

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

EDUARDO MOREIRA VICENTE

SISTEMA DE MPPT PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM
BAIXA COMPLEXIDADE E ALTO RENDIMENTO

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da UNIFEI como requisito
parcial para a obtenção do título de
Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Microeletrônica

Orientador: Prof. Dr. Robson Luiz Moreno

Coorientador: Prof. Dr. Enio Roberto Ribeiro

Dezembro de 2015

Itajubá – MG

*“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica:
a vontade!”*

Albert Einstein.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, que nos dá força para continuar a caminhada todos os dias e que sempre coloca lições ao longo do caminho, para que possamos aprender cada vez mais.

Aos professores Robson Luiz Moreno e Enio Roberto Ribeiro pelo apoio, amizade, dedicação e ajuda durante a longa jornada, do mestrado ao doutorado.

Aos meus pais José e Ana, que sempre apoiaram as minhas escolhas e que são um porto seguro em minha vida, fontes de amor e carinho.

Aos meus irmãos Marcos, Alexandre, Carlos e Sérgio, que estão sempre na torcida pelo meu sucesso.

À minha esposa Paula, que é minha companheira de todas as horas, inclusive de doutorado, por estar sempre presente ao meu lado e por todo carinho que dedica a mim.

Aos amigos, antigos e novos, da infância e da fase adulta, pela cumplicidade.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Itajubá e aos colegas da Universidade Federal de São João del-Rei, que contribuíram com o conhecimento e a estrutura para o desenvolvimento das pesquisas.

Ao povo brasileiro e a CAPES pelo apoio financeiro.

A todos que, de forma direta e indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

Resumo da tese apresentada à Universidade Federal de Itajubá como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica

SISTEMA DE MPPT PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COM BAIXA COMPLEXIDADE E ALTO RENDIMENTO

Eduardo Moreira Vicente

Dezembro de 2015

Orientador: Professor Robson Luiz Moreno, Dr.

Coorientador: Professor Enio Roberto Ribeiro, Dr.

Área de concentração: Microeletrônica.

Palavras-chave: MPPT, leitura da temperatura, estimação da irradiância, método I&T.

Número de páginas: 115.

RESUMO:

O uso de energias renováveis é uma necessidade nos dias de hoje, tanto pela diminuição do impacto ambiental quanto pela escassez de outras fontes de energia. Dentre as diversas fontes de energias renováveis, uma das mais promissoras é a energia fotovoltaica. Entretanto, a baixa capacidade de conversão dos módulos fotovoltaicos comerciais, que é da ordem de 13% a 18%, é um dos entraves à sua utilização. Para garantir que a máxima potência disponível seja extraída dos módulos fotovoltaicos, faz-se necessário o desenvolvimento de sistemas rastreadores de máxima potência. Sendo assim, apresenta-se neste trabalho uma nova proposta de técnica de rastreamento do ponto de máxima potência de módulos fotovoltaicos. A técnica proposta realiza a medição em conjunto de duas grandezas não utilizadas anteriormente, a corrente de curto-circuito e a temperatura. A corrente de curto-circuito é utilizada para estimar o valor da irradiância e, conseqüentemente, seus efeitos. Emprega-se a leitura da temperatura para aumentar a exatidão do modelo, obtendo assim um rendimento elevado. A alta velocidade de rastreamento do ponto de operação, em diferentes condições de irradiância e temperatura, e a estabilidade em regime permanente, são características relevantes desta técnica. A análise dessas características será realizada por meio de simulações computacionais e resultados experimentais, comparando a técnica proposta com outras difundidas na literatura.

Abstract of Thesis presented to the Federal University of Itajubá as a partial requirement for the degree of Doctor in Electrical Engineering

LOW COMPLEXITY AND HIGH EFFICIENCY MPPT TECHNIQUE FOR PV MODULES

Eduardo Moreira Vicente

December, 2015

Advisor: Professor Robson Luiz Moreno, Dr.

Co-Advisor: Professor Enio Roberto Ribeiro, Dr.

Concentration area: Microelectronics.

Keywords: MPPT, temperature reading, irradiance estimation, I&T method.

Number of pages: 115.

ABSTRACT:

The use of renewable energies is a trend nowadays, even to reduce the environmental impact and due to the lack of other sources of energy. Among several renewable energy sources, one of the most promising is photovoltaic. However, the low conversion rate of commercial photovoltaic (PV) modules, which is about 18%, is one of the main drawbacks of its utilization. To ensure that the maximum available power is extracted from the PV modules, it is necessary the development of maximum power tracking systems. Therefore, this work presents a new proposal of a maximum power point tracking system for PV modules. The proposed technique performs the measurement of two variables that have never been used together, the short-circuit current and PV module temperature. The short-circuit current is used to estimate the irradiance level and, therefore, its effects. The temperature reading is used to increase the accuracy of the model, thereby obtaining a high efficiency. The high tracking factor, in different conditions of irradiance and temperature, as well as the stability in steady state condition, are the most interesting features of this technique. The analysis of these characteristics is performed by computer simulations and experimental results, comparing the proposed method with other well-known techniques.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Símbolos	xi
1. Introdução.....	1
1.1. Definição do problema.....	1
1.2. Motivação do trabalho	2
1.3. Organização da tese	4
2. Sistema de busca pelo ponto de máxima potência	5
2.1. Introdução	5
2.2. Célula, módulo e painel fotovoltaico	5
2.3. Ponto de máxima potência	9
2.4. Modelagem do módulo fotovoltaico.....	12
2.5. Conversor CC-CC <i>buck</i>	14
2.6. Técnicas de MPPT	16
2.6.1. Método da razão cíclica fixa	16
2.6.2. Método da tensão constante	17
2.6.3. Método do gradiente de temperatura	19
2.6.4. Método da tensão de circuito aberto	21
2.6.5. Método da corrente de curto-circuito.....	23
2.6.6. Método perturba e observa (P&O).....	25
2.6.7. Método da condutância incremental	27
2.6.8. Comparação entre os métodos de MPPT apresentados	30
2.7. Conclusão.....	31
3. Método I&T proposto.....	33
3.1. Introdução	33
3.2. Influência da temperatura	33
3.3. Influência da irradiância	34

3.4.	Modelagem matemática	36
3.5.	Implementação da técnica I&T	40
3.6.	Resultados	42
3.7.	Conclusão.....	43
4.	Resultados de simulação	44
4.1.	Introdução	44
4.2.	Variação da irradiância	44
4.3.	Variação da temperatura	51
4.4.	Variação da irradiância e da temperatura simultaneamente	57
4.5.	Rendimento dos métodos em regime permanente	62
4.6.	Conclusão.....	64
5.	Resultados experimentais	65
5.1.	Introdução	65
5.2.	Desenvolvimento da bancada de testes.....	65
5.2.1.	Construção do conversor CC-CC <i>buck</i>	65
5.2.2.	Circuitos de medição da tensão, corrente e temperatura do módulo	68
5.2.3.	Circuito de medição da corrente de curto-circuito.....	72
5.2.4.	Conexão dos circuitos	73
5.3.	Testes experimentais	74
5.3.1.	Comportamento estático	74
5.3.2.	Comportamento dinâmico.....	89
5.4.	Comparação entre os resultados de simulação e os experimentais.....	100
5.5.	Conclusão.....	105
6.	Conclusão Geral	106
7.	Apêndice.....	108
8.	Referências Bibliográficas	112

Lista de Figuras

Fig. 2.1 - Definição de célula, módulo e painel (adaptado de [16]).	6
Fig. 2.2 - Espectro da radiação solar e o comprimento de onda absorvido pela célula fotovoltaica (adaptado de [17]).	6
Fig. 2.3 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica.	7
Fig. 2.4 - Comportamento da corrente I_D obtido através de simulação.	9
Fig. 2.5 - Curva $I \times V$ do módulo fotovoltaico KS-10 da Kyocera® para STC.	10
Fig. 2.6 - Curva $I \times V$ do módulo KS-10 para variações de: (a) irradiância; (b) temperatura (adaptado de [20]).	11
Fig. 2.7 - Curva $P \times V$ do módulo KS-10 para variações de: (a) irradiância; (b) temperatura ...	12
Fig. 2.8 - Circuito desenvolvido no Matlab/Simulink® para representar o módulo KS-10.	13
Fig. 2.9 - Comparação da curva $I \times V$ obtida do <i>datasheet</i> e através da simulação.	14
Fig. 2.10 - Módulo fotovoltaico conectado ao conversor <i>buck</i> .	15
Fig. 2.11 - Fluxograma do método da razão cíclica fixa.	16
Fig. 2.12 - Diagrama de blocos do método da razão cíclica fixa.	16
Fig. 2.13 - Curva da potência para o método da razão cíclica fixa	17
Fig. 2.14 - Fluxograma do método da tensão constante.	17
Fig. 2.15 - Diagrama de blocos do método da tensão constante.	18
Fig. 2.16 - Curva da potência para o método da tensão constante	18
Fig. 2.17 - Variação da temperatura e irradiância em 20/09/2000, em Nagaoka, Japão, adaptado de [29].	19
Fig. 2.18 - Fluxograma do método do gradiente de temperatura.	20
Fig. 2.19 - Diagrama de blocos do método do gradiente de temperatura.	20
Fig. 2.20 - Curva da potência para o método do gradiente de temperatura.	20
Fig. 2.21 - Fluxograma do método da tensão de circuito aberto.	21
Fig. 2.22 - Diagrama de blocos do método da tensão de circuito aberto.	22
Fig. 2.23 - Curva da potência para o método da tensão de circuito aberto.	22
Fig. 2.24 - Fluxograma do método da corrente de curto-circuito.	23
Fig. 2.25 - Diagrama de blocos do método da corrente de curto-circuito.	24
Fig. 2.26 - Curva da potência para o método da corrente de curto-circuito	24
Fig. 2.27 - Curva da potência para o método da corrente de curto-circuito ($t = 250$ ms)	25

Fig. 2.28 - Fluxograma do método perturba e observa.....	25
Fig. 2.29 - Diagrama de blocos do método perturba e observa.....	26
Fig. 2.30 - Curva da potência para o método perturba e observa.....	26
Fig. 2.31 - Comportamento do método P&O em situações de rápida variação da irradiância.....	27
Fig. 2.32 - Curvas PxV e dP/dV do módulo KS-10.....	28
Fig. 2.33 - Fluxograma do método da condutância incremental.....	28
Fig. 2.34 - Diagrama de blocos do método da condutância incremental.....	29
Fig. 2.35 - Curva da potência para o método da condutância incremental.....	29
Fig. 2.36 - Rendimento das técnicas para a variação da irradiância de 1000 W/m ² para 500 W/m ²	30
Fig. 2.37 - Rendimento das técnicas para a variação de temperatura de 25 °C para 65 °C.....	31
Fig. 3.1 - Curva PxV para uma variação de temperatura de 25 °C a 70 °C.....	33
Fig. 3.2 - Curva IxV para uma variação de temperatura de 25 °C a 70 °C.....	34
Fig. 3.3 - Curva PxV para uma variação de irradiância de 1000 W/m ² a 100 W/m ²	35
Fig. 3.4 - Curva IxV para uma variação de irradiância de 1000 W/m ² a 100 W/m ²	36
Fig. 3.5 - Comparação das curvas IxV obtidas por meio das expressões (3.1) e (3.2).....	37
Fig. 3.6 - Método I&T proposto implementado no ambiente Matlab/Simulink®.....	40
Fig. 3.7 - Fluxograma do método I&T proposto.....	41
Fig. 3.8 - Diagrama de blocos do método I&T proposto.....	42
Fig. 3.9 - Curva da potência, para o método I&T proposto.....	42
Fig. 3.10 - Ondulação do ponto de operação.....	43
Fig. 4.1 - Perfis de variação da irradiância: (a) 1º perfil - 900 para 300 W/m ² , (b) 2º perfil - 300 para 900 W/m ² , (c) 3º perfil - 1000 para 400 W/m ² , (d) 4º perfil - 400 para 1000 W/m ² , (e) 5º perfil - 1000 para 200, retornando a 1000 W/m ²	45
Fig. 4.2 - Potência de saída para o primeiro perfil de variação da irradiância.....	46
Fig. 4.3 - Potência de saída para o segundo perfil de variação da irradiância.....	47
Fig. 4.4 - Potência de saída para o terceiro perfil de variação da irradiância.....	48
Fig. 4.5 - Potência de saída para o quarto perfil de variação da irradiância.....	48
Fig. 4.6 - Potência de saída para o quinto perfil de variação da irradiância.....	50
Fig. 4.7 - Comparação dos métodos para variações na irradiância.....	50
Fig. 4.8 - Perfis de variação da temperatura.....	51
Fig. 4.9 - Potência de saída para o primeiro perfil de variação da temperatura.....	52
Fig. 4.10 - Potência de saída para o segundo perfil de variação da temperatura.....	53

Fig. 4.11 - Potência de saída para o terceiro perfil de variação da temperatura.....	54
Fig. 4.12 - Potência de saída para o quarto perfil de variação da temperatura.....	55
Fig. 4.13 - Potência de saída para o quinto perfil de variação da temperatura.....	56
Fig. 4.14 - Comparativo da potência total durante a variação da temperatura.....	57
Fig. 4.15 - Perfis de variação simultânea da irradiância e temperatura.....	58
Fig. 4.16 - Potência de saída para o primeiro perfil de variação simultânea da irradiância e temperatura.....	59
Fig. 4.17 - Potência de saída para o segundo perfil de variação simultânea da irradiância e temperatura.....	60
Fig. 4.18 - Potência de saída para o terceiro perfil de variação simultânea da irradiância e temperatura.....	61
Fig. 4.19 - Comparativo da potência total durante a variação simultânea da irradiância e temperatura.....	61
Fig. 4.20 - Comparação do rendimento obtido para as oito técnicas em regime permanente..	62
Fig. 4.21 - Comportamento em regime permanente ($S = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$) das técnicas de MPPT.....	63
Fig. 5.1 - Diagrama esquemático do conversor <i>buck</i> com o circuito de acionamento do interruptor.....	66
Fig. 5.2 - Conversor <i>buck</i> desenvolvido.....	67
Fig. 5.3 - Curva $I \times V$ obtida através do conversor <i>buck</i> para a condição de $S = 1125 \text{ W/m}^2$ e $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$	67
Fig. 5.4 - Circuito para aquisição da tensão do módulo: (a) diagrama elétrico, (b) circuito implementado.....	68
Fig. 5.5 - Circuito de adequação do sinal de corrente: (a) diagrama elétrico, (b) circuito implementado.....	69
Fig. 5.6 - Circuito de condicionamento do sensor LM35.....	71
Fig. 5.7 - Leitura de temperatura obtida através dos sensores colocados junto ao módulo fotovoltaico.....	72
Fig. 5.8 - Circuito de medição da corrente de curto-circuito.....	72
Fig. 5.9 - Arranjo para a medição da corrente de saída e da corrente de curto-circuito.....	73
Fig. 5.10 - Bancada de testes utilizada nos ensaios.....	73
Fig. 5.11 - Material para modificação da irradiância: (a) tecido Voal, (b) TNT.....	75
Fig. 5.12 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 1.....	76

Fig. 5.13 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 2	78
Fig. 5.14 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 3	79
Fig. 5.15 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 4	81
Fig. 5.16 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 5	82
Fig. 5.17 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 6	84
Fig. 5.18 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 7	85
Fig. 5.19 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 8	86
Fig. 5.20 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 9	88
Fig. 5.21 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 10	89
Fig. 5.22 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 11	91
Fig. 5.23 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 12	93
Fig. 5.24 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 13	94
Fig. 5.25 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 14	95
Fig. 5.26 - Tensão, corrente e potência média das técnicas -15	97
Fig. 5.27 - Tensão, corrente e potência média das técnicas - 16	98
Fig. 5.28 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: - 17	99
Fig. 5.29 - Comparação da curva IxV dos sistemas real e simulado para diferentes condições de irradiância.	101
Fig. 5.30 - Comparação entre os resultados experimentais e de simulação para $S = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$	102
Fig. 5.31 - Comparação entre os resultados experimentais e de simulação para uma variação de $15 \text{ }^\circ\text{C}$ na temperatura.	104
Fig. 5.32 - Comparação entre os resultados experimentais e de simulação para uma variação de 50% na irradiância	105
Fig. 7.1 - Diagrama de blocos da razão cíclica fixa no Matlab/Simulink [®]	108
Fig. 7.2 - Diagrama de blocos da tensão constante no Matlab/Simulink [®]	108
Fig. 7.3 - Diagrama de blocos do gradiente de temperatura no Matlab/Simulink [®]	109
Fig. 7.4 - Diagrama de blocos da tensão de circuito aberto no Matlab/Simulink [®]	109
Fig. 7.5 - Diagrama de blocos da corrente de curto-circuito no Matlab/Simulink [®]	110
Fig. 7.6 - Diagrama de blocos do método P&O no Matlab/Simulink [®]	110
Fig. 7.7 - Diagrama de blocos da condutância incremental no Matlab/Simulink [®]	111

Lista de Símbolos

Símbolo	Significado
MPP	<i>Maximum Power Point</i> (ponto de máxima potência);
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i> (rastreamento do ponto de máxima potência);
STC	<i>Standard Test Condition</i> (condição padrão de teste);
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuits</i> (circuitos integrados de aplicação específica);
MIPS	Milhões de Instruções Por Segundo;
P&O	Perturba e Observa;
I	corrente de saída da célula;
I_{ph}	corrente fotogerada;
I_D	corrente de saturação reversa da célula;
I_{PV}	corrente do módulo fotovoltaico;
I_{SC}	corrente de curto-circuito;
I_{SCref}	corrente de curto-circuito de referência;
I_{MPP}	corrente de máxima potência;
$I_{MPP(STC)}$	corrente de máxima potência nas condições de teste;
I_{RT}	corrente reversa total;
V	tensão de saída da célula;
V_T	tensão térmica da junção PN;
V_{OC}	tensão de circuito aberto;
V_{OCref}	tensão de circuito aberto de referência;
V_{PV}	tensão do módulo fotovoltaico;
V_{MPP}	tensão de máxima potência;
$V_{MPP(STC)}$	tensão de máxima potência nas condições de teste;
R_S	resistência série da célula;
R_P	resistência paralela da célula;
q	carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C);
η	fator de qualidade da junção PN (entre 1 e 2);
k	constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
α	coeficiente de temperatura de I_{SC} ;
β	coeficiente de temperatura de V_{OC} ;
E_g	energia de banda proibida de um semicondutor (1,12 eV para o silício policristalino a 25 °C);
N_s	número de células em série que formam o módulo fotovoltaico;

T	temperatura;
T_1	temperatura atual;
T_0	temperatura anterior;
T_{ref}	temperatura de referência (298 K);
ΔT	variação da temperatura;
ΔI_{ref}	variação da corrente de referência;
S	irradiância;
S_{ref}	irradiância de referência (1000 W/m ²);
k_V	constante que relaciona a tensão de circuito aberto com a de máxima potência;
k_I	constante que relaciona a corrente de curto-circuito com a de máxima potência;
P_T	potência média total;
P_1	potência atual;
P_0	potência anterior;
P_{MPP}	potência no ponto de máxima potência;
D	razão cíclica do conversor;
Δd	incremento da razão cíclica;
d_1	razão cíclica atual;
d_0	razão cíclica anterior;
η	rendimento da técnica em relação à potência máxima;
$P_{técnica}$	potência de saída obtida com o uso da técnica;
P_{max}	potência máxima disponível;
C_{IN}	capacitor do filtro de entrada;
C_{OUT}	capacitor do filtro de saída;
L	indutor;
R	resistor;
f_s	frequência de comutação;
T_s	período de comutação;
S_W	interruptor do conversor buck;
D_1	diodo ultrarrápido do conversor buck.

Capítulo 1

1. Introdução

1.1. Definição do problema

O aproveitamento da energia solar fotovoltaica é uma realidade nos dias atuais, sobretudo devido à sua plena disponibilidade, sendo que a superfície terrestre recebe, em média, cerca de 63 TW diariamente, provenientes do Sol [1]. Além disso, há a possibilidade de geração de energia em lugares remotos em virtude da independência do sistema de geração.

Um grande desafio dos sistemas fotovoltaicos comerciais é a baixa eficiência dos módulos fotovoltaicos (em torno de 13% a 18% para módulos de silício policristalino) em função de sua tecnologia de desenvolvimento e do custo elevado de materiais que possuem uma melhor capacidade de converter a energia luminosa em energia elétrica, como o arseneto de gálio e índio, que possui um rendimento da ordem de 35% [2].

Para a utilização dos módulos fotovoltaicos como fonte de energia, é necessário criar artifícios que permitam o aproveitamento máximo de toda energia disponível nos módulos. Entretanto, em diversos momentos, o módulo fotovoltaico não consegue fornecer a sua máxima potência em função de inúmeros fatores, como a variação da temperatura, irradiância ou até mesmo alteração da carga conectada ao sistema.

Para solucionar esse problema, foram desenvolvidos os circuitos rastreadores do ponto de máxima potência que, através de algumas premissas, são capazes de estimar o ponto em que a potência gerada pelo módulo é máxima. Os sistemas de rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) conseguem maximizar a energia extraída do módulo fotovoltaico.

Sistemas de MPPT modificam as características de corrente e tensão do módulo fotovoltaico, fazendo-o operar em seu respectivo ponto de máxima potência (*Maximum Power Point* - MPP). Existem diversas técnicas de MPPT na literatura [3] – [7], exigindo cautela e conhecimento do projetista, antes de decidir pelo método mais adequado.

1.2. Motivação do trabalho

As técnicas de MPPT [3] – [7], diferem em alguns aspectos, sendo classificadas em: técnicas *online* e técnicas *offline*, técnicas de perturbação do ponto de operação, métodos de inteligência artificial e sistemas baseados ou não em modelos matemáticos [8].

Técnicas *online* necessitam de amostras contínuas das variáveis do sistema, como: valores da tensão de saída, corrente de saída, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, irradiância, temperatura, etc. Essas amostras são utilizadas para atualizar as medidas realizadas anteriormente, juntamente com o sistema de controle e o MPP. As estratégias que utilizam esse tipo de amostragem são a técnica do gradiente de temperatura, técnica da tensão de circuito aberto e a técnica da corrente de curto-circuito.

Os métodos *offline* são mais simples, pois não necessitam de amostras atuais das variáveis do sistema. Os pontos de operação são pré-definidos para situações específicas, baseado no comportamento do sistema em eventos anteriores como, por exemplo: dados anuais de incidência solar ou informações sobre a temperatura média ao longo de um determinado dia do ano [9]. Exemplos de métodos *offline* são: o método da razão cíclica fixa e o da melhor tensão fixa [9]. Apesar de interessante, esse tipo de abordagem causa erros na busca pelo MPP, tendo em vista que um evento ocorrido anteriormente não irá, necessariamente, repetir-se no mesmo período de tempo subsequente.

As técnicas que empregam a perturbação do ponto de operação como variável de decisão na busca pelo MPP (modificando a razão cíclica do conversor CC-CC ou a tensão da saída do módulo), como a técnica perturba e observa (P&O) e da condutância incremental, podem ser utilizadas sem a necessidade de se conhecer os parâmetros do módulo conectado ao sistema. Esses fatores trazem versatilidade a essas técnicas de MPPT e simplificam sua implementação. Entretanto, a constante modificação do ponto de operação impede que o sistema estabilize-se no MPP.

Outra alternativa para determinar o MPP é utilizar a inteligência artificial em técnicas de MPPT. Esses sistemas empregam modelos matemáticos complexos e que exigem elevados esforços computacionais para determinar com exatidão as características da curva corrente/tensão do módulo fotovoltaico e, conseqüentemente, o ponto de máxima potência. Existem inúmeras implementações dessas técnicas, dentre as quais estão a técnica das redes cognitivas fuzzy [10]. Apesar de ser desejável atingir o MPP, o uso de sistemas complexos se justifica apenas em aplicações de maior valor agregado.

Finalmente, os sistemas baseados em modelos necessitam de parâmetros do módulo fotovoltaico, como suas resistências internas e os valores de corrente e tensão de máxima potência para a condição padrão de teste (*Standard Test Condition* - STC) para estimar o MPP. A principal vantagem desse tipo de técnica, como o método de controle ciclo a ciclo [11], é o alto rendimento obtido, tendo em vista a correta modelagem das variáveis do módulo fotovoltaico. Em contrapartida, as técnicas que não utilizam modelos, como as técnicas da correlação de ondulação [12] e da maximização de I e V [13], obtém o MPP somente através das medições das variáveis de saída do módulo fotovoltaico, podendo ser utilizadas sem o conhecimento dos parâmetros internos do módulo.

Em suma, devem-se realizar escolhas entre eficiência e complexidade diante das diversas técnicas de MPPT existentes. Sistemas com baixa complexidade, em geral, possuem desempenho inferior a sistemas de alta complexidade, ou seja, quanto menor a complexidade, menor o desempenho e vice-versa.

Tendo como premissa a análise das características apresentadas e de diversas técnicas de MPPT [3] – [13], propõe-se uma nova técnica de busca pelo ponto de máxima potência capaz de perceber as variações de corrente e tensão do ponto de máxima potência, com o objetivo de ser, ao mesmo tempo, eficiente, simples e de baixo custo.

É apresentado nesta tese o controle de um módulo fotovoltaico através de uma nova metodologia de MPPT, envolvendo o uso conjunto de duas medidas não utilizadas anteriormente, a medição da temperatura e a estimação da irradiância (através da leitura da corrente de curto-circuito). A técnica de MPPT desenvolvida será implementada, utilizando um conversor CC-CC *buck*, e comparada com outras abordagens existentes através de resultados computacionais e experimentais, comprovando ser capaz de obter um alto rendimento mediante variações de irradiância e/ou temperatura.

Após obter a comprovação do método proposto utilizando um microcontrolador, o sistema será implementado em um circuito integrado de aplicação específica (*Application Specific Integrated Circuits* - ASIC). Porém, esta etapa do projeto será realizada em um futuro trabalho de doutoramento, por meio dos resultados gerados a partir dessa tese. Deve-se ressaltar que a implementação de técnicas de MPPT em circuitos integrados é uma tendência atual [14], tendo em vista as inúmeras possibilidades e a flexibilidade do projetista no desenvolvimento do circuito.

1.3. Organização da tese

O trabalho é organizado com o intuito de apresentar as características principais envolvidas na busca pelo ponto de máxima potência, evidenciando os pontos mais importantes. A organização dos capítulos é realizada da seguinte forma:

Capítulo 2 - Este capítulo apresenta o sistema como um todo, desde a definição do efeito fotovoltaico, passando pela caracterização da célula fotovoltaica, conversor CC-CC, modelagem computacional e culmina na revisão das técnicas mais difundidas na literatura, comparando-as por meio de simulações computacionais.

Capítulo 3 - Desenvolve-se a técnica proposta nesse trabalho, mostrando as características da curva corrente/tensão do módulo fotovoltaico que influenciam na busca pelo ponto de máxima potência, assim como os efeitos na modelagem matemática do módulo. Ao final, realiza-se uma análise computacional da resposta do método às variações de irradiância e temperatura.

Capítulo 4 - A comparação entre os resultados dos métodos apresentados na literatura e do método proposto são realizadas nesse capítulo através de simulações computacionais. Os testes avaliam diferentes perfis de variação de irradiância e temperatura, resposta dinâmica (comportamento do módulo a variações na condição de operação) e em regime permanente (comportamento do módulo em condições estáveis de irradiância e temperatura), com o intuito de verificar o desempenho das técnicas de MPPT diante de diferentes situações.

Capítulo 5 - A bancada de testes desenvolvida e os resultados experimentais são apresentados nesse capítulo. Os parâmetros definidos na construção do conversor CC-CC *buck* e a resposta das técnicas de MPPT e do método proposto são avaliados. A análise de situações de irradiância e temperatura constantes e testes de variações dessas grandezas são exploradas ao longo do capítulo. Finalmente, os resultados de simulação e experimentais são comparados a fim de evidenciar as semelhanças e diferenças entre as implementações.

Capítulo 6 - Esse capítulo traz a conclusão geral do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

2. Sistema de busca pelo ponto de máxima potência

2.1. Introdução

O ponto de máxima potência, ou MPP, é o ponto no qual o produto da corrente e da tensão em um módulo fotovoltaico é máximo, garantindo que a maior quantidade de potência seja transferida para a carga. Logo, a busca pelo MPP é um aspecto extremamente importante diante do elevado custo do kWh gerado por sistemas fotovoltaicos.

A corrente e tensão de saída do módulo se alteram de forma não linear em virtude da carga que é conectada aos seus terminais. A característica $I \times V$ do módulo se comporta de forma análoga a uma fonte de corrente antes de atingir o MPP, mas se aproxima de uma fonte de tensão após o MPP [15].

Tendo em vista essas características, é indispensável utilizar rastreadores de máxima potência para garantir que o MPP seja mantido, mesmo após a modificação das condições de temperatura e irradiância. São mostrados ao longo desse capítulo alguns desses métodos de busca pelo ponto de máxima potência encontrados na literatura.

2.2. Célula, módulo e painel fotovoltaico

A célula fotovoltaica é a menor unidade do sistema fotovoltaico. Um conjunto de células é denominado módulo e, por sua vez, um conjunto de módulos é nomeado painel ou arranjo [16]. Para facilitar o entendimento desses termos tem-se, na Fig. 2.1, uma ilustração que exemplifica essa classificação. Ao longo de todo o texto, será utilizada essa nomenclatura.

A forma como as células são associadas em um módulo, em série e/ou em paralelo, é responsável pelas características de corrente e tensão do mesmo. A associação dos módulos em um painel, de forma equivalente, tem por objetivo atender a um determinado perfil de corrente e tensão.

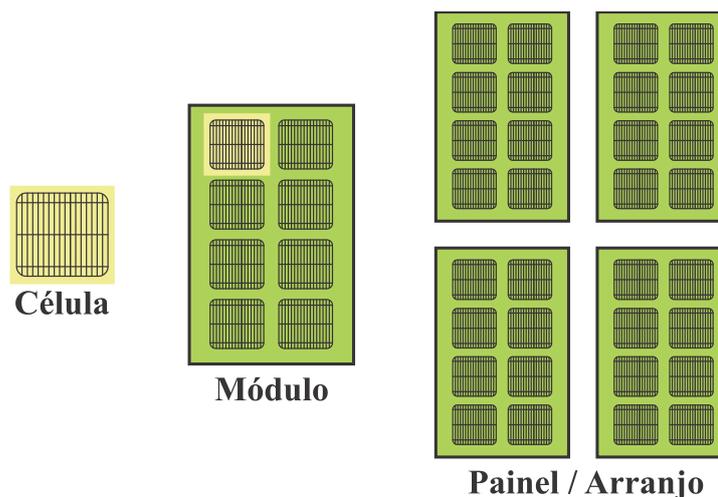


Fig. 2.1 - Definição de célula, módulo e painel (adaptado de [16]).

O princípio de funcionamento da célula fotovoltaica é baseado no princípio de funcionamento dos materiais semicondutores, haja vista que uma célula fotovoltaica é, essencialmente, uma junção de materiais semicondutores dos tipos P e N. Ou seja, ocorre a circulação de corrente do material semicondutor P para o material semicondutor N a partir do momento em que a junção é polarizada corretamente. A polarização de uma célula fotovoltaica se dá no momento em que a junção PN, composta de materiais semicondutores sensíveis à luz, é exposta à radiação solar, fazendo com que ocorra o fluxo de portadores majoritários, originando assim a corrente fotogerada I_{ph} .

A célula fotovoltaica é polarizada de acordo com o comprimento de onda que atinge a mesma. O comprimento de onda do espectro da radiação solar, que produz energia numa célula fotovoltaica de silício, está concentrado entre 300 nm e 1100 nm, como mostrado na Fig. 2.2 [17]. O espectro que está fora desse intervalo não produz energia e é, sobretudo, convertido em calor [18].

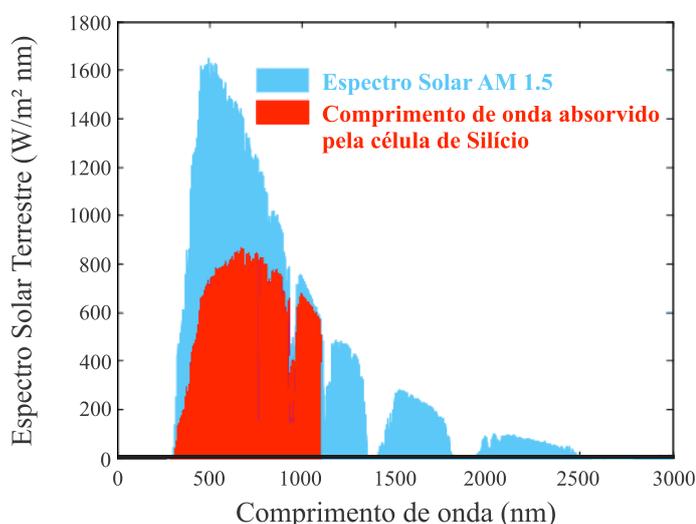


Fig. 2.2 - Espectro da radiação solar e o comprimento de onda absorvido pela célula fotovoltaica (adaptado de [17]).

O circuito equivalente que traduz o efeito fotovoltaico de uma célula e, consequentemente, de um módulo [15] é visto na Fig. 2.3.

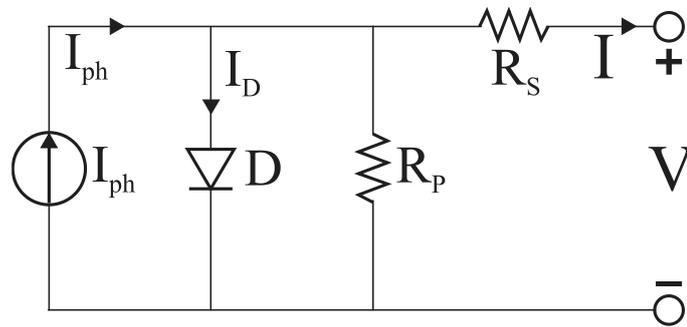


Fig. 2.3 - Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

- em que:
- I_{ph} - corrente fotogerada (A);
 - I_D - corrente de saturação reversa da célula (A);
 - I - corrente de saída da célula (A);
 - V - tensão de saída da célula (V);
 - R_S - resistência série da célula (Ω);
 - R_P - resistência paralela da célula (Ω).

A corrente fotogerada I_{ph} é a corrente gerada internamente pela célula fotovoltaica. Essa corrente se divide em outras duas correntes, uma que flui em direção aos terminais da célula (que posteriormente irá se dividir entre a corrente que passa por R_P e a corrente de saída I) e outra que circula através da junção PN, a corrente I_D , que é o resultado do fluxo dos portadores minoritários nos materiais semicondutores. As resistências série R_S e paralelo R_P representam os diversos elementos conectados aos terminais do módulo e o efeito da corrente de fuga na junção PN.

Utilizando a modelagem característica da corrente em uma junção PN [19] e considerando os efeitos supracitados, pode-se representar a corrente de saída da célula I , dada por (2.1), que também pode ser utilizada na caracterização da corrente de saída do módulo [15].

$$I = I_{ph} - I_D \cdot \left(e^{q \frac{V + I \cdot R_S}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \quad (2.1)$$

- em que:
- q - carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19}$ C);
 - η - fator de qualidade da junção PN (entre 1 e 2);
 - k - constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K);
 - T - temperatura medida (K).

