

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**



**ANDRÉ SALUME LIMA FERREIRA LEÃO**

**TÉCNICA PERTURBA E OBSERVA MODIFICADA  
APLICADA EM MPPT DISTRIBUÍDO (DMPPT)**

VITÓRIA  
2019

ANDRÉ SALUME LIMA FERREIRA LEÃO

**TÉCNICA PERTURBA E OBSERVA MODIFICADA APLICADA EM  
MPPT DISTRIBUÍDO (DMPPT)**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **André Salume Lima Ferreira Leão**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos

ANDRÉ SALUME LIMA FERREIRA LEÃO

## **TÉCNICA PERTURBA E OBSERVA MODIFICADA APLICADA EM MPPT DISTRIBUÍDO (DMPPT)**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **André Salume Lima Ferreira Leão**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 17 de dezembro de 2019.

### **COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Dr. Walbermark Marques dos Santos**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**  
**Orientador**

---

**Dr. Paulo José Mello Menegáz**  
**Universidade Federal do Espírito Santo**

---

**MSc. Vinícius Secchin de Melo**  
**Instituto Federal do Espírito Santo**

*Dedico a todos aqueles que tentam melhorar  
o Brasil utilizando engenharia e tecnologia.*

*Agradeço a todos aqueles que transformaram a UFES na minha casa entre 2014 e 2019. Foram anos inesquecíveis que me orgulho muito por ter vivido e a vontade é agradecer a cada indivíduo que cruzou meu caminho e que, de alguma forma, me ajudou a chegar à conclusão do curso.*

*Agradeço à minha família, representada aqui pelos meus pais Marcos Ferreira Leão e Elyzabeth Salume Lima, pelo amor, pela paciência, pelo suporte que me proporcionaram durante esses anos.*

*Aos professores, representados aqui pelo orientador desse projeto, Walbermark Marques dos Santos, por todo o conhecimento e inspiração que me passaram.*

*Aos meus amigos, representados aqui pelos meus colegas de curso, que me ensinaram, me divertiram e me acompanharam nessa jornada.*

*Ao Projeto Solares, por desenvolver meu conhecimento e habilidades e por abrir portas para meu futuro.*

*À FAPES, que incentivou financeiramente o desenvolvimento desse Trabalho de Conclusão de Curso.*

*E eu poderia seguir escrevendo e ainda assim não apontar todos os que me ajudaram a chegar onde estou. Que fique registrado que sou imensamente grato a todos que impactaram positivamente na minha vida até aqui!*

## RESUMO

Este Trabalho de Conclusão de Curso consiste no estudo e projeto de um conversor CC/CC que pudesse ser usado como otimizador de potência, ou seja, como MPPT distribuído (DMPPT).

Durante o projeto, foi desenvolvido uma técnica original de rastreamento do ponto de máxima, modificando o Perturba e Observa convencional e o fazendo ter passo variável sem avaliar a derivada da potência em relação à tensão ou à razão cíclica. Além disso, essa técnica permite que o valor ideal da razão cíclica, para uma dada situação, seja fixado, sem ter a necessidade de sempre perturbar o sistema, com isso, fazendo o módulo operar por mais tempo na máxima potência.

Outras contribuições deste trabalho são as formulações das limitações de cada topologia de conversor CC/CC para trabalhar em um sistema de DMPPT em série e um método para definir o modo de operação do conversor *Buck+Boost*, como *Buck* ou como *Boost*, de forma automática, sem distingui-los no código e sem avaliar a necessidade de ter que operar em um modo específico.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de curvas de $P \times V$ e $I \times V$ em células fotovoltaicas .....	20
Figura 2 - Efeito causado pela variação de intensidade luminosa na célula.....	21
Figura 3 - Efeito causado pela variação de temperatura na célula.....	21
Figura 4 - Curva de potência distorcida.....	22
Figura 5 - Fluxograma do algoritmo P&O convencional .....	23
Figura 6 - Característica de saída de SCPVM utilizando conversor abaixador .....	26
Figura 7 - Característica de saída de SCPVM utilizando conversor elevador .....	26
Figura 8 - Característica de saída de SCPVM.....	26
Figura 9 - SCPVMs com diferentes potências .....	28
Figura 10 - Região de corrente para operação em máxima .....	29
Figura 11 - Região de corrente para operação em máxima .....	30
Figura 12 – Ausência de região de corrente para operação .....	31
Figura 13 - Esquemático básico do conversor Buck+Boost .....	33
Figura 14 – Esquemático e curvas de operação do Buck-Boost convencional .....	34
Figura 15 - Esquemático e curvas de operação do Buck+Boost operando como Buck-Boost .....	34
Figura 16 - Esquemático e curvas de operação do Buck+Boost operando como Buck.....	35
Figura 17 - Esquemático e curvas de operação do Buck+Boost operando como Boost .....	35
Figura 18 - Funcionamento como Buck com chave $S_1$ fechada (on).....	36
Figura 19 - Funcionamento como Buck com chave $S_1$ aberta (off).....	36
Figura 20- Funcionamento como Boost com chave $S_2$ fechada (on) .....	36
Figura 21 - Funcionamento como Boost com chave $S_1$ aberta (off).....	37
Figura 22 - Funcionamento como Pass-Through .....	37
Figura 23 - Variação do passo após um pico ou vale.....	40
Figura 24 - Variação do passo até $D$ fixo ( $dD=0$ ).....	41
Figura 25 - Retomada do passo $dD_{max}$ (vermelho, parte superior) após variação na potência disponível (vermelho, parte inferior) sendo acompanhada pela potência extraída (azul, parte inferior).....	42
Figura 26 - Circuito do conversor feito no software PSIM.....	45
Figura 27 - Topologia com dois DMPPTs.....	46

Figura 28 - Topologia com um DMPPT .....	46
Figura 29 - Topologia com nenhum DMPPT .....	47
Figura 30 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	48
Figura 31 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...48	
Figura 32 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...49	
Figura 33 - Razões cíclicas .....	49
Figura 34 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	50
Figura 35 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...50	
Figura 36 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...51	
Figura 37 - Razões cíclicas .....	51
Figura 38 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	52
Figura 39 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...52	
Figura 40 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...53	
Figura 41 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	54
Figura 42 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...54	
Figura 43 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...55	
Figura 44 - Razões cíclicas .....	55
Figura 45 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	56
Figura 46 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...56	
Figura 47 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...57	
Figura 48 - Razões cíclicas .....	57
Figura 49 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	58
Figura 50 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...58	
Figura 51 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...59	
Figura 52 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	60
Figura 53 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...60	
Figura 54 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...61	

Figura 55 - Razões cíclicas .....	61
Figura 56 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	62
Figura 57 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...62	
Figura 58 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...63	
Figura 59 - Razões cíclicas .....	63
Figura 60 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul) .....	64
Figura 61 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i...64	
Figura 62 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j...65	
Figura 63 - MLPE no mercado brasileiro. (A) Renovigi, (B) APsystems, (C) Tigo e (D) SolarEdge.....	72

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - População mundial através dos anos .....	14
Gráfico 2 - Potência instalada, em MW, de geradores fotovoltaicos no Brasil.....	15

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valores nominais do módulo fotovoltaico escolhido .....	42
Quadro 2 - Parâmetros de projeto .....	43
Quadro 3 - Valores mínimos para os componentes do conversor .....	44
Quadro 4 - Variáveis utilizadas para as simulações .....	47
Quadro 5 - Resultado do teste para 2 DMPPTs sem perturbação .....	49
Quadro 6 - Resultado do teste para 1 DMPPT sem perturbação .....	51
Quadro 7 - Resultado do teste sem DMPPT sem perturbação.....	53
Quadro 8 - Perturbação gerada por alterações climáticas.....	53
Quadro 9 - Resultado do teste para 2 DMPPTs com perturbação climática.....	55
Quadro 10 - Resultado do teste para 1 DMPPT com perturbação climática .....	57
Quadro 11 - Resultado do teste sem DMPPT com perturbação climática.....	59
Quadro 12 - Perturbação gerada por alteração na tensão de barramento .....	60
Quadro 13 - Resultado do teste para 2 DMPPTs com perturbação na tensão do barramento .....	61
Quadro 14 - Resultado do teste para 1 DMPPT com perturbação na tensão do barramento .....	63
Quadro 15 - Resultado do teste sem DMPPT com perturbação na tensão do barramento .....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BIPV	<i>Building-Integrated Photovoltaic</i>
DMPPT	<i>Distributed Maximum Power Point Tracking</i>
MLPE	<i>Module Level Power Electronics</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
SCPVM	<i>Self-Controlled PV Module</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	Geração fotovoltaica	14
1.2	Desafio para a geração fotovoltaica urbana	16
1.3	Objetivo e justificativa	17
1.4	Apresentação do trabalho	18
<b>2</b>	<b>EMBASAMENTO TEÓRICO</b>	<b>19</b>
2.1	Módulo fotovoltaico	19
2.1.1	Característica da célula fotovoltaica	20
2.1.2	Característica de associações em série de células fotovoltaicas	21
2.2	Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT)	22
2.3	Rastreamento distribuído do ponto de máxima potência (DMPPT)	24
2.3.1	Limitações do rastreamento centralizado	24
2.3.2	Rastreamento distribuído com microinversores	25
2.3.3	Rastreamento distribuído com otimizadores de potência	25
2.4	Constatações	31
<b>3</b>	<b>PROJETO</b>	<b>32</b>
3.1	Proposta	32
3.2	Conversor	32
3.2.1	Controle das chaves	37
3.3	Algoritmo P&O	38
3.4	Dimensionamento	42
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EM SIMULAÇÃO</b>	<b>45</b>
4.1	Parâmetros para testes	45
4.2	Teste sem perturbações	48
4.2.1	Otimizador em 2 módulos	48
4.2.2	Otimizador em 1 módulo	50
4.2.3	Sem otimizador	52
4.3	Teste com perturbação na potência disponível no módulo	53
4.3.1	Otimizador em 2 módulos	54
4.3.2	Otimizador em 1 módulo	56
4.3.3	Sem otimizador	58
4.4	Teste com perturbação na tensão de barramento	59

4.4.1 Otimizador em 2 módulos.....	60
4.4.2 Otimizador em 1 módulo.....	62
4.4.3 Sem otimizador.....	64
4.5 Comentários.....	65
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE A – FLUXOGRAMA P&amp;O MODIFICADO .....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE B – ANÁLISE DE MERCADO .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>74</b>

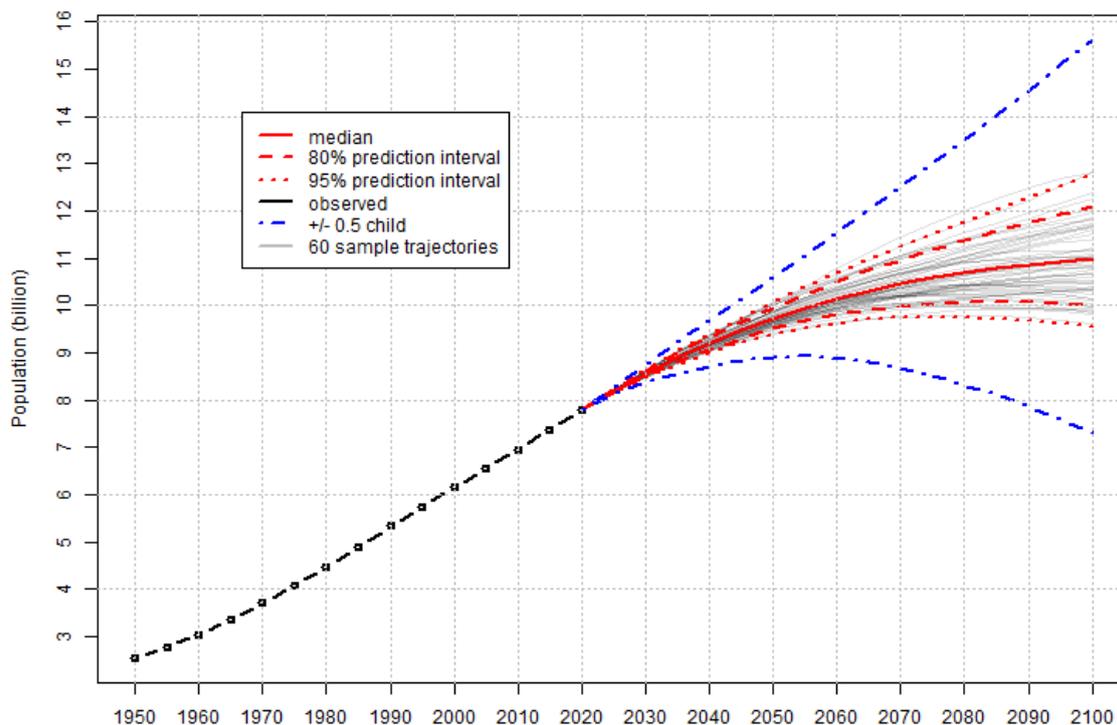
# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Geração fotovoltaica

A humanidade tem um grande desafio energético a ser encarado. A população mundial e a demanda por energia elétrica vêm se tornando cada vez maior. O consumo de energia primária cresceu a uma taxa anual de 2,9% em 2018, quase o dobro da média de 10 anos de 1,5% ao ano e a maior desde 2010 (BP, 2019) sendo que ainda, para um futuro próximo, deve ser considerada a popularização de veículos elétricos e de dispositivos conectados à internet, aumentando ainda mais a necessidade de geração.

Associado a isso, a população mundial, embora tenha tido sua taxa de crescimento diminuída nos últimos anos, está sendo projetada pela ONU para 10 bilhões de habitantes em 2060, como demonstra o Gráfico 1.

Gráfico 1 - População mundial através dos anos



Fonte: ONU (2019).

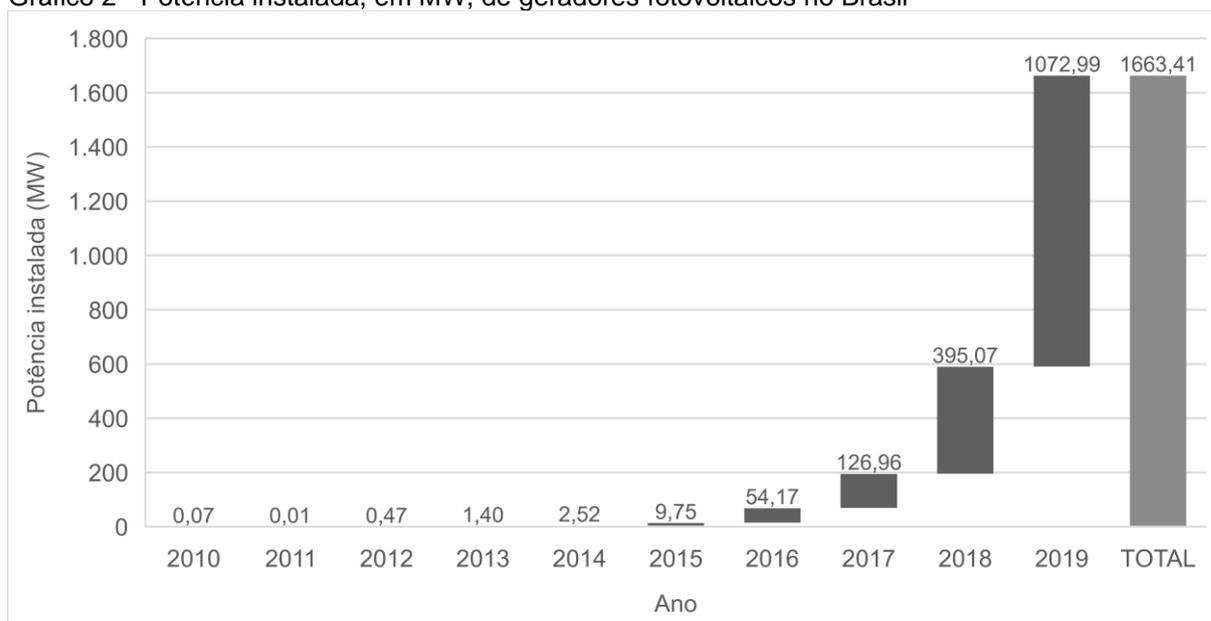
Além da necessidade de produzir eletricidade em uma escala ainda maior que a atual, a sustentabilidade também deve ser levada em conta. Cada vez mais necessitada de recursos naturais, a civilização não pode negligenciar o meio

ambiente e deve associar o progresso à preservação e manutenção dos ecossistemas.

Dessa forma, há uma busca intensa por gerar mais energia, causando o menor impacto possível, e, apesar dos desafios ambientais ligados a energia fotovoltaica, como o descarte dos módulos e os subprodutos tóxicos vinculados ao processo de fabricação das células (SVTC, 2019), ela se apresenta como um tipo de geração de baixo impacto.

Por isso, já é possível perceber o crescimento de instalações fotovoltaicas em todo o mundo, com a tendência de aumentar ainda mais. No Brasil, que tem altos níveis de irradiância solar, devido sua localização geográfica, a potência instalada bate recorde ano a ano, conforme evidenciado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Potência instalada, em MW, de geradores fotovoltaicos no Brasil



Fonte: ANEEL, 2019

Avaliando o quesito sustentabilidade, a baixa densidade energética dos módulos fotovoltaicos, os quais os melhores no mercado têm eficiência próxima a 20%, faz com que não seja tão interessante ocupar áreas livres de fazenda ou florestas para a instalação de usinas fotovoltaicas, uma vez que essa vasta área poderia ser usada para outros fins, como cultivo agrícola, criação de animais ou reservas naturais.

O uso mais popular e também mais adequado, do ponto de vista do aproveitamento de espaço, é ter os módulos fotovoltaicos instalados nas próprias edificações, tanto no telhado quanto integrado nas fachadas e vidros dos prédios, seguindo o conceito de *Building-Integrated Photovoltaic* ou BIPV (ALONSO et al., 2012). No Brasil 89% da potência instalada está em zonas urbanas (ANEEL, 2019).

O fato de ser uma fonte estática e silenciosa, se comparada a geradores rotativos, também contribui para sua aceitação nas cidades, mas avaliando a potencial eficiência do sistema, o ambiente urbano apresenta alguns percalços.

## **1.2 Desafio para a geração fotovoltaica urbana**

Um gerador fotovoltaico conectado à rede elétrica é composto, basicamente, por três elementos: os módulos fotovoltaicos, responsáveis por captar luz e transformá-la em energia elétrica; um dispositivo que garante a operação dos módulos em sua máxima potência, utilizando um recurso chamado *Maximum Power Point Tracking* ou MPPT; e o inversor, que faz a conversão de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) e se conecta à rede.

Comumente, os inversores têm o recurso MPPT em suas portas de entradas para otimizar a geração de energia elétrica de um grupo de painéis. Assim esses modelos, conhecidos como “inversores *string*”, acumulam duas funções: transformar a tensão contínua dos painéis em tensão alternada, conforme a da rede elétrica; e fazer o conjunto de módulos trabalhar em sua máxima potência.

Vale notar que a maior potência do conjunto pode não ser a maior potência possível a ser fornecida. Em uma situação com painéis em diferentes condições de insolação e/ou temperatura ou que tenham diferenças construtivas significativas, cada um deles operará em uma faixa de potência distinta e, como todos os painéis estão conectados entre si, o baixo desempenho de um deles influencia o grupo, fazendo o dispositivo MPPT gerar a máxima potência do conjunto, que é menor que a soma das máximas potências individuais de cada painel (FEMIA et al., 2013, p.139).

Em sistemas fotovoltaicos urbanos, é comum que haja módulos com diferentes níveis de incidência solar. Isso acontece, principalmente, por dois motivos: devido ao

pouco espaço para a instalação dos painéis, que resulta em painéis colocados em diferentes águas de telhado, ou seja, com diferentes orientações geográficas; e porque ambientes urbanos são mais suscetíveis a proporcionar sombreamentos, pois o entorno nem sempre é favorável à instalação fotovoltaica, podendo haver árvores, prédios, postes, maior acúmulo de material particulado, entre outros.

Se cada módulo fotovoltaico tiver um dispositivo MPPT de dedicação exclusiva, fazendo cada um operar, individualmente, no seu ponto de máxima potência, é possível extrair do sistema o somatório das potências máximas de cada painel, aumentando a eficiência global da geração. A esse tipo de abordagem dá-se o nome de MPPT Distribuído (DMPPT) (FEMIA et al., 2008).

Existem duas formas de se usar MPPTs distribuídos: com microinversores e com otimizadores de potência. O primeiro é comercialmente mais comum e trata de reduzir o inversor para que cada painel tenha o seu. O segundo não é tão popular, principalmente no Brasil, mas se fundamenta na ideia de dividir a função dos atuais inversores em dois dispositivos. Cada placa teria acoplada a si um conversor CC/CC que faria o papel de rastrear o ponto de máxima potência, distribuindo a função do MPPT, e o papel de converter a tensão contínua para alternada seria realizado por um inversor central. Assim, o sistema conseguiria ser mais eficiente do que utilizando inversores *string* e não tão caro quanto um sistema com microinversores, já que a etapa de inversão de tensão, que não precisa ficar partilhada, é concentrada em outro equipamento.

### **1.3 Objetivo e justificativa**

Considerando o cenário apresentado nos itens 1.1 e 1.2, este trabalho pretende explorar mais as aplicações de DMPPT usando conversores CC/CC e desenvolver o projeto de um otimizador de potência, que pode vir a se tornar um produto que a ser agregado ao mercado de energia solar, difundindo esta tecnologia, que hoje é pouco conhecida no mercado nacional, e buscando tornar sistemas fotovoltaicos otimizados mais acessíveis.

## 1.4 Apresentação do trabalho

Este trabalho contém, em seu segundo capítulo, o embasamento teórico necessário para compreender o funcionamento da tecnologia, explicando o que o DMPPT utilizando conversores CC/CC pode proporcionar e como ele desempenha sua função.

No capítulo 3, é exposto como foi desenvolvido o otimizador de potência para este trabalho e quais foram as decisões de projeto, desde a escolha do circuito e seu dimensionamento ao algoritmo MPPT utilizado.

No quarto capítulo são apresentados os resultados de performance do conversor em diferentes testes simulados no software PSIM, acompanhado de comentários explicativos.

O capítulo 5 traz uma breve análise de mercado sobre as soluções de eletrônica de potência em nível de módulo (*Module Level Power Electronics* ou MLPE) já existentes, como otimizadores de potência e microinversores, e seus custos.

As conclusões da pesquisa são apresentadas no sexto e último capítulo.

## 2 EMBASAMENTO TEÓRICO

### 2.1 Módulo fotovoltaico

Módulos, painéis ou placas fotovoltaicos são uma associação de células fotovoltaicas. Essas, por sua vez, são feitas com uma estrutura molecular, geralmente utilizando silício, capaz de converter energia luminosa em energia elétrica.

A irradiância solar, medida em  $W/m^2$ , sobre uma placa varia de acordo com a intensidade do sol, que é inconstante durante o dia, devido às variações climáticas e ao movimento de rotação e translação da Terra. Por isso, a orientação e a inclinação do painel são fatores importantes para determinar a intensidade de luz que é incidida no módulo, uma vez que a maior transferência de energia do Sol para as células fotovoltaicas se dá quando o vetor de *Poynting*, que representa a direção do fluxo de energia, é perpendicular à superfície da placa.

A máxima potência elétrica ( $P$ ), em  $W$ , disponível para ser extraída do painel depende de sua eficiência ( $\eta$ ), que varia de acordo com a temperatura na superfície das células, sua área ( $A$ ), em  $m^2$ , e da Irradiância Solar ( $SI$ ), em  $W/m^2$ , de acordo com a fórmula (1):

$$P = SI \cdot A \cdot \eta(T) \quad (1)$$

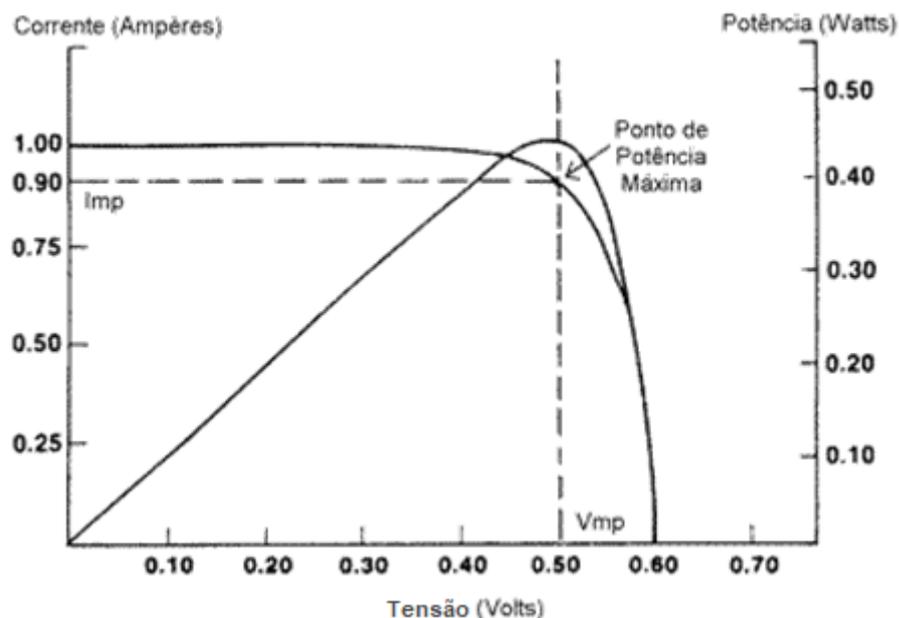
Como a área do módulo é um valor determinado em sua fabricação, a variação da potência disponível depende diretamente da variação da irradiância solar, ou seja, da orientação e inclinação dos painéis e da presença de qualquer tipo de obstáculo à luz, e da temperatura das células.

