

FRANCISCO ANTÔNIO FERREIRA DOS SANTOS JUNIOR

**MODELAGEM, ANÁLISE E EXPERIMENTAÇÃO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO ISOLADO BASEADO EM PLATAFORMA DE
SIMULAÇÃO COM DIAGRAMA DE BLOCOS**

JOÃO PESSOA – PB

2016

FRANCISCO ANTÔNIO FERREIRA DOS SANTOS JUNIOR

**MODELAGEM, ANÁLISE E EXPERIMENTAÇÃO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO ISOLADO BASEADO EM PLATAFORMA DE
SIMULAÇÃO COM DIAGRAMA DE BLOCOS**

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

Orientadores:

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

JOÃO PESSOA – PB

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Ferreira dos Santos, Francisco A. Jr.

Modelagem, Análise e Experimentação de Sistema Fotovoltaico Isolado Baseado em Plataforma de Simulação com Diagrama de Blocos – João Pessoa, 2016.

Nº de páginas: 84

Área de concentração: Otimização de sistemas de energia.

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

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba

1. Sistema fotovoltaico, modelagem, Simulink, push-pull fonte de corrente, inversor de tensão, bombeamento d'água

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a dissertação do Mestrado.

**MODELAGEM, ANÁLISE E EXPERIMENTAÇÃO DE SISTEMA
FOTOVOLTAICO ISOLADO BASEADO EM PLATAFORMA DE
SIMULAÇÃO COM DIAGRAMA DE BLOCOS**

Elaborado por

FRANCISCO ANTÔNIO FERREIRA DOS SANTOS JUNIOR

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

COMISSÃO EXAMINADORA

DR. DARLAN ALEXANDRIA FERNANDES

DR. ROGÉRIO GASPAR DE ALMEIDA

DR. CÍCERO DA ROCHA SOUTO

DR. HELON DAVID DE MACEDO BRAZ

João Pessoa/PB, 29 de Fevereiro de 2016.

Dedico:

A Deus, em primeiro lugar, a minha família e meus amigos, que sempre acreditaram na minha capacidade e vontade de vencer, diante dos desafios que tenho enfrentado. Aos meus orientadores Dr. Darlan Alexandria Fernandes e o Dr. Rogério Gaspar de Almeida que, sempre se estiveram dispostos a ajudar, mesmo diante de todas as minhas dificuldades.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me guiado e iluminado o meu caminho, não deixando que me abatesse pelos espinhos e pedras encontrados durante este ciclo que se finaliza com este trabalho de dissertação de mestrado.

A minha esposa Fernanda Marques de Almeida Holanda e minha filha Lívia Holanda dos Santos por se constituírem diferentemente enquanto pessoa, igualmente belas e admiráveis em essência, estímulos que me impulsionaram a buscar vida nova a cada dia, meus agradecimentos por ter aceitado a se privar de minha companhia pelos estudos, concedendo a mim a oportunidade de me realizar ainda mais.

Ao meu irmão Sócrates Golzio e minhas irmãs Sarah Golzio e Soraya Golzio, pela base sólida que sempre me deu força para encarar a vida de frente. Aos meus pais, pela dedicação em formar a todos os seus filhos. A minha mãe Clênia Golzio por cumprir este papel magistralmente e pelo amor intenso.

Aos meus amigos do Trabalho Pedro Nascimento, Eduardo Oliveira, Eude Haniel, Christiane Soares e Ardyllhes Diego, pela ajuda em cobrir minha falta no trabalho devido ao mestrado.

Aos meus amigos do mestrado Márcia Karolina Vieira, Tatiana Guedes e Weyber Santana, pelo apoio no projeto.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Darlan Alexandria Fernandes e co-orientador Rogério Gaspar de Almeida pelo apoio e pela extrema competência e dedicação, que me deram uma oportunidade de ingressar no mundo da pesquisa.

A todos os professores e seus convidados pelo carinho, dedicação e entusiasmo demonstrado ao longo do curso.

Aos amigos do mestrado pela espontaneidade e alegria na troca de informações e materiais numa rara demonstração de amizade e solidariedade.

E, finalmente, a DEUS pela oportunidade e pelo privilégio que nos foram dados em compartilhar tamanha experiência e, ao frequentar este curso, perceber e atentar para a relevância de temas que não faziam parte, em profundidade, das nossas vidas.

"É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e ver a vida passar; é melhor tentar, ainda que em vão, que sentar-se fazendo nada até o final. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora louco, que em conformidade viver..."

(Martin Luther King)

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	IX
RESUMO.....	XII
ABSTRACT.....	XIII
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 MOTIVAÇÃO	17
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
2 MODELAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO ISOLADO	21
2.1 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.2 MODELO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA.....	26
2.3 MODELO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DA REGULAÇÃO DE TENSÃO PV.....	34
2.4 MODELAGEM DO BLOCO PWM DO CONVERSOR PUSH-PULL	42
2.5 TÉCNICA DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTENCIA.....	43
2.6 MODELO DO SISTEMA DE CONTROLE COM A CARGA CHAVEADA	45
2.7 MODELO DO SISTEMA DE INVERSÃO COM CARGA CA	47
3 RESULTADOS E ANÁLISES DE SIMULAÇÃO.....	52
3.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÕES	52
3.1.1 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO	52
3.1.2 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO – CONVERSOR PUSH-PULL - CARGA RESISTIVA.....	54
3.1.3 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO – CONVERSOR PUSH-PULL – CARGA CHAVEADA.....	57
3.1.4 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO – CONVERSOR PUSH-PULL – INVERSOR TRIFÁSICO PWM E MOTOBOMBA.....	60
4 RESULTADOS E ANÁLISES EXPERIMENTAIS	66
4.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	66
4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	72
5 CONCLUSÃO	80
REFERÊNCIAS.....	82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Média global de Irradiação solar.	15
Figura 1.2 – Potência global instalada de energia solar fotovoltaica de 2004 a 2014.....	16
Figura 2.1 – Circuito Equivalente do Painel Fotovoltaico por Venkatesh Busa (2012).....	22
Figura 2.2 – Modelo de Sistema desenvolvido por VIOREL (2012).....	23
Figura 2.3 – Circuito equivalente do Painel utilizado em (SOETEDJO, LOMI, <i>et al.</i> , 2012)..	23
Figura 2.4 – Sistema fotovoltaico desenvolvido por (MOSTEFAI, KHEMLICHE e BADOUD, 2015)	24
Figura 2.5 – Proposta de Sistema modelado em (ADHIKARI, SINGH, <i>et al.</i> , 2011).....	25
Figura 2.6 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica	27
Figura 2.7 – Modelo da corrente fotogerada	30
Figura 2.8 – Modelo da corrente de saturação.....	31
Figura 2.9 – Diagrama de blocos que representa o modelo de um painel fotovoltaico	32
Figura 2.10 – Bloco do modelo do painel fotovoltaico	33
Figura 2.11 – Janela com entradas para os parâmetros do painel fotovoltaico	33
Figura 2.12 – Diagrama elétrico do conversor Push-Pull.....	35
Figura 2.13 – Diagrama elétrico do conversor <i>Push-Pull</i> conectado ao painel fotovoltaico ..	35
Figura 2.14 – Diagrama elétrico do conversor <i>Push-pull</i> com as chaves q_a e q_b fechadas...	36
Figura 2.15 – Modelo do indutor de entrada L_f	37
Figura 2.16 – Modelo do capacitor de entrada C_1	37
Figura 2.17 – Diagrama elétrico do conversor <i>Push-Pull</i> com a chave q_a fechada.....	38
Figura 2.18 – Diagrama elétrico do conversor <i>Push-Pull</i> com as chaves q_a e q_b fechadas ..	39
Figura 2.19 – Diagrama elétrico do conversor <i>Push-Pull</i> com a chave q_b fechada.....	39
Figura 2.20 – Modelo do capacitor de saída C_2	40
Figura 2.21 – modelo do indutor de L_1	41
Figura 2.22 – Diagrama de blocos que representa o modelo do <i>Push-Pull</i>	42
Figura 2.23 – Forma de onda dos pulsos do conversor push-pull alimentado em corrente. .	42
Figura 2.24 – Diagrama de bloco do controle PWM	43
Figura 2.25 – Fluxograma da técnica Perturba e Observa	44
Figura 2.26 – Bloco da técnica P&O de rastreamento do ponto de máxima potência	45
Figura 2.27 – Diagrama elétrico da carga chaveada	46
Figura 2.28 – Diagrama de bloco que representa a carga eletrônica	47
Figura 2.29 – Diagrama elétrico do inversor de tensão	48
Figura 2.30 – Diagrama de bloco que representa o inversor de tensão	49
Figura 2.31 – Diagrama de bloco que representa controle PWM	50
Figura 3.1 – Painel fotovoltaico e dispositivos par gerar as curvas I_xV e P_xV	52

Figura 3.2 – Curvas característica I x V do painel fotovoltaico	53
Figura 3.3 – Curvas característica P x V do painel fotovoltaico	54
Figura 3.4 – Modelo do Push-pull com uma carga resistiva.	55
Figura 3.5 – Potência gerada pelo painel fotovoltaico entrada do Push-pull	56
Figura 3.6 – Tensão e corrente gerada pelo painel fotovoltaico entrada do Push-pull.....	56
Figura 3.7 – Tensão na saída do push-pull com carga resistiva.....	57
Figura 3.8 – Corrente de saída do Push-pull com carga resistiva.	57
Figura 3.9 – Modelo do sistema utilizando a carga eletrônica	58
Figura 3.10 – Potência do Painel na entrada do Push-pull com carga chaveada	58
Figura 3.11 – Tensão e Corrente do painel na entrada do Push-pull com carga chaveada..	59
Figura 3.12 – Tensão do barramento regulado pela carga chaveada.....	59
Figura 3.13 – Modelo do sistema Completo Conversores CC-CC e CC-CA e carga	60
Figura 3.14 – Configuração de um painel solar comercial.....	61
Figura 3.15 - Potência do Painel com carga CA na saída	62
Figura 3.16 - Tensão e Corrente do painel com carga CA na saída	62
Figura 3.17 – Tensão do barramento regulada pelo inversor com carga CA.....	63
Figura 3.18 – Corrente trifásico na carga CA	63
Figura 3.19 – Corrente trifásica senoidal na carga CA	64
Figura 4.1 – Configuração do sistema proposto.....	66
Figura 4.2 – Emulador do painel fotovoltaico	67
Figura 4.3 – Conversor <i>Push-Pull</i>	68
Figura 4.4 – Inversor de tensão trifásico IRAM™	69
Figura 4.5 – carga hidráulica completa	69
Figura 4.6 – Processador digital de sinais (TMS320F28335)	71
Figura 4.7 – Bancada experimental do sistema fotovoltaico completo	71
Figura 4.8 – Sinais <i>PWM</i> das chaves do <i>Push-Pull</i>	73
Figura 4.9 – <i>Display</i> do emulador solar fotovoltaico	74
Figura 4.10 – Medições do comportamento do sistema (<i>SAS mode</i>).....	75
Figura 4.11 – Corrente de uma das fases da carga hidráulica	75
Figura 4.12 – Medições dos sinais do sistema proposto	77
Figura 4.13 – Variações das medições dos sinais do sistema proposto.....	77
Figura 4.14 – Sinal <i>PWM</i> senoidal.....	78

LISTA DE SÍMBOLOS

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

DSP – *Digital Signal Processing* (Processador Digital de Sinais)

I_{sc} – Corrente de Curto-Circuito

I_{mp} – Corrente de Máxima Potência

IGBT – *Insulated Gate Bipolar Transistor* (Transistor Bipolar de Porta Isolada)

Mosfet – *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor* (transistor de efeito de campo)

MPPT – *Maximum Power Point Tracking* (Rastreamento do Ponto de Máxima Potência)

P&O – Pertuba e Observa

PCI – Placa de Circuito Impresso

PWM – *Pulse-Width Modulation* (Modulação Por Largura De Pulso)

PV – *Photovoltaic* (fotovoltaico)

SAS – *Solar Array Simulator* (Simulador de matriz solar)

V_{mp} – Tensão de Máxima Potência

V_{oc} – Tensão de Circuito Aberto

RESUMO

MODELAGEM, ANÁLISE E EXPERIMENTAÇÃO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO ISOLADO BASEADO EM PLATAFORMA DE SIMULAÇÃO COM DIAGRAMA DE BLOCOS

Resumo: Este trabalho apresenta uma modelagem em diagramação de blocos de um sistema de geração de energia fotovoltaico isolado, incluindo as etapas de regulação CC, inversão de tensão e sistema de controle com base em simulações dinâmicas no ambiente *Simulink/Matlab*[®] utilizando, exclusivamente, os blocos *built-in* disponíveis em sua biblioteca. Uma técnica bem conhecida na literatura foi utilizada para o rastreamento da máxima potência da geração fotovoltaica. No entanto, o controle utilizado para manter a tensão de saída constante do *Push-Pull* é baseado num método similar ao do rastreamento da máxima potência, o que configura uma novidade deste trabalho. A integração da modelagem de todo o sistema fotovoltaico com estes sistemas de controle é realizada no ambiente *Simulink* para averiguação e produção dos resultados de simulação. Uma plataforma experimental que inclui um emulador de painéis fotovoltaicos, um *Push-Pull* de 1 kW de potência, um inversor trifásico de três braços e uma carga hidráulica constituída por um motobomba foi construída em laboratório. Os resultados experimentais corroboram a metodologia utilizada.

Palavras-chaves: Sistema Fotovoltaico, Modelagem, *Simulink/Matlab*[®], *Push-pull* fonte de corrente, inversor de tensão, bombeamento d'água.

ABSTRACT

MODELING AND ANALYSIS OF A PHOTOVOLTAIC SYSTEM BASED ON BLOCK DIAGRAM SIMULATION

Abstract: This paper presents a block diagram modeling of a grid-independent photovoltaic power generation system, including the steps of DC regulation, voltage inversion, and control system based on dynamic simulations in Simulink / Matlab[®] exclusively using the built-in blocks available in its library. A well-known technique in literature called MPPT (maximum power point tracking) was used for tracking the maximum power of the photovoltaic generation. However, the control that was used to maintain a constant output voltage of the Push-Pull is based on a method that is similar to the MPPT, which configures a novelty of this research. The integration of modeling the entire PV system with these control systems is carried out in Simulink for investigation and production of simulation results. An experimental platform that includes an emulator of photovoltaic panels, a 1 kW Push-Pull converter, a three-phase inverter with three arms and a hydraulic load constituted by a motor-pump was built in the laboratory. The experimental results corroborate the methodology that was used.

Keywords: Photovoltaic system, modeling, Simulink/Matlab[®], Push-pull current source, voltage inverter, water pumping.

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

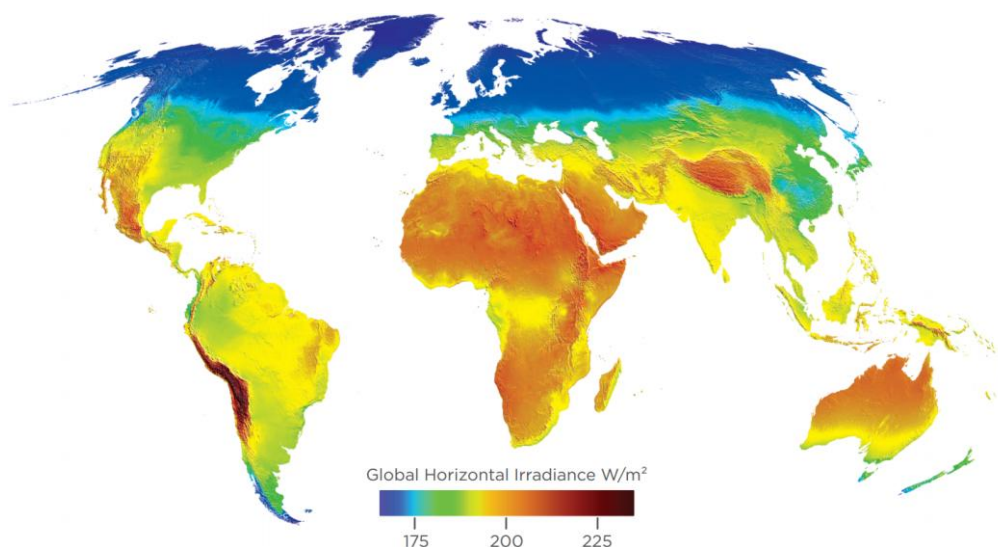
Em países em desenvolvimento, sistemas de energia renovável distribuídos oferecem oportunidade sem precedentes em acelerar a transição para serviços modernos e o aumento do acesso à energia elétrica. O mais rápido crescimento e maior aumento da capacidade renovável ocorreram no setor de energia, e foi dominado por três tecnologias: eólicos, solares fotovoltaicos (PV) e energia hidrelétrica.

No final do ano de 2014, as energias renováveis chegaram a um nível estimado em 27,7% da capacidade de geração de energia do mundo, o suficiente para abastecer 22,8% da eletricidade global (REN21, 2015).

A energia solar fotovoltaica é considerada uma das fontes de energia mais promissoras, devido à enorme potência disponível do sol, baixa poluição e pouco ruído na conversão de energia (BHATNAGAR e NEMA, 2013).

As instalações dos sistemas de geração fotovoltaicos são muito adequadas em localidades onde existe um índice elevado de irradiação solar, pois a geração de energia solar está diretamente relacionada a essa quantidade de irradiação. A média global de irradiação solar referente ao ano de 2014 é mostrada na Figura 1.1.

Figura 1.1 – Média global de Irradiação solar.

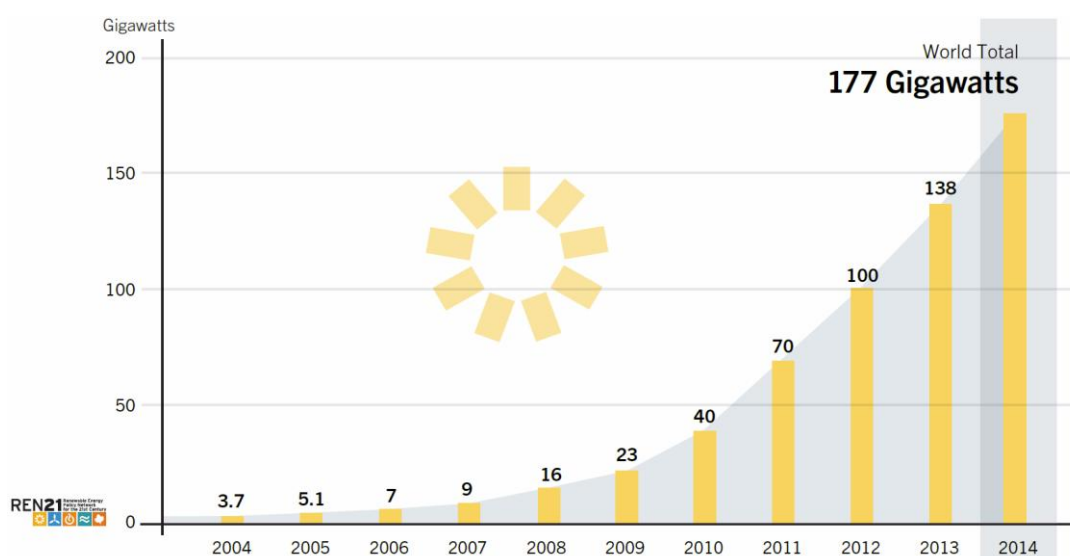


Fonte: www.vaisala.com

Conforme ilustrado na Figura 1.1, o Brasil, por ter sua localidade próxima à linha do Equador, é um país que possui grande área com radiação solar incidente, o que vem atraindo muito incentivo por esta produção de energia.

A potência total proveniente da energia solar fotovoltaica instalada cresce, em média, a uma taxa de 70% ao ano (REN21, 2015), como mostrado na Figura 1.2. No entanto, essa fonte energética, ainda apresenta dificuldade por possuí baixa eficiência em sistemas de geração distribuída¹.

Figura 1.2 – Potência global instalada de energia solar fotovoltaica de 2004 a 2014.



Fonte: ren21.net

A baixa eficiência dos painéis fotovoltaicos gera uma enorme dificuldade para se ter um bom controle do sistema de geração. Caso esses dispositivos não tenham um sistema devidamente controlado, a conexão do mesmo à rede elétrica pode levar a uma instabilidade ou até mesmo ao colapso do sistema. Devido a essa preocupação, há um alto interesse nas estratégias de controle aplicadas aos sistemas de geração fotovoltaica.

¹. A geração distribuída se caracteriza pela utilização de geradores elétricos ligados a sistemas de baixa e média tensão de forma distribuída.

O rápido crescimento populacional, o aumento de consumo de energia, principalmente, em países em desenvolvimento é um dos fatores que impulsiona as pesquisas com energias renováveis.

O controle do sistema de geração utilizado em acionamento de um motor trifásico para um bombeamento de água pode ser considerado uma ótima aplicação da energia elétrica fotovoltaica isolada, e sua otimização se torna bastante interessante, no ponto de vista acadêmico. Este tipo de sistema é bastante utilizado em lugares remotos e com difícil acesso às linhas de transmissão, pois sua instalação em pequena escala não requer enormes investimentos.

O bombeamento de água é uma das atividades mais difundidas quanto ao emprego da energia solar fotovoltaica (M.KOLLING, M., *et al.*, 2004). A utilização da água bombeada pode ser empregada no abastecimento doméstico e higienização, bem como para irrigação no campo, piscicultura e no abastecimento em sistemas de criação de animais no setor agrícola.

Uma das ferramentas mais importantes para se projetar e verificar o desempenho de um controle do sistema de geração fotovoltaico é o uso correto de simulações dinâmicas. Essas simulações podem ajudar também na concepção de parâmetros críticos do sistema e na segurança dos geradores. Além disso, dentro de um contexto onde a geração renovável está se tornando mais relevante para a matriz energética de muitos países, a simulação de tais sistemas está crescendo numa proporção significativa.

1.1 MOTIVAÇÃO

Os pacotes comerciais de simulação contêm dispositivos pré-definidos em sua estrutura, como é o caso do *PSIM*[®], *PSPICE*[®], *PSCAD*[®]/*EMTDC*[®], *SimPowerSys*[®], entre outros. O *Simulink* é um *toolbox* do *Matlab*[®] desenvolvido para programação com diagramação de blocos. Cada versão lançada traz novidades com novas funções internas e facilidades de comunicação com o usuário, inclusive com *hardwares* de microcontroladores ou mesmo simuladores de tempo real.

Os dispositivos pré-definidos dão ao usuário uma facilidade para implementação e conseqüentemente para as análises de desempenho, transitórios e regime permanente. No entanto, o usuário fica restrito a utilizar apenas estas configurações pré-definidas sem acesso aos seus conteúdos internos.