Os dois últimos termos de (2.1) representam as perdas pela corrente de saturação reversa da junção PN e as perdas relativas às resistências R_S e R_P . A corrente fotogerada pode ser melhor representada através de (2.2), em que é possível observar sua dependência com os níveis de irradiância e temperatura [15].

$$I_{ph} = \left[I_{SC_{ref}} + \alpha(T - T_{ref}) \right] \cdot \frac{S}{S_{ref}} \quad (2.2)$$

em que: $I_{SC_{ref}}$ - corrente de curto-circuito de referência (A);

α - coeficiente de temperatura de I_{SC} (A/K);

T_{ref} - temperatura de referência (298 K);

S - irradiância medida (W/m²);

S_{ref} - irradiância de referência (1000 W/m²).

Observa-se a partir de (2.2) que a corrente fotogerada é linearmente dependente da irradiância, sofrendo uma modificação proporcional à razão entre a irradiância medida e a irradiância de referência. Por outro lado, a temperatura influencia em menor proporção o valor da corrente I_{ph} , tendo em vista a magnitude do coeficiente α , que incrementa minimamente o valor da corrente com o aumento da temperatura além do seu valor de referência.

A corrente de saturação reversa I_D também pode ser escrita em função das grandezas que a influenciam [15], como mostrado em (2.3).

$$I_D = \left[\frac{I_{SC_{ref}}}{e^{\left(\frac{V_{OC_{ref}}}{q \cdot \eta \cdot k \cdot T} \right)} - 1} \right] \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q E_g}{\eta \cdot k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (2.3)$$

em que: $V_{OC_{ref}}$ - tensão de circuito aberto de referência (V);

E_g - energia de banda proibida de um semiconductor (1,12 eV para o silício policristalino a 25 °C).

O valor da corrente I_D é influenciado por parâmetros intrínsecos da célula, como a tensão de circuito aberto e a corrente de curto-circuito, além do valor da temperatura à qual a célula está submetida [15]. Como observado através de (2.3), a corrente de saturação reversa não é influenciada diretamente pela irradiância. Nos gráficos da Fig. 2.4 são apresentadas as curvas de I_D para variações da temperatura e da irradiância, evidenciando o efeito predominante da temperatura.

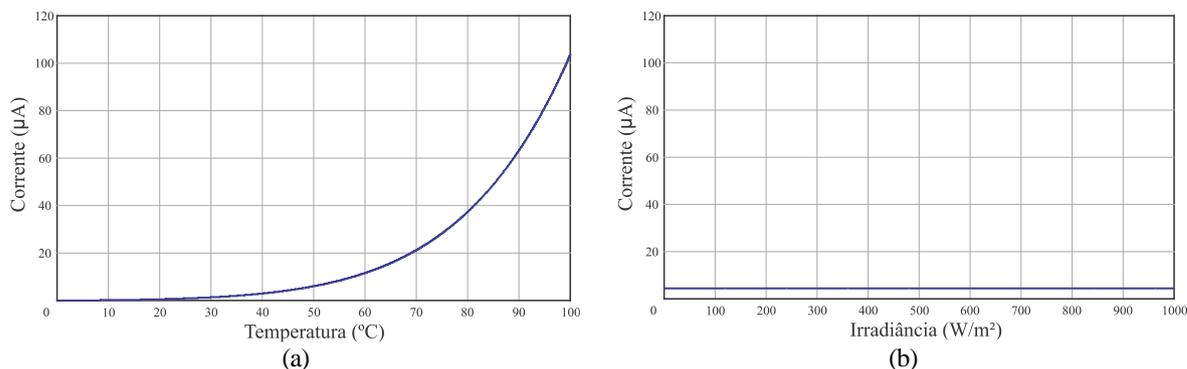


Fig. 2.4 - Comportamento da corrente I_D obtido através de simulação com a variação de: (a) temperatura de 0 °C a 100 °C; (b) irradiância de 0 W/m² a 1000 W/m².

Além da influência direta da temperatura e/ou da irradiância nas equações (2.1), (2.2) e (2.3), algumas grandezas, como a tensão térmica V_T e a energia de banda proibida E_g , são modificadas de maneira indireta por esses parâmetros, dificultando a modelagem do módulo fotovoltaico e a obtenção do seu ponto de máxima potência.

2.3. Ponto de máxima potência

Os módulos fotovoltaicos possuem um ponto característico em que o produto entre as variáveis corrente e tensão é máximo, que corresponde ao ponto de máxima potência. Devido ao baixo rendimento inerente aos módulos fotovoltaicos, é desejável que o ponto de operação do módulo seja mantido na máxima potência, independente das condições climáticas, para que isso não acarrete uma diminuição na potência gerada pelo módulo.

Entretanto, a modelagem de todas as características do módulo apresenta uma grande complexidade em função da corrente de saída ser dependente de inúmeros fatores, como visto na equação (2.1). Além disso, a não linearidade de alguns parâmetros em função da variação de temperatura e da irradiância torna ainda mais complexa essa tarefa.

Com o intuito de simplificar a análise do módulo fotovoltaico, tem-se na Fig. 2.5 a curva $I \times V$ de um módulo fotovoltaico (modelo KS-10 [20], fabricado pela Kyocera[®]), para a situação de teste padrão (STC).

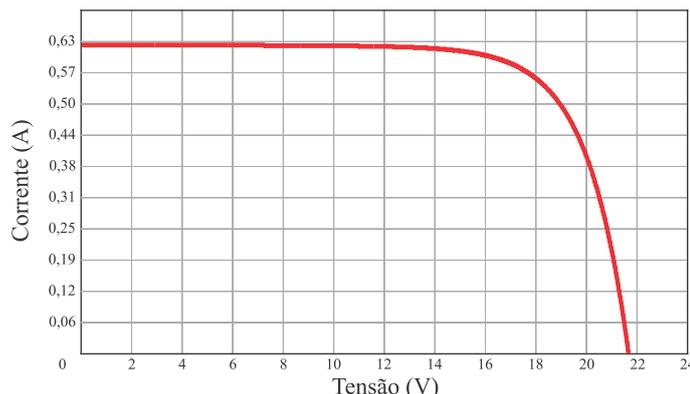


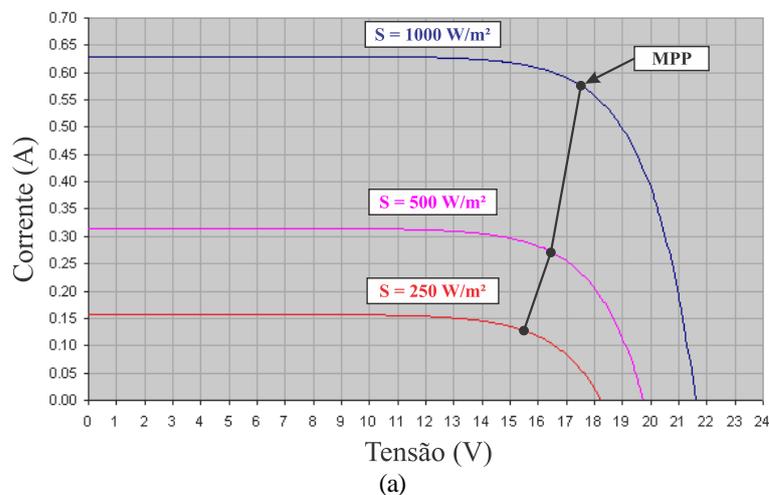
Fig. 2.5 - Curva $I \times V$ do módulo fotovoltaico KS-10 da Kyocera® para STC.

A curva $I \times V$ da Fig. 2.5 é a representação gráfica de (2.1), plotada em função dos dados do módulo KS-10 mostrados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Dados do módulo fotovoltaico KS-10 da Kyocera®.

Símbolo	Parâmetro	Valor
P_{MPP}	Potência Máxima	10 W
V_{MPP}	Tensão de Máxima Potência	17,4 V
I_{MPP}	Corrente de Máxima Potência	0,58 A
V_{OC}	Tensão de Circuito aberto	21,7 V
I_{SC}	Corrente de Curto-circuito	0,62 A
R_S	Resistência Série	1,72 Ω
R_P	Resistência Paralelo	28 k Ω
N_S	Número de células série do módulo	36
α	Coefficiente de temperatura de I_{SC}	0,27 mA/K
β	Coefficiente de temperatura de V_{OC}	-82,40 mV/K

Para compreender a influência da variação da temperatura e da irradiância nas características do módulo fotovoltaico, na Fig. 2.6 são apresentadas as curvas $I \times V$ obtidas a partir do *datasheet* (ou folha de dados) do módulo KS-10 [20].



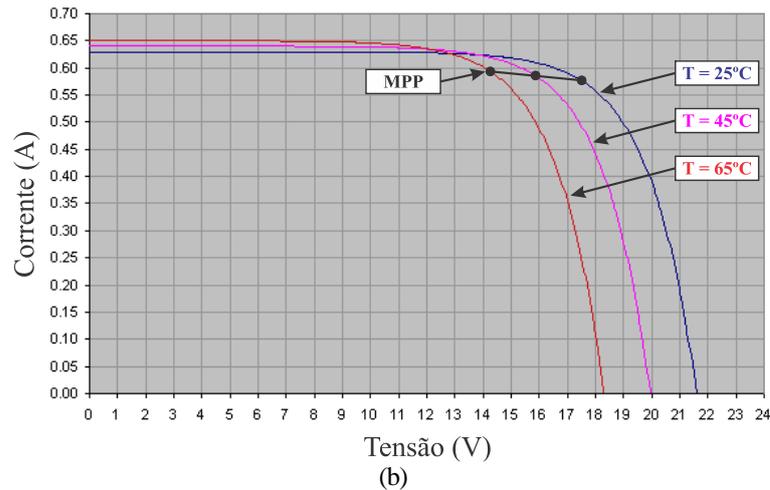
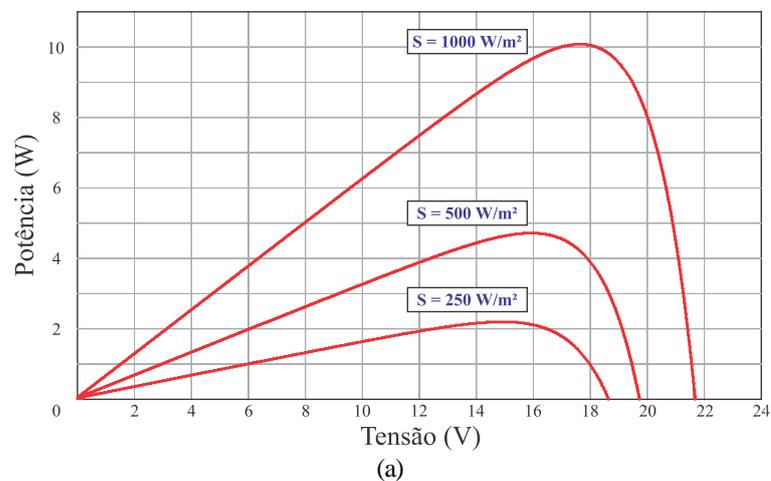


Fig. 2.6 - Curva $I \times V$ do módulo KS-10 para variações de: (a) irradiância; (b) temperatura (adaptado de [20]).

Na análise da Fig. 2.6a verifica-se que, ao reduzir a irradiância incidente no módulo, a tensão de máxima potência sofre uma variação de 11,40% em relação à situação de 1000 W/m^2 . Em contrapartida, a corrente tem uma resposta aproximadamente linear à diminuição da irradiância, fazendo com que a potência seja menor quanto menor for a irradiância incidente no módulo.

Por meio do gráfico da Fig. 2.6b pode-se observar que, com a variação da temperatura, a corrente de máxima potência modifica-se minimamente, variando de 0,573 A a 0,578 A. Entretanto, a tensão de máxima potência é reduzida em maior proporção à medida que a temperatura se eleva, ou seja, menor será a potência total que o módulo produz.

Para facilitar a visualização desses efeitos sobre a potência, são apresentados os gráficos que relacionam a potência do módulo com a tensão, $P \times V$, na Fig. 2.7, deixando clara a relação existente entre a potência de saída e as variações de irradiância e temperatura.



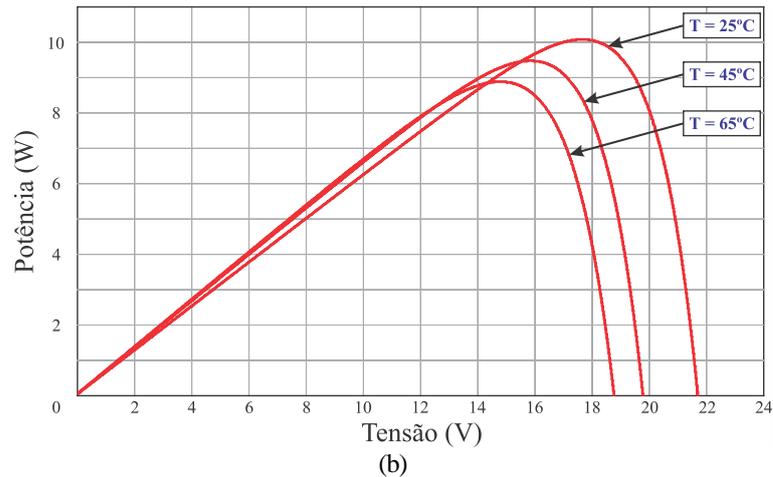


Fig. 2.7 - Curva $P \times V$ do módulo KS-10 para variações de: (a) irradiância; (b) temperatura.

As não linearidades características da curva $I \times V$, juntamente com os efeitos da irradiância e da temperatura sobre a mesma, dificultam a obtenção de um modelo que retrate com fidelidade o comportamento de um módulo fotovoltaico. Porém, desconsiderando-se a variação da energia de banda proibida E_g , é possível obter um modelo matemático que se aproxime do comportamento real do módulo fotovoltaico, como é mostrado a seguir.

2.4. Modelagem do módulo fotovoltaico

Antes de iniciar a análise dos métodos de MPPT, é necessário modelar o módulo fotovoltaico em um ambiente computacional, que permita reproduzir as condições encontradas em um sistema real e que o possa traduzir da forma mais fiel possível. Para isso, utilizou-se o ambiente Matlab/Simulink[®], que é amplamente empregado em sistemas fotovoltaicos e permite o ajuste e configuração de diversos parâmetros.

No início, desenvolveu-se o modelo baseado em (2.1), em que a corrente de saída é um produto da corrente fotogerada descontadas as perdas por corrente de saturação reversa e das resistências R_S e R_P . O sistema desenvolvido, baseado no equacionamento da Seção 2.2 e em [15], pode ser visto na Fig. 2.8. Apesar dos diferentes modelos de caracterização do módulo fotovoltaico presentes na literatura [15] e [21], os resultados obtidos através desses modelos, independente do *software* utilizado, são praticamente idênticos.

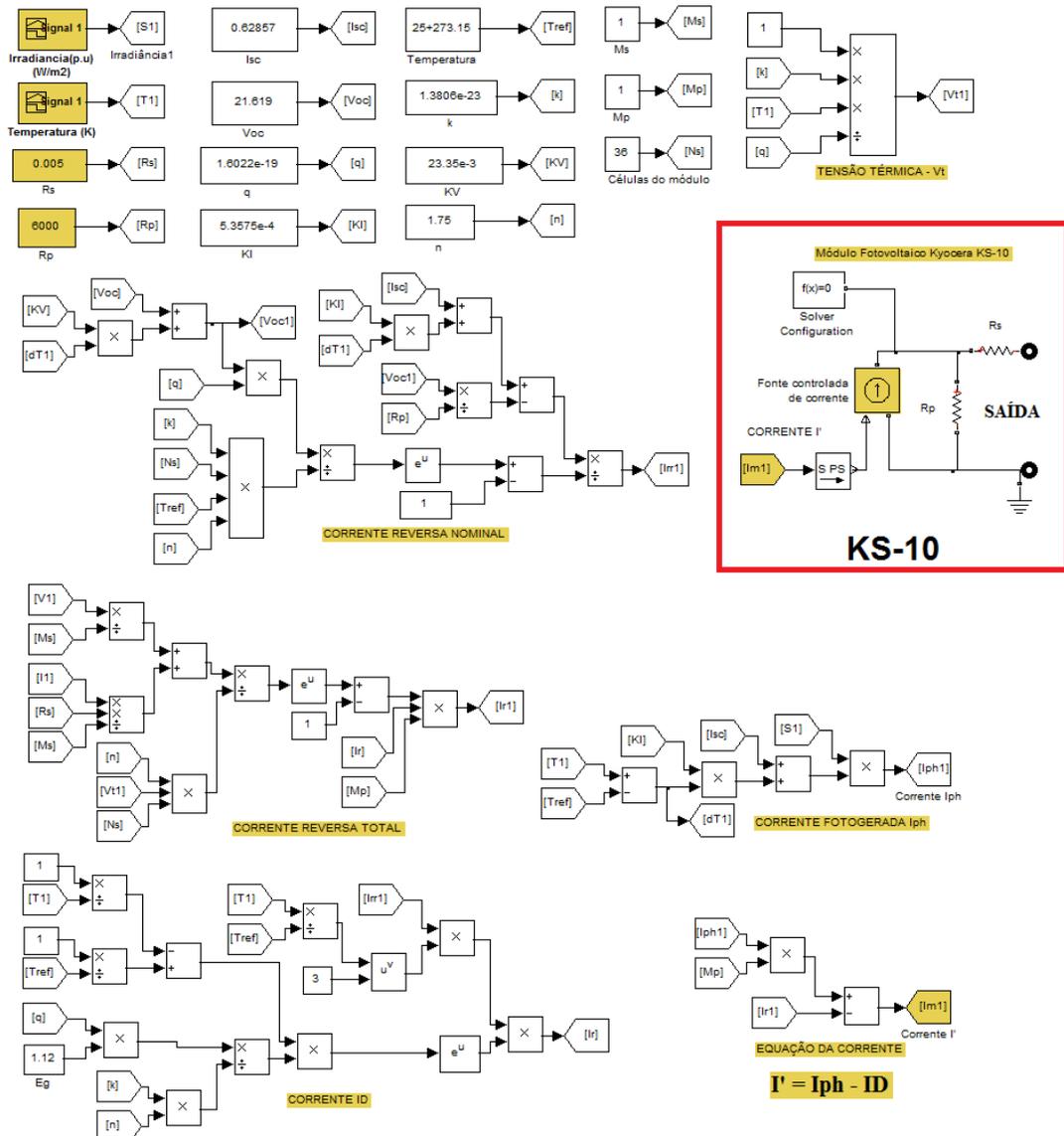


Fig. 2.8 - Circuito desenvolvido no Matlab/Simulink® para representar o módulo KS-10.

A partir do circuito da Fig. 2.8, os parâmetros foram ajustados para reproduzir com fidelidade as características do módulo KS-10, utilizando os dados da Tabela 2.1, bem como as informações do *datasheet*. Tem-se na Fig. 2.9 uma comparação entre os valores da curva $I \times V$ obtidos na simulação e os valores do *datasheet* [20].

Observa-se, através da Fig. 2.9a, que os valores obtidos durante a simulação aproximam-se dos pontos do *datasheet*, divergindo apenas para a curva de 250 W/m² a partir da tensão de 14 V. Situação semelhante ocorre para a Fig. 2.9b, em que os valores para as situações de 45 °C e 65 °C sofrem uma pequena divergência em relação ao valor do *datasheet*. Isto se deve, sobretudo, às não linearidades de algumas grandezas com a variação da temperatura, como a tensão térmica $V_T = N_s k T / q$ e a energia de banda proibida E_g [15].

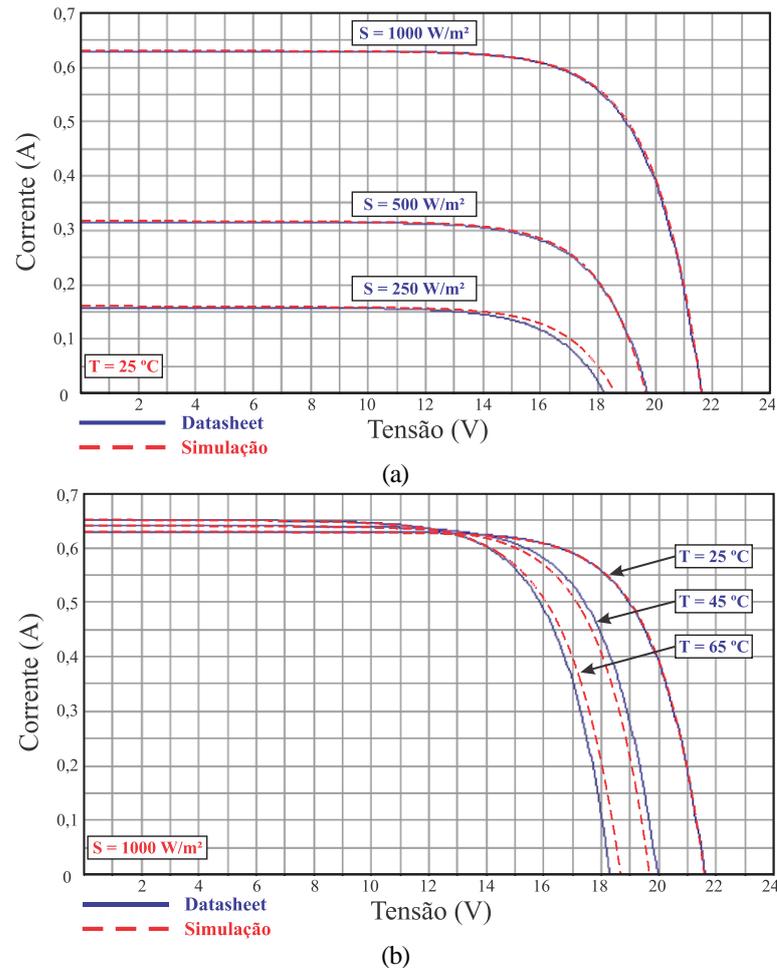


Fig. 2.9 - Comparação da curva $I \times V$ obtida do *datasheet* e através da simulação, para uma variação de: (a) irradiância; (b) temperatura. Adaptado de [20].

2.5. Conversor CC-CC *buck*

Para que os sistemas de MPPT possam extrair a máxima potência do módulo fotovoltaico é necessário modificar o valor da carga conectada aos seus terminais. Um conversor CC-CC pode ser utilizado entre a carga e o módulo fotovoltaico, no intuito de variar a impedância vista pelo módulo.

Existem diversos estudos [16], [22] sobre qual o melhor tipo de conversor a se utilizar, sendo que cada um possui vantagens e desvantagens inerentes. Para o sistema desenvolvido, optou-se por utilizar um conversor CC-CC do tipo *buck* ou abaixador, devido à sua estrutura simples e à facilidade de construção. Além disso, as características desse conversor são mais adequadas aos níveis de irradiância e temperatura avaliados no estudo [16].

Utilizando o equacionamento visto em [23] e tendo como referência a potência de saída do módulo KS-10, os parâmetros do conversor mostrados na Tabela 2.2 foram obtidos. Alguns

valores foram adaptados em virtude da disponibilidade comercial dos dispositivos. A frequência de comutação foi definida em 31 kHz em função de limitações do microcontrolador que será utilizado na implementação prática, como será apresentado mais adiante.

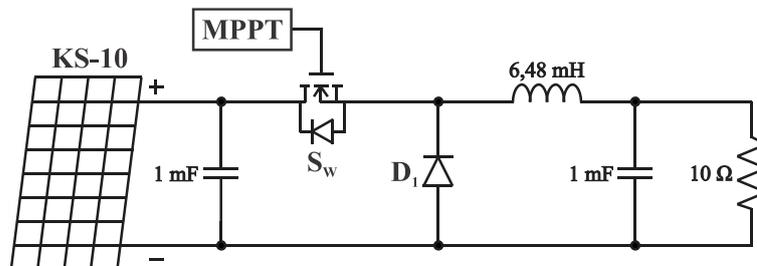
Tabela 2.2 - Especificações do conversor *buck* utilizado.

Símbolo	Componente	Especificação
P	Potência	10 W
C _{IN}	Capacitor do filtro de entrada	1 mF
C _{OUT}	Capacitor do filtro de saída	1 mF
L	Indutor	6,48 mH
R	Resistor	10 Ω
f _s	Frequência de comutação	31 kHz
ΔI	Ondulação de corrente no indutor	1 %
ΔV	Ondulação de tensão no capacitor	1 %
D ₁	Diodo ultrarrápido	--
S _w	Interruptor MOSFET	--

A definição do valor da resistência que deve ser conectada à carga pode ser obtida de diferentes formas, como observado em [24] – [26]. Entretanto, a análise de [26] mostra-se mais coerente, pois leva em consideração o valor da corrente e tensão de máxima potência para a situação padrão de teste (STC). Dessa forma, a máxima transferência de potência é garantida, permitindo que o módulo opere em seu MPP. A definição da resistência a ser conectada ao conversor é obtida através de (2.4).

$$R < \frac{V_{MPP}}{I_{MPP}} \quad (2.4)$$

Por meio de (2.4), o valor máximo para R é de 28,5 Ω, porém, para permitir que o ponto de máxima potência seja obtido através das diferentes técnicas de MPPT, o valor escolhido foi de 10 Ω, tendo em vista os níveis de irradiância e temperatura avaliados durante os ensaios. O circuito que mostra o conversor *buck* especificado, conectado ao módulo KS-10, é visto na Fig. 2.10.

Fig. 2.10 - Módulo fotovoltaico conectado ao conversor *buck*.

As técnicas de MPPT irão modificar a forma como o interruptor S_w é acionado, em função do sistema de controle utilizado. Na próxima seção são apresentadas as técnicas mais comuns empregadas em sistemas de MPPT.

2.6. Técnicas de MPPT

2.6.1. Método da razão cíclica fixa

O objetivo principal de um sistema de MPPT é fazer com que o módulo fotovoltaico produza sempre o máximo de potência possível para um dado instante. No método da razão cíclica fixa [3], o sistema de controle atua de forma a manter constante o tempo de condução do conversor, no valor que produza na saída do módulo a tensão de máxima potência para a situação padrão de teste ($S = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$). O fluxograma do método é mostrado na Fig. 2.11.

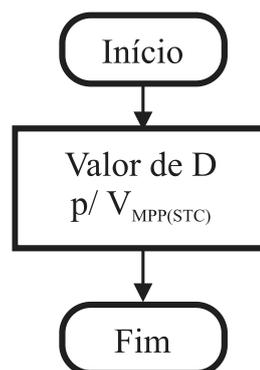


Fig. 2.11 - Fluxograma do método da razão cíclica fixa.

Esse método funciona em malha aberta, sem que haja realimentação de corrente ou tensão para corrigir as alterações no ponto de operação do módulo, como mostra a Fig. 2.12. O valor da razão cíclica que garante que $V_{MPP(STC)}$ seja obtido quando o módulo estiver operando na STC, é mantido independente das condições de irradiância e temperatura do módulo.

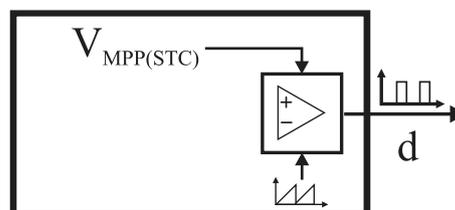


Fig. 2.12 - Diagrama de blocos do método da razão cíclica fixa.

Para analisar a resposta dinâmica das técnicas de MPPT, o modelo apresentado na Fig. 2.8, em conjunto com o conversor da Fig. 2.10, foram utilizados na implementação das técnicas. Na Fig. 2.13 tem-se a potência de saída do módulo fotovoltaico quando ocorrem variações de

irradiância e temperatura. É destacada em cada gráfico a potência média total P_T (obtida através do cálculo dos valores do gráfico, entre 0 e 600 ms) de cada variação.

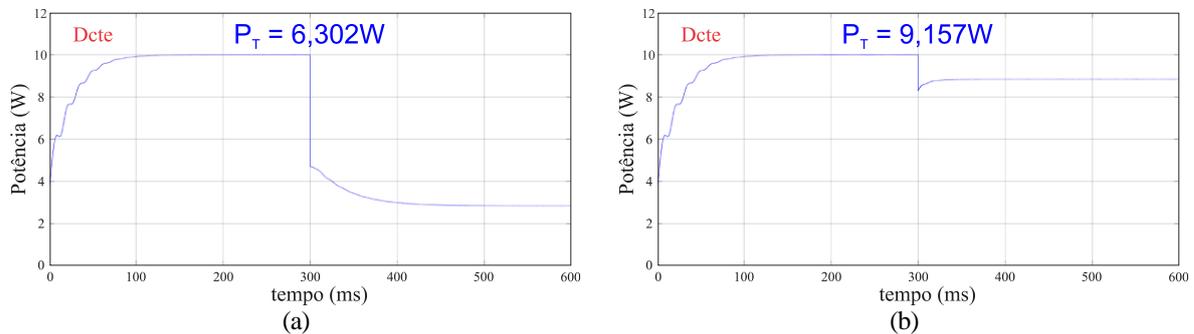


Fig. 2.13 - Curva da potência para o método da razão cíclica fixa, em função da variação de: (a) irradiância (de 1000 W/m² para 500 W/m²); (b) temperatura (de 25 °C para 65 °C).

Na Fig. 2.13a, a irradiância foi alterada de 1000 W/m² para 500 W/m², sendo a temperatura mantida constante em 25 °C. Na Fig. 2.13b, a temperatura variou de 25 °C para 65 °C, mantendo-se a irradiância constante em 1000 W/m². Ambas modificações foram realizadas no instante de 300 ms. A potência máxima, em cada uma das situações, foi de 7,401 W e 9,494 W, respectivamente.

Com a variação da irradiância e da temperatura, e a consequente modificação dos parâmetros do módulo, a potência de saída média é inferior ao valor máximo, sobretudo em função da ausência de sensores para monitoramento das variáveis.

2.6.2. Método da tensão constante

A busca pelo MPP nesse sistema, que possui uma estrutura simplificada, baseia-se na modificação da razão cíclica para a obtenção da tensão de máxima potência sob condições de teste [27]. Em outras palavras, a tensão no ponto de máxima potência na STC é o parâmetro de referência do sistema, sendo mantida para qualquer outra situação de irradiância ou temperatura. O fluxograma desse método é mostrado na Fig. 2.14.

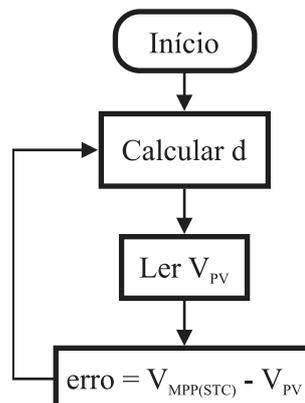


Fig. 2.14 - Fluxograma do método da tensão constante.

Esse tipo de sistema é interessante, pois utiliza um sensor de baixo custo no monitoramento da tensão de saída, como um divisor resistivo, permitindo o aumento da potência de saída quando comparado com a técnica da razão cíclica fixa, sobretudo em situações de baixa irradiância. O diagrama de blocos do método da tensão constante é visto na Fig. 2.15.

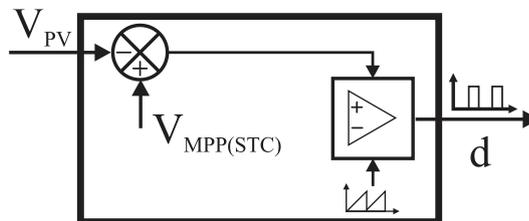


Fig. 2.15 - Diagrama de blocos do método da tensão constante.

Esse método apresenta resposta satisfatória em sistemas nos quais a temperatura se mantém próxima à de STC. Como observado na Seção 2.3, a variação da temperatura causa maior impacto sobre a tensão de máxima potência, tornando esse método mais sensível a esse tipo de variação. Na Fig. 2.16 tem-se a resposta do sistema às mesmas variações mostradas na Seção 2.6.1, sendo que a irradiância varia de 1000 W/m² para 500 W/m² e a temperatura aumenta de 25 °C a 65 °C.

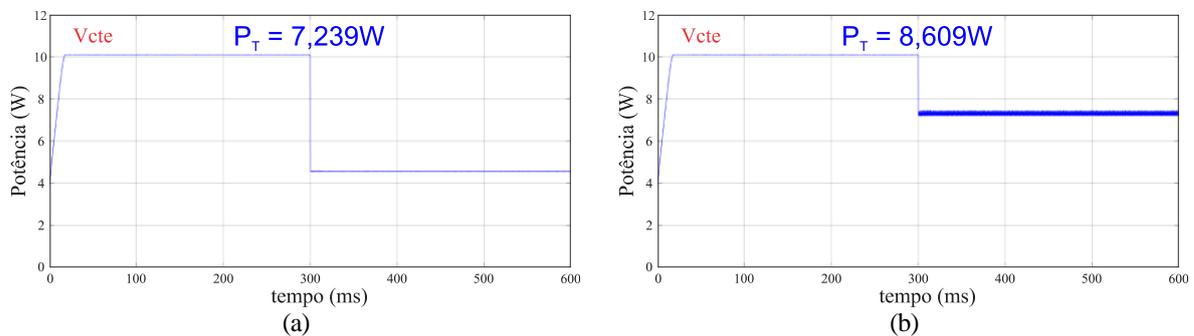


Fig. 2.16 - Curva da potência para o método da tensão constante, em função da variação de: (a) irradiância (de 1000 W/m² para 500 W/m²); (b) temperatura (de 25 °C para 65 °C).

Observa-se que, para a mudança na irradiância da Fig. 2.16a, a potência de saída do sistema se mostra estável após o instante de 300 ms, em que ocorre a modificação do nível de irradiância. Durante a variação de temperatura da Fig. 2.16b, a potência de saída sofreu uma queda acentuada, em virtude da oscilação do ponto de operação.

A principal deficiência desse método é a manutenção da tensão de saída considerando apenas os dados do fabricante do módulo fotovoltaico para estabelecer os limites do sistema, sem perceber as variações de irradiância e temperatura. O rendimento dessa técnica é ligeiramente superior ao método da razão cíclica fixa devido à leitura da tensão de saída para definição da razão cíclica do conversor.

2.6.3. Método do gradiente de temperatura

O método do gradiente de temperatura [28] difere em relação ao anterior por levar em consideração, na busca pelo ponto de máxima potência, a leitura do valor da temperatura. Como observado na Fig. 2.16b, o aumento da temperatura causa uma diminuição na potência do sistema, sobretudo em função da redução da tensão de máxima potência.

A leitura da temperatura é um parâmetro importante na análise do funcionamento dos sistemas fotovoltaicos, tendo em vista que, em situações práticas, a mesma acompanha as modificações da irradiância, como se observa na Fig. 2.17 [29].

