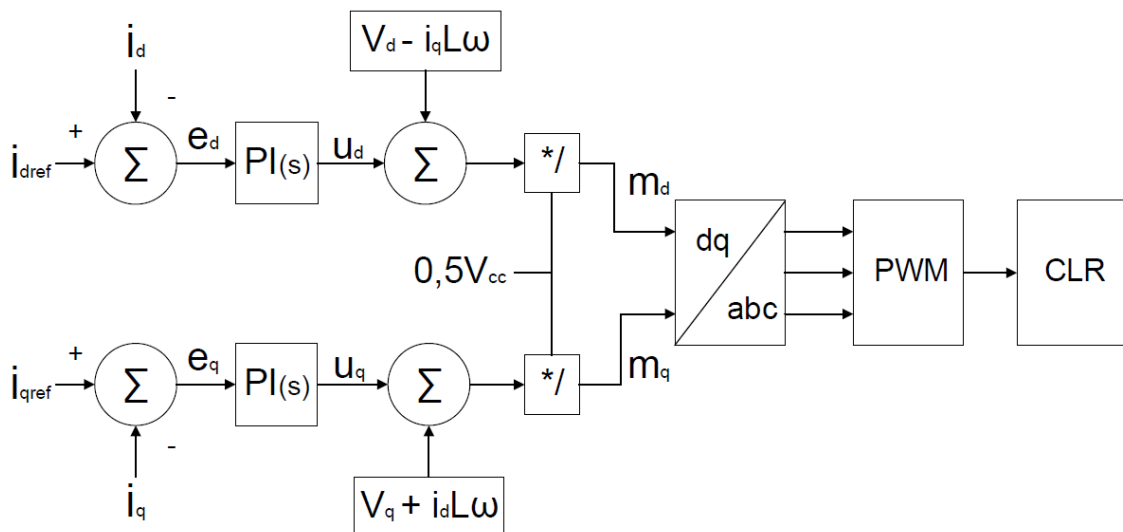
$$L \frac{d}{dt} I_d = -R I_d + u_d. \quad (3.27)$$

$$L \frac{d}{dt} I_q = -R I_q + u_q \quad (3.28)$$

As equações (3.27) e (3.28) representam sistemas lineares desacoplados e de primeira ordem, em que as correntes i_d e i_q podem ser controladas pelas entradas u_d e u_q . Os controladores do eixo direto e do eixo em quadratura fornecem, respectivamente, u_d e u_q , que contribuem para os índices de modulação m_d e m_q , respectivamente.

Após expressar a modelagem do controle de corrente do lado da rede, é possível desenvolver o modelo de diagrama de blocos, conforme ilustrado na Figura 18.

Figura 18 – Sistema de controle de corrente do conversor do lado da rede.



Fonte: O autor.

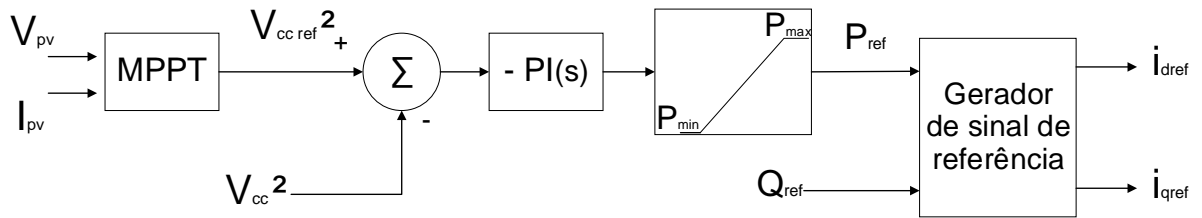
3.1.3 Controle de tensão elétrica do barramento CC

Quando se aplica o MPPT no sistema, obtém-se como resposta de saída, a tensão de referência nos terminais da associação dos painéis. A malha de controle do barramento CC, que tem como referência a tensão obtida pelo algoritmo MPPT, é projetada com objetivo principal de controlar a tensão do barramento CC a partir do fluxo de potência entre a rede e o CLR.

Para regular a tensão do barramento CC é empregado o mecanismo de realimentação que compara o quadrado da tensão medida nos terminais do barramento CC (V_{cc}) com o quadrado da tensão de saída do MPPT (V_{ccref}). Essa comparação gera um sinal de erro, que é processado por um PI (suficiente por tratar de uma grandeza contínua) tendo como saída a potência ativa (P_{sref}), passa por um gerador de sinais de referência fornecendo as referências de eixo em quadratura (I_d) e eixo direto (I_q), como mostrada no diagrama de blocos da Figura 19 (MARTINS, 2017).

A potência reativa do sistema é controlada de maneira independente, e para um fator

Figura 19 – Diagrama de blocos da malha de controle de tensão do barramento CC.



Fonte: O autor.

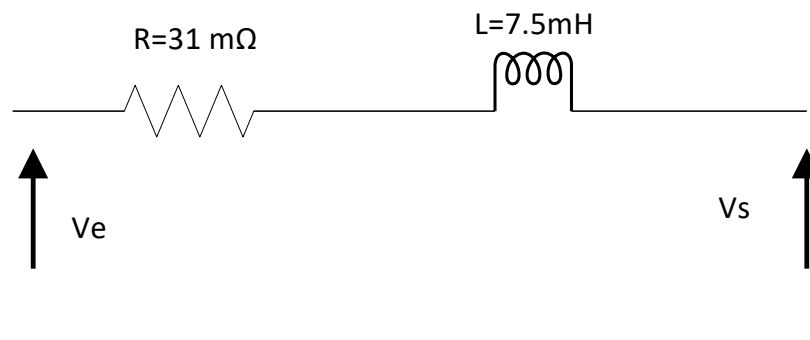
de potência unitário, foi regulado em zero a corrente para esse projeto. O objetivo desse é realizar a máxima transferência de potência do lado CC com o lado CA do sistema.

É necessário frisar que o conversor pode operar em dois modos: como retificador e como inversor. Quando a tensão do barramento CC estiver inferior, o conversor do lado da rede atua como retificador elevando a tensão com auxílio da rede elétrica. Quando o sistema de geração fotovoltaico estiver gerando potência, a tensão do barramento tende a se elevar e o conversor atua como inversor (SUEBKINORN; NEAMMANEE, 2011).

3.1.4 Filtro RL de saída

O filtro de característica indutiva presente na saída do conversor tem o comportamento de um filtro passa-baixa com valores de indutância $L = 7,5 \text{ mH}$ e sua resistência elétrica $R = 31 \text{ m}\Omega$, que representa as perdas. O modelo do filtro é representado na Figura 20.

Figura 20 – Filtro RL na saída do conversor.



Fonte: O autor.

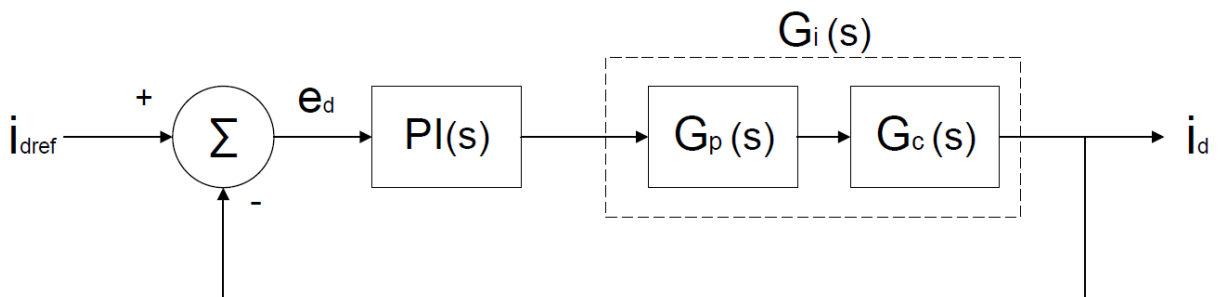
3.2 Projeto dos controladores do sistema

Nesta seção são apresentados os projetos dos controladores do circuito de sincronismo, corrente e tensão, considerando-se a modelagem desenvolvida na seção 3.1.

3.2.1 Projeto do controlador de Corrente

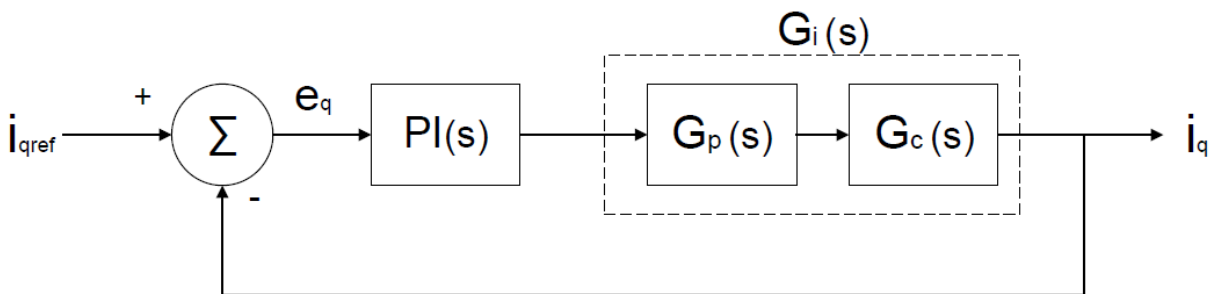
Os modelos de diagramas de blocos das malhas de controle de corrente de eixo direto e eixo em quadratura, apresentado por Moreira (2017), são mostrados nas Figuras 21 e 22, respectivamente.

Figura 21 – Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente de eixo direto.



Fonte: Adaptada de Moreira (2017).

Figura 22 – Diagrama de blocos simplificado do controlador de corrente de eixo em quadratura.



Fonte: Adaptada de Moreira (2017).

Nota-se que o sistema é constituído por três blocos: o bloco $PI(s)$ que é o controlador PI, o bloco $G_c(s)$ que é a planta do conversor eletrônico fonte de tensão trifásica com filtro L, o bloco $G_p(s)$ representando a dinâmica do *Pulse Width Modulation* (PWM) do CLR e $G_i(s)$ representando os blocos $G_c(s)$ e $G_p(s)$, em cascata.

Sabe-se que as funções transferência da dinâmica do CLR e do PWM são determinadas por $G_c(s)$ e $G_p(s)$, respectivamente, e são representadas pelas equações (3.29) e (3.30).

$$G_c(s) = \frac{1}{Ls + R} \quad (3.29)$$

$$G_p(s) = \frac{1 - s(\frac{T_s}{4})}{1 + s(\frac{T_s}{4})} \quad (3.30)$$

em que T_s é o tempo de amostragem, L é a indutância do filtro e R a resistência elétrica do filtro.

Dessa forma, tem-se a função transferência do controlador PI é dada por:

$$PI(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.31)$$

para $s = j\omega$, a função pode ser expressa como:

$$PI(j\omega) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i j\omega} \right) \quad (3.32)$$

$$\angle PI(j\omega) = - \arctan \frac{1}{T_i \omega} \quad (3.33)$$

A margem de fase desejada MF_d para o sistema controlado é calculada por:

$$MF_d = \pi + \angle G_i(j\omega_c) + \angle PI(j\omega_c) \quad (3.34)$$

em que ω_c é a frequência de cruzamento de ganho (OGATA, 2011).

Substituindo a equação (3.33) em (3.34), e isolando T_i , obtêm-se a primeira condição do projeto do controlador.

$$T_i = \frac{1}{\omega_c \cdot \tan(\pi + \angle G_i(j\omega_c) - MF_d)} \quad (3.35)$$

A magnitude da função transferência de malha aberta de um sistema controlado é dado por $\omega_c = 1$, como representado na equação (3.36), além disso substituindo a equação (3.32)

em (3.36) e ainda isolando o k_p , obtém-se a segunda condição do projeto do controlador na equação (3.37).