Por exemplo, o bloco pré-definido de painel fotovoltaico na versão 2015 do *toolbox SimPowerSys*[®], que é compatível com o *Simulink*[®], tem como variável de saída, a tensão. Se o estudo que está sendo feito do sistema fotovoltaico necessita da corrente como saída, isto torna o bloco inviável para utilização.

Outro aspecto a ser destacado é que o controle do barramento CC nos sistemas fotovoltaicos, que está localizado entre o regulador CC/CC e o inversor de tensão, são tradicionalmente feito por controladores do tipo proporcional-integral (PI), a partir da medição da corrente de uma das fases do inversor. Seria bastante interessante ter um controlador alternativo que realizasse o controle a partir da medição de tensão, disponibilizando-se assim uma opção de controle do barramento a partir da medição de tensão da própria variável controlada, e ainda, que seja também de fácil implementação, não demandando tempo de processamento excessivo, uma vez que será utilizada em tempo real.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia de implementação de um sistema fotovoltaico isolado completo em ambiente *Simulink*[®], apenas com o uso de blocos das funções *built-in* que estão disponíveis, sem nenhum dispositivo de outro *toolbox* do *Matlab*[®]. Ainda, propor uma técnica de controle simples para regular a tensão do barramento CC em situações diversificadas de operações com um inversor de tensão que seja diferente de um PI, mas que mantenha a mesma agilidade computacional para implementações em tempo real.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os modelos serão desenvolvidos e simulados pela plataforma do *software Simulink/Matlab*[®]. Dois cenários de simulações são levados em conta neste trabalho:

- O primeiro abrange as etapas de modelagem da geração fotovoltaica, do conversor CC/CC, que utilizará uma técnica de controle para drenar o máximo de energia do gerador, e uma carga eletrônica. A carga chaveada serve para regular a tensão de saída do conversor CC/CC. Isto é exigido apenas para testar a dinâmica

do controle e eficiência do sistema, uma vez que, a tensão do barramento de saída do conversor CC/CC deve ser mantida num valor constante;

- No segundo cenário, retirada a carga eletrônica, será feita a modelagem de um inversor trifásico, que vai ser utilizado para alimentar um motobomba, regulando a tensão do barramento CC a partir de uma técnica de controle similar à que rastreia a máxima potência.

Após a modelagem e simulações de todas as fases do sistema proposto, será feito testes em bancada para comprovação experimental.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de dissertação está estruturado de acordo com os seguintes capítulos:

- No capítulo 2, são apresentadas obras literárias que serviu de base para o desenvolvimento deste trabalho e modelagem do processo de todas as fases do sistema fotovoltaico;
- No capítulo 3, são apresentados os resultados de simulações, retirados da plataforma de simulação *Simulink/Matlab*[®];
- No capítulo 4, são apresentados os resultados experimentais comprovando a parte simulada.
- No capítulo 5, apresenta-se a conclusão para o desfecho do trabalho de dissertação.

2 MODELAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTVOLTAICO ISOLADO

2 MODELAGEM DO SISTEMA DE BOMBEAMENTO FOTOVOLTAICO ISOLADO

Neste capítulo é realizada uma breve revisão da literatura na seção 2.1 sobre o sistema de geração fotovoltaica. Posteriormente nas demais seções serão feitas as modelagens dos processos de todas as fases do sistema fotovoltaico.

2.1 REVISÃO DE LITERATURA

Modelagem e simulação de um sistema fotovoltaico são etapas de grande importância, pois, é possível obter um melhor entendimento, a partir de seus modelos matemáticos representativos, de como se comportam as estruturas de um sistema desse tipo no mundo real.

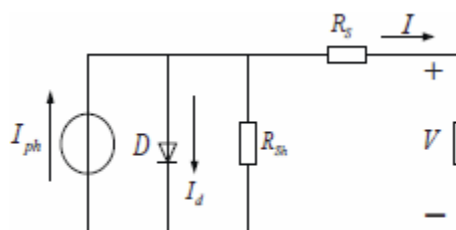
Algumas das vantagens em trabalhar com modelos matemáticos é a flexibilidade de testar esses modelos que representam um determinado sistema em diferentes cenários de simulações, avaliando seus comportamentos e limites, bem como de alterar qualquer dos componentes do sistema em estudo, minimizando assim, os custos e o tempo de implementação de um sistema real.

Dada a importância do entendimento de flexibilidade no projeto, com custo e tempo de implementação minimizados de um sistema real, descreve-se a seguir alguns trabalhos envolvendo estudos de sistemas fotovoltaicos isolados.

Em (BUSA, NARSINGOJU e KUMAR, 2012), um modelo de sistema fotovoltaico composto por um painel solar ligado a um conversor CC/CC do tipo *Boost* alimentando uma carga resistiva foi desenvolvido com o *software Simulink/Matlab*[®]. Este trabalho teve como objetivo comparar os dois métodos mais usados de rastreamento para o ponto de máxima potência do painel fotovoltaico: o método Perturba e Observa (*P&O*) e de Condutância Incremental. O modelo do painel solar fotovoltaico foi construído com base na equação característica do circuito equivalente, demonstrado na Figura 2.1.

O conversor *Boost* ligado a uma carga resistiva foi desenvolvido utilizando a biblioteca *Simpowersys*[®] que consiste de um *toolbox* específico para simulação.

Figura 2.1 – Circuito Equivalente do Pannel Fotovoltaico por Venkatesh Busa (2012)



Fonte: Venkatesh Busa (2012)

Nos resultados obtidos com simulações, os autores alegam que ambos rastreiam o ponto de máxima potência, tendo a técnica do perturba e observa (*P&O*) apresentado uma maior oscilação em torno do ponto de máxima potência do pannel fotovoltaico reduzindo um pouco da sua eficiência, mas sendo de fácil implementação exigindo menos em *hardware* e conseqüentemente diminuição de custo, e na simulação com a técnica da Condutância incremental se mostra mais precisa, tendo a desvantagem de requerer um *hardware* complexo para ser implementada.

Contudo deve-se escolher um método de controle razoável e econômico. Assim o trabalho de (BUSA, NARSINGOJU e KUMAR, 2012) não são levados em conta às fases de inversão de tensão e carga.

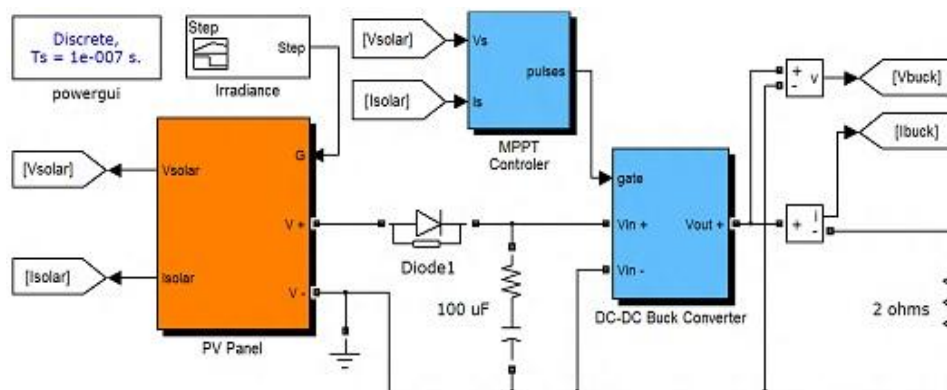
Utilizando um controle de rastreamento de máxima potência com a técnica de condutância incremental, em (VIOREL e ISTRATE, 2012) é modelado um sistema composto por um pannel fotovoltaico que alimenta uma carga resistiva através de um conversor CC/CC do tipo *Buck*. O objetivo principal deste trabalho foi estudar o comportamento abrupto de irradiância solar. Com o modelo do pannel fotovoltaico representado pelo o bloco *Lookup Table*, e o conversor desenvolvido usando alguns dos componentes da biblioteca *Simpowersys*[®] presente no *software Simulink/Matlab*[®].

Pode ser observado na Figura 2.2 que (VIOREL e ISTRATE, 2012) adicionaram paralelamente à entrada do conversor *Buck*, um circuito série composto por resistor e capacitor, devido a este tipo de conversor apresentar em sua entrada uma grande oscilação de tensão e corrente.

Este circuito possibilita um caminho para a corrente do pannel quando a chave presente na entrada do conversor *Buck* opera em sua condição de aberta, que sem esta estratégia a corrente tenderia a zero, tornando assim impossível o

correto funcionamento da técnica de condutância incremental que utiliza o valor da tensão e da corrente de saída do painel fotovoltaico.

Figura 2.2 – Modelo de Sistema desenvolvido por VIOREL (2012)

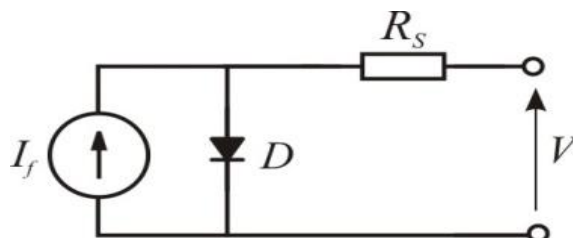


Fonte: (VIOREL e ISTRATE, 2012)

Em (SOETEDJO, LOMI, *et al.*, 2012), é modelado um sistema com o software *Simulink/Matlab*[®], composto por um painel fotovoltaico alimentando uma carga resistiva por um conversor CC/CC do tipo *Buck*, utilizando a técnica de rastreamento do ponto de máxima potência Perturba e Observa (*P&O*), que tem como entrada os parâmetros de tensão e corrente de saída do painel.

Todos os modelos foram desenvolvidos a partir das equações matemáticas que descrevem o comportamento de seus componentes. Os autores utilizaram um modelo simplificado do painel fotovoltaico, como mostrado na Figura 2.3, desprezando assim a resistência em paralelo, com a justificativa que esta possui um valor elevado, podendo então ser considerada como um circuito aberto.

Figura 2.3 – Circuito equivalente do Painel utilizado em (SOETEDJO, LOMI, *et al.*, 2012)



Fonte: (SOETEDJO, LOMI, *et al.*, 2012)

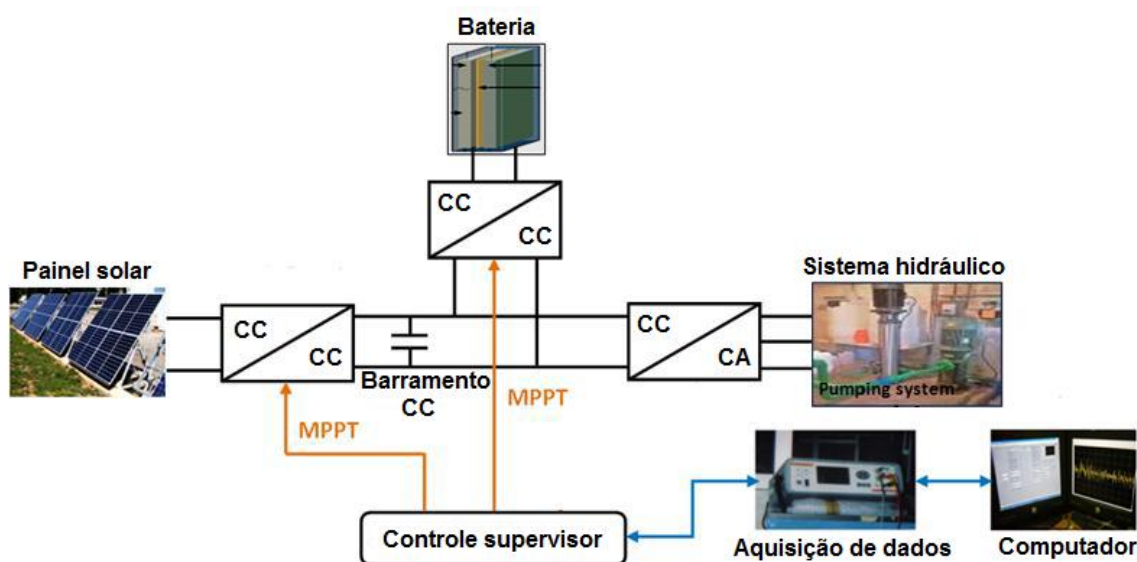
A justificativa usada em vários trabalhos que o resistor em paralelo pode ser considerado como um circuito aberto é confirmada em (LOKANADHAM e

BHASKAR, 2012), onde é feita uma modelagem e simulação da estrutura de uma célula fotovoltaica com o software *Simulink/Matlab*[®], que conclui em seu trabalho, que a resistência em paralelo deve possuir valores elevados com o objetivo de se obter uma maior potência de saída da célula.

Em (MOSTEFAI, KHEMLICHE e BADOUD, 2015) foi modelado um sistema fotovoltaico isolado como mostrado na Figura 2.4, com o *software Simulink/Matlab*[®], composto por um conjunto de painéis fotovoltaicos conectados a um conversor CC/CC do tipo *Buck-Boost* para extrair o máximo de potência disponível do gerador utilizando a técnica de rastreamento (P&O).

Para regular a tensão do barramento é utilizado um conversor CC/CC de corrente reversível, possibilitando um fluxo de corrente entre a bateria de chumbo ácido e o conversor CC/CA, garantindo assim uma tensão fixa no barramento CC. Esse conjunto do conversor CC/CC junto à bateria, responsável pela alimentação do conversor CC/CA que aciona um motobomba e garante energia suficiente na ausência de irradiância solar.

Figura 2.4 – Sistema fotovoltaico desenvolvido por (MOSTEFAI, KHEMLICHE e BADOUD, 2015)

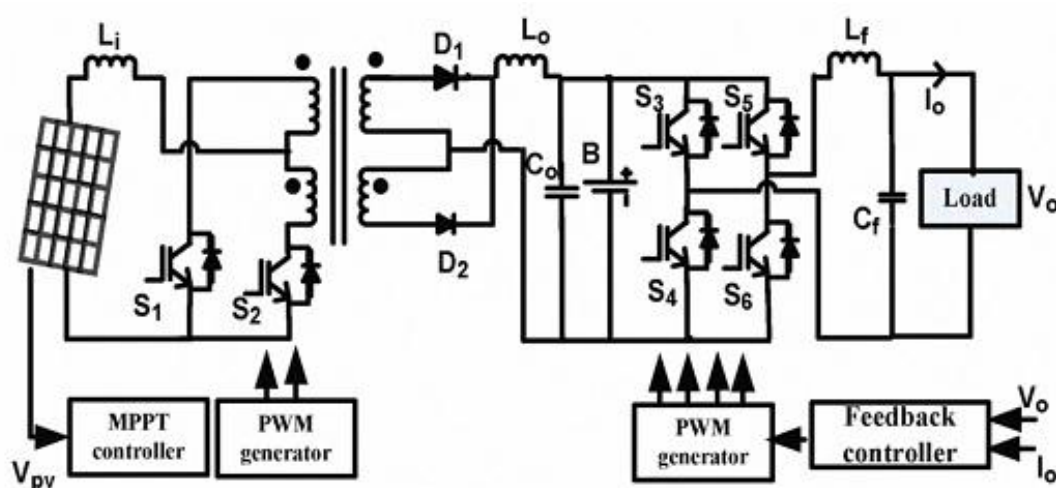


Fonte: (MOSTEFAI, KHEMLICHE e BADOUD, 2015)

Em (ADHIKARI, SINGH, *et al.*, 2011), é desenvolvido um trabalho modelando um sistema fotovoltaico isolado usando alguns dos componentes da biblioteca *Simpowersys*[®], um sistema composto por um conjunto de painéis fotovoltaicos conectados a um conversor CC/CC do tipo *Push-Pull*, como mostrado

na Figura 2.5, o qual é controlado através do sinal *PWM* gerado pelo bloco de rastreamento onde é empregada a técnica conhecida por tensão constante. Essa técnica garante uma tensão fixa no barramento CC na saída do conversor *Push-Pull*, que tem conectado, um conjunto de bateria que alimenta uma carga CA fixa de 1,5 kW através de um conversor CC/CA.

Figura 2.5 – Proposta de Sistema modelado em (ADHIKARI, SINGH, *et al.*, 2011)



Fonte: (ADHIKARI, SINGH, *et al.*, 2011)

Os autores (ADHIKARI, SINGH, *et al.*, 2011) adicionam um filtro LC na saída do conversor CA no intuito de eliminar os harmônicos presentes na tensão de saída, um controlador proporcional integral PI é empregado para corrigir o erro de valores de realimentação de sua tensão e corrente de saída com a de referência desejado na carga.

Em (MAHMOUD, XIAO e ZEINELDIN, 2012) uma modelagem com simulação do modulo fotovoltaico usando uma solução não linear é proposta. O trabalho, no entanto é focado apenas no desenvolvimento do modelo de simulação do gerador, utilizando *software Simulink/Matlab*[®], deixando de fora as outras fases responsáveis pelo condicionamento de energia.

Em (VELDHUIS e REINDERS., 2012) é utilizado um *software* de tempo real o *Quest3D*[®], apenas para emular a radiação solar em diferentes tipos de superfícies.

Em (PIAZZA, PUCCI, *et al.*, 2010) um modelo mais complexo é feito para simular a irradiação solar na superfície do painel fotovoltaico. Um conversor

Buck regula a tensão CC, em que a tensão e corrente são determinados analiticamente por um modelo neural. Como o objetivo principal é testar a resposta do painel em cenários diversificados de irradiância, não são levadas em conta as fases de inversão de tensão e carga.

Em (A. YAZDANI, KAZERANI, *et al.*, 2011), foram realizadas simulações de sistemas fotovoltaicos, com uma análise minuciosa em sistemas conectados à rede e foco nas técnicas de controle. Nesse trabalho são abordados modelos de painéis, inversores de tensão monofásica e trifásica, e filtros para sinais *PWM*. No entanto, não é mencionada a regulação de tensão CC.

Com base nas revisões das literaturas nesta seção, serão descritas a seguir as etapas de modelagem e de simulação computacional do sistema fotovoltaico isolado proposto nesta dissertação.

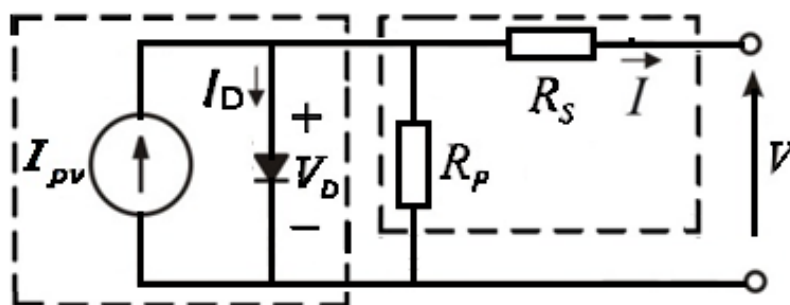
2.2 MODELO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Um gerador fotovoltaico é basicamente um arranjo de conjuntos de células de silício para fornecer determinados níveis de tensões, correntes e potência.

Inicialmente, para modelar o painel fotovoltaico precisa-se determinar o comportamento da sua menor estrutura, que é a célula fotovoltaica. Seu modelo é construído com base nas equações características que descrevem o seu comportamento representado pelo circuito elétrico equivalente mostrado na Figura 2.6 utilizado em (BUSA, NARSINGOJU e KUMAR, 2012), esta é uma das estruturas mais comumente utilizada quando se deseja reproduzir em simulação o funcionamento de um painel fotovoltaico real.

Neste circuito, a tensão V e a corrente I de saída da célula fotovoltaica vão depender da fonte de corrente fotogerada I_{pv} . Esta fonte de corrente é diretamente proporcional ao nível de irradiação solar e inversamente proporcional à temperatura de sua operação.

Figura 2.6 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica



Fonte: Do autor

O quadro tracejado à esquerda, como mostrado na esquerda da Figura 2.6, representa uma célula fotovoltaica ideal, composto pela fonte de corrente fotogerada I_{pv} e o diodo, onde este, presente no circuito, tem como função representar o comportamento da corrente de saturação da célula.

As perdas associadas a corrente de fuga (parasitas) devido às impurezas e as irregularidades referentes ao processo de fabricação da célula são representadas no segundo quadro tracejado mostrado na direita da Figura 2.6 pelas resistências em paralelo R_p e a resistência série R_s , onde se estabelece a ligação entre a célula fotovoltaica e as cargas elétricas por esta alimentadas.

A relação entre a tensão de saída (V) e a corrente (I), a partir da análise do circuito equivalente da célula fotovoltaica apresentada na Figura 2.6 para o modelo de um diodo, é dada pela equação (1).

$$V = V_D - IR_S \quad (1)$$

Aplicando a lei de *Kirchhoff*, obtemos o fluxo de corrente pela equação (2).

$$I_{pv} - I_D - \frac{V_D}{R_p} - I = 0 \quad (2)$$

Onde I_{pv} é a corrente gerada pela radiação luminosa, I_D a corrente do diodo pode ser expressa mostrada na equação (3), e I_0 sendo a corrente máxima de saturação reversa do diodo.

$$I_D = I_o \left[e^{\left(\frac{V_D}{V_t}\right)} - 1 \right] \quad (3)$$

Substituindo a equação (3) e (1) na equação (2):

$$I = I_{pv} - I_o \left[e^{\left(\frac{V_D}{V_T}\right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}, \quad (4)$$

Sendo a tensão presente nos terminais do diodo V_D obtida a partir da equação (5):

$$V_D = m \cdot V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{pv} + I_o - I - I_{Rp}}{I_o} \right) \quad (5)$$

A variável m representa parâmetro do diodo, e V_T é a tensão térmica, dado por:

$$V_T = \frac{kT}{q}, \quad (6)$$

Sendo T a temperatura absoluta da célula em Kelvin, $k = 1,3845 \cdot 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ é a constante de Boltzmann e q é a carga do elétron $1,6021 \cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Como descrito na equação (1), a corrente e tensão estão relacionadas de forma não linear que é uma característica da célula fotovoltaica. Logo, substituindo as equações (5) e (6) na equação (1) a tensão de saída da célula fotovoltaica fica:

$$V = m \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_{pv} + I_o - I - I_p}{I_o} \right) - IR_s. \quad (7)$$

Na equação (7), os parâmetros de corrente fotogerada I_{pv} , corrente de saturação do diodo I_o e fator de idealidade do diodo m são obtidos a partir de equações que envolvem parâmetros de referência, sendo estes parâmetros fornecidos pelos fabricantes de painéis fotovoltaicos.

A corrente fotogerada é obtida utilizando os parâmetros de referência de corrente de curto-circuito do painel I_{sc}^r , da irradiância padrão G^r (1000 W/m^2) e da irradiância G que incide sobre a célula fotovoltaica. A definição desta corrente é apresentada na equação (8).

$$I_{pv} = \frac{I_{sc}^r \cdot G}{G^r} \quad (8)$$

Já a corrente de saturação do diodo é obtida utilizando os parâmetros de referência de temperatura padrão da célula T^r , do potencial térmico de referência V_T^r e da corrente de saturação de referência I_0^r , sendo também função da temperatura da célula fotovoltaica T . Esta corrente é apresentada na equação (9).

$$I_0 = I_0^r \cdot \left(\frac{T}{T^r}\right)^3 \cdot \exp\left[\frac{Eg}{m} \cdot \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T}\right)\right], \quad (9)$$

Sendo Eg é uma constante denominada Energia de *gap* cujo valor é de 1,12eV (elétron-Volt).