Importante ressaltar que as células fotovoltaicas produzem energia elétrica em tensão e corrente contínuas. Para conectá-las na rede elétrica, é necessário que haja um inversor que seja capaz de transformar a tensão contínua para alternada e sincronizá-la com a rede.

### 2.1.1 Característica da célula fotovoltaica

Cada célula pode operar em diferentes valores de potência, representados pela curva na Figura 1, que é definida pela tensão de operação em seus terminais.

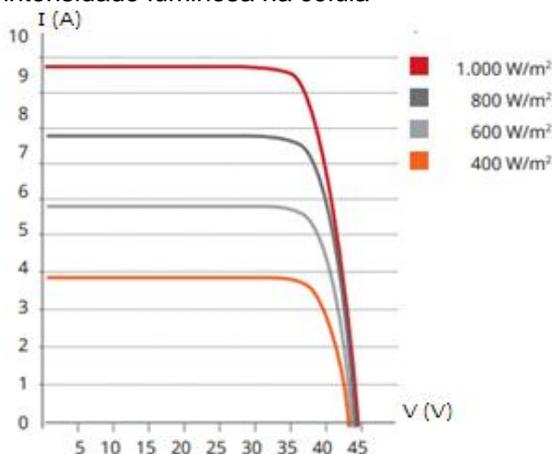
Figura 1 - Exemplo de curvas de  $P \times V$  e  $I \times V$  em células fotovoltaicas



Fonte: Adaptado de CRESESB (2019).

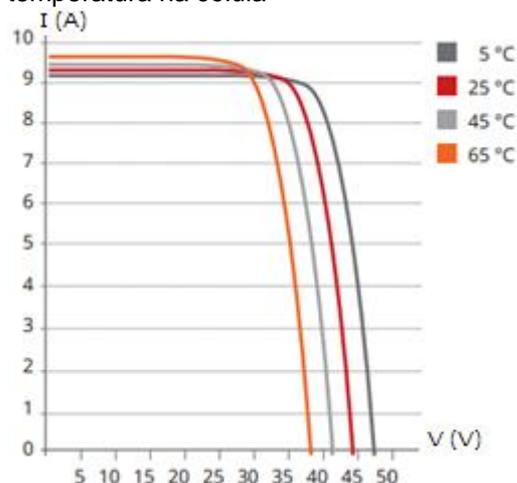
As curvas de potência de uma célula fotovoltaica têm o mesmo formato característico, apresentando um ponto de máxima potência. Tais curvas e, conseqüentemente, a localização do ponto de máxima potência pode variar de acordo com aspectos construtivos, mas em uma mesma célula, os possíveis valores de potência dependem da incidência luminosa e a temperatura de operação, como mencionado no item 2.1 e conforme ilustrado na Figura 2 e na Figura 3.

Figura 2 - Efeito causado pela variação de intensidade luminosa na célula



Fonte: Adaptado de CANADIAN SOLAR (2016).

Figura 3 - Efeito causado pela variação de temperatura na célula



Fonte: Adaptado de CANADIAN SOLAR (2016).

Vale ressaltar que o aumento da potência disponível na célula é diretamente proporcional ao crescimento da irradiância solar, que influencia principalmente na corrente de saída, e contrária ao aumento da temperatura, que interfere majoritariamente em sua tensão.

### 2.1.2 Característica de associações em série de células fotovoltaicas

A associação de células pode se dar em série ou paralelo e se comporta conforme as associações de elementos em circuitos elétricos: em paralelo, as células terão as mesmas tensões em seus terminais e suas correntes serão somadas; e em série, elas compartilharão a mesma corrente e suas tensões serão somadas.

Um painel é um conjunto de células geralmente associadas em série. A uma associação em série de painéis se dá o nome de *string*. A associação em série é comum em sistemas fotovoltaicos pois ela pode proporcionar correntes baixas para uma alta potência, diminuindo perdas e economizando em material condutor (fios e barramentos).

Um ponto negativo da associação em série, no caso dos módulos fotovoltaicos, é a grande influência de um painel com pouca incidência solar na corrente da *string*. Como já explicado no item 2.1.1, a corrente é fortemente influenciada pela irradiância solar e, dessa forma, é possível perceber, tomando como exemplo os painéis com 400 W/m<sup>2</sup> e 1000 W/m<sup>2</sup> da figura 2, que seus pontos de máxima potência não ocorrem com o mesmo valor de corrente e por isso, pelo de estarem

em série e compartilharem a mesma corrente, não haverá um pico de potência comum e sim dois picos menores, quando a corrente da *string* coincidir com as correntes de máxima potência de cada um dos módulos. Nesse caso, a curva  $P \times V$  apresentará dois picos de potência, conforme ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Curva de potência distorcida



Fonte: Solarize (2019).

Essa distorção da curva de potência da *string* pode ocorrer sempre que houver diferenças significativas entre a potência de geração de módulos conectados em série, podendo ser ocasionada por sombras, sujeira, diferentes orientações, diferenças construtivas, entre outros.

## 2.2 Rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT)

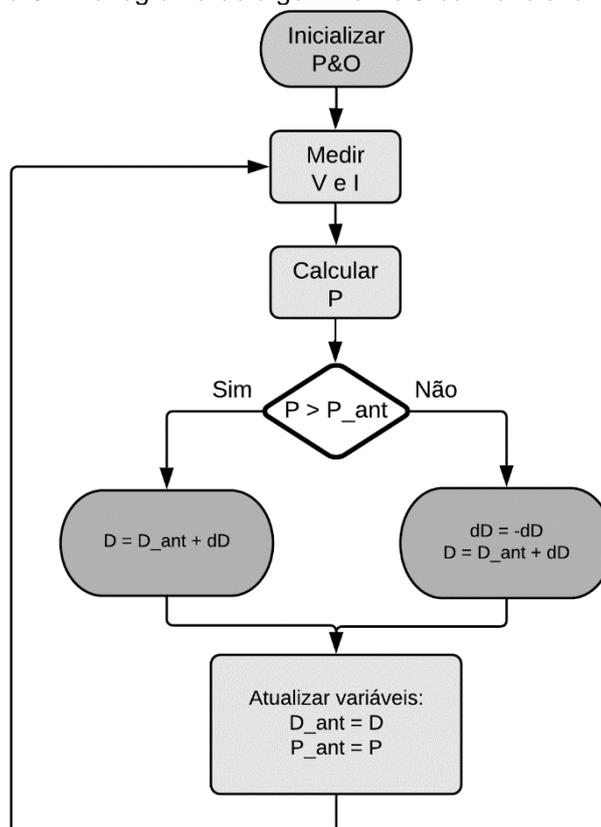
O MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracking*, é um método de controle utilizado em conjunto com conversores chaveados para fazer com que a tensão nos terminais dos painéis seja a que gere a máxima potência.

É possível desempenhar essa função sensoriando diferentes grandezas, como tensão, corrente, temperatura, irradiância solar, entre outros. As informações obtidas pelos sensores são utilizadas para tomar decisões e alterar a razão cíclica da(s) chave(s) do conversor (variável manipulada), que controla o chaveamento e,

consequentemente, o circuito equivalente enxergado pelo módulo. A alteração desse circuito equivalente faz a tensão nos terminais variar.

O algoritmo mais simples para o rastreamento do ponto de máxima potência é o Perturba e Observa ou P&O (FEMIA et al., 2013, p.42), ilustrado na Figura 5. Sua premissa consiste em gerar uma perturbação, aumentando ou diminuindo a tensão do painel, enquanto observa o valor da potência que está sendo entregue pelo módulo. Por exemplo, caso o conversor diminua a tensão da placa e a potência de geração aumente, o controlador irá manter essa operação; caso diminua, ele mudará o comportamento e passará a aumentar a tensão, sempre visando encontrar uma potência maior do que a que ele está operando.

Figura 5 - Fluxograma do algoritmo P&O convencional



Fonte: Elaborado pelo autor.

Além de ser de fácil implementação, o P&O é robusto e utiliza duas variáveis medidas (tensão e corrente do painel) refletindo em economia por necessitar de apenas dois sensores, comparado a alguns métodos que medem também temperatura e irradiância.

Existem otimizações para o P&O, buscando tornar o algoritmo mais rápido e com menos oscilações. O “passo variável” é um deles e consiste em diminuir a variação da razão cíclica (perturbação) conforme o ponto de operação se aproxime da máxima potência. Para realizar tal operação o algoritmo avalia a derivada da potência pela perturbação, uma vez que a derivada de uma função tende a zero conforme se aproxima do seu máximo. A equação 2 descreve a variação do passo nesse tipo de algoritmo, sendo  $D$  a razão cíclica,  $dD$  o passo,  $P$  a potência,  $N$  o fator de escala e  $k$  a iteração (FEMIA et al., 2013, p.62):

$$D_{k+1} = D_k \pm dD = D_k \pm N \cdot \frac{|P_k - P_{k-1}|}{|D_k - D_{k-1}|} \quad (2)$$

Um dos problemas do P&O é que ele não é capaz de distinguir uma potência máxima local de um máximo global, podendo fazer com que os módulos operem em uma potência menor do que o possível. Apesar disso, para aplicações de MLPE, em que as chances de cada célula estar em condições diferentes são baixas, o P&O se demonstra adequado.

## 2.3 Rastreamento distribuído do ponto de máxima potência (DMPPT)

### 2.3.1 Limitações do rastreamento centralizado

Os inversores *string* são responsáveis por fazer o rastreamento da máxima potência e por transformar a tensão contínua dos módulos em tensão alternada, sincronizando-a com a rede.

Eles são construídos para que várias *strings* se conectem às suas portas de entrada, com cada entrada ou grupos de entradas vinculados a um dispositivo MPPT. Com muitas *strings* conectadas em um mesmo MPPT, é raro que todas os módulos estejam nas mesmas condições e, em uma situação como essa, o baixo desempenho de um deles influencia o grupo, fazendo o dispositivo MPPT operar no ponto de máxima potência do conjunto, que é menor que a soma das máximas potências individuais de cada painel (FEMIA et al., 2013, p.139). Além disso, é possível ainda que os múltiplos picos de potência que se formam na curva  $P \times V$

nesse cenário, faça com que o MPPT possa operar em um máximo local, e não no máximo global, diminuindo ainda mais a produção.

A condição de poucos MPPTs imposta pelos inversores *string* também pode inviabilizar instalações fotovoltaicas em algumas edificações, principalmente aquelas com pouco espaço em uma mesma orientação geográfica.

### **2.3.2 Rastreamento distribuído com microinversores**

Os microinversores desempenham o mesmo papel dos inversores *string*, mas em uma escala menor, com apenas um painel conectado a cada um deles.

Como todos os microinversores são conectados à rede, eles são completamente independentes um dos outros, diferente dos otimizadores de potência, garantindo em qualquer circunstância a máxima potência do painel.

O ponto negativo é o alto custo de ter um equipamento responsável pelo MPPT e pela conexão com a rede em cada uma das placas. Para solucionar esse problema, o mercado tem lançado microinversores para conectar mais módulos (dois ou quatro) em um mesmo dispositivo, mas esse movimento reduz o número de MPPTs do arranjo e vai contra a tendência de eletrônica de potência em nível de módulo (MLPE), que busca garantir a máxima potência de cada placa.

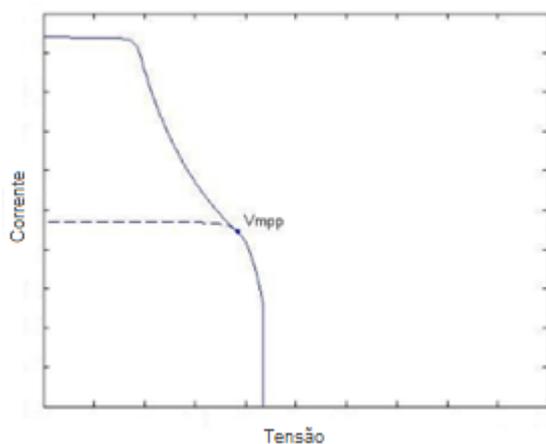
### **2.3.3 Rastreamento distribuído com otimizadores de potência**

A ideia principal do otimizador de potência é distribuir apenas o MPPT, fazendo com que cada placa opere na sua máxima potência individual, deixando a operação de inversão e conexão com a rede com um inversor, que pode ter ou não a função de rastreamento de máxima potência.

Os painéis com um conversor CC/CC dedicado são chamados de módulos fotovoltaicos autocontrolados, do inglês *Self-Controlled PV Module* ou SCPVM, (FEMIA et al., 2013, p.145) e podem se comportar como fontes de potência, em certa região de operação. Para conversores abaixadores, para toda tensão de saída abaixo da tensão de máxima potência, o SCPVM consegue entregar a máxima potência. A mesma lógica vale para conversores elevadores operando com tensões

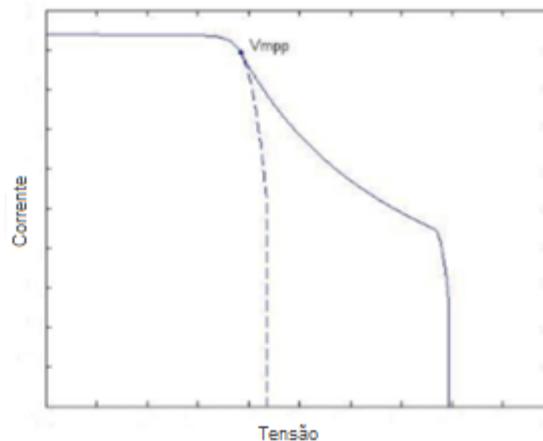
de saída acima da tensão de máxima potência. SCPVM com conversores abaixadores-elevadores conseguem sempre atuar como fontes de potência, limitados apenas pelos valores limites nominais dos componentes. As Figuras 6, 7 e 8 ilustram a curva de corrente por tensão de saída. A região de potência constante ( $P = V.I = cte$ ) é representada por uma curva hiperbólica, uma vez que  $x.y = cte$  define uma hipérbole.

Figura 6 - Característica de saída de SCPVM utilizando conversor abaixador



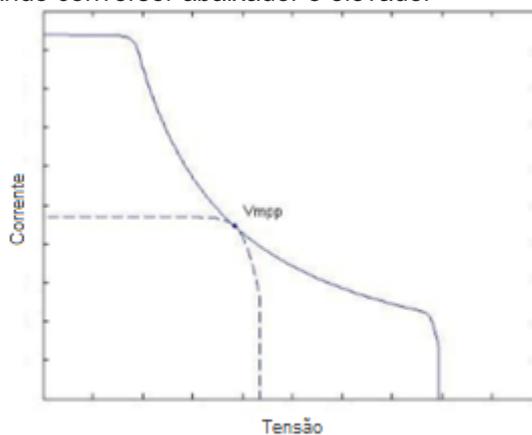
Fonte: Adaptado de ALONSO et al., 2010.

Figura 7 - Característica de saída de SCPVM utilizando conversor elevador



Fonte: Adaptado de ALONSO et al., 2010.

Figura 8 - Característica de saída de SCPVM utilizando conversor abaixador e elevador



Fonte: Adaptado de ALONSO et al., 2010.

Vale ressaltar que o conversor é projetado para garantir a máxima potência do módulo de acordo com a tensão ou corrente de saída, ou seja, o otimizador **não é capaz de controlar a sua saída**. O que definirá o valor da saída do conversor será o barramento CC do inversor. Por isso, caso o inversor tenha um MPPT em sua entrada, o MPPT do otimizador tem que operar mais rápido para que, a cada mudança de tensão no barramento CC, ou seja, a cada variação na saída do

conversor, este consiga fazer rapidamente o ajuste para garantir a tensão e a corrente de máxima potência em sua entrada.

Em relação a forma de ligação entre os terminais de saída dos conversores, há dois tipos de topologia: em série, como é comumente feito com os painéis, sendo essa a forma mais comum dentre os produtos no mercado; ou em paralelo, topologia encontrada em apenas um otimizador comercial (FEMIA et al., 2013, p. 144).

Como os otimizadores tem que se conectar a um barramento CC do inversor para que este possa operar, a utilização dos otimizadores em paralelo garante mais independência entre os módulos, pois cada um deles se conecta ao mesmo nível de tensão, fornecendo a corrente proporcional à sua potência de operação, sem interferência entre a saída dos conversores.

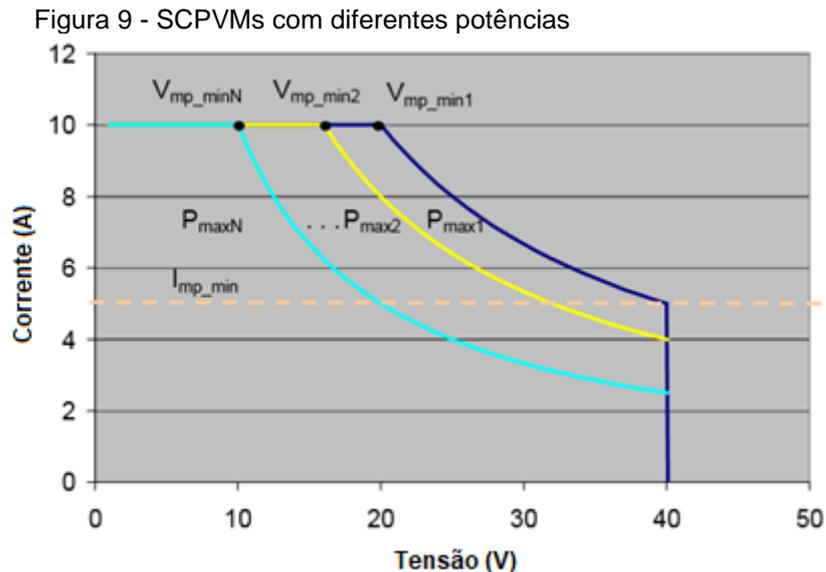
Já em uma ligação em série, além da soma das tensões de saída dos otimizadores ter que ser igual a tensão do barramento, todos os conversores compartilham a mesma corrente de saída, fazendo com que a saída de um influencie na saída do outro. Com isso, alguns conversores podem não ser capazes de fazer com que todos os painéis de uma *string* operem individualmente em suas máximas potências. O ponto positivo da ligação em série é ter componentes mais baratos, por trabalharem com menores tensões de saída.

Dada essa situação, é necessário que haja conhecimento de quais situações e com quais conversores os otimizadores conseguem gerar o máximo de um conjunto sendo ligados em série.

Para que uma *string* consiga operar com cada um dos seus painéis em suas máximas potências individuais, considera que o módulo  $i$  é o que recebe menos radiação solar e o módulo  $j$ , o que mais recebe. Dessa forma,  $SI_i < SI_j$  e conseqüentemente  $I_{MP\ i} < I_{MP\ j}$ , a máxima corrente de saída do conversor do painel  $i$ , em sua região de máxima potência, deve ser maior que a mínima corrente de saída do painel  $j$ , também operando em sua máxima potência, pois assim haverá uma corrente de operação comum entre eles:

$$I_{oMP\ max\ i} > I_{oMP\ min\ j} \quad (3)$$

Tal relação pode ser visualizada na Figura 9, na qual a hipérbole mais próxima da origem representa o painel i e a mais distante, o painel j. Há uma região de corrente em que as duas hipérboles estão contidas e ela se dá acima da mínima corrente de máxima potência de saída ( $I_{mp\_min}$ ) do painel j, de maior potência, representado pela curva em azul escuro, e abaixo da corrente limite de saída.



Para conversores abaixadores, sua menor corrente de saída para a máxima potência é a própria corrente de máxima potência da placa e sua maior corrente de saída será a que for limitada pelo circuito, para manter a integridade dos componentes:

$$I_{OMP\ min} = I_{MP} \quad (4)$$

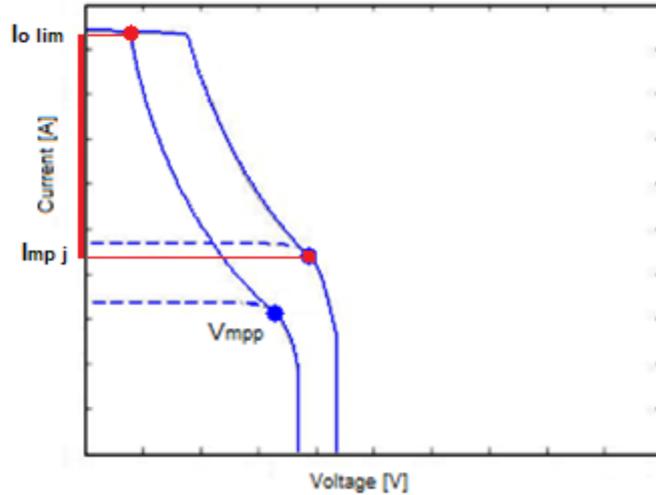
$$I_{OMP\ max} = I_{o\ lim} \quad (5)$$

Aplicando (4) e (5) em (3), tem-se:

$$I_{o\ lim} > I_{MP\ j} \quad (6)$$

Portanto, para garantir que haja uma região de máxima potência do conjunto utilizando esse tipo de conversor, basta dimensioná-lo para que sua corrente limite seja maior do que a corrente de máxima potência para a melhor irradiância solar esperada, como ilustra a Figura 10.

Figura 10 - Região de corrente para operação em máxima potência de uma *string* com DMPPT abaixador.



Fonte: Adaptado de ALONSO et al., 2010.

Para conversores abaixadores-elevadores, a conclusão é semelhante:

$$I_{oMP\ max} = I_{o\ lim} \quad (7)$$

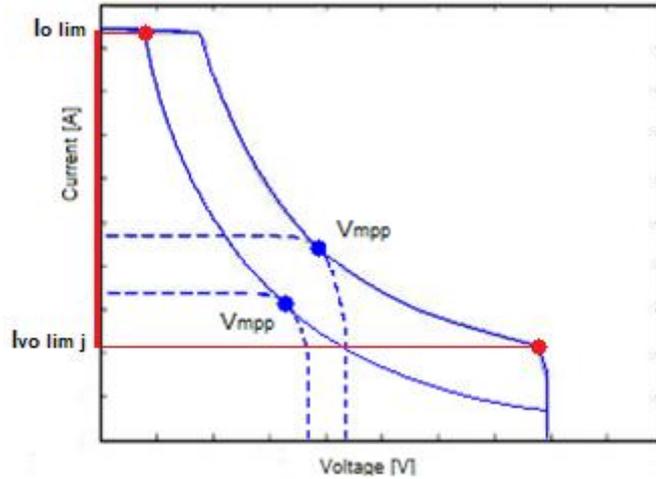
$$I_{oMP\ min} = \frac{P_{MP}}{V_{o\ lim}} = I_{V_{o\ lim}} \quad (8)$$

Como  $V_{o\ lim} > V_{MP}$ , por ser elevador, a corrente para  $V_{o\ lim}$  será menor que a corrente de máxima potência  $I_{V_{o\ lim}} < I_{MP}$ .

$$I_{o\ lim} > I_{MP\ j} > I_{V_{o\ lim\ j}} \quad (9)$$

A equação (9) tem a mesma desigualdade da (6), ou seja, este conversor também depende apenas do dimensionamento correto. A diferença entre um otimizador abaixador e um abaixador-elevador é que este aumenta a faixa de corrente que proporciona a máxima potência do conjunto, como ilustra a Figura 11, facilitando a implementação de um inversor com barramento CC fixo, sem MPPT.

Figura 11 - Região de corrente para operação em máxima potência de uma *string* com DMPPT abaixador-elevador.



Fonte: Adaptado de ALONSO et al., 2010.