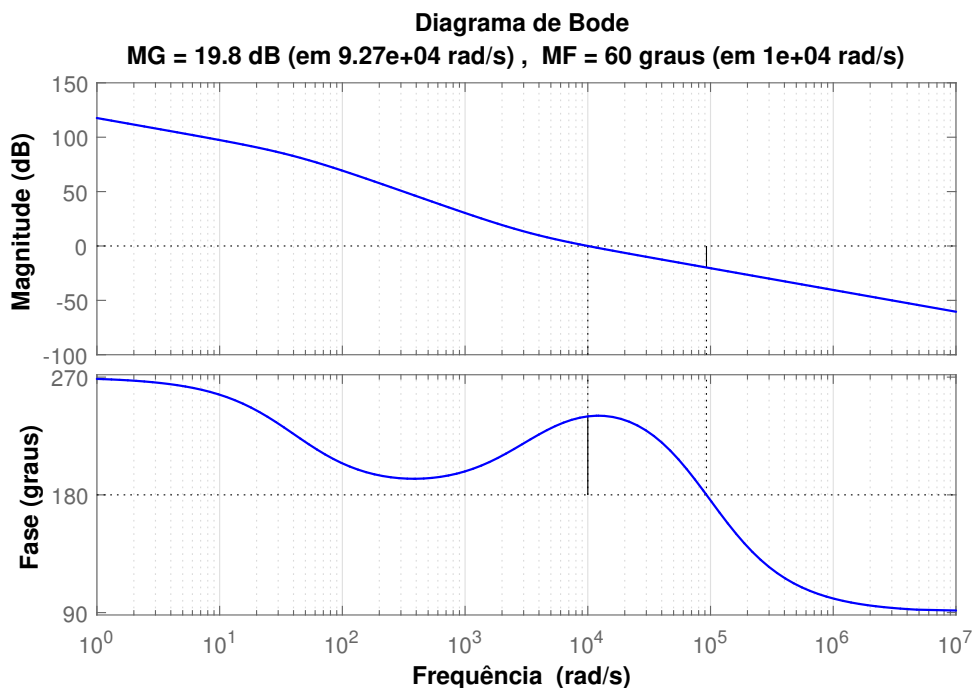
$$|PI(j\omega_c)| \cdot |G_i(j\omega_c)| = 1 \quad (3.36)$$

$$k_p = \frac{1}{|G_i(j\omega_c)| \cdot \left| 1 - \frac{j}{\omega_c T_i} \right|} \quad (3.37)$$

Para que o projeto de controle seja considerado satisfatório, deve-se obter uma Margem de Ganho (MG) superior à 6 dB e uma margem de fase entre 30° e 60° (OGATA, 2011). Assim, de acordo com as equações (3.35) e (3.37), e utilizando os valores de $\omega_c = 1000$ e $MF_d = 60$ foram obtidos os valores de $k_p = 71.1898$ e $T_i = 0.0017s$ do controlador de corrente do CLR. Vale ressaltar que a frequência de cruzamento para esse controle foi definida a partir de resultados obtidos em simulações.

A Figura 23 mostra o diagrama de bode da resposta em frequência do sistema de controle de corrente do CLR. O projeto atende as condições necessárias com valores de margem de fase igual a 60° e margem de ganho igual a 19.8 dB.

Figura 23 – Resposta em frequência de malha aberta do controle das correntes elétricas i_d e i_q do CLR.



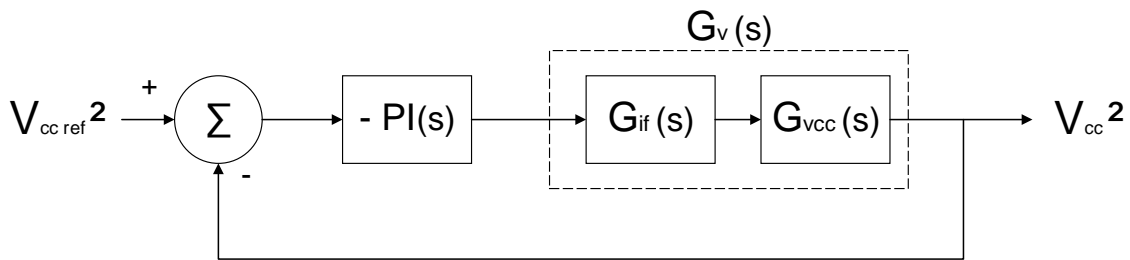
Fonte: O autor.

3.2.2 Projeto do controlador do barramento CC

O controle do barramento CC é projetado para realizar a máxima transferência de potência entre o CLR e a rede elétrica. Comumente, os controladores projetados para esse sistema têm a função de estabilizá-lo, e sua dinâmica é mais lenta comparada ao controle de corrente.

Nota-se que o diagrama de blocos do controle do barramento CC da Figura 24 é constituído por três blocos: o bloco $PI(s)$ que é o controlador PI multiplicado por (-1) que compensa o sinal negativo de $G_{vcc}(s)$, o bloco $G_{if}(s)$ que é a malha fechada de controle de corrente do CLR, $G_{vcc}(s)$ que representa a dinâmica da tensão do barramento CC, e o bloco $G_v(s)$ representa os blocos $G_{if}(s)$ em cascata com $G_{vcc}(s)$.

Figura 24 – Diagrama de blocos simplificado do controle de tensão elétrica do barramento CC.



Fonte: Adaptada de Moreira (2017).

De acordo com Martins (2017) função de transferência do modelo simplificado $G_{vcc}(s)$ é dado por :

$$G_{vcc}(s) = \frac{V_{cc}^2(s)}{P_t(s)} = - \left(\frac{2}{C} \right) \frac{\tau s + 1}{s} \quad (3.38)$$

em que V_{cc} é a variável de estado do sistema, C é a capacitância do barramento CC, P_t é a potência nos terminais do conversor e τ é dado pela equação (3.39), sendo proporcional ao fluxo de potência ativa entre a fonte e o conversor eletrônico trifásico.

$$\tau = \frac{2L P_{ext}}{3V_{sd}^2} \quad (3.39)$$

Ao considerar os referidos aspectos, a metodologia de projeto de controlador do PI é aplicada analogamente ao utilizado no controle de corrente apresentado na secção 3.2.1, no diagrama de malha aberta apresentado na Figura 24. Por meio das equações (3.40) e (3.41),

são determinados os parâmetros do controlador PI do controle de tensão do barramento CC (MOREIRA, 2017).

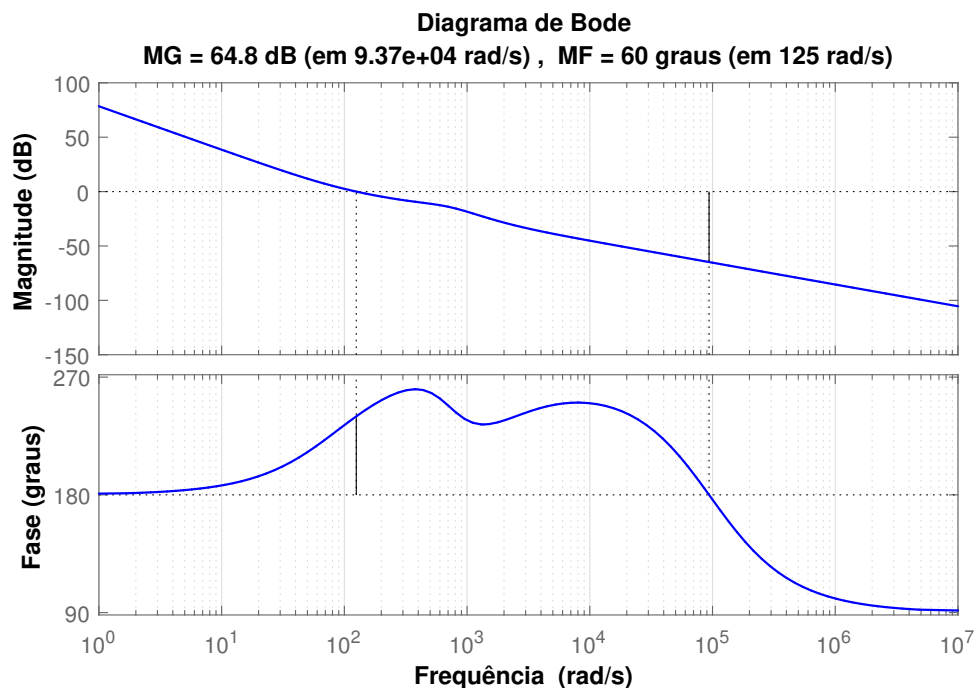
$$T_i = \frac{1}{\omega_c \cdot \tan(\pi + \angle G_v(j\omega_c) - MF_d)} \quad (3.40)$$

$$k_p = \frac{1}{|G_v(j\omega_c)| \cdot \left| 1 - \frac{j}{\omega_c T_i} \right|} \quad (3.41)$$

A partir dessa metodologia de projeto com $\omega_c = 125 \text{ rad/s}$ e $MF = 60^\circ$, obtêm-se os valores de $k_p = 0.0463$ e $T_i = 0.0121 \text{ s}$ para o controlador de tensão do CLR. Como já mencionado, a malha de controle de tensão tem a dinâmica mais lenta do que a malha de controle da corrente e foi tomada como base para determinar o valor de frequência de cruzamento, juntamente com os resultados obtidos de simulações.

A Figura 25 mostra a resposta em frequência do sistema controlado a partir do controlador de tensão do barramento CC que satisfaz as condições de um bom projeto com os valores de margem de ganho maior que 6 dB e margem de fase de 60° para uma frequência de cruzamento de 125 rad/s .

Figura 25 – Resposta em frequência de malha aberta do controlador de tensão elétrica do barramento CC do CLR.



Fonte: O autor.

3.2.3 Projeto do circuito de sincronismo trifásico (PLL)

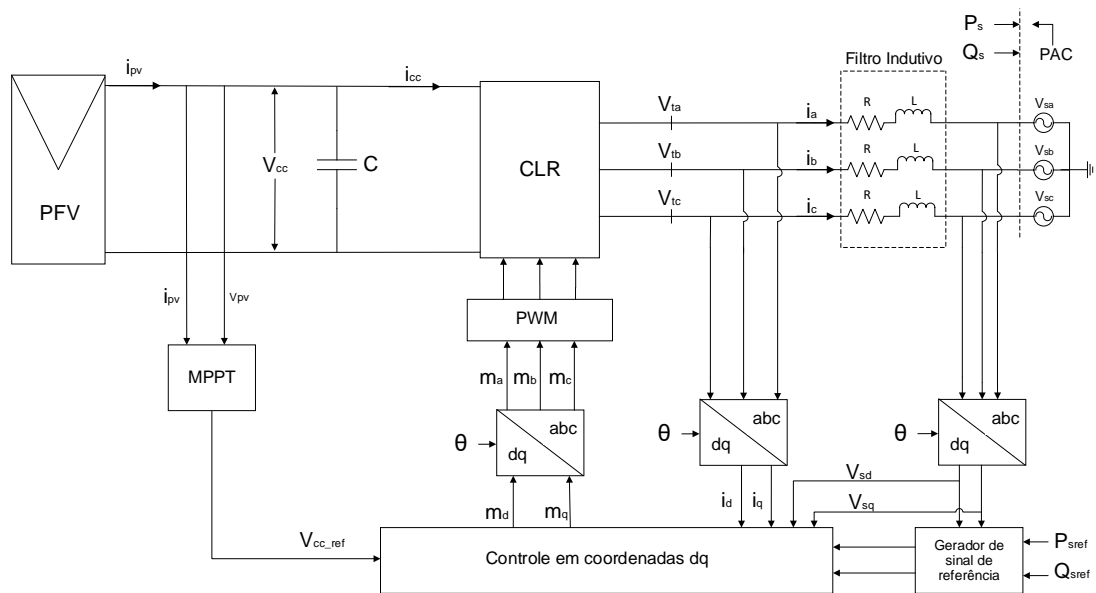
O objetivo do PLL é manter o sincronismo entre as tensões da rede elétrica e as tensões que saem do conversor, e como saída desse sistema, têm-se os valores de seno e cosseno em fase com o sinal de entrada. O diagrama do sistema PLL é mostrado pela Figura 16, sendo representado por um bloco integrador, responsável por gerar um sinal de erro proporcional ao erro do ângulo equação (3.42), um bloco saturador e um bloco compensador $H(s)$, que é um simples controlador PI. O controlador $H(s)$ é usado para zerar o erro e é projetado através do método de resposta em frequência com Margem de Fase (MF) e frequência de cruzamento (ω_c), respectivamente $MF = 60^\circ$ e $\omega_c = 145 \text{ rad/s}$, e a partir desses dados se obtém os valores de $k_p = 0.6976$ e $T_i = 0.0119s$.

$$G_{PLL}(s) = \frac{1}{s} \quad (3.42)$$

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações obtidos nos sistemas de controle propostos para o sistema de geração FV com topologia de único estágio. As simulações foram realizadas na plataforma Matlab/Simulink/Simpowersystems. O sistema foi montado conforme o diagrama mostrado na Figura 26.

Figura 26 – Sistema de geração fotovoltaico completo.

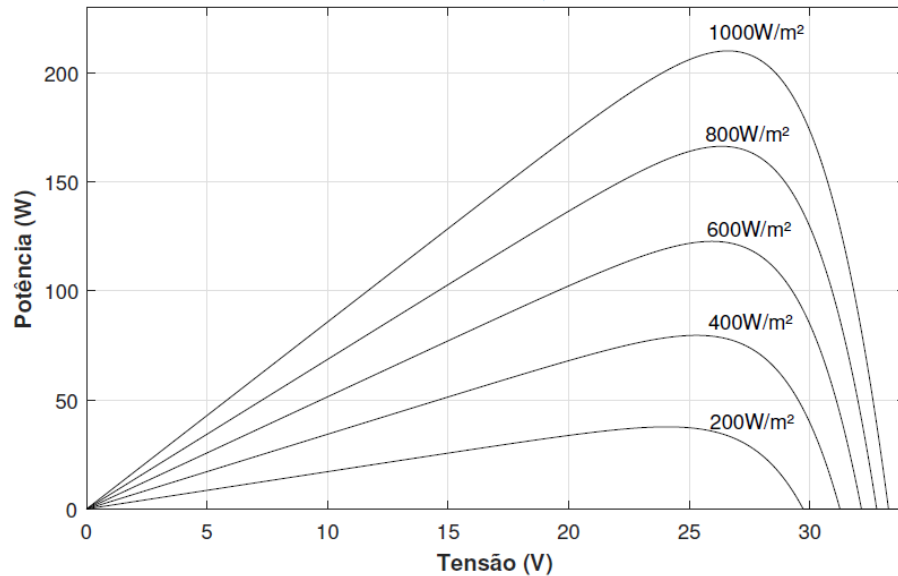


Fonte: O autor.