O fator de idealidade do diodo é obtido utilizando os parâmetros de tensão de referência no ponto de máxima potência V_{pmax}^r , da tensão de circuito aberto do painel V_{oc} , da corrente de referência no ponto de máxima potência I_{pmax}^r , da corrente de curto circuito do painel I_{sc}^r e do potencial térmico V_T^r . Este fator é apresentado na equação (10).

$$m = \frac{2V_{pmax}^r - V_{oc}}{V_T^r \cdot \ln\left(\frac{I_{sc}^r - I_{pmax}^r}{I_{sc}^r}\right) + \frac{V_T^r \cdot I_{pmax}^r}{I_{sc}^r - I_{pmax}^r}} \quad (10)$$

De posse das equações (7) a (10) é possível construir o modelo para simulação baseado no circuito equivalente da célula fotovoltaica, apresentado na Figura 2.6. Porém, uma única célula fotovoltaica não é capaz de produzir energia suficiente para suprir as cargas a serem alimentadas pelos sistemas fotovoltaicos. Desta forma é necessário criar arranjos série e paralelo de várias células fotovoltaicas com o objetivo de se alcançar níveis de tensão e corrente desejados para a carga a qual se deseja alimentar.

Deste modo, é necessário adicionar às equações que serão utilizadas na construção do modelo do painel fotovoltaico, os parâmetros referentes ao número de células N_{cel} , número de painéis ligados em paralelo N_p e o numero de painéis ligados em série N_s .

Com a adição do número de células que compõem o painel fotovoltaico, número de painéis em série e do número de painéis em paralelo,

obtêm-se as equações (11) a (13), que juntamente com a equação (10) completam a modelagem do painel fotovoltaico utilizado neste trabalho.

$$V = m \cdot \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{N_P \cdot I_{pv} + N_P \cdot I_0 - I - I_P}{N_P \cdot I_0} \right) - \frac{N_S}{N_P} \cdot I \cdot R_S \quad (11)$$

$$I_{pv} = \frac{N_P \cdot I_{sc}^r \cdot G}{G^r} \quad (12)$$

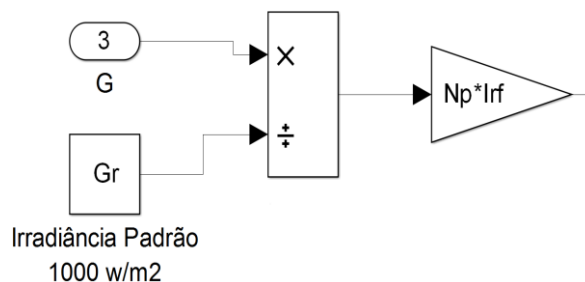
$$I_0 = I_0^r \cdot \left(\frac{T}{T^r} \right)^3 \cdot \exp \left[N_{cel} \cdot \frac{Eg}{m} \cdot \left(\frac{1}{V_T^r} - \frac{1}{V_T} \right) \right] \quad (13)$$

Para fins de controle os pontos (I, V) são numericamente computados e tem-se um procedimento alternativo para suas obtenções. O bloco gerador fotovoltaico é construído por meio de operações aritméticas: adição, subtração, produto, divisão, função exponencial e potenciação presentes na biblioteca do ambiente *Simulink*[®], tendo sua realimentação a corrente I para permitir o processo iterativo. Não há a necessidade de se aplicar qualquer método numérico a partir do uso de uma função pré-definida.

O desenvolvimento do modelo do painel fotovoltaico tem como base a equação (11) a qual apresenta como variáveis de saída, a tensão V e a corrente I , e como variáveis de entrada a corrente fotogerada I_{pv} , corrente de saturação I_0 e a temperatura do painel fotovoltaico T .

Utilizando a equação (12) foram montados os blocos referentes à corrente fotogerada como mostrado na Figura 2.7.

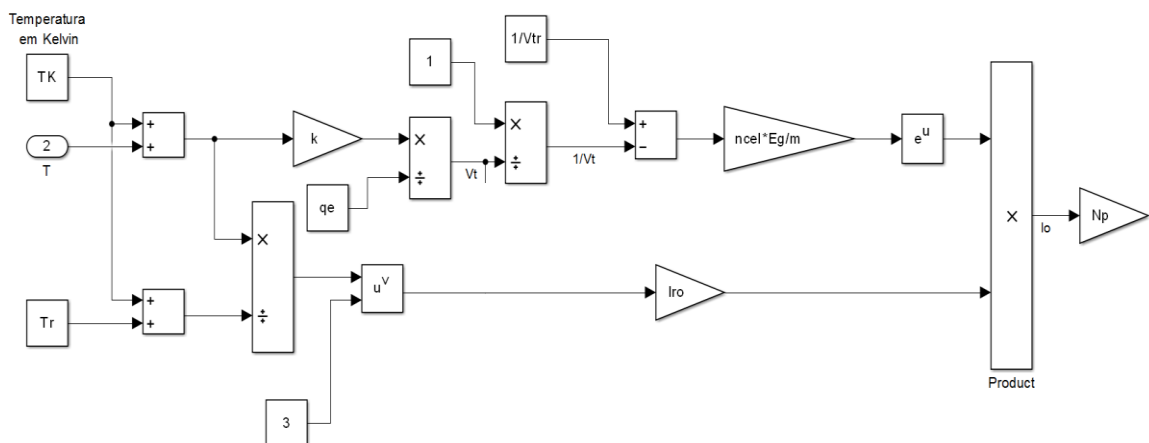
Figura 2.7 – Modelo da corrente fotogerada



Fonte: Do autor

Na Figura 2.8 é representada a corrente de saturação dada pela equação (13).

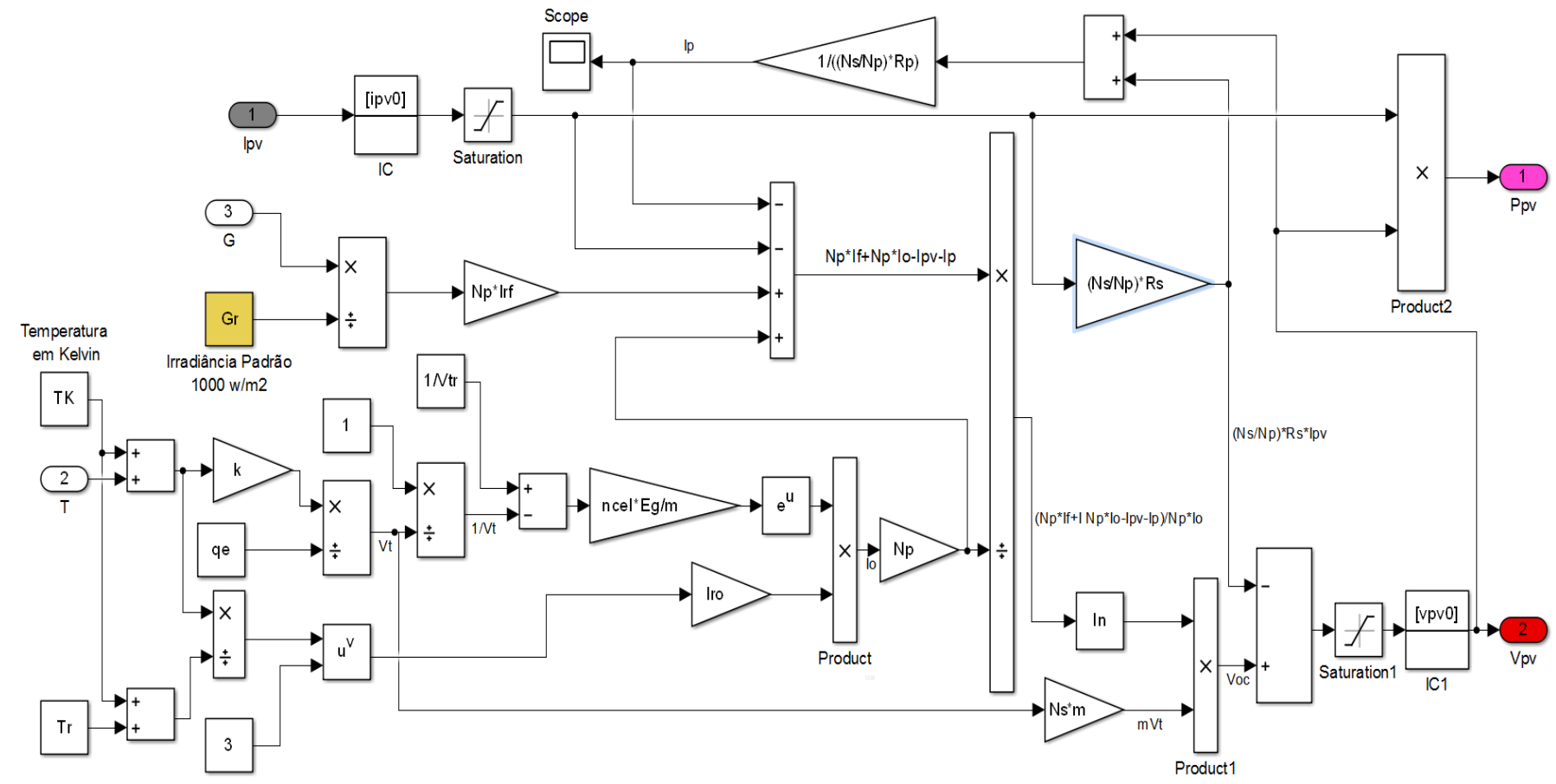
Figura 2.8 – Modelo da corrente de saturação



Fonte: Do autor

Estando já montados os blocos referentes à corrente de saturação e a corrente fotogerada, e sendo a corrente de saída do painel fotovoltaico I uma entrada para o modelo do painel, como visto anteriormente, o próximo passo foi montar o modelo do painel fotovoltaico e seus componentes em diagrama de blocos conforme observado na Figura 2.9.

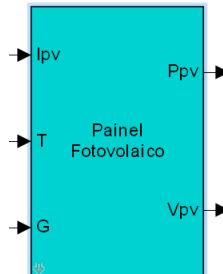
Figura 2.9 – Diagrama de blocos que representa o modelo de um painel fotovoltaico



Fonte: Do autor

Após a conclusão do modelo, para ficar intuitiva a simulação, foi criado um bloco para alocar todo o diagrama do painel fotovoltaico apresentado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Bloco do modelo do painel fotovoltaico



Fonte: Do autor

Também foi criada uma máscara para o bloco do painel fotovoltaico de forma a alterar os valores dos parâmetros de referência com maior facilidade sempre que necessário, sem a necessidade de alterá-los diretamente nos blocos que compõem o sistema. A máscara pode ser observada em detalhes na Figura 2.11.

Figura 2.11 – Janela com entradas para os parâmetros do painel fotovoltaico

Fonte: Do autor

2.3 MODELO DO CIRCUITO EQUIVALENTE DA REGULAÇÃO DE TENSÃO PV

O modelo usado na seção 0 pode ser utilizado com diferentes combinações de painéis fotovoltaicos, mas para continuar o modelo do gerador é preciso levar em conta a regulação de tensão.

Neste trabalho, não haverá baterias ou acumuladores para realizar a tarefa de regulação de tensão. Em vez disso, será aplicado um conversor CC/CC, que pode aumentar ou diminuir a tensão de saída conectada ao barramento CC. Em sistemas fotovoltaicos, o uso de conversores abaixadores de tensão é usual com a presença de acumulador. Os conversores elevadores de tensão são aplicados quando o próximo estágio de alimentação é seguido por um inversor de tensão. Em operação isolada, geralmente, estes níveis de tensão são definidos para as tensões nominais de rede/carga CA como foi abordado em (ADHIKARI, SINGH, *et al.*, 2011).

Para este trabalho, foi utilizado um conversor CC/CC do tipo *Push-Pull* alimentado em corrente. Esse tipo de conversor é uma das topologias mais utilizadas em desenvolvimento de sistemas fotovoltaicos.

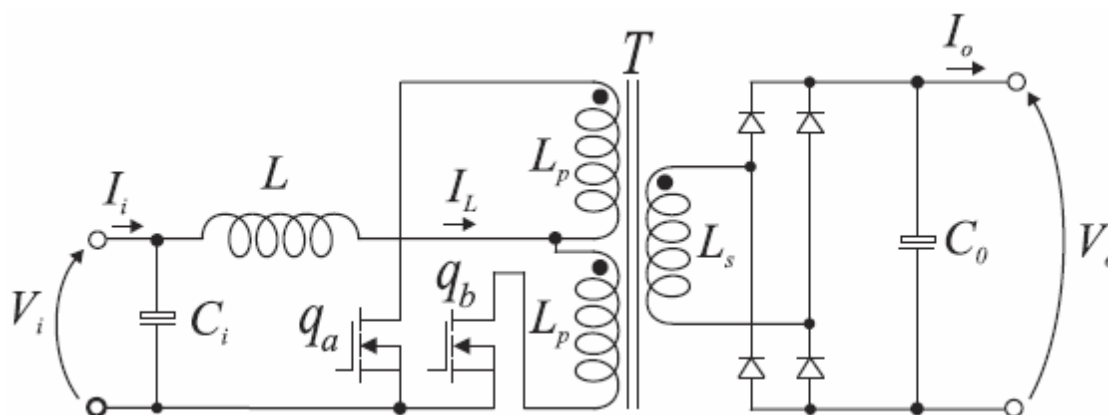
O conversor mostrado na Figura 2.12, tem uma série de vantagens em sistemas fotovoltaicos, como:

- Elevado ganho de tensão;
- Apresenta isolação galvânica entre a entrada e saída;
- A corrente de entrada é contínua devido a razão cíclica ser maior que (0,5), reduzindo assim as perdas por condução.

Já as desvantagens são:

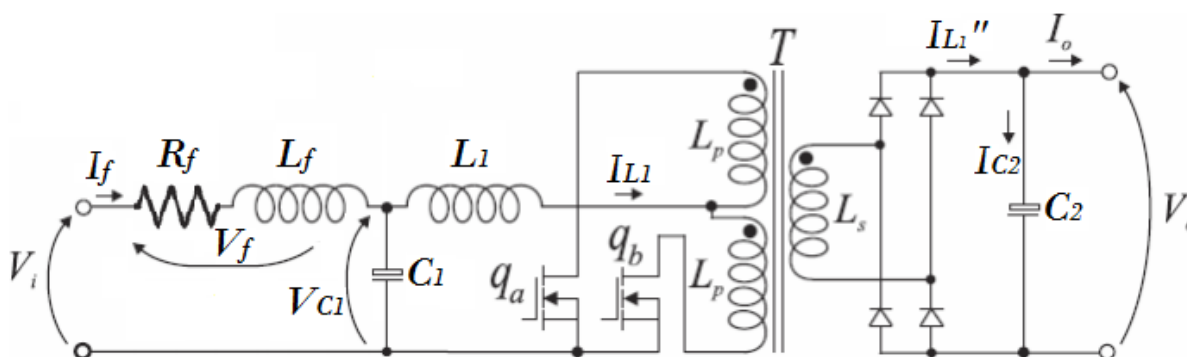
- Reduzida transferência de energia, devido à razão cíclica trabalhar entre 0,5 a 1;
- Possibilidade de saturação do transformador devido a um eventual erro de assimetria nos sinais de comando das chaves.

Figura 2.12 – Diagrama elétrico do conversor Push-Pull



(Fonte: Montê A. Vitorino, 2008)

Na modelagem do conversor, uma vez que será acoplado um painel e de modo a formar o modelo mais robusto para simulação, foi adotado um pequeno circuito RL na entrada do *Push-Pull*. Assim, o novo circuito ficará como mostrado na Figura 2.13.

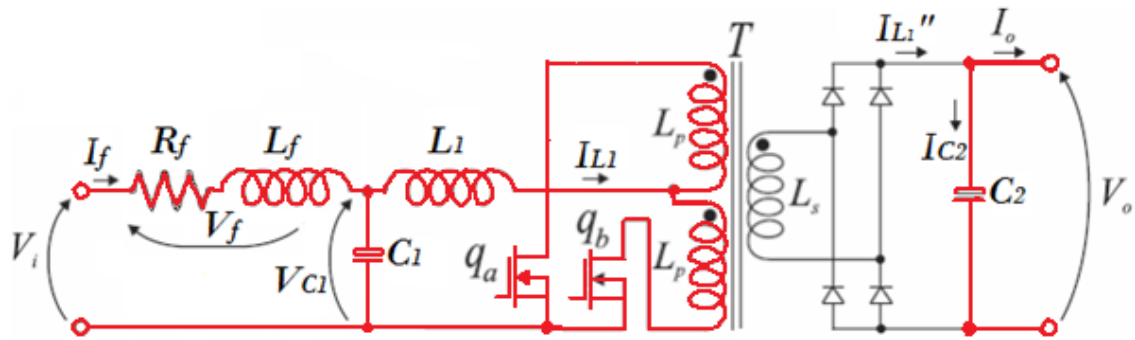
Figura 2.13 – Diagrama elétrico do conversor *Push-Pull* conectado ao painel fotovoltaico

(Fonte: Autor)

O diagrama elétrico do conversor tem seu funcionamento em quatro modos de chaveamento.

No primeiro modo do chaveamento, as chaves q_a e q_b são fechadas, armazenando a energia do gerador fotovoltaico no indutor L_1 , como mostrado na Figura 2.14. Nesse momento, não há transferência de energia do primário para o secundário.

Figura 2.14 – Diagrama elétrico do conversor *Push-pull* com as chaves q_a e q_b fechadas



Fonte: Do autor

Assim têm-se as equações do lado primário:

$$I_f = I_{C1} + I_{L1} \quad (14)$$

$$V_f = V_i - V_{C1} \rightarrow V_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} \quad (15)$$

Logo:

$$R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} = V_i - V_{C1} \quad (16)$$

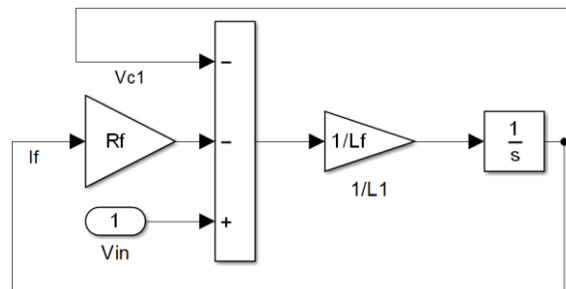
Assim:

$$\frac{dI_f}{dt} = \frac{1}{L_f} (V_i - V_{C1} - R_f I_f) \quad (17)$$

Integrando a equação (17), então:

$$I_f = \frac{1}{L_f} \int (V_i - V_{C1} - R_f \cdot I_f) dt \quad (18)$$

Na Figura 2.15 é mostrado o diagrama de blocos adotado para computar I_f a partir da equação (18).

Figura 2.15 – Modelo do indutor de entrada L_f 

Fonte: Do autor

Para se obter o V_{C1} , vale resaltar que:

$$I_f = I_{C1} + I_{L1} \Rightarrow I_{C1} = I_f - I_{L1} \quad (19)$$

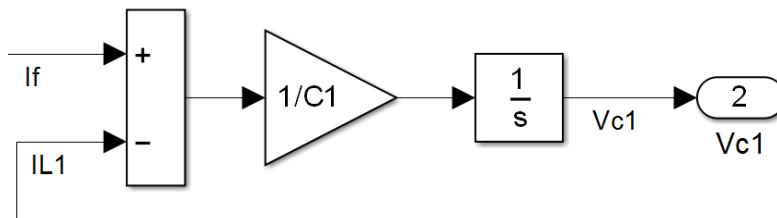
Sabendo que $I_{C1} = C_1 \cdot \frac{dV_{C1}}{dt}$, então:

$$C_1 \cdot \frac{dV_{C1}}{dt} = I_f - I_{L1} \quad (20)$$

Integrando, tem-se a equação do diagrama de bloco V_{C1} :

$$V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int (I_f - I_{L1}) dt \quad (21)$$

Com base na equação (21) o modelo do capacitor C_1 fica como mostrado na Figura 2.16.

Figura 2.16 – Modelo do capacitor de entrada C_1 

Fonte: Do autor

Como as chaves q_a e q_b estão fechadas, a tensão nas bobinas L_P é igual à zero, e a equação do diagrama de bloco I_{L1} fica:

$$\frac{dL_1}{dt} = \frac{1}{L_1} \cdot V_{C1} \Rightarrow I_{L1} = \frac{1}{L_1} \int V_{C1} dt \quad (22)$$

Como não há transferência de energia do primário para o secundário, a equação do secundário do transformador para o diagrama de bloco de V_{C2} , fica:

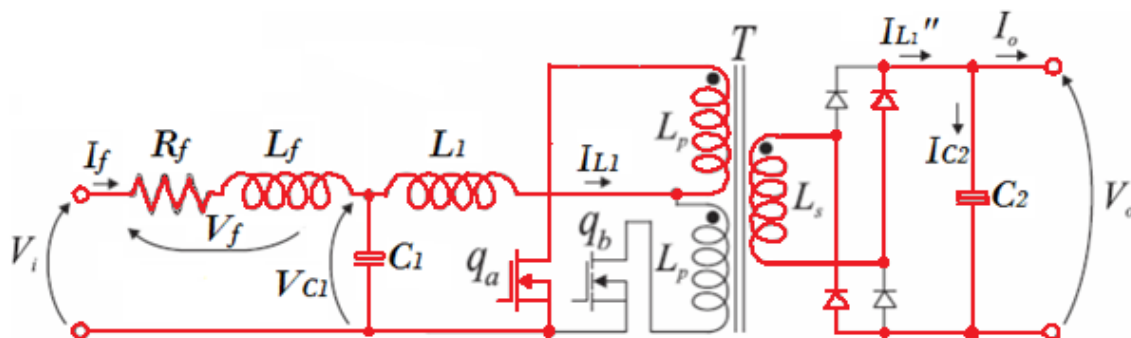
$$I_{C2} = -I_0 \Rightarrow C_2 \cdot \frac{dV_{C2}}{dt} = I_0 \quad (23)$$

Integrando, tem-se que:

$$V_{C2} = \frac{1}{C_2} \int I_0 dt \quad (24)$$

No segundo modo de chaveamento, mostrado na Figura 2.17, a chave q_a é mantida fechada e q_b é aberta.