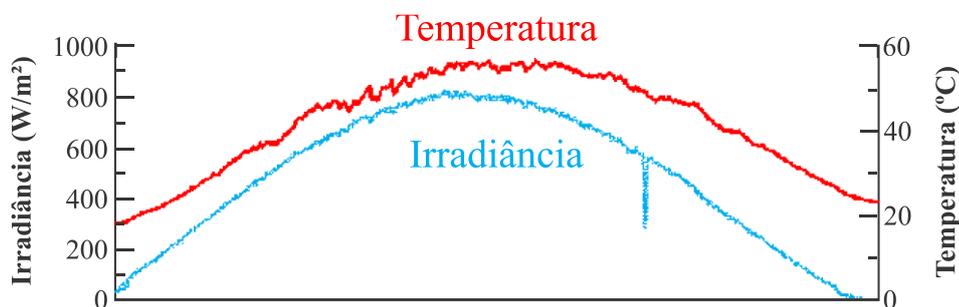


Fig. 2.17 - Variação da temperatura e irradiância em 20/09/2000, em Nagaoka, Japão, adaptado de [29].

Isto implica que não considerar a leitura dessa grandeza no sistema de controle irá acarretar a diminuição de sua potência máxima, tendo em vista que, com a variação da temperatura, a tensão de máxima potência também se altera. Para calcular o novo valor da tensão de máxima potência, utiliza-se a seguinte relação:

$$V_{MPP} = V_{MPP(STC)} + \beta(T_{ref} - T) \quad (2.5)$$

em que: $V_{MPP(STC)}$ - tensão de máxima potência nas condições de teste.

O fluxograma do método do gradiente de temperatura é visto na Fig. 2.18. Após a inicialização do sistema e cálculo dos parâmetros iniciais, a temperatura do módulo é medida e a tensão de máxima potência é corrigida conforme a variação da temperatura. O diagrama de blocos da Fig. 2.19 permite compreender melhor o funcionamento do sistema de controle do método.

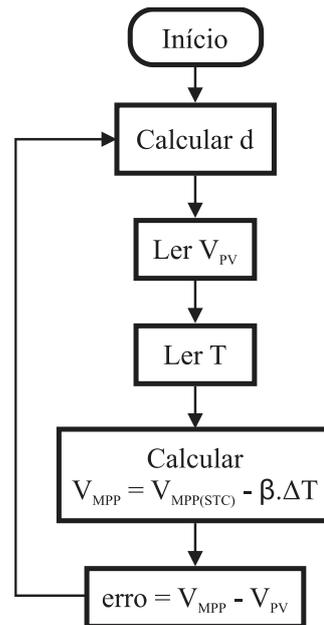


Fig. 2.18 - Fluxograma do método do gradiente de temperatura.

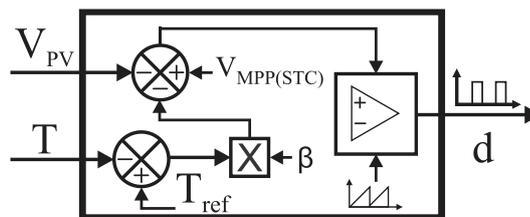


Fig. 2.19 - Diagrama de blocos do método do gradiente de temperatura.

Os resultados da potência de saída para variações de temperatura e irradiância são apresentados na Fig. 2.20.

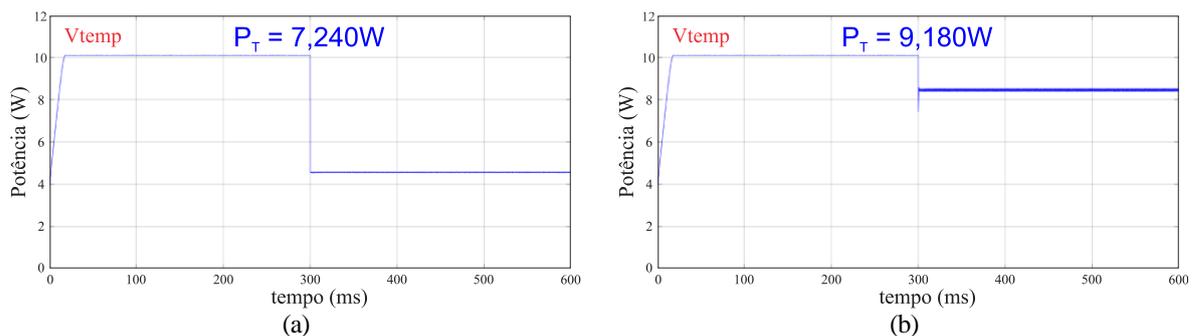


Fig. 2.20 - Curva da potência para o método do gradiente de temperatura, em função da variação de: (a) irradiância (de 1000 W/m² para 500 W/m²); (b) temperatura (de 25 °C para 65 °C).

Comparando-se os resultados da Fig. 2.20b com aqueles obtidos na Fig. 2.16b, observa-se a vantagem da leitura da temperatura, que permitiu o aumento da potência em 6,63% para a condição de variação dessa grandeza.

2.6.4. Método da tensão de circuito aberto

Uma abordagem simples, mas que possui um rendimento satisfatório, considerando-se a menor quantidade de sensores e o custo reduzido de implementação, é o método da tensão de circuito aberto [30] e [31]. Essa técnica consiste em amostrar a tensão de circuito aberto do módulo, utilizando-a como parâmetro de controle do sistema. A tensão V_{OC} é comparada com a tensão de saída do módulo através de um fator k_V , obtendo assim o ponto de máxima potência. A relação existente é dada por (2.6).

$$V_{MPP} = k_V \cdot V_{OC} \quad (2.6)$$

em que: k_V - constante que relaciona a tensão de circuito aberto com a de máxima potência.

O fluxograma desse método é ilustrado na Fig. 2.21. Essencialmente, o sistema funciona por meio da leitura dos valores da tensão de circuito aberto e da tensão de saída. A partir disso, calcula-se o erro entre a tensão de saída do módulo e a tensão de referência, obtido pela expressão (2.6).

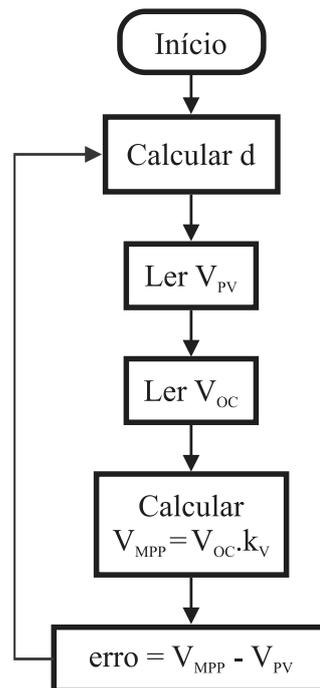


Fig. 2.21 - Fluxograma do método da tensão de circuito aberto.

Apesar da tensão de circuito aberto possuir uma boa relação com as variações de irradiância e temperatura [32], um dos pontos negativos dessa técnica é a necessidade de abertura do circuito para o monitoramento da tensão V_{OC} . Durante o intervalo de tempo em que o circuito está aberto para medição da tensão, não é entregue potência à carga, pois o módulo está desconectado do conversor. No trabalho visto em [30], o autor utiliza uma célula piloto, cujos

parâmetros são idênticos ao do módulo conectado ao sistema, sendo utilizada somente para extrair o valor da tensão de circuito aberto. Essa é uma alternativa interessante, mas o módulo utilizado na amostragem não produz potência, diminuindo o rendimento final do conjunto.

Além dos aspectos supracitados é importante destacar que o fator k_V é diferente para cada tipo de módulo. Seu valor usual é da ordem de 0,76 [31]. Entretanto, segundo a literatura, o mesmo pode variar de 0,7 a 0,8, sendo que essa relação não é linear ao longo de toda a faixa de irradiância. A Tabela 2.3 apresenta a relação entre V_{OC} e V_{MPP} , do módulo KS-10, para diferentes valores de irradiância, obtidos através da simulação.

Tabela 2.3 - Valores de k_V para diferentes níveis de irradiância ($T = 25\text{ }^\circ\text{C}$).

Irradiância (W/m^2)	V_{OC} (V)	V_{MPP} (V)	k_V
1000	21,627	17,616	0,814
900	21,456	16,752	0,780
800	21,264	16,584	0,779
700	21,047	16,392	0,778
600	20,795	16,176	0,777
500	20,498	15,912	0,776
400	20,133	15,576	0,773
300	19,661	15,168	0,771
200	18,992	14,568	0,767
100	17,833	13,536	0,759

O diagrama de blocos do sistema de controle é apresentado na Fig. 2.22.

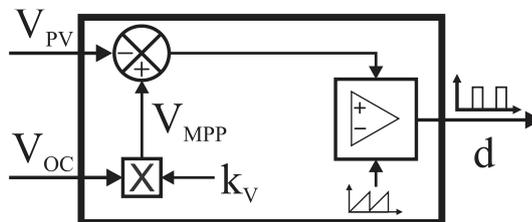


Fig. 2.22 - Diagrama de blocos do método da tensão de circuito aberto.

Para analisar a resposta dinâmica do método, foram realizadas variações nos níveis de irradiância e temperatura, que podem ser visualizadas na Fig. 2.23. Utilizou-se o valor de $k_V = 0,777$, obtido através da média dos valores da Tabela 2.3.

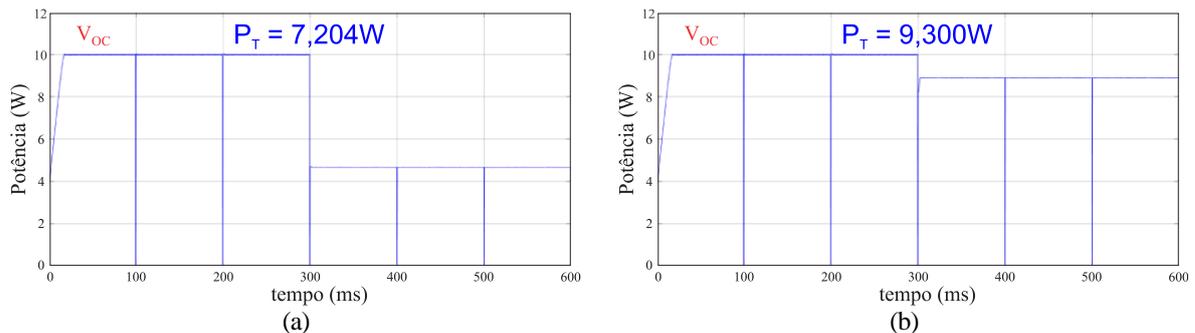


Fig. 2.23 - Curva da potência para o método da tensão de circuito aberto, em função da variação de: (a) irradiância (de $1000\text{ W}/\text{m}^2$ para $500\text{ W}/\text{m}^2$); (b) temperatura (de $25\text{ }^\circ\text{C}$ para $65\text{ }^\circ\text{C}$).

O circuito foi projetado para realizar aberturas de medição a cada 100 ms [31], estando o interruptor aberto para medição da tensão V_{OC} durante $0,5 \mu\text{s}$, que corresponde a 1,5% do período de comutação ($T_s = 32 \mu\text{s}$). Desconsiderando o tempo de abertura do sistema, o rendimento total para os ensaios de variação de temperatura e irradiância chegaria a cerca de 97,82%. Entretanto, devido às perdas durante o tempo de abertura do interruptor, o rendimento aproximado é de 97,33%. Além disso, existem alguns problemas inerentes à esse tipo de sistema de amostragem, pois o ponto de operação é atualizado somente quando o interruptor é aberto, fazendo com que o sistema opere em um ponto de menor potência quando os parâmetros se modificam entre os períodos de amostragem.

2.6.5. Método da corrente de curto-circuito

A técnica da corrente de curto-circuito é semelhante à técnica da tensão de circuito aberto, porém, o parâmetro de controle é a corrente de saída do módulo [29]. Nesse método, a corrente de curto-circuito é monitorada e, da mesma forma que na técnica anterior, utilizando-se uma constante chamada k_I , relaciona-se a corrente de saída com a corrente de máxima potência. A equação (2.7) mostra essa relação.

$$I_{MPP} = k_I \cdot I_{SC} \quad (2.7)$$

em que: k_I - constante que relaciona a corrente de curto-circuito com a de máxima potência.

Pode-se observar o fluxograma dessa técnica na Fig. 2.24. Basicamente, o circuito funciona através da amostragem da corrente de curto-circuito e cálculo da corrente de máxima potência através da constante k_I , comparando-se o erro obtido para atuação do sistema de controle.

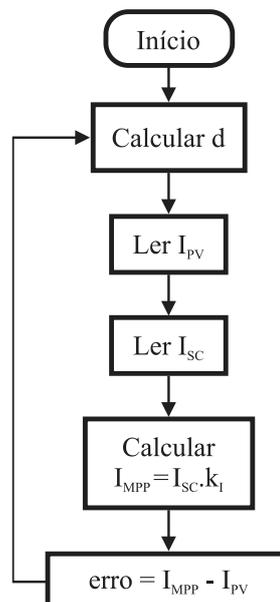


Fig. 2.24 - Fluxograma do método da corrente de curto-circuito.

A relação entre a irradiância e a corrente de curto-circuito é praticamente linear, permitindo o monitoramento indireto dessa grandeza [29]. O principal ponto negativo dessa técnica está na abertura do circuito para medição, além da necessidade do fechamento de um segundo interruptor para curto-circuitar o módulo e medir o valor de I_{SC} . O monitoramento desse parâmetro, realizado a cada 100 ms, de forma análoga ao método da tensão de circuito aberto, impõe um limite ao rendimento dessa técnica de MPPT. O diagrama de blocos da técnica é visto na Fig. 2.25.

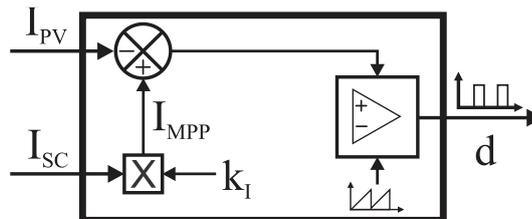


Fig. 2.25 - Diagrama de blocos do método da corrente de curto-circuito.

Em nível de comparação, têm-se na Fig. 2.26 os resultados para variações de irradiância e temperatura. Utilizou-se $k_I = 0,9125$, sendo esse valor obtido através da relação entre $I_{MPP(STC)}$ e I_{SCref} do circuito simulado.

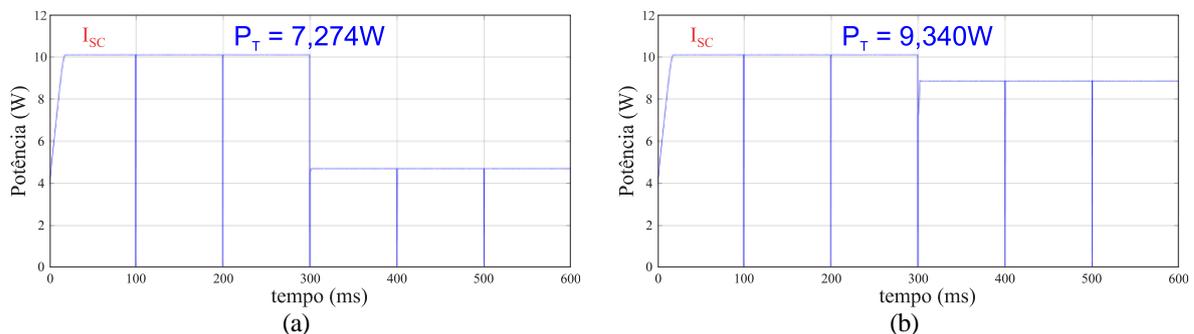


Fig. 2.26 - Curva da potência para o método da corrente de curto-circuito, em função da variação de: (a) irradiância (de 1000 W/m² para 500 W/m²); (b) temperatura (de 25 °C para 65 °C).

O rendimento do sistema é de 98,28%, incluindo o tempo de abertura do interruptor. Apesar do valor de rendimento expressivo, 0,49% foi perdido durante o tempo de amostragem. Como o sistema é baseado em amostras periódicas, ocorrendo alterações no ponto de operação entre as amostragens, o conversor continuará operando no “ponto anterior”. Essa situação é exemplificada na Fig. 2.27 sendo que, nas duas situações, as variações de irradiância e temperatura ocorrem no instante de 250 ms.

Apesar da modificação do ponto de operação ter ocorrido no instante de 250 ms, o sistema manteve o ponto de operação anterior, que havia sido obtido em 200 ms. Somente com a nova amostra da corrente I_{SC} obtida em 300 ms, o sistema convergiu para o ponto de máxima potência definido pela relação (2.7). Sob essas condições, o rendimento do sistema é de 96,32%.

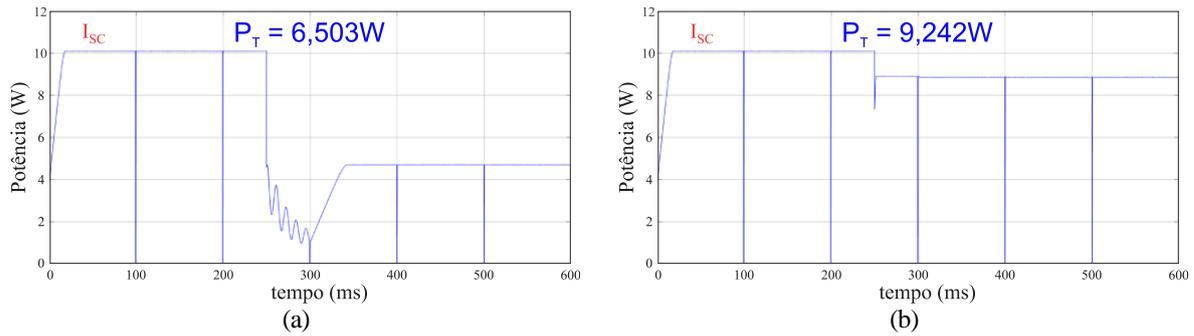


Fig. 2.27 - Curva da potência para o método da corrente de curto-circuito, em função da variação, no instante 250 ms, de: (a) irradiância (de 1000 W/m² para 500 W/m²); (b) temperatura (de 25 °C para 65 °C).

2.6.6. Método perturba e observa (P&O)

O método perturba e observa, também chamado de P&O, é um método iterativo baseado na modificação do ponto de operação (através da alteração da tensão de saída ou da razão cíclica do conversor) e observação do efeito resultante na potência de saída do módulo [33]. Caso a potência de saída atual P_1 seja maior do que a potência de saída anterior P_0 , a modificação da razão cíclica deve ser mantida no mesmo sentido. Caso P_1 seja menor do que P_0 , o sistema deve alterar o sentido de modificação da razão cíclica. A relação mostrada em (2.8) exemplifica o funcionamento dessa técnica, cujo fluxograma é apresentado na Fig. 2.28.

$$\begin{aligned}
 P_1 > P_0 &- \text{modifica } d \text{ na mesma direção} \\
 P_1 < P_0 &- \text{modifica } d \text{ na direção oposta}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

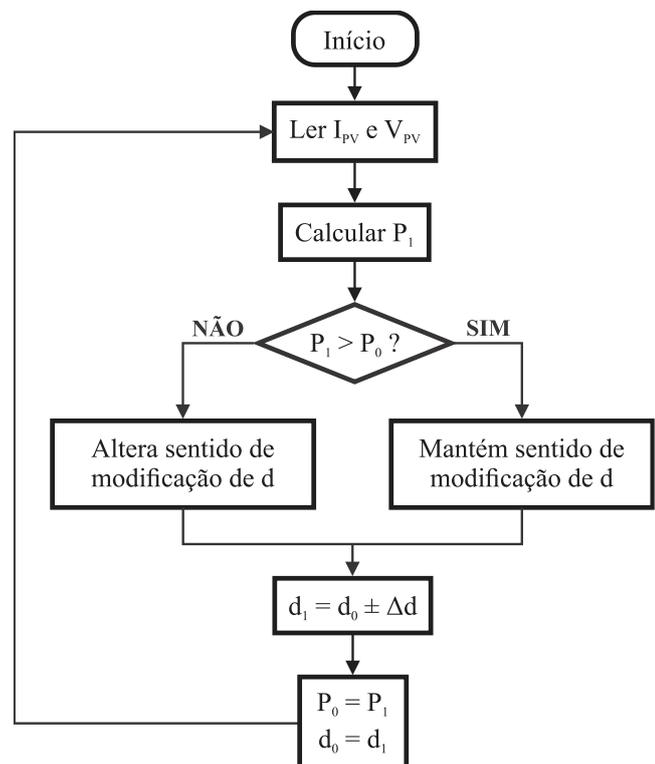


Fig. 2.28 - Fluxograma do método perturba e observa.

Como indicado no fluxograma, o cálculo periódico da potência do módulo é um dos pontos negativos dessa técnica, pois exige a multiplicação das amostras de corrente e tensão do módulo o que, conseqüentemente, demanda o uso de um dispositivo de controle com maior capacidade computacional. Outro parâmetro de destaque é o incremento Δd , que é responsável pela velocidade de convergência do sistema de controle, assim como a oscilação da potência em regime permanente. Quanto maior o valor de Δd , mais rápido o sistema irá convergir para o ponto de máxima potência, mas haverá uma maior oscilação em regime permanente e vice-versa. O diagrama de blocos do método é visto na Fig. 2.29.

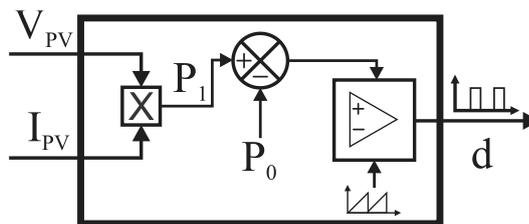


Fig. 2.29 - Diagrama de blocos do método perturba e observa.

A necessidade de amostragem da corrente e tensão aumenta o número de sensores utilizados, quando comparado com as técnicas que realizam a amostragem de apenas uma variável. O desempenho do sistema mediante variações de irradiância e temperatura pode ser avaliado através da Fig. 2.30.

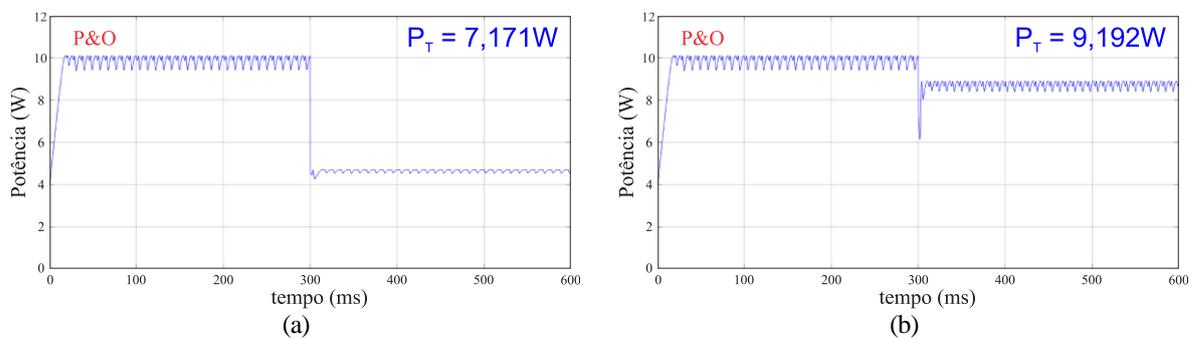


Fig. 2.30 - Curva da potência para o método perturba e observa, em função da variação de: (a) irradiância (de 1000 W/m² para 500 W/m²); (b) temperatura (de 25 °C para 65 °C).

Mesmo com um rendimento satisfatório, essa técnica exige cautela na sua utilização. Em situações nas quais a irradiância varia de forma abrupta, como visto no gráfico da Fig. 2.31, o sistema pode convergir para pontos de operação que não são os pontos de máxima potência [16], indicados através da sequência.

Na Fig. 2.31 são apresentadas três curvas de potência para diferentes valores de irradiância. Adotando como condição inicial o módulo operando no ponto A, considere que durante a variação da razão cíclica, a irradiância seja modificada para a condição 2, fazendo com que o novo ponto de operação seja o ponto B. Em seguida, ocorre a mesma situação,

aumento da irradiância durante a variação da razão cíclica, e o ponto C é o novo ponto de operação. Tomando como exemplo que a razão cíclica foi reduzida durante a modificação do ponto de operação nas duas situações, o sistema de controle irá assumir que a nova modificação necessária é um decremento da razão cíclica, pois, de acordo com a última modificação, essa condição fez a potência de saída aumentar. Entretanto, isso fará com que o sistema se distancie do MPP. Caso a irradiância continue variando, o que normalmente ocorre em dias nublados, o sistema de controle não conseguirá alcançar o MPP para essa condição.

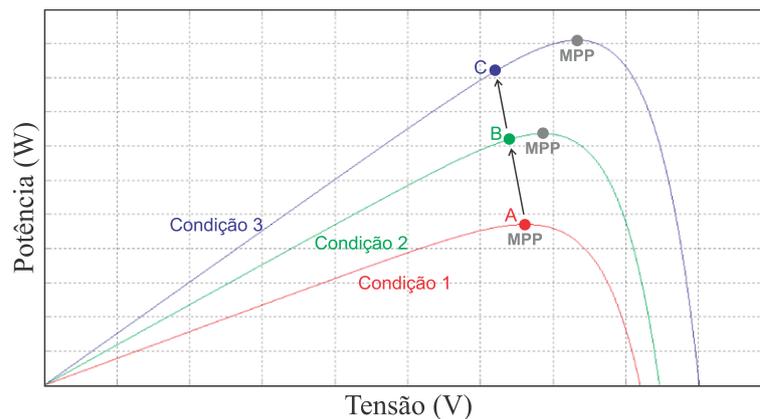


Fig. 2.31 - Comportamento do método P&O em situações de rápida variação da irradiância.

Além do que foi citado anteriormente, a escolha pelo incremento adequado na razão cíclica Δd e da frequência entre as amostragens, impacta na resposta do sistema, tanto na análise em regime permanente quanto na resposta dinâmica. Quanto maior for o valor de Δd , mais rapidamente o sistema alcançará o MPP, porém, maior será a oscilação em regime permanente. O mesmo acontece com a frequência de amostragem, que irá alterar a oscilação em torno do MPP. Essas características são abordadas posteriormente, sendo figuras de mérito dessa técnica.

2.6.7. Método da condutância incremental

Ainda tratando de métodos iterativos, tem-se o método da condutância incremental. Nessa técnica, também ocorre a modificação da razão cíclica para a descoberta do ponto de máxima potência. Porém, ao invés de observar o valor da potência de saída, esse método analisa a variação da potência em relação à variação da tensão do módulo [16], [34], baseado na Fig. 2.32.

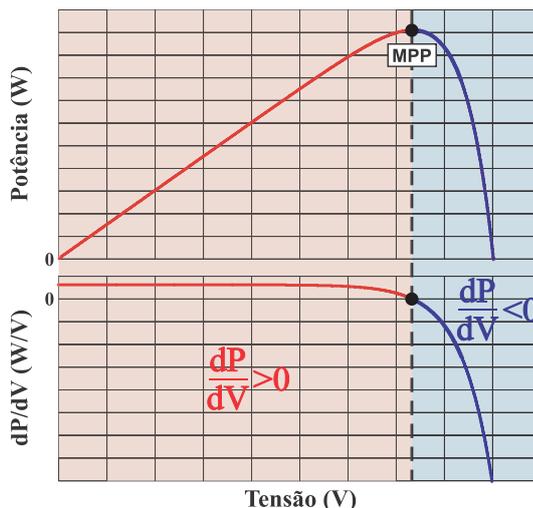


Fig. 2.32 - Curvas $P \times V$ e dP/dV do módulo KS-10.

A derivada da potência em relação à tensão somente terá valor nulo quando o módulo estiver operando no MPP. Quando o valor de dP/dV for menor que zero, o ponto de operação estará à direita do MPP. Quando a derivada for maior que zero, estará à esquerda do MPP. Essa análise simplifica a obtenção do sentido de modificação da razão cíclica. Todavia, o cálculo da derivada da potência exige um alto esforço computacional. Na Fig. 2.33, tem-se o fluxograma do método, que permite visualizar como o processo de decisão é realizado.

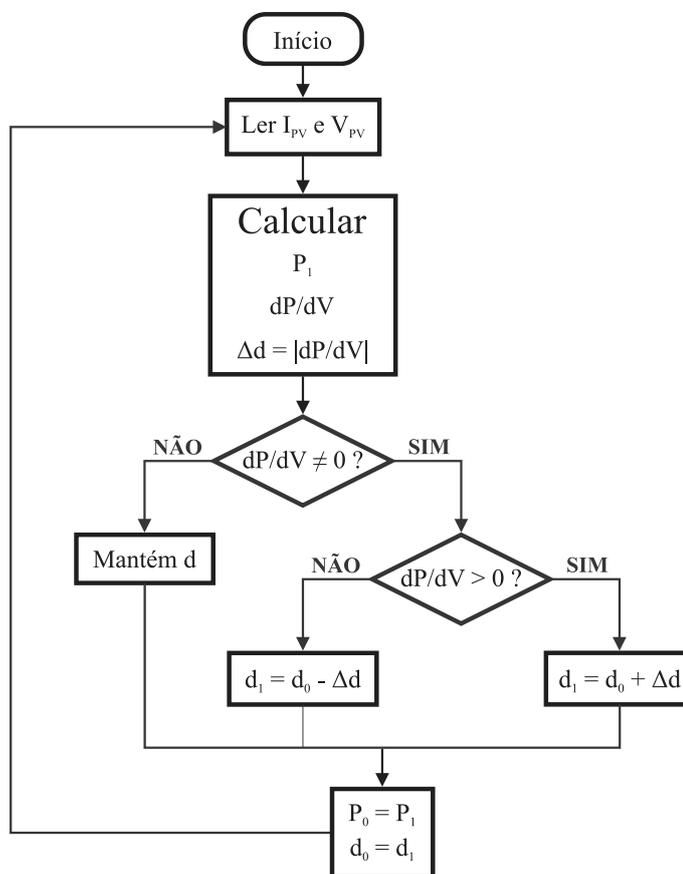


Fig. 2.33 - Fluxograma do método da condutância incremental.

Uma vantagem desse método quando comparado com o P&O está na velocidade de rastreamento do MPP. Como a derivada da potência é a responsável pela localização do ponto de operação (à direita ou à esquerda do MPP), o seu valor em módulo pode ser utilizado para distinguir se o ponto encontra-se próximo ou distante do MPP, tornando mais rápida a convergência para o ponto de máxima potência [16]. Tem-se na Fig. 2.34 o diagrama de blocos do método da condutância incremental.

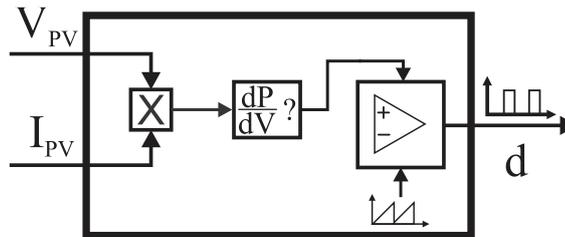


Fig. 2.34 - Diagrama de blocos do método da condutância incremental.

Além da maior velocidade na busca pelo MPP, em virtude do incremento variável no sistema de controle, essa característica garante uma menor oscilação no ponto de operação em regime permanente.

Finalmente, com o intuito de analisar a resposta dinâmica do sistema de controle, são obtidos os gráficos da potência de saída em função das variações de irradiância e temperatura, mostrados na Fig. 2.35.

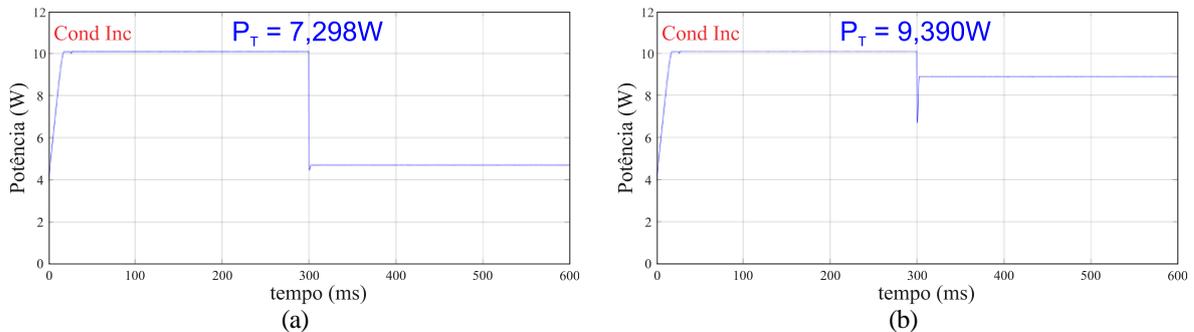


Fig. 2.35 - Curva da potência para o método da condutância incremental, em função da variação de: (a) irradiância (de 1000 W/m² para 500 W/m²); (b) temperatura (de 25 °C para 65 °C).

O elevado valor da potência de saída se deve, em grande parte, à menor oscilação em regime permanente comparada ao método P&O, e à alta velocidade de rastreamento. Porém, o cálculo da derivada da potência em relação à tensão é uma tarefa que exige um maior esforço computacional, aumentando o custo de implementação do sistema.

2.6.8. Comparação entre os métodos de MPPT apresentados

Para analisar as vantagens e desvantagens de cada uma das técnicas, é proposta nessa seção uma comparação entre as técnicas apresentadas. O parâmetro utilizado para esta finalidade é o rendimento de cada uma das técnicas, calculado da seguinte forma:

$$\eta = \frac{P_{técnica}}{P_{max}} \quad (2.9)$$

em que: η - rendimento da técnica em relação à potência máxima;

$P_{técnica}$ - potência de saída média obtida com o uso da técnica;

P_{max} - máximo valor teórico da potência que o módulo pode produzir.

A potência máxima do sistema é a maior potência que o módulo pode entregar para uma dada situação, seja em regime permanente ou durante a variação da temperatura e/ou da irradiância. Na Fig. 2.36 tem-se o comparação das técnicas apresentadas para a variação da irradiância.

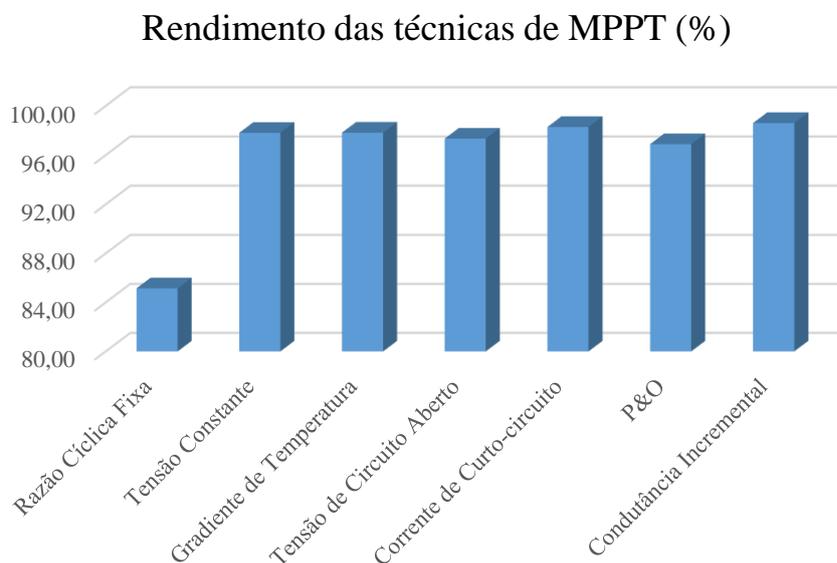


Fig. 2.36 - Rendimento das técnicas para a variação da irradiância de 1000 W/m² para 500 W/m².