4.1 Curvas características do sistema FV e parâmetros do sistema

O arranjo FV deste trabalho é composto de 15 módulos FV policristalina da Kyocera modelo KD 210 GX, associados em série para alcançar os valores de tensão ideal para o barramento CC, para garantir controlabilidade de corrente e baixa oscilação na corrente de saída. A partir da modelagem, obteve-se as curvas de potência versus tensão demonstradas na Figura 27 para diferentes níveis de irradiância, ressaltando mais uma vez a influência da incidência solar sobre os painéis, considerando a temperatura constantes de 25°C.

Figura 27 – Curva característica da potência versus tensão para diferentes níveis de irradiação.



Fonte: O autor.

Para realizar a simulação do sistema foi utilizado os parâmetros apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros do sistema.

Tensão de pico (V_p)	180 V
Tensão de linha (V_l)	110 V
Frequência da rede elétrica	60 Hz
Capacitância do Barramento CC (C)	900 μ F
Tensão do Barramento CC (V_{cc})	400 V
Filtro L (L)	7,5 mH
Resistência da indutância (RL)	0,31 Ω
Frequência de chaveamento (f_s)	24 kHz

Fonte: O autor.

4.2 Comportamento do sistema para o conversor do lado da rede elétrica com filtro L

Para um bom funcionamento do sistema de geração FV, o projeto do conversor eletrônico CC-CA trifásico conectado à rede é de fundamental importância, pois têm a função de controlar o fluxo de potência e manter a tensão constante nos terminais do barramento CC.

Faz-se necessário o desenvolvimento do projeto do circuito de sincronismo do conversor CC-CA com a rede elétrica PLL, apresentado em detalhes na secção 3.2.3, o desenvolvimento do projeto de controle de corrente do CLR e controle de tensão do barramento CC.

Com a finalidade de verificar o comportamento do sistema de controle implementado,

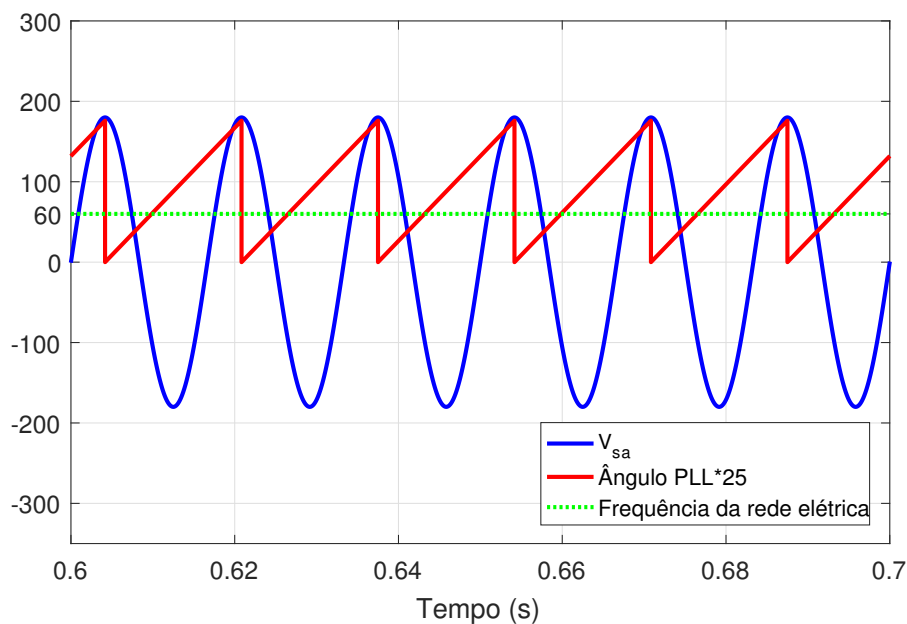
analisou-se os resultados de dois cenários de simulação, que apresentam níveis de irradiância no valor de 1000 W/m^2 e 400 W/m^2 , respectivamente, considerando a temperatura constante de 25°C . Além disso, analisou-se os resultados de um terceiro cenário nas condições de 800 W/m^2 de irradiância e temperatura de $47,9^\circ\text{C}$ para constatar o funcionamento em situações adversas de temperatura, como em um sistema real.

4.2.1 Circuito de sincronismo PLL

Para realizar a conexão do conversor eletrônico ao sistema CA, o PLL é executado e gera o ângulo θ que está em sincronismo com a tensão da rede, apresentando a mesma frequência. A Figura 28 apresenta a tensão da rede elétrica na fase A (V_{sa}), a frequência da rede elétrica em Hz e o ângulo (θ) gerado pelo PLL. Verifica-se que a frequência e o ângulo gerado pelo PLL estão de acordo com a rede, apresentando a mesma frequência e com o ângulo em sincronismo com a tensão da rede elétrica (V_{sa}).

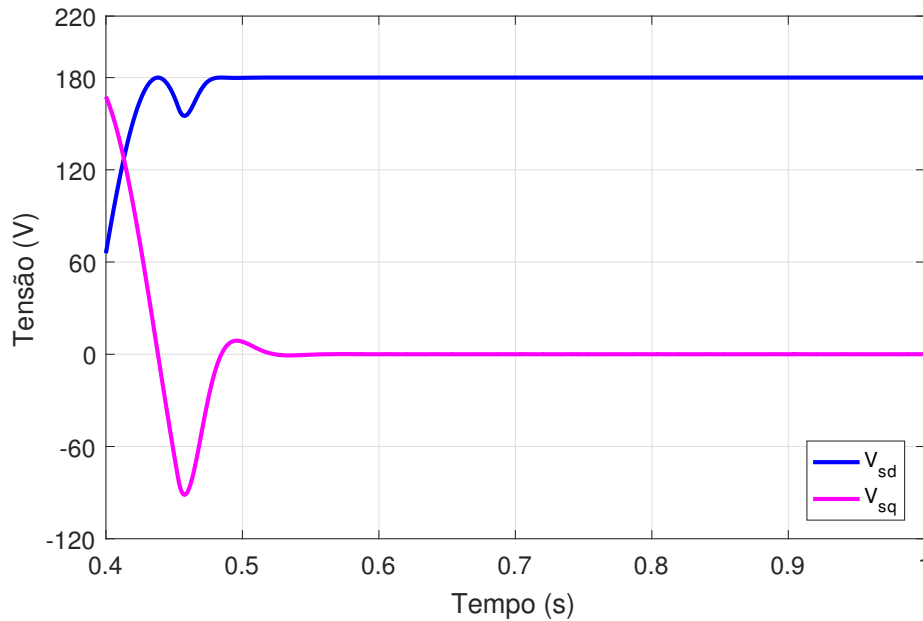
Na Figura 29 são mostradas as respostas das tensões de eixo direto (V_{sd}) e de eixo em quadratura (V_{sq}). É possível observar que a tensão de eixo em quadratura da rede elétrica é igual à tensão de pico de 180 V e a tensão em eixo direto assume o valor zero quando ambas estão em regime permanente, condição que comprova que o PLL gera θ em sincronia.

Figura 28 – Tensão da rede elétrica (V_{sa}), frequência da rede elétrica e ângulo θ obtido a partir do PLL.



Fonte: O autor.

Figura 29 – Tensões de eixo direto da rede elétrica (V_{sd}) e tensão de eixo em quadratura (V_{sq}).



Fonte: O autor.

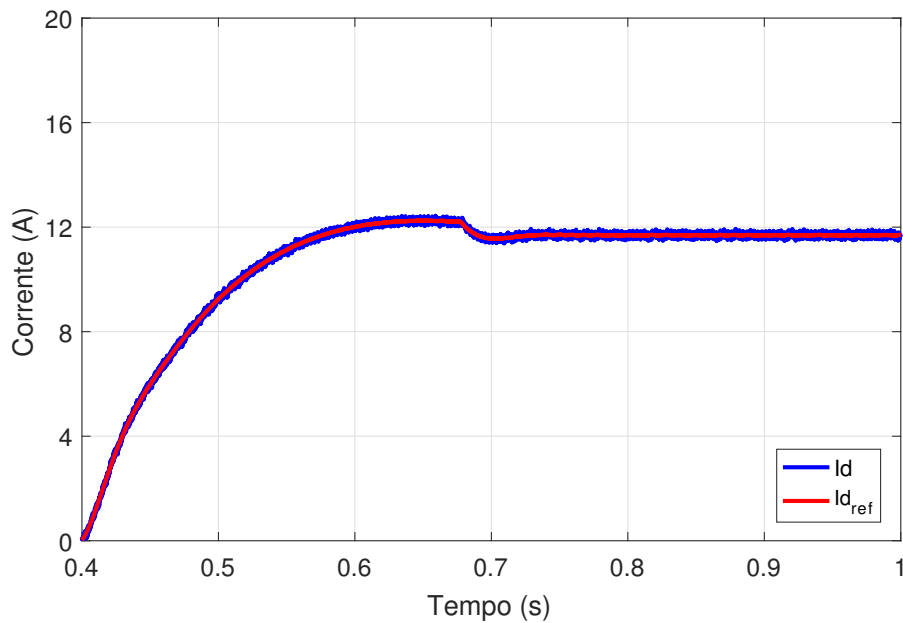
4.2.2 Comportamento do Sistema FV para o Controle de Corrente do CLR

Foi simulado o sistema de controle de corrente do CLR de acordo com o diagrama de blocos da Figura 18. As Figuras 30 e 31 representam as correntes (I_{dref}) e (I_d), respectivamente, para os dois cenários de nível de irradiância. Já as Figuras 32 e 33 apresentam o comportamento correntes (I_{qref}) e (I_q), respectivamente.

É importante observar que o sistema de controle de corrente permanece desligado até que o PLL se estabilize e não apresente variações em (V_{sd}) e (V_{sq}), desse modo, aplica-se uma rampa de 0,4 segundos que aciona o sistema de controle de tensão CC, sendo possível observar que as corrente (I_d) e (I_q) medidas seguem as referências pré-definidas (I_{dref}) e (I_{qref}), mostrando que o projeto dos controladores está adequado, garantindo a boa operação do sistema.

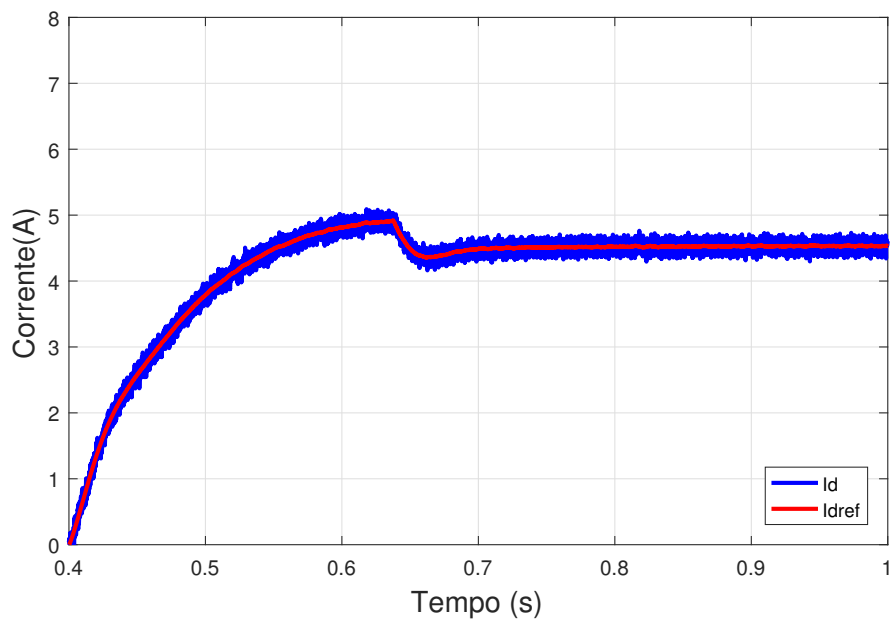
Observa-se nas Figuras 30 e 31, que independente da irradiância as correntes seguem reguladas de acordo com a sua referência. As correntes de eixo direto são diretamente proporcionais as irradiâncias.