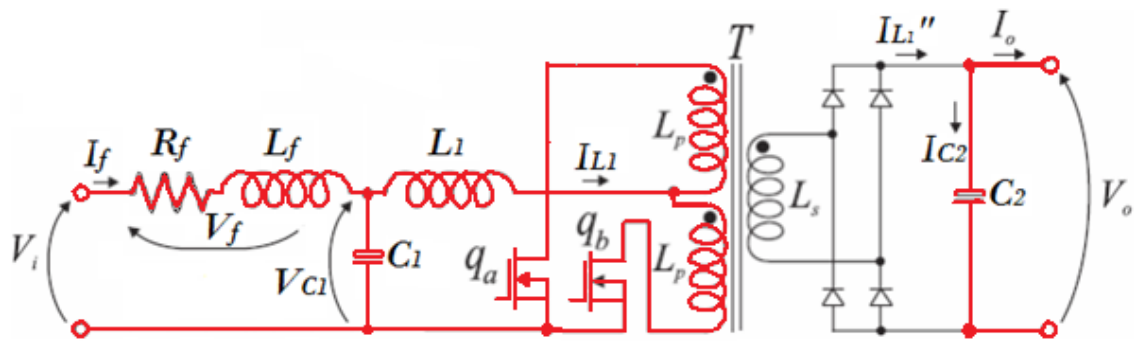
Figura 2.17 – Diagrama elétrico do conversor *Push-Pull* com a chave q_a fechada



Fonte: Do autor

A terceira etapa mostrada na Figura 2.18 é semelhante ao primeiro modo de chaveamento, onde a chave q_b volta a ser fechada, fazendo novamente o indutor L_1 armazenar energia e o barramento CC seja alimentado pelo capacitor C_2 .

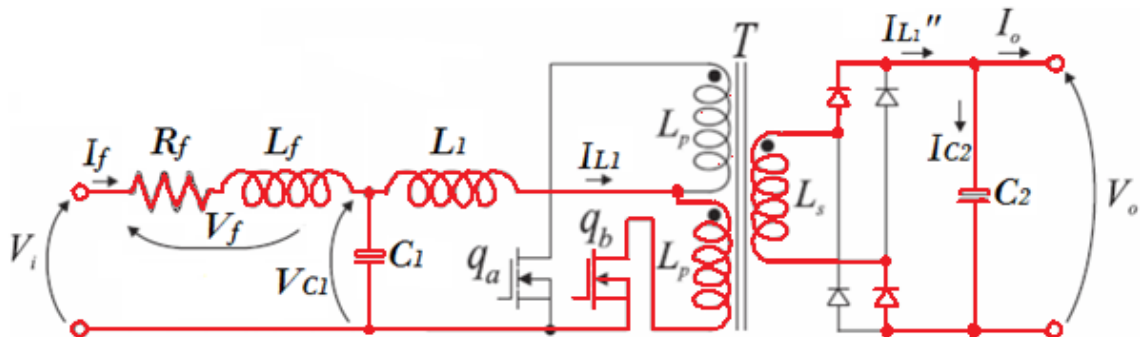
Figura 2.18 – Diagrama elétrico do conversor *Push-Pull* com as chaves q_a e q_b fechadas



Fonte: Do autor

O quarto modo de chaveamento mostrado na Figura 2.19, é semelhante ao segundo modo, só que desta vez a chave q_b é mantida fechada e a chave q_a é aberta, transferindo toda energia do gerador fotovoltaico quanto a energia armazenada do indutor através do transformador T para o barramento CC, carregando o capacitor C_2 .

Figura 2.19 – Diagrama elétrico do conversor *Push-Pull* com a chave q_b fechada



Fonte: Do autor

Nos dois estágios em que uma das chaves está fechada e outra aberta, há uma transferência de energia para o secundário como mostra Figura 2.17 e Figura 2.19. Observa-se, que I_{L1}'' é a corrente I_{L1} refletida no secundário do transformador. Esta corrente equivale a:

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P} = n \quad (25)$$

Assim:

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{N_S}{N_P} = \frac{1}{n} \Rightarrow I_P = \frac{1}{n} I_S \quad (26)$$

$$I_S = n I_P \quad (27)$$

Então, a corrente I_{L1} quando refletida para o secundário do transformador deve ser multiplicado pela relação de espiras. Neste trabalho a relação de espira projetada para o transformador do *Push-Pull* foi de seis, ou seja, a tensão do secundário é seis vezes a tensão do primário, então:

$$V_S = 6 \cdot V_P \quad (28)$$

Portanto, a equação do diagrama de bloco de V_{C2} quando C_2 é quem recebe energia do primário é:

$$I_{L1}'' = I_{C2} + I_0 \Rightarrow I_{C2} = I_{L1}'' - I_0 \quad (29)$$

Sendo $I_{C2} = C_2 * \frac{dV_{C2}}{dt}$, então:

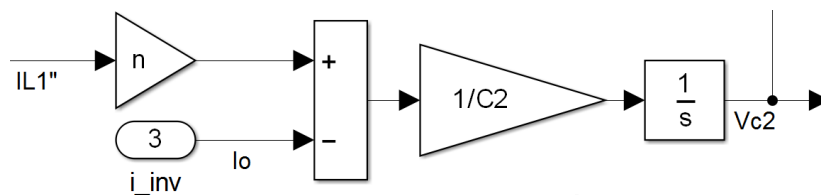
$$C_2 \cdot \frac{dV_{C2}}{dt} = (I_{L1}'' - I_0) \quad (30)$$

Integrando, tem-se:

$$V_{C2} = \frac{1}{C_2} \int (I_{L1}'' - I_0) dt \quad (31)$$

Com a equação (31) é modelado o capacitor de saída C_2 , mostrado na Figura 2.20

Figura 2.20 – Modelo do capacitor de saída C_2



Fonte: Do autor

Além disso, utilizando a relação de transformação, a tensão V_{C2}' presente no enrolamento do primário, então:

$$V_{L_1} = V_{C_1} - V_{C_2}' \quad (32)$$

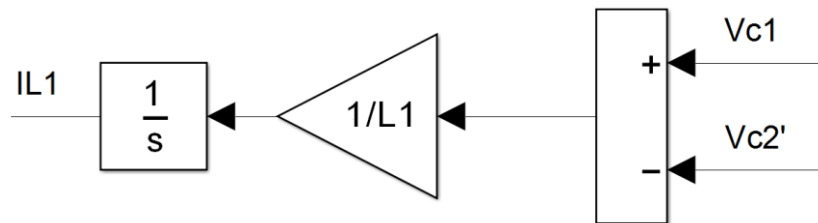
$$L_1 \cdot \frac{dI_{L_1}}{dt} = V_{C_1} - V_{C_2}' \quad (33)$$

O que resulta em:

$$I_{L_1} = \frac{1}{L_1} \int (V_{C_1} - V_{C_2}') dt \quad (34)$$

Com base na equação (34) é modelado o indutor L_1 , como mostrado na Figura 2.21.

Figura 2.21 – modelo do indutor de L_1



Fonte: Do autor

Para o modelo em diagrama de blocos total com os quatro modos de operação das chaves, apresentado na Figura 2.22, serão incluídos nas equações uma variável chamada “gate”, que tem o seguinte comportamento.

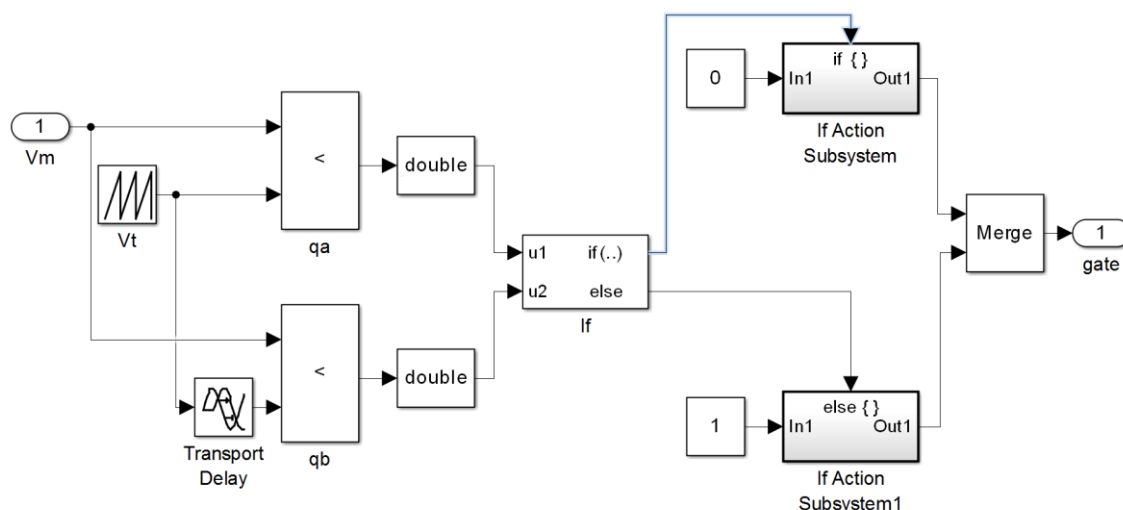
gate = 1 (Chaves q_a ou q_b fechadas)

gate = 0 (Chaves q_a e q_b abertas)

A modelagem do gerador do PWM para controle do chaveamento do conversor *Push-Pull* no *Simulink*[®] consistiu em implementar, a partir de blocos presentes na biblioteca, a técnica de comparação entre um sinal constante referente à razão cíclica D e uma onda portadora triangular de 80 kHz.

Para isto foram utilizados os blocos de fonte de sinal configurado para fornecer em sua saída uma onda triangular e o bloco *Relational operator*, cuja função é comparar dois sinais de entrada e fornecer em sua saída um sinal lógico de valor 0 (zero) ou 1 (um), de acordo com o resultado de sua comparação. O modelo construído possui uma entrada por onde é informado o valor da razão cíclica desejada para o sinal *PWM*, o qual é disponibilizado em sua saída. Este pode ser visto em detalhes na Figura 2.24.

Figura 2.24 – Diagrama de bloco do controle PWM



Fonte: Do autor

2.5 TÉCNICA DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTENCIA

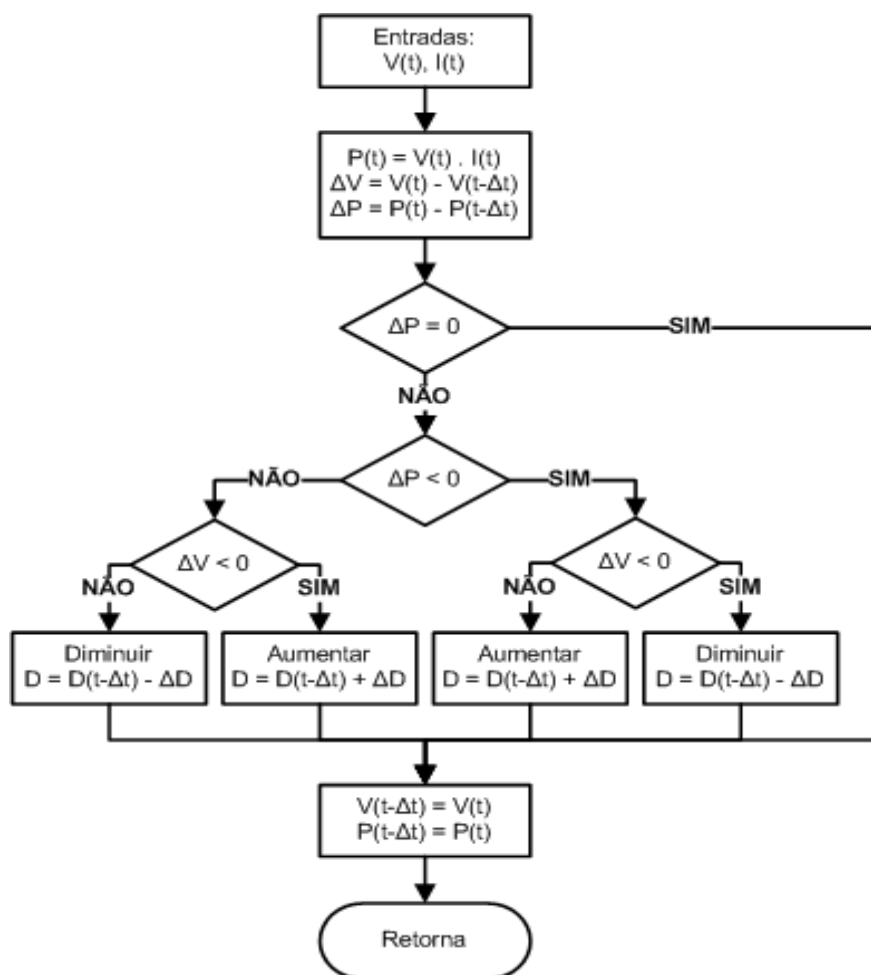
Para o conversor *Push-Pull* manter uma regulação de tensão de máxima potência do painel fotovoltaico, é necessário fazer o controle adequado do ciclo de trabalho (D). Na literatura existe uma grande quantidade de métodos utilizados. Os mais simples são os que utilizam controladores proporcionais e/ou integrais. A desvantagem nesse caso é a inviabilidade de apontar diferentes objetivos de controle. Isto é viável com o uso de técnicas

mais elaboradas, tais como: controles baseados em lógica *fuzzy*, redes neurais, e as que se baseiam em modelos não-lineares.

Todas as técnicas de controle dependem de um algoritmo que faz rastreamento do ponto de máxima potência (*MPPT*) de um painel fotovoltaico. Isto assegura uma otimização do sistema no que diz respeito à potência (ESRAM e CHAPMAN, 2007) e (BOZTEPE, GUINJOAN, *et al.*, 2014).

Entre os vários algoritmos reportados pela comunidade científica, o trabalho descrito em (KOLLIMALLA e MISHRA, 2014) é um algoritmo simples e eficaz chamado perturba e observa (P&O), seu fluxograma é mostrado na Figura 2.25.

Figura 2.25 – Fluxograma da técnica Perturba e Observa



Fonte: Do autor

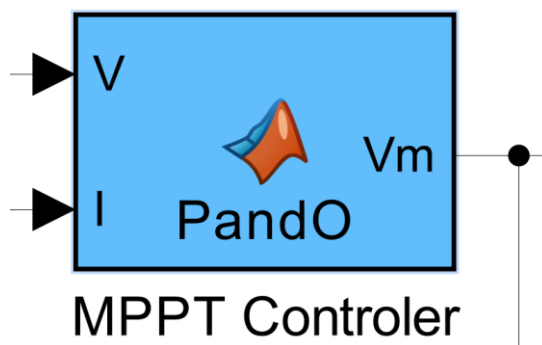
Dada uma tensão de referência, tem de se produzir um ciclo de trabalho, que funciona como um sinal de disparo durante a simulação. Para

esta finalidade, o sinal de referência serve como um sinal de modulação que é imposta através de uma portadora de 80 kHz dente-de-serra, utilizado neste trabalho.

O algoritmo *MPPT* baseia-se no fato de que a tensão de saída do painel fotovoltaico seja fixada a um valor, ajustada através do ciclo de trabalho, para uma máxima potência do painel a ser entregue na entrada do conversor *Push-Pull*.

A modelagem do controle de rastreamento do ponto de máxima eficiência do painel fotovoltaico utilizando a técnica do Perturba e Observa foi realizada através do bloco *function* presente na biblioteca do *Simulink*[®]. Uma vez definida a programação do algoritmo de rastreamento para o bloco *function*, este passou a ter duas entradas associadas aos sinais medidos de tensão e de corrente de saída do painel fotovoltaico, e uma saída com o sinal gerado para o controle das chaves do conversor *Push-Pull* por onde atua a técnica de rastreamento. O bloco com este controle é apresentado na Figura 2.26.

Figura 2.26 – Bloco da técnica P&O de rastreamento do ponto de máxima potência

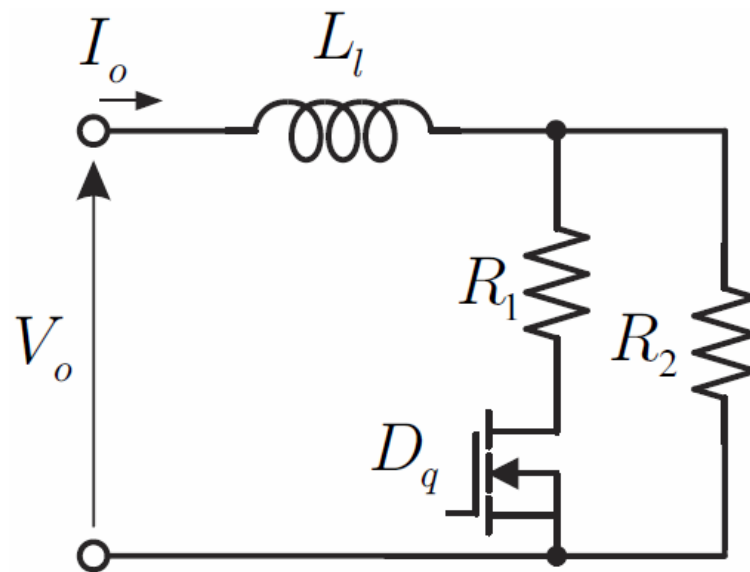


Fonte: Do autor

2.6 MODELO DO SISTEMA DE CONTROLE COM A CARGA CHAVEADA

No caso em que, no barramento CC não existe um estágio de conversor CC-CA, a tensão de saída do *Push-Pull* precisa ser mantida constante. Para isto, pode ser utilizada uma carga chaveada que regula a tensão de saída do conversor, proporcionando um valor médio de resistência pelo chaveamento do *Mosfet*. Seu circuito elétrico é mostrado na Figura 2.27.

Figura 2.27 – Diagrama elétrico da carga chaveada

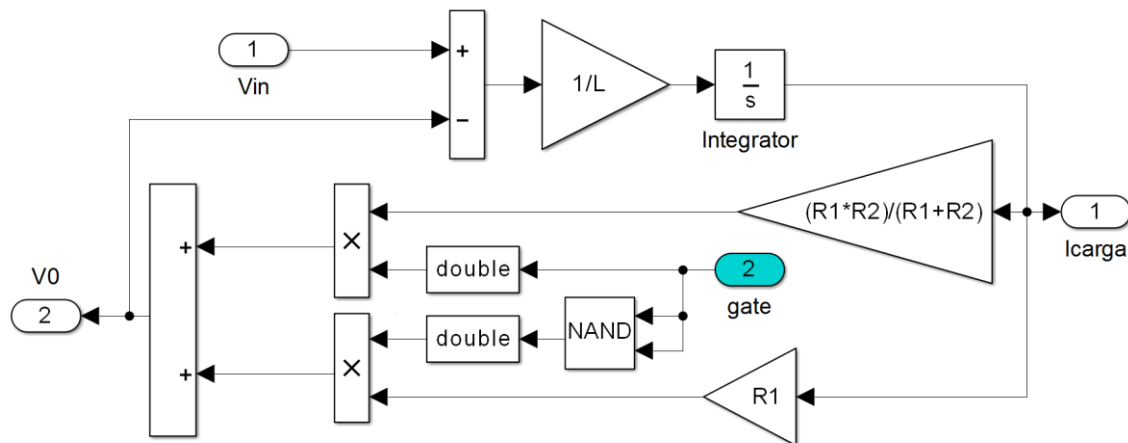


Fonte: Do autor

Quando a chave é aberta (D_q off), a resistência é R_2 , e enquanto está fechada (D_q on), o valor da resistência é o paralelo de R_1 e R_2 . A comutação da carga é independente do conversor e que funciona com uma frequência mais elevada. Portanto, podem-se impor valores médios de resistência na saída, de tal maneira que a tensão através da carga seja constante.

Um controlador *MPPT* parecido com o do controle *Push-Pull* é utilizado para regular a tensão. Na Figura 2.28, mostra-se o diagrama de blocos relacionado à carga eletrônica, sendo composta de um Indutor L_1 em série com duas resistências R_1 e R_2 em paralelo. Isto permite uma faixa de valores de resistência de modo a tornar possível a tensão de referência para a carga.

Figura 2.28 – Diagrama de bloco que representa a carga eletrônica



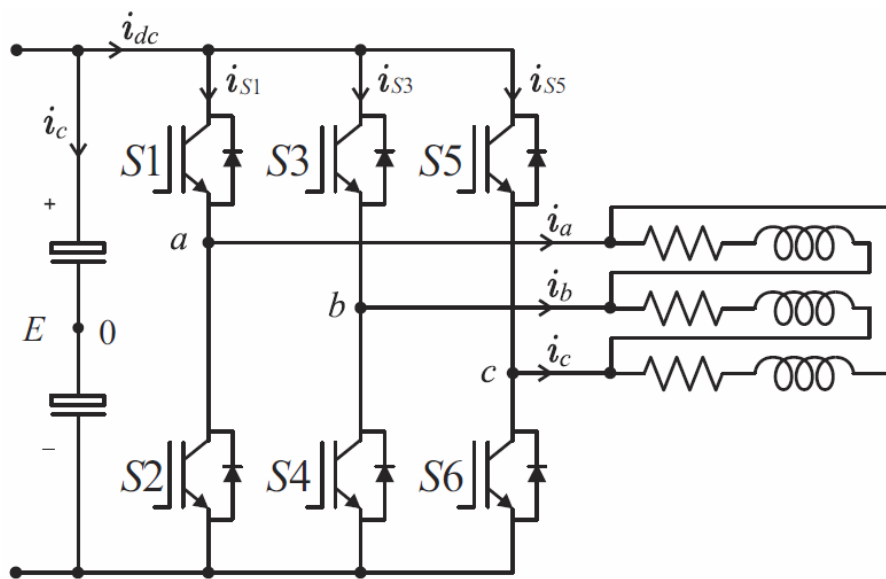
Fonte: Do autor

2.7 MODELO DO SISTEMA DE INVERSÃO COM CARGA CA

Para o sistema descrito anteriormente, foi utilizado uma carga para poder manter a tensão do barramento constante, para testar o controle do conversor *Push-Pull* junto ao painel fotovoltaico. A carga eletrônica é substituída por um inversor de tensão que vai alimentar uma carga de indução trifásica. Essa carga de indução trifásica pode ser representada por um motor de bomba hidráulica.

O inversor de tensão trifásico é composto por três braços como mostrado na Figura 2.29, que serão comandados por um controle parecido com o utilizado no conversor *Push-Pull*, que mantém a tensão do barramento constante.