Por meio da Fig. 2.36, observa-se que o método com o melhor rendimento é a técnica da condutância incremental, cujo valor é 98,61%. O método da corrente de curto-circuito também possui um bom rendimento, ficando em segundo lugar com 98,28%. Em terceiro as técnicas do gradiente de temperatura e tensão constante, com 97,81%. O método P&O obteve

um rendimento abaixo do esperado, de 96,89%, que foi motivado pela oscilação do ponto de operação, apesar do sistema responder rapidamente às variações de irradiância e temperatura.

Na Fig. 2.37, são analisadas as situações de variação da temperatura. Novamente, o maior rendimento é obtido com a técnica da condutância incremental, correspondente a 98,90%. Observa-se também que o rendimento do método do gradiente de temperatura é superior ao do método da tensão constante, em virtude da utilização do sensor de temperatura para ajustar a tensão de máxima potência. O rendimento dos métodos da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito poderiam ser mais elevados caso não fosse necessário desconectar o conversor para medir as grandezas do sistema de controle.

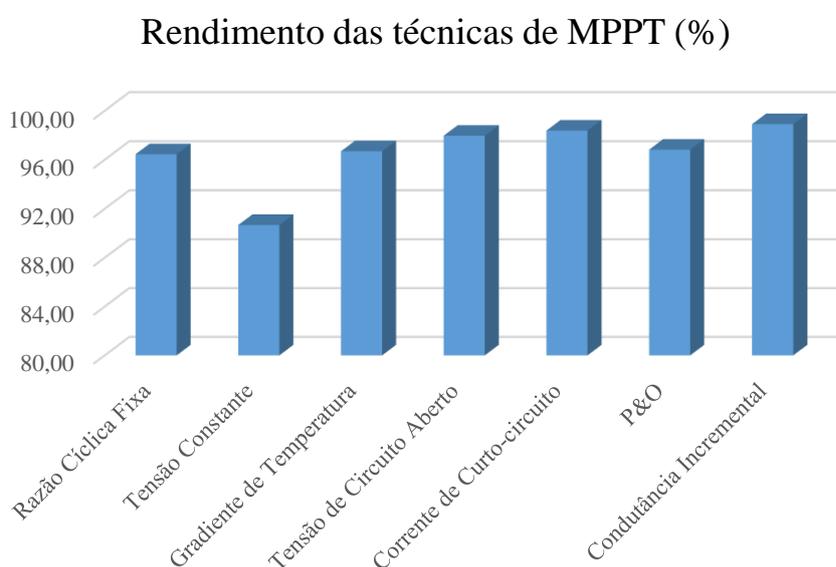


Fig. 2.37 - Rendimento das técnicas para a variação de temperatura de 25 °C para 65 °C.

2.7. Conclusão

Foram apresentadas nesse capítulo a modelagem do módulo fotovoltaico e diversas técnicas de MPPT presentes na literatura. O comportamento das técnicas para situações de variação da irradiância e temperatura foram avaliados, obtendo-se o rendimento de cada método de MPPT. A análise da resposta das técnicas permitiu avaliar suas deficiências no rastreamento do ponto de máxima potência. Técnicas que apresentam um número menor de sensores, como a da tensão constante e da razão cíclica fixa, possuem um rendimento inferior às demais técnicas. As técnicas da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto, mesmo utilizando um único sensor, conseguem obter um rendimento elevado, porém, a necessidade de abertura periódica do circuito provoca uma diminuição na potência média de saída. O método

do gradiente de temperatura é uma boa alternativa quando ocorrem variações da temperatura, entretanto, seu desempenho é reduzido para níveis de irradiância diferentes da STC. A técnica P&O possui um rendimento elevado, contudo, a oscilação do ponto de operação em regime permanente atenua seu desempenho. Através da comparação entre as diversas técnicas, verificou-se que a mais adequada, tanto para situações de variação da irradiância quanto da temperatura, é a técnica da condutância incremental, que obteve o melhor desempenho durante os testes realizados.

Capítulo 3

3. Método I&T proposto

3.1. Introdução

Nesse capítulo é realizada uma análise mais criteriosa da influência da temperatura e da irradiância nos parâmetros do módulo fotovoltaico, assim como nas curvas $I \times V$ e $P \times V$ características. Além disso, o método I&T é apresentado, juntamente com a relação utilizada para estimar a irradiância do módulo. O método foi denominado I&T por realizar amostras da corrente de curto-circuito (I) e da temperatura (T) para a determinação do ponto de máxima potência. De forma equivalente aos testes do Capítulo 2, é avaliado o desempenho da técnica proposta através de simulações computacionais, para situações de variação da irradiância e temperatura.

3.2. Influência da temperatura

No Capítulo 2, a influência da temperatura nas características do módulo fotovoltaico foi abordada brevemente. Porém, no desenvolvimento do método I&T proposto, realiza-se uma análise mais criteriosa acerca desta variável. Através da Fig. 3.1, observa-se a curva $P \times V$ para diferentes situações de temperatura. Durante a simulação, a temperatura variou de 25 °C a 70 °C, mantendo-se a irradiância constante em 1000 W/m².

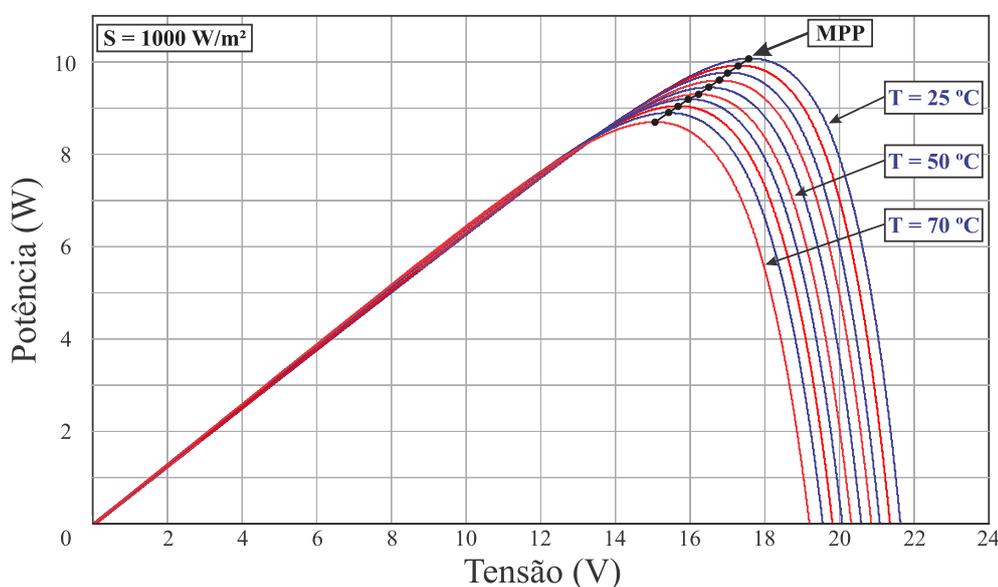


Fig. 3.1 - Curva $P \times V$ para uma variação de temperatura de 25 °C a 70 °C.

Verifica-se na Fig. 3.1 que a potência de saída é consideravelmente reduzida. Adotando o ponto de maior potência, correspondente à temperatura de 25 °C, e o de menor potência, temperatura a 70 °C, a potência de saída reduziu-se em 13,36%.

Analisando a influência dessa variação na curva $I \times V$ do módulo fotovoltaico, para o mesmo intervalo de temperaturas, tem-se na Fig. 3.2 suas curvas características.

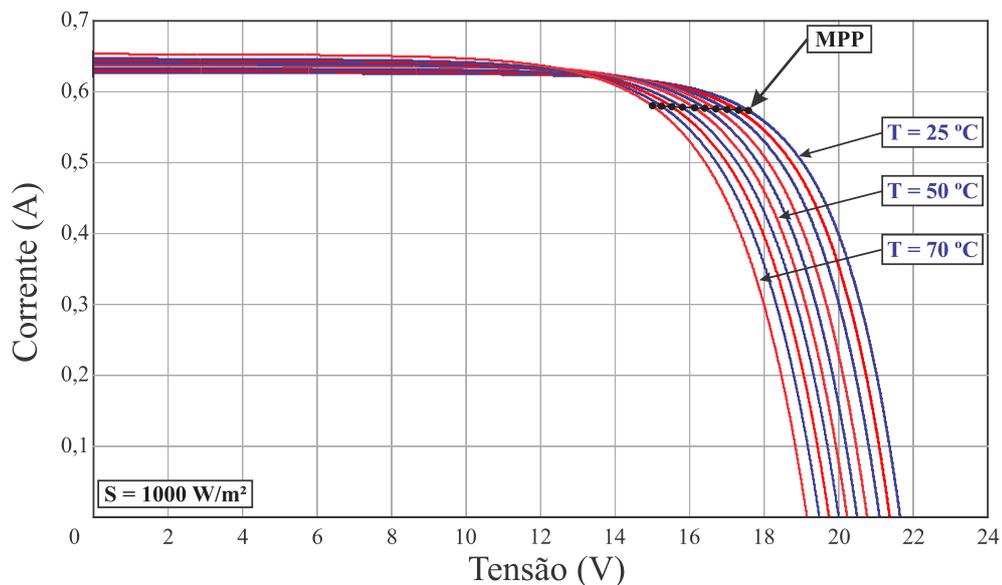


Fig. 3.2 - Curva $I \times V$ para uma variação de temperatura de 25 °C a 70 °C.

Pode ser observado que a temperatura influencia, sobretudo, o valor da tensão de máxima potência, sendo que a corrente permanece praticamente inalterada. Adotando como referência o ponto de menor temperatura, 25 °C, até o ponto de maior temperatura, 70 °C, a tensão no MPP sofreu uma variação de 14,30%, enquanto a diferença do nível de corrente foi de 1,04%.

Tendo em vista essa diferença, é essencial considerar a influência da temperatura nos parâmetros de controle. A análise da temperatura é realizada com o intuito de monitorar e corrigir as variações na tensão de máxima potência, que é diretamente influenciada pela temperatura, como evidenciado durante os testes. Em virtude desta constatação, optou-se por utilizar um sensor de temperatura na técnica de MPPT proposta, que possui um baixo custo de implementação.

3.3. Influência da irradiância

Além da temperatura, outro parâmetro que influencia a tensão e corrente de saída do módulo é a irradiância. A radiação solar, ou irradiância, representa a quantidade de energia que

chega até o módulo fotovoltaico e que pode ser convertida em energia elétrica dependendo, naturalmente, da eficiência de conversão do módulo utilizado, que é em média de 13% a 18% [2].

Para avaliar o comportamento da curva $P \times V$, observa-se na Fig. 3.3 o deslocamento do ponto de máxima potência durante a variação da irradiância de 1000 W/m^2 a 100 W/m^2 .

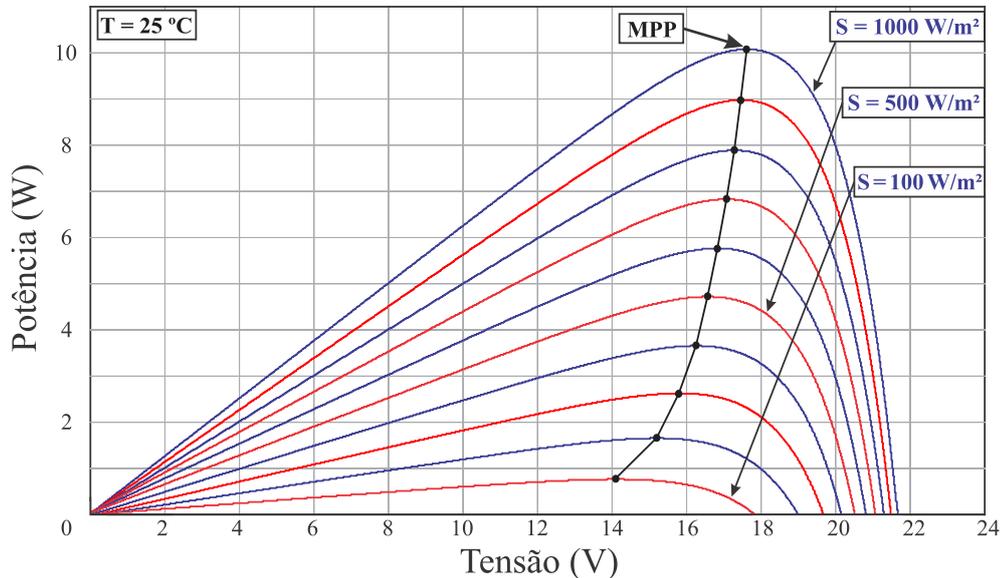


Fig. 3.3 - Curva $P \times V$ para uma variação de irradiância de 1000 W/m^2 a 100 W/m^2 .

Comparando os resultados da Fig. 3.3 com aqueles da Fig. 3.1, que mostra o comportamento do módulo para uma variação de temperatura, destaca-se que a variação da irradiância tem um impacto mais expressivo na potência de saída. Durante a variação da irradiância em 90%, de 1000 W/m^2 a 100 W/m^2 , a potência de saída foi alterada em 92,38%, evidenciando a relação quase direta entre irradiância e potência de saída.

De forma a verificar o impacto da variação da irradiância na corrente e tensão de saída do módulo, a Fig. 3.4 ilustra a curva $I \times V$ para o mesmo conjunto de valores da situação anterior. Analisando os pontos de corrente e tensão do gráfico, observa-se que a tensão de máxima potência sofreu uma variação de 19,89% do ponto de maior potência, irradiância a 1000 W/m^2 , até o ponto de menor potência, irradiância a 100 W/m^2 . A corrente de máxima potência, entretanto, variou 90,57% entre os dois pontos supracitados.

A partir dessas considerações, é possível estimar o ponto de máxima potência através da leitura da irradiância. Todavia, sensores de irradiância de alta precisão [35] possuem um custo elevado, o que acaba limitando sua utilização.

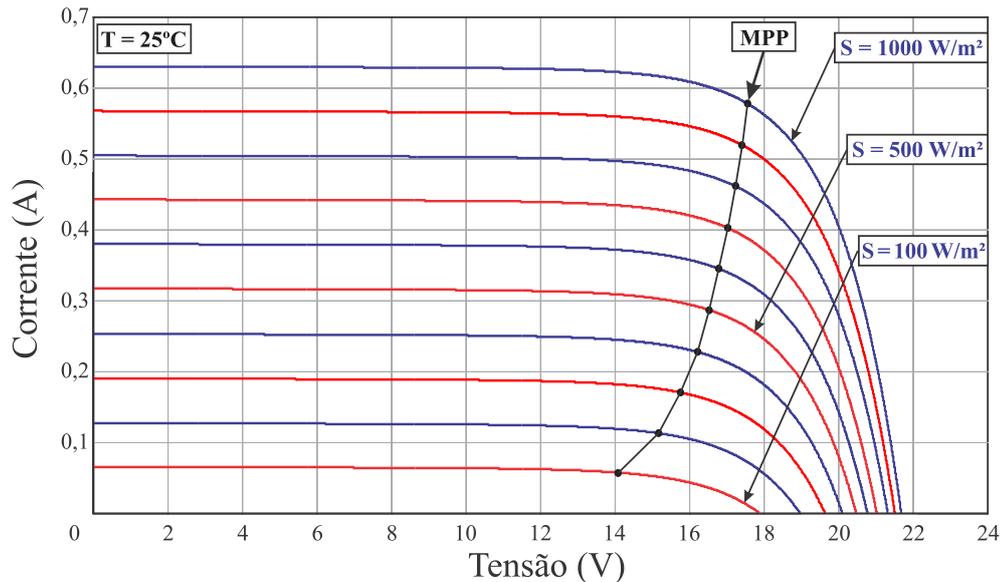


Fig. 3.4 - Curva $I \times V$ para uma variação de irradiância de 1000 W/m^2 a 100 W/m^2 .

Durante a modelagem do módulo fotovoltaico e com a utilização de simulações computacionais na determinação de suas características, observou-se a relação praticamente linear entre a corrente de curto-circuito e a irradiância [29]. Partindo dessa premissa, optou-se por utilizar a amostra da corrente de curto-circuito, realizada com sensores de valor inferior a 1% do custo de um sensor de irradiância [35], como uma forma de estimar a irradiância do módulo fotovoltaico e assim, determinar o ponto de máxima potência.

3.4. Modelagem matemática

A partir das características observadas nas Seções 3.2 e 3.3, retoma-se a modelagem matemática do módulo fotovoltaico com o objetivo de desenvolver um método de controle capaz de compensar as variações de temperatura e irradiância. Existem alguns autores [8] que utilizam a medida da irradiância para estimar o MPP, o que traz bons resultados. Entretanto, o custo desse tipo de sensor é elevado, quando comparado com sensores de corrente ou tensão. Por esse motivo, optou-se pela leitura indireta dessa variável, através da amostragem da corrente de curto-circuito.

O método proposto é baseado na leitura da temperatura e da corrente de curto-circuito para estimar o ponto de máxima potência. A leitura da corrente de curto-circuito se faz necessária para estimar a variação da irradiância e assim, corrigir os parâmetros que são diretamente influenciados por essa grandeza.

A temperatura tem uma maior influência na tensão de máxima potência quando comparada com a irradiância, além de modificar os valores da tensão térmica e da corrente reversa do módulo, razões que tornam necessária sua amostragem para estimar o MPP.

Sendo assim, a amostragem da temperatura e da corrente de curto-circuito conseguem representar as variações do ponto de máxima potência e defini-lo com exatidão. Além disso, é interessante citar que, após uma ampla pesquisa bibliográfica, não foram encontradas técnicas de MPPT que realizem a amostragem simultânea dessas duas grandezas na busca pelo MPP.

No que tange à modelagem do módulo fotovoltaico realizada no Capítulo 2, tem-se a expressão (3.1).

$$I = \underbrace{\left\{ \left[I_{SC_{ref}} + \alpha(T - T_{ref}) \right] \cdot \frac{S}{S_{ref}} \right\}}_{\text{Corrente fotogerada } (I_{ph})} - I_D \cdot \left(e^{\frac{q(V+I.R_S)}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_S}{R_P} \quad (3.1)$$

Essa equação é semelhante a (2.1), mas nesse caso a corrente fotogerada I_{ph} é representada em função de sua dependência com a temperatura e a irradiância. Através de (3.1), é possível observar a dependência da corrente de saída I com a irradiância e a temperatura. Alguns autores [15], [36] – [38] sugerem que o último termo de (3.1), $\{(V+I.R_S)/R_P\}$, seja suprimido, pois o erro com essa simplificação é mínimo, resultando na expressão (3.2) [39].

$$I = \left\{ \left[I_{SC_{ref}} + \alpha(T - T_{ref}) \right] \cdot \frac{S}{S_{ref}} \right\} - I_D \cdot \left(e^{\frac{q(V+I.R_S)}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.2)$$

Plotando-se as expressões (3.1) e (3.2), para $T = T_{ref}$, obtém-se as curvas $I \times V$ da Fig. 3.5.

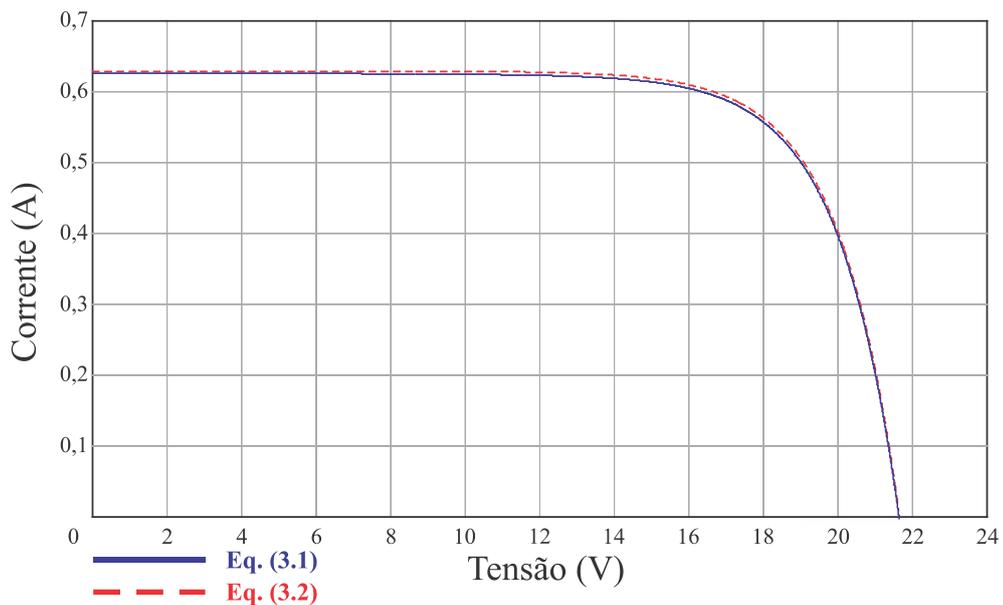


Fig. 3.5 - Comparação das curvas $I \times V$ obtidas por meio das expressões (3.1) e (3.2).

Como observado através da Fig. 3.5, desconsiderar o último termo de (3.1) não compromete a linearidade do modelo. Esse artifício será utilizado posteriormente na simplificação do algoritmo de controle.

Com o intuito de eliminar a dependência entre (3.2) e a irradiância medida S , a expressão (3.2) foi analisada em detalhes. Igualando-se (3.2) à corrente de curto-circuito medida I_{SC} (onde $V = 0$ V), tem-se:

$$I_{SC} = \left\{ \left[I_{SC_{ref}} + \alpha(T - T_{ref}) \right] \cdot \frac{S}{S_{ref}} \right\} - \underbrace{I_D \cdot \left(e^{q \frac{I_{SC} \cdot R_S}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right)}_{\text{Corrente reversa total (I}_{RT}\text{)}} \quad (3.3)$$

O segundo termo da expressão (3.3) é a parte referente à corrente reversa total I_{RT} que, com o auxílio de (2.3), resulta em (3.4), onde T é dado em Kelvin.

$$I_{RT} = \left\{ \left[\frac{I_{SC_{ref}}}{\left(e^{\left(\frac{V_{OC_{ref}}}{q \frac{\eta \cdot k \cdot T}{\eta \cdot k \cdot T}} \right)} - 1 \right)} \right] \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q E_g}{\eta \cdot k} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \right\} \cdot \left(e^{q \frac{I_{SC} \cdot R_S}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Utilizando os dados do módulo KS-10 é possível obter o valor de I_{RT} na expressão (3.4) em função da temperatura do módulo, como segue.

Para $T = 0$ °C (ou 273 K):

$$I_{RT} = I_{SC_{ref}} \cdot (4,522 \cdot 10^{-219}) \text{ A}$$

Para $T = T_{ref}$, tem-se:

$$I_{RT} = I_{SC_{ref}} \cdot (7,332 \cdot 10^{-200}) \text{ A}$$

Para $T = 100$ °C:

$$I_{RT} = I_{SC_{ref}} \cdot (5,195 \cdot 10^{-158}) \text{ A}$$

Em todas as situações analisadas, a corrente I_{RT} pode ser desconsiderada sem prejuízo para a análise da corrente I_{SC} em (3.3), tendo em vista o pequeno valor de I_{RT} . Dessa forma, chega-se à relação de (3.5).

$$\frac{I_{SC}}{\left[I_{SC_{ref}} + \alpha(T - T_{ref}) \right]} = \frac{S}{S_{ref}} \quad (3.5)$$

Novamente, utilizando os dados do módulo KS-10, realiza-se uma análise de (3.5) em função da temperatura. Para $T = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\frac{I_{SC}}{[I_{SC_{ref}} - 0,08]} = \frac{S}{S_{ref}}$$

Para $T = T_{ref}$:

$$\frac{I_{SC}}{I_{SC_{ref}}} = \frac{S}{S_{ref}}$$

Para $T = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$:

$$\frac{I_{SC}}{[I_{SC_{ref}} + 0,027]} = \frac{S}{S_{ref}}$$

Por meio dos valores obtidos, é possível aproximar a relação de S/S_{ref} com boa precisão, a partir da relação (3.6), a fim de eliminar a necessidade de um medidor de irradiância [39].

$$\frac{I_{SC}}{I_{SC_{ref}}} = \frac{S}{S_{ref}} \quad (3.6)$$

A partir da relação (3.6), é possível simplificar (3.2), que resulta em (3.7).

$$I = \left\{ I_{SC} + \alpha \cdot \frac{(T - T_{ref})I_{SC}}{I_{SC_{ref}}} \right\} - I_D \cdot \left(e^{q \frac{V+I.R_s}{\eta \cdot k \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.7)$$

Dessa forma, a definição da corrente de saída do módulo fica atrelada à corrente de curto-circuito e à temperatura. Em virtude de (3.7) ser uma equação recursiva, é necessário definir os valores da tensão V e da corrente I antes de utilizá-la na definição do MPP. Existem diferentes formas [15], [39] – [42] de se substituir a tensão V na equação. Porém, o método utilizado em [42] se mostrou o mais adequado, em virtude da linearidade da aproximação. Assim, a variável V será então substituída por (3.8).

$$V_{MPP} = k_V \cdot \eta \cdot N_s \cdot V_T \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_D} + 1 \right) \quad (3.8)$$

em que: N_s - número de células em série que formam o módulo fotovoltaico;

V_T - tensão térmica da junção PN.

Analisando a corrente I no segundo termo de (3.7), tem-se que a forma mais adequada de substituir o seu valor consiste em utilizar a mesma relação de [29], $I = k_I \cdot I_{SC}$. A partir dessa

consideração e substituindo (3.8) em (3.7), obtém-se (3.9), que será utilizada no sistema de controle da técnica I&T proposta.

$$I_{MPP} = \left[I_{SC} + \frac{I_{SC}}{I_{SCref}} \cdot \alpha(T - T_{ref}) \right] - I_D \cdot \left(e^{k_V \cdot \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_D} + 1\right) + \frac{k_I \cdot I_{SC} \cdot R_S}{\eta \cdot K \cdot T}} - 1 \right) \quad (3.9)$$

A corrente no ponto de máxima potência I_{MPP} é o parâmetro de controle do método I&T proposto. Como pode ser observado em (3.9), o sistema de controle irá depender, sobretudo, das amostras da corrente de curto-circuito e temperatura.

3.5. Implementação da técnica I&T

Para comprovar o equacionamento matemático desenvolvido para a técnica I&T proposta, o método foi implementado no ambiente Matlab/Simulink[®], como ilustra a Fig. 3.6.

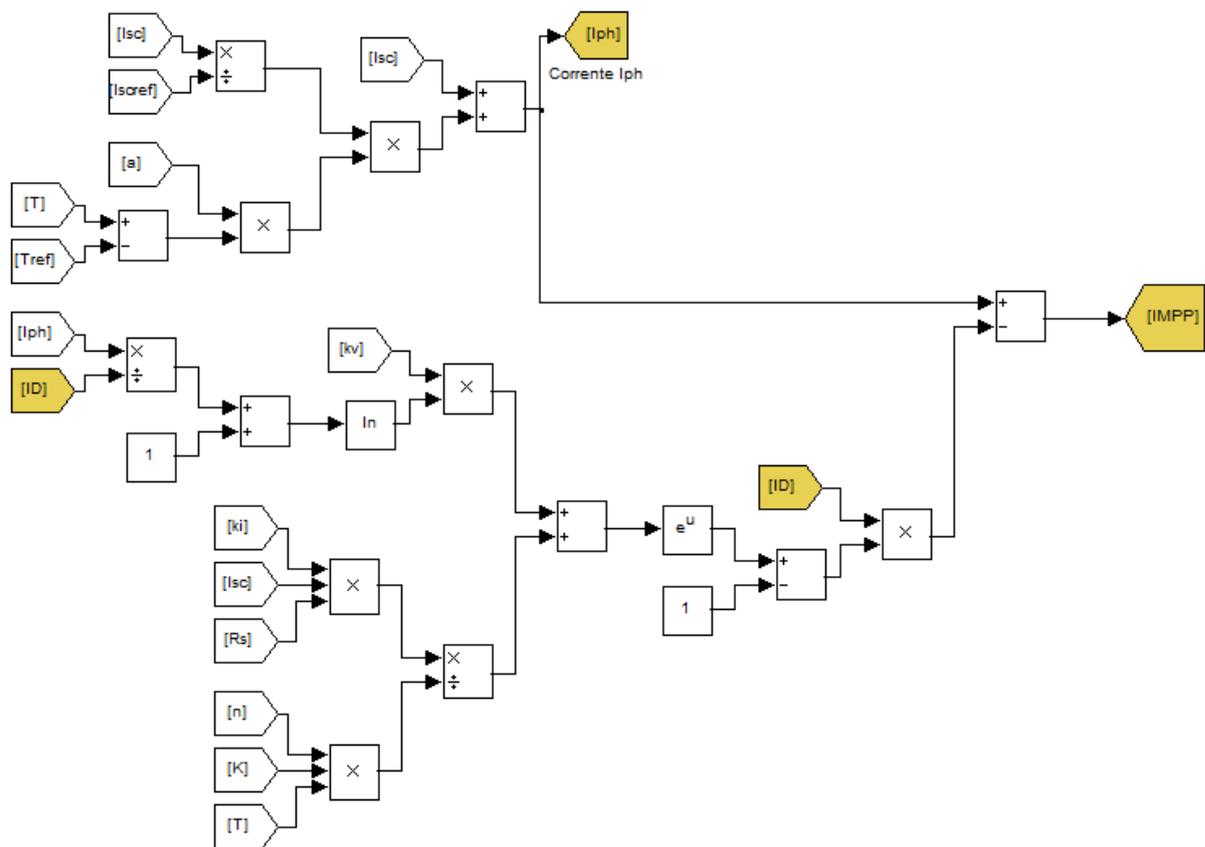


Fig. 3.6 - Método I&T proposto implementado no ambiente Matlab/Simulink[®].

Uma deficiência da técnica I&T proposta consiste na necessidade de abertura do circuito para o monitoramento da corrente I_{SC} . Para a manutenção do sistema no MPP, seria necessário realizar uma amostra contínua dessa corrente, garantindo que qualquer modificação no MPP seja percebida pelo sistema de controle. Entretanto, isso aumentaria as perdas no sistema.

Com o intuito de sanar essa deficiência, é possível monitorar a corrente de saída do módulo para perceber qualquer variação no circuito [41]. Através desse monitoramento, quando ocorrer a modificação da irradiância ou da temperatura, a corrente de saída também será alterada.

A amostragem contínua da corrente de saída do módulo evita a interrupção periódica do circuito para medição da corrente de curto-circuito, reduzindo-se as perdas. O fluxograma do método I&T proposto é apresentado na Fig. 3.7. Antes de analisá-lo, é interessante definir a variação da corrente de saída de referência (ΔI_{ref}). A mesma é estabelecida em $0,02 I_{MPP}$ (12,4 mA para o módulo KS-10 utilizado), fazendo com que o módulo seja desconectado da carga apenas quando as condições de funcionamento modificam-se consideravelmente.

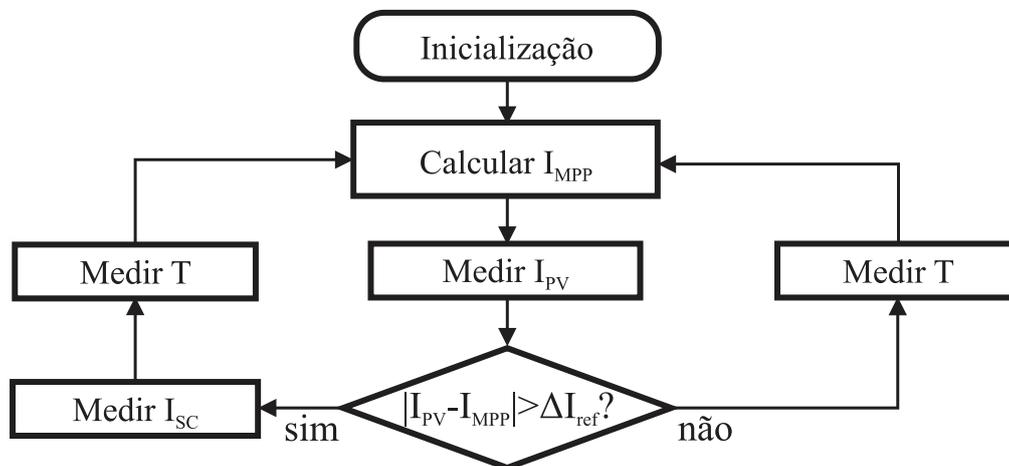


Fig. 3.7 - Fluxograma do método I&T proposto.

Após a inicialização do sistema calcula-se a corrente de máxima potência I_{MPP} a partir dos valores de referência I_{SCref} e T_{ref} . Em seguida, realiza-se a amostragem da corrente de saída do módulo I_{PV} e a mesma é comparada com a corrente I_{MPP} calculada. Caso a diferença entre as duas correntes seja maior do que a variação de referência ΔI_{ref} , o módulo deverá ser desconectado da carga para que a corrente I_{SC} seja medida, assim como a temperatura T , e um novo valor de I_{MPP} será calculado. Se a diferença entre as correntes for menor que ΔI_{ref} somente a temperatura T será medida, obtendo-se um novo valor de I_{MPP} , reiniciando o processo.

A corrente de saída do módulo é amostrada com uma frequência de 1 kHz [8], [41] e [42] com o intuito de monitorar as alterações nas condições de operação do módulo e determinar quando I_{SC} deverá ser medida. A amostragem de I_{SC} ocorrerá apenas quando modificações significativas do ponto de operação forem constatadas, evitando perdas desnecessárias [5]. O diagrama de blocos do método é visto na Fig. 3.8.

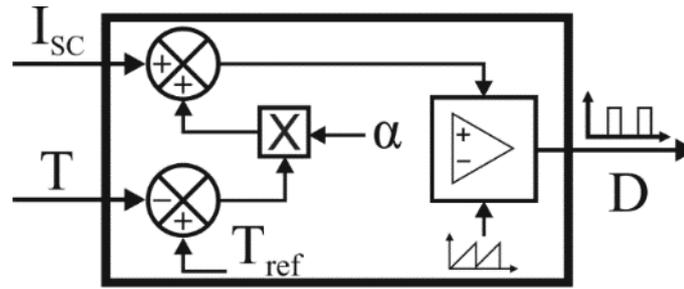


Fig. 3.8 - Diagrama de blocos do método I&T proposto.

Assim, como no método da corrente de curto-circuito, utilizou-se um segundo interruptor para curto-circuitar o módulo e realizar a medição dessa grandeza. A medição da temperatura é realizada continuamente.

3.6. Resultados

Para avaliar a resposta dinâmica do método I&T proposto foram realizados ensaios com variações de irradiância e temperatura semelhantes aos testes do Capítulo 2, apresentados na Fig. 3.9.