Para conversores elevadores, sua maior corrente de saída para a máxima potência é a própria corrente de máxima potência do módulo e sua menor corrente de saída dependerá da tensão limite:

$$I_{OMP\ max} = I_{MP} \quad (10)$$

$$I_{OMP\ min} = \frac{P_{MP}}{V_{o\ lim}} = I_{Vo\ lim} \quad (11)$$

Aplicando (10) e (11) em (3), tem-se:

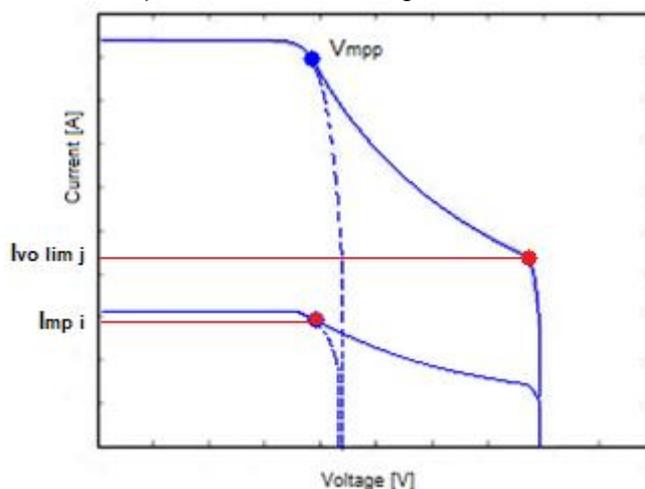
$$I_{MP\ i} > I_{Vo\ lim\ j} \quad (12)$$

Nesse caso, como há variáveis dependendo de  $i$  e  $j$ , diferente dos outros que só havia variáveis  $j$ , esse conversor não dependerá somente do dimensionamento, mas sim da relação entre  $SI_i$  e  $SI_j$ , como ilustra a Figura 12. Considerando (13), é possível aplicar fórmula (1) em (12) e chegar em:

$$\Delta SI \approx \Delta I_{MP} \text{ e } V_{MP} \approx cte \quad (13)$$

$$\frac{SI_i \cdot \eta_i \cdot A_i}{V_{MP\ i}} > \frac{SI_j \cdot \eta_j \cdot A_j}{V_{OMP\ lim}} \quad (14)$$

Figura 12 – Ausência de região de corrente para operação em máxima potência de uma *string* com DMPPT elevador.



Fonte: Adaptado de ALONSO et al., 2010.

A consideração feita na equação (13) é uma simplificação, considerando que a variação de irradiância solar influencia praticamente apenas a corrente, fazendo com que a tensão de máxima potência seja constante com a variação de SI.

Considerando que os módulos tenham a mesma área e a mesma eficiência, ou seja,  $\eta_i = \eta_j$ ;  $A_i = A_j$ , chega-se em na inequação (15) que evidencia a relação entre as irradiâncias solares nos painéis i e j, e mostra como o conversor deve ser dimensionado para uma dada diferença de SI:

$$\frac{SI_i}{SI_j} > \frac{V_{MP i}}{V_{oMP lim}} \quad (15)$$

## 2.4 Constatações

Em relação aos tipos de conversores, ficou demonstrado que os conversores elevadores não conseguem necessariamente fazer com que a *string* alcance a sua máxima potência (BALATO; VITELLI, 2014).

Os abaixadores e os abaixadores-elevadores sempre têm uma região de operação comum a todos os SCPVM que os façam operar em sua máxima potência. A diferença é que essa região é maior para os abaixadores-elevadores, podendo ser possível utilizá-los com mais confiabilidade em inversores sem MPPT.

## **3 PROJETO**

### **3.1 Proposta**

Este projeto se propôs a desenvolver um conversor CC/CC que opere como DMPPT e que possa vir a ser um embrião de um otimizador de potência comercial, popularizando o uso de otimizadores e colaborando com a melhoria na eficiência da geração fotovoltaica.

Otimizadores de potência comerciais, além de conter o conversor e o controlador responsável por desempenhar a função de DMPPT, costumam ter circuitos de comunicação e monitoramento para avaliar as condições de funcionamento do painel, além de elementos de proteção, para garantir a operação dentro dos limites nominais dos componentes, e de regulação de tensão faz com que a energia do módulo possa alimentar esses sistemas adicionais.

Como este trabalho se trata apenas de DMPPT, esses circuitos complementares não serão abordados e devem ser desenvolvidos a parte caso o conversor em questão possa ser evoluído ao patamar de produto.

A principal consideração que guiou a escolha do conversor foi a capacidade de poder alcançar o ponto de máxima potência em qualquer situação. Para o algoritmo, foi escolhido um método robusto, de fácil implementação e baixo custo computacional.

### **3.2 Conversor**

Como explicado no item 2.3.3 a ligação em paralelo, apesar de garantir independência entre os módulos, envolve fazer uma elevação de tensão em torno de 10 vezes o valor nominal do painel e isso envolveria componentes mais caros e tamanho físico maior. Dessa forma, foi escolhido a ligação em série dos otimizadores.

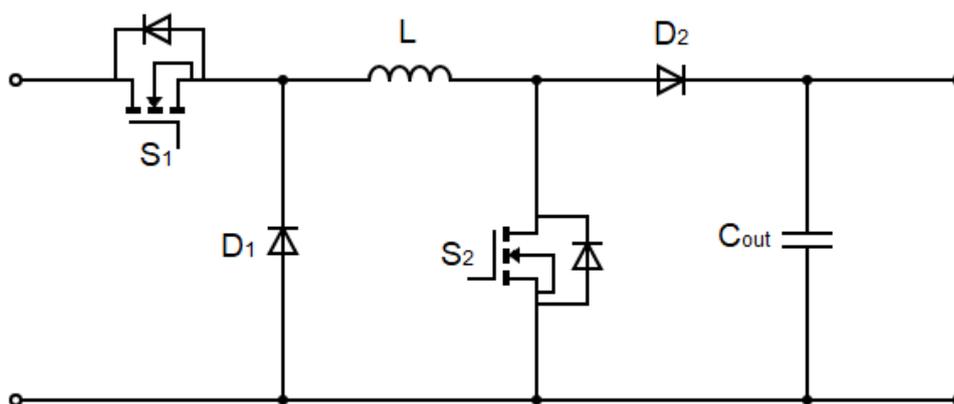
Pode se reduzir as opções de conversores em três grandes grupos: abaixadores, elevadores e que realizam ambas operações. Como mostrado no item 2.3.3.2, os

que só elevam a tensão não garantem a extração da máxima potência de todas as placas em qualquer situação, enquanto os que abaixam a tensão, sim.

Visando a maior versatilidade, foi escolhido uma topologia abaixadora e elevadora de tensão, garantindo sempre a existência de um ponto de máxima potência, ampliando a região de tensão de máxima potência do barramento CC, conforme mencionado no item 2.3.3.3, e permitindo que a *string* possa trabalhar com correntes menores do que se fosse usado um conversor somente abaixador.

Dentre os possíveis circuitos capazes de operar abaixando ou elevando tensão, foi feita a opção pelo *Buck+Boost*, ilustrado na Figura 13, também conhecido como *Buck-Boost* não inversor ou *Buck-Boost* de duas chaves.

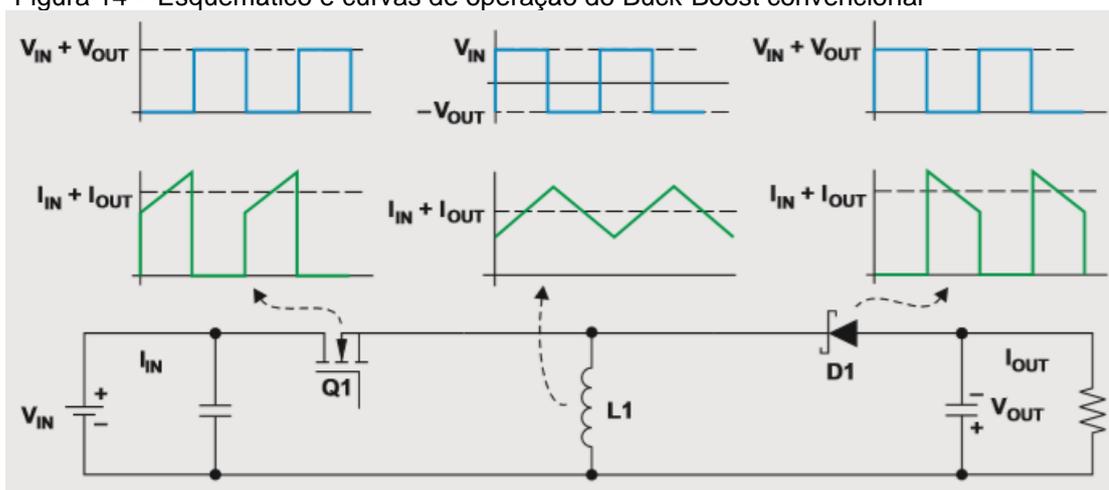
Figura 13 - Esquemático básico do conversor Buck+Boost



Fonte: Elaborado pelo autor.

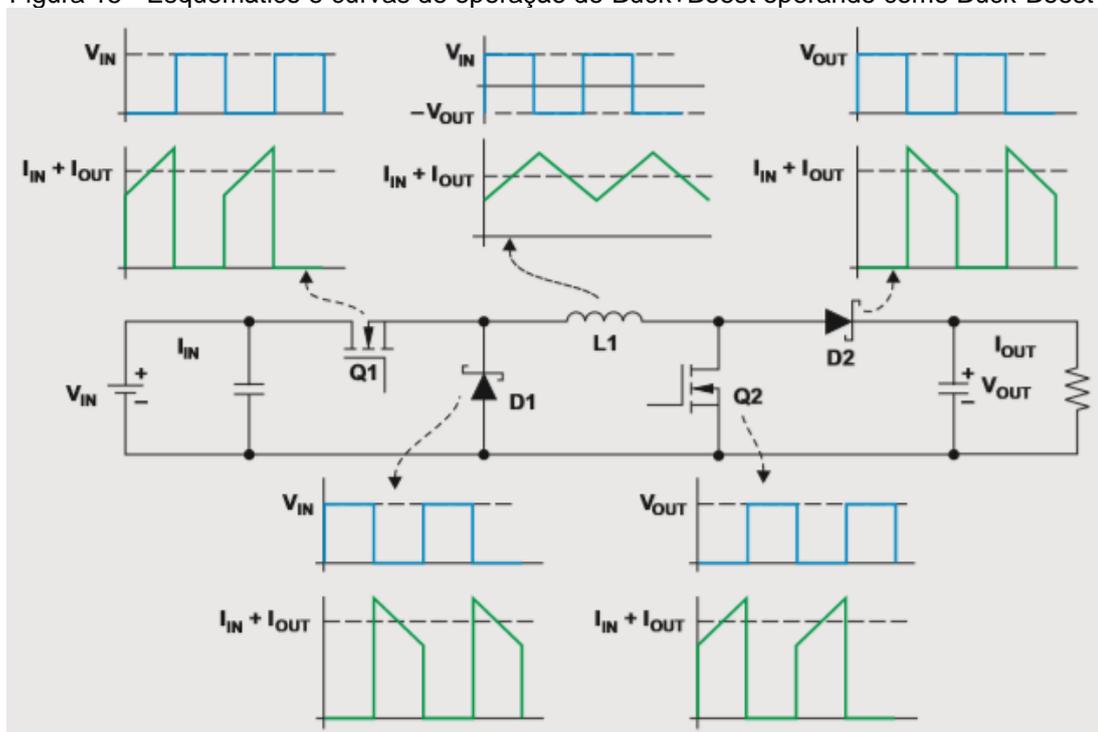
Apesar de dobrar o número de diodos e chaves em relação ao *Buck-Boost* convencional, esse circuito é capaz de operar como um conversor *Buck*, *Boost* e *Buck-Boost*, dependendo apenas de como são chaveadas as chaves  $S_1$  e  $S_2$  e sua topologia já garante duas melhorias: saída não invertida e menor tensão de bloqueio sobre as chaves e diodos, independentemente do modo de operação, como mostram as Figuras 14, 15, 16 e 17. Considerando que  $V_{in}$  e  $V_{out}$  são iguais para todas as situações demonstradas nestas figuras, a tensão de bloqueio na chave e no diodo do *Buck-Boost* convencional será  $V_{in} + V_{out}$  e, por isso, sempre maior que no *Buck+Boost*, que por sua vez será ou  $V_{out}$  ou  $V_{in}$ , dependendo do elemento e do modo analisado.

Figura 14 – Esquemático e curvas de operação do Buck-Boost convencional



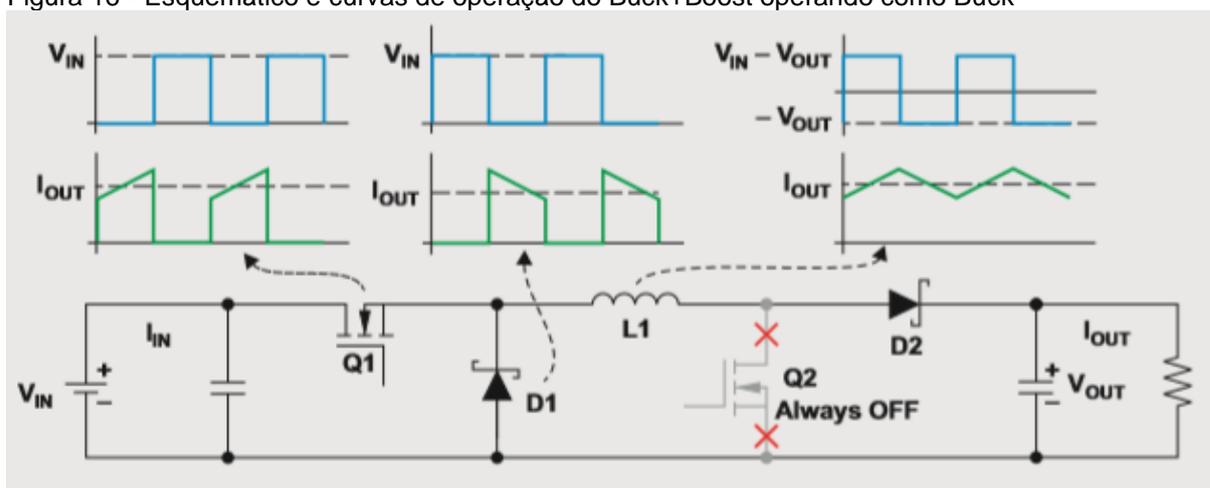
Fonte: Texas Instruments, 2014.

Figura 15 - Esquemático e curvas de operação do Buck+Boost operando como Buck-Boost



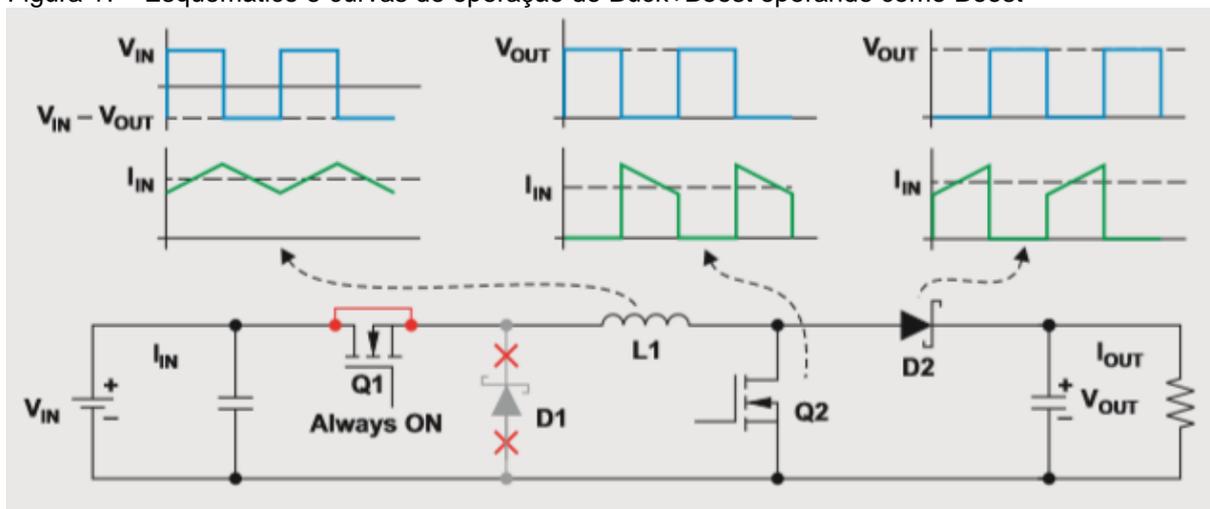
Fonte: Texas Instruments, 2014.

Figura 16 - Esquemático e curvas de operação do Buck+Boost operando como Buck



Fonte: Texas Instruments, 2014.

Figura 17 - Esquemático e curvas de operação do Buck+Boost operando como Boost

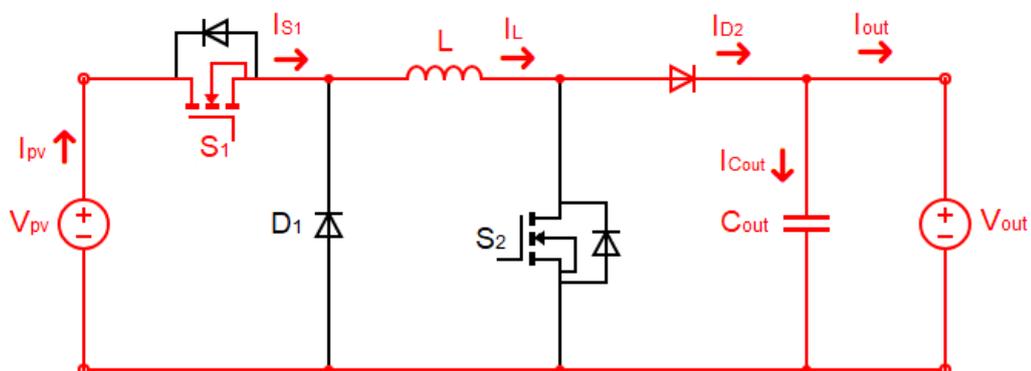


Fonte: Texas Instruments, 2014.

Além disso, optando por fazer o circuito operar hora como *Buck* e hora como *Boost*, dependendo da situação, apenas um transistor será chaveado, evitando perdas e, por isso, aumentando sua eficiência e confiabilidade.

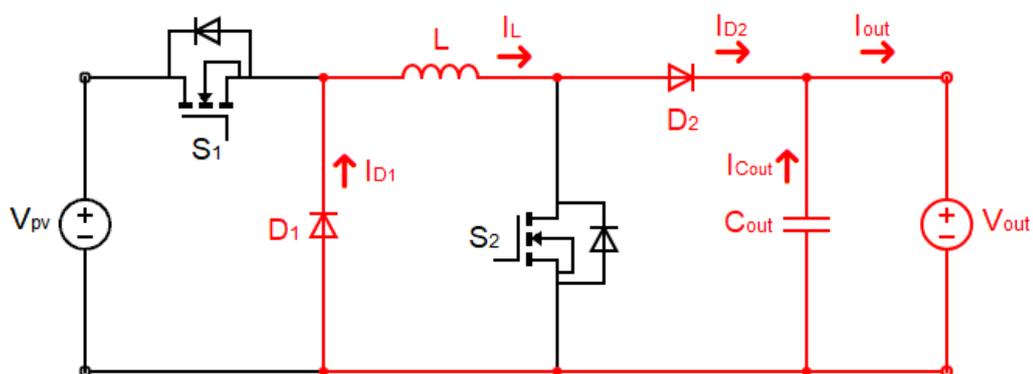
Nesse caso, é possível definir três modos para o conversor: *Buck*, *Boost* e *Pass-Through* (LINARES et al, 2009). No modo *Buck*, Figuras 18 e 19, a chave  $S_2$  fica permanentemente aberta e o diodo  $D_2$  sempre conduz. A razão cíclica  $D$  que definirá a potência de saída é aplicada na chave  $S_1$ .

Figura 18 - Funcionamento como Buck com chave  $S_1$  fechada (on)



Fonte: Elaborado pelo autor.

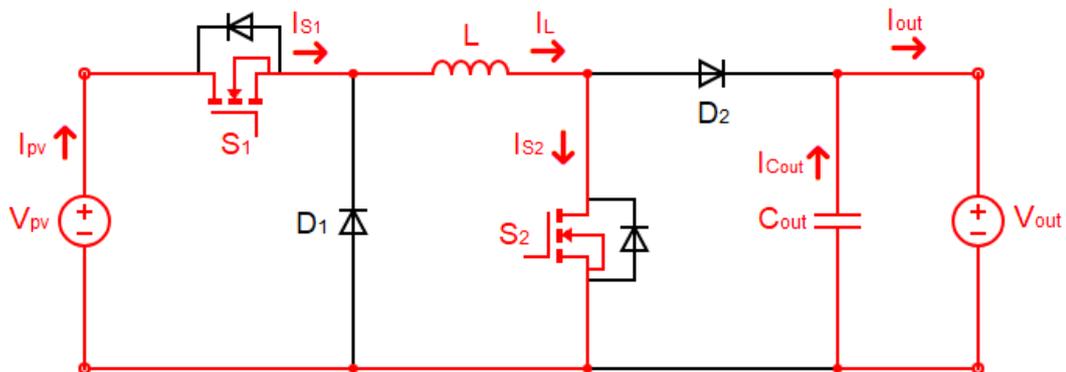
Figura 19 - Funcionamento como Buck com chave  $S_1$  aberta (off)



Fonte: Elaborado pelo autor.

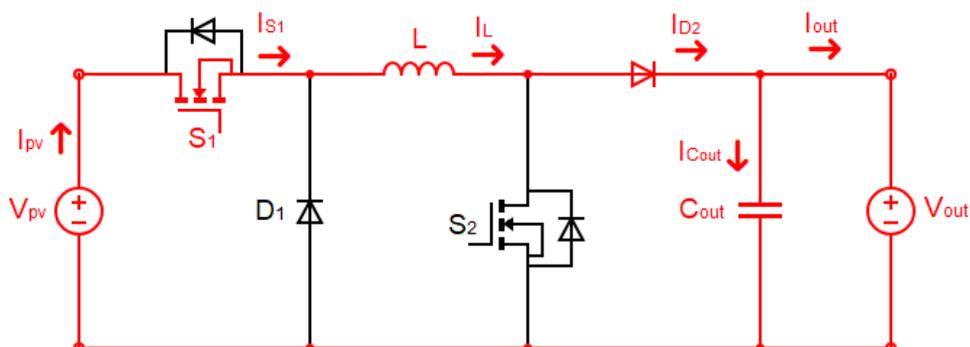
No modo Boost, Figuras 20 e 21, a chave  $S_1$  fica permanentemente fechada e o diodo  $D_1$  nunca conduz. A razão cíclica  $D$  que definirá a potência de saída é aplicada na chave  $S_2$ .

Figura 20- Funcionamento como Boost com chave  $S_2$  fechada (on)



Fonte: Elaborado pelo autor.

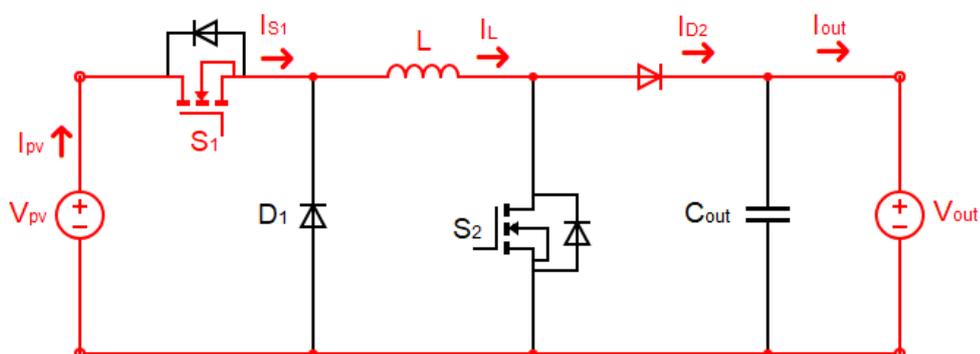
Figura 21 - Funcionamento como Boost com chave S1 aberta (off)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como no modo *Buck* a chave  $S_2$  está sempre aberta e no modo *Boost* a chave  $S_1$  está sempre fechada, é possível perceber que um *Buck* com  $D = 1$  e um *Boost* com  $D = 0$  tem as mesmas características, não abaixando nem elevando a tensão de entrada. A essa situação se dá o nome de modo *Pass-Through* (LINARES et al, 2009) e, apesar de ser raro operar dessa forma, nele há o grande benefício de não haver perdas por chaveamento, já que corresponde a uma ligação direta da entrada à saída. A Figura 22 ilustra o funcionamento desse modo.

Figura 22 - Funcionamento como Pass-Through



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.1 Controle das chaves

Foi observado que é possível controlar o modo de operação do conversor utilizando apenas uma variável  $D$  que definirá os valores das razões cíclicas  $D_{buck}$ , da chave  $S_1$ , e  $D_{boost}$ , de  $S_2$ .

$$D_{buck} = D$$

$$D_{boost} = D - 1$$

Sendo que, se  $D_{buck}$  ou  $D_{boost}$  resulta em um número maior que 1, seu valor será 1, e se for menor que 0, será atribuído 0, estando limitado a esses extremos, definindo a chave como sempre fechada ou sempre aberta.

Dessa forma,  $S_1$  funcionará com razão cíclica de 0 a 1, enquanto  $S_2$  estará aberta ou  $S_2$  funcionará com razão cíclica de 0 a 1, enquanto  $S_1$  estará fechada, e a transição entre os dois modos acontece por meio do modo *Pass-Through*, com  $D = 1$ .

Começando com  $D$  nulo e aumentando até 1, a tensão de saída vai de 0 ao valor da tensão de entrada, uma vez que, para o Buck,  $V_{out} = D_{buck} \cdot V_{in}$ . No momento em que a tensão de saída é igual ao valor da entrada, com  $D = 1$ , acontece o modo *Pass-Through*. Com  $D > 1$ , a tensão de saída passa a aumentar, pois  $D_{buck}$  será fixado em 1 e  $D_{boost}$  irá operar entre 0 e 1, fazendo tensão de saída ser  $V_{out} = V_{in} / (1 - D_{boost})$ . Assim, variando  $D$  de 0 a 2 é possível fazer com que o painel consiga operar em sua máxima potência com qualquer valor de tensão em sua saída.