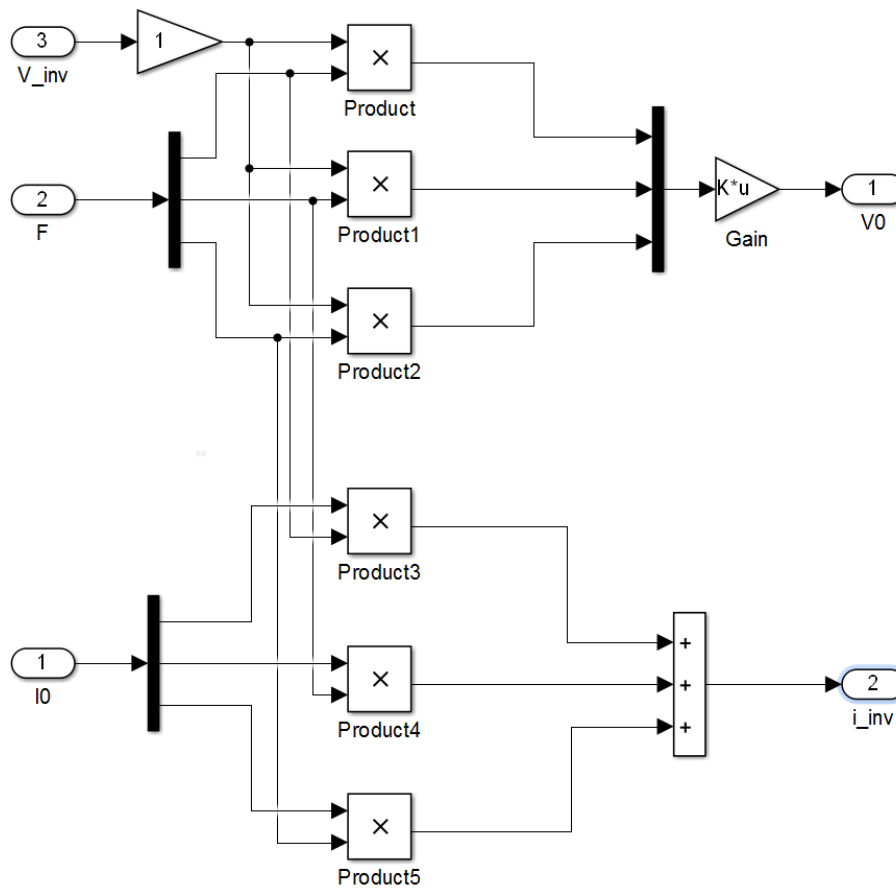
Figura 2.29 – Diagrama elétrico do inversor de tensão



Fonte: Do autor

Na Figura 2.30, é ilustrado o diagrama de blocos que representa o inversor de tensão. No que diz respeito à função do inversor, os sinais de controle das chaves são gerados por comparação de três tensões senoidais modulante, deslocadas por $2\pi/3$ [rad] com uma única tensão com forma de onda de triangular (portadora). Ao conhecer os intervalos de condução dos interruptores, é possível então determinar a forma de onda de diferentes correntes e tensões. A frequência de comutação *PWM* é de 10kHz. Na Figura 2.31 é mostrado o diagrama de bloco do controle *PWM*.

Figura 2.30 – Diagrama de bloco que representa o inversor de tensão

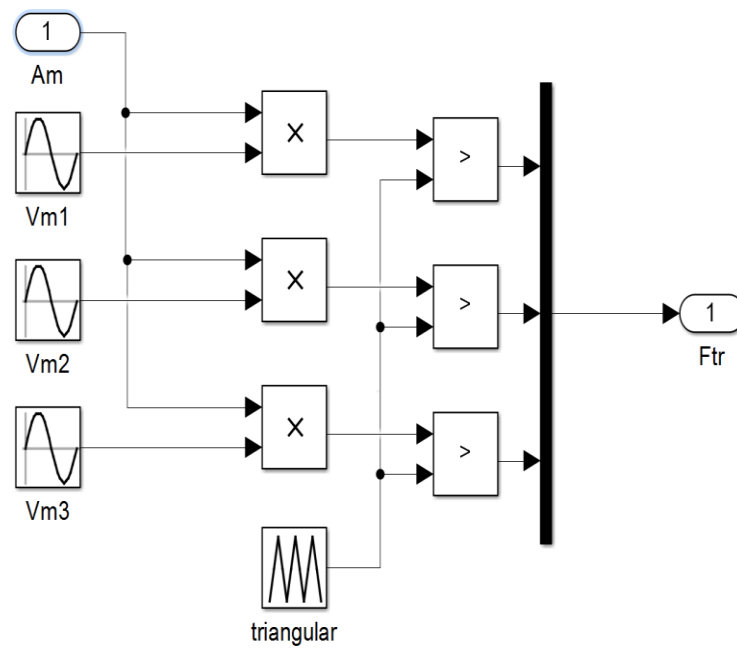


Fonte: Do autor

O sinal gerado na saída deste bloco consiste na multiplexação de 3 (três) sinais gerados a partir da comparação entre 3 (três) ondas senoidais de mesma frequência e amplitude sendo defasadas entre si de 120° com uma portadora triangular de alta frequência, similarmente, ao realizado na geração do *PWM* de controle do conversor *Push-Pull* apresentada na seção 2.3.

Ao sinal gerado a partir desta comparação entre a onda senoidal e a portadora triangular de alta frequência se dá o nome de *PWM* senoidal. Na Figura 2.31 é mostrado os blocos gerador do sinal *PWM* senoidal. Observa-se que em todos os intervalos em que a senoide possui valor maior que o da triangular, o sinal gerado possui valor 1 (um), caso contrário, se a senoide possui valor inferior à triangular, o sinal gerado possui valor 0 (zero).

Figura 2.31 – Diagrama de bloco que representa controle PWM



Fonte: Do autor

Com base nas revisões das literaturas, foram feitas as modelagens de todas as etapas do sistema, na seção seguinte serão descritas toda simulação computacional do sistema fotovoltaico isolado proposto nesta dissertação.

3 RESULTADOS E ANÁLISES DE SIMULAÇÃO

3 RESULTADOS E ANÁLISES DE SIMULAÇÃO

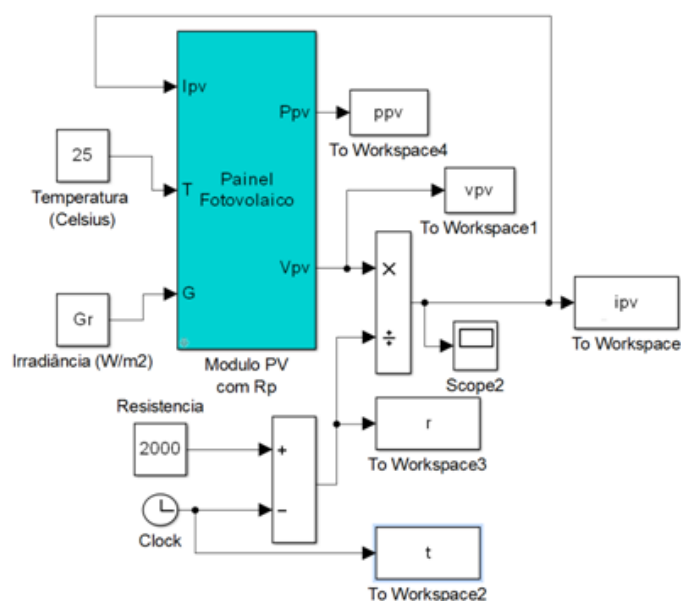
Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados de simulação computacional de todo o sistema fotovoltaico proposto de corrente, conectado a um sistema fotovoltaico. A plataforma de simulação computacional foi desenvolvida no ambiente do *software Simulink/Matlab*[®]. Os resultados experimentais foram obtidos a partir da bancada montada no laboratório LOSE (Laboratório de Otimização de Sistemas de Energia) da Universidade Federal da Paraíba – UFPB serão abordados no capítulo 4.

3.1 CENÁRIOS DE SIMULAÇÕES

3.1.1 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Na Figura 3.1 é ilustrada a diagramação de blocos no Simulink[®] que mostra o modelo do painel fotovoltaico dentro de um subsistema em conjunto com blocos de modo a se construir as curvas de (corrente x tensão) e (potência x tensão) do referente painel. Vale ressaltar que o modelo do painel é constituído de uma interface para introduzir os parâmetros do mesmo de acordo com o fabricante como já mostrado na Figura 2.11.

Figura 3.1 – Painel fotovoltaico e dispositivos par gerar as curvas IxV e PxV

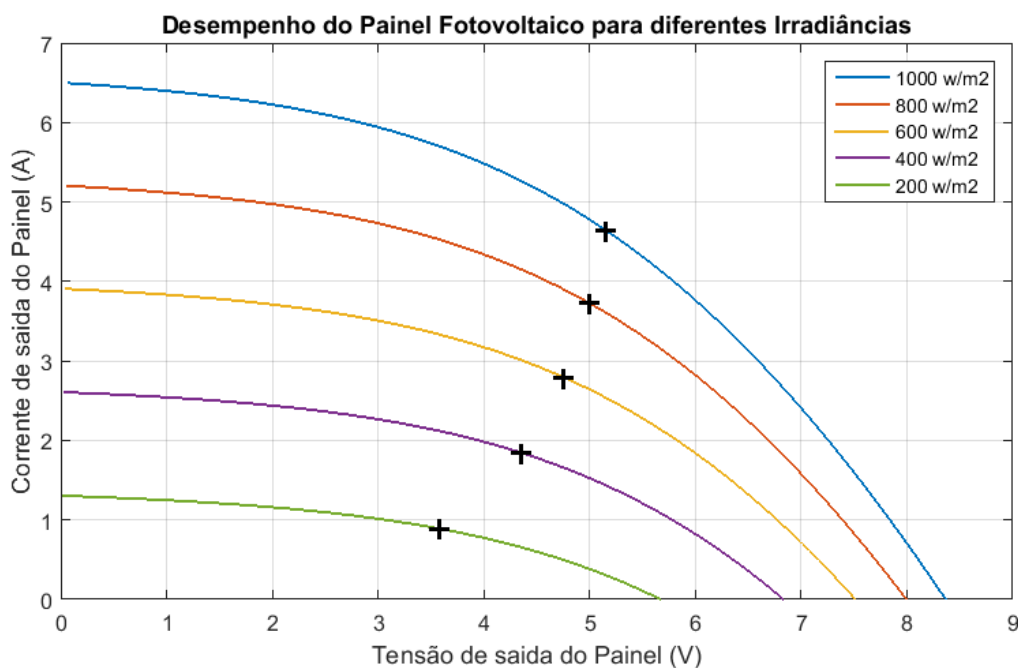


(Fonte: Do autor)

Na Figura 3.2 é possível observar os resultados obtidos a partir do *Matlab*[®] do comportamento típico da potência máxima de um gerador fotovoltaico genérico quando exposto a luz solar, com variações de insolação. Vale ressaltar que o desempenho dos módulos PV depende da temperatura de operação de suas células fotovoltaicas e do nível de insolação a que eles estão sujeitos.

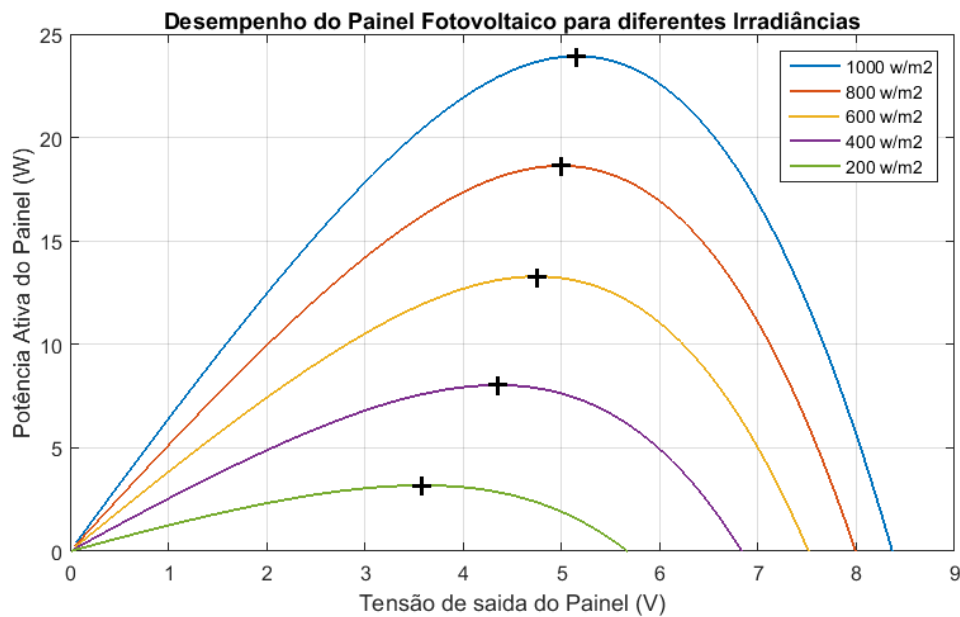
Na Figura 3.3 é apresentado o comportamento da curva característica da potência em função da tensão. Em ambas as figuras geradas pelo programa *Matlab*[®] são destacados os pontos de máxima potência e os valores de corrente e tensão associados a esses pontos. É importante comentar que as curvas ilustradas nas Figura 3.2 e Figura 3.3 correspondem ao painel cujos parâmetros são ilustrados na Figura 2.11.

Figura 3.2 – Curvas característica I x V do painel fotovoltaico



Fonte: Do autor

Figura 3.3 – Curvas característica P x V do painel fotovoltaico

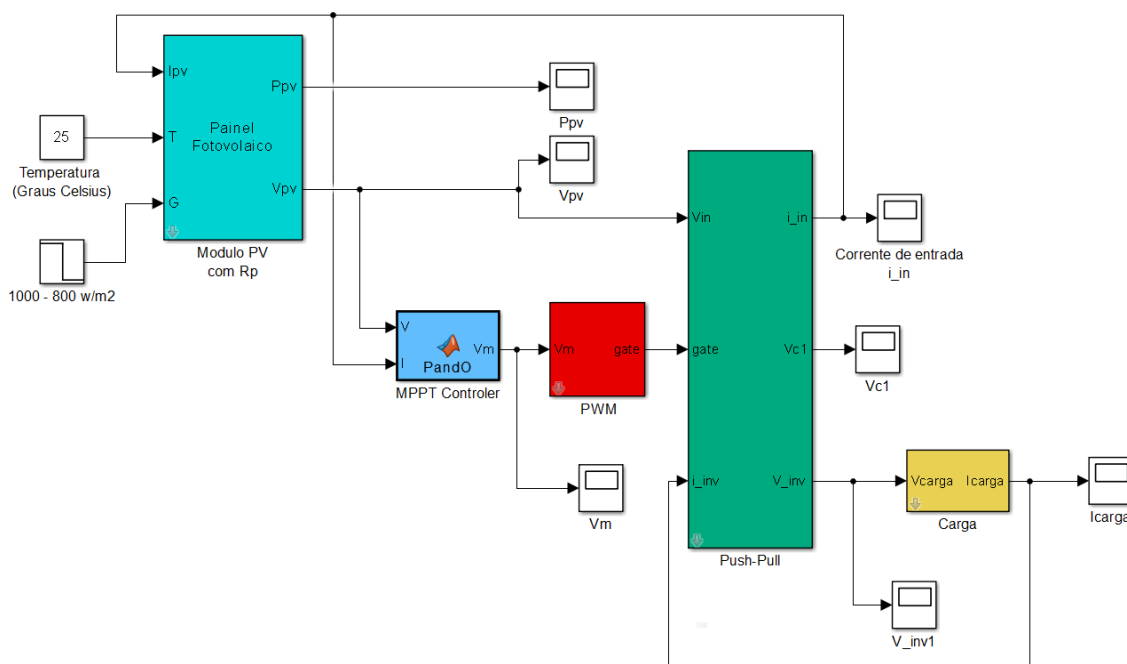


Fonte: Do autor

3.1.2 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO – CONVERSOR PUSH-PULL - CARGA RESISTIVA

Inicialmente, como primeiro cenário de simulação, apresenta-se o painel solar e o conversor *Push-Pull* com uma carga resistiva, como mostrado na Figura 3.4. Neste primeiro modelo, objetiva-se testar o funcionamento do controle *MPPT*, e comprovar o ganho do conversor CC-CC. Para este cenário de simulação foi considerada uma variação da irradiância solar de 1000 W/m² para 800 W/m² de modo a avaliar a resposta dinâmica do sistema.

Figura 3.4 – Modelo do Push-pull com uma carga resistiva.

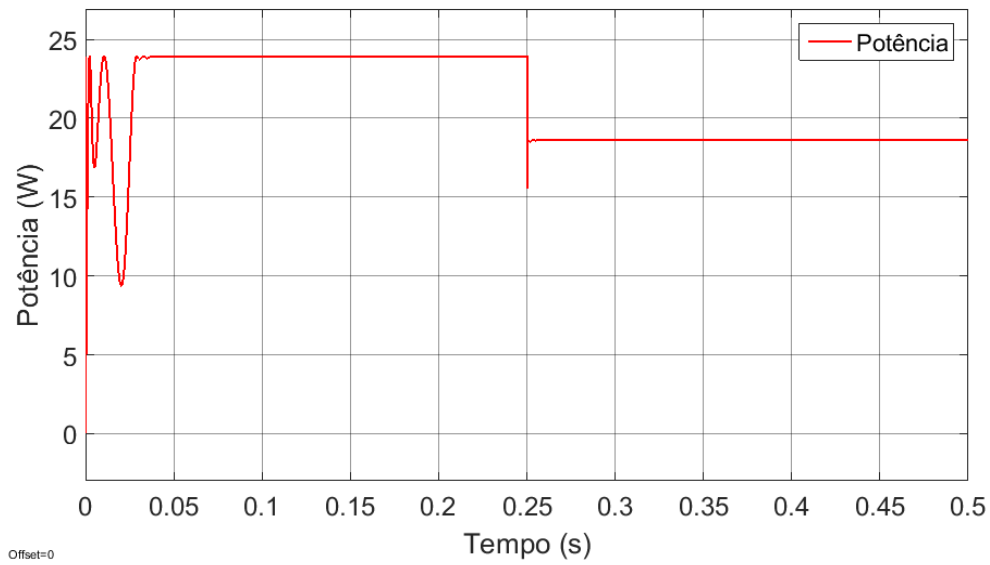


Fonte: Do autor

Observando as curvas apresentadas a seguir nesta seção, nota-se a ocorrência de oscilações durante os primeiros 0,05 segundos do intervalo de simulação. Estas oscilações são decorrentes do transitório inicial das equações diferenciais que compõem os modelos desenvolvidos.

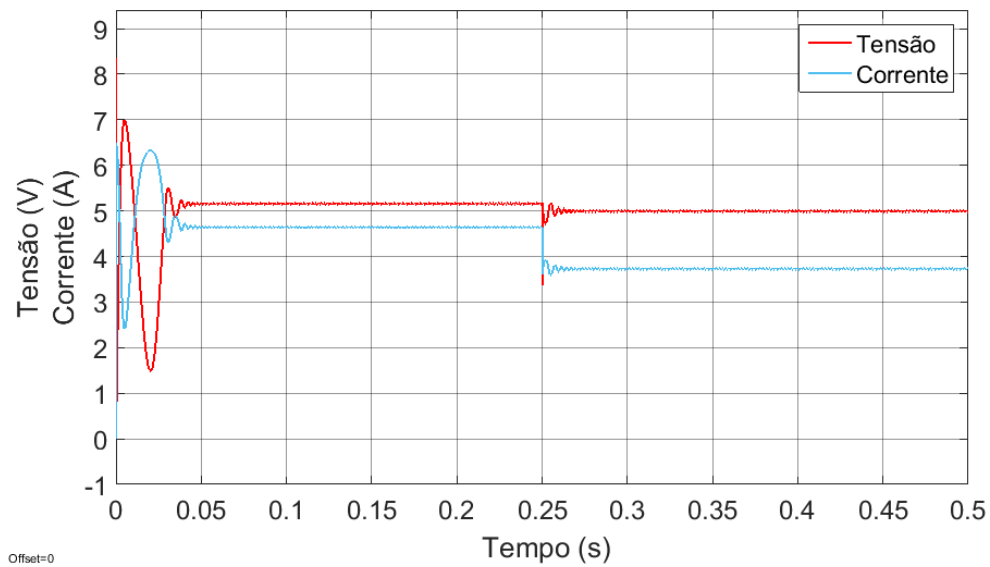
Na simulação realizada, os valores de potência ativa produzida pelo painel, conforme mostrado na Figura 3.5, de corrente e de tensão, de acordo com a Figura 3.6, estão em conformidade com os valores relativos ao ponto de máxima potência, em destaque nas curvas $V \times P$ e $I \times V$ do painel, representadas nas Figura 3.2 e Figura 3.3, para as irradiações solares de 1000 w/m^2 e 800 w/m^2 , respectivamente.

Figura 3.5 – Potência gerada pelo painel fotovoltaico entrada do Push-pull



Fonte: Do autor

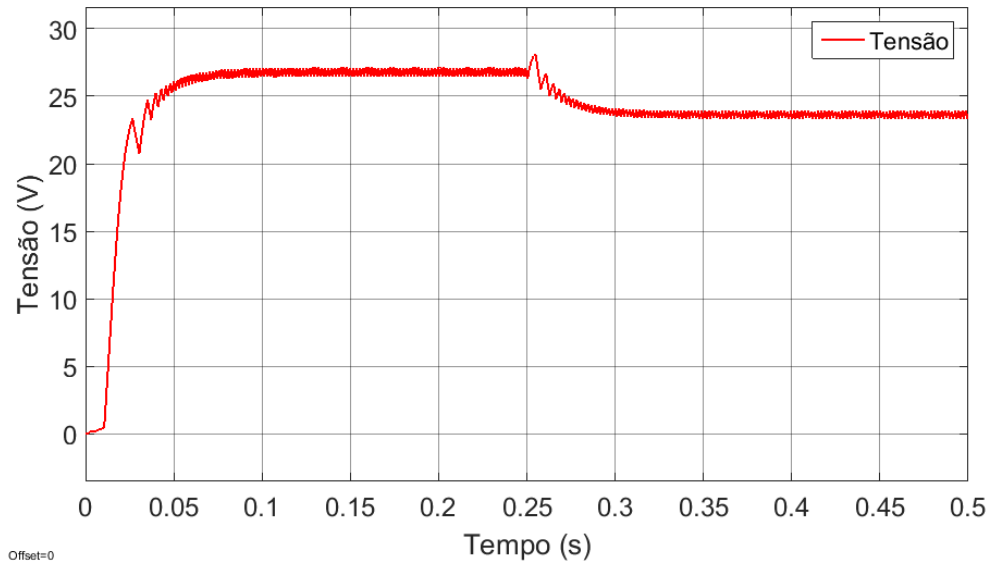
Figura 3.6 – Tensão e corrente gerada pelo painel fotovoltaico entrada do Push-pull



Fonte: Do autor

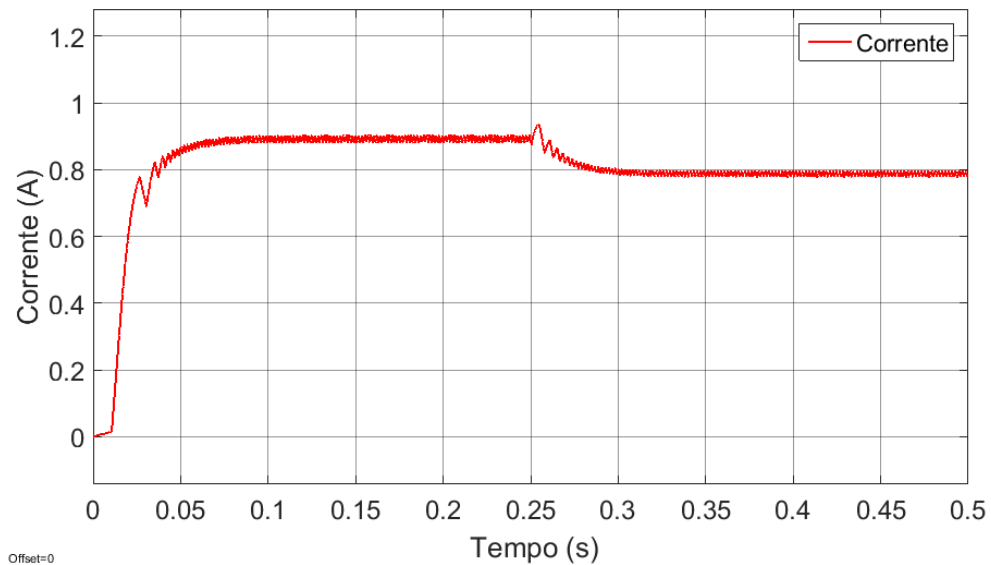
Por outro lado, a tensão e a corrente obtidas a partir do conversor *Push-Pull* podem ser observados nas Figura 3.7 e Figura 3.8, respectivamente. Pode-se observar, conforme esperado, o ganho de tensão na saída do conversor em relação à sua tensão de entrada (que corresponde a tensão de saída do painel) como mostrado na Figura 3.6.