Figura 30 – Correntes de eixo direto (I_d) e de eixo direto de referência (I_{dref}) para irradiância de 1000 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

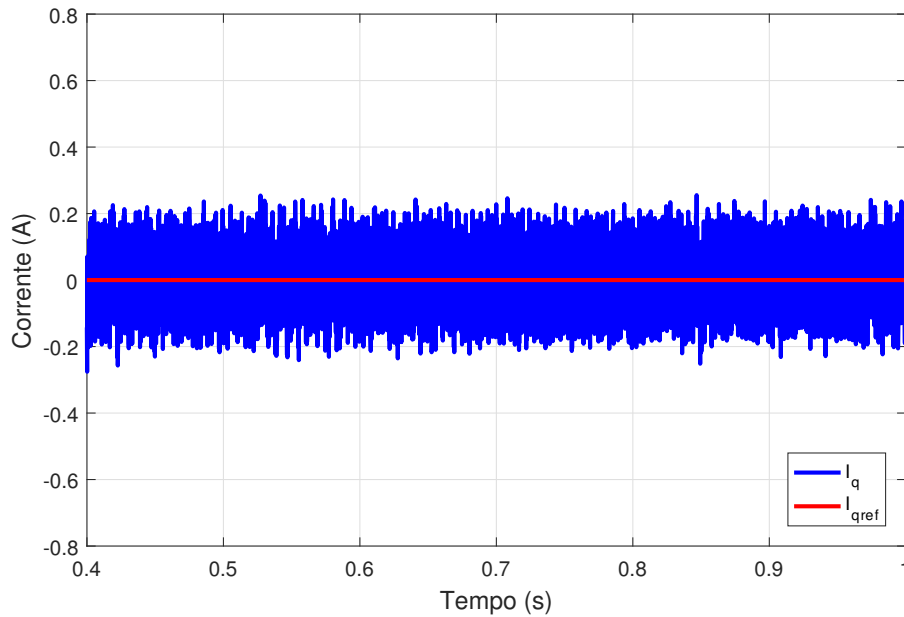
Figura 31 – Correntes de eixo direto (I_d) e de eixo direto de referência (I_{dref}) para irradiância de 400 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

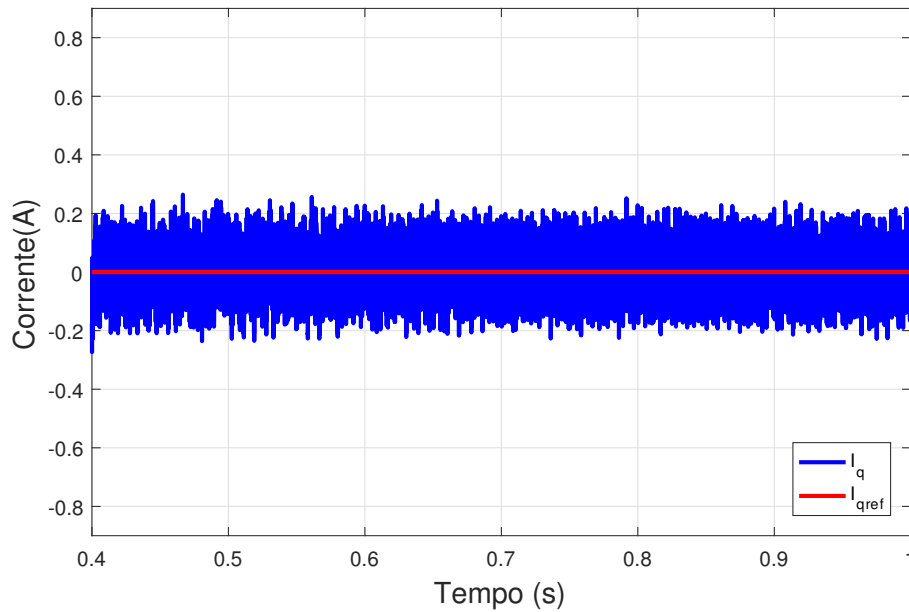
As Figuras 32 e 33, apresentam as correntes de eixo em quadratura regulada em zero para diferentes valores de irradiância.

Figura 32 – Correntes de eixo em quadratura (I_q) e de eixo em quadratura de referência (I_{qref}) para irradiância de 1000 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

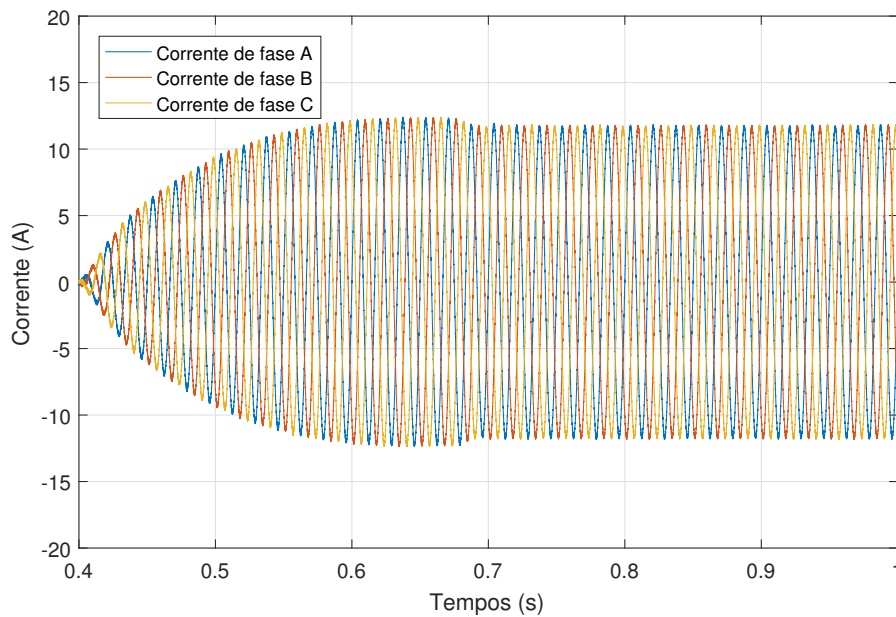
Figura 33 – Correntes de eixo em quadratura (I_q) e de eixo em quadratura de referência (I_{qref}) para irradiância de 400 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

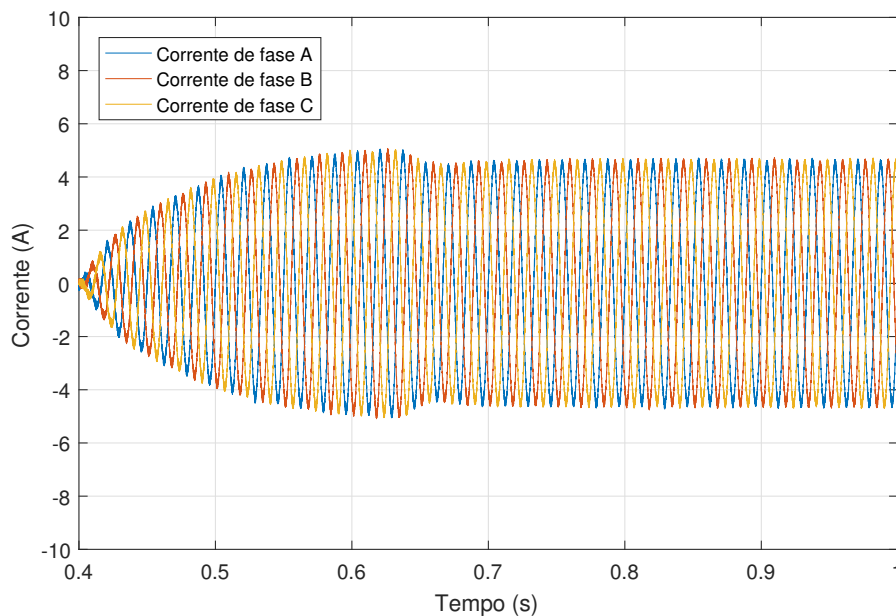
As Figuras 34 e 35 ilustram as corrente elétrica trifásicas enviadas à rede elétrica, e observa-se que, com aumento de irradiância, o gerador passa a contribuir com mais corrente.

Figura 34 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica para irradiância de 1000 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

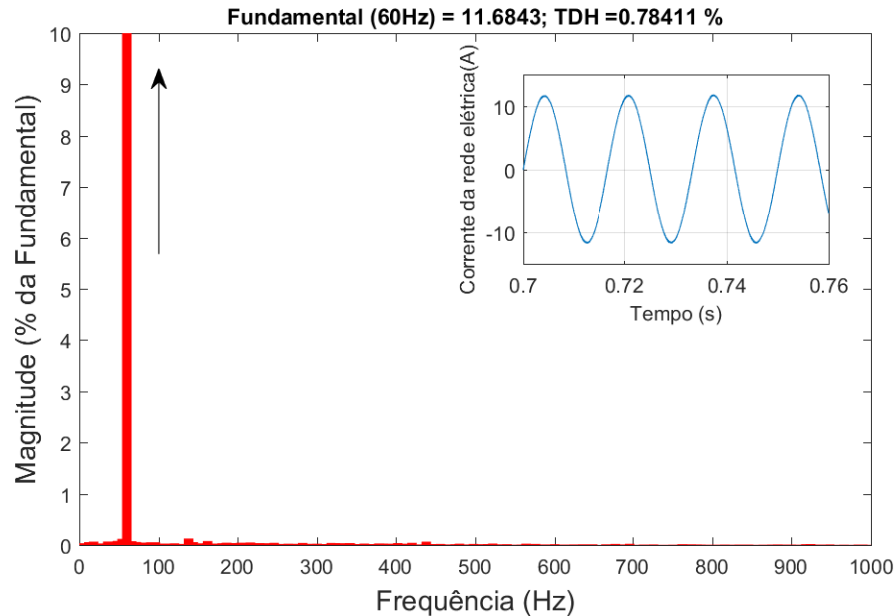
Figura 35 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica para irradiância de 400 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

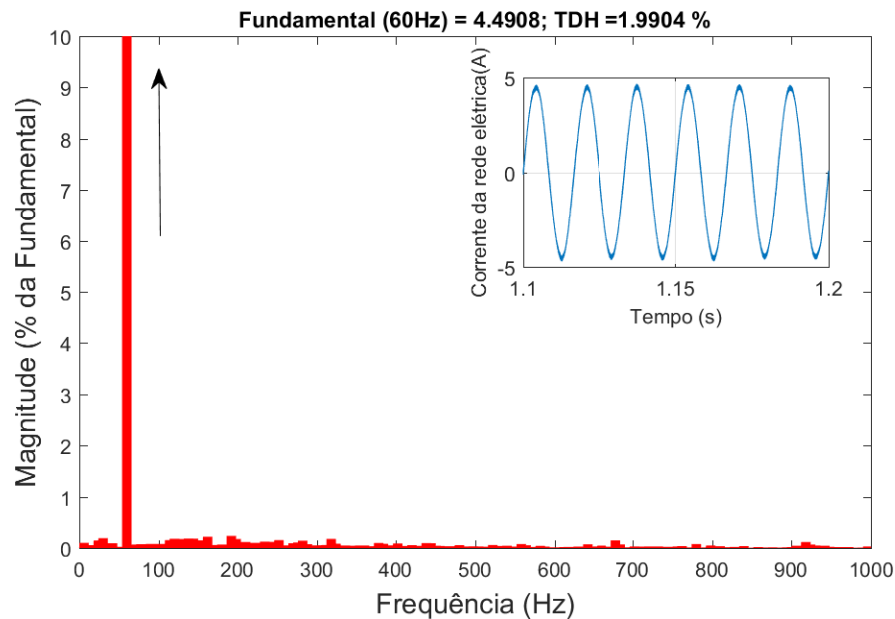
As Figuras 36 e 37 ilustram os *Total Harmonic Distortion* (TDH) de corrente da rede elétrica para irradiância de (1000 W/m^2) e (400 W/m^2). Sabendo que o TDH da corrente de rede aumenta em função da baixa irradiância, é aceitável que o cenário de menor irradiância produza uma distorção harmônica maior (HICKS; BAGHZOUZ, 2018). Por outro lado, ambos os cenários estão dentro do limite de 5%, sendo o limite mais exigente da norma IEEE-519:1992.

Figura 36 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica para irradiância de 1000 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

Figura 37 – Corrente elétrica trifásica enviada à rede elétrica para irradiância de 400 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



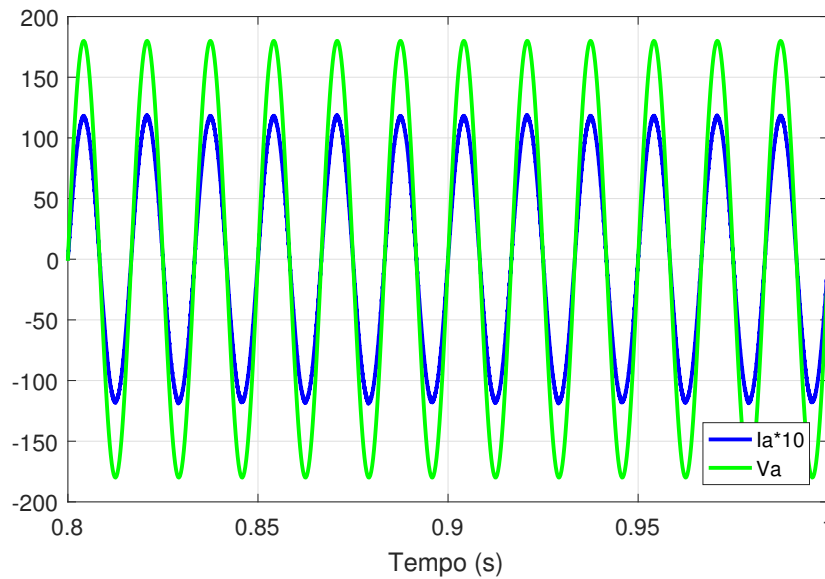
Fonte: O autor.