Esse método possibilita a transição automática entre os três modos de operação, sem a necessidade de distingui-los no código e sem ter que identificar qual a tensão de saída para optar por uma operação específica.

### 3.3 Algoritmo P&O

Por questões de simplicidade, robustez e baixo custo escolheu-se aplicar o método Perturba e Observa, um algoritmo de simples implementação e que necessita de apenas dois sensores, um de tensão e outro de corrente, para conseguir rastrear o ponto de máxima potência.

Além disso, para aumentar sua eficiência, escolheu-se otimizá-lo com o recurso do passo variável, explicado no item 2.2, mas os testes computacionais feitos utilizando o valor da derivada da potência pela razão cíclica mostrou um comportamento inadequado, ocasionado devido às oscilações de tensão e corrente a cada passo.

Apesar de ser possível tratar o sinal e utilizar esse método, por priorizar a simplicidade e a robustez, foi desenvolvido uma forma de variar o passo da razão cíclica sem ter que avaliar o valor de  $dP/dD$ .

Junto a esse método original (até onde o autor pode averiguar) foi adicionado um recurso capaz de fixar a razão cíclica, quando o passo se tornar pequeno demais, reduzindo as perdas de potência geradas pelas sucessivas perturbações. Um fluxograma do processo pode ser visualizado no Apêndice A.

O algoritmo é essencialmente um laço que se repete em um período determinado, sempre recebendo dois sinais de entrada: tensão  $V$  do módulo e corrente  $I$  do módulo; e gerando dois sinais de saída:  $D_{\text{buck}}$  e  $D_{\text{boost}}$ , responsáveis por controlar respectivamente, as chaves  $S_1$  e  $S_2$ , como mostrado no item 3.2.

No início do ciclo, os sensores realizam às medidas de  $V$  e  $I$  e esses dados são multiplicados para que seja encontrado o valor da potência instantânea  $P$ . O controlador, então, realiza a comparação entre os valores de potência e tensão atuais com os obtidos no laço anterior ( $P_{\text{ant}}$  e  $V_{\text{ant}}$ ) e toma uma das seguintes decisões:

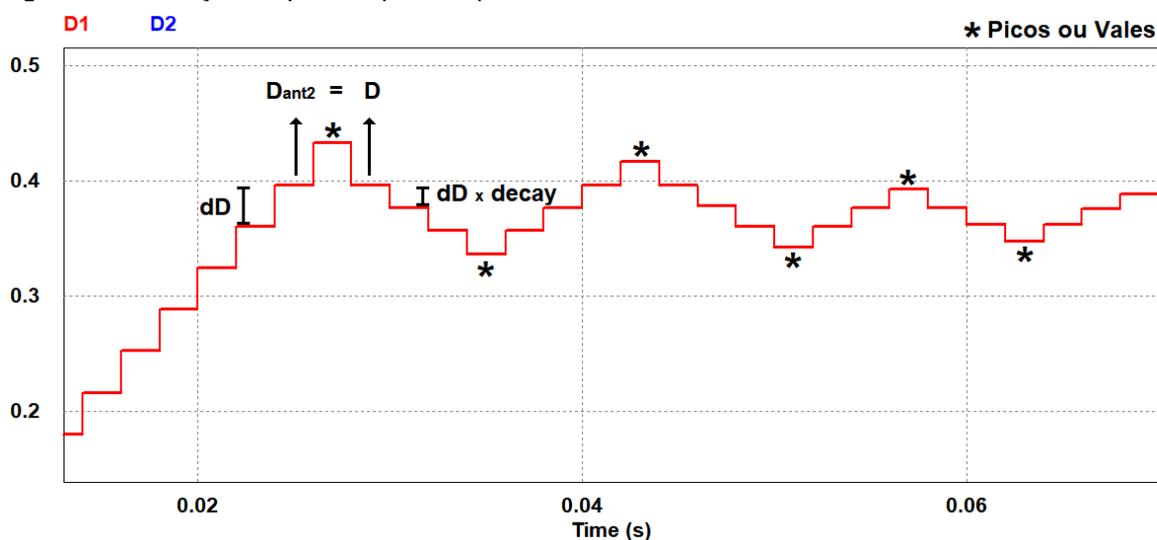
- Se a potência aumentou com um aumento de tensão, aumente a tensão.
- Se a potência aumentou com uma diminuição de tensão, diminua a tensão.
- Se a potência diminuiu com um aumento de tensão, diminua a tensão.
- Se a potência diminuiu com uma diminuição de tensão, aumente a tensão.

Alguns P&Os fazem apenas a comparação dos valores de potência, ou seja, aumenta-se ou diminui-se a tensão do módulo enquanto a potência estiver aumentando e quando ela passa a diminuir, a operação é invertida. O problema é que esse método está suscetível a erros que podem vir da oscilação de tensão e corrente do circuito. É possível que, quando ocorra a leitura dos sensores, a potência instantânea esteja menor que a anterior devido a oscilação, não porque o MPPT encontrou o ponto de máxima potência. Assim, a abordagem feita faz com que as oscilações sejam desconsideradas e se busque a tensão que garanta a máxima potência.

Com o cálculo da razão cíclica  $D$ , são definidos  $D_{\text{buck}}$  e  $D_{\text{boost}}$ , conforme explicado no item 3.2, sempre os limitando entre o intervalo de 0 a 1.

A etapa da variação do passo  $dD$  consiste em avaliar se a razão cíclica  $D$  está oscilando sobre um ponto. Para realizar essa avaliação basta verificar se o valor atual de  $D$  é igual ao de dois ciclos passados, caracterizando um pico ou um vale na curva da razão cíclica, conforme ilustra a Figura 23.

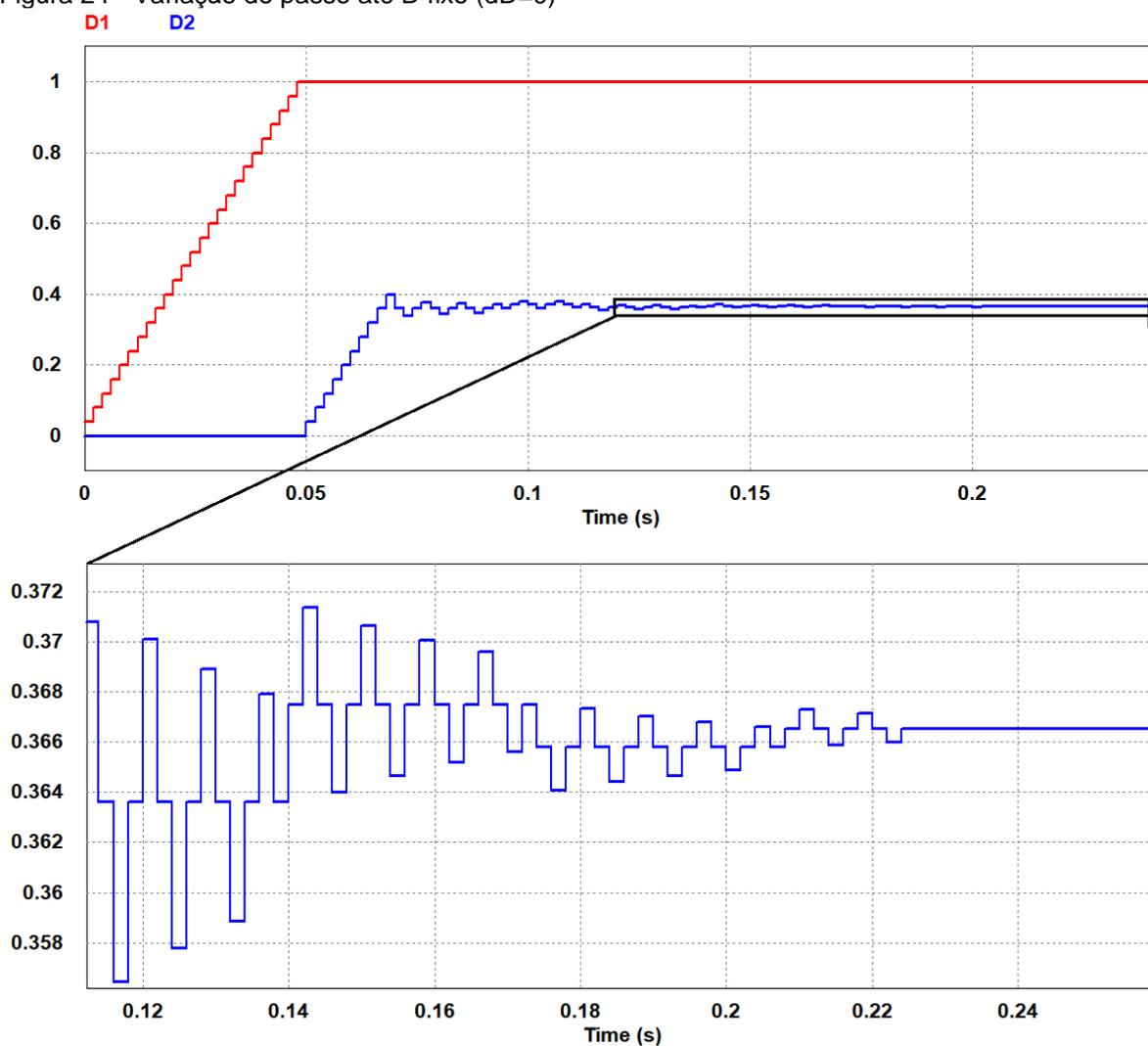
Figura 23 - Variação do passo após um pico ou vale



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a oscilação de  $D$  acontece próximo do ponto de máxima potência, o novo passo  $dD$  é multiplicado por um valor de decaimento (*decay*) e será diminuído no próximo ciclo, a fim de buscar com mais precisão qual o valor ideal de  $D$  para garantir a máxima potência.

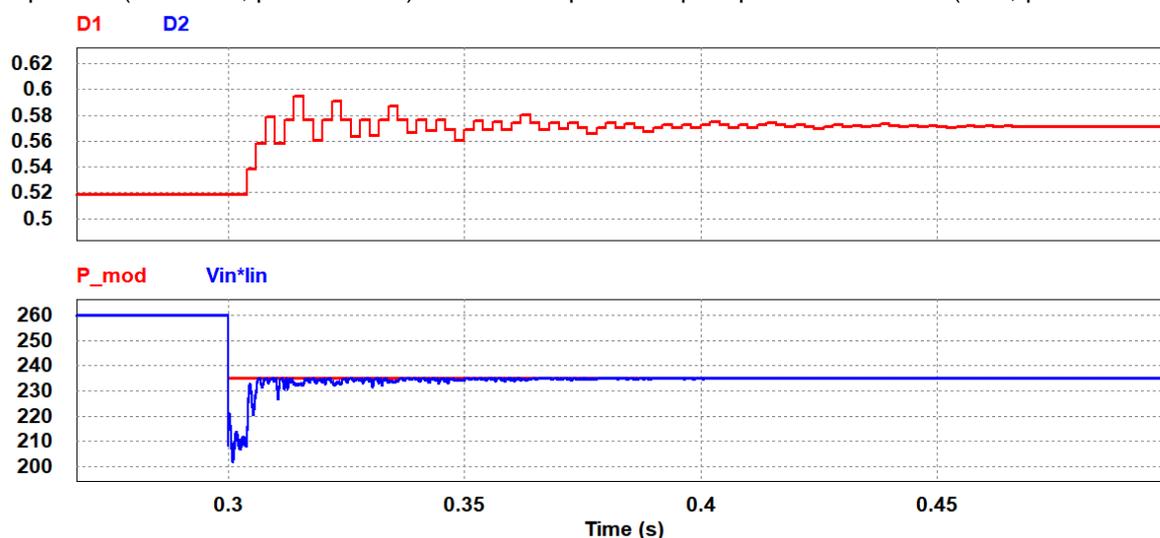
O passo  $dD$  vai diminuindo conforme  $D$  oscila, até um momento em que  $dD$  é menor que um valor mínimo estipulado e, então, passa a ser nulo, não havendo mais perturbação, conforme ilustra a Figura 24, extraindo mais energia do módulo por não tirá-lo constantemente do seu ponto de máxima potência, como outros P&O.

Figura 24 - Variação do passo até D fixo ( $dD=0$ )

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de não haver mais perturbação, o algoritmo segue observando e sempre checa o valor atual da potência comparando com o anterior, pois caso haja alguma variação de potência acima da potência percentual tolerada definida ( $P_{tol}$ ), é um indicativo de que houve uma mudança na potência disponível no módulo e, nesse caso, o passo volta a ter seu valor inicial ( $dD_{max}$ ) e começa a buscar o novo ponto de máxima potência, como ilustra a Figura 25.

Figura 25 - Retomada do passo  $dD_{\max}$  (vermelho, parte superior) após variação na potência disponível (vermelho, parte inferior) sendo acompanhada pela potência extraída (azul, parte inferior)



Fonte: Elaborado pelo autor.

No fim de cada ciclo, as variáveis são atualizadas ( $V_{\text{ant}} = V$ ;  $P_{\text{ant}} = P$ ;  $D_{\text{ant}2} = D_{\text{ant}}$ ;  $D_{\text{ant}} = D$ ), para que o laço seja recomeçado e novos valores possam ser adquiridos.

Feito dessa forma, o algoritmo se mostrou não só funcional como também robusto, não sofrendo com as oscilações do circuito e conseguindo funcionar adequadamente em diferentes situações e painéis, ajustando apenas a potência de tolerância  $P_{\text{tol}}$  quando necessário.

### 3.4 Dimensionamento

Os parâmetros de projeto e os valores nominais do módulo fotovoltaico que irá operar com o otimizador estão contidos nos Quadros 1 e 2, respectivamente.

Quadro 1 - Valores nominais do módulo fotovoltaico escolhido (em Standard Test Conditions STC)

Grandeza	Valor
Potência nominal	260 W
Tensão de máxima potência	31,4 V
Corrente de máxima potência	8,37 A
Tensão de circuito aberto	38,4 V
Corrente de curto-circuito	8,94 A

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi considerado que o conversor é capaz dobrar e reduzir pela metade a tensão de máxima potência do painel em suas condições padrões.

Quadro 2 - Parâmetros de projeto

Grandeza	Valor
Frequência de comutação (f)	50 kHz
Tensão de saída máxima (Boost)	62,8 V
Tensão de saída mínima (Boost)	31,4 V
Corrente de saída máxima (Boost)	8,37 A
Corrente de saída mínima (Boost)	4,19 A
Tensão de saída máxima (Buck)	31,4 V
Tensão de saída mínima (Buck)	15,7 V
Corrente de saída máxima (Buck)	16,7 A
Corrente de saída mínima (Buck)	8,37 A
Ripple de corrente ( $\Delta I$ %)	30%
Ripple de tensão ( $\Delta V$ %)	1%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como o circuito pode operar como Buck e Boost, foi calculado o valor mínimo para o Indutor e o Capacitor em cada um dos modos e o maior entre eles foi utilizado. As fórmulas (16) e (17) foram utilizadas para o cálculo dos elementos do *Buck*, e (18) e (19), do *Boost* (TEXAS INSTRUMENTS, 2015):

$$L = \frac{V_{out\ min} \cdot (V_{in} - V_{out\ min})}{\Delta I_L \cdot f \cdot V_{in}} \quad (16)$$

$$C_{out} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f \cdot \Delta V_{out}} \quad (17)$$

$$L = \frac{V_{in} \cdot (V_{out\ max} - V_{in})}{\Delta I_L \cdot f \cdot V_{out\ max}} \quad (18)$$

$$C_{out} = \frac{I_{out\ max} \cdot (1 - V_{in}/V_{out\ max})}{f \cdot \Delta V_{out}} \quad (19)$$

Sendo  $\Delta I_L = \Delta I(\%) \cdot I_{out\ max}$  e  $\Delta V_{out} = \Delta V(\%) \cdot V_{out\ max}$  para o *Buck* e  $\Delta I_L = \Delta I(\%) \cdot I_{out\ max} \cdot V_{out\ max}/V_{in}$  e  $\Delta V_{out} = \Delta V(\%) \cdot V_{out\ max}$  para o *Boost*.

Para o dimensionamento dos MOSFETs e dos diodos, para uma eventual aquisição de materiais para a construção de um protótipo, foi considerado que os componentes devem ter capacidade maior que o valor de pico de tensão e corrente, pois todos os elementos estão suscetíveis a tais esforços:

$$I_{D1} = I_{D2} = I_{S1} = I_{S2} \geq (1 + \Delta I) \cdot I_{out\ max} \quad (20)$$

$$V_{D1} = V_{D2} = V_{S1} = V_{S2} \geq (1 + \Delta V) \cdot V_{out\ max} \quad (21)$$

O Quadro 3 contém os valores calculados utilizando as fórmulas e os parâmetros de entrada expostos. Foram utilizados os maiores valores entre o dimensionamento do *Buck* e do *Boost*.

Quadro 3 - Valores mínimos para os componentes do conversor

<b>Buck</b>		<b>Boost</b>	
Elemento	Valor nominal	Elemento	Valor nominal
Indutor	> 31 $\mu$ H	Indutor	> 63 $\mu$ H
Capacitor de saída	> 40 $\mu$ F	Capacitor de saída	> 133 $\mu$ F
Diodo 1	> 22 A; > 32 V	Diodo 1	> 11 A; > 63 V
Diodo 2	> 22 A; > 32 V	Diodo 2	> 11 A; > 63 V
MOSFET 1	> 22 A; > 32 V	MOSFET 1	> 11 A; > 63 V
MOSFET 2	> 22 A; > 32 V	MOSFET 2	> 11 A; > 63 V

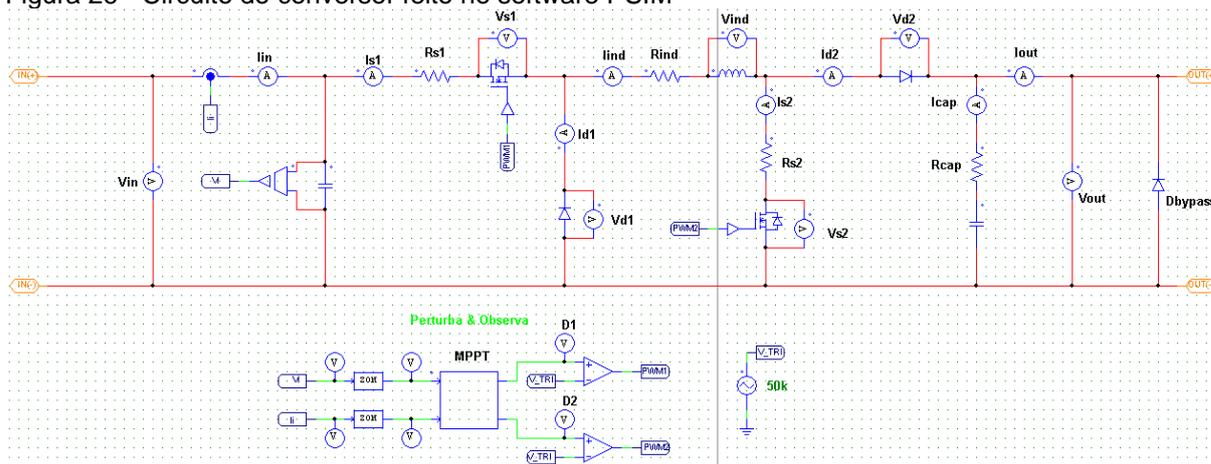
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 RESULTADOS EM SIMULAÇÃO

### 4.1 Parâmetros para testes

A Figura 26 apresenta o circuito do otimizador de potência desenvolvido no *software* PSIM.

Figura 26 - Circuito do conversor feito no software PSIM

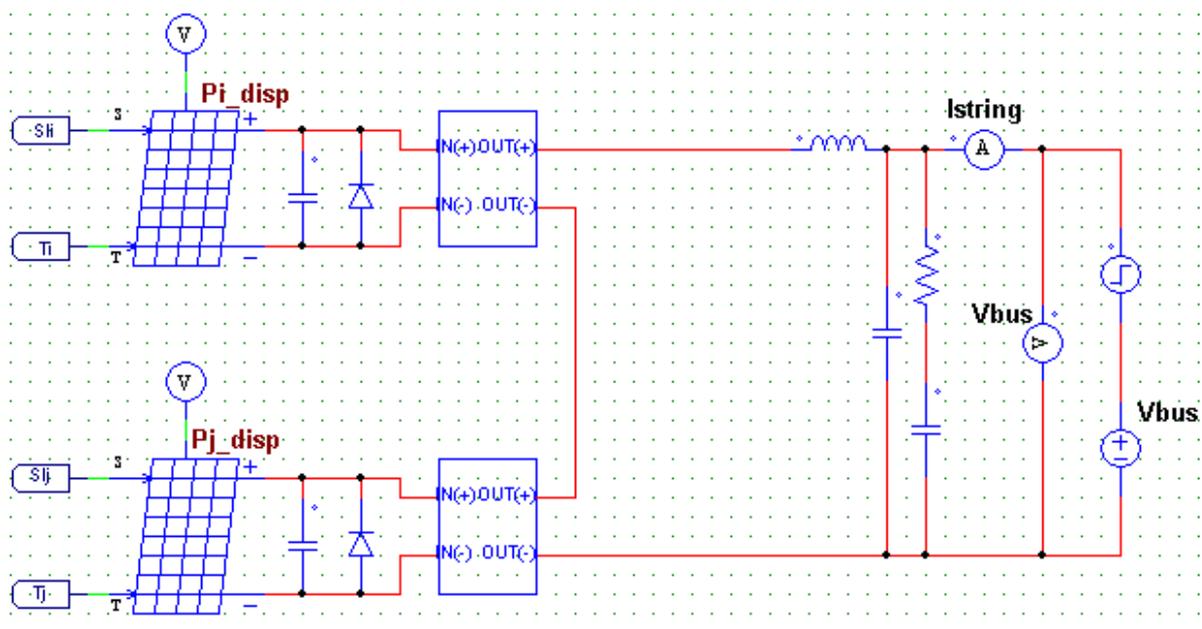


Fonte: Elaborado pelo autor.

Com esse conversor funcionando como DMPPT, diferentes testes foram feitos para representar diversas situações, todos com uma *string* dois módulos conectados a um barramento CC, sendo que um estará em piores condições (painel i) de geração que o outro, com menos irradiância solar e maior temperatura de trabalho (painel j). Para efeito de comparação, cada um dos testes foi feito com diferentes topologias: com a *string* tendo otimizadores nos dois painéis, Figura 27; em apenas um, no caso o de melhor produção, Figura 28; e sem otimizador algum, Figura 29.

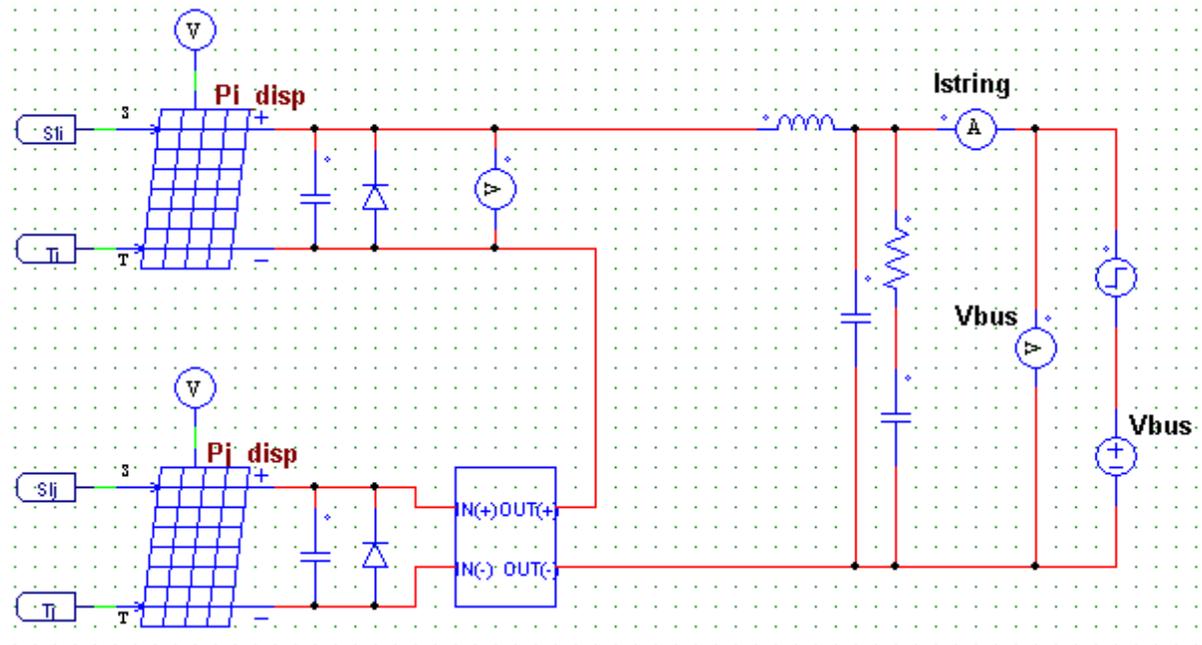
Os testes realizados representam situações de variação de tensão no barramento CC; mudança climática, com alteração de irradiância e temperatura; e operação constante, sem nenhuma das perturbações anteriores.