Figura 3.7 – Tensão na saída do push-pull com carga resistiva.



Fonte: Do autor

Figura 3.8 – Corrente de saída do Push-pull com carga resistiva.



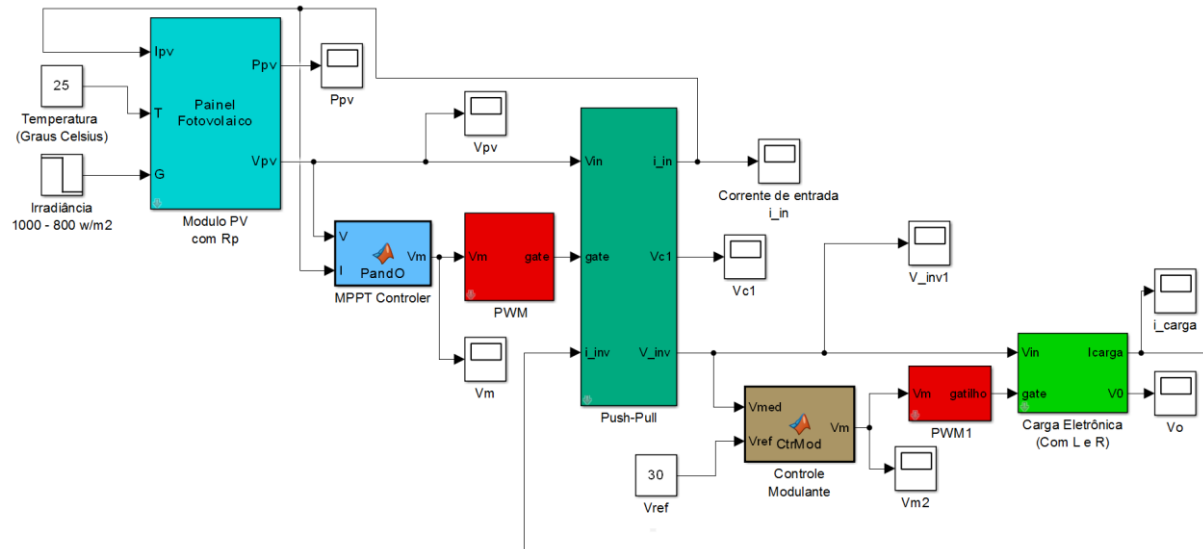
Fonte: Do autor

3.1.3 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO – CONVERSOR PUSH-PULL – CARGA CHAVEADA

A mesma técnica de controle *MPPT*, utilizada no conversor *Push-Pull*, é aplicada na carga eletrônica através de um controle similar, para controlar a tensão do barramento CC. Para este cenário de simulação

considerou-se uma irradiação solar variando de 1000 W/m^2 para 800 W/m^2 . O sistema com a carga chaveada é mostrado na Figura 3.9.

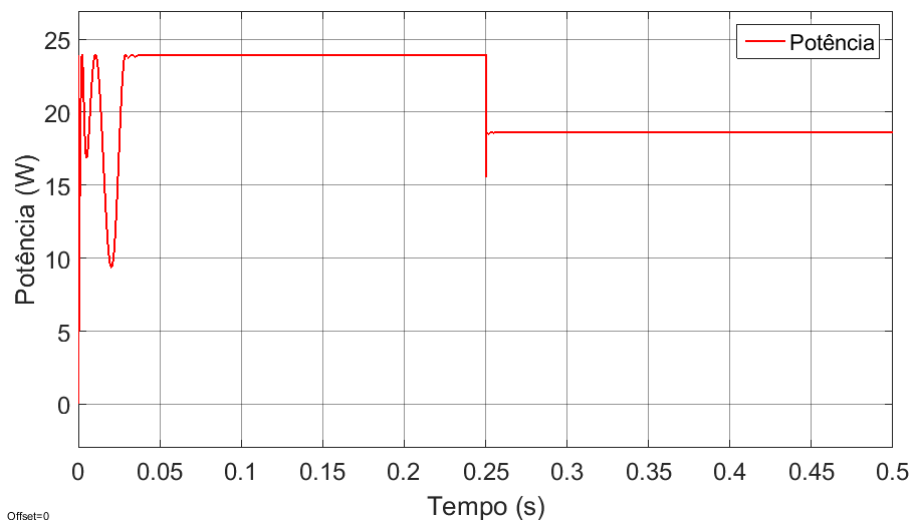
Figura 3.9 – Modelo do sistema utilizando a carga eletrônica



Fonte: Do autor

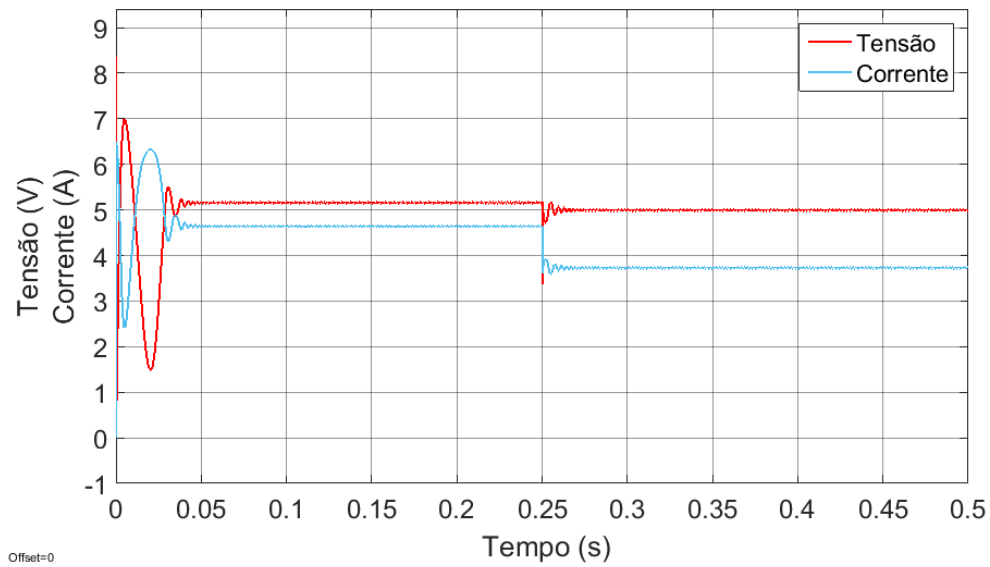
Na Figura 3.10, observa-se que o controle *MPPT* continua rastreamento a potência máxima do painel estabelecendo a corrente e a tensão associadas ao seu ponto de máxima potência para as diferentes irradiâncias adotadas, conforme mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.10 – Potência do Painel na entrada do Push-pull com carga chaveada



Fonte: Do autor

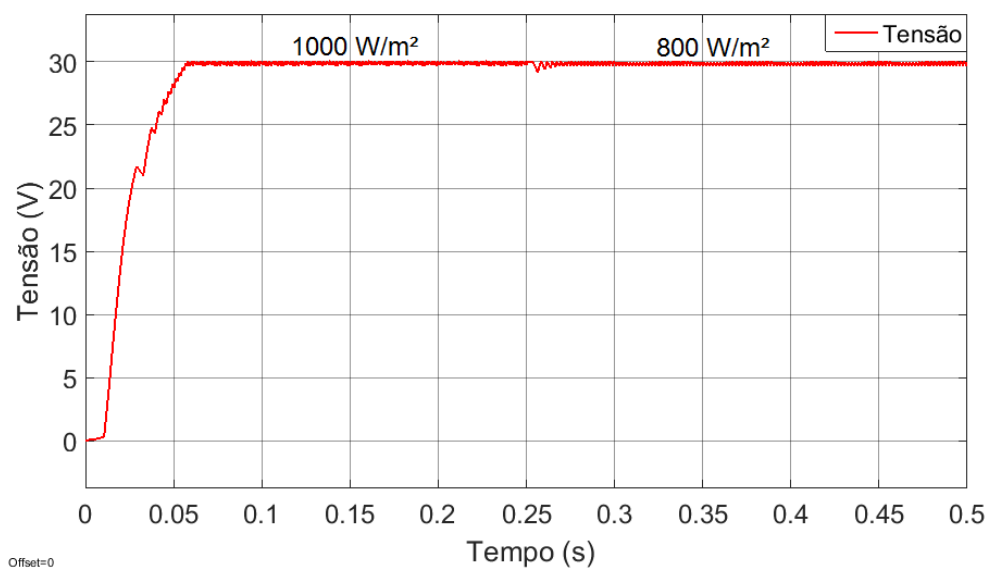
Figura 3.11 – Tensão e Corrente do painel na entrada do Push-pull com carga chaveada



Fonte: Do autor

Na Figura 3.12, é verificada a regulação da tensão do barramento CC, feita pela carga chaveada, em que se observa o valor de tensão imposta pela tensão de referência do controle desenvolvido. Nota-se a robustez do controle durante a variação de irradiância pelo qual está submetido o painel fotovoltaico.

Figura 3.12 – Tensão do barramento regulado pela carga chaveada

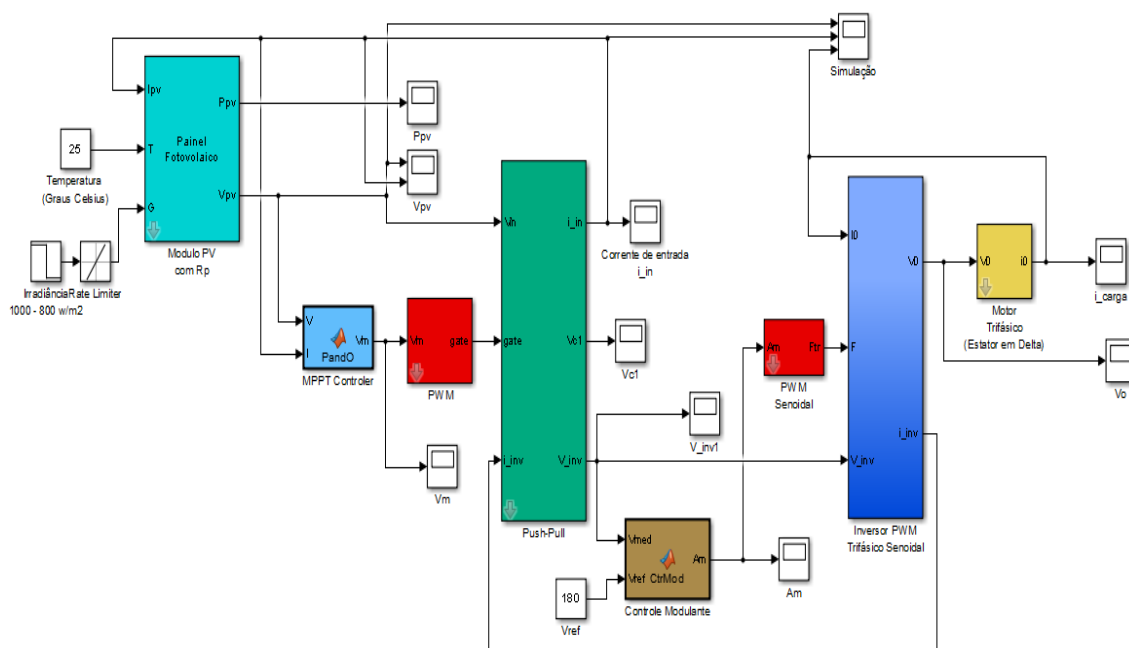


Fonte: Do autor

3.1.4 PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO – CONVERSOR PUSH-PULL – INVERSOR TRIFÁSICO PWM E MOTOBOMBA

O sistema completo de geração de energia fotovoltaica isolado é mostrado na Figura 3.13. Para este cenário de simulação adotou-se utilizar valores de um painel comercial como é demonstrado na Figura 3.14, para propósitos de validação do experimento, e variando a irradiação solar também de 1000 W/m^2 para 800 W/m^2 .

Figura 3.13 – Modelo do sistema Completo Conversores CC-CC e CC-CA e carga



Fonte: Do autor

Figura 3.14 – Configuração de um painel solar comercial

Function Block Parameters: Modulo PV com Rp

Sistema Solar Fotovoltaico

Dados do Painel Fotovoltaico

Parameters

Tensão de Circuito Aberto - Voc (V):
37.6

Corrente de Curto-Circuito - Isc (A):
8.92

Tensão no Ponto de Máxima Potência - Vpmax (V):
29.8

Corrente no Ponto de Máxima Potencia - Ipmx (A):
8.39

Temperatura do módulo PV nas condições padrões de operação (Celsius):
25

Irradiância nas condições padrão de operação (w/m2):
1000

Número de células
60

Resistência Série (Ohm):
0.42475

Resistência em Paralelo (Ohm):
364.6382

Números de Paineis

Em paralelo:
1

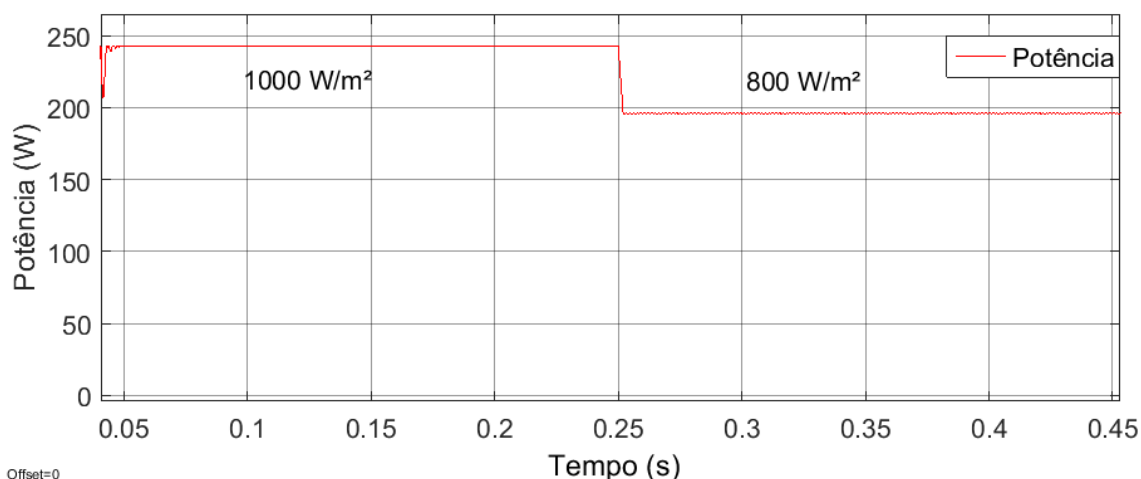
Em série:
1

OK Cancel Help Apply

Fonte: Do autor

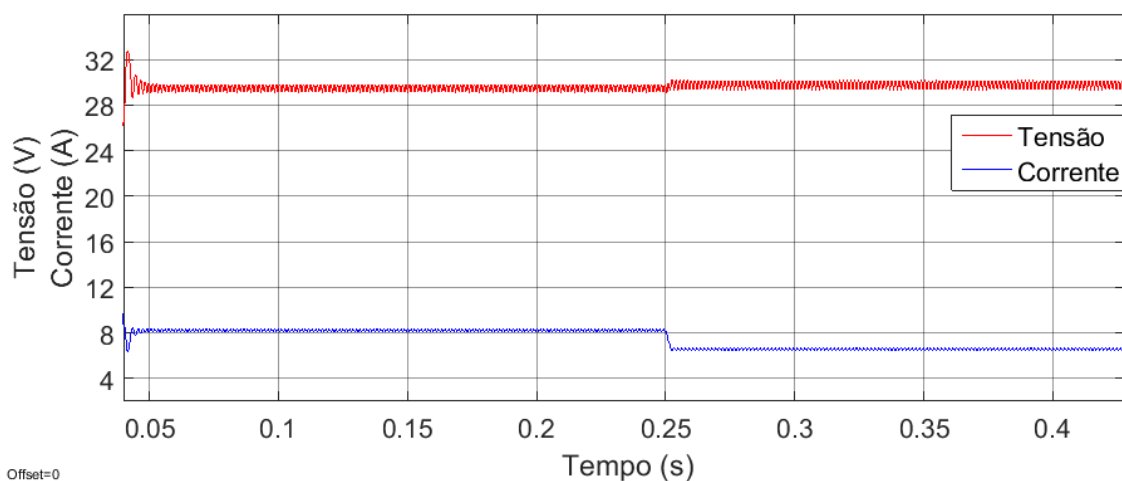
Na Figura 3.15 observa-se que o controle *MPPT* rastreia a potência máxima, associada aos diferentes níveis de irradiância, enquanto que na Figura 3.16 é mostrado o conversor estabelecendo a corrente e a tensão do painel fotovoltaico relativo ao seu ponto de máxima potência para cada irradiância solar.

Figura 3.15 - Potência do Pannel com carga CA na saída



Fonte: Do autor

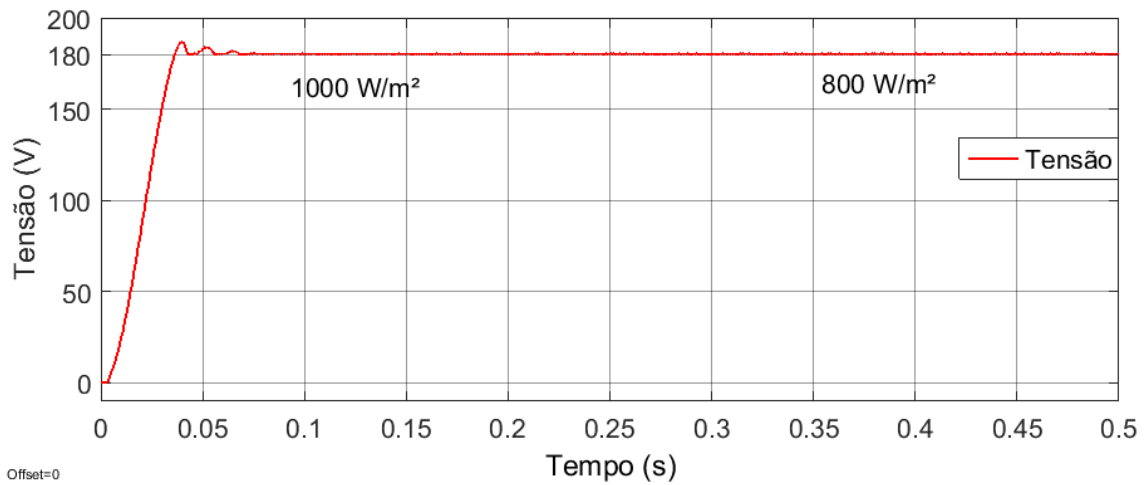
Figura 3.16 - Tensão e Corrente do pannel com carga CA na saída



Fonte: Do autor

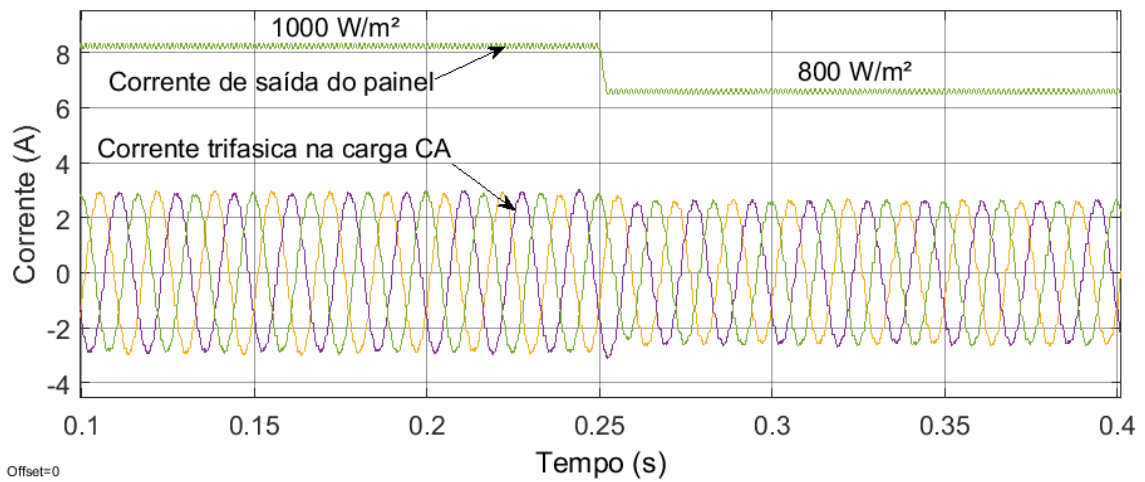
Na Figura 3.17, é mostrado a tensão do barramento CC regulada pelo conversor inversor trifásico no valor de tensão imposta pela tensão de referência do controle desenvolvido. Conforme se pode verificar, essa tensão permanece regulada, mesmo ocorrendo variação na corrente injetada à carga decorrente da variação da irradiância sofrida pelo painel fotovoltaico, como mostra a Figura 3.18.