4.2.3 Análise do fator de potência

Um fator relevante para a qualidade de energia a ser analisado é o fator de potência do sistema FV conectado à rede elétrica. A partir de um bom funcionamento do conversor eletrônico, é possível regular a defasagem entre a corrente alternada gerada em relação a tensão da rede elétrica. Como $I_q=0$ a potência reativa também é zero, assim, o fator de potência é

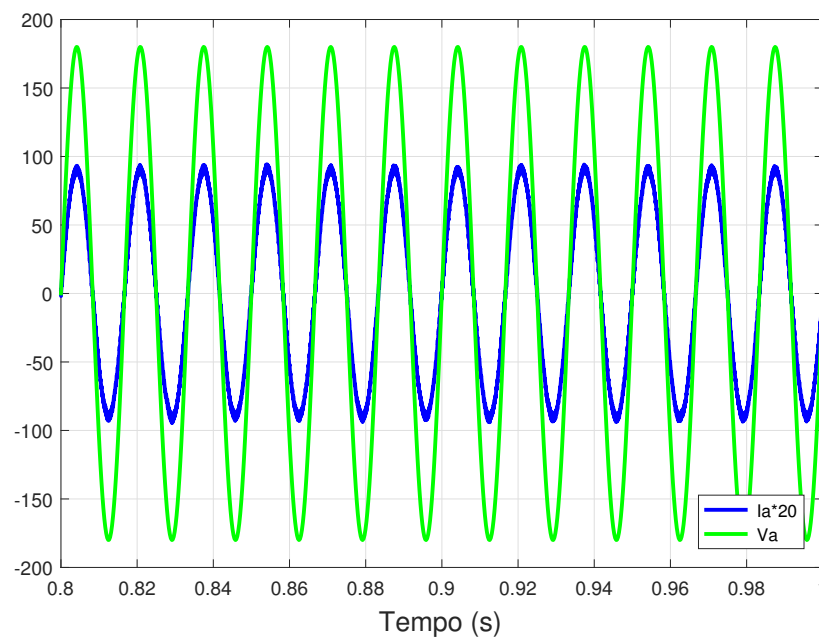
unitário e isso pode ser visto para diferentes valores de irradiâncias. Nos casos de irradiância igual a 1000 W/m^2 e 400 W/m^2 , a corrente I_a está em fase com a tensão V_{sa} . As Figuras 38 e 39 mostram a corrente e a tensão nos terminais, e se observa que as grandezas estão em fase para os dois cenários de variação de irradiância desenvolvidos em simulação.

Figura 38 – Tensão da rede (V_a) e Corrente (I_a) em detalhes para irradiância de 1000 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

Figura 39 – Tensão da rede (V_a) e Corrente (I_a) em detalhes para irradiância de 400 W/m^2 , e temperatura de 25°C .

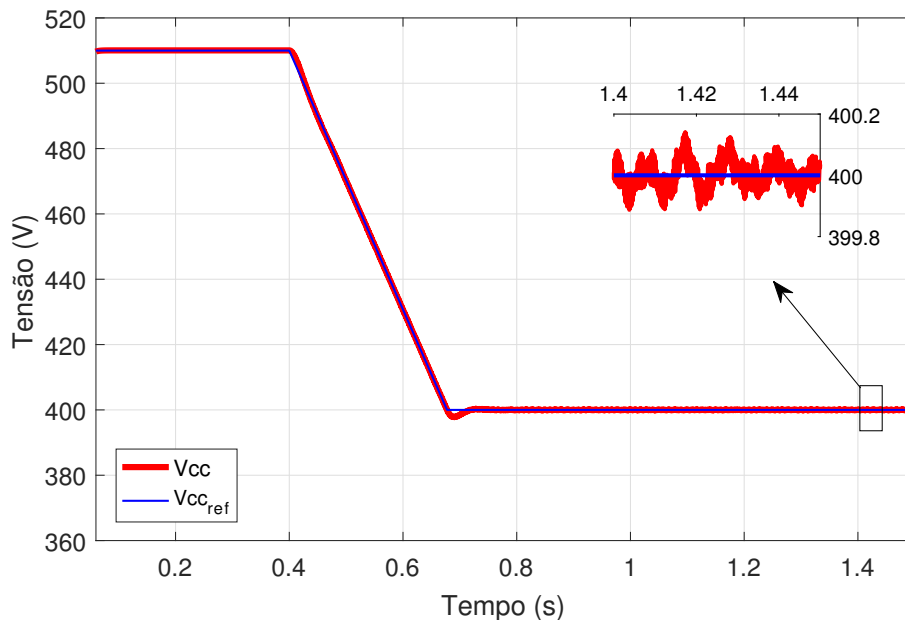


Fonte: O autor.

4.2.4 Análise do sistema de controle de tensão do barramento CC

Sob as mesmas condições de simulação já apresentadas em seções anteriores, para realizar o controle do barramento CC, implementou-se o diagrama de blocos apresentado na Figura 24. O controle do barramento CC é dividido em dois estágios, inicialmente a tensão do barramento CC segue uma referência pré-fixada pela tensão de circuito aberto do arranjo FV, após essa etapa, o controle é acionado e o sistema segue a referência da tensão mínima de 400 V para conexão com barramento CC do conversor, desse modo, as Figuras 40 e 41 mostram o sistema em dois cenários de irradiância e apresentam a tensão de referência e a tensão medida.

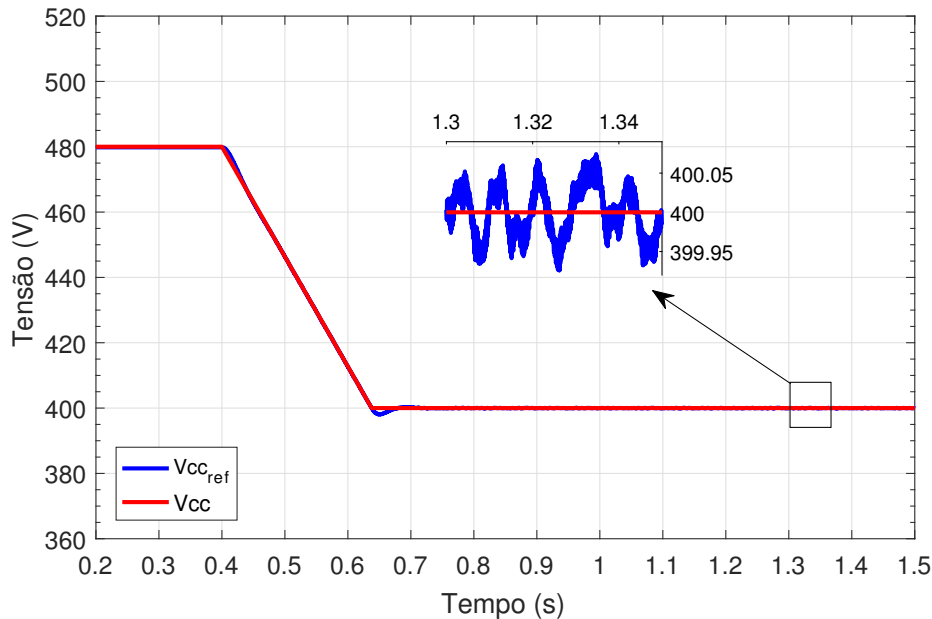
Figura 40 – Tensão V_{CC} seguindo a referência $V_{CC_{ref}}$ em detalhes para irradiância de 1000 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

No início do funcionamento do sistema, com os controles desativados, as correntes elétricas do capacitor do barramento são limitadas pelos resistores de pré-carga. A necessidade desse circuito é vital para evitar danos ao sistema no período em que a tensão é elevada até o valor de referência, pois as correntes enviadas pela rede elétrica crescem de forma exponencial no instante de partida, dessa forma, evita-se danos às chaves eletrônicas do conversor e serve para limitar a corrente de carga do capacitor do barramento CC.

Figura 41 – Tensão V_{CC} seguindo a referência $V_{CC_{ref}}$ em detalhes para irradiância de 400 W/m^2 , e temperatura de 25°C .

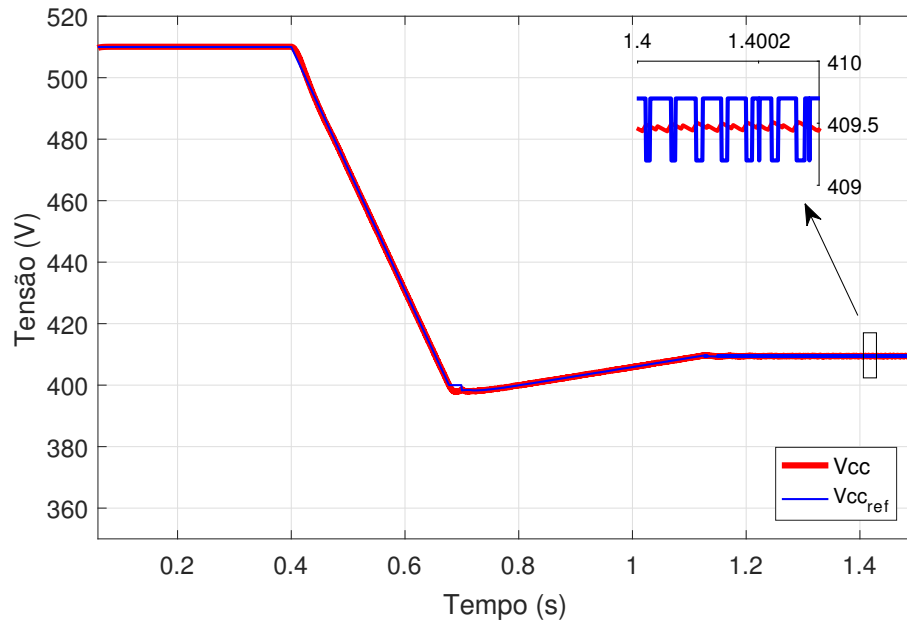


Fonte: O autor.

A tensão de referência inicialmente parte da tensão de circuito aberto do arranjo fotovoltaico. No momento em que o sistema está estabilizado e o circuito de pré-carga desabilitado, e no instante de tempo de $0,4 \text{ s}$, o controle de tensão é ativado e aplica-se uma função rampa (deixando-o mais suave) ao sistema com a função de abaixar a tensão do barramento CC até a tensão pré-fixada de 400 V . O processo se repete para as duas condições de irradiância e em ambos os cenários se observa que o controle do barramento CC está de acordo com o projetado, pois o sinal segue sua referência.

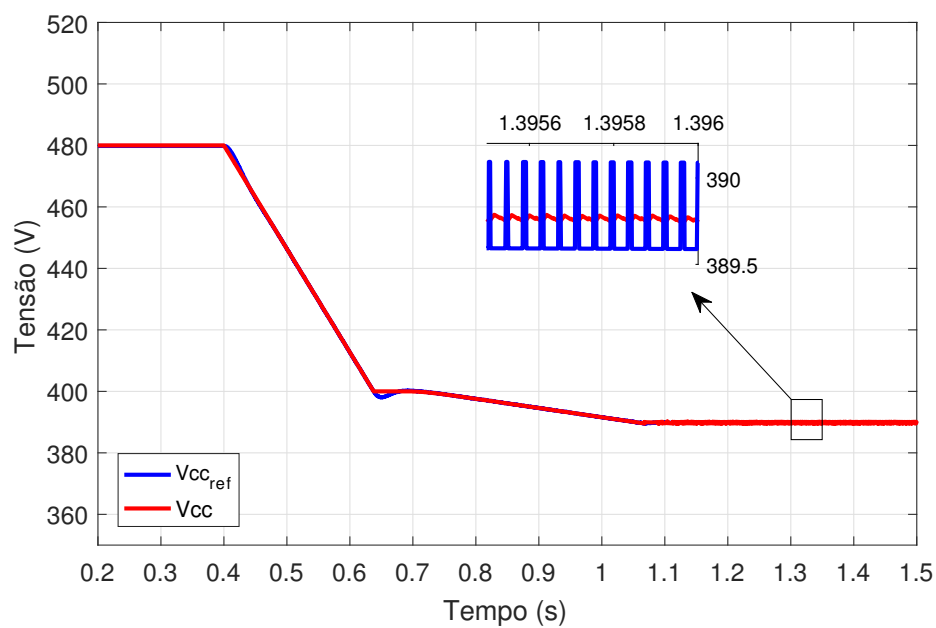
Associado ao sistema de controle do barramento CC, o método MPPT com algoritmo PeO tem a função de rastrear o ponto de máxima potência, e tem como saída, a tensão de referência, $V_{CC_{ref}}$, utilizada para a malha de controle de tensão. As Figuras 42 e 43 mostram o comportamento do barramento CC com a aplicação do método de MPPT para os cenários apresentados anteriormente.