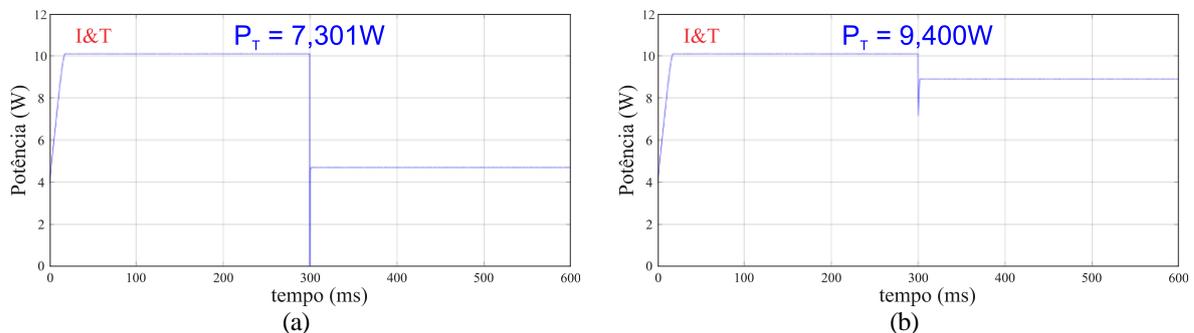


Fig. 3.9 - Curva da potência, para o método I&T proposto, em função da variação de: (a) irradiância (de 1000 W/m² para 500 W/m²); (b) temperatura (de 25 °C para 65 °C).

Como pode ser observado através da Fig. 3.9, a potência entregue pelo sistema está próxima do valor máximo, que é de 7,401 W para a Fig. 3.9a e 9,494 W para a Fig. 3.9b, garantindo um rendimento elevado. Verifica-se também a alta velocidade de rastreamento do ponto de operação, tornando-o adequado a sistemas nos quais ocorrem constantes modificações nas condições do módulo fotovoltaico. Além disso, é possível observar, através da Fig. 3.10, a ondulação do ponto de operação para a condição de $S = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 25 \text{ °C}$. A ondulação em torno do MPP é de cerca de 0,02%, o que garante precisão na busca pelo MPP.

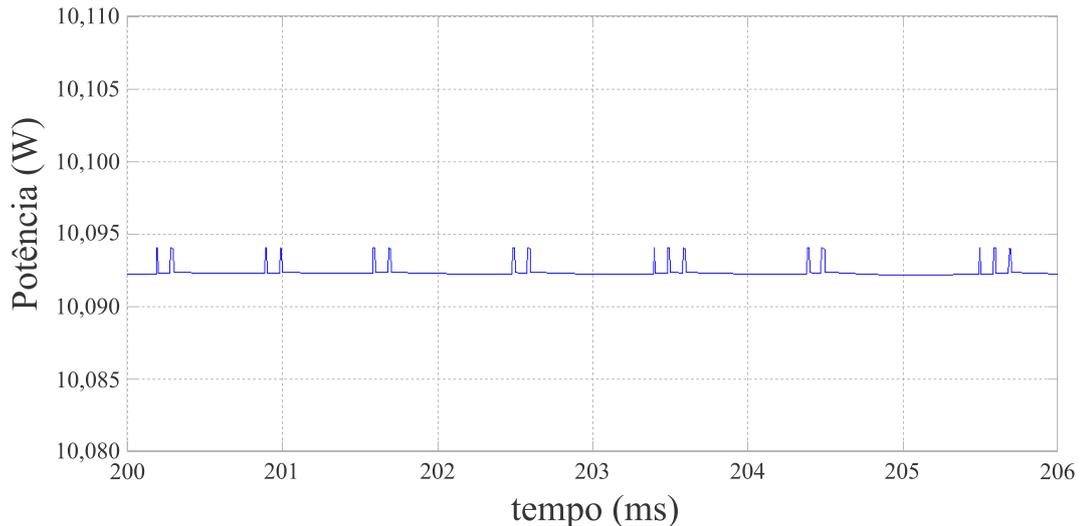


Fig. 3.10 - Ondulação do ponto de operação.

3.7. Conclusão

Apresentou-se nesse capítulo a influência da temperatura e da irradiância no ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico e, a partir da análise dessas influências, o equacionamento do método I&T foi desenvolvido. O fluxograma do método, bem como o seu diagrama de blocos, foram também apresentados. A relação desenvolvida para a estimação da irradiância do módulo mostrou-se interessante, tendo em vista os resultados obtidos pelo método para situações de variação tanto da irradiância quanto da temperatura, que foram superiores aos resultados das técnicas introduzidas no Capítulo 2. Os resultados mostraram que o método possui um alto rendimento (superior a 98,82% em média, para os perfis analisados) e, ao mesmo tempo, uma baixa oscilação do ponto de operação em regime permanente.

Capítulo 4

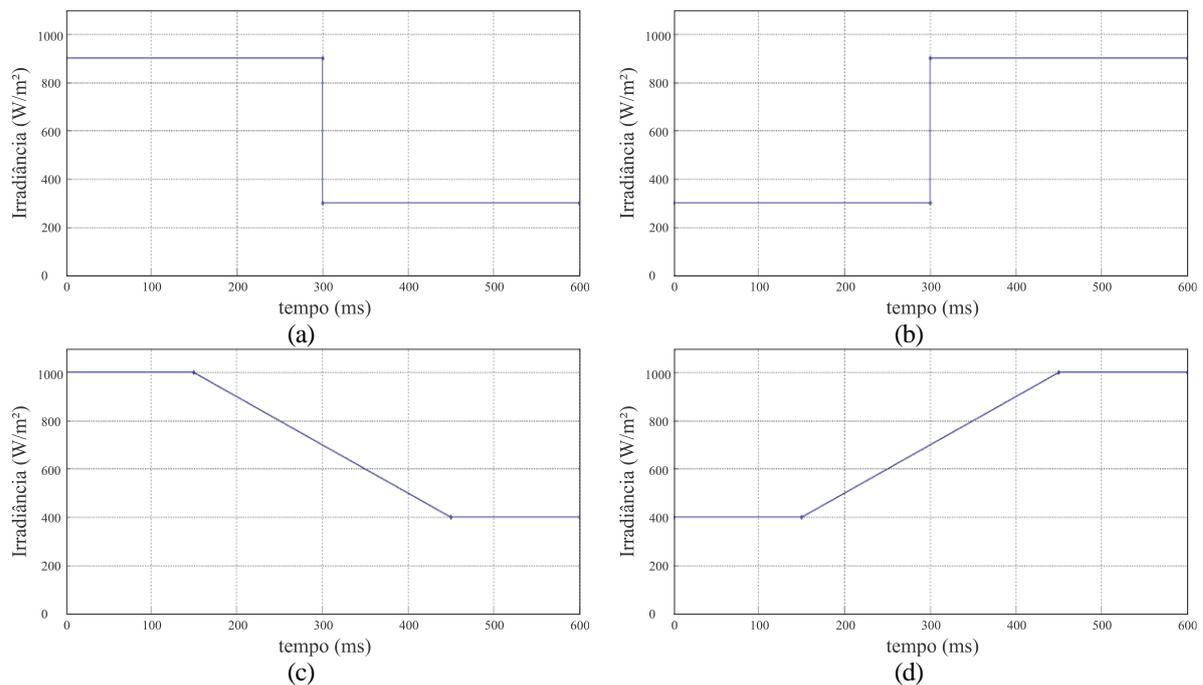
4. Resultados de simulação

4.1. Introdução

São realizados nesse capítulo testes computacionais de variações lineares e em forma de degrau da irradiância e temperatura do módulo fotovoltaico. O rendimento dos métodos apresentados no Capítulo 2 são comparados ao método I&T proposto, analisando-se o comportamento de cada uma das técnicas aos diferentes perfis de variação. Esta análise tem por objetivo definir quais os sistemas mais adequados para cada uma das situações de variação e qual método apresenta o rendimento mais elevado.

4.2. Variação da irradiância

Nos Capítulos 2 e 3, observou-se a influência da irradiância nos parâmetros do módulo fotovoltaico, sobretudo sua influência no nível de corrente. Baseado nos testes realizados em outros trabalhos [5], [22] e [41], são apresentados nessa seção diversos perfis de variação da irradiância, vistos na Fig. 4.1, e a resposta das técnicas de MPPT. Em todos os ensaios, a temperatura foi mantida constante em 25 °C.



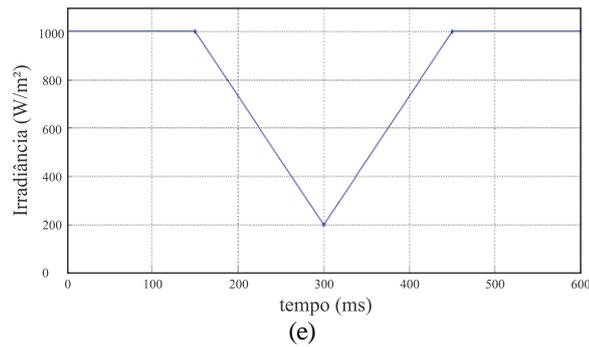
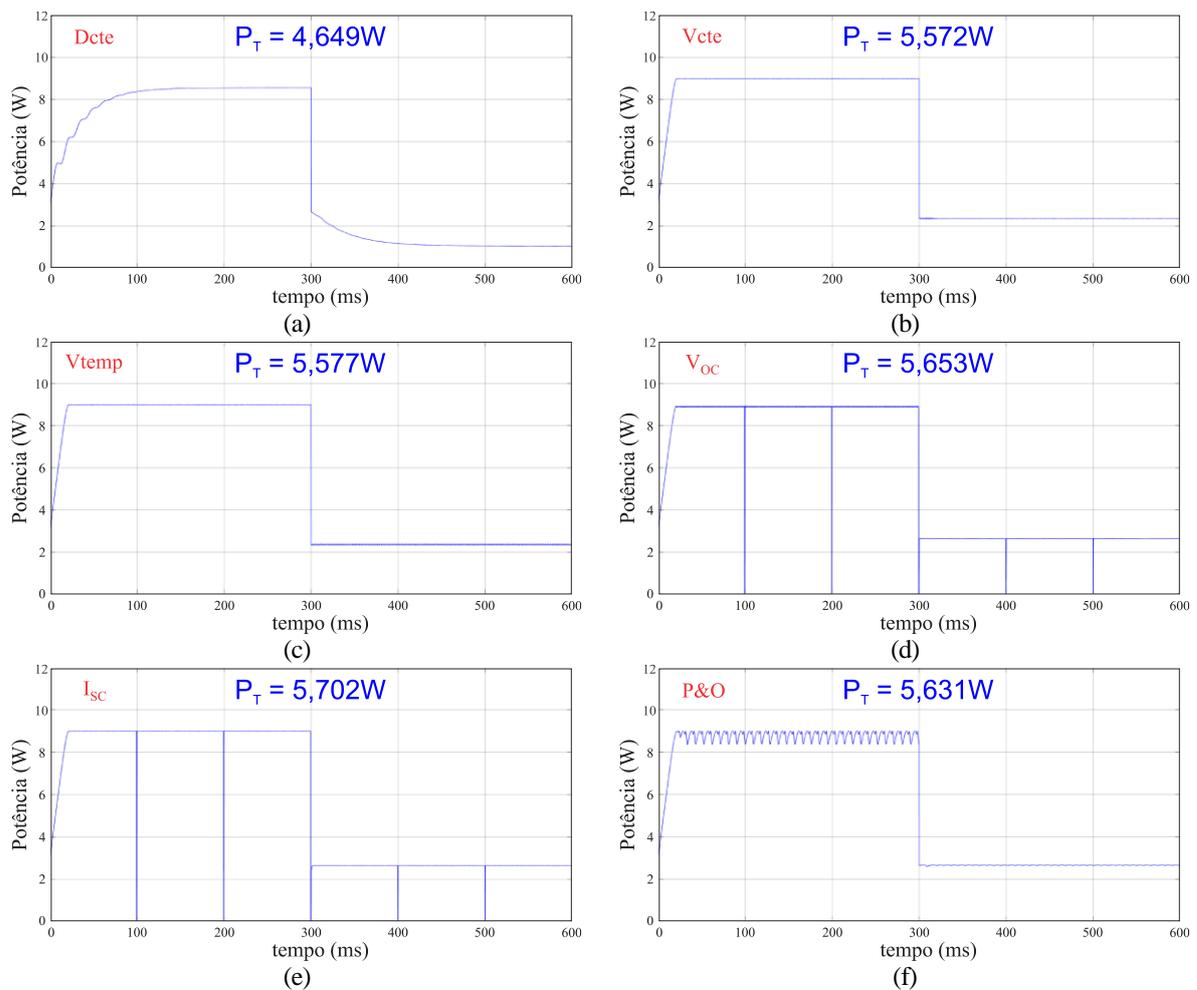


Fig. 4.1 - Perfis de variação da irradiância: (a) 1º perfil - 900 W/m² para 300 W/m², (b) 2º perfil - 300 W/m² para 900 W/m², (c) 3º perfil - 1000 W/m² para 400 W/m², (d) 4º perfil - 400 W/m² para 1000 W/m², (e) 5º perfil - 1000 W/m² para 200 W/m², retornando a 1000 W/m².

O perfil de variação da Fig. 4.1a, irradiância variando em forma de degrau de 900 W/m² a 300 W/m², foi aplicado aos sete métodos anteriormente apresentados no Capítulo 2 e ao método I&T proposto, sendo os resultados mostrados na Fig. 4.2.



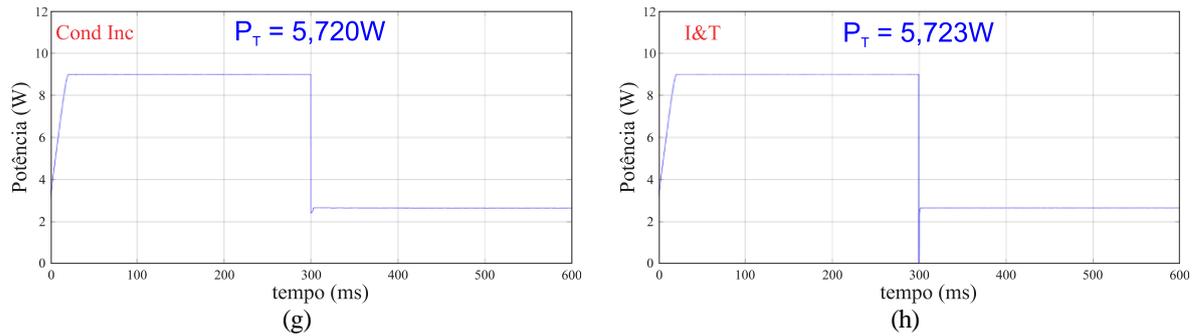
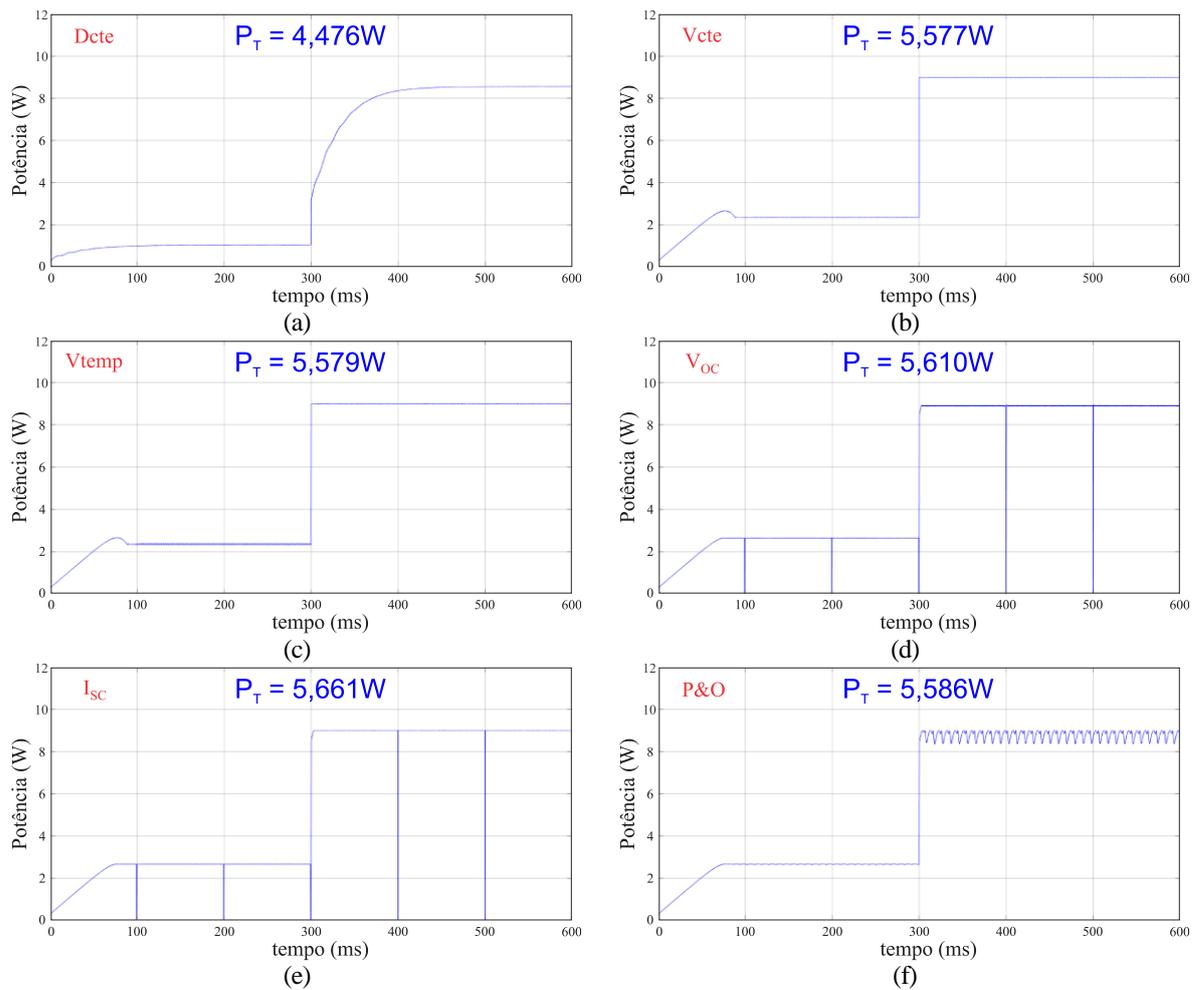


Fig. 4.2 - Potência de saída para o primeiro perfil de variação da irradiância para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

A partir dos resultados da Fig. 4.2, verifica-se que o método I&T proposto obteve o maior valor de potência de saída dentre os demais métodos, seguido das técnicas da condutância incremental e da corrente de curto-circuito. Os resultados do segundo perfil de variação, irradiância variando em forma de degrau de 300 W/m²a 900 W/m², podem ser observados na Fig. 4.3.



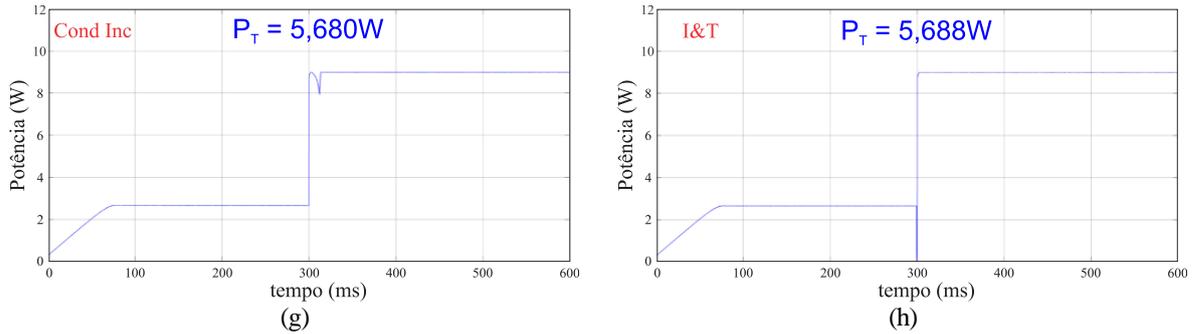
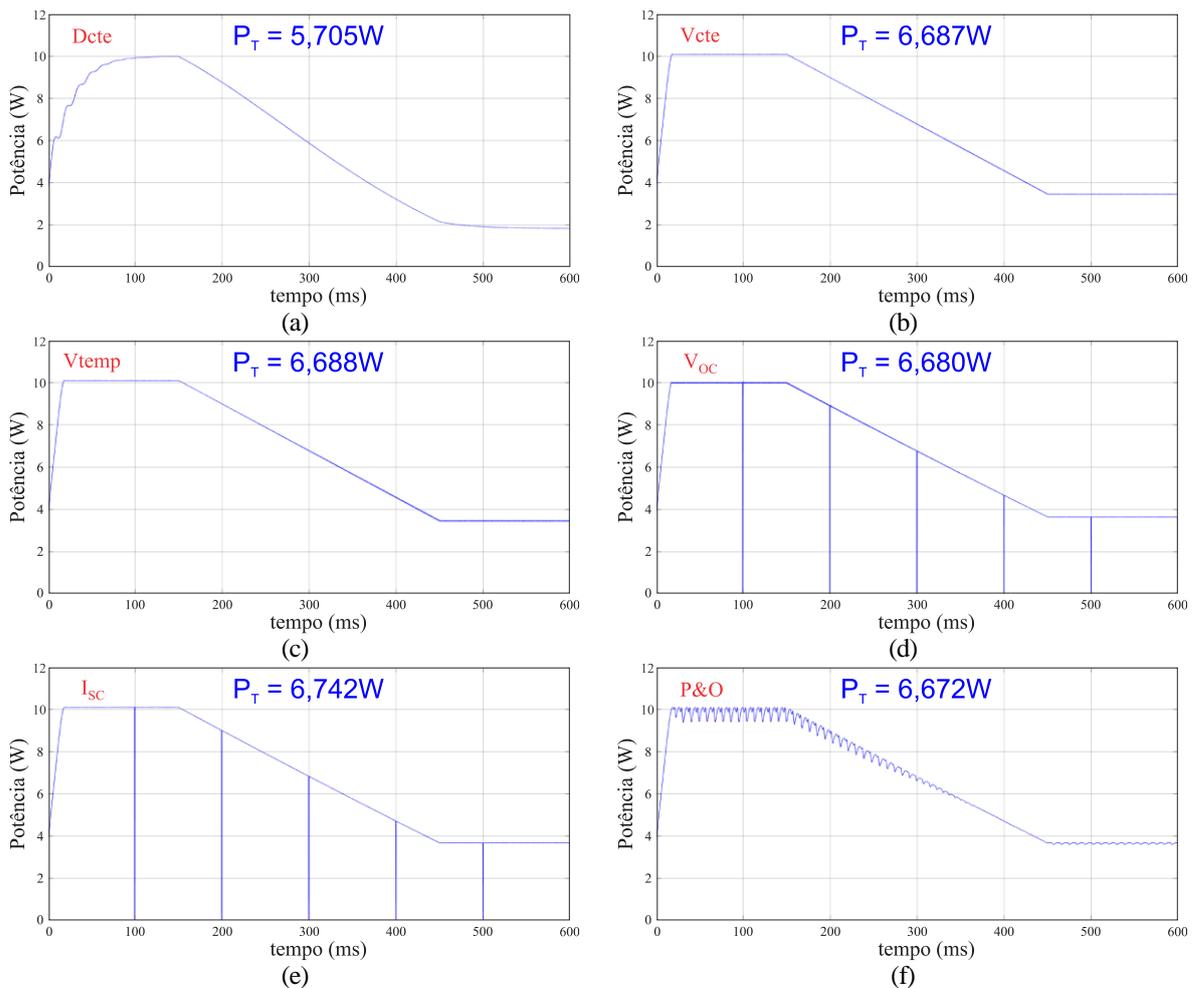


Fig. 4.3 - Potência de saída para o segundo perfil de variação da irradiância, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Para os resultados da Fig. 4.3, novamente, o método I&T e as técnicas da condutância incremental e corrente de curto-circuito, obtiveram os melhores desempenhos. Para as situações de variação linear da irradiância, de 1000 W/m² a 400 W/m² e vice-versa, têm-se os resultados vistos na Fig. 4.4 para o terceiro perfil de variação e da Fig. 4.5 para o quarto perfil de variação.



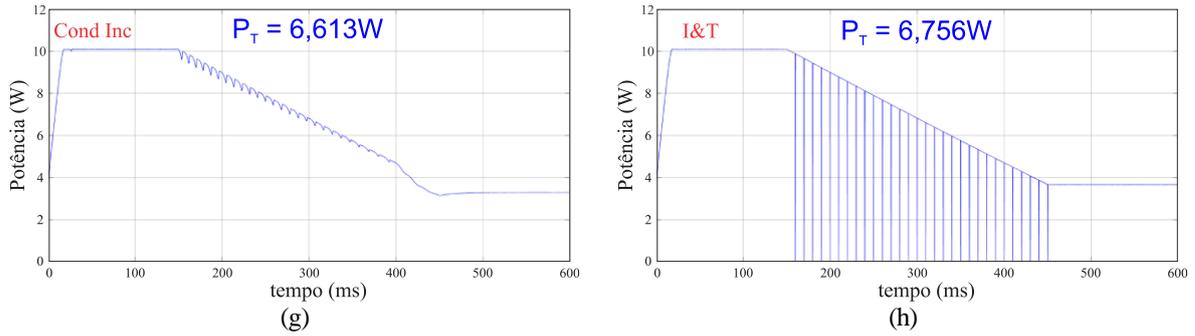


Fig. 4.4 - Potência de saída para o terceiro perfil de variação da irradiância, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

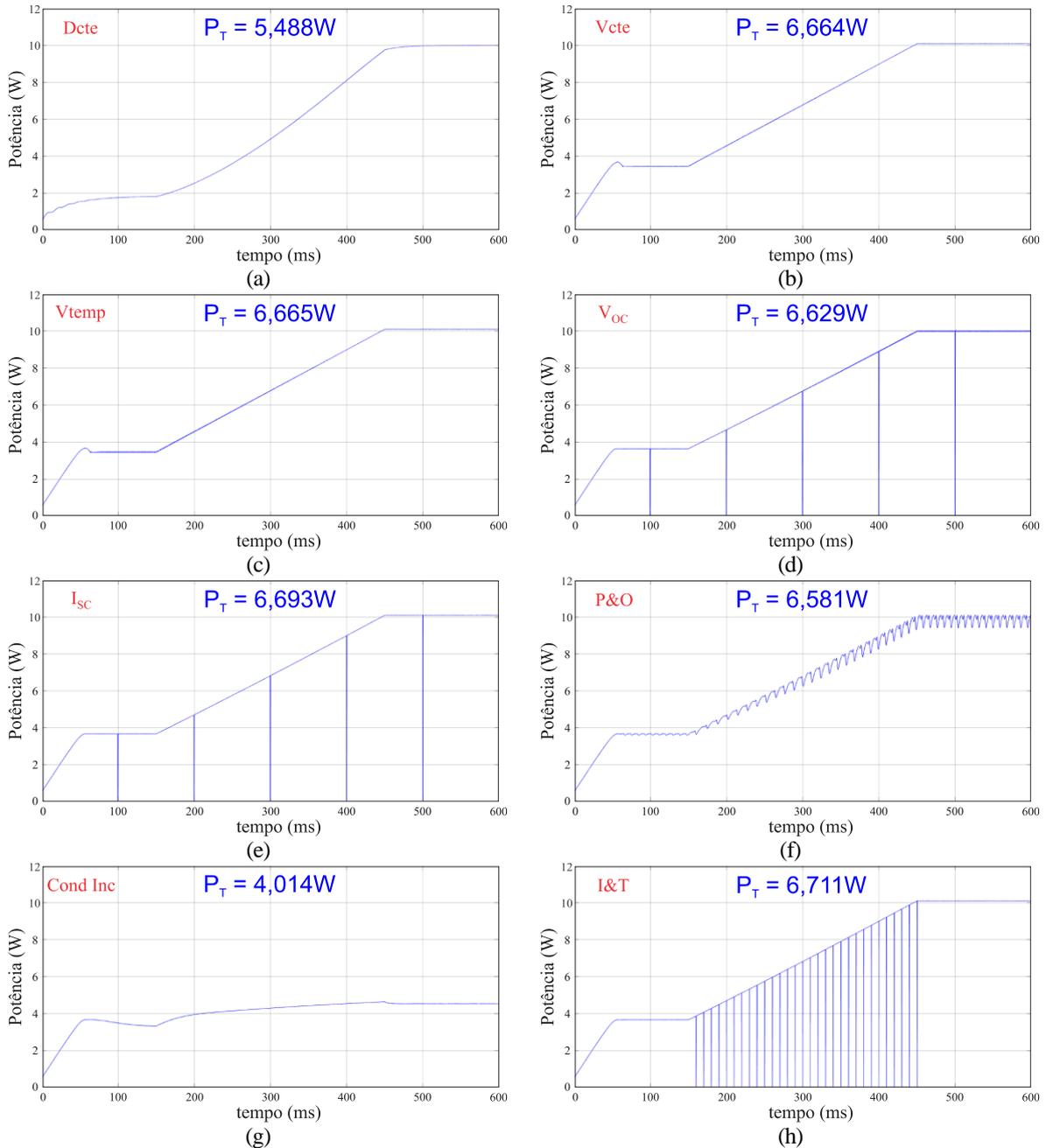
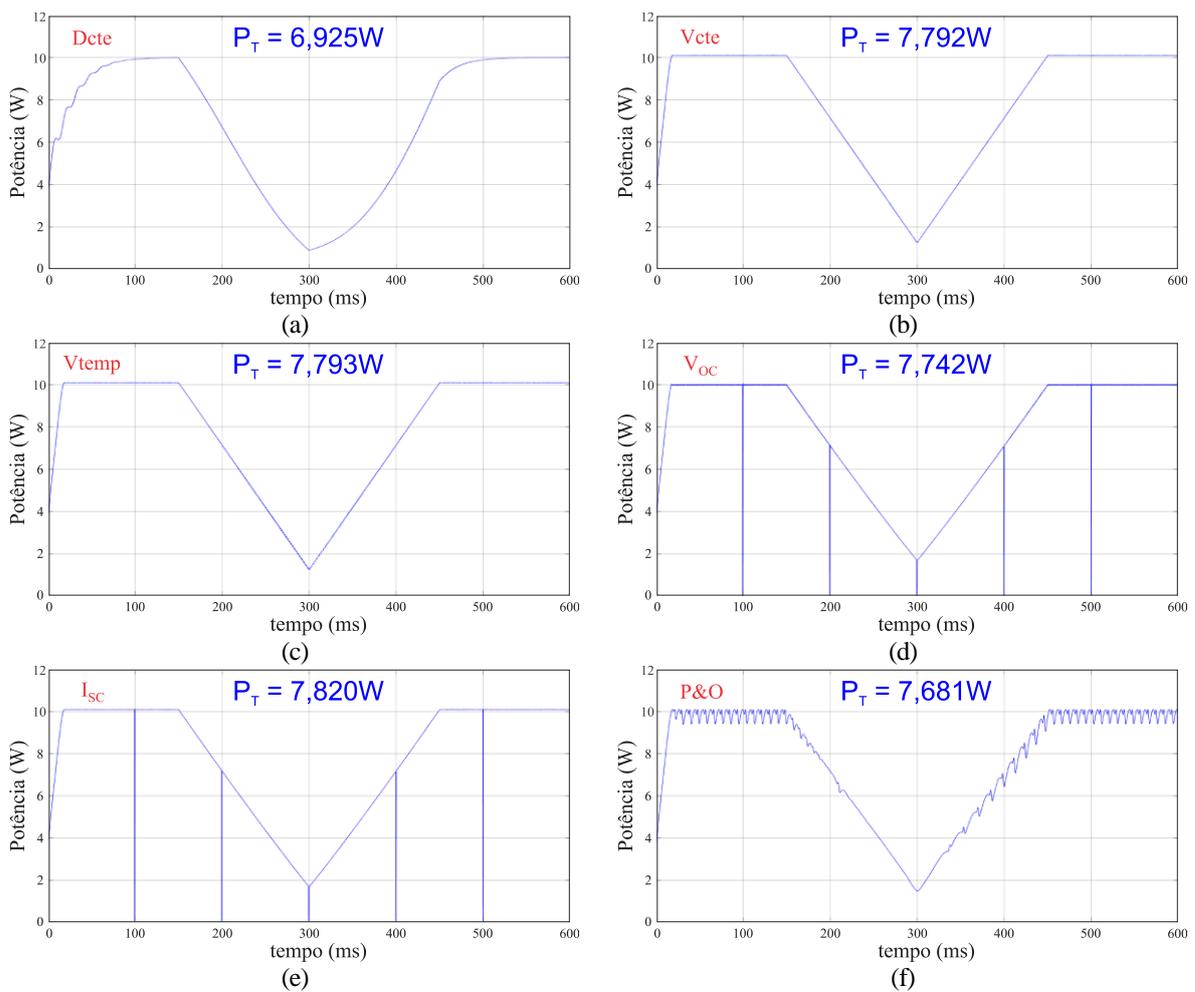


Fig. 4.5 - Potência de saída para o quarto perfil de variação da irradiância, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Os resultados da Fig. 4.4 e Fig. 4.5 demonstram que o método I&T permitiu o maior aproveitamento da potência. As técnicas da corrente de curto-circuito e do gradiente de temperatura também obtiveram bons resultados, com o segundo e terceiro melhores desempenhos em ambas as situações. Em contrapartida, as oscilações dos algoritmos de busca dos métodos da condutância incremental e P&O, sobretudo durante a variação linear da irradiância, reduziram a potência de saída. Uma forma de contornar essa deficiência é reduzir o incremento da razão cíclica, porém, isso acarreta um aumento no tempo de convergência dos métodos. O comportamento do método da condutância incremental durante o quarto perfil de variação, Fig. 4.5g, foi causado pela magnitude do incremento utilizado durante o ensaio, que reduziu drasticamente seu desempenho.

Finalmente, na Fig. 4.6, têm-se os resultados obtidos para o quinto perfil de variação da irradiância (de 1000 W/m² para 200 W/m², retornando a 1000 W/m²).



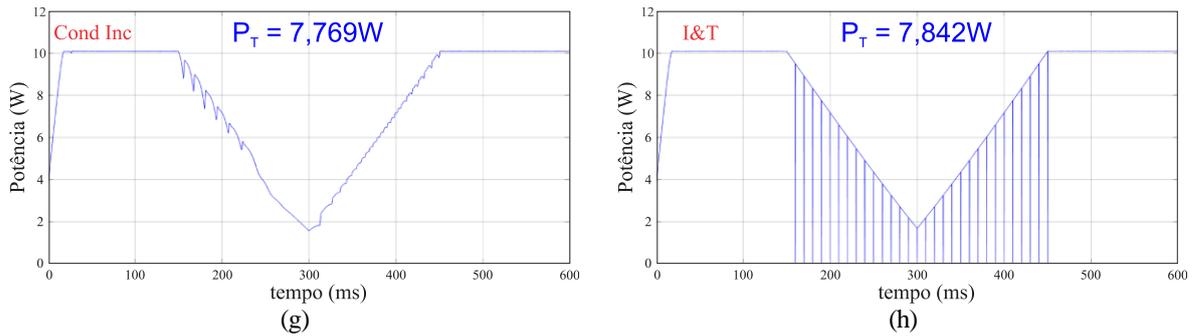


Fig. 4.6 - Potência de saída para o quinto perfil de variação da irradiância, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

A oscilação do ponto de operação do método P&O e da técnica da condutância incremental foram responsáveis pela diminuição da potência gerada por esses métodos. Igualmente, o método I&T proposto obteve o melhor desempenho, seguido pelas técnicas da corrente de curto-circuito e do gradiente de temperatura. Comparando-se os resultados obtidos, o gráfico da Fig. 4.7 apresenta a potência média total dos métodos para as cinco situações apresentadas.