Figura 3.17 – Tensão do barramento regulada pelo inversor com carga CA



Fonte: Do autor

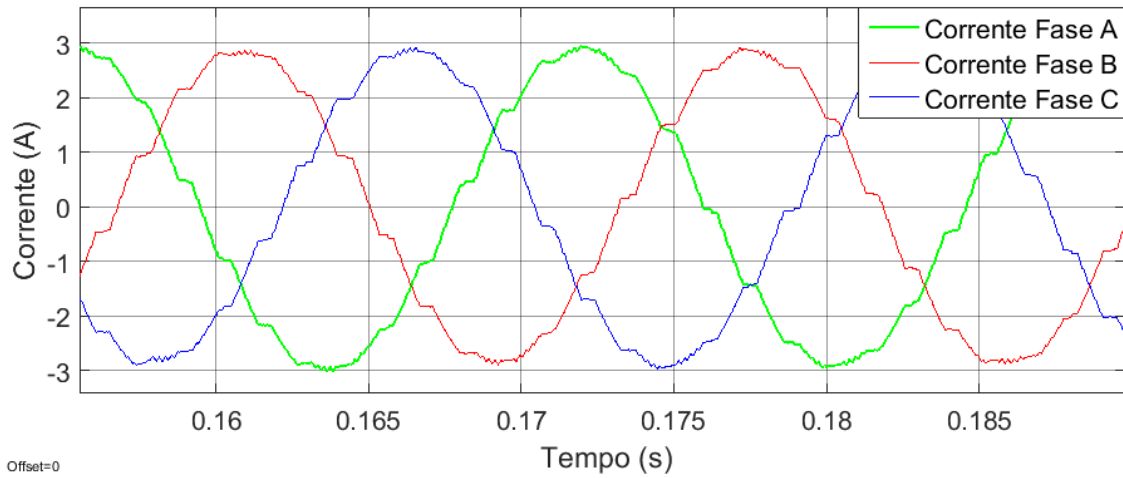
Figura 3.18 – Corrente trifásico na carga CA



Fonte: Do autor

Devido a carga ser indutiva, o resultado simulado pela técnica *PWM* utilizado apresenta uma corrente aproximadamente senoidal como mostra a Figura 3.19

Figura 3.19 – Corrente trifásica senoidal na carga CA



Fonte: Do autor

Uma vez definidos os modelos computacionais, para o propósito de promover o conhecimento aprofundado do desempenho do sistema em estudo com as técnicas de controle projetadas, o passo seguinte consiste na implementação experimental do referido sistema conforme se descreve no capítulo 4.

4 RESULTADOS E ANÁLISES EXPERIMENTAIS

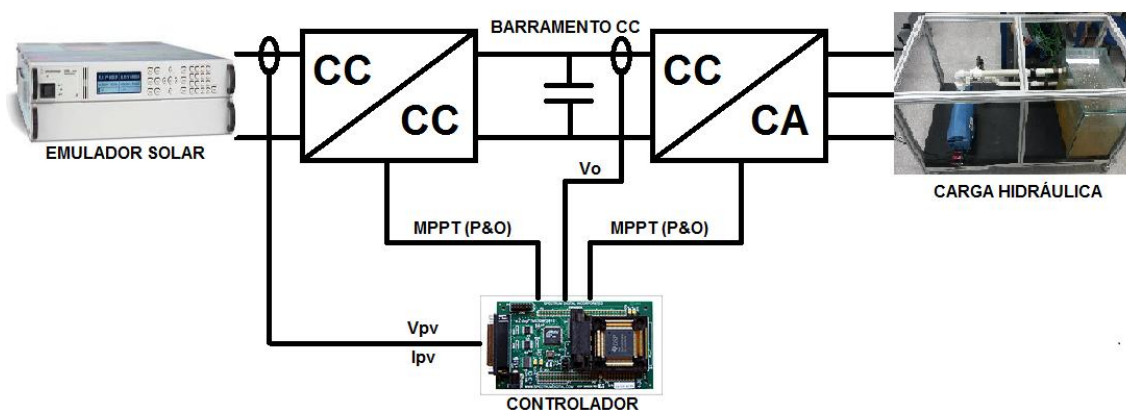
4 RESULTADOS E ANÁLISES EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados a estrutura da plataforma experimental que foi montada em laboratório, bem como os resultados extraídos da mesma, com a intenção de verificar os métodos que estão sendo propostos no trabalho.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

Toda estrutura experimental foi desenvolvida no Laboratório de Otimização de Sistemas de Energia do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB. Como já mencionado anteriormente, esta estrutura corresponde a um sistema fotovoltaico isolado e que pode ser visualizada por um diagrama esquemático como ilustrado na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Configuração do sistema proposto



Fonte: Do autor

O sistema fotovoltaico isolado mostrado na Figura 4.1 fornece energia para uma carga que emula um bombeamento d'água. A tensão fornecida pelo gerador é regulada pelo conversor CC/CC, que fornece energia para o barramento CC. Este barramento fornece a tensão necessária para um inversor de tensão (conversor CC/CA), que alimenta uma carga. O motobomba é um motor de indução trifásico acoplado a uma bomba d'água centrífuga de três estágios. Todo o processamento da bancada é realizado por um DSP da *Texas Instruments*TM, com o Kit de desenvolvimento TMS320F28335. Neste

DSP são feitas as aquisições de dados, processamento dos controles e produção dos sinais *PWM* para os dois conversores.

O gerador solar utilizado é um dispositivo que emula um único painel ou associações, de acordo como as entradas fornecidas pelo usuário. O utilizado neste trabalho é de fabricação *Keysight*, Modelo E4360A, e está mostrado na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Emulador do painel fotovoltaico



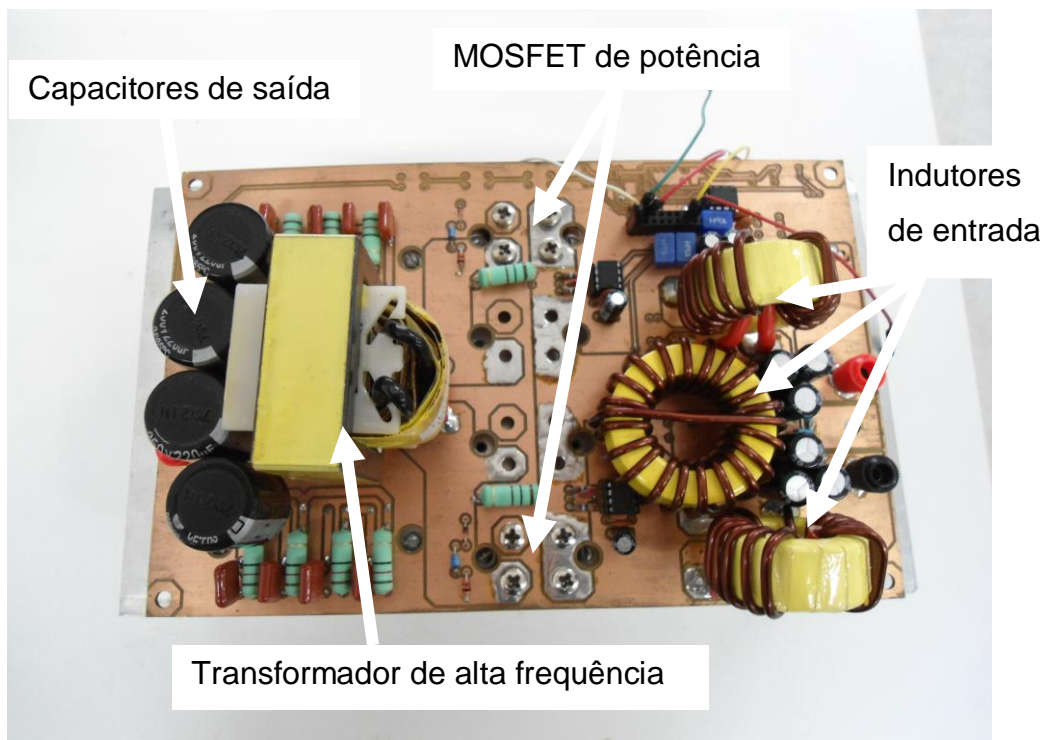
Fonte: <http://www.keysight.com/en/pd-1370006-pn-E4360A>

Com este emulador ainda é possível produzir tensões e correntes com diversos valores de irradiâncias, utilizando o modo lista do emulador. As listas podem conter até 512 curvas programadas individualmente, onde o usuário entra com os dados de cada curva $I \times V$, e pré-define o tempo que cada uma permanece ativa, também podendo ser programado para que se repitam. Este modo é útil para testar a dinâmica dos controladores projetados. O modo sem o uso de listas (*SAS mode*), que simula apenas uma irradiância, usa um modelo exponencial para que se aproxime muito da curva $I \times V$, e é útil para testes de eficácia do controle proposto ou mesmo a checagem de operação em regime permanente do sistema montado.

Como já descrito na seção 2.3, o conversor CC/CC utilizado é um *Push-Pull* de corrente. Este conversor foi projetado para operar com potência de até 1000 W. Os dois *Mosfets* de potência operam numa frequência de 80 kHz. Sendo assim, o transformador do conversor desta topologia suporta operação em altas frequências sem entrar no modo de saturação. Isso implica em um melhor aproveitamento do núcleo, permitindo um tamanho reduzido do mesmo. O conversor montado e utilizado neste trabalho está mostrado na Figura 4.3. O circuito montado na PCI tem os dois *Mosfets* e os diodos

montados na face de baixo com o objetivo de ficarem em contato no dissipador de calor, necessário para evitar aquecimentos excessivos nestes componentes.

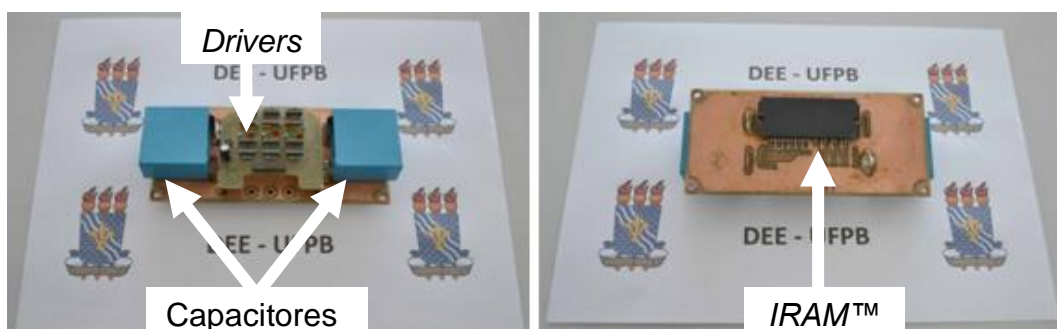
Figura 4.3 – Conversor *Push-Pull*



Fonte: Do autor

O conversor CC/CA utilizado é um de fabricação *IRAM™* que possui três braços com seis *IGBTs*. Cada um recebe um sinal de gatilho, acionados pelos *drivers*, advindo do *DSP*. O circuito é embarcado em um chip e faz-se necessário a inclusão de capacitores para criar o barramento CC. Neste trabalho, dois capacitores eletrolíticos de $1000\mu\text{F}$ cada, e conectados em paralelo são utilizados na formação do barramento. O chip é montado em uma placa de circuito impresso como mostrado na Figura 4.4. Os capacitores que estão mostrados na Figura 4.4 servem para atenuar as oscilações de chaveamento dos *Mosfets*.

Figura 4.4 – Inversor de tensão trifásico IRAM™

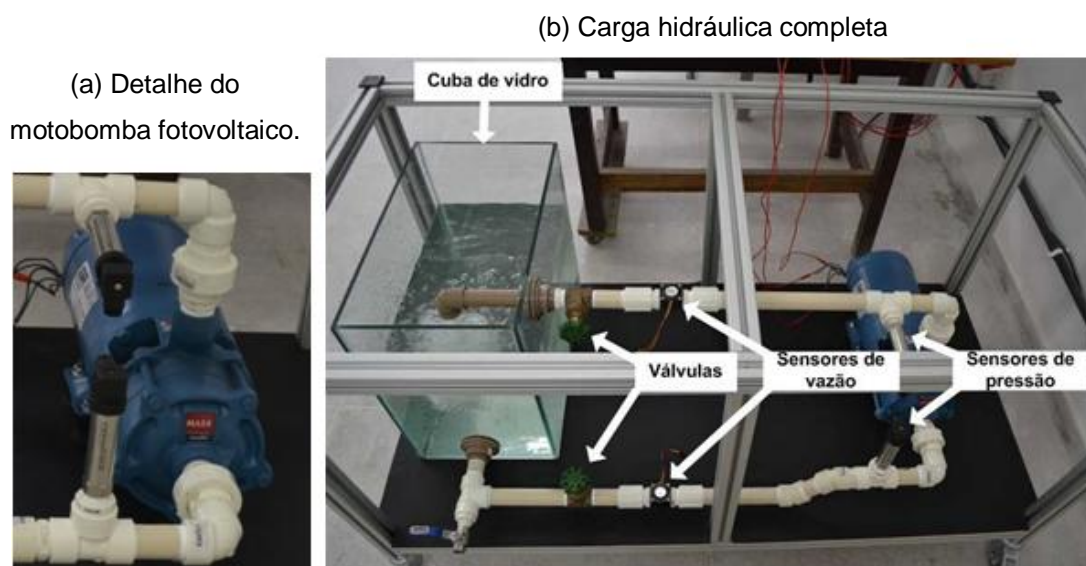


Fonte: Do autor

O motobomba Figura 4.5(a) na carga hidráulica tem a função de bombear a água que circula pelos encanamentos. A Fonte: Do autor

Tabela 4.1 resume os dados de placa do motor. Em dois pontos dos encanamentos foram colocadas válvulas de estrangulamento para aumentar ou diminuir a pressão. Sensores de pressão e vazão também estão devidamente alocados para medições. Esta carga hidráulica completa está mostrada na Figura 4.5(b).

Figura 4.5 – carga hidráulica completa



Fonte: Do autor

Tabela 4.1 – Dados da placa do motor de indução WEG

Parâmetro	Valor
Potência	1,1 kW
Tensões	220/380 V
Fator de Potência	0,87
Opções de ligações	Delta/Estrela

A intenção é que esta carga emule um sistema de bombeamento hidráulico para enchimento de caixas d'água. Uma maior pressão interna emula caixas em alturas mais elevadas.

O processador utilizado neste trabalho é o *DSP* com o Kit de desenvolvimento TMS320F28335 da *Texas Instruments*TM. Ele é adequado para o projeto aqui propostos, pois tem velocidade de processamento, quantidade de canais Analógico/Digital (*A/D*) e a quantidade de sinais *PWM* necessários para todo o controle dos dispositivos. A Figura 4.6 mostra o kit de desenvolvimento utilizado na bancada. O ambiente de programação deste processador é o *Code Composer Studio*TM, onde são aceito as linguagens C ou C++. É importante destacar que um único processador foi utilizado para controlar os dois conversores utilizados no trabalho simultaneamente, mesmo tendo frequências de chaveamento diferentes. Os *Mosfets* do conversor *Push-Pull* operam a 80 kHz, enquanto que os *IGBTs* do inversor de tensão operam a 10 kHz. Isto é possível graças à existência de contadores independentes, o que produz os sinais *PWM* para cada conversor.

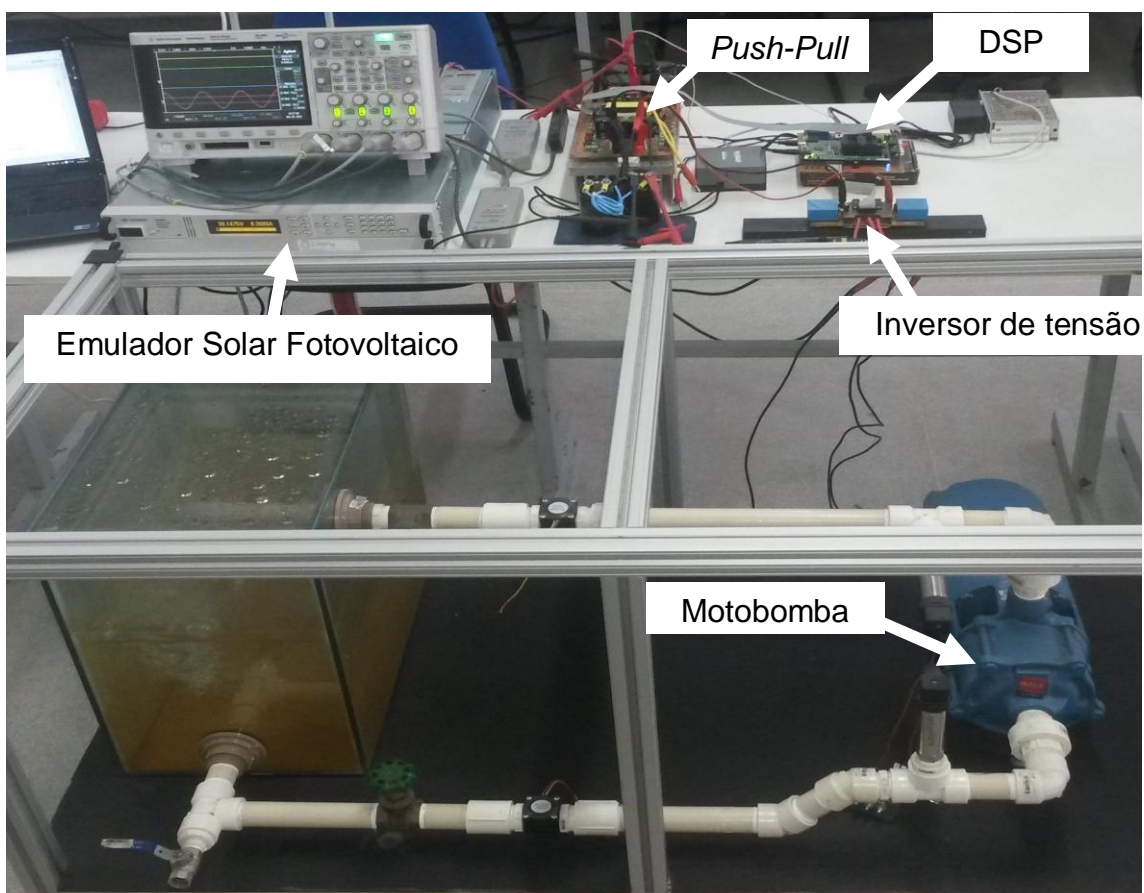
Figura 4.6 – Processador digital de sinais (TMS320F28335)



Fonte: <http://www.8051faq.com.cn/manager/download/TMDXEZ28335.html>

Uma vez descritos todos os componentes, o sistema fotovoltaico isolado montado está mostrado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Bancada experimental do sistema fotovoltaico completo



Fonte: Do autor

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

De forma a demonstrar o funcionamento do sistema fotovoltaico isolado proposto, testes experimentais da plataforma são apresentados nesta seção, para validar a metodologia utilizada.

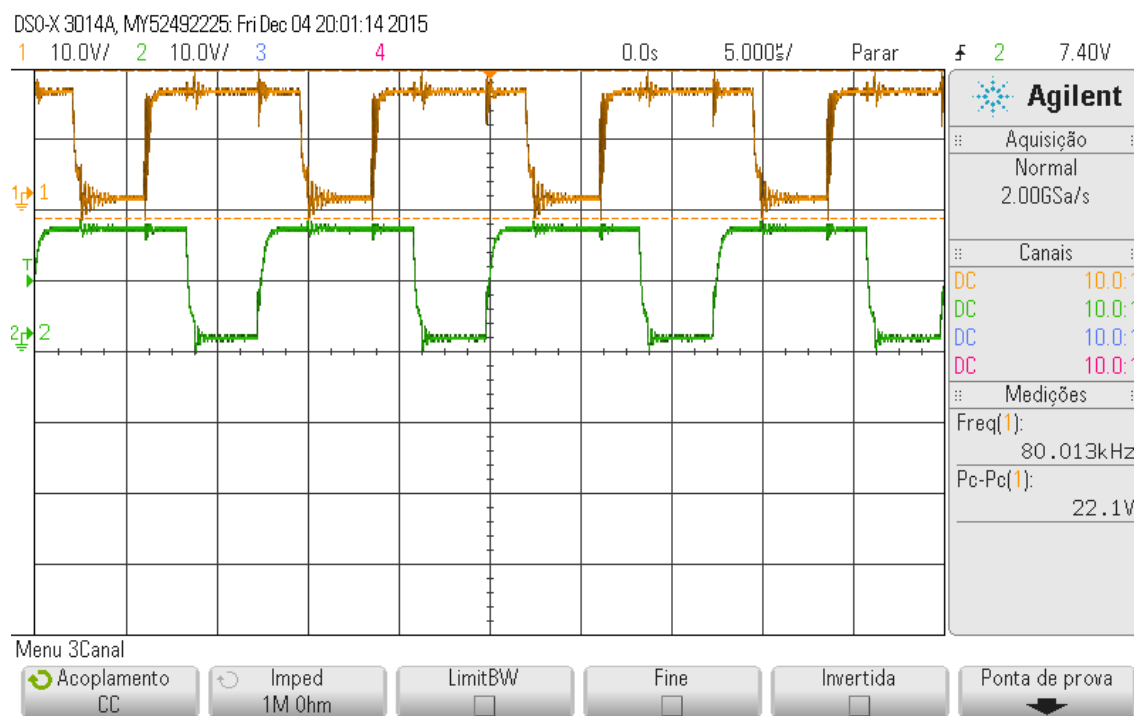
Visando avaliar a técnica do controle utilizada no conversor *Push-Pull* para o rastreamento da máxima potência da geração fotovoltaica, o emulador solar foi configurado no modo SAS, como já mencionado na seção 4.1, para os valores de um painel comercial da *Yingli Solar*, com os parâmetros mostrados na Tabela 4.2.

Como pode ser observado, a tensão e corrente com o ponto de máxima potência (MPP) tem valores 29,8 V e 8,39 A, respectivamente. Os parâmetros descritos nesta tabela são para uma irradiância 1000 W/m^2 , e temperatura do módulo de 25° C .

Tabela 4.2 – Características elétricas do Painel Fotovoltaico

Parâmetros Elétricos	Valor
Potência	250 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp})	30,4 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp})	8,24 A
Tensão de Circuito Aberto (V_{oc})	38,4 V
Corrente de Curto-Circuito (I_{sc})	8,79 A
Números de Células	60

Na Figura 4.8 é mostrada a tensão entre o dreno e fonte dos dois *Mosfets* de potência do conversor *Push-Pull*. Observa-se que a razão cíclica é maior que (0,5), o que representa a característica do conversor fonte de corrente utilizado neste trabalho.

Figura 4.8 – Sinais *PWM* das chaves do *Push-Pull*

Fonte: Do autor

Os sinais *PWM* mostrados são determinados a partir do uso de uma técnica de rastreamento de máxima potência. Assim como nos casos simulados, foi utilizada a *P&O* pelas mesmas razões já mencionadas.