Figura 42 – Tensão no barramento CC (V_{cc}) com o método do MPPT para irradiância de $1000W/m^2$, e temperatura de $25^{\circ}C$.



Fonte: O autor.

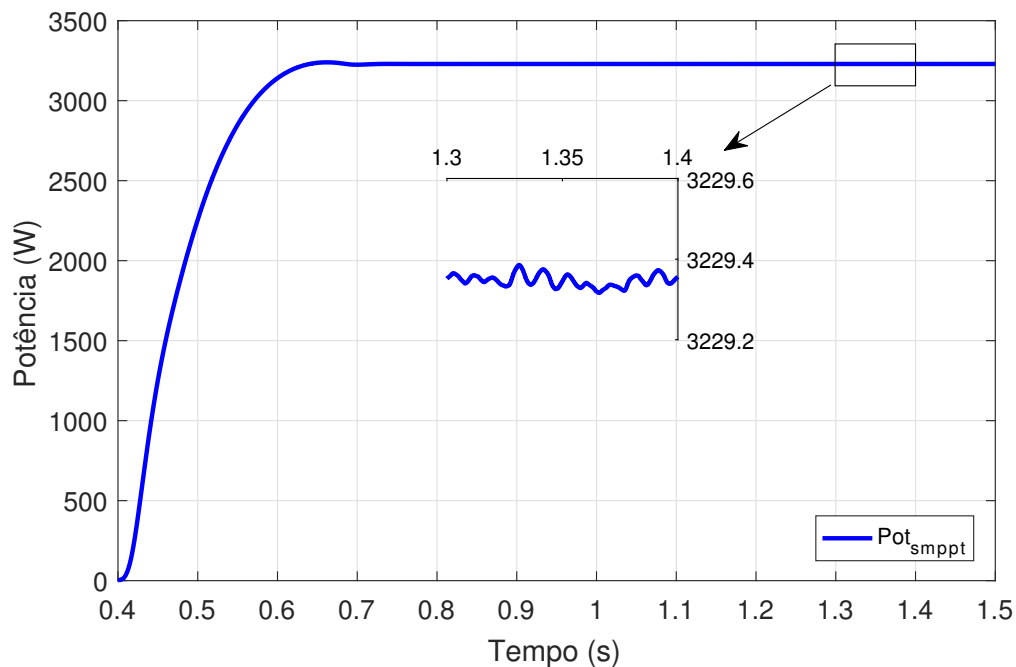
Figura 43 – Tensão no barramento CC (V_{cc}) com o método do MPPT para irradiância de $400W/m^2$, e temperatura de $25^{\circ}C$.



Fonte: O autor.

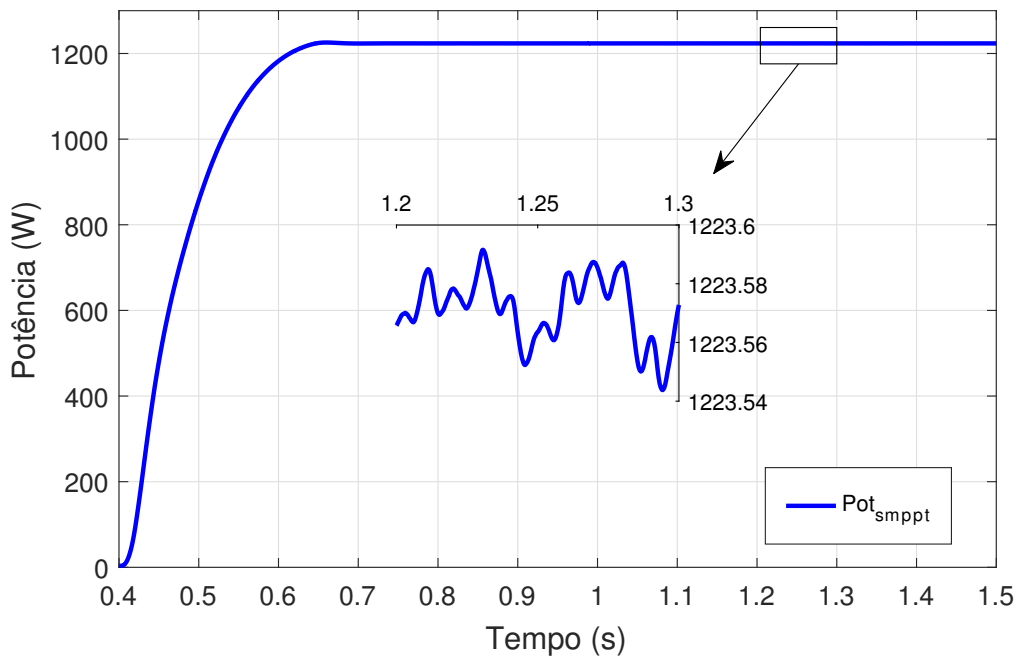
O algoritmo MPPT é acionado no tempo de 0.7s, ou seja, após a tensão estabilizar no valor pré-fixada de 400 V. A tensão V_{CCref} foi definida a partir da análise da curva característica do módulo, vista na secção 4.1, para se aproximar da tensão de máxima potência e o MPPT alcançar à tensão de referência, em que a potência é máxima, mais rapidamente. Outro fator a ser observado é que o PeO atuando no sistema de maneira intermitente e, como consequência, a tensão fica com pequenas oscilações de acordo com o tamanho do passo definido no processo. As Figuras 44 e 45 mostram os comportamento das curvas de potência para os dois cenários de irradiância, sem o método MPPT.

Figura 44 – Curva de potência sem o método de MPPT em detalhes para irradiância de 1000 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

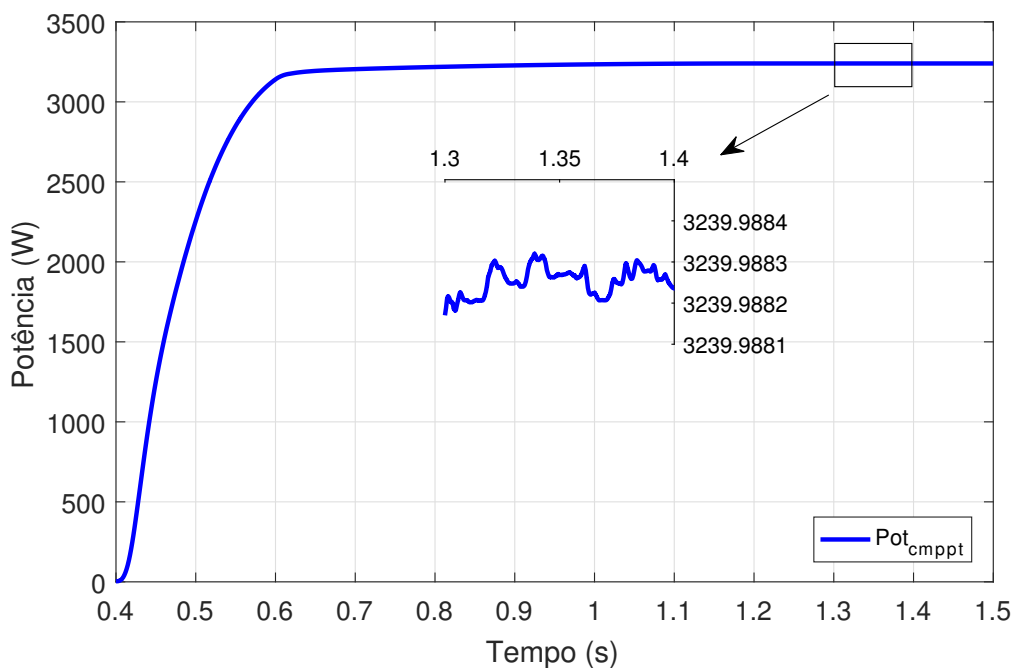
Figura 45 – Curva de potência sem o método de MPPT em detalhes para irradiância de 400 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

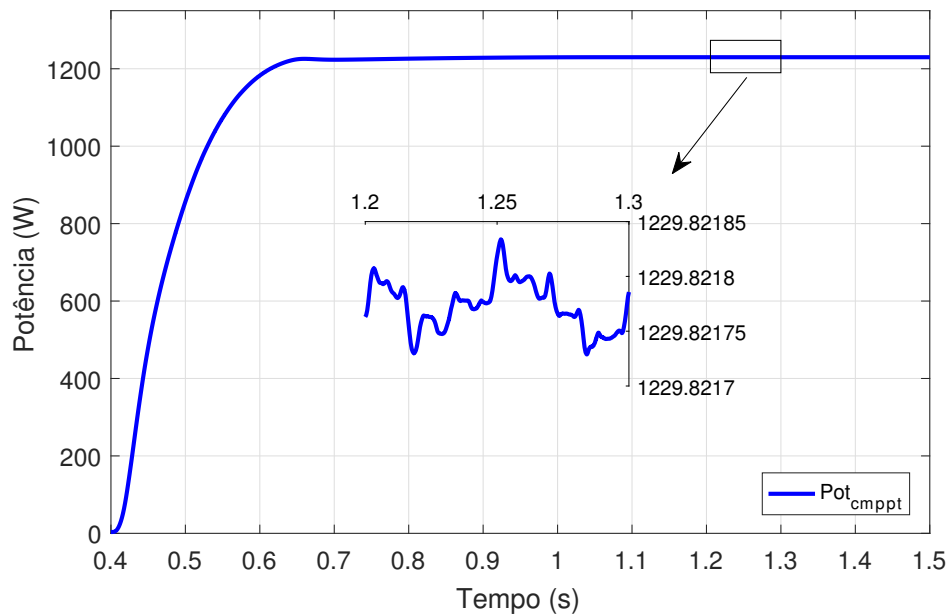
Nas Figuras 46 e 47, aplica-se o algoritmo de MPPT que ajusta automaticamente a tensão do barramento CC a partir da tensão de referência (V_{mppt}), garantindo que a potência seja máxima.

Figura 46 – Curva de potência com PeO em detalhes para irradiância de 1000 W/m^2 , e temperatura de 25°C .



Fonte: O autor.

Figura 47 – Curva de potência com PeO em detalhes para irradiância de $400 \text{ W}/\text{m}^2$, e temperatura de 25°C .

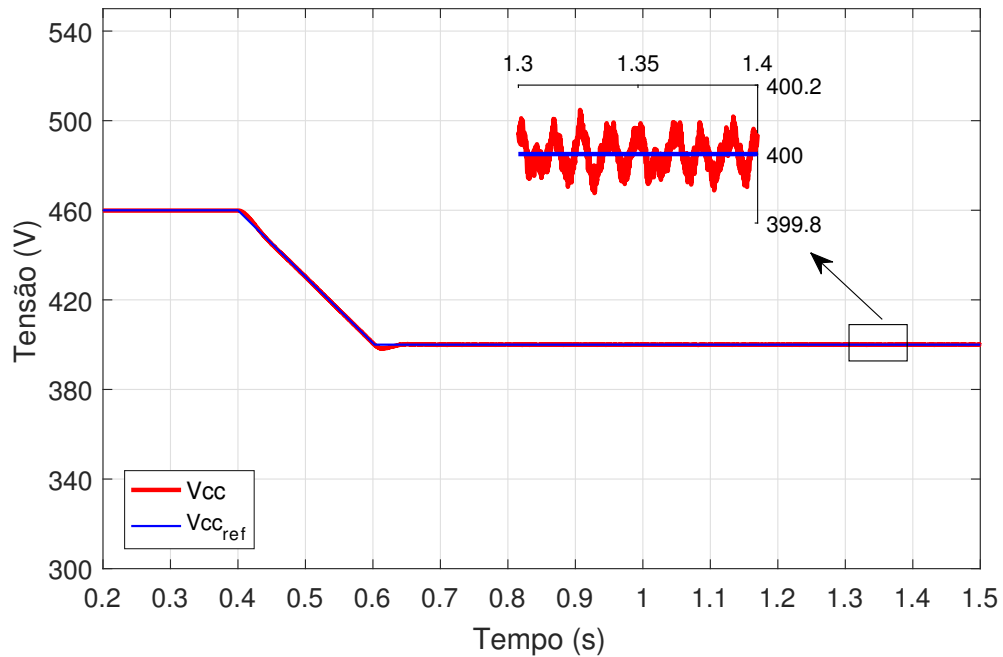


Fonte: O autor.

Comparando as Figuras 44 e 45 com as Figuras 46 e 47, o sistema FV com algoritmo de MPPT apresenta melhor desempenho, e mesmo com a referência inicial teórica sendo calculada de acordo com a tensão de máxima potência, dada pelo *datasheet* do fabricante, o método gera um ganho de 10 W e 6 W, respectivamente, de potência ativa.