Figura 27 - Topologia com dois DMPPTs



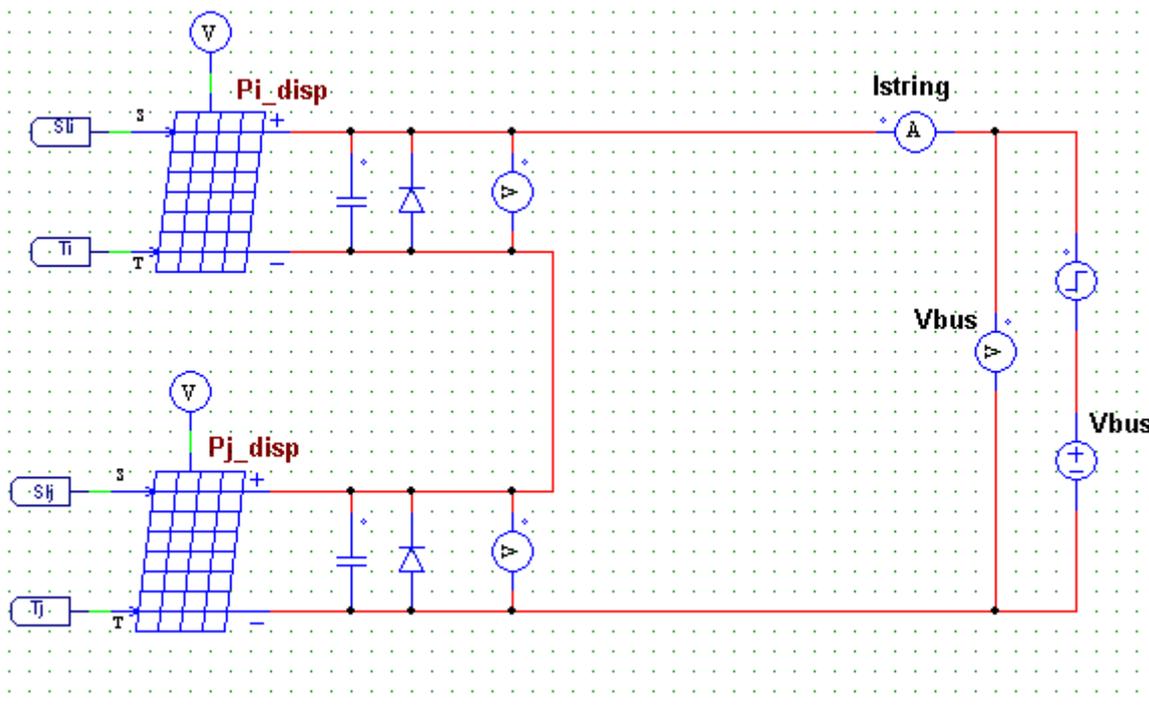
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28 - Topologia com um DMPPT



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29 - Topologia com nenhum DMPPT



Fonte: Elaborado pelo autor.

O filtro colocado antes do barramento CC nas topologias das Figuras 27 e 28 é necessário para filtrar a corrente pulsada.

O Quadro 4 contém os valores utilizados para os elementos do circuito e para as variáveis do algoritmo P&O.

Quadro 4 - Variáveis utilizadas para as simulações

	Grandeza	Símbolo	Valor
Variáveis do Circuito	Indutância	L	150 $\mu$ H
	Capacitância de saída	$C_{out}$	470 $\mu$ F
	Capacitância de entrada	$C_{in}$	470 $\mu$ F
	Resist. Capacitor de saída	$R_{cap}$	15 m $\Omega$
	Resist. Indutor	$R_{ind}$	0,1 m $\Omega$
	Resist. MOSFET	$R_{S1}$ e $R_{S2}$	13 m $\Omega$
	Queda de tensão Diodo	$V_{D1}$ e $V_{D2}$	0,7 V
	Tensão no barramento	$V_{bus}$	60 V
	Irradiância solar do módulo i	$S_{li}$	400 W/m <sup>2</sup>
	Temperatura do módulo i	$T_i$	50 °C
	Irradiância solar do módulo j	$S_{lj}$	1000 W/m <sup>2</sup>
	Temperatura do módulo j	$T_j$	25 °C
Variáveis do Algoritmo MPPT	Passo inicial	dD <sub>0</sub>	0,04
	Passo máximo	dD <sub>max</sub>	0,02
	Passo mínimo	dD <sub>min</sub>	0,0005
	Decaimento para variação do passo	decay	0,95
	Potência de tolerância	P <sub>tol</sub>	2%

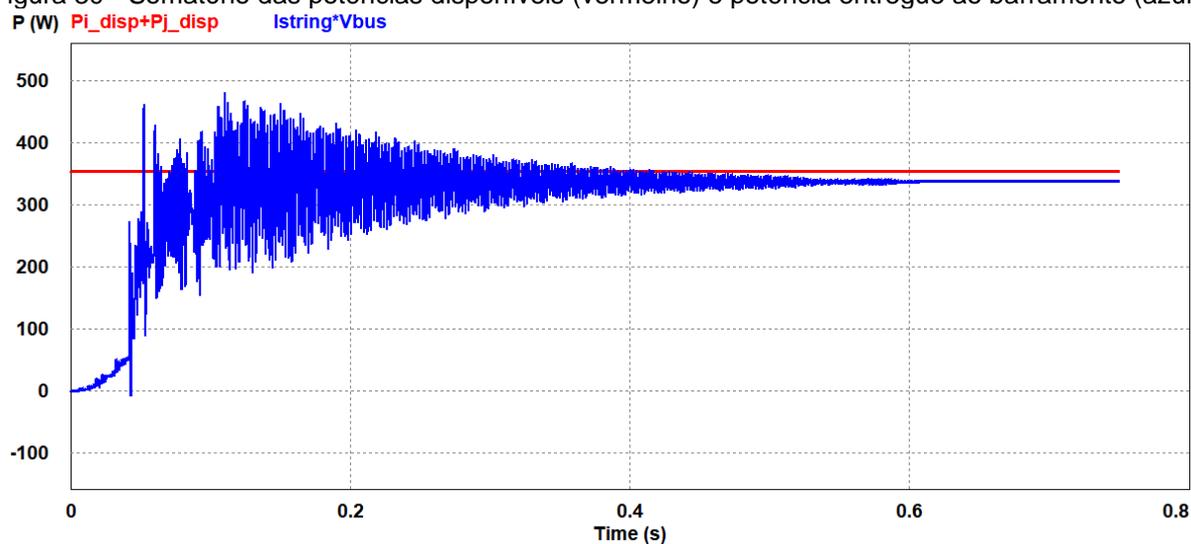
Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 Teste sem perturbações

Com esse teste será avaliado a operação dos DMPPTs em curso estável, sem perturbações.

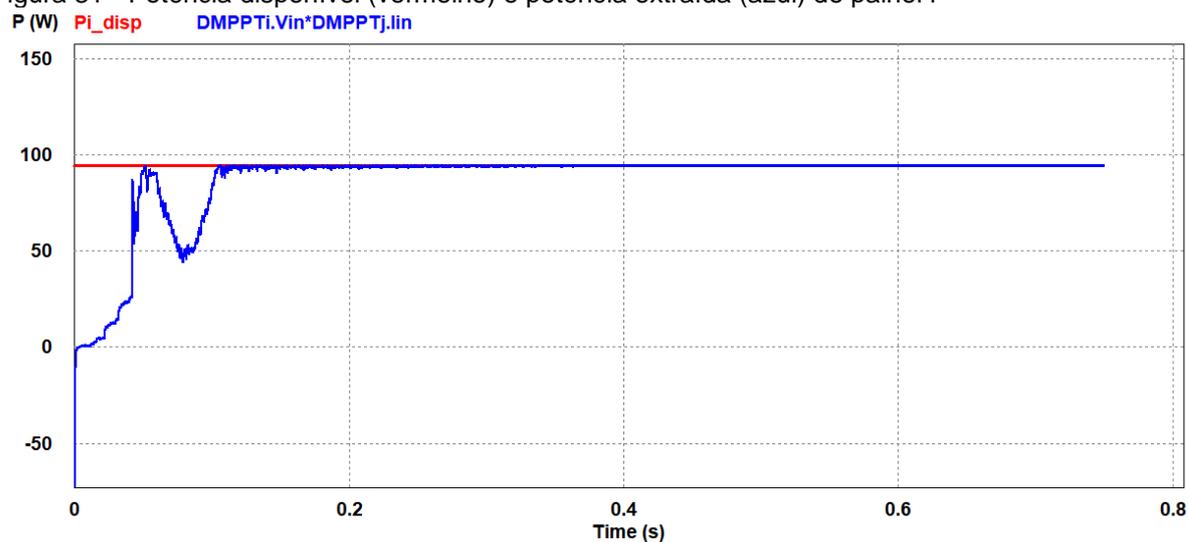
### 4.2.1 Otimizador em 2 módulos

Figura 30 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)



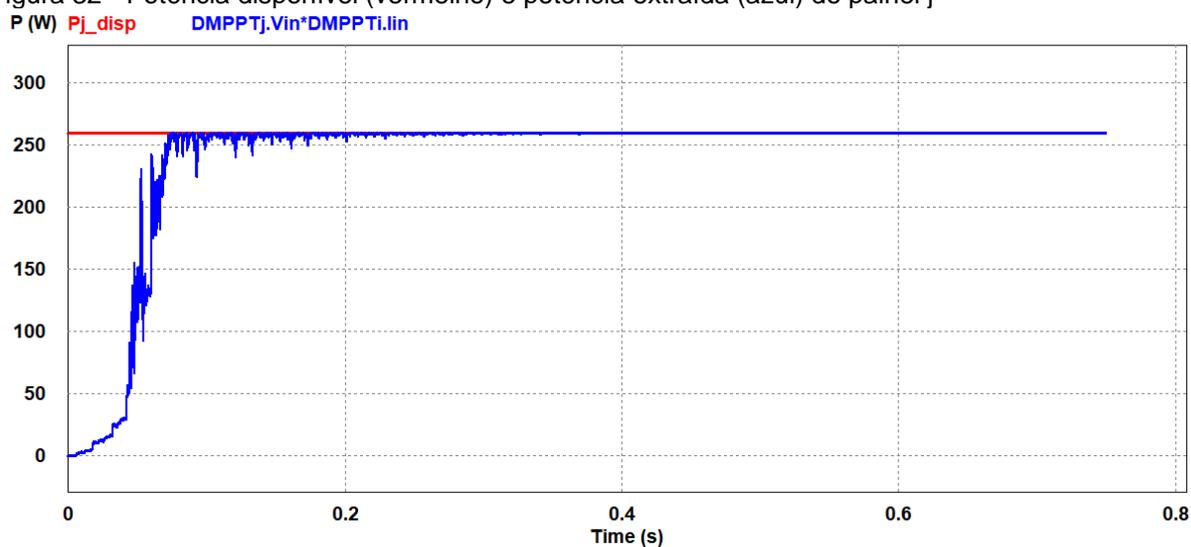
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i



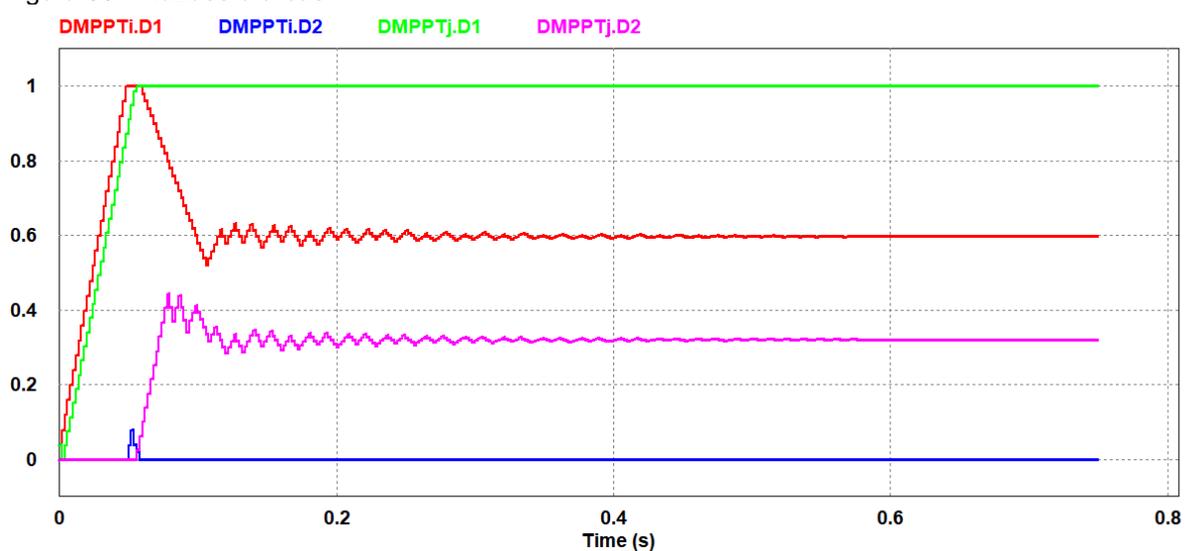
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33 - Razões cíclicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

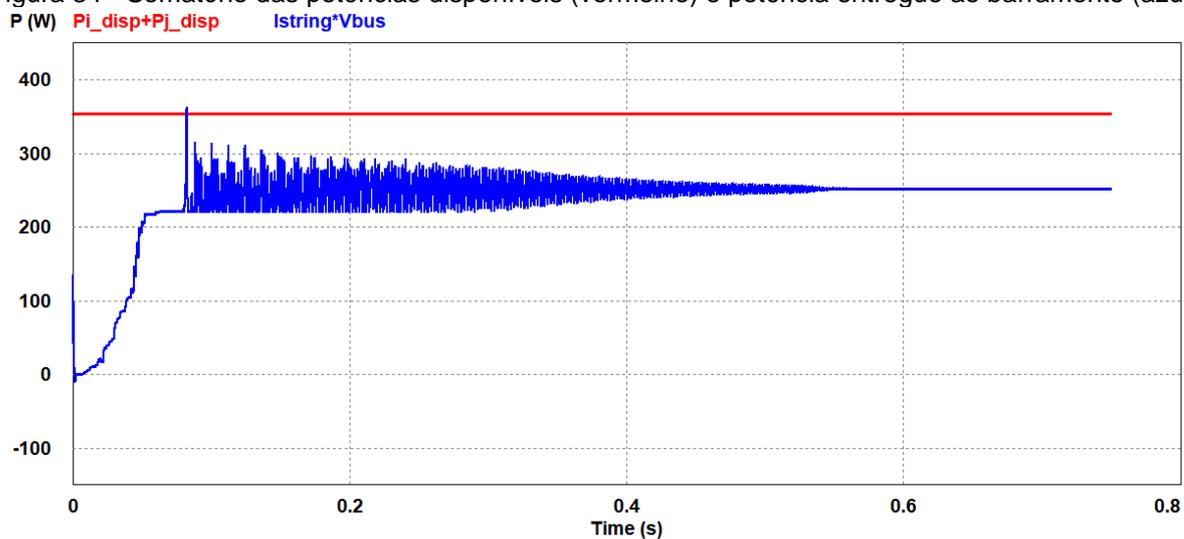
Quadro 5 - Resultado do teste para 2 DMPPTs sem perturbação

Grandeza	Valor de estabilização	
	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W
Potência individual extraída	94,2 W	259,8 W
DMPPT D1	0,598	1
DMPPT D2	0	0,320
Potência total disponível	354 W	
Potência total entregue ao barramento	337,7 W	

Fonte: Elaborado pelo autor.

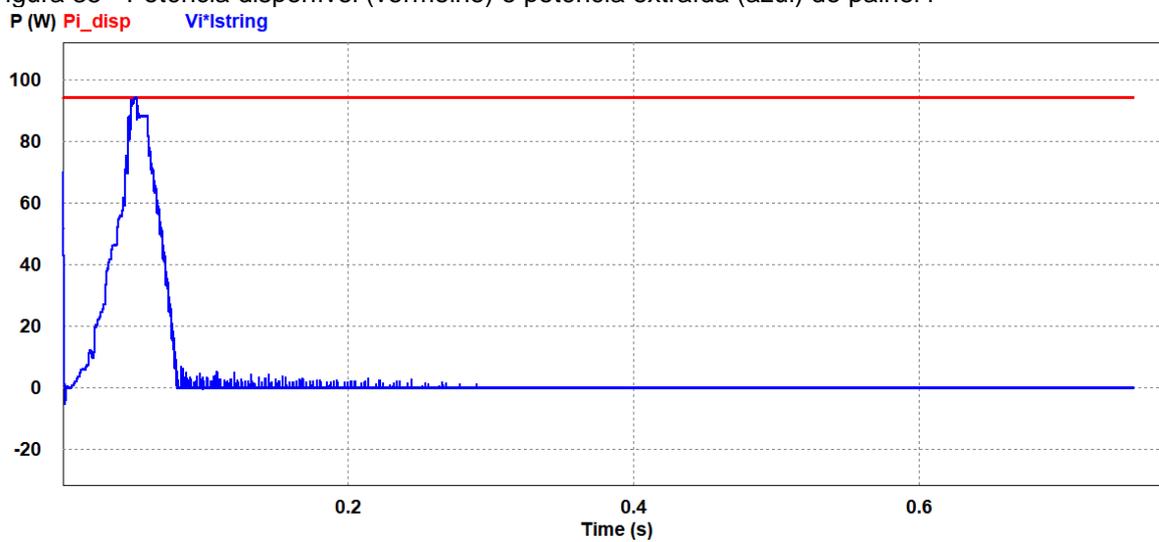
## 4.2.2 Otimizador em 1 módulo

Figura 34 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)



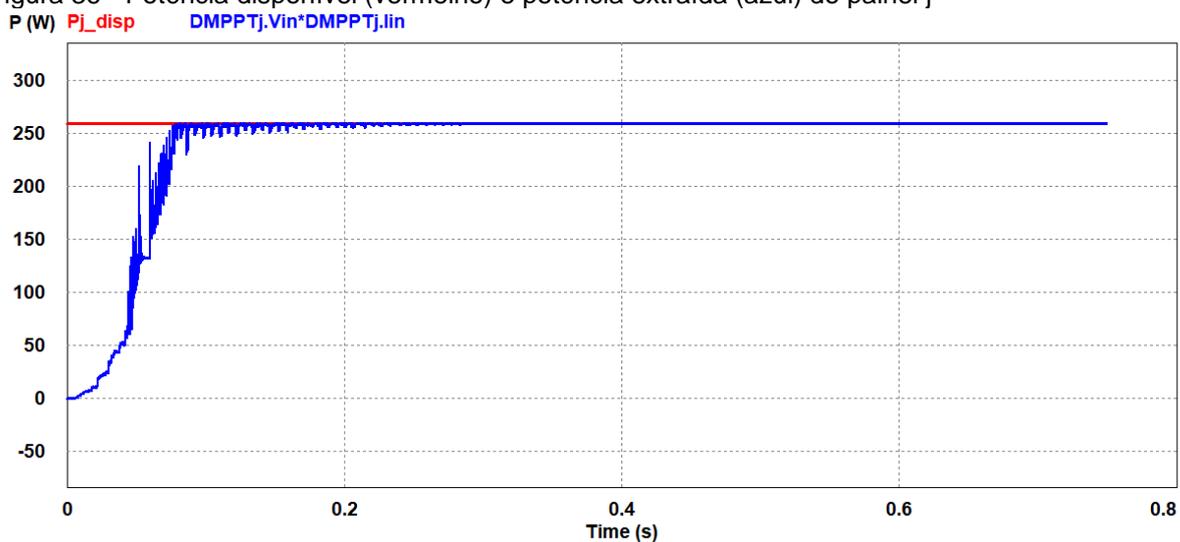
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 35 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i



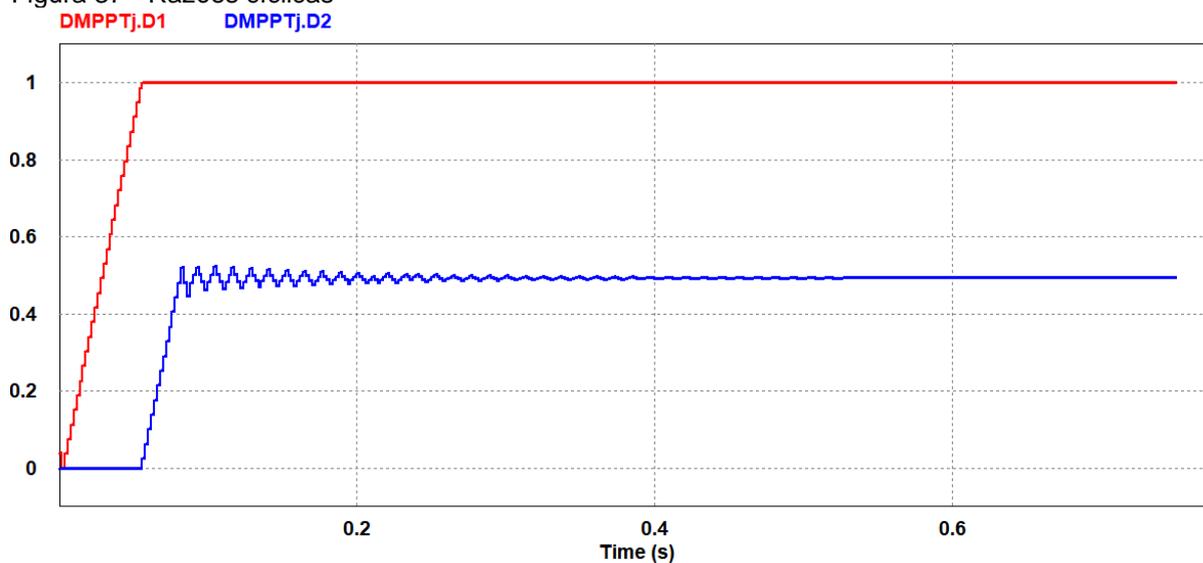
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37 - Razões cíclicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 6 - Resultado do teste para 1 DMPPT sem perturbação

Grandeza	Valor de estabilização	
	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W
Potência individual extraída	0 W	259,8 W
DMPPT D1	-	1
DMPPT D2	-	0,494
Potência total disponível	354 W	
Potência total entregue ao barramento	252,4 W	

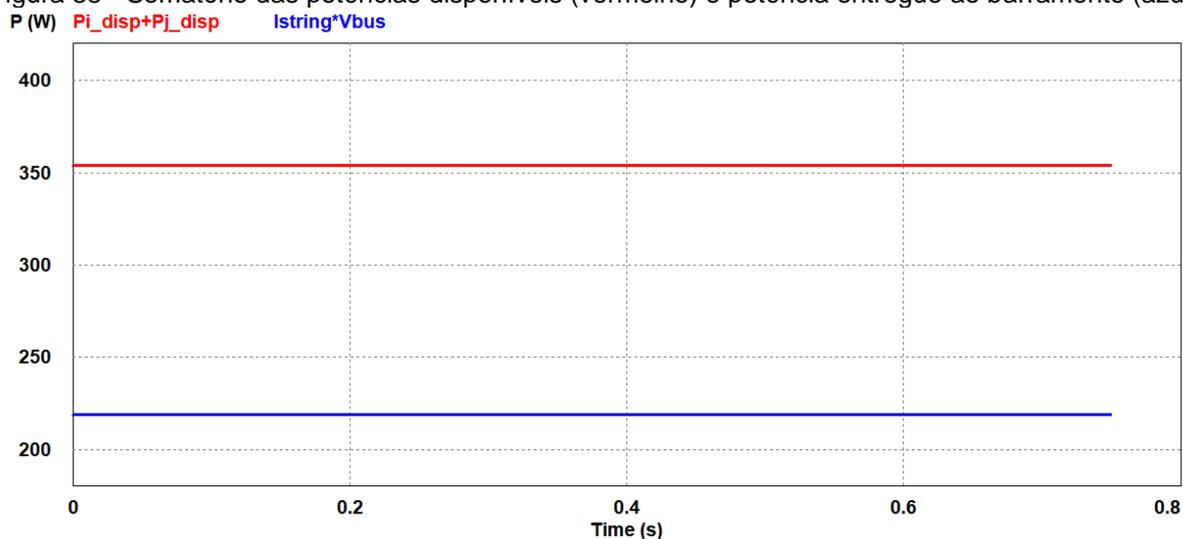
Fonte: Elaborado pelo autor.

O painel autocontrolado j opera em sua máxima potência, mas com isso, a corrente de saída do otimizador é maior que a corrente de curto-circuito do painel i e, por

isso, ele não consegue entregar potência alguma, pois sua tensão de operação é nula, já que sua corrente é a máxima possível (de curto-circuito) e o restante da corrente da *string* passa pelo seu diodo *by-pass*.