Variação da Irradiância

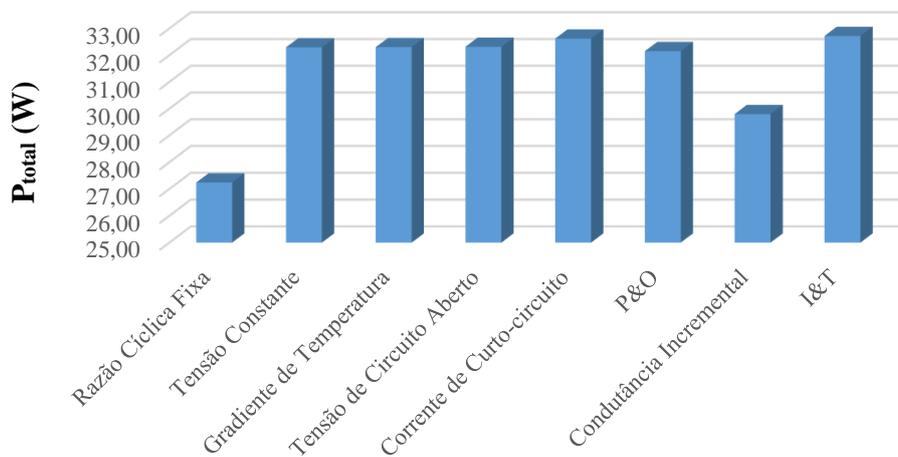


Fig. 4.7 - Comparação dos métodos para variações na irradiância.

Observa-se através do gráfico da Fig. 4.7 que o sistema com o maior rendimento é o método I&T proposto, seguido pela técnica da corrente de curto-circuito. Além disso, verifica-se que os métodos do gradiente de temperatura e da tensão constante, também possuem bom rendimento para as variações na irradiância. Na próxima seção, são observados os resultados para variações na temperatura.

4.3. Variação da temperatura

Partindo para a análise da resposta dos sistemas a variações de temperatura foram realizados cinco tipos de modificações na temperatura dos módulos, mostrados na Fig. 4.8. A resposta do primeiro perfil de variação, temperatura modificada em forma de degrau de 30 °C para 60°C, pode ser observada na Fig. 4.9.

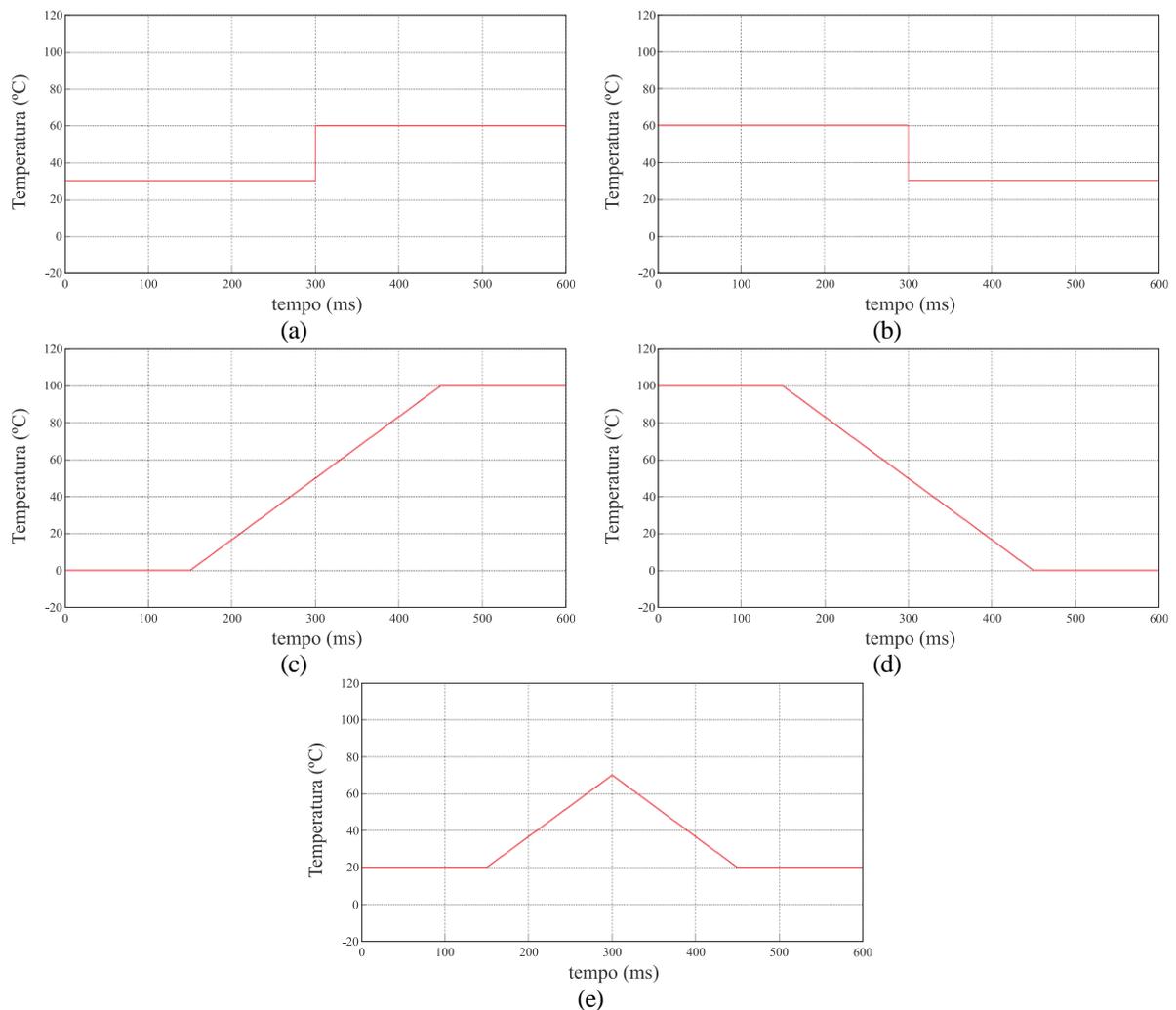


Fig. 4.8 - Perfis de variação da temperatura. (a) 1º perfil - 30 °C para 60 °C, (b) 2º perfil - 60 °C para 30 °C, (c) 3º perfil - 0 °C para 100 °C, (d) 4º perfil - 100 °C para 0 °C, (e) 5º perfil - 20 °C para 70 °C, retornando a 20 °C.

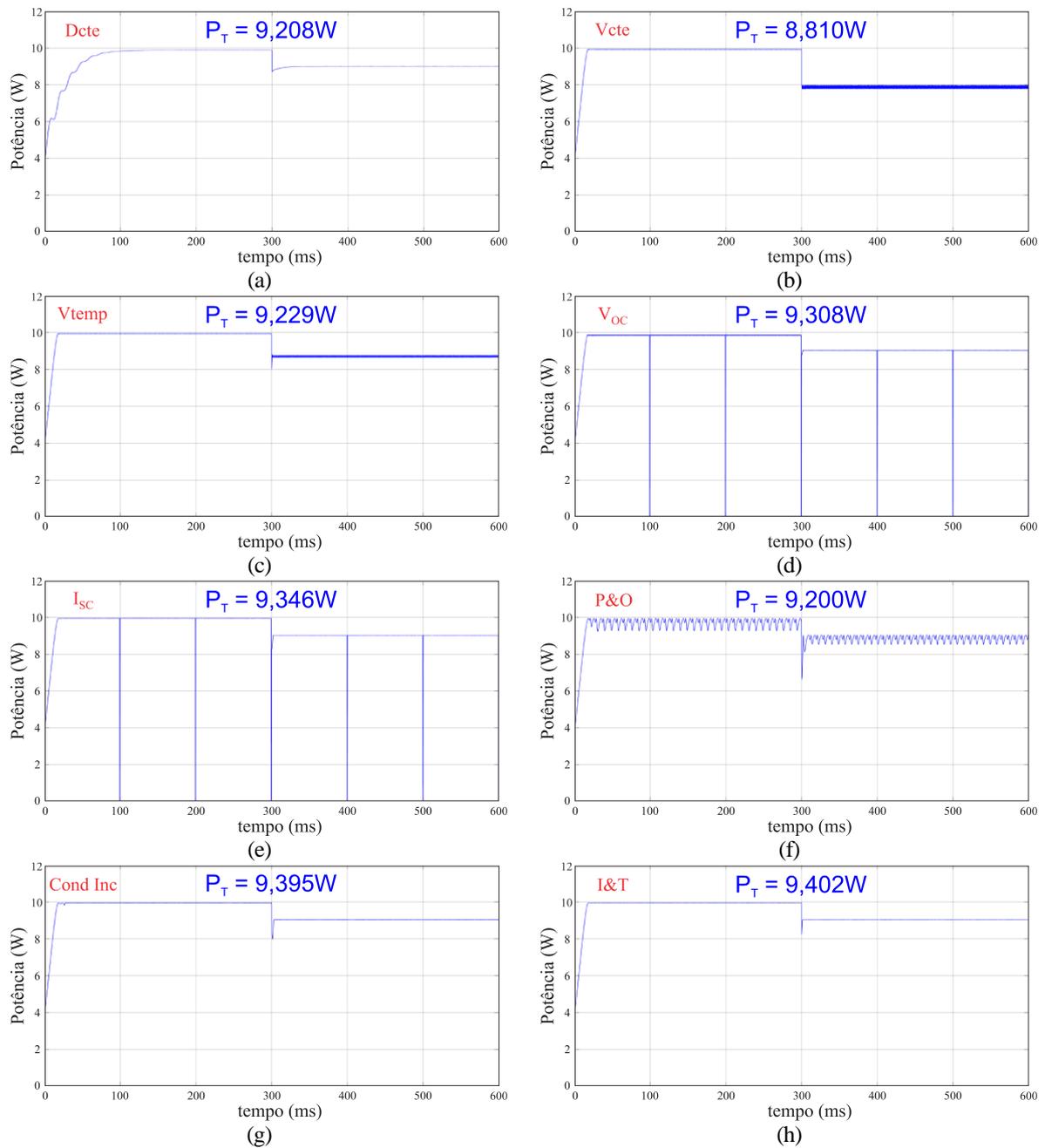


Fig. 4.9 - Potência de saída para o primeiro perfil de variação da temperatura, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

A potência obtida pelo método I&T foi superior aos demais métodos, seguido pelas técnicas da condutância incremental e corrente de curto-circuito. Na sequência, realizou-se uma variação de 60 °C a 30 °C, de acordo com o perfil da Fig. 4.8b. Os resultados são apresentados na Fig. 4.10.

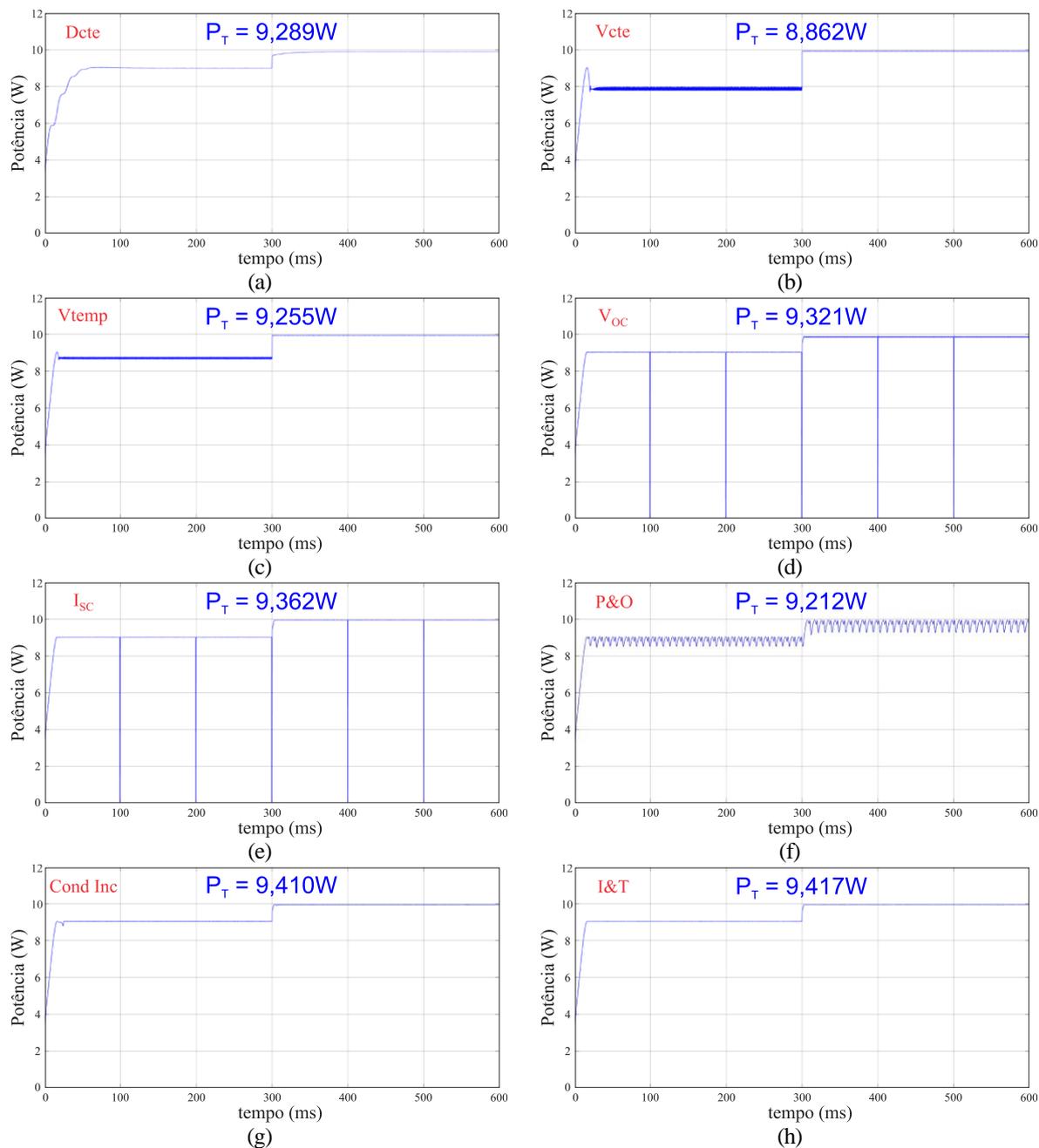


Fig. 4.10 - Potência de saída para o segundo perfil de variação da temperatura, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Os resultados da Fig. 4.10 são semelhantes aos do primeiro perfil de variação, sendo as melhores técnicas: I&T, condutância incremental e corrente de curto-circuito. Para analisar o efeito de uma variação linear de temperatura, de 0 °C a 100 °C e vice-versa, têm-se os perfis da Fig. 4.8c e d, com seus respectivos resultados observados na Fig. 4.11 e Fig. 4.12.

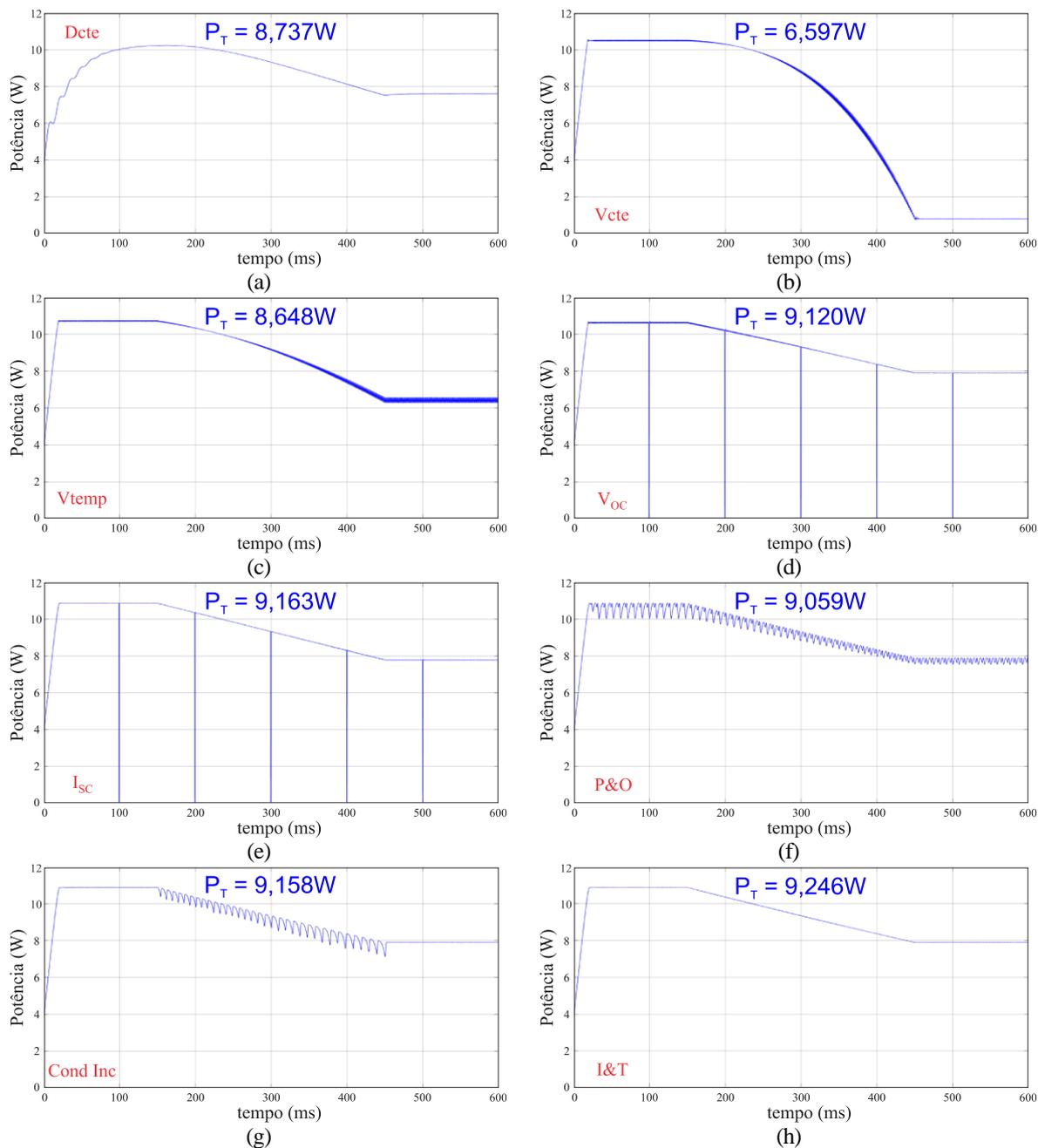


Fig. 4.11 - Potência de saída para o terceiro perfil de variação da temperatura, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Para as variações lineares de temperatura, o desempenho obtido pelo método P&O na Fig. 4.11 e Fig. 4.12 são inferiores aos métodos I&T, da condutância incremental e da corrente de curto-circuito. O baixo desempenho se deve à oscilação do ponto de operação durante a variação linear, causando uma redução na potência de saída. O método da condutância incremental apresentou um excelente desempenho durante a variação da temperatura de 100 °C a 0 °C, no quarto perfil de variação, obtendo o mesmo valor de potência do método I&T.

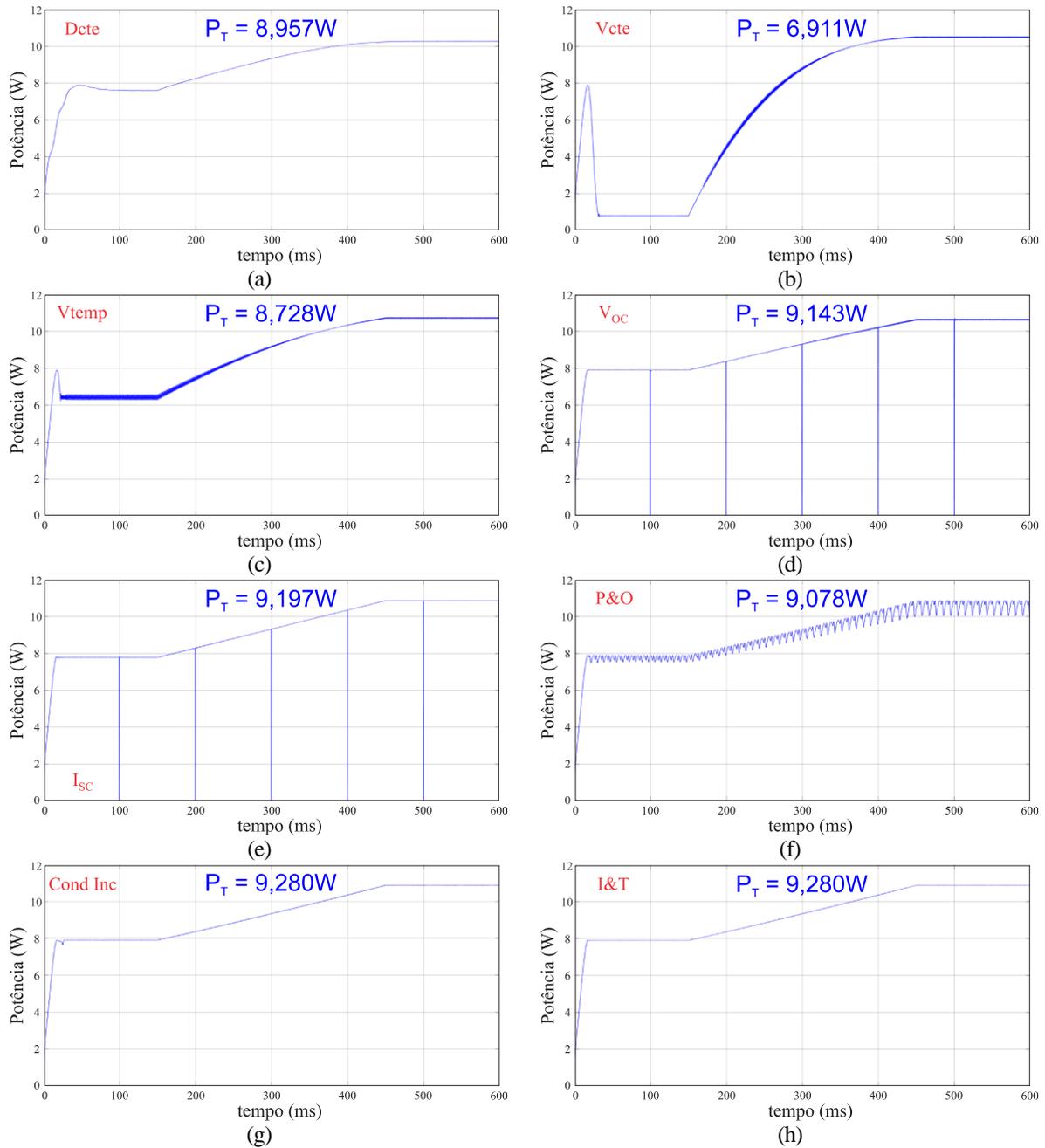


Fig. 4.12 - Potência de saída para o quarto perfil de variação da temperatura, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

No último ensaio de variação da temperatura, realizou-se uma variação linear de 20 °C a 70 °C, retornando a 20 °C. A potência de saída característica de cada um dos métodos pode ser observada na Fig. 4.13.

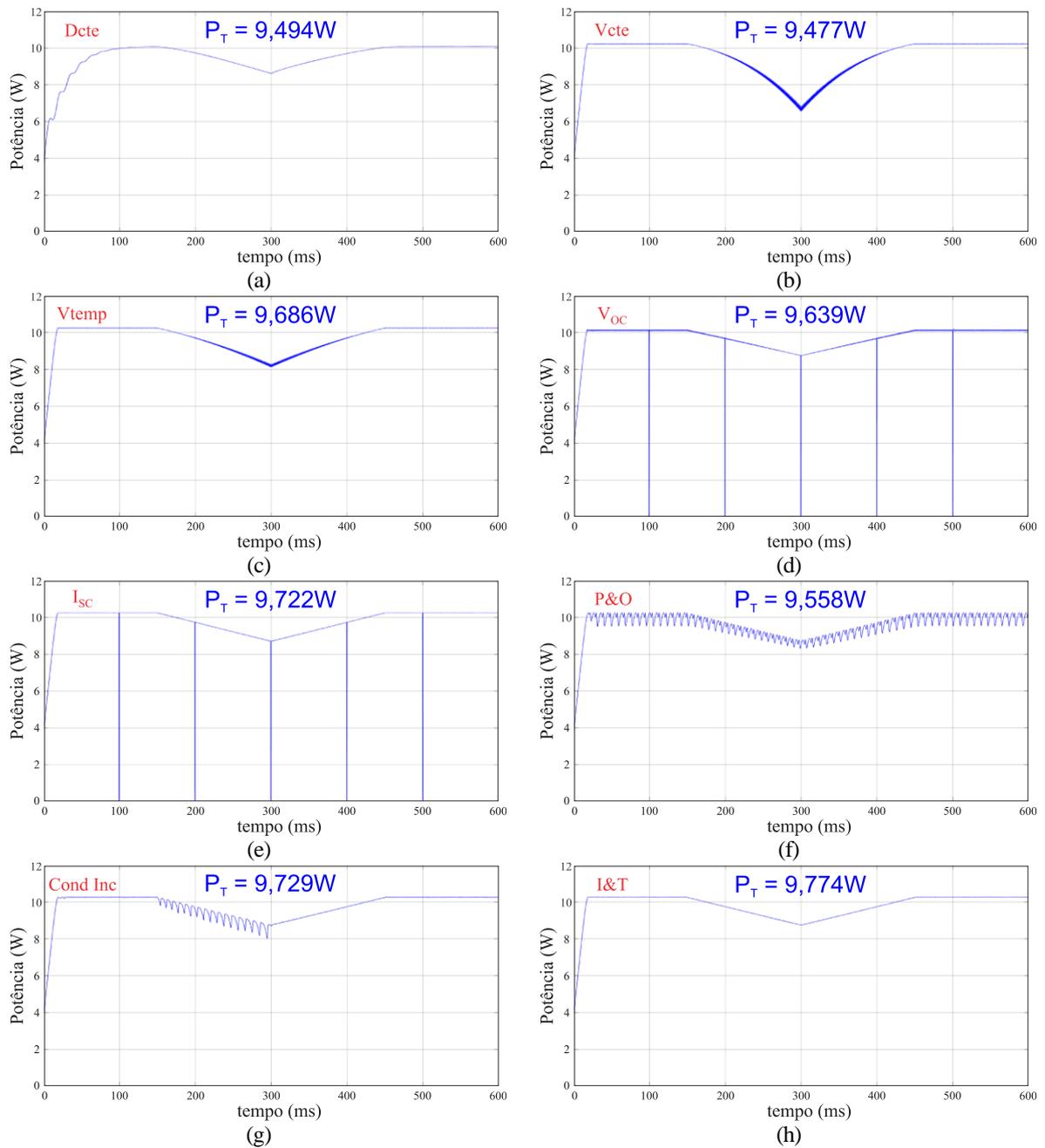


Fig. 4.13 - Potência de saída para o quinto perfil de variação da temperatura, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Na situação da Fig. 4.13, o maior rendimento foi do método I&T, seguido pelas técnicas da condutância incremental e da corrente de curto-circuito. Analisando a potência total de saída, dentre todas as variações de temperatura, tem-se na Fig. 4.14 uma comparação entre os valores obtidos por cada uma das técnicas.

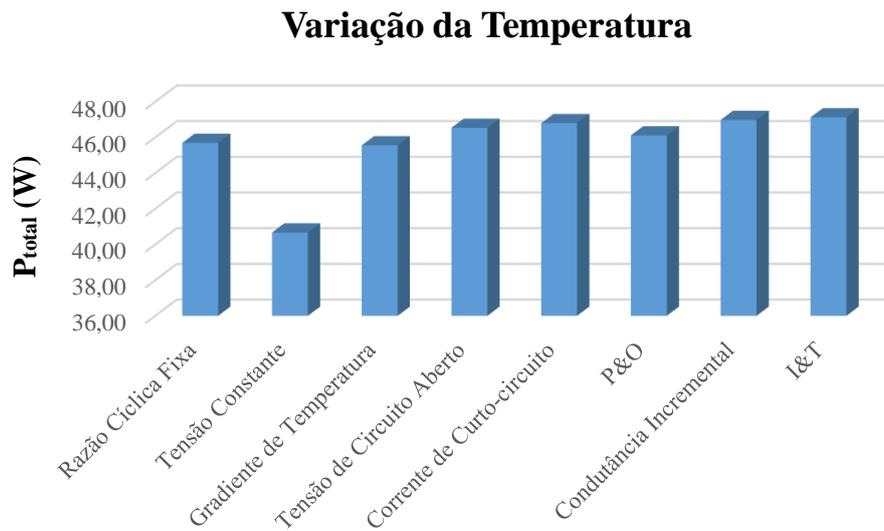
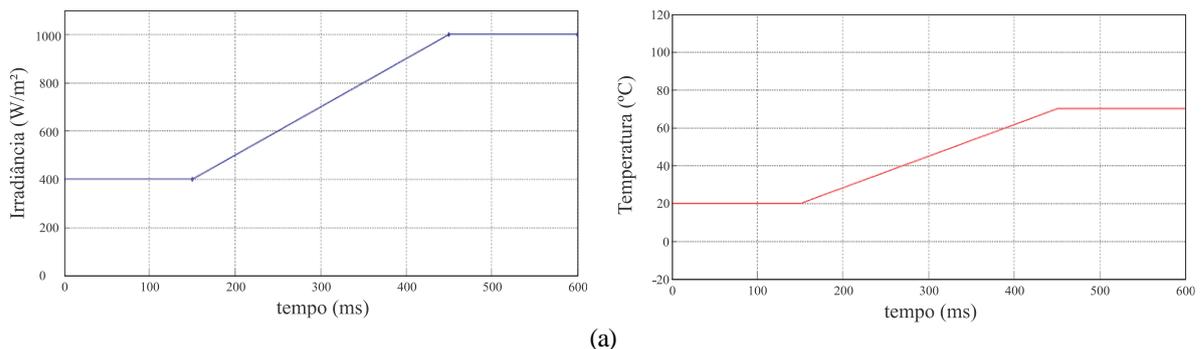


Fig. 4.14 - Comparativo da potência total durante a variação da temperatura.

Apesar de alguns métodos possuírem melhor desempenho durante a variação linear da temperatura em comparação com a variação tipo degrau, a comparação da Fig. 4.14 permite verificar que o sistema I&T proposto possui o melhor rendimento em situações nas quais a temperatura é modificada. Em seguida, tem-se o método da condutância incremental, com rendimento superior ao método da corrente de curto-circuito, que obteve o terceiro melhor desempenho. Na sequência, são avaliadas as situações de variação conjunta da irradiância e da temperatura.

4.4. Variação da irradiância e da temperatura simultaneamente

Para analisar o comportamento do módulo fotovoltaico em condições análogas às situações reais, em que variações de irradiância e temperatura acontecem simultaneamente, foram realizados três ensaios mostrados a seguir. No primeiro teste, a irradiância e a temperatura modificaram-se de forma linear de acordo com os perfis da Fig. 4.15. Os resultados são observados na Fig. 4.16.



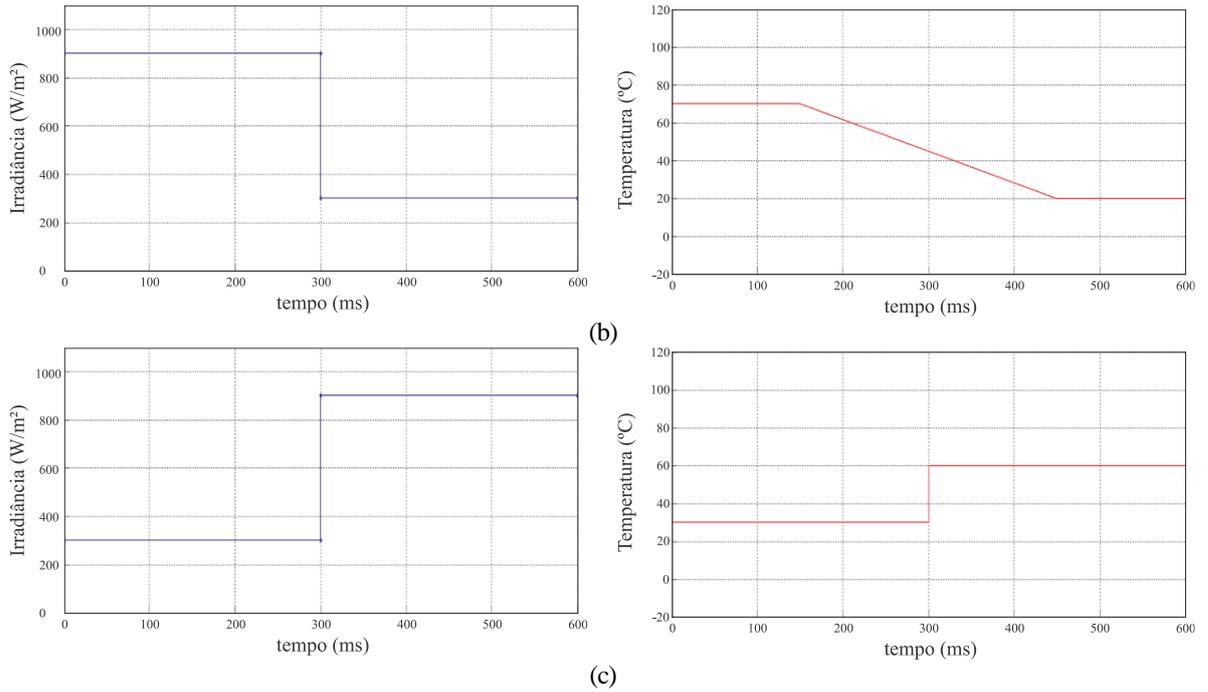
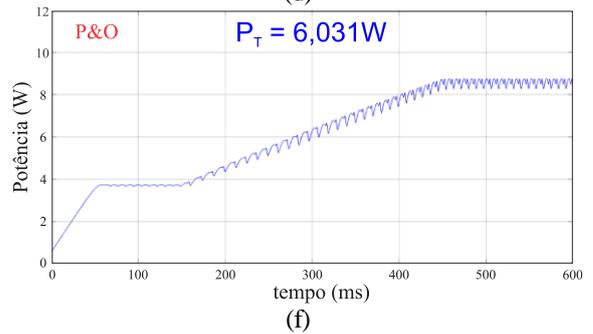
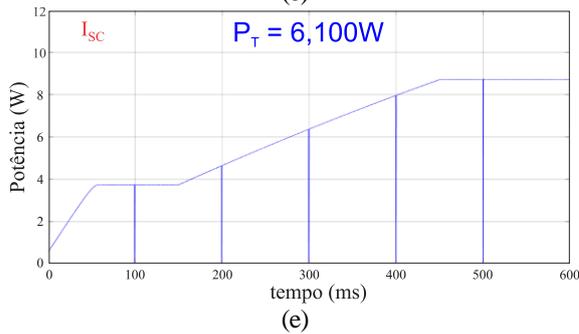
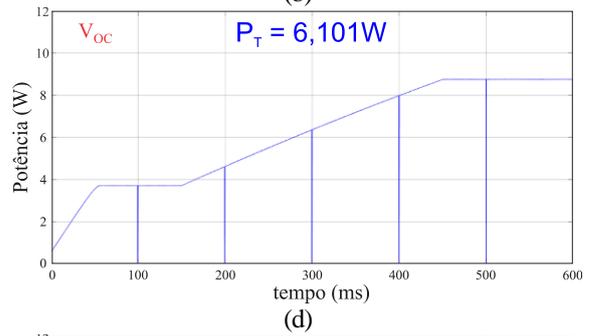
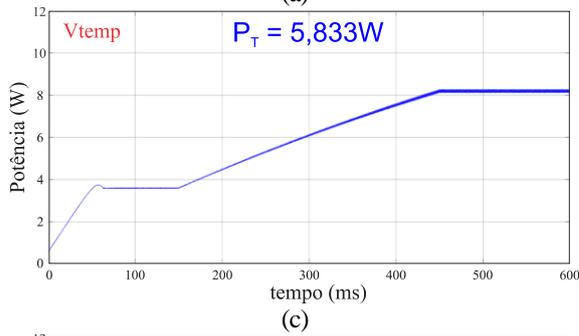
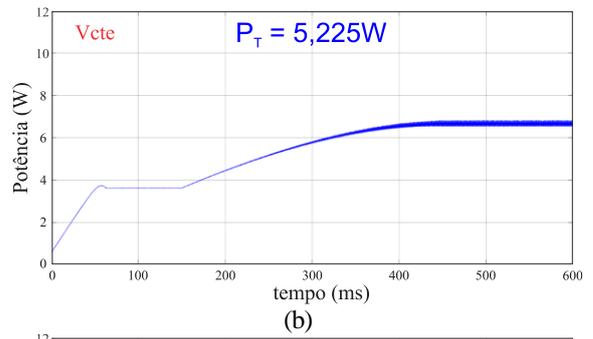
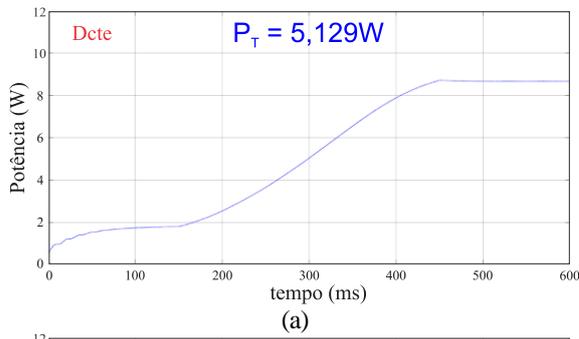


Fig. 4.15 - Perfis de variação simultânea da irradiância e temperatura: (a) 1º perfil - irradiância de 400 W/m² para 1000 W/m² e temperatura de 20 °C a 70 °C, (b) 2º perfil - irradiância de 900 W/m² para 300 W/m² e temperatura de 70 °C a 20 °C, (c) 3º perfil - irradiância de 300 W/m² para 900 W/m² e temperatura de 30 °C a 60 °C.