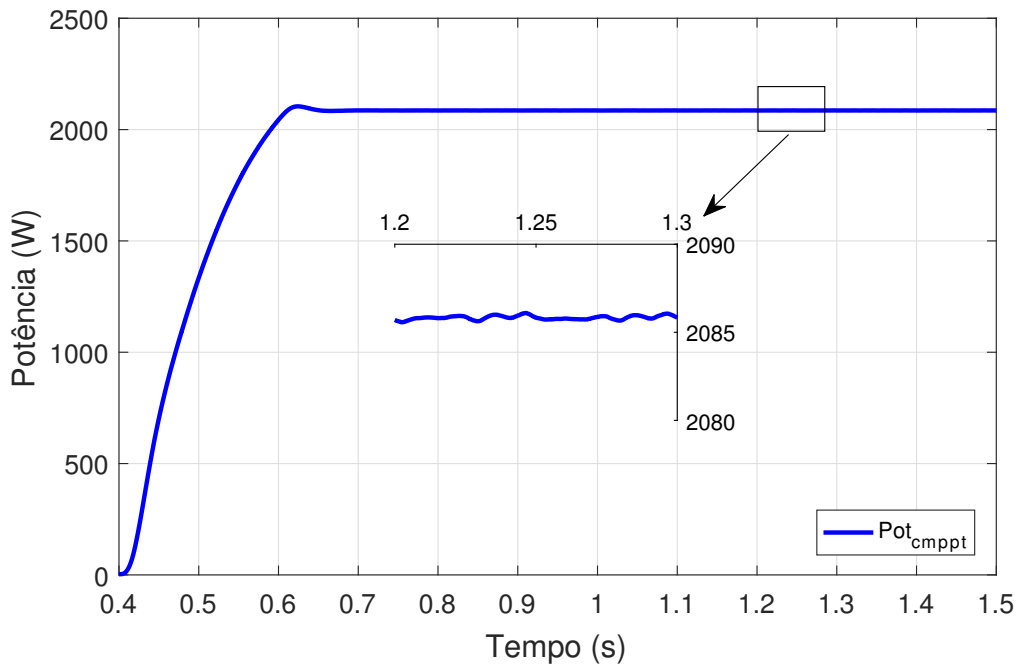
Para um terceiro cenário foi analisado o desempenho do algoritmo PeO para as condições normais de operação dada pelo *datasheet*, com temperatura de $47,9^\circ\text{C}$ e irradiância de $800 \text{ W}/\text{m}^2$, que podem variar de uma região para outra. As Figuras 48 e 49 ilustram o controle de tensão do barramento CC e a curva de potência injetada na rede pelo sistema de geração FV, respectivamente, para as mesmas condições de operação sem a implementação do MPPT.

Figura 48 – Tensão no barramento CC (V_{cc}) sem o método do MPPT para irradiância de 800 W/m^2 , e temperatura de $47,9^\circ\text{C}$.



Fonte: O autor.

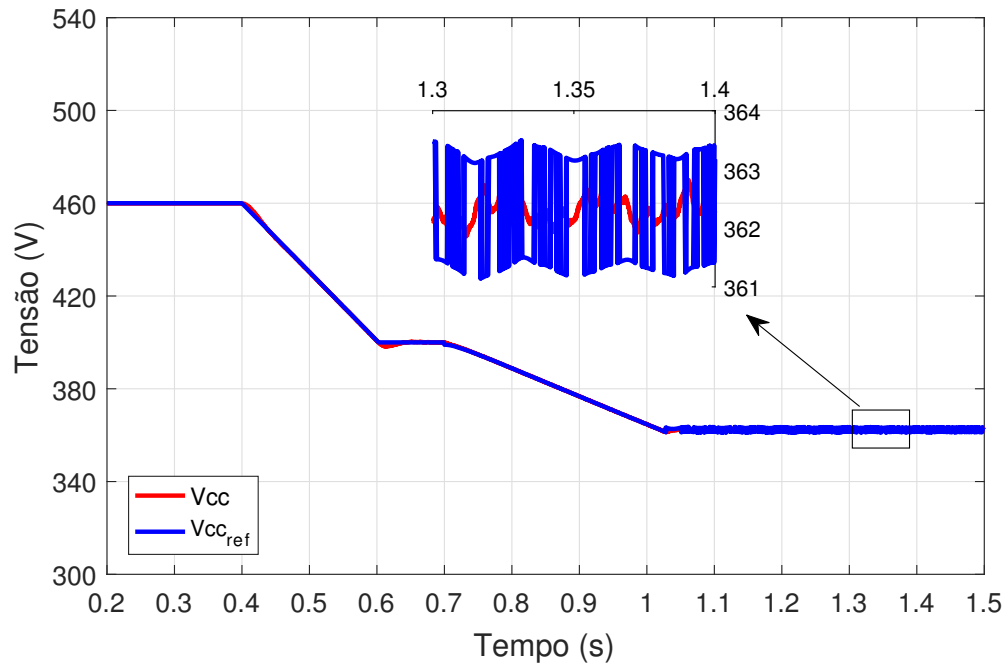
Figura 49 – Curva de potência sem o MPPT para irradiância de 800 W/m^2 , e temperatura de $47,9^\circ\text{C}$.



Fonte: O autor.

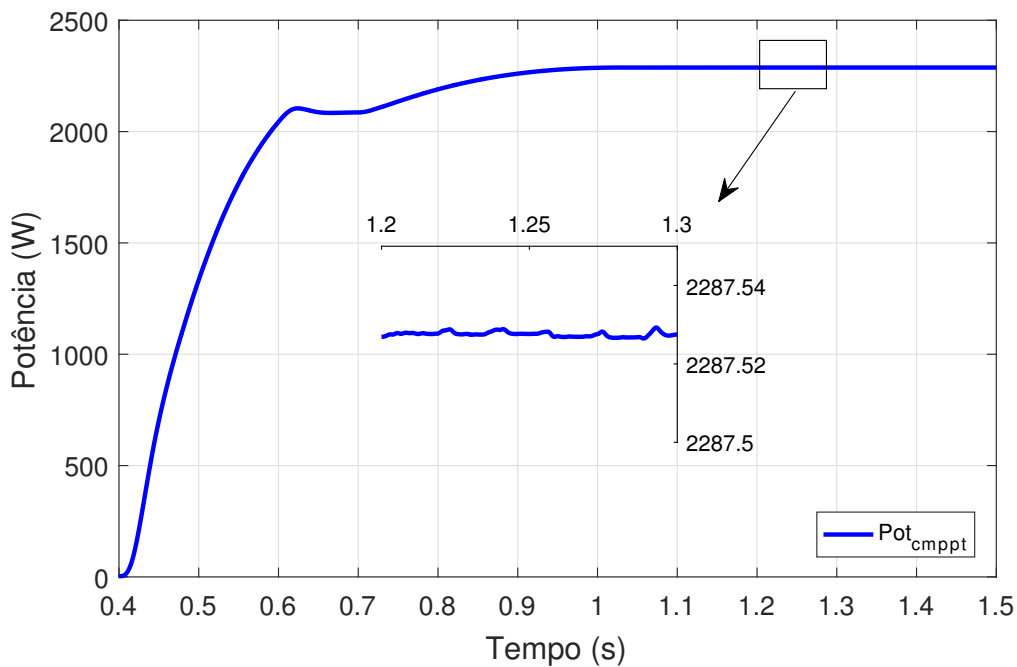
De modo análogo, as Figuras 50 e 51 ilustram o comportamento do controle de tensão do barramento CC e a curva de potência injetada pelo sistema FV com a implementação do MPPT.

Figura 50 – Tensão no barramento CC (V_{cc}) para o método PeO para irradiância de 800 W/m^2 , e temperatura de $47,9^\circ\text{C}$.



Fonte: O autor.

Figura 51 – Curva de potência sem o MPPT para irradiância de 800 W/m^2 , e temperatura de $47,9^\circ\text{C}$.



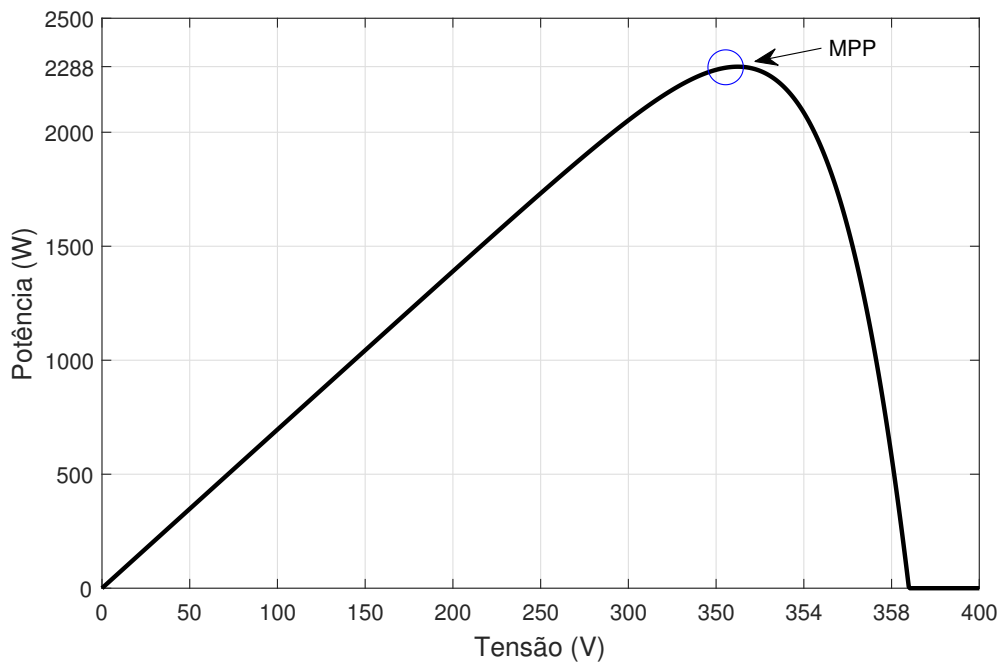
Fonte: O autor.

Comparando as Figuras 48 e 50 com as Figuras 49 e 51, observou-se que o sistema implementado com método de MPPT apresenta um ganho de potência de aproximadamente 200 W, cerca de 10 % acima da potência gerada sem o método. Observa-se ainda que a vantagem do

método PeO se torna mais evidente para diferentes temperaturas.

Ainda para a análise do método quanto ao seu desempenho, a Figura 52 ilustra o comportamento da potência do arranjo FV em função da tensão, apresentando um ponto de máxima potência a partir da modelagem realizada para os módulos nas mesmas condições de irradiância de 800 W/m^2 e temperatura de $47,9^\circ\text{C}$.

Figura 52 – Curva de potência do arranjo FV com definição do MPP para irradiância de 800 W/m^2 , e temperatura de $47,9^\circ\text{C}$.



Fonte: O autor.

Ao observar a potência do sistema com a implementação do MPPT, a partir da análise da Figura 51, nota-se que a potência alcançada com o método está muito próxima da potência máxima teórica, ilustrada na Figura 52, com o valor próximo de 2288 W, sendo, portanto, a produção de potência ativa maior, utilizando o algoritmo de MPPT.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho mostrou, por meio de simulação, a operação de um sistema FV conectado à rede elétrica, a partir da topologia de estágio único, utilizando a técnica de MPPT com algoritmo PeO para obtenção da máxima potência do sistema.

A energia solar produzida através do efeito fotovoltaico é uma das formas de produção de energia promissora e contribui para a manutenção da característica renovável da matriz energética.

Na modelagem do módulo fotovoltaico se obteve as curvas características de tensão e potência que representaram de modo satisfatória o seu comportamento, sendo validado a partir da comparação das curvas fornecidas pelo fabricante com as curvas obtidas via simulação.

Conforme visto nesse trabalho, a implementação do algoritmo MPPT satisfaz o objetivo de busca do MPP e tem como saída a tensão de referência para o controle de tensão do barramento CC do conversor eletrônico que é responsável por manter a tensão no valor de referência, em virtude disso, eleva o rendimento do sistema. Baseado na análise dos dados medidos, comparou-se o comportamento do sistema nas condições sem o método de MPPT e com método e pode-se constatar que ao implementar a técnica de MPPT se obteve uma maior potência média fornecida pelos módulos.

A estratégia de controle proposta é composta por duas malhas em cascata: uma malha de controle de corrente gerada pelo conversor e uma para controle do barramento CC. Ao analisar os resultados obtidos a implementação dos controladores desse sistema, a partir da estratégia em coordenadas dq , projetados a utilizando o método de resposta em frequência, obtiveram um bom desempenho no comportamento dinâmico do sistema. Como verificado para três diferentes irradiâncias os controles de corrente seguiram suas referências, assim como o controle da tensão em que o V_{cc} seguiu a referência $V_{cc_{ref}}$ regulando a tensão do barramento CC. Desta forma, foi possível verificar a injeção de potência para os casos estudados.

Analisando os resultados de TDH, verifica-se que o nível de harmônico injetado na rede está dentro dos limites mais exigentes e recomendado pela norma IEEE-519:1992, que recomenda níveis de TDH inferiores a 5% para tensões, e para correntes uma faixa de recomendação de 5% até 20% à depender da corrente de curto-circuito da instalação.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Dentre os trabalhos futuros estão:

- Utilização de diferentes técnicas de controle ao sistema;
- Utilização de outras topologias e estágios de conversão;
- Adicionar sistema de armazenamento de energia com estudo de conversor bidirecional.