Os valores medidos já mostram o gerador operando em regime permanente. Na Figura 4.9 é mostrado no *display* do emulador fotovoltaico os valores de tensão e corrente instantâneos, dado o momento do *Push-Pull* em funcionamento, extraíndo a máxima energia gerada. Neste caso, o erro da tensão rastreada é de 0,28% e o de corrente, 0,1%.

Figura 4.9 – *Display* do emulador solar fotovoltaico

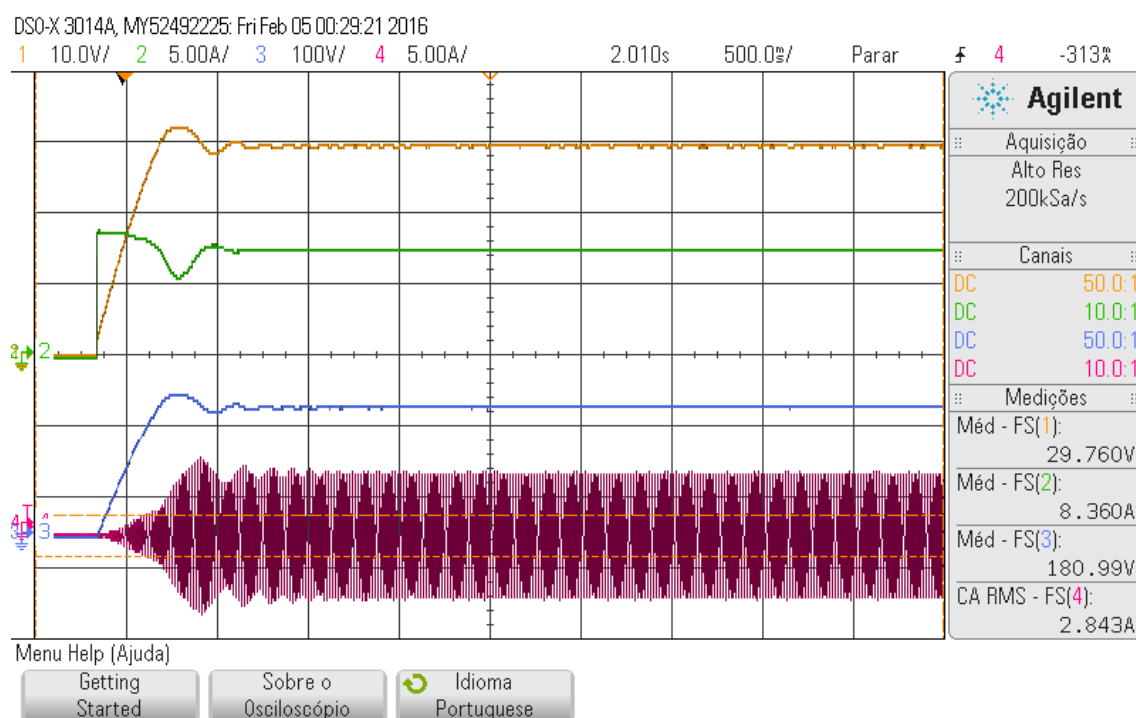
Fonte: Do autor

Na Figura 4.10 é mostrado o comportamento de todo o sistema para o emulador configurado no modo SAS, onde a tensão de saída do gerador fotovoltaico é representada pela forma de onda de cor amarela e de corrente na cor verde. Observa-se que o sistema de controle proposto obteve uma resposta dinâmica significativamente rápida, com o tempo de estabilização alcançando o ponto de máxima potência em torno de 0,75 s após o seu ligamento.

Para o barramento CC do inversor de tensão foi especificado o valor de 180 V de tensão para atuação do controle proposto. A curva em azul é o resultado da atuação do controle, e como pode ser observado, o propósito é alcançado.

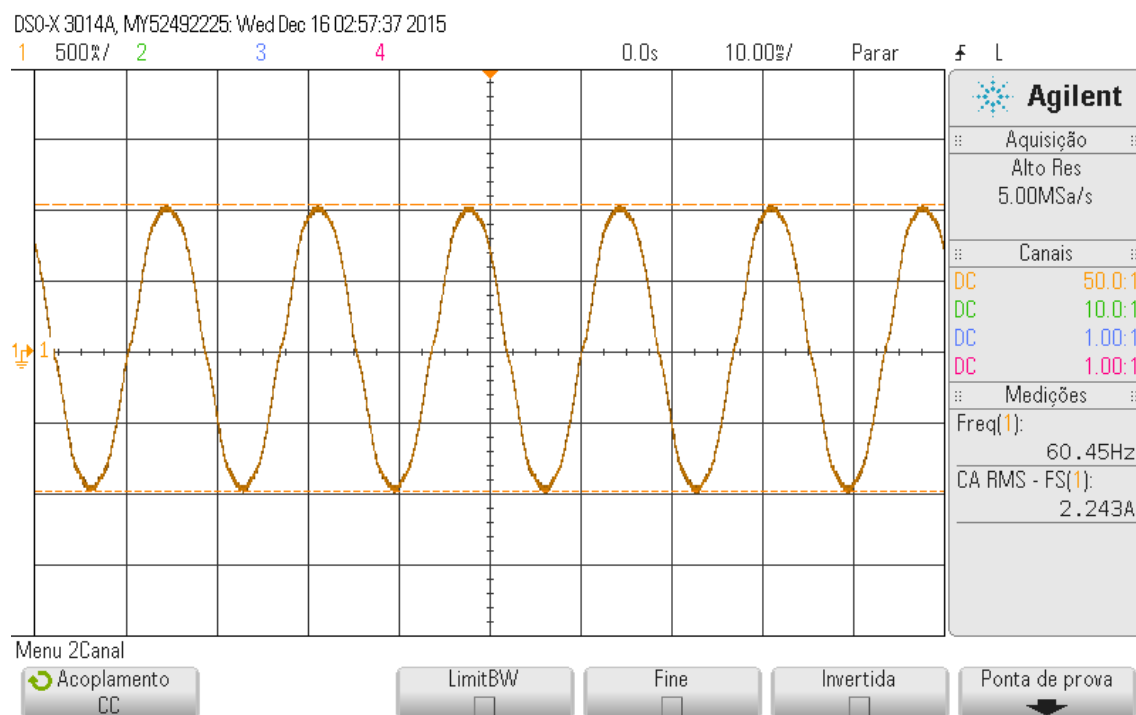
Finalmente, a curva em vermelho é uma das correntes trifásicas que alimenta a bomba d'água. Para uma melhor visualização desta última, a Figura 4.11 mostra uma aproximação, ou seja, uma faixa de tempo menor na janela do osciloscópio. Esta corrente alimenta uma fase do motor e o coloca em funcionamento.

Figura 4.10 – Medições do comportamento do sistema (SAS mode)



Fonte: Do autor

Figura 4.11 – Corrente de uma das fases da carga hidráulica



Fonte: Do autor

Para testar a dinâmica do controle é necessário alterar o nível de irradiância no gerador fotovoltaico durante o experimento. Neste gerador, a utilização do modo *list* possibilita que seja executado desta maneira.

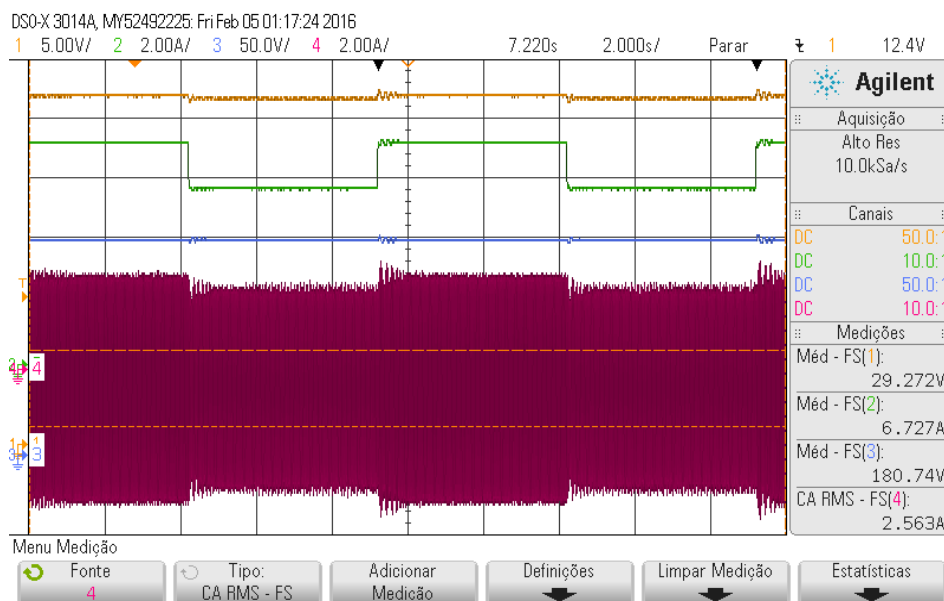
Cada lista necessita dos parâmetros (V_{mp} , I_{mp} , V_{oc} , I_{sc}) para ser criada. Dois valores de irradiância são pretendidos para o teste, portanto, são necessárias duas listas. A primeira ($V_{mp} = 29,8V$, $I_{mp} = 8,39A$, $V_{oc} = 37,6V$, $I_{sc} = 8,92A$) refere-se a uma irradiância de $1000W/m^2$, e para um valor de menor irradiância ($V_{mp} = 28,55V$, $I_{mp} = 4,51A$, $V_{oc} = 36,04V$, $I_{sc} = 5,32A$).

A lista foi configurada para permanecer por um tempo de 5s cada. Ao término da segunda, retorna-se para primeira, e assim indefinidamente até a intervenção do usuário.

Na Figura 4.12 são mostradas as formas de onda geradas pelo sistema em funcionamento, onde a tensão de saída do gerador fotovoltaico é representada pela forma de onda de cor amarela e de corrente na cor verde, tensão do barramento CC representada pela cor azul e a corrente de umas das fases da carga hidráulica representada pela cor vermelha.

Na Figura 4.12 ilustra-se, que mesmo com a variação de potência do emulador fotovoltaico (formas de onda representadas pelas cores amarelo e verde), a tensão do barramento CC se mantém estável, regulada para uma referência estabelecida a 180 V. Para isto, o inversor aumenta ou diminui a amplitude de corrente, representada pela forma de onda vermelha, na carga hidráulica.

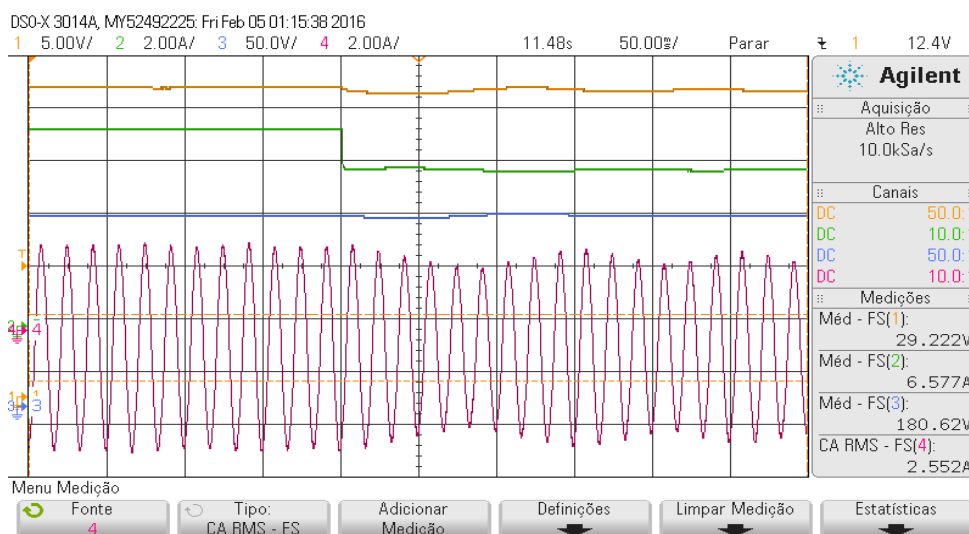
Figura 4.12 – Medições dos sinais do sistema proposto



Fonte: Do autor

Para uma melhor visualização desta corrente de fase, controlada pelo conversor CC/CA, é mostrado na Figura 4.13 o instante em que a potência do emulador fotovoltaico é reduzida, na mudança de uma curva para outra, diminuindo assim o valor de tensão e corrente. Observa-se a variação de corrente para manter o valor de tensão do barramento CC constante ao valor de referência.

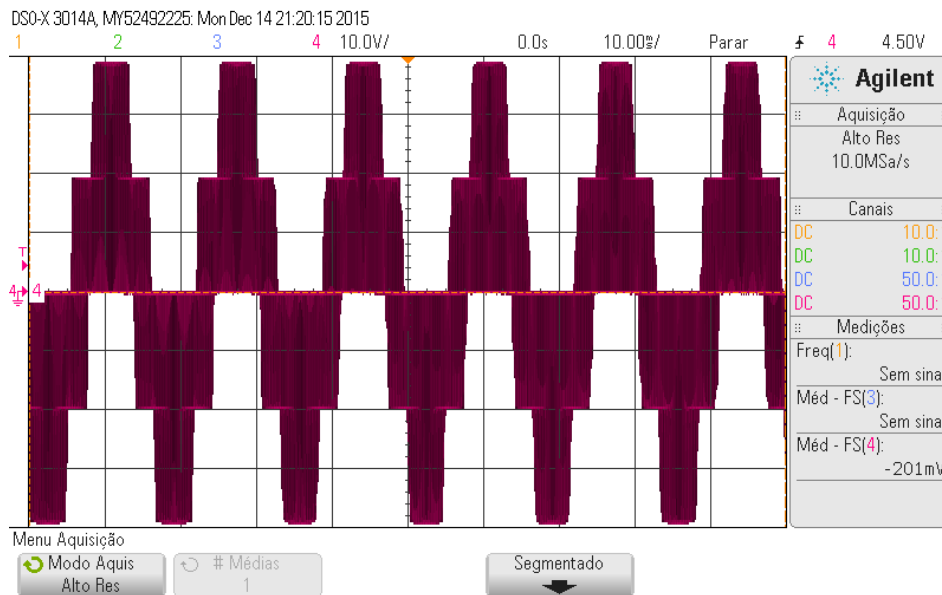
Figura 4.13 – Variações das medições dos sinais do sistema proposto



Fonte: Do autor

Na Figura 4.14 é mostrada a tensão de uma das fases que alimenta o motor. Esta tensão tem um formato modulado, pois é produzida pelo inversor de tensão e não tem uma filtragem natural como acontece com a corrente. A indutância da armadura do motor é um filtro para a corrente, e por isso tem um formato senoidal.

Figura 4.14 – Sinal *PWM* senoidal



Fonte: Do autor

5 CONCLUSÃO

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia de análise de um sistema fotovoltaico isolado. As etapas de geração, regulação CC/CC, inversão de tensão, carga e controles foram contemplados. Um primeiro objetivo foi modelar analiticamente cada uma destas etapas e em seguida, conseguir uma implementação computacional no ambiente *Simulink* do *Matlab*[®], utilizando apenas as funções contidas em sua biblioteca. O atrativo desta metodologia é que o usuário passa a ter flexibilidade para construção das etapas, sem ficar restrito aos blocos pré-definidos dos pacotes, como por exemplo, os do *SymPowerSys*[®]. As técnicas apresentadas neste trabalho permitem que um gerador fotovoltaico possa ser construído para fornecer tensão ou corrente, o que não acontece no *SymPowerSys*[®], que apenas a tensão é fornecida. Da mesma forma acontece para os circuitos e cargas. Além disso, a integração entre as etapas construídas é de fácil implementação. Como o ambiente *Simulink* permite com grande facilidade checar os resultados, toda análise de simulação foi feita neste ambiente. Para confirmar a veracidade dos resultados de simulação, uma bancada experimental foi desenvolvida em escala laboratorial. Os circuitos dos conversores foram projetados em concordância com os valores tratados na simulação assim como os parâmetros dos controles. Com estas condições e com os resultados experimentais das tensões e correntes da máxima potência do gerador rastreados, tem-se a prova de que a proposta está correta.

Um segundo objetivo foi de projetar um controle do barramento CC que se encontra entre o regulador CC/CC e o inversor de tensão. Uma técnica simples, baseada na ideia do algoritmo perturba e observa para rastreamento de máxima potência, foi desenvolvido. Como pôde ser observado inicialmente nos resultados de simulação na Figura 3.17, os valores de referência foram prontamente alcançados e permanecendo constante como mostrado no resultado experimental da Figura 4.10. No resultado do experimento na Figura 4.13 é mostrado a corrente da carga CA variando para manter constante a tensão do barramento CC na mudança da irradiação o que corrobora com resultado de simulação da Figura 3.18 e valida assim esta segunda proposta do trabalho.

Com o funcionamento de todo o sistema isolado, pôde-se verificar o pleno funcionamento do sistema de bombeamento hidráulico, que pode ser entendido como um sistema de bombeamento d'água em regiões ensolaradas e remotas, uma vez que não se faz uso de baterias.

Trabalhos Futuros

A partir do que foi desenvolvido neste trabalho, pode ser sugerido para sua continuação os seguintes tópicos:

- Testes no modelo do gerador fotovoltaico com saída de corrente.
- Outras técnicas de rastreamento de máxima potência mais elaboradas em conjunto com os modelos apresentados.
- Conexão com a rede elétrica.

REFERÊNCIAS

A. YAZDANI, A. F. H. G. M. R. et al. Modeling guidelines and benchmark for power system simulation studies of three-phase singlestage photovoltaic systems. **IEEE Trans. Pow. Del.**, Apr 2011. ISSN 26(2):1247–1264.

ADHIKARI, N. et al. Analysis and Design of Isolated Solar-PV Energy Generating System. **Industry Applications Society Annual Meeting (IAS)**, 2011.

ANDERSEN, R. L.; BARBI, I. Three-Phase Current-Fed Push-Pull DC-DC Converter. In **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, p. 358–368, February 2009. ISSN 2.

AZZOPARDI, B.; M.-CESEA, E.; MUTALE, J. Decision support system for ranking photovoltaic technologies. **IET Renew. Power Generat.**, Nov 2013. ISSN 7(6):669–679.

BHATNAGAR; NEMA, R. K. Maximum power point tracking control techniques: state-of-the-art in photovoltaic applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 224–241, 2013.

BOZTEPE, M. et al. Global MPPT scheme for photovoltaic string inverters based on restricted voltage window search algorithm. **IEEE Trans. Ind. Electron**, p. 3302–3312, Jul 2014. ISSN 61(7).

BUSA, V.; NARSINGOJU, K. K.; KUMAR, G. V. Simulation Analysis of Maximum Power Control of Photo Voltaic Power System. **International Journal on Advanced Electrical and Electronics Engineering**, v. 01, p. 2278-8948, 2012. ISSN 1.

CHIKH, A.; CHANDRA, A. An optimal maximum power point tracking algorithm for PV systems with climatic parameters estimation. **IEEE Trans. Sustain. Energy**, p. 644–652, Apr 2015. ISSN 6(2).

ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. **IEEE Trans. Energy Convers**, p. 439–449, Jun 2007. ISSN 22(2).

ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking- techniques. **IEEE Trans. Energy Convers.**, Jun 2007. ISSN 22(2):439–449.

FERNANDES, D. A. et al. Modeling and state-space feedback control of a dc-dc converter for photovoltaic systems. **In Proc. of ECCE**, v. 01, p. 1119–1128, 2014.

FERNANDES, D. A.; COSTA, F. F.; DOS SANTOS, E. C. Digital-Scalar PWM Approaches Applied to Four-Leg Voltage-Source Inverters. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, p. 2022-2030, 2013.

HARTMANN, L. V. Otimização de Sistemas Fotovoltaicos. **Dissertação de mestrado**, Campina Grande, n. Universidade Federal de Campina Grande, 2007.

KOLLIMALLA, S. K.; MISHRA, M. K. A novel adaptive P&O MPPT algorithm considering sudden changes in the irradiance. **IEEE Trans. Ener. Conv**, p. 602–610, Sept 2014. ISSN 29(3).

LATRECHE, S. et al. Implementation of a MPPT algorithm and supervision of a shading on photovoltaic panel, 2015.

M, L.; K, V. B. Incremental Conductance Based Maximum Power Point Tracking (MPPT) for Photovoltaic System. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**, v. 02, p. 1420-1424, 2012.

M.KOLLING et al. Análise operacional de um sistema fotovoltaico de bombeamento de água. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, p. 527-535, set/dez 2004. ISSN 3.

MAHMOUD, Y.; XIAO, W.; ZEINELDIN, H. A simple approach to modeling and simulation of photovoltaic modules. **IEEE Trans. Sustain. Energy**, Jan 2012. ISSN 3(1):185–186.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power Electronics: converters, applications, and design**. New York: [s.n.], v. 3rd Ed, 2003.

MOSTEFAI, M.; KHEMLICHE, M.; BADOUD, A. E. Implementation of a MPPT algorithm and Supervision of a Shading on Photovoltaic Panel. **International Renewable Energy Congress (IREC)**, n. 6th, 2015.

MUKAI, T. et al. The competitiveness of continuous monitoring of residential PV systems: A model and insights from the japanese market. **IEEE Trans. Sustain. Energy**, Oct 2014. ISSN 5(4):1176–1183.

PIAZZA, M. C. et al. Analytical versus neural real-time simulation of a photovoltaic generator based on a DC/DC converter. **IEEE Trans. Ind. Appl.**, Nov./Dec 2010. ISSN 46(6):2501–2510.

REN21. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century. **Renewables 2015 Global Status Report**, France, v. Relatório Técnico ISBN 978-3-9815934-7-1, 2015.

SOETEDJO, A. et al. Modeling of Maximum Power Point Tracking Controller for Solar Power System, v. 10, n. TELKOMNIKA, p. 419-430, 2012.

SU, S.; CHEN., J. Simulation investigation of high-efficiency solar thermoelectric generators with inhomogeneously doped nanomaterials. **IEEE Trans. Ind. Electron.**, May 2015. ISSN 62(5):3569–3575.

THOTTUVELIL, V. J.; WILSON, T. G.; JR., H. A. O. Analysis and Design of a Push-Pull Current-Fed Converter. **IEEE Power Electronics Specialists Conference Proceedings**, p. 192-203, 1981. ISSN In Proc. of Pesc'81.

VELDHUIS, A. J.; REINDERS., A. Real-time irradiance simulation for PV products and building integrated PV in a virtual reality environment. **Journ. of Photovoltaics**, Jul 2012. ISSN 2(3):352–358.

VIOREL, I.; ISTRATE, M. Modeling of Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Systems. **Electrical and Power Engineering (EPE)**, p. 953-957, 2012.