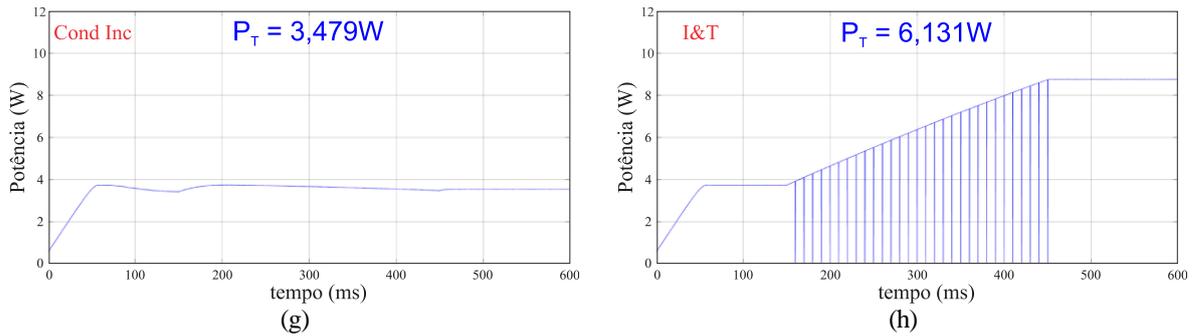
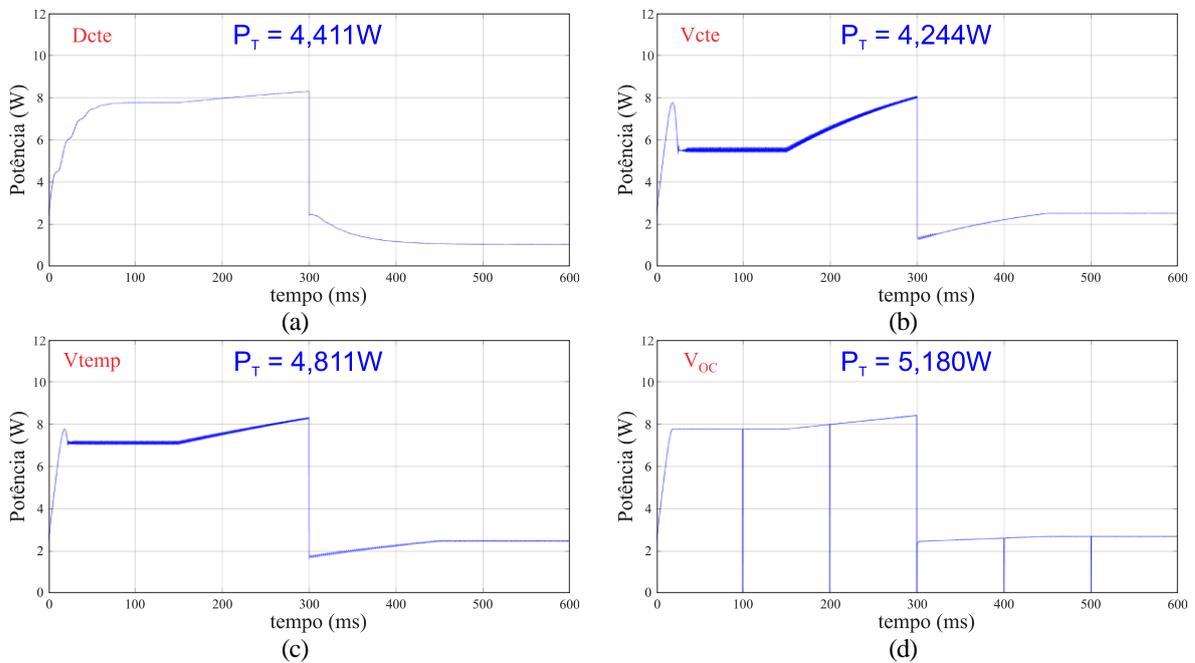


Fig. 4.16 - Potência de saída para o primeiro perfil de variação simultânea da irradiância e temperatura, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Os melhores resultados foram alcançados com o método I&T e as técnicas da tensão de circuito aberto e corrente de curto-circuito, que obtiveram praticamente o mesmo desempenho, com valores de potência média muito próximos. Para o método da condutância incremental, a mesma característica observada durante a variação linear da irradiância se repetiu durante o ensaio da variação simultânea da irradiância e da temperatura, influenciando, consideravelmente, o desempenho durante esse ensaio. No segundo perfil de variação, a irradiância modificou-se em forma de degrau e a temperatura foi alterada linearmente, sendo essa situação semelhante a um dia nublado, por exemplo. Os perfis de variação e os resultados são mostrados na Fig. 4.15b e Fig. 4.17, respectivamente.



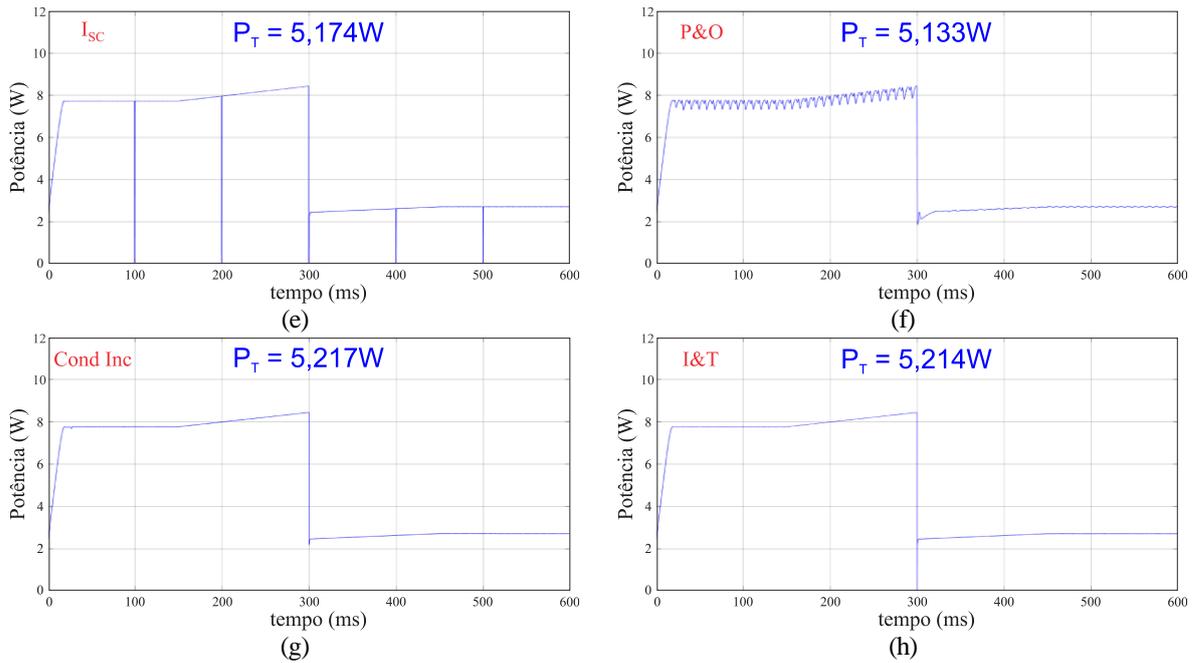
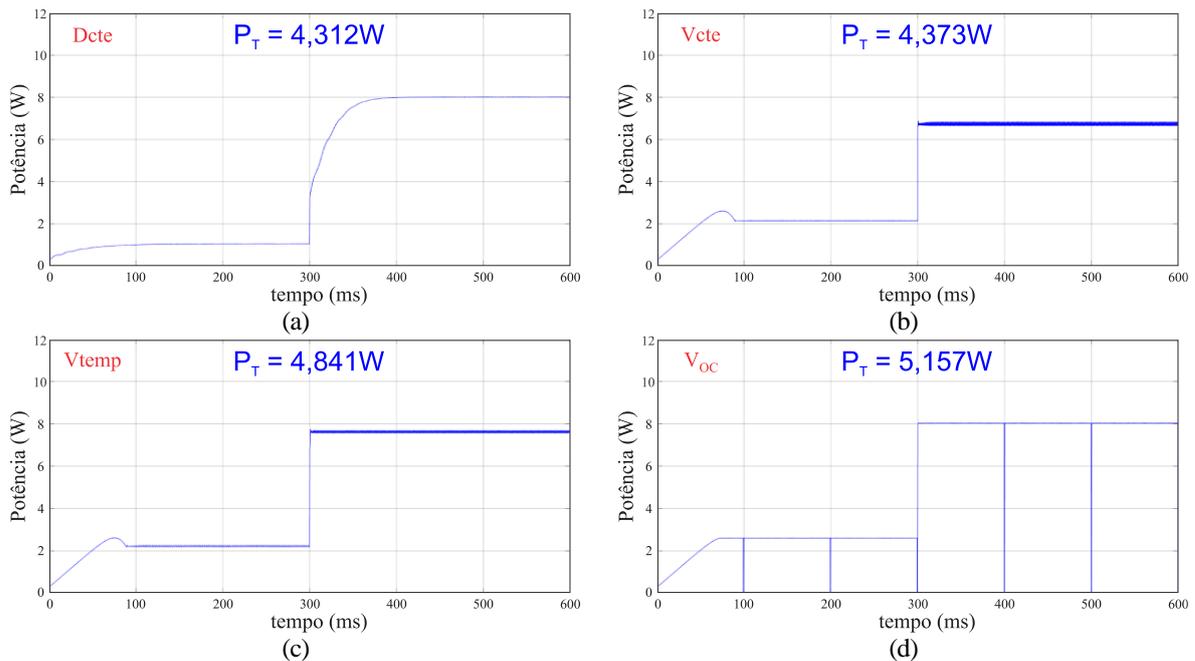


Fig. 4.17 - Potência de saída para o segundo perfil de variação simultânea da irradiância e temperatura, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Nesse ensaio, a técnica da condutância incremental obteve o melhor desempenho, que foi ligeiramente superior à potência obtida através do método I&T. A técnica da tensão de circuito aberto ficou em terceiro lugar. Finalmente, tem-se uma variação em degrau tanto da irradiância quanto da temperatura, para observar a capacidade de resposta dos sistemas a variações bruscas das condições climáticas. Os perfis de variação são vistos Fig. 4.15c e a potência de saída dos sistemas na Fig. 4.18.



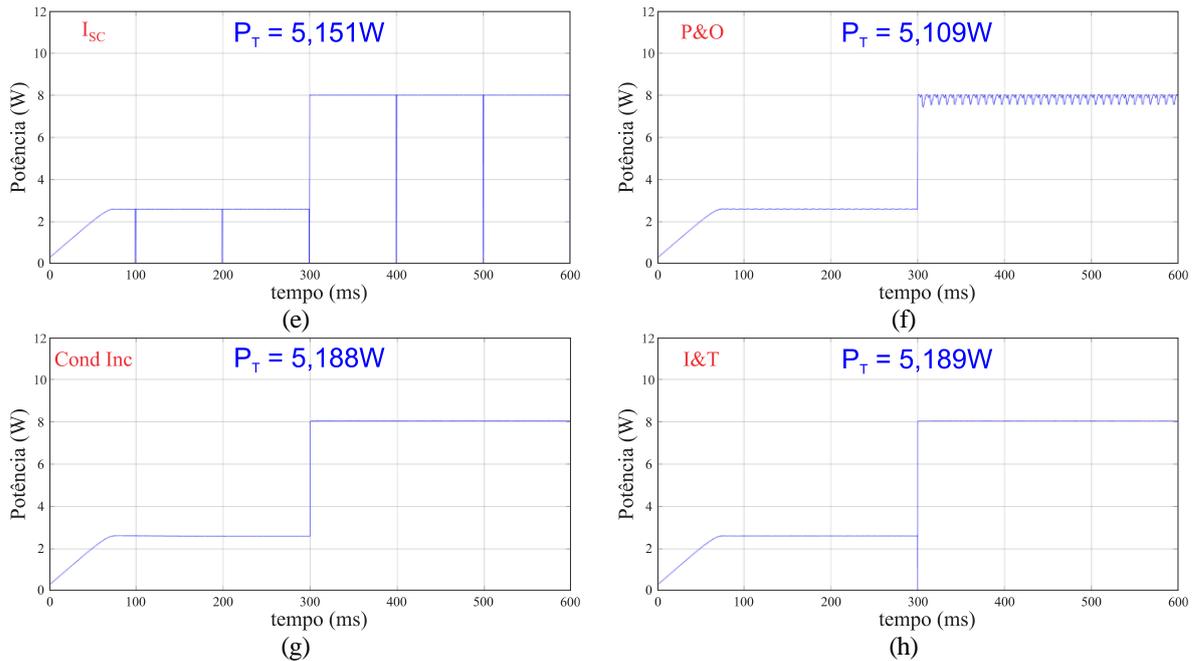


Fig. 4.18 - Potência de saída para o terceiro perfil de variação simultânea da irradiância e temperatura, para a técnica: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Nas condições da Fig. 4.18, o rendimento do método da condutância incremental se aproxima do método I&T, que foi superior. Assim como no segundo perfil de variação, a técnica da tensão de circuito aberto obteve o terceiro melhor desempenho. Analisando o comportamento dos sistemas para as três situações apresentadas nesta seção, é mostrado na Fig. 4.19 um comparativo da potência total obtida.

Variação da Irradiância e Temperatura

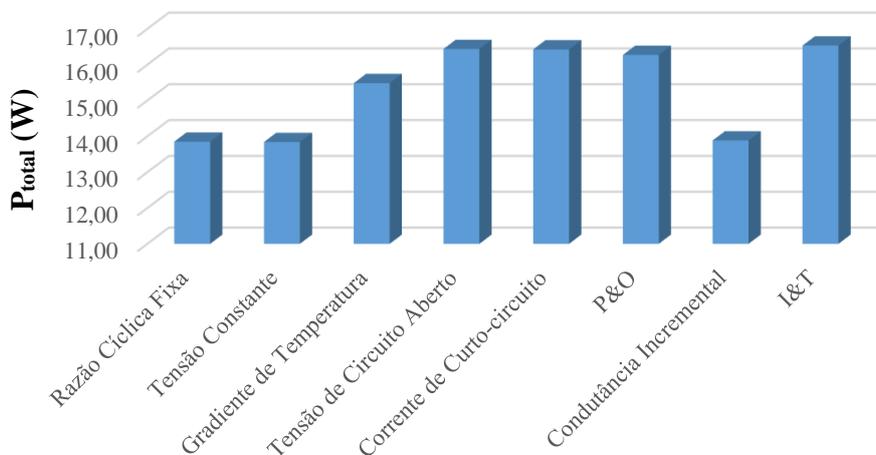


Fig. 4.19 - Comparativo da potência total durante a variação simultânea da irradiância e temperatura.

Observa-se na Fig. 4.19 que o método proposto obteve rendimento superior a todos os demais métodos para variações simultâneas da irradiância e da temperatura, estando os métodos da corrente de curto-circuito e da tensão de circuito aberto em segundo e terceiro lugares. O método da condutância incremental foi prejudicado em função do perfil de irradiância do primeiro ensaio, que reduziu o seu desempenho. Na sequência, são analisadas as respostas dos sistemas em regime permanente.

4.5. Rendimento dos métodos em regime permanente

Por fim, uma análise do comportamento das técnicas de MPPT em regime permanente, com níveis de irradiância e temperatura estáveis, foi realizado. A temperatura foi mantida constante em 45 °C e a irradiância foi modificada de 1000 W/m² a 100 W/m². O rendimento dos métodos é apresentado na Fig. 4.20.

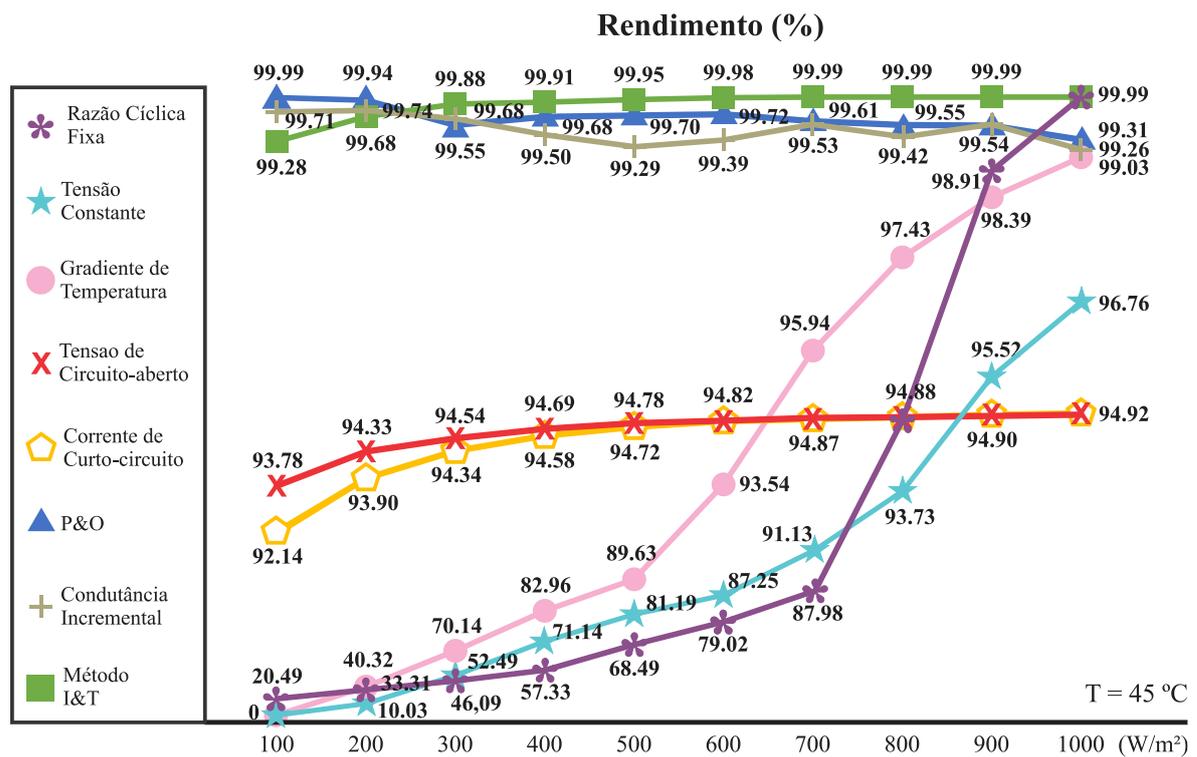


Fig. 4.20 - Comparação do rendimento obtido para as oito técnicas em regime permanente.

De acordo com os resultados da Fig. 4.20 as três estratégias mais eficientes são o método I&T proposto, P&O e condutância incremental. Além disso, uma análise acerca da oscilação em torno do ponto de máxima potência foi realizada, sendo a resposta de cada uma das técnicas apresentada na Fig. 4.21. A irradiância foi mantida em 1000 W/m² e a temperatura encontra-se fixa em 45 °C durante os testes.

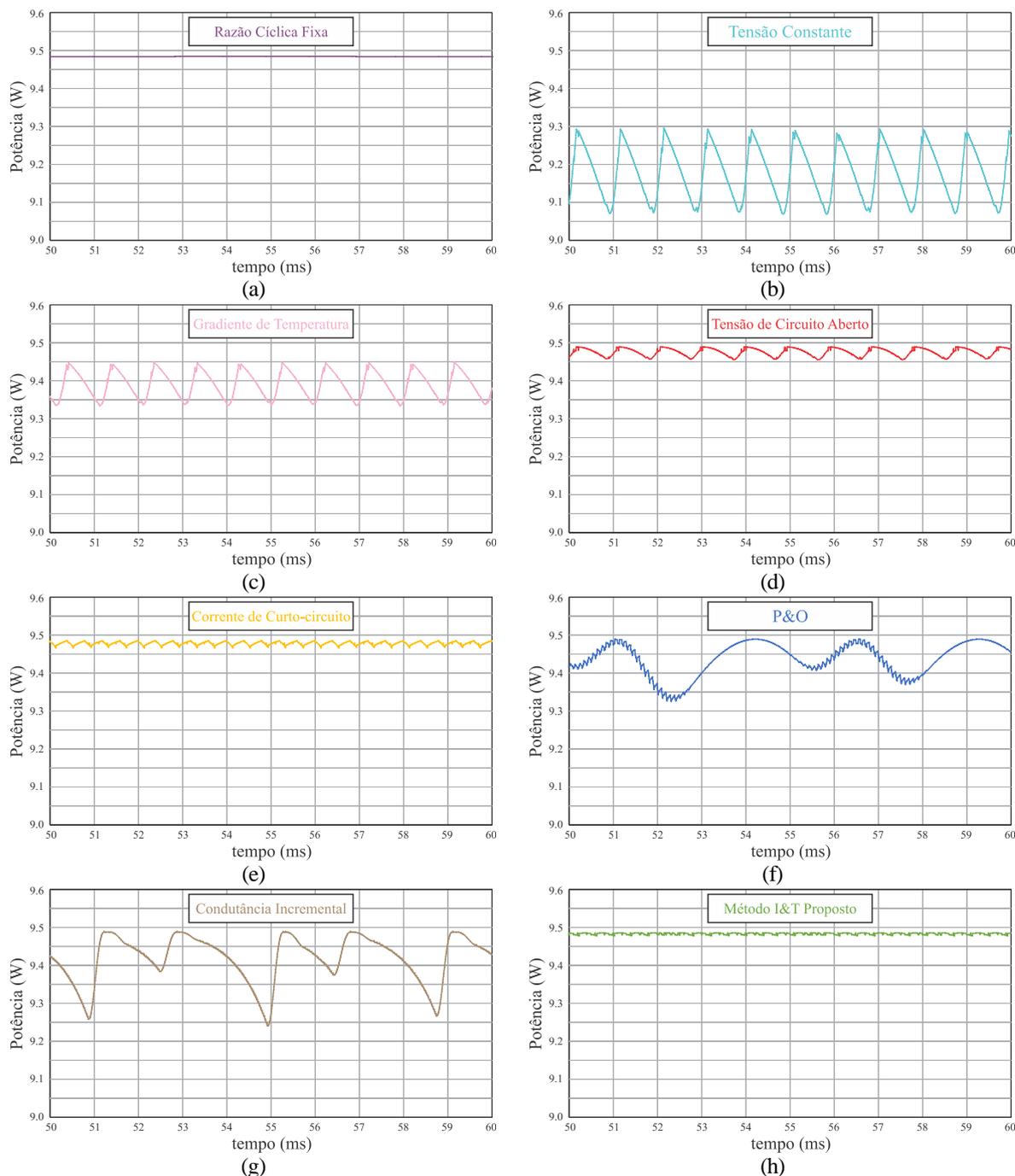


Fig. 4.21 - Comportamento em regime permanente ($S = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$) das técnicas de MPPT: (a) razão cíclica fixa; (b) tensão constante; (c) gradiente de temperatura; (d) tensão de circuito aberto; (e) corrente de curto-circuito; (f) P&O; (g) condutância incremental e (h) método I&T proposto.

Os sistemas que apresentam a menor oscilação em torno do ponto de máxima potência são o método da razão cíclica fixa, o método I&T proposto e da corrente de curto-circuito. É natural que o método da razão cíclica fixa não oscile, pois o mesmo não realiza a amostragem de nenhuma variável, mantendo a tensão de saída constante. Para o método da corrente de curto-circuito, apesar de haver uma pequena oscilação em torno do ponto de máxima potência, a constante abertura do circuito para medida das grandezas do sistema de controle torna essa

técnica pouco interessante devido à perda de energia durante a abertura do interruptor. As técnicas P&O e da condutância incremental, mesmo apresentando um bom rendimento em regime permanente, oscilam em torno do ponto de máxima potência devido ao funcionamento do algoritmo de controle das técnicas, que está constantemente em busca do MPP.

4.6. Conclusão

Através das análises desenvolvidas ao longo desse capítulo, foi possível comprovar a eficiência de cada uma das técnicas de MPPT quando submetidas a variações de irradiância e / ou temperatura. Além disso, por meio das comparações realizadas observou-se que, apesar de algumas técnicas realizarem a amostragem de variáveis complexas ou, ainda, utilizarem sistemas que possuem maior esforço computacional, isso não resulta, necessariamente, em uma potência de saída maior em todas as condições de operação e para todos os tipos de variação. Entretanto, na maior parte das condições simuladas, o método I&T proposto obteve o melhor desempenho, exceto na análise da oscilação em torno do ponto de máxima potência. Nessa situação, o método proposto ficou em segundo lugar, estando a técnica da razão cíclica fixa em primeiro devido ao valor constante da razão cíclica do conversor.

Capítulo 5

5. Resultados experimentais

5.1. Introdução

Nesse capítulo, é apresentada a especificação dos componentes, bem como dos sensores utilizados na amostragem das grandezas e os recursos para variação da irradiância. Além disso, resultados experimentais, com perfis de irradiância e temperatura constantes e variáveis, serão analisados. Ao final, uma comparação entre os resultados de simulação e os resultados práticos será utilizada para validar a modelagem do sistema e a eficiência do método I&T proposto.

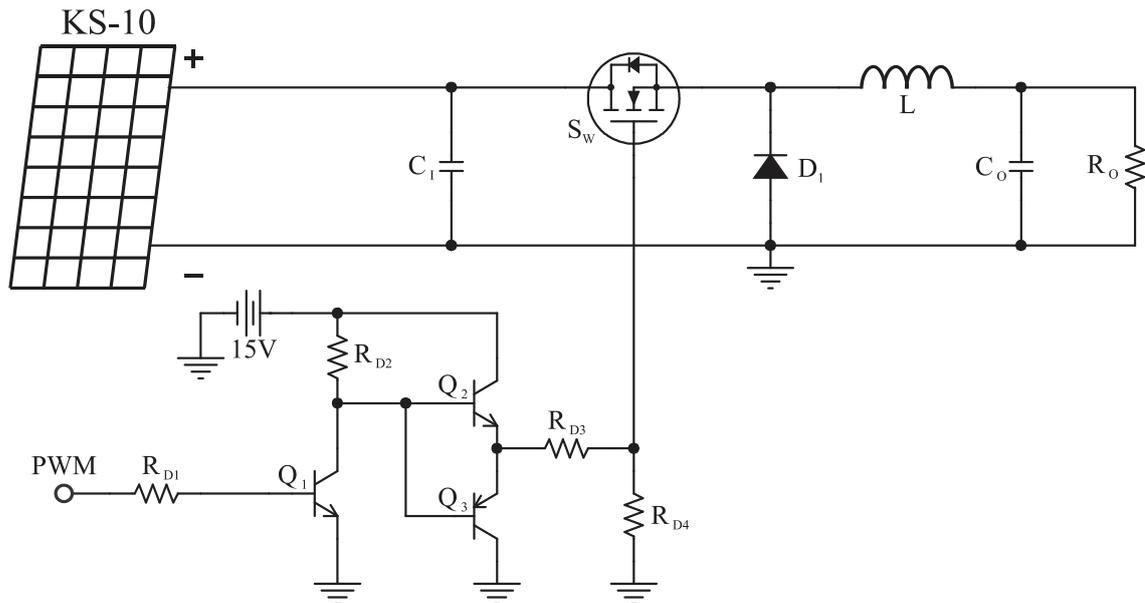
5.2. Desenvolvimento da bancada de testes

5.2.1. Construção do conversor CC-CC *buck*

Com a finalização dos testes computacionais, deu-se início à etapa de construção da bancada de testes, para se obter os resultados práticos. A primeira etapa deu-se com a construção do conversor CC-CC *buck*, projetado na seção 2.5. Os parâmetros do conversor estão definidos na Tabela 2.2. O indutor foi projetado utilizando como referência documentações técnicas [16], [43] e [44].

Como dispositivo de controle do conversor *buck*, utilizou-se o microcontrolador ATMEGA2560, produzido pela Atmel Corporation[®]. O dispositivo em questão é um microcontrolador de 8 *bits*, com capacidade de processamento de até 16 MIPS (Milhões de Instruções Por Segundo). Esse microcontrolador é de baixo custo e fácil integração com diversos componentes, devido à utilização em kits de programação da plataforma Arduino[®] [45], permitindo integrá-lo a sistemas que são construídos especificamente para essa plataforma.

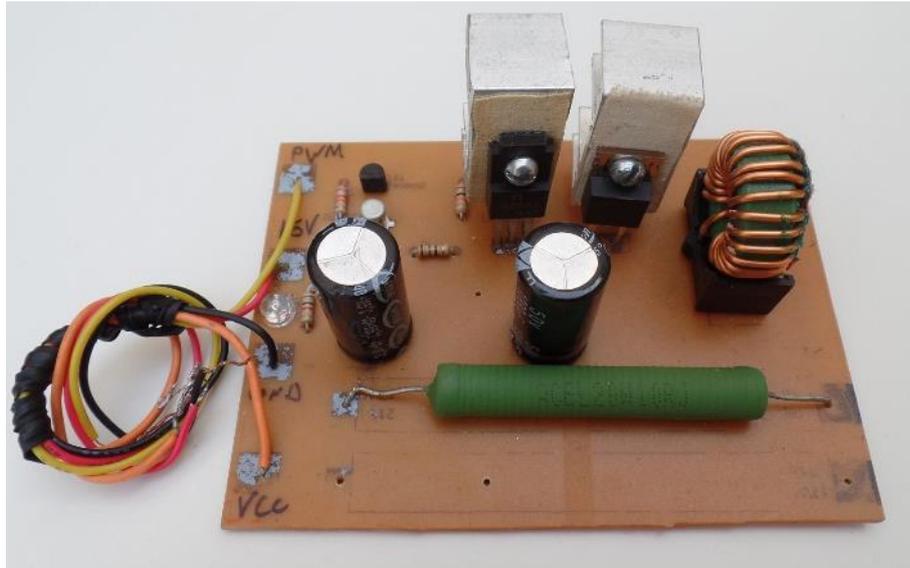
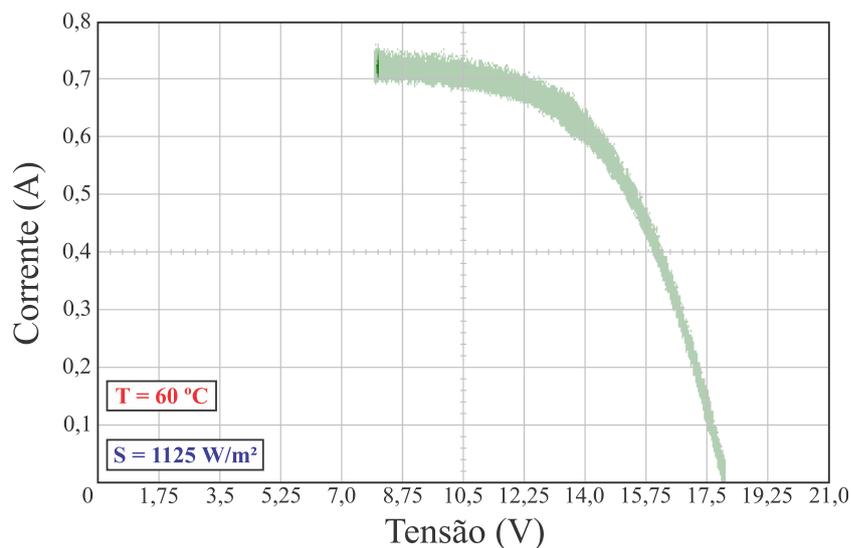
O circuito para acionamento do interruptor foi obtido a partir de [16] e [44]. O diagrama esquemático do conversor *buck* implementado em conjunto com o circuito de acionamento é visto na Fig. 5.1. A Tabela 5.1 detalha os componentes utilizados na montagem do conversor.

Fig. 5.1 - Diagrama esquemático do conversor *buck* com o circuito de acionamento do interruptor.Tabela 5.1 - Componentes do conversor *buck* implementado.

Componente	Tipo	Especificação
f_s	Frequência de comutação	31 kHz
C_1	Capacitor eletrolítico	1 mF/50 V
C_o	Capacitor eletrolítico	1 mF/50 V
L	Indutor	6,48 mH
R_o	Resistor de fio	10 Ω /20 W
D_1	Diodo ultrarrápido	15ETH06
S_w	Interruptor	MOSFET K2299
R_{D1}	Resistor de carbono	22 k Ω /0,25 W
R_{D2}	Resistor de carbono	390 Ω /0,25 W
R_{D3}	Resistor de carbono	12 Ω /0,25 W
R_{D4}	Resistor de carbono	10 k Ω /0,25 W
Q_1	Transistor 2N2222	TBJ
Q_2	Transistor 2N2222	TBJ
Q_3	Transistor 2N3906	TBJ

Os componentes utilizados na confecção do protótipo foram selecionados em função de suas especificações e devido à disponibilidade dos mesmos. A frequência de comutação do conversor foi inicialmente definida em 50 kHz porém, devido à limitação do microcontrolador utilizado, a mesma foi modificada para 31 kHz. O protótipo experimental do conversor e o circuito de acionamento do interruptor podem ser vistos na Fig. 5.2.