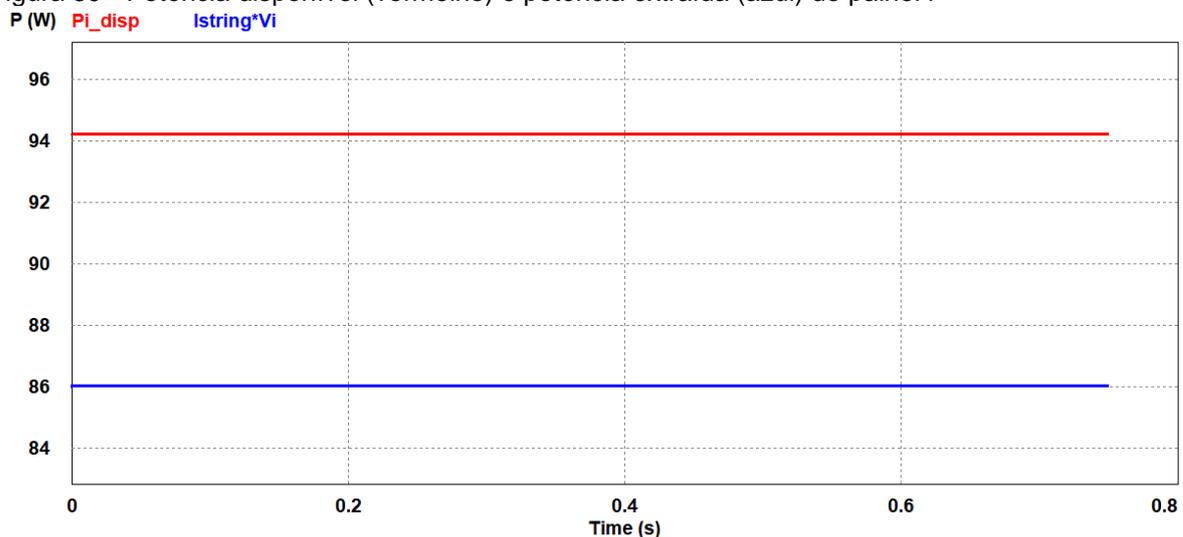
### 4.2.3 Sem otimizador

Figura 38 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)



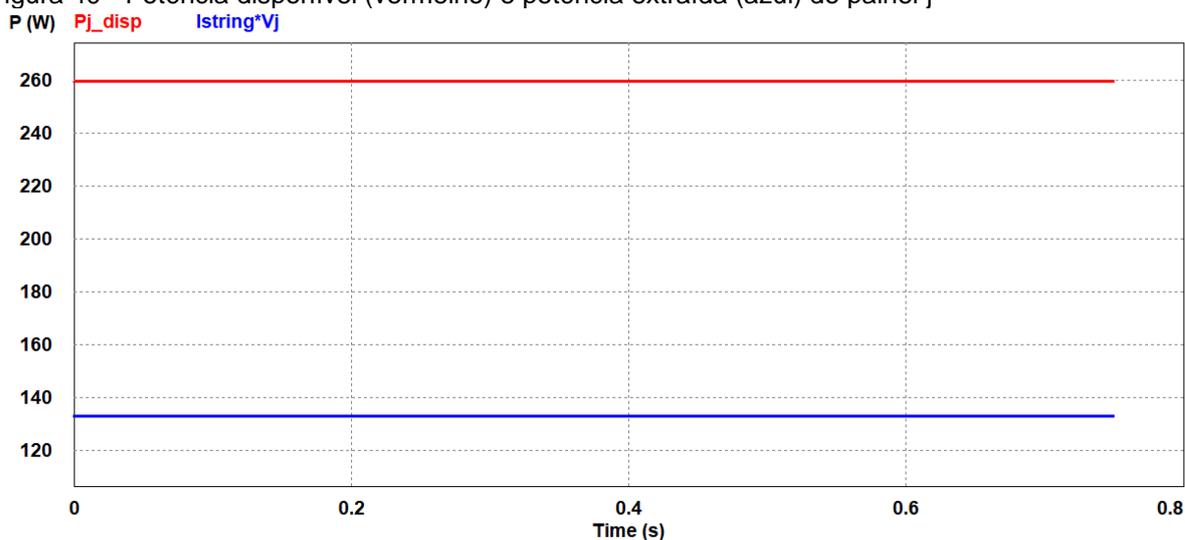
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 7 - Resultado do teste sem DMPPT sem perturbação

Grandeza	Valor de estabilização	
	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W
Potência individual extraída	86 W	133,1 W
Potência total disponível	354 W	
Potência total entregue ao barramento	219,1 W	

Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Teste com perturbação na potência disponível no módulo

Com esse teste será avaliado a operação dos DMPPTs em situações de variação climática. O Quadro 8 expõe o valor da perturbação.

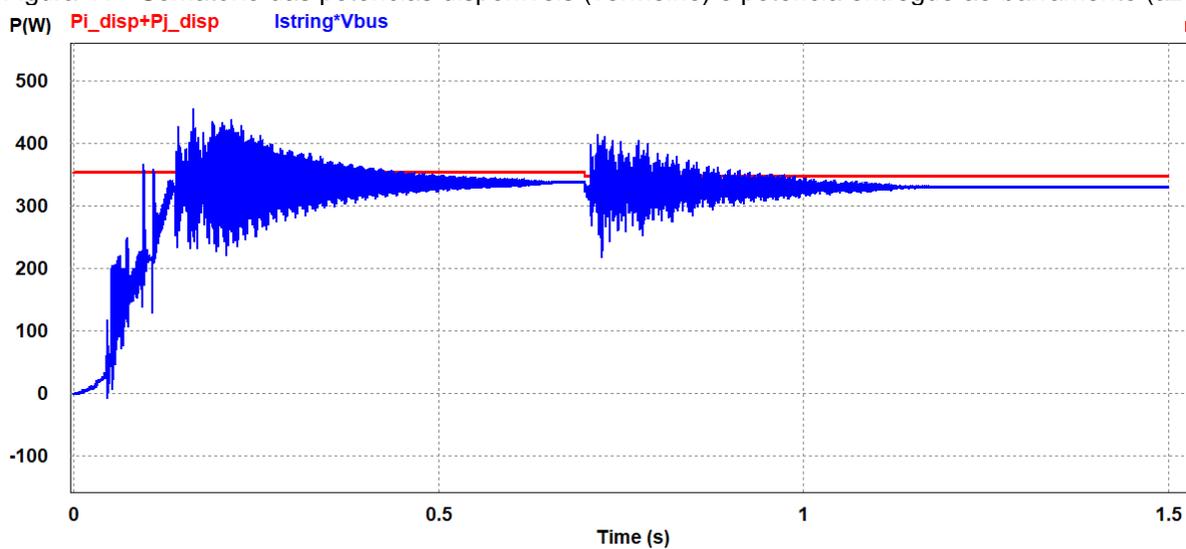
Quadro 8 - Perturbação gerada por alterações climáticas

Grandeza	Símbolo	Instante	Valor antes da perturbação	Valor após a perturbação
Irradiância Solar	$S_i$	0,7 s	400 W/m <sup>2</sup>	500 W/m <sup>2</sup>
Temperatura	$T_i$	0,7 s	50 °C	40 °C
Irradiância Solar	$S_j$	0,7 s	1000 W/m <sup>2</sup>	900 W/m <sup>2</sup>
Temperatura	$T_j$	0,7 s	25 °C	35 °C

Fonte: Elaborado pelo autor.

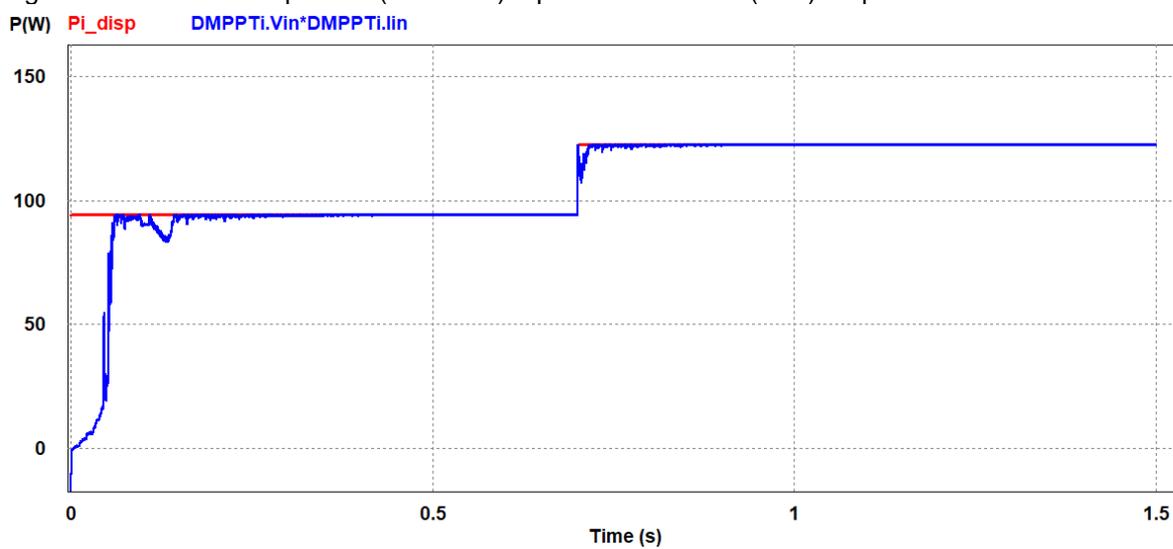
### 4.3.1 Otimizador em 2 módulos

Figura 41 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)



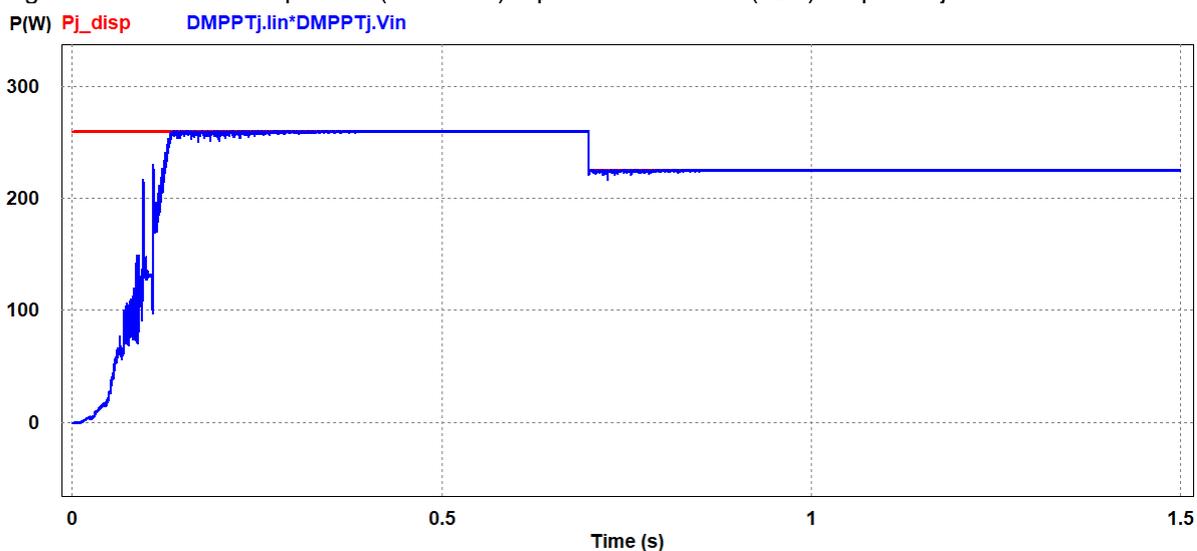
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i



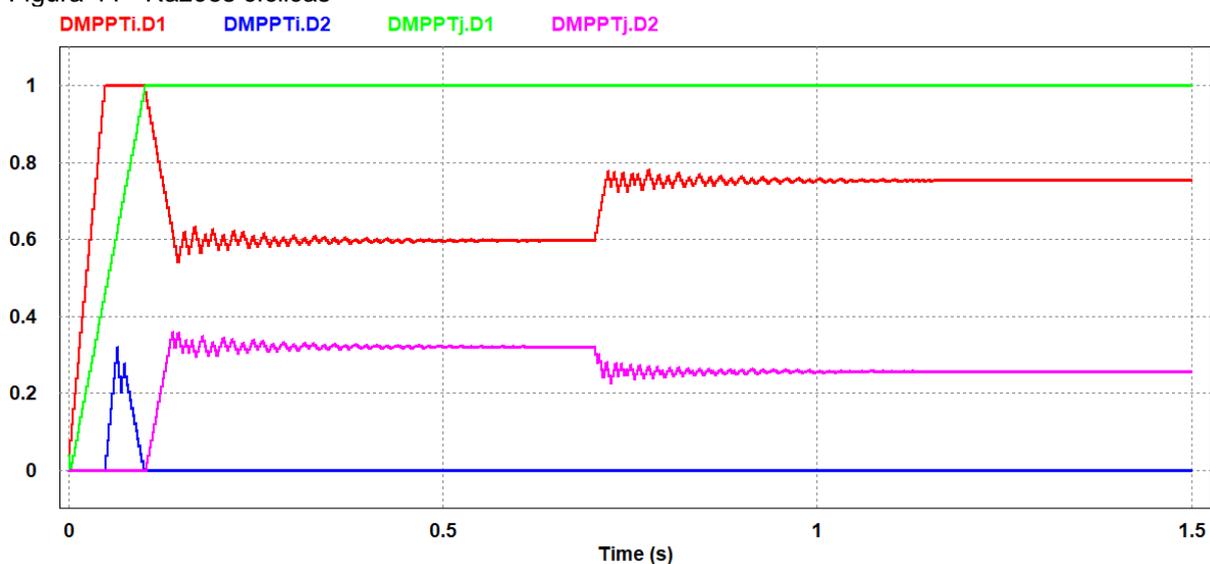
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44 - Razões cíclicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

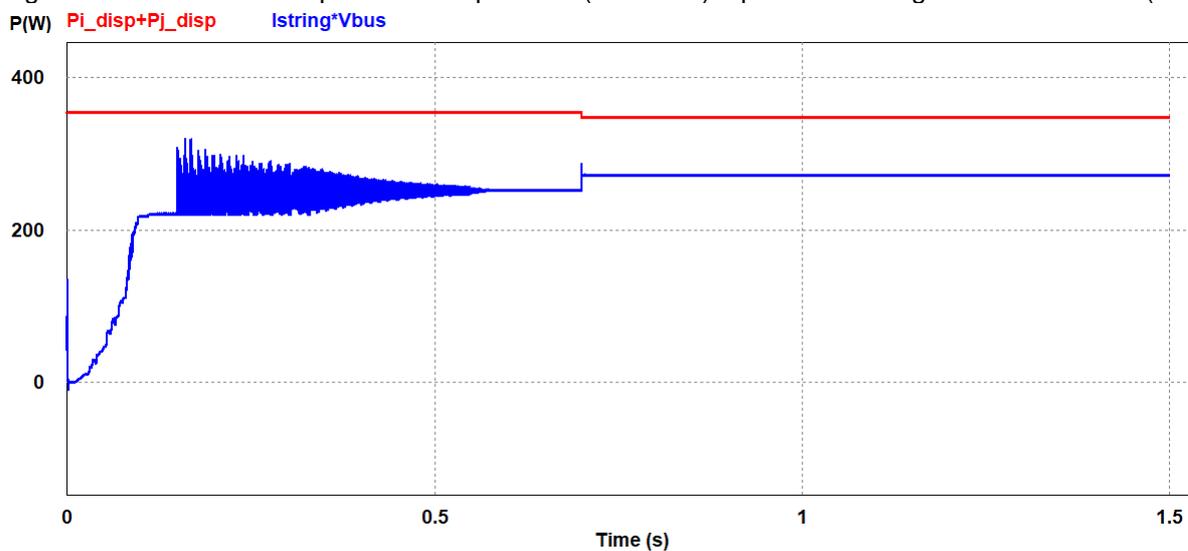
Quadro 9 - Resultado do teste para 2 DMPPTs com perturbação climática

Grandeza	Antes da perturbação		Após da perturbação	
	Módulo i	Módulo j	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W	122,5 W	225,3 W
Potência individual extraída	94,2 W	259,8 W	122,5 W	225,3 W
DMPPT D1	0,598	1	0,754	1
DMPPT D2	0	0,320	0	0,257
Potência total disponível	354 W		347,8 W	
Potência total entregue ao barramento	337,7 W		330,8 W	

Fonte: Elaborado pelo autor.

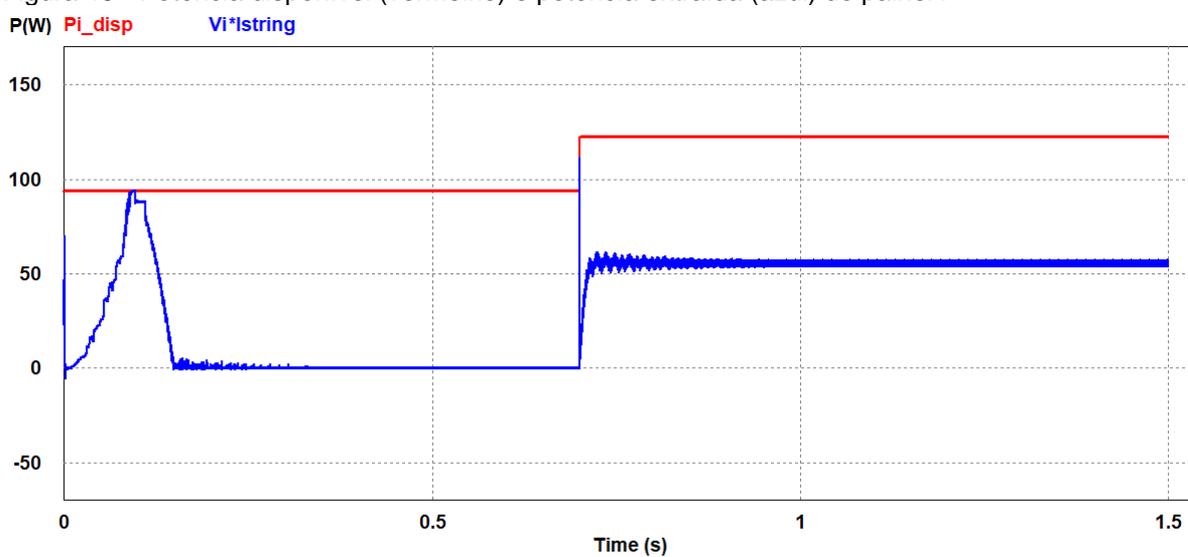
### 4.3.2 Otimizador em 1 módulo

Figura 45 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)



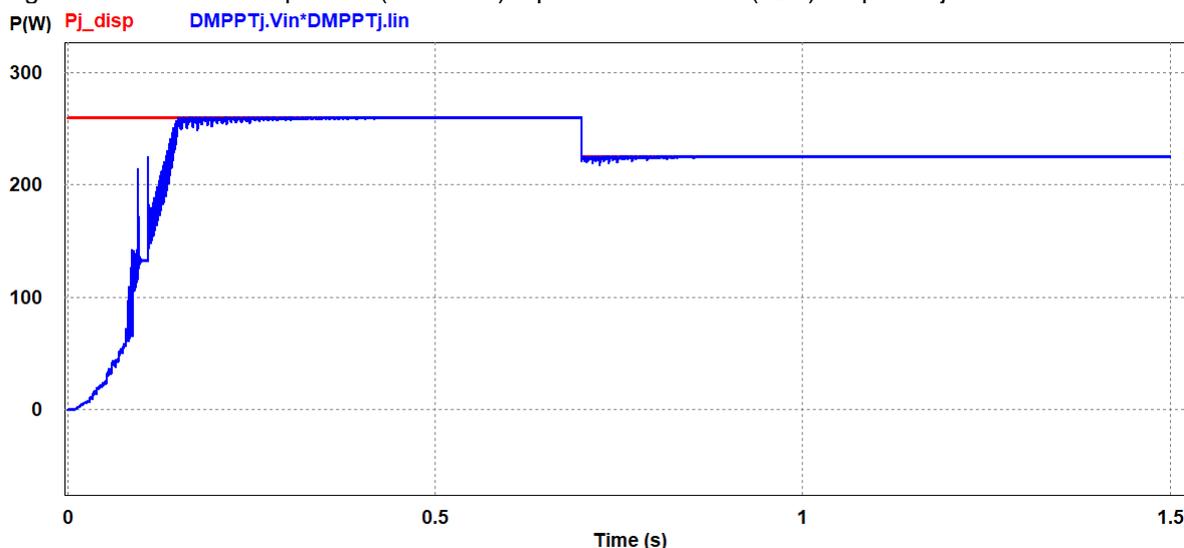
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 46 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i



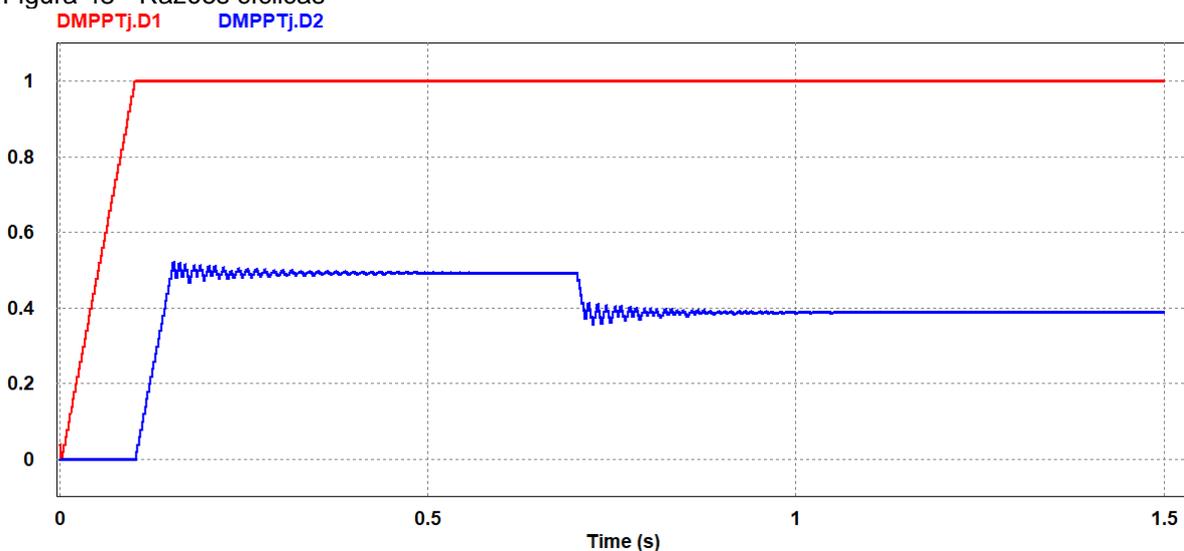
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48 - Razões cíclicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 10 - Resultado do teste para 1 DMPPT com perturbação climática

Grandeza	Antes da perturbação		Após da perturbação	
	Módulo i	Módulo j	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W	122,5 W	225,3 W
Potência individual extraída	0 W	259,8 W	55,8 W	225,3 W
DMPPT D1	-	1	-	1
DMPPT D2	-	0,493	-	0,388
Potência total disponível	354 W		347,8 W	
Potência total entregue ao barramento	252,3 W		272,5 W	

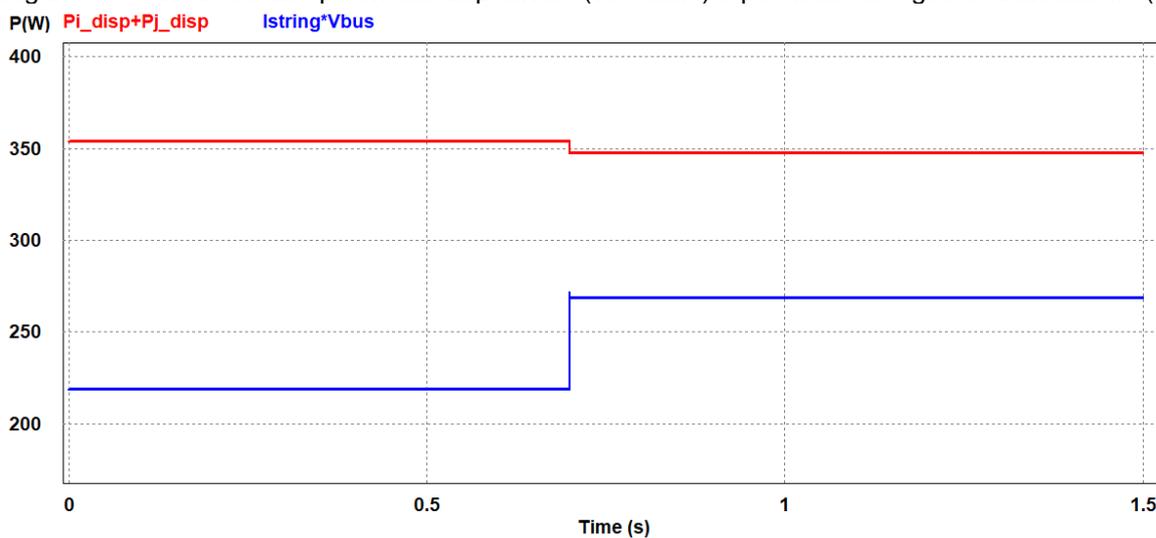
Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste caso, o aumento da potência disponível no módulo i fez com que sua corrente pudesse assumir valores maiores e, assim, ele pode contribuir, aumentando a

potência de geração da *string*, mesmo com a diminuição da potência disponível. Esse resultado pode parecer contra intuitivo, mas mostra justamente a influência da diferença entre as condições de geração dos módulos.