REFERÊNCIAS

- ABSOLAR. **Perspectiva para a geração centralizada solar fotovoltaica no Brasil**. 2019. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/>>. Acesso em: 11 jun.2019.
- BARRETO, R. L. **CONTRIBUIÇÃO AO MÉTODO DE RASTREAMENTO DE MÁXIMA POTÊNCIA PARA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**. 2014. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Universidade Federal de Rio Grande do Norte, Natal, 2014.
- CARNEIRO, J. curta de animação, **Electromagnetismo B. Módulos Fotovoltaicos**. 2010. Universidade do Minho.
- CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. *Eletrônica de Potência*, vol. 13, no. 3, 2008.
- ELY, F.; SWART, J. W. Energia solar fotovoltaica de terceira geração. *Advancing Technology for Humanity*, IEEE - Brasil, 2014.
- FEMIA., N.; PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M. **Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems**. [S.l.]: Taylor Francis Group, 2013. S.l.
- GUAN-CHYUN, H.; JAMES, C. Phase-locked loop techniques - a survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*., 1996.
- HICKS, C.; BAGHZOUZ, Y. Power quality of residential pv system under low solar irradiance and off-grid operation. *IEEE 18ª Conferência Internacional sobre Harmônicos e Qualidade de Energia (ICHQP)*., 2018.
- MARTINS, G. S. **TÉCNICAS DE CONTROLE DE POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA UTILIZANDO GERADOR DE INDUÇÃO GAIOLA DE ESQUILO APLICADO A UM SISTEMA DE GERAÇÃO EÓLICA**. 2018. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- MOREIRA, A. B. **PROPOSTAS DE CONTROLE DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE ENERGIA EÓLICA COM GERADOR DE INDUÇÃO DUPLAMENTE ALIMENTADO COM MITIGAÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS NA REDE ELÉTRICA GERADAS POR CARGA NÃO LINEAR**. 2017. 156 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. [S.l.]: Pearson, 2011. v. 5ª edição.
- SUEBKINORN, W.; NEAMMANEE, B. An implementation of field oriented controlled scig for variable speed wind turbine. *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*., 2011.
- SUMATHI, S.; KUMAR, L.; SUREKHA, P. **Solar PV and Wind Energy Conversion Systems**. [S.l.]: Springer, 2015. S.l.
- VILLALVA, M.; GAZOLI, J. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *Power and Energy Magazine, IEEE* , v.24, n.5., 2009.

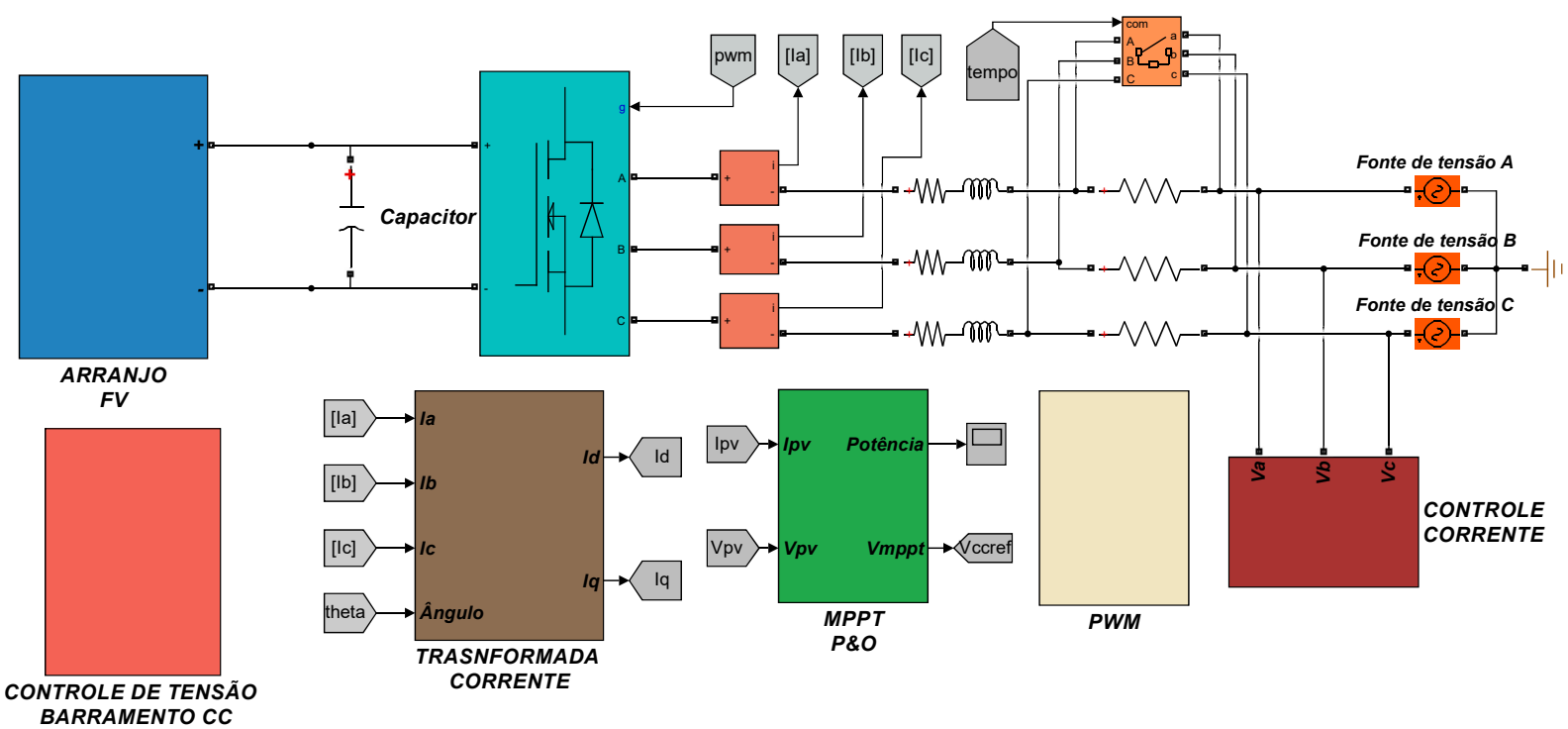
VILLALVA, M. G. **Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e aplicações.** [S.l.]: Erica/Saraiva, 2012. v. 2.

WANNER, B. **Is exponential growth of solar PV the obvious conclusion.** 2019. Disponível em: <<https://www.iea.org/>>. Acesso em: 11 jun.2019.

YAZDANI, A.; IRAVANI, R. **Voltage-sourced converters in power systems : modeling, control, and applications.** [S.l.]: John Wiley Sons, 2010. S.l.

APÊNDICE A – SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Diagrama esquemático do sistema de geração fotovoltaico conectado à rede elétrica implementado no software MatLab/Simulink.



ANEXO A - DATASHEET KYOCERA KD210GX-LPU

New Zero Tolerance
Greater Field Performance



210 WATT

HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL
PHOTOVOLTAIC MODULE



KD210GX-LPU

NEC 2008 Compliant
UL 1703, Class C
IEC 61215



CUTTING EDGE TECHNOLOGY

As a pioneer with 35 years in solar, Kyocera demonstrates leadership in the development of solar energy products. Kyocera's *Kaizen* Philosophy, commitment to continuous improvement, is shown by repeatedly achieving world record cell efficiencies.

Kyocera Quality Built In:

- New frame technology allows for end mounting with 2400 Pa (50 psf) or wind speeds of 130 mph (ASTM E1830) and traditional mounting under 5400 Pa (113 psf) to support increased snow load
- UV stabilized, aesthetically pleasing black anodized frame
- Supported by major mounting structure manufacturers
- Easily accessible grounding points on all four corners for fast installation
- Proven junction box technology
- Quality locking plug-in connectors to provide safe & quick connections

Kyocera manufactures and assembles solar cells and modules at its own worldwide production sites using a true vertical integration process. This superior approach gives Kyocera complete control over every step of the manufacturing process, producing modules with the industry's tightest power tolerance, promising high quality and efficiency.

- Superior Built-In Quality
- Proven Superior Field Performance
- Tight Power Tolerance
- 20 Year Warranty
- 2 Year Workmanship Warranty

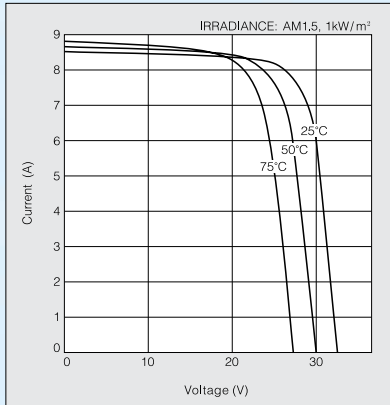


SOLAR by KYOCERA

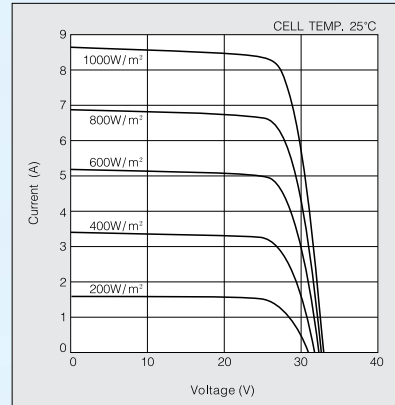
KD210GX-LPU

ELECTRICAL CHARACTERISTICS

Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KD210GX-LPU at various cell temperatures



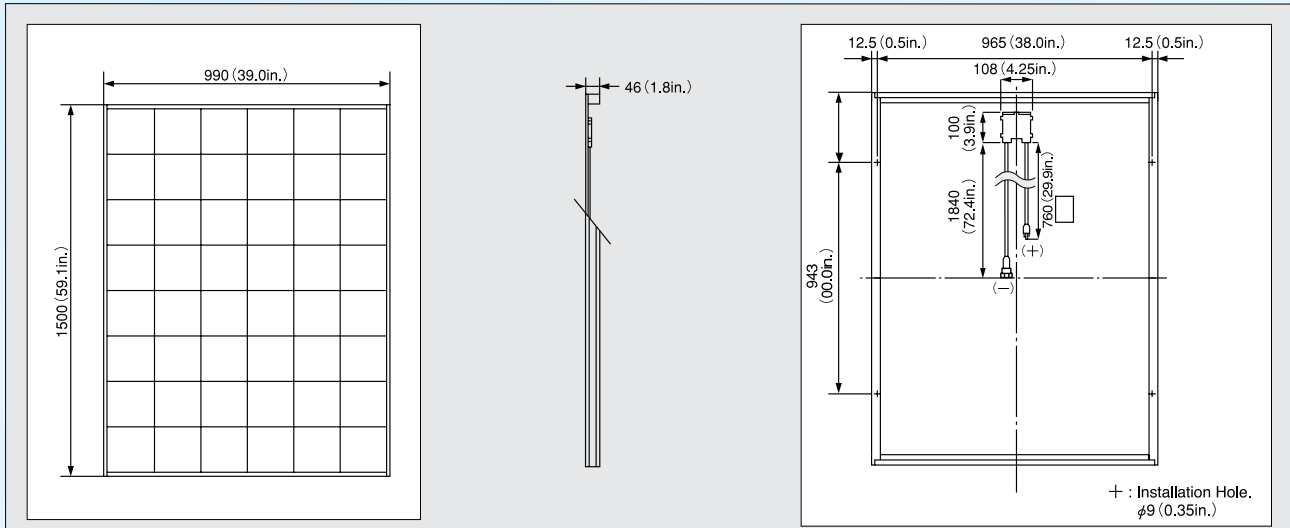
Current-Voltage characteristics of Photovoltaic Module KD210GX-LPU at various irradiance levels



SPECIFICATIONS

Physical Specifications

Unit : mm (in.)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)

Maximum Power (P _{max})	210W (+5W/-0W)
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	26.6V
Maximum Power Current (I _{mp})	7.90A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	33.2V
Short Circuit Current (I _{sc})	8.58A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of V _{oc}	-1.20×10 ⁻¹ V/°C
Temperature Coefficient of I _{sc}	5.15×10 ⁻³ A/°C

*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, cell temperature 25°C

Electrical Performance at 800W/m², *NOCT, AM1.5

Maximum Power (P _{max})	149W
Maximum Power Voltage (V _{mpp})	23.6V
Maximum Power Current (I _{mp})	6.32A
Open Circuit Voltage (V _{oc})	30.0V
Short Circuit Current (I _{sc})	6.62A

*NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47.9°C

Cells

Number per Module	54
-------------------	----

Module Characteristics

Length × Width × Depth	1500mm(59.1in.)×990mm(39.0in.)×46mm(1.8in)
Weight	18kg(39.7lbs.)
Cable	(+)760mm(29.9in.), (-)1840mm(72.4in)

Junction Box Characteristics

Length × Width × Depth	100mm(3.9in.)×108mm(4.3in.)×15mm(0.6in)
IP Code	IP65

Others

*Operating Temperature	-40°C ~ 90°C
Maximum Fuse	15A

*This temperature is based on cell temperature.

ISO 9001 and ISO 14001 Certified and Registered

www.kyocerasolar.com
800-223-9580 toll free 800-523-2329 fax