Para avaliar o funcionamento do conversor, bem como o comportamento da curva $I \times V$ do módulo fotovoltaico quando conectado a um conversor *buck* [16], realizou-se uma variação da razão cíclica do conversor, de 1 a 99%, sendo que foi extraída a curva $I \times V$ vista na Fig. 5.3.

Fig. 5.2 - Conversor *buck* desenvolvido.Fig. 5.3 - Curva $I \times V$ obtida através do conversor *buck* para a condição de $S = 1125 \text{ W/m}^2$ e $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Os pontos localizados abaixo do valor de tensão de 8,0 V não podem ser alcançados devido a uma limitação desse tipo de conversor [16]. Porém, essa limitação não interfere na busca pelo ponto de máxima potência nas situações que serão analisadas, tendo em vista que os pontos de máxima potência estarão localizados à direita desse ponto, como observado no Capítulo 3. A limitação do uso desse conversor na busca do MPP se aplica a sistemas onde a temperatura ultrapassa 100 °C [16], sendo que a máxima temperatura medida no módulo durante os testes foi de 70 °C.

5.2.2. Circuitos de medição da tensão, corrente e temperatura do módulo

Na sequência, foram analisados os circuitos auxiliares, responsáveis pela medição das grandezas de controle: tensão, corrente e temperatura. Para a amostragem de tensão, existem quatro tipos principais de medidores: transformadores de pulso, medidores isolados, sensores de efeito Hall e divisores resistivos. Os transformadores de pulso realizam a adequação dos níveis de tensão através da relação de espiras do transformador, que garante a isolação entre os circuitos de potência e medição, porém, são restritos a sistemas de corrente alternada. Tendo em vista o nível de tensão do módulo KS-10, próximo a 20 V, o uso de medidores isolados e de efeito Hall não se justifica, devido ao custo elevado desse tipo de medidor. Sendo assim, optou-se pelo uso do divisor resistivo, visto na Fig. 5.4, para realizar a amostragem de tensão.

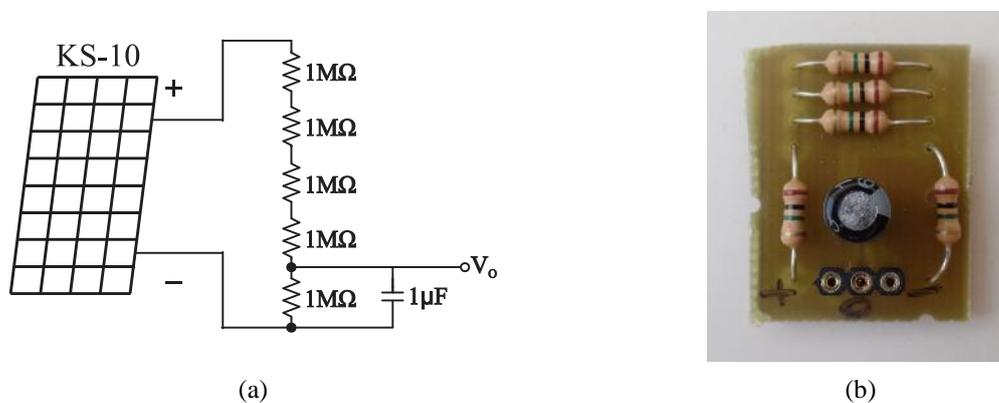


Fig. 5.4 - Circuito para aquisição da tensão do módulo: (a) diagrama elétrico, (b) circuito implementado.

O circuito desenvolvido utiliza cinco resistores de 1 MΩ, em que uma tensão proporcional à tensão do módulo é amostrada pelo conversor analógico/digital (A/D) do microcontrolador. O capacitor em paralelo com o resistor foi introduzido para diminuir as oscilações de tensão durante a amostragem. Os testes realizados comprovaram o desempenho satisfatório do circuito de medição, que apresentou erros inferiores a 2% durante as medições, quando comparado com as medições realizadas com o multímetro Agilent® modelo U1241B. Uma parcela do erro de medição é devido aos ruídos do sistema de conversão, que apresenta uma faixa de erro de até 2 *bits* [45], que é aceitável para a utilização no sistema de aquisição.

A segunda grandeza a ser amostrada foi o valor da corrente de saída do módulo. Existem diversas formas de realizar a amostragem dessa grandeza, com circuitos que utilizam transformadores, amplificadores de instrumentação e sensores de efeito Hall. Assim como os transformadores utilizados para a aquisição de tensão, os transformadores de corrente são restritos a circuitos em corrente alternada. O segundo tipo de sensor, que são amplificadores de

instrumentação, são compactos e capazes de medir correntes muito pequenas [46], devido ao alto ganho desses dispositivos, porém, são sensíveis a ruídos. Sendo assim, optou-se pelo último tipo, o sensor de efeito Hall, que possui dimensões reduzidas e é capaz de medir baixas correntes, com uma faixa de erro na casa de poucos miliampères.

Dentre os modelos de sensores de efeito Hall disponíveis, dois foram escolhidos para análise, o sensor LA25NP da LEM[®] e o sensor ACS712 da Allegro[®]. Os dois sensores possuem uma faixa de aplicação semelhante, com modelos que realizam a medição de até 30 A e possibilidade de modificação do ganho. O primeiro é alimentado através de uma fonte simétrica e, apesar de possuir um menor erro de medição, o ganho máximo do dispositivo, que é de 1/200, inviabiliza sua utilização, tendo em vista que os níveis de corrente do módulo fotovoltaico estão na faixa de 100 a 800 mA. O segundo componente, ACS712, possui uma maior sensibilidade à corrente, de até 185 mV/A, e pode ser alimentado através de uma fonte unipolar, de 0 a 5 V [47]. Em razão dessas características, optou-se por utilizá-lo.

Tendo em vista os valores de corrente a serem medidos e a resolução do conversor A/D do sistema de aquisição, que é de 10 *bits*, desenvolveu-se um circuito de adequação do sinal para diminuir a influência dos ruídos na medição. A saída do sensor ACS712 possui um deslocamento de 2,5 V do sinal medido, o que permite ao sensor medir correntes alternadas sem utilizar uma fonte simétrica. Porém, para medições em corrente contínua que utilizem a faixa de conversão de 0 a 5 V, o sinal de 2,5 V deve ser retirado das amostras, possibilitando a amplificação do sinal de saída e, conseqüentemente, o aumento da resolução da leitura do valor de corrente do sensor. Com o intuito de eliminar o deslocamento de 2,5 V e amplificar o sinal medido pelo sensor de corrente, desenvolveu-se o circuito da Fig. 5.5.

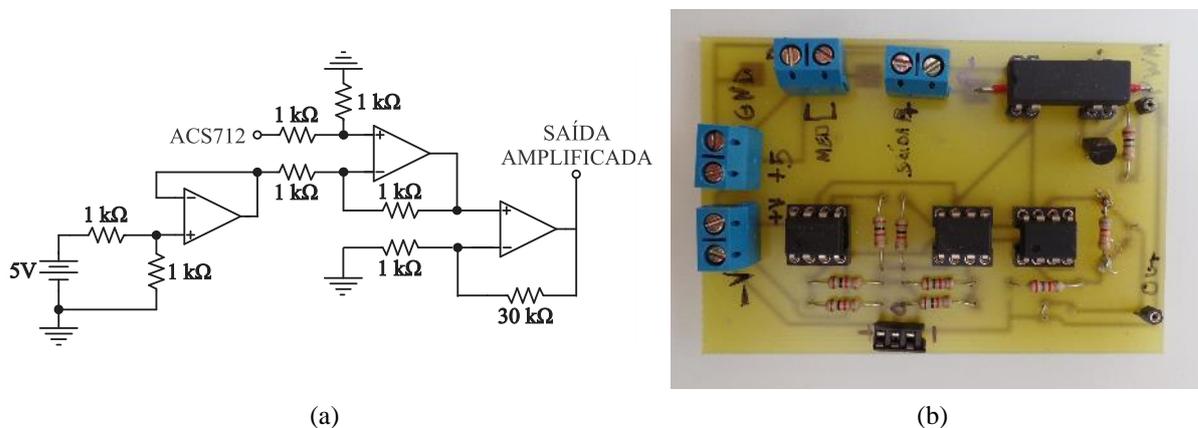


Fig. 5.5 - Circuito de adequação do sinal de corrente: (a) diagrama elétrico, (b) circuito implementado.

O ganho de tensão do circuito da Fig. 5.5a é de 31 V/V dessa forma, o maior valor de corrente que poderá ser lido pelo circuito é de 871 mA e o menor de, aproximadamente, 1 mA (desconsiderando-se os erros dos circuitos de aquisição e amostragem). Para a montagem desse circuito escolheu-se o amplificador operacional OP07C [48] que possui baixo deslocamento (na faixa de 100 μ V), tendo em vista que a leitura de corrente poderia ser alterada pelo ruído do amplificador.

Após a montagem do circuito, foram realizados testes experimentais de medição da corrente. Para analisar a linearidade dos valores medidos com o sensor ACS712 e permitir sua calibração através da programação do microcontrolador, os valores obtidos foram comparados com um multímetro Agilent® modelo U1241B, que possui uma precisão de 1,5%. No circuito de teste utilizou-se uma fonte de tensão Agilent® U8030A, de saída variável, conectada a um resistor de 10 Ω / 20 W, estando os dois medidores em série, com a saída do ACS712 conectada à entrada do microcontrolador ATMEGA2560. Foram analisados sete sensores ACS712 diferentes, sendo os resultados apresentados na Tabela 5.2. As leituras foram exibidas através de um *display* LCD conectado ao microcontrolador.

Tabela 5.2 - Corrente medida através do sensor ACS712.

Sensor	Corrente (mA)											
	200	Erro	300	Erro	400	Erro	500	Erro	600	Erro	700	Erro
1	122	39%	272	9%	390	3%	570	14%	694	16%	849	21%
2	154	23%	286	5%	399	0%	537	7%	660	10%	774	11%
3	158	21%	282	6%	395	1%	536	7%	659	10%	778	11%
4	229	15%	311	4%	402	1%	477	5%	566	6%	642	8%
5	165	18%	287	4%	394	2%	530	6%	645	8%	767	10%
6	168	16%	284	5%	389	3%	535	7%	645	8%	768	10%
7	200	0%	294	2%	404	1%	505	1%	600	0%	699	0%

A partir dos resultados da Tabela 5.2 verificou-se que o sensor que apresentou os menores erros de medição, com erros inferiores a 2% quando comparado com as leituras realizadas através do multímetro, foi o sensor 7. Devido a essa característica, que é satisfatória para o sistema de medição, o mesmo será utilizado na bancada de testes.

Finalmente, para a medição da temperatura, foram analisados três sensores distintos: LM35 da Texas Instruments®, DS18B da Maxim® e DHT22 da Aosong Electronics®. Utilizando o mesmo procedimento de teste dos demais sensores, foram realizados testes de medição da temperatura para avaliar a linearidade dos sensores. A referência para a leitura de temperatura foi obtida com o medidor Fluke® 561, capaz de medir a temperatura através de um

sensor infravermelho e também com o uso de um termopar. Esse medidor foi utilizado por ser um aparelho calibrado e com exatidão superior a 1%. A informação dos demais sensores foi disponibilizada por meio de um *display* LCD conectado ao microcontrolador.

Dos três sensores disponíveis, dois deles fornecem a leitura de temperatura de forma digital, o DS18B e o DHT22. A leitura do sensor LM35 é feita de forma analógica, sendo a saída de tensão desse sensor proporcional a 10 mV/°C. Tendo em vista que a resolução do conversor A/D do microcontrolador utilizado é de 10 *bits*, em uma faixa que vai de 0 a 5 V, é interessante realizar o condicionamento do sinal do sensor LM35. Sem a utilização de um circuito de condicionamento, o menor valor de temperatura amostrado pelo microcontrolador seria de 0,5 °C. Com o intuito de ampliar a resposta do conversor A/D, desenvolveu-se um circuito de condicionamento para o sensor LM35 com um ganho de 6 V/V, visto na Fig. 5.6, capaz de diminuir os erros de conversão e permitir uma leitura mínima de até 0,1 °C.

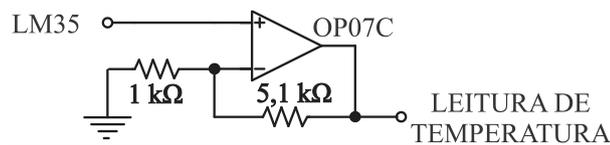


Fig. 5.6 - Circuito de condicionamento do sensor LM35.

Com a utilização do circuito de condicionamento foi possível monitorar valores de temperatura em intervalos de 0,1 °C. Entretanto, a necessidade de alimentação do circuito através de uma fonte simétrica, assim como a menor velocidade de convergência do sensor LM35, quando comparado aos demais sensores, fez com que o mesmo fosse descartado.

Em seguida, novos testes de medição da temperatura foram realizados. Os dois sensores em questão, o DS18B e o DHT22, foram colocados na parte de trás de um módulo fotovoltaico, modelo KS-10 da Kyocera®, juntamente com o termopar do medidor Fluke® 561. Foram avaliados 80 pontos de medição durante 40 minutos, sendo cada ponto tomado em intervalos de 30 segundos. A comparação entre os valores obtidos pelos sensores é mostrada na Fig. 5.7.

Observa-se, por meio da Fig. 5.7, que o sensor DHT22 é o que mais se aproxima das medições obtidas através do termopar do medidor Fluke® 561. Além disso, também foi possível perceber que o sensor DHT22 converge mais rapidamente para o valor da temperatura lida pelo termopar, do que o sensor DS18B. Em função dessas características, optou-se pelo sensor DHT22.

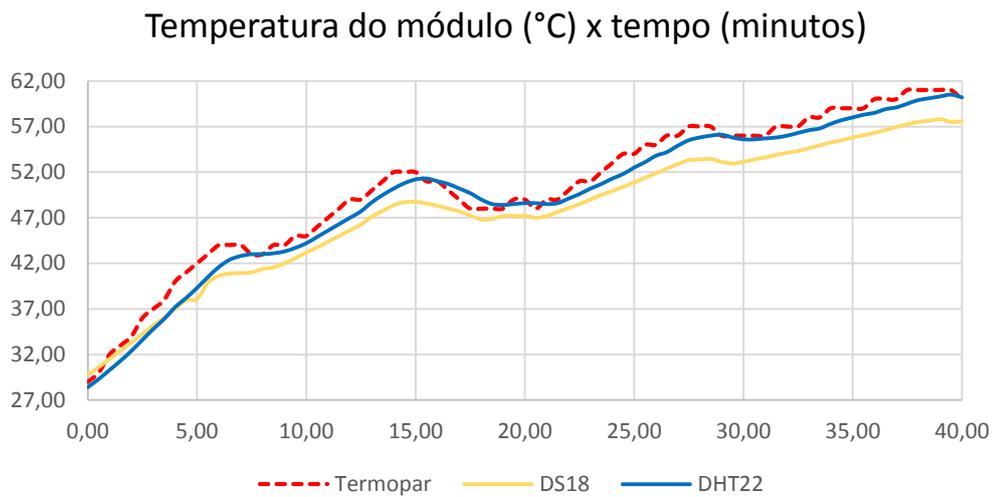


Fig. 5.7 - Leitura de temperatura obtida através dos sensores colocados junto ao módulo fotovoltaico.

5.2.3. Circuito de medição da corrente de curto-circuito

O desenvolvimento de um circuito para medição da corrente de curto-circuito se fez necessário tendo em vista que o mesmo será utilizado nas técnicas da corrente de curto-circuito e no método I&T proposto.

O objetivo desse circuito é permitir a medição dessa grandeza a partir de um pulso de controle, a ser aplicado em uma chave do circuito, capaz de curto-circuitar os terminais do módulo. Foram analisados diferentes interruptores para aplicação nesse circuito, contudo, devido à simplicidade de seu circuito de disparo e a independência da referência do circuito principal, utilizou-se um relé HE721A da Hamlin[®]. Sua desvantagem em relação aos demais interruptores se deve à baixa frequência de comutação, em torno de 1 kHz, o que não afetará o sistema de amostragem da corrente de curto-circuito, que possui uma frequência de amostragem inferior a 1 Hz. O circuito desenvolvido é visto na Fig. 5.8.

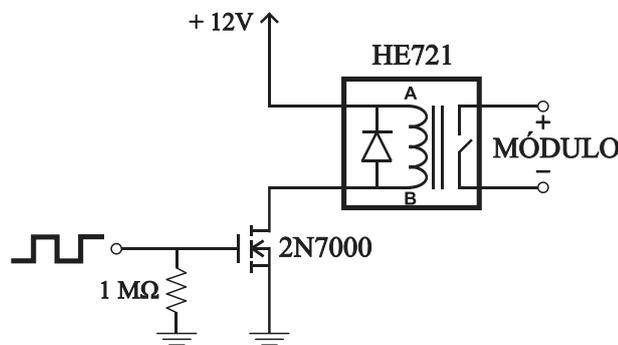


Fig. 5.8 - Circuito de medição da corrente de curto-circuito.

Para diminuir o número de sensores no circuito, o medidor de corrente, apresentado na Seção 5.2.2, foi associado em série com os terminais do módulo, como mostrado na Fig. 5.9, permitindo que o mesmo sensor realize medições da corrente de saída do módulo, assim como de sua corrente de curto-circuito.

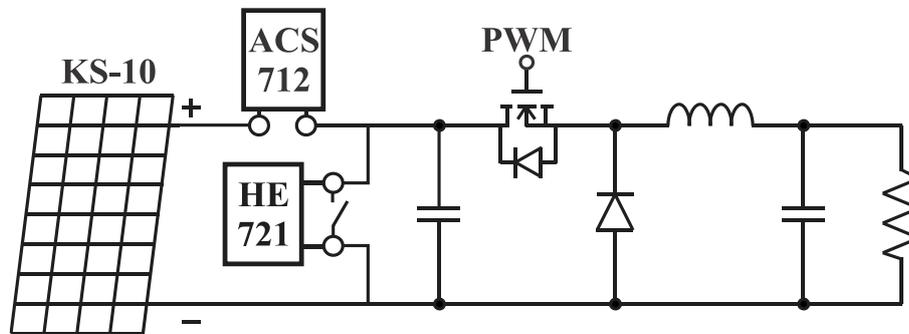


Fig. 5.9 - Arranjo para a medição da corrente de saída e da corrente de curto-circuito.

5.2.4. Conexão dos circuitos

Após o desenvolvimento dos circuitos de medição e do conversor *buck*, os circuitos foram interligados, dando origem à bancada de testes a ser utilizada nos ensaios, vista na Fig. 5.10. Na parte superior esquerda, estão localizados os terminais de conexão do módulo fotovoltaico, o circuito de amostragem da tensão do módulo e o conversor *buck* desenvolvido. No canto superior direito está o circuito de amostragem e condicionamento da corrente do módulo, juntamente com o interruptor de curto-circuito. Na parte inferior encontra-se o microcontrolador ATMEGA2560 conectado ao *display* LCD.

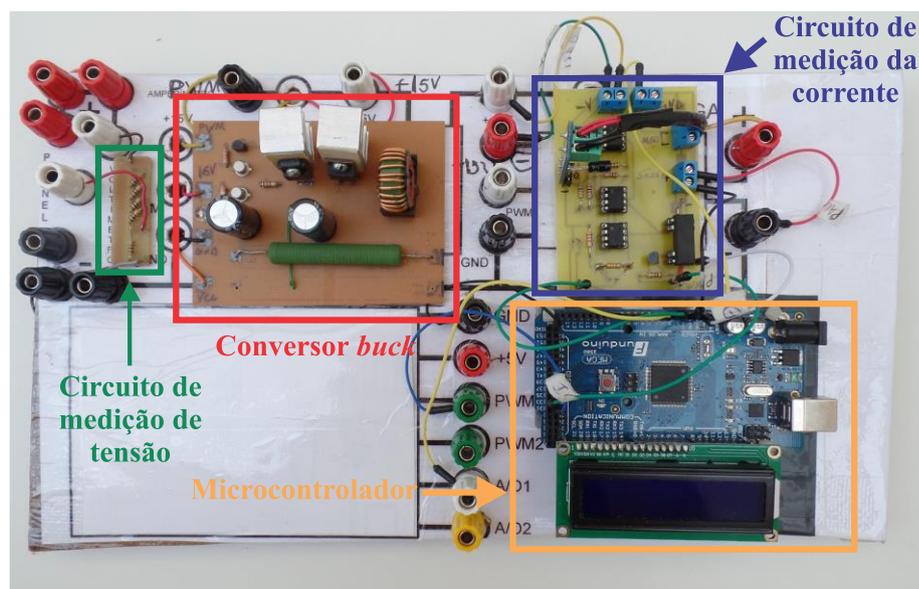


Fig. 5.10 - Bancada de testes utilizada nos ensaios.

5.3. Testes experimentais

Serão utilizados nos testes experimentais módulos KS-10 da Kyocera® com as mesmas características dos módulos simulados, e os dados de corrente e tensão serão obtidos através do osciloscópio DSO-X-2002A da Agilent® e da ponteira de corrente A622 da Tektronix®. Informações de temperatura serão lidas por meio do medidor Fluke® 561. Devido à indisponibilidade de um piranômetro para a medida da irradiância, a mesma será estimada a partir da relação entre a corrente de curto-circuito do módulo e seu valor de referência, apresentada na equação (3.6). Os resultados para a técnica da condutância incremental não puderam ser obtidos em função das condições climáticas durante a época do ano em que os mesmos foram coletados e do cronograma de finalização desse trabalho.

5.3.1. Comportamento estático

A irradiância que chega até o módulo fotovoltaico varia ao longo do dia com a passagem de nuvens, de acordo com a posição do Sol e também em função da localização geográfica [29]. Nos testes de variação da irradiância fez-se necessário desenvolver uma forma de modificar os níveis de irradiância. Através da literatura, observou-se que os autores utilizam, geralmente, uma fonte de corrente para emular o comportamento do módulo fotovoltaico [3] e, a partir da modificação dos parâmetros da fonte, é analisado o comportamento das técnicas para diferentes situações de irradiância. Porém, para observar o comportamento do módulo em um sistema real, o mesmo foi exposto diretamente ao Sol.

Com o intuito de modificar a irradiância que chega ao módulo, permitindo avaliar o seu comportamento e também a eficiência das técnicas de MPPT, foram analisados diferentes materiais, sendo o tecido Voal (também chamado de Voil) e o TNT, os que produziram os melhores resultados. Para realizar a modificação da irradiância construíram-se diversos quadros com dimensões semelhantes ao módulo, capazes de alterar a irradiância em diferentes níveis. Na Fig. 5.11a é possível observar o quadro com o tecido Voal e na Fig. 5.11b com o TNT.

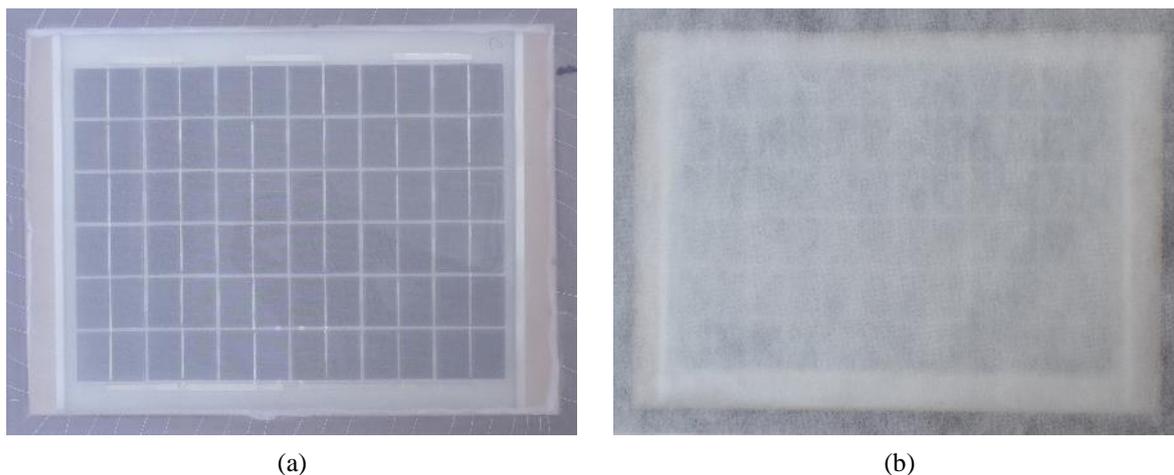


Fig. 5.11 - Material para modificação da irradiância: (a) tecido Voal, (b) TNT.

A utilização desses materiais produz diferentes níveis de irradiância. De acordo com a relação entre a corrente de curto-circuito obtida e seu valor de referência, por meio da qual estimou-se a irradiância, obteve-se a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Irradiância estimada para diferentes camadas dos materiais.

Material	Número de camadas	Irradiância estimada (W/m ²)
Voal	1	760
	2	610
	3	510
	4	430
	5	370
	6	320
	7	280
	8	250
	9	220
	10	200
TNT	1	670
	2	470
	3	360
	4	270
	5	220

Nessa tabela, a irradiância estimada, para diferentes camadas dos materiais, é apresentada. O material escolhido para a realização dos testes foi o Voal, pois permite alterar a irradiância de forma mais gradual que o TNT.

5.3.1.1. Comportamento estático da irradiância (45 °C)

Durante os testes apresentados nessa seção, os níveis de irradiância foram mantidos constantes, a uma temperatura de 45 °C. No primeiro teste, a irradiância foi mantida constante em 1150 W/m². A potência obtida pelas técnicas da razão cíclica fixa, tensão constante, gradiente de temperatura, tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito, P&O e I&T, podem ser vistas na Fig. 5.12.

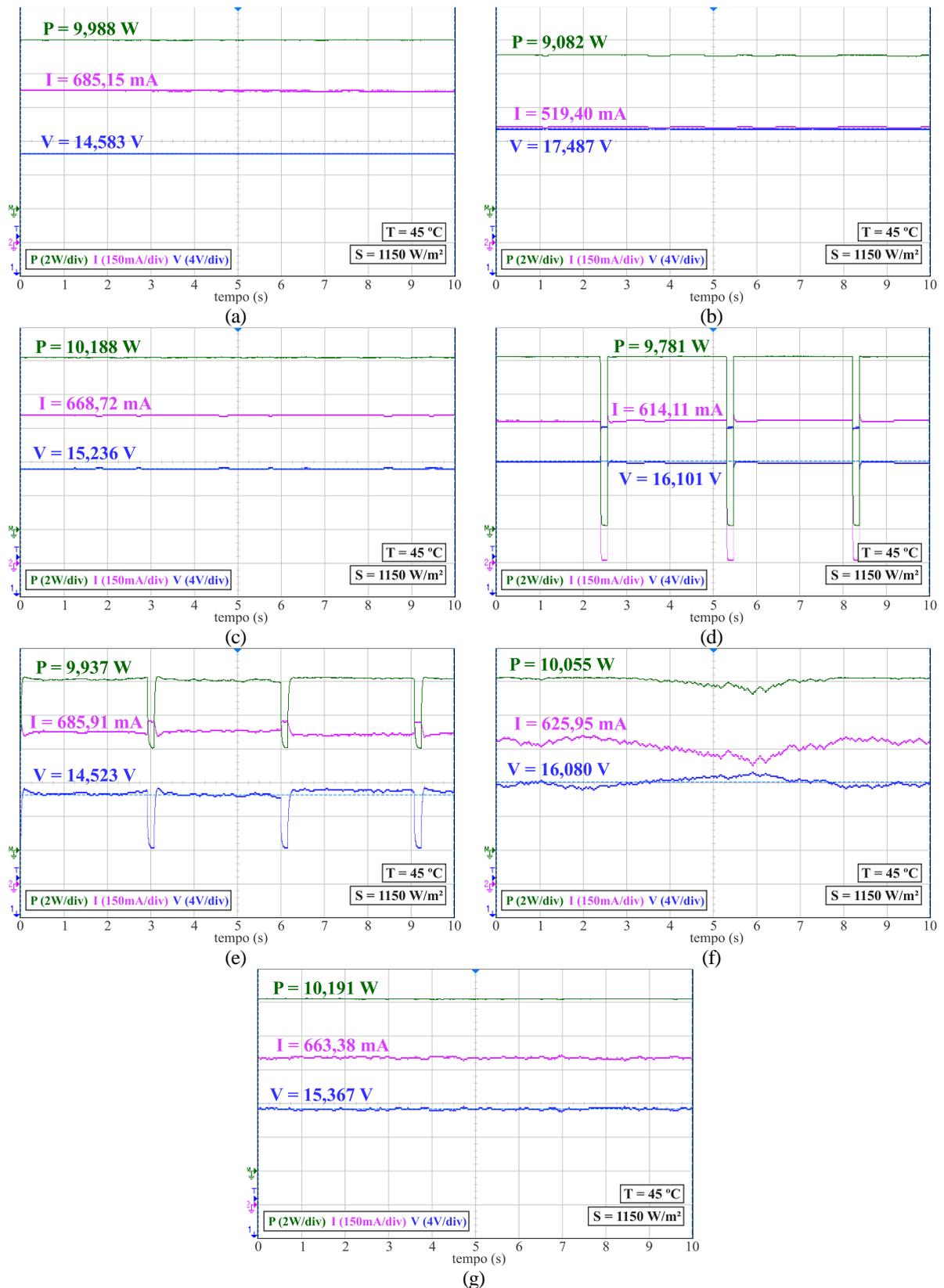
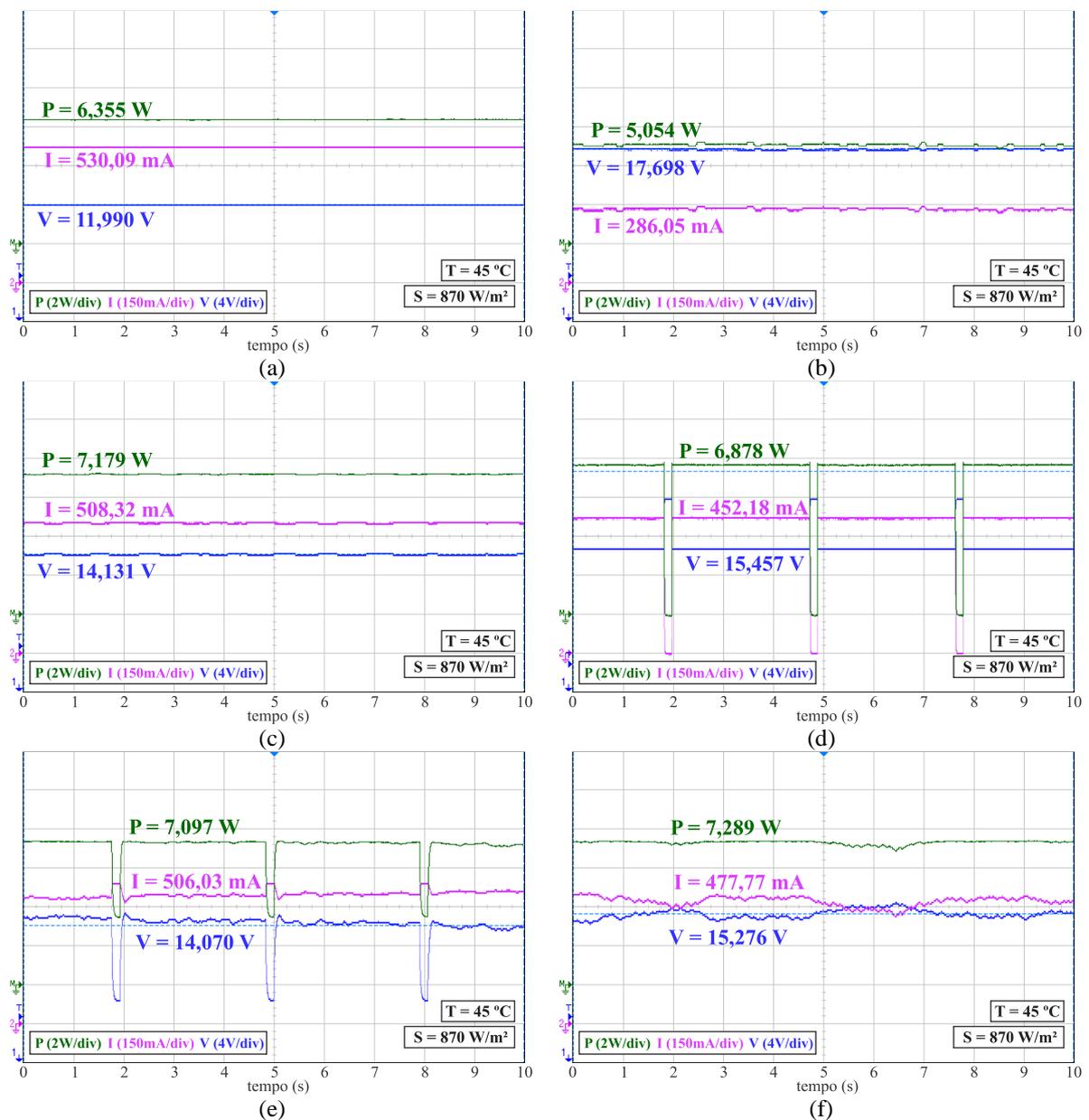


Fig. 5.12 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 1150 \text{ W/m}^2$ e $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nessa condição, o maior nível de irradiância em relação ao valor médio (1000 W/m^2) em conjunto com o pequeno aumento da temperatura contribuiu para que o desempenho do método da razão cíclica fixa fosse superior ao das técnicas da tensão constante, tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito. Esse mesmo fator contribuiu para o desempenho da técnica do gradiente de temperatura, que ficou ligeiramente abaixo do método I&T, que obteve o maior valor de potência.

No segundo ensaio, com a utilização de uma camada do tecido Voal, a irradiância foi reduzida em cerca de 25%, para o valor de 870 W/m^2 , sendo a temperatura mantida constante em $45 \text{ }^\circ\text{C}$ através de um sistema de ventilação forçada. A Fig. 5.13 apresenta os resultados dessa condição.



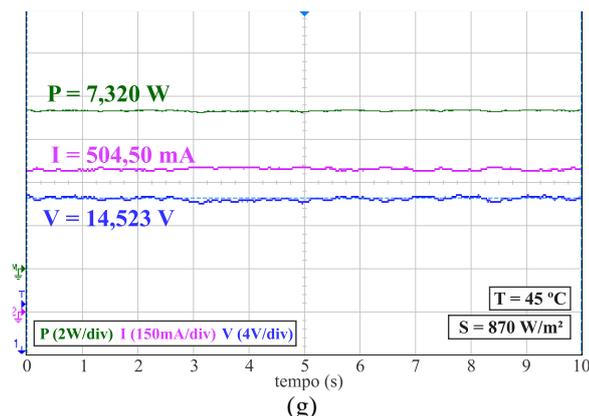