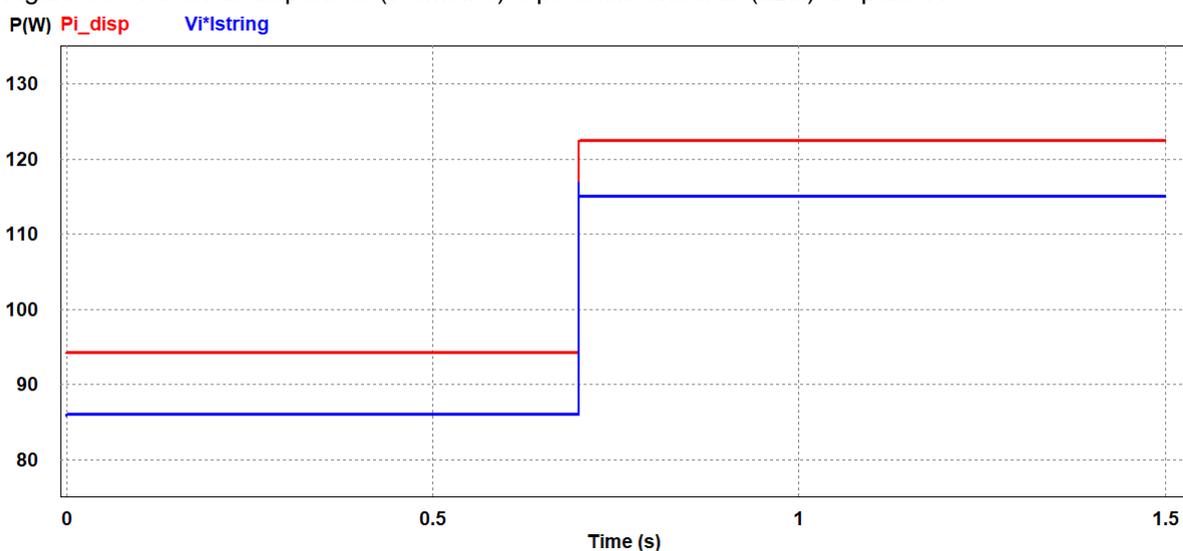
### 4.3.3 Sem otimizador

Figura 49 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)



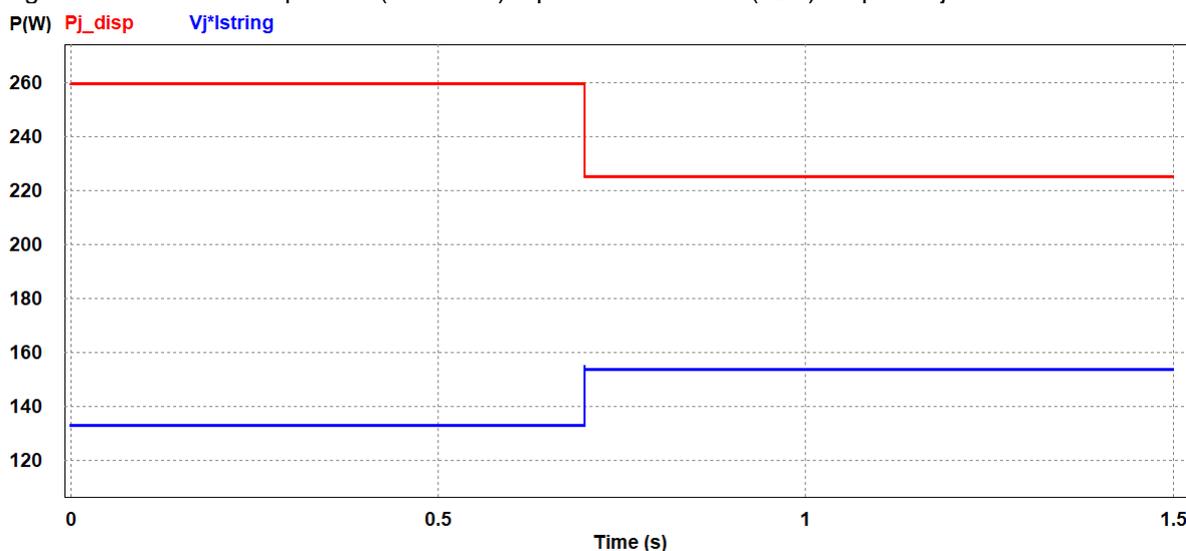
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 51 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 11 - Resultado do teste sem DMPPT com perturbação climática

Grandeza	Antes da perturbação		Após da perturbação	
	Módulo i	Módulo j	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W	122,5 W	225,3 W
Potência individual extraída	86 W	133,1 W	115,1 W	153,6 W
Potência total disponível	354 W		347,8 W	
Potência total entregue ao barramento	219,1 W		268,7 W	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Resposta semelhante à do item 4.3.2, com a mesma justificativa: a diferença entre as condições de geração reduziu e, por isso, a influência de um painel no outro é menor, dessa forma a *string* consegue trabalhar em uma maior potência.

#### 4.4 Teste com perturbação na tensão de barramento

Com esse teste será avaliado a operação dos DMPPTs em situações de variação da tensão do barramento, que pode ser originada por um MPPT central, na entrada do inversor, que controle essa tensão  $V_{bus}$ .

As condições de geração do painel não serão modificadas, mudará apenas o ponto de operação da *string*, o que fará com que haja uma oscilação da potência no instante da perturbação e uma reativação do modo Perturba e Observa, fazendo com que o algoritmo busque o novo ponto de máxima potência. O Quadro 12 expõe o valor da perturbação.

Quadro 12 - Perturbação gerada por alteração na tensão de barramento

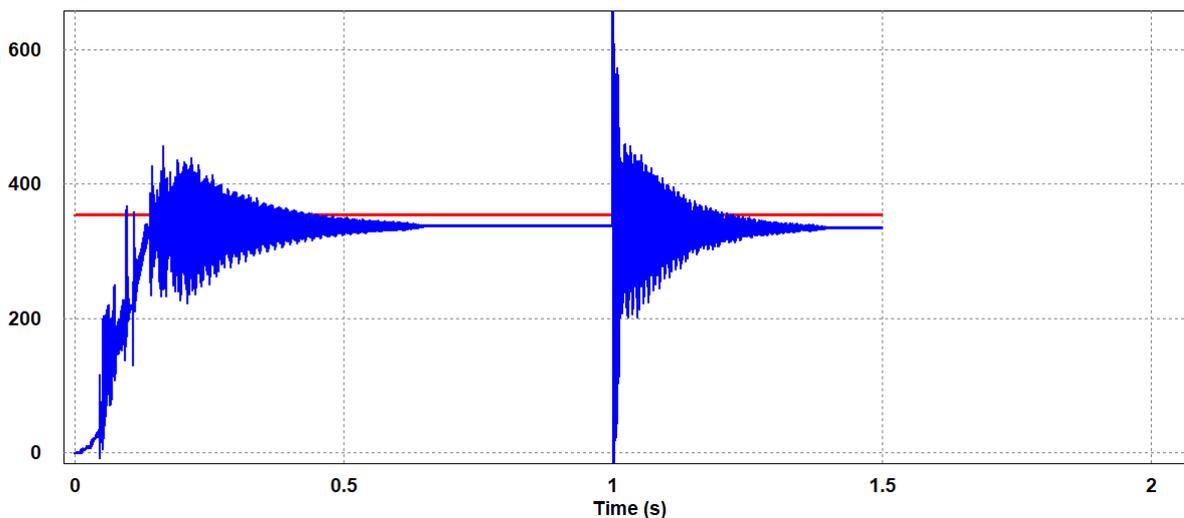
Grandeza	Símbolo	Instante	Valor antes da perturbação	Valor após a perturbação
Tensão de barramento	$V_{bus}$	1 s	60 V	50 V

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4.1 Otimizador em 2 módulos

Figura 52 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)

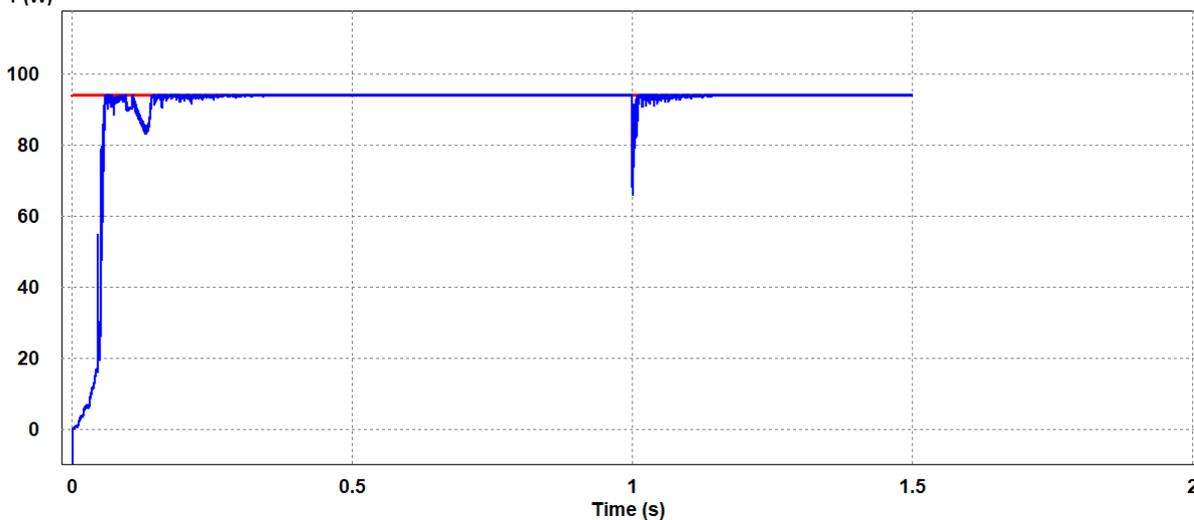
P(W)  $P_{i\_disp}+P_{j\_disp}$   $I_{string} \cdot V_{bus}$



Fonte: Elaborado pelo autor.

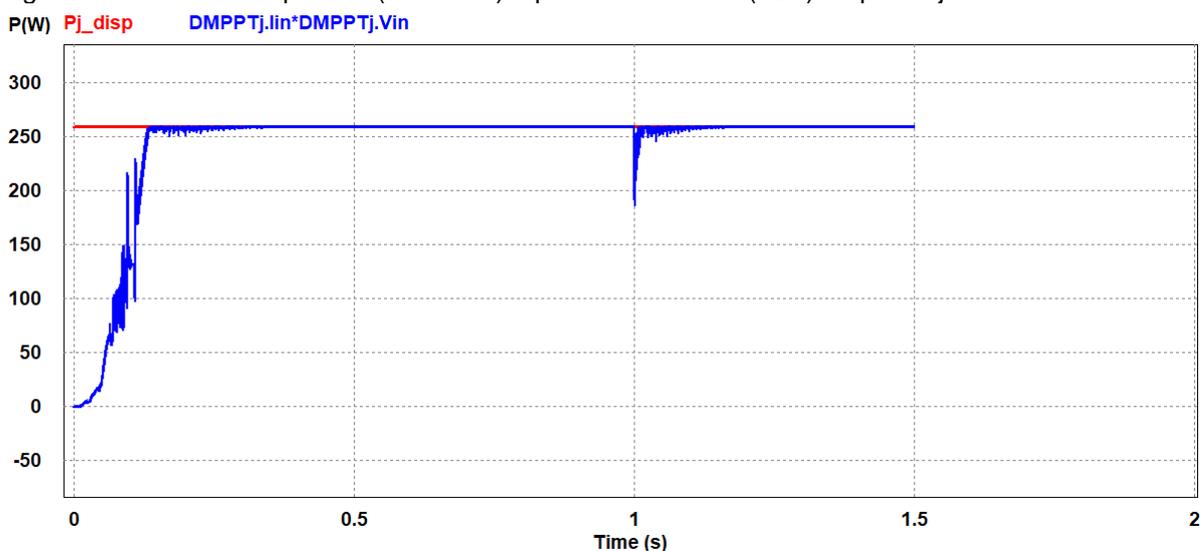
Figura 53 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i

P(W)  $P_{i\_disp}$   $DMPPTi.lin \cdot DMPPTi.Vin$



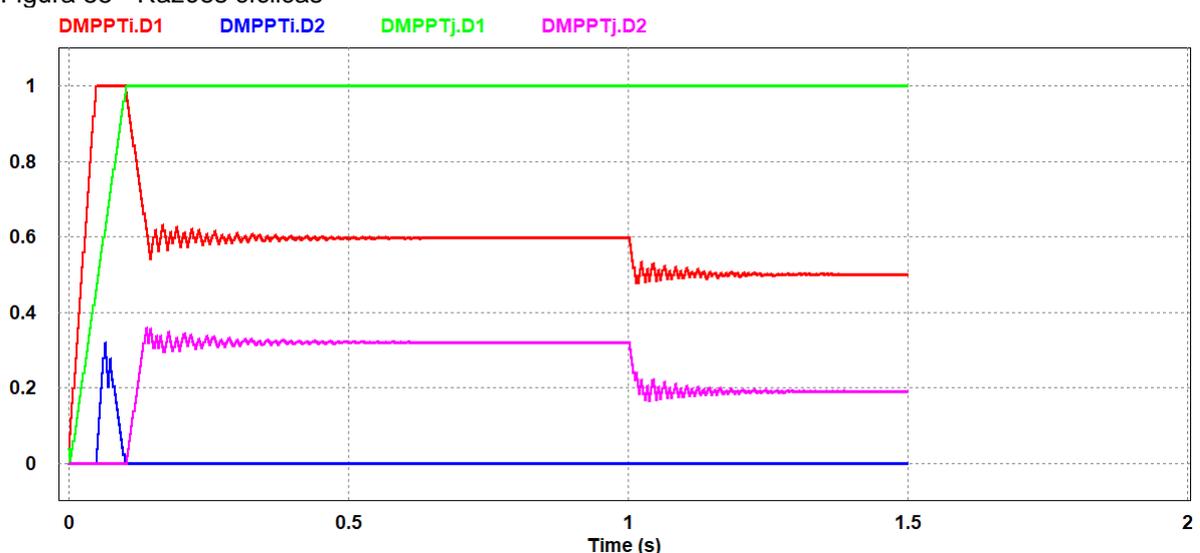
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55 - Razões cíclicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 13 - Resultado do teste para 2 DMPPTs com perturbação na tensão do barramento

Grandeza	Antes da perturbação		Após da perturbação	
	Módulo i	Módulo j	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W	94,2 W	259,8 W
Potência individual extraída	94,2 W	259,8 W	94,2 W	259,8 W
DMPPT D1	0,598	1	0,501	1
DMPPT D2	0	0,321	0	0,191
Potência total disponível	354 W		354 W	
Potência total entregue ao barramento	337,7 W		335,2 W	

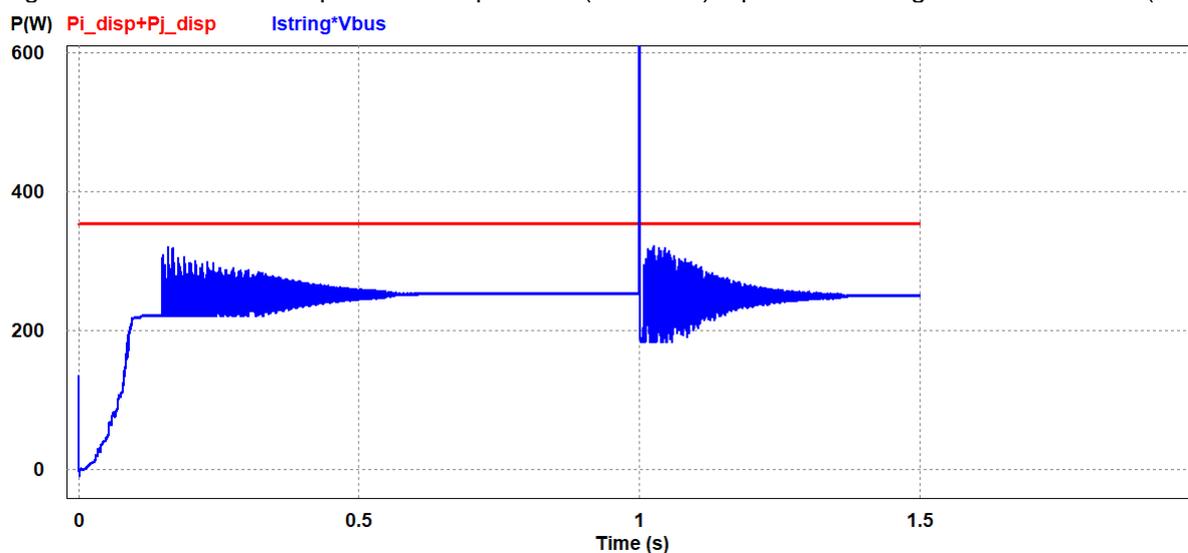
Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar do otimizador conseguir fazer os módulos operarem em sua máxima potência, a potência total entregue ao barramento reduziu. Isso se deve ao fato de

que, no novo ponto de operação, a corrente é maior, já que a tensão do barramento CC reduziu e a potência gerada se manteve a mesma. Isso faz com que as perdas por condução aumentem. É possível perceber esse comportamento também no item 4.4.2.

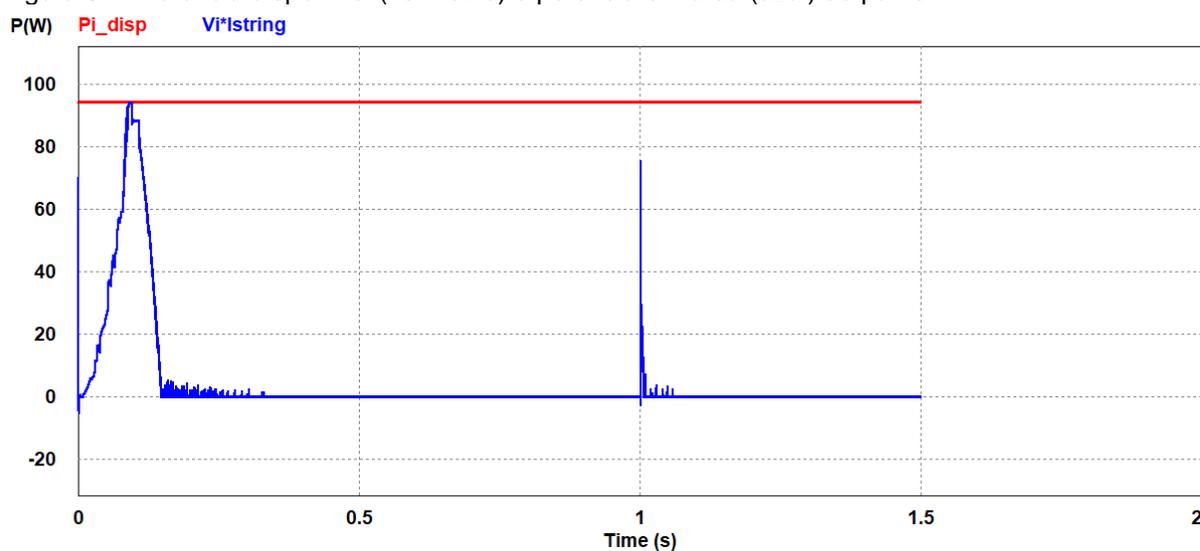
#### 4.4.2 Otimizador em 1 módulo

Figura 56 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)



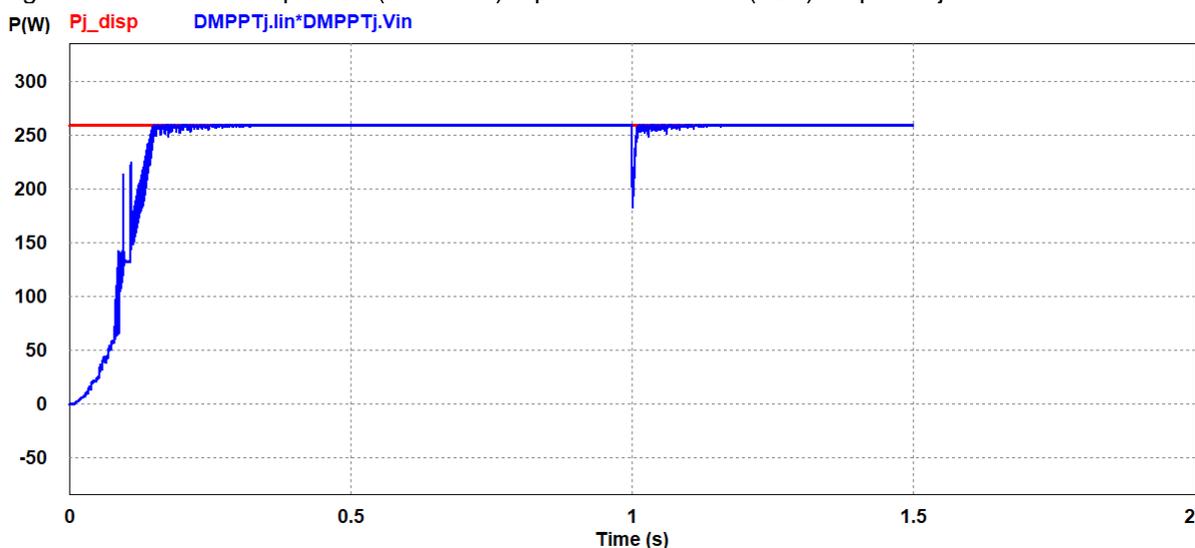
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i



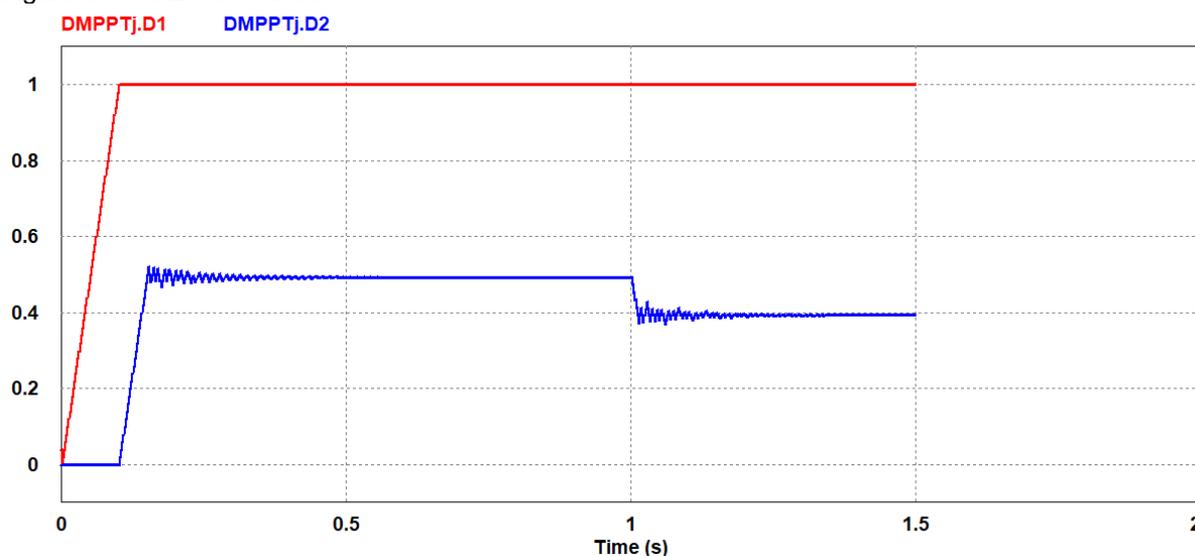
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 59 - Razões cíclicas



Fonte: Elaborado pelo autor.

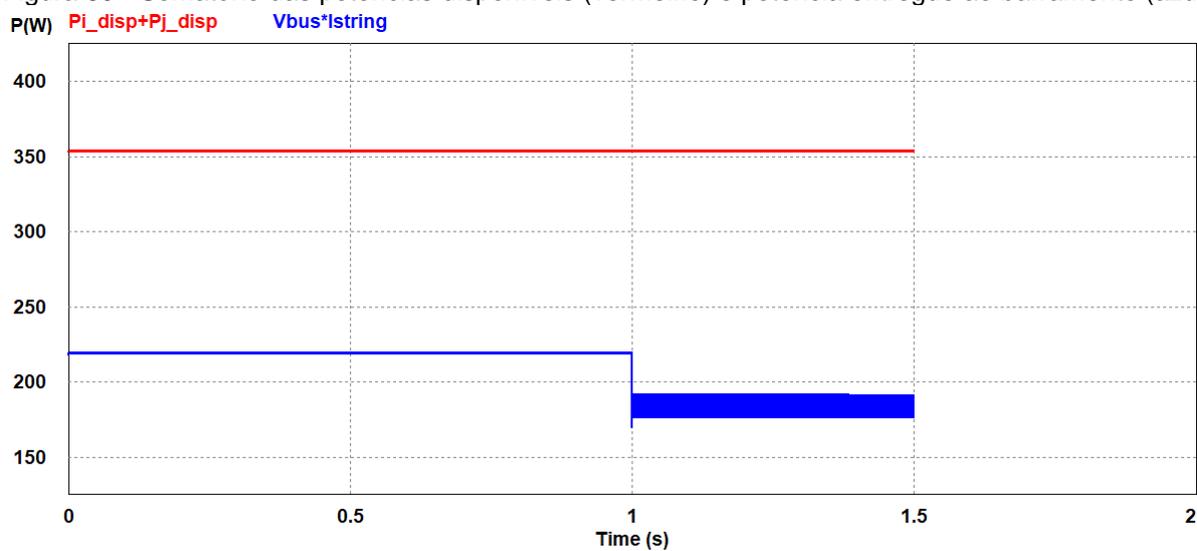
Quadro 14 - Resultado do teste para 1 DMPPT com perturbação na tensão do barramento

Grandeza	Antes da perturbação		Após da perturbação	
	Módulo i	Módulo j	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W	94,2 W	259,8 W
Potência individual extraída	0 W	259,8 W	0 W	259,8 W
DMPPT D1	-	1	-	1
DMPPT D2	-	0,493	-	0,393
Potência total disponível	354 W		354 W	
Potência total entregue ao barramento	252,4 W		249,9 W	

Fonte: Elaborado pelo autor.

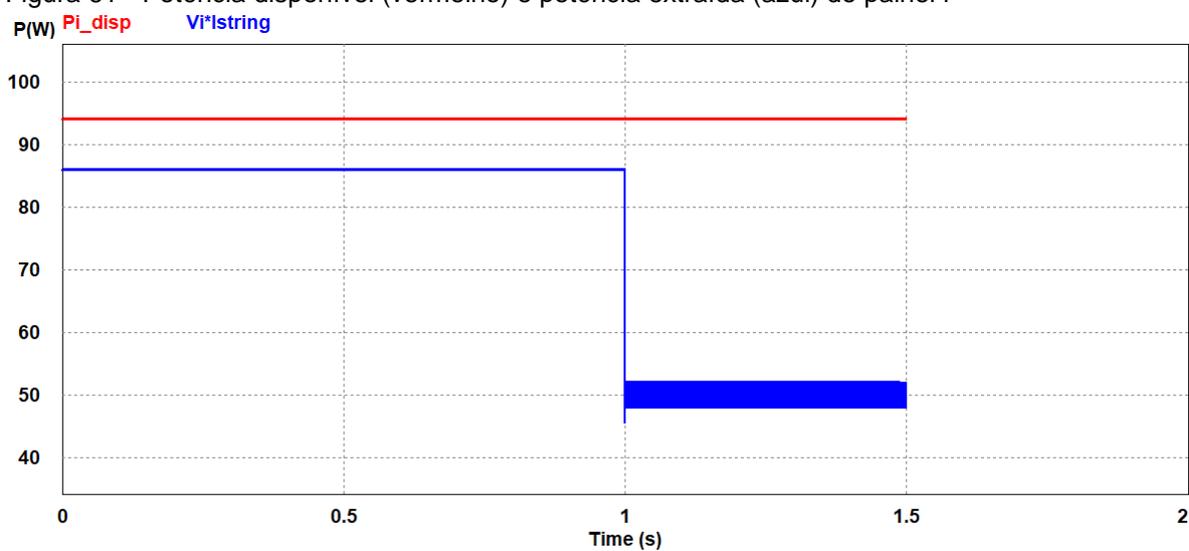
### 4.4.3 Sem otimizador

Figura 60 - Somatório das potências disponíveis (vermelho) e potência entregue ao barramento (azul)



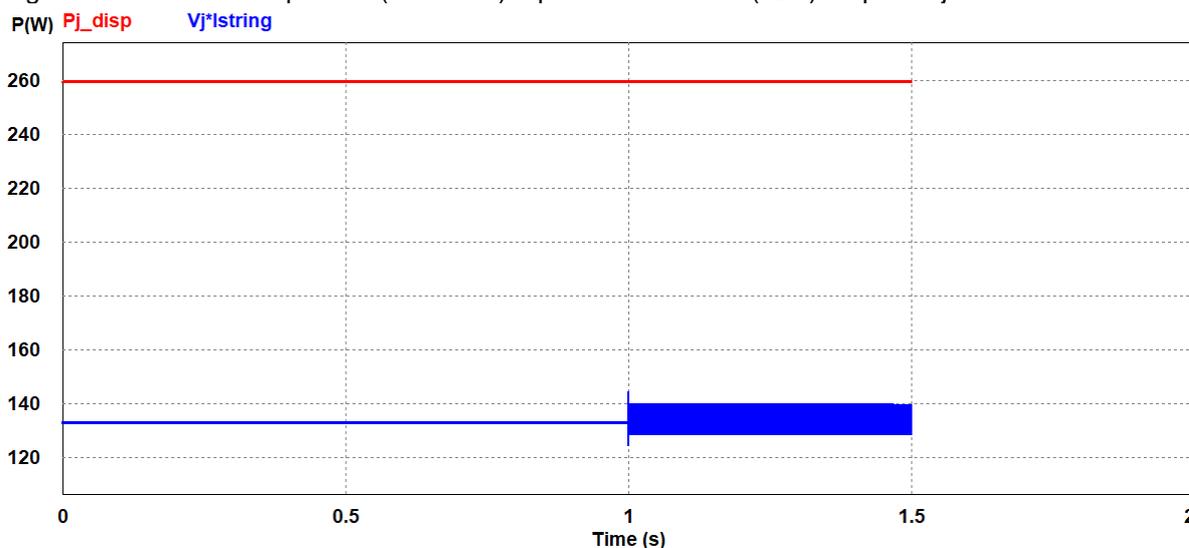
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel i



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 62 - Potência disponível (vermelho) e potência extraída (azul) do painel j



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 15 - Resultado do teste sem DMPPT com perturbação na tensão do barramento

Grandeza	Antes da perturbação		Após da perturbação	
	Módulo i	Módulo j	Módulo i	Módulo j
Potência individual disponível	94,2 W	259,8 W	94,2 W	259,8 W
Potência individual extraída	86 W	133,1 W	50,1 W	134,3W
Potência total disponível	354 W		354 W	
Potência total entregue ao barramento	219,1 W		184,5 W	

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.5 Comentários

Com os dois DMPPTs, a máxima potência dos painéis sempre é extraída, em todas as situações. Nesse caso, a diferença observada entre a potência entregue ao barramento CC e a potência disponível se deve às perdas no conversor, por chaveamento, nas resistências e nos diodos.

É interessante observar dois comportamentos nos testes com um DMPPT: o primeiro é a inutilização do painel i, que não produz nada (testes 4.2 e 4.4), enquanto o painel j opera em sua máxima potência, pois dada a tensão no barramento e a potência do painel j, a corrente resultante é maior do que a corrente de curto-circuito do módulo i, fazendo-o não gerar. O segundo é a melhora da potência entregue ao barramento com a queda da tensão disponível (teste 4.3) que ocorreu por causa da mudança da corrente de saída do SCPVM, que agora está dentro dos valores de operação do painel i. Essas situações ajudam a reforçar que o conversor não controla sua saída e que ela influencia os outros módulos.

## 5 CONCLUSÕES

O futuro caminha para um maior crescimento de geração fotovoltaica e para módulos cada vez mais eficientes e esse caminho passa, necessariamente, por DMPPT. É muito provável que muitos painéis saiam de fábrica com soluções de MLPE em suas caixas de junções, podendo controlar a máxima potência de um conjunto de células de uma placa, ou seja, DMPPT submodulares integrados (PILAWA-PODGURSKI, 2013).

DMPPTs podem ser capazes de garantir que qualquer superfície, com diferentes orientações e inclinações, possa gerar energia elétrica, fazendo com que, no futuro, todas as pessoas tenham em suas casas, como se fosse um “eletrodoméstico que economiza energia”.

O trabalho exposto ajuda a comunidade científica a caminhar para essa direção, com algumas contribuições produzidas de forma original.

A contribuição matemática do item 2.3.3, aponta quais são as limitações de cada tipo de conversor e evidencia como a operação em máxima potência de conversores abaixadores e abaixadores-elevadores como DMPPTs em série só depende do seu dimensionamento. Já a de conversores elevadores, depende também da diferença entre a irradiância solar entre os painéis.

O controle de chaves do circuito *Buck+Boost*, explicada no item 3.2.1, faz com que a topologia, que tem três modos de operação, tenha apenas um controle. Sua simplicidade faz com que a transição entre os modos não tenha custo computacional e seja feita de forma automática.

A nova alternativa para algoritmo P&O de passo variável, Apêndice A, tem implementação mais simples que o método que avalia a derivada da potência em relação à razão cíclica e se apresenta mais eficiente que outros métodos P&O por fixar a razão cíclica em um valor ótimo.

Espera-se que todas as inovações desse trabalho possam ser utilizadas e desenvolvidas em futuros projetos. O P&O modificado, particularmente, pode ter seu

método refinado e ainda deve ser testado em diferentes situações, simuladas e reais, a fim de avaliar e quantificar seu desempenho.

Além das inovações, conclui-se que o conversor elevador-abaiçador é o mais versátil para aplicações com otimizadores de potência, tendo como ponto negativo o custo. A possibilidade de fazer com que um módulo fotovoltaico autocontrolado (SCPVM) possa operar em máxima potência com tensão de saída acima ou abaixo da nominal, faz com que um módulo se torne uma fonte de potência, sendo capaz de entregar sempre sua máxima potência, elevando o desempenho da *string* até mesmo quando somente alguns painéis contêm otimizadores.

Por fim, esse trabalho desenvolveu o projeto de um conversor CC/CC capaz de atuar como DMPPT em painéis fotovoltaicos conectados em série e conseguindo sempre gerar a máxima potência individual de cada módulo, independente das condições climáticas e do ponto de operação definido pelo barramento CC, utilizando um algoritmo MPPT original.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, R.; IBÁÑEZ, P.; MARTÍNEZ, V.; ROMÁN, E.; SANZ, A., Analysis of performance of new distributed MPPT architectures, *In: 2010 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, Bari, 2010, p. 3450-3455.

ALONSO, R.; ROMAN, E.; SANZ, A.; MARTÍNEZ SANTOS, V. E.; IBANEZ, P. Analysis of Inverter-Voltage Influence on Distributed MPPT Architecture Performance, *In: IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2012, v. 59, n. 10, p. 3900-3907.

ANEEL. **Informações compiladas e mapa.** Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrljoiZjM4NjM0OWYtN2lwZS00YjViLTlIMjltN2E5MzBkN2ZIMzVkliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 11 dez. 2019.

BALATO, M.; VITELLI, M. A new control strategy for the optimization of Distributed MPPT in PV applications. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. Italia, v. 62, p. 763-773, 2014.

BP. **BP Statistical Review of World Energy.** Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019.

CANADIAN SOLAR. **Datasheet MAXPOWER CS6U-315|320|325|330P.** Disponível em: <https://www.canadiansolar.com/upload/a795cd743b6ad509/2204c59105aaa331.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019.

CRESESB. **Módulos Fotovoltaicos.** Disponível em: [http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&lang=pt&cid=331](http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&lang=pt&cid=331). Acesso em: 11 dez. 2019.

FEMIA, N.; LISI, G.; PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M. Distributed maximum power point tracking of photovoltaic arrays: Novel approach and system

analysis, *In: IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2008, v. 55, n. 7, p. 2610-2621.

FEMIA, N.; PETRONE, G.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M. **Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems**. Boca Raton: CRC Press, 2013.

LEARN ABOUT ELECTRONICS. **Buck-Boost Converters**. Disponível em: <http://www.learnabout-electronics.org/PSU/psu33.php>. Acesso em: 11 dez. 2019.

LINARES, Leonor et al. Improved energy capture in series string photovoltaics via smart distributed power electronics. *In: 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. IEEE, 2009. p. 904-910.

ONU. **População mundial**. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>. Acesso em: 11 dez. 2019.

PILAWA-PODGURSKI, R. C. N. Submodule Integrated Distributed Maximum Power Point Tracking for Solar Photovoltaic Applications, *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, v. 28, n. 6, p. 2957-2967.

SCARPETTA, F.; LISERRE M.; MASTROMAURO, R. A., Adaptive distributed MPPT algorithm for photovoltaic systems, IECON 2012 - 38TH ANNUAL CONFERENCE ON IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY, 2012, Montreal, p. 5708-5713.

SOLARIZE. **Sombreamento em arranjos fotovoltaicos**. Disponível em: <https://www.solarize.com.br/site-content/11-blog/114-sombreamento-parcial-em-arranjos-fotovoltaicos>. Acesso em: 11 dez. 2019.

SOLÓRZANO, J.; EGIDO, M.A., Hot-spot mitigation in PV arrays with distributed MPPT (DMPPT). **Solar Energy**. v. 101, p. 131-137, 2014.

SVTC. **Silicon Valley Toxic Coalition**. Disponível em: <http://svtc.org/our-work/solar/>. Acesso em: 11 dez. 2019.

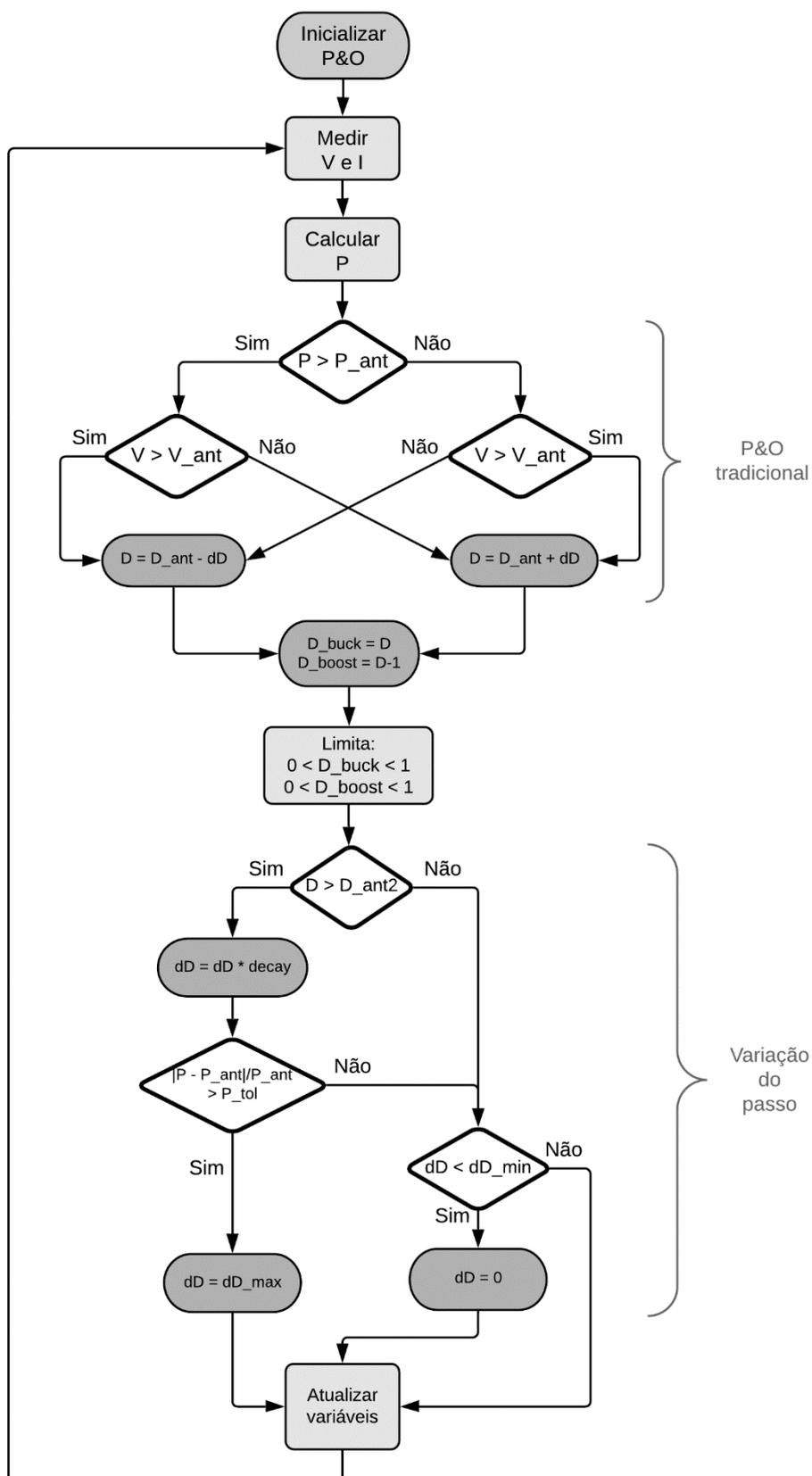
TEXAS INSTRUMENTS. **Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage.** Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/slva372c/slva372c.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage.** Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019.

TEXAS INSTRUMENTS. **Design tips for an efficient non-inverting buck-boost converter.** Disponível em: <http://www.ti.com/lit/an/slyt584/slyt584.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2019.

TSAO, P.; SARHAN, S.; JORIO, I., Distributed max power point tracking for photovoltaic arrays, *2009 34TH IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE (PVSC)*, Philadelphia, 2009, p. 2293-2298.

## APÊNDICE A – FLUXOGRAMA P&O MODIFICADO



## APÊNDICE B – ANÁLISE DE MERCADO

Foi feito um levantamento dos produtos de MLPE mais presentes no mercado brasileiro e são eles: Renovigi e APsystems, para microinversores, e SolarEdge e Tigo para otimizadores de potência, ilustrados na Figura 63.

Figura 63 - MLPE no mercado brasileiro. (A) Renovigi, (B) APsystems, (C) Tigo e (D) SolarEdge



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pouca diferença de funcionamento é encontrada nos microinversores. Cada um deles pode atender 2 ou 4 painéis, dependendo da sua potência nominal, e seu preço individual varia entre R\$ 1.800,00 a R\$ 3.600,00, com seu preço por potência nominal sendo em torno de 3,5 R\$/W.

Já nos otimizadores de potência, a diferença de funcionalidade é muito grande: A empresa SolarEdge desenvolveu otimizadores de potência e um inversor sem MPPT, com a intenção de baratear o custo total do sistema. Seus otimizadores, que prometem uma melhora de até 25% na produção de energia, funcionam exclusivamente com seu inversor, e os revendedores vendem apenas a solução completa, com preço por potência nominal indo de 0,83 R\$/W, em sistemas menores (12 kW), à 0,74 R\$/W em maiores (92kW).

A empresa Tigo utilizou outra abordagem: seus otimizadores funcionam em mais de 2000 modelos de inversores, podendo ser acoplado à sistemas já instalados. Em sua folha de dados, presente no Anexo A, o otimizador Tigo TS4-O afirma otimizar um sistema sem sombra em até 3% e um sistema sombreado em até 36%. O preço unitário de um TS4-O gira em torno R\$ 270,00, ou seja, 0,57 R\$/W. Apesar do baixo preço por potência nominal é importante lembrar que é necessário a aquisição de um inversor, uma vez que a Tigo não produz a solução completa, como a SolarEdge.

Todas as soluções de MLPE oferecem monitoramento de cada dispositivo, sendo um importante benefício para médios e grandes sistemas, acima de 30 módulos.

Vale ressaltar que, quando se avalia a compra em grande quantidade, os preços unitários tendem a diminuir. Os preços unitários apresentados aqui são para servir de base para análise. Além disso, deve ser levado em conta os custos da instalação e acessórios vinculados aos produtos. Por exemplo, apesar de mais caros, os microinversores proporcionam uma economia por reduzirem a quantidade necessária de cabos para uma instalação fotovoltaica e simplifica o trabalho dos instaladores, reduzindo tempo de trabalho, uma vez que, com um inversor central, é necessário interligar os módulos aos inversores que geralmente estão distantes, pois comumente os painéis estão localizados na cobertura e os inversores no interior da edificação.

Dentre os expostos, o otimizador que mais se assemelha com o proposto por esse trabalho é o TS4-O, da Tigo: um conversor dedicado para cada painel e que pode ser acoplado em diversos inversores. Uma diferença entre eles é que, de acordo com o *datasheet* do TS4-O, Anexo A, sua máxima tensão de saída não ultrapassa a tensão de circuito aberto do painel, ou seja, se trata de um conversor abaixador.

Se o projeto desenvolvido nesse trabalho vier a se tornar um produto e popularizar o uso de otimizadores de potência, seu preço deve ser menor que o preço proposto pela Tigo.

## ANEXO A

# TS4-O

## Optimization



TS4-O is one of 5 functional covers that pairs with an integrated modular junction box base (TS4-B), a single retrofit/add-on base (TS4-R-O), or a dual retrofit/add-on base (TS4-R-O-Duo).

### Features

- Increased energy yield
- Greater design flexibility
- Shade and age tolerance
- Maximized roof usage

Plus all the benefits of Safety:

- NEC 690.12 Rapid Shutdown compliance
- Module-level deactivation

Plus all the benefits of Monitoring:

- Reduced O&M costs
- Module barcode tracking
- Fleet management

### Increase your energy harvest

In an unshaded system, Tigo optimization increased energy harvest by 3%.<sup>1</sup>

In a shaded system, recover 36% of energy that would have been lost due to mismatch.<sup>2</sup>

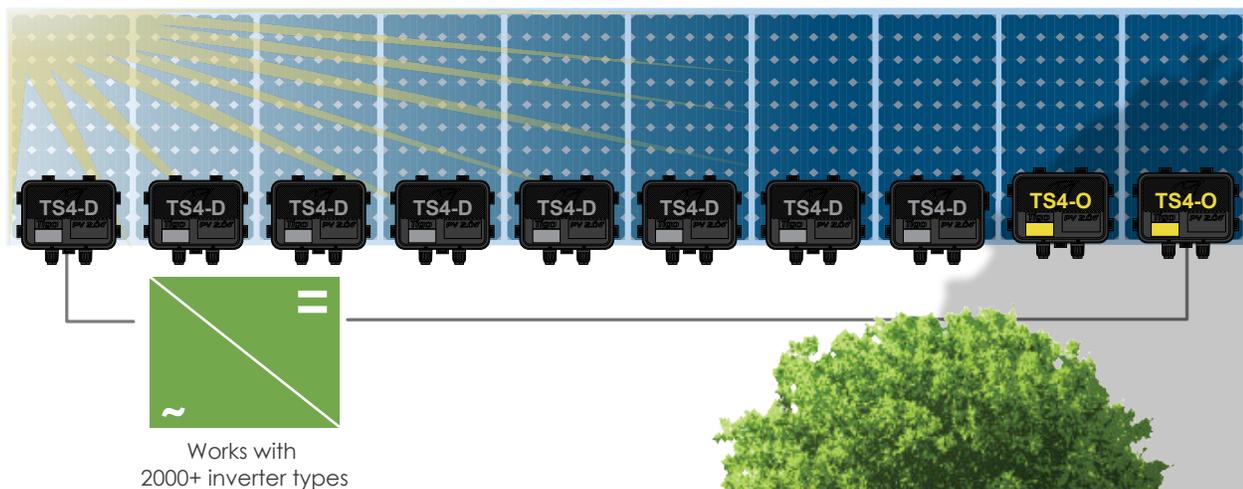
### Design flexibility

Design using unequal string lengths and mixed orientations.

Install into shaded areas with a reduced setback ratio.

Optimize only where needed with selective deployment.<sup>3</sup>

Optimize only where needed<sup>4</sup>



# Meet any projects' needs with the TS4 covers

Tigo has expanded its smart module platform to provide five levels of customization. TS4 increases your freedom of choice by allowing you to select the right features for each project and budget.

## ELECTRICAL RATINGS

INPUT	
Rated DC Input Power	475W
Maximum Input Voltage @ Lowest Temperature	90V
Maximum Short Circuit Current (I <sub>sc</sub> )	12A
Maximum V <sub>oc</sub> @ STC	75V
Minimum V <sub>MP</sub> @ STC	16V
OUTPUT	
Output Power Range	0 - 475W
Output Voltage Range	0 - V <sub>oc</sub>
Rapid Shutdown UL Certified (NEC 2014 & 2017 690.12)	Yes
Impedance Matching Capability	Yes
Output Voltage Limit	No
Maximum System Voltage	1500V

CCA and TAP required for rapid shutdown compliance.



### For sales info:

[sales@tigoenergy.com](mailto:sales@tigoenergy.com) or 1.408.402.0802 ext. 1

### For product info:

Visit [www.tigoenergy.com/products](http://www.tigoenergy.com/products)

### For technical info:

<http://support.tigoenergy.com>

For additional info and product selection assistance, use Tigo's online design tool at [www.tigoenergy.com/design](http://www.tigoenergy.com/design)



Distributed Generation monitoring module component, Q1102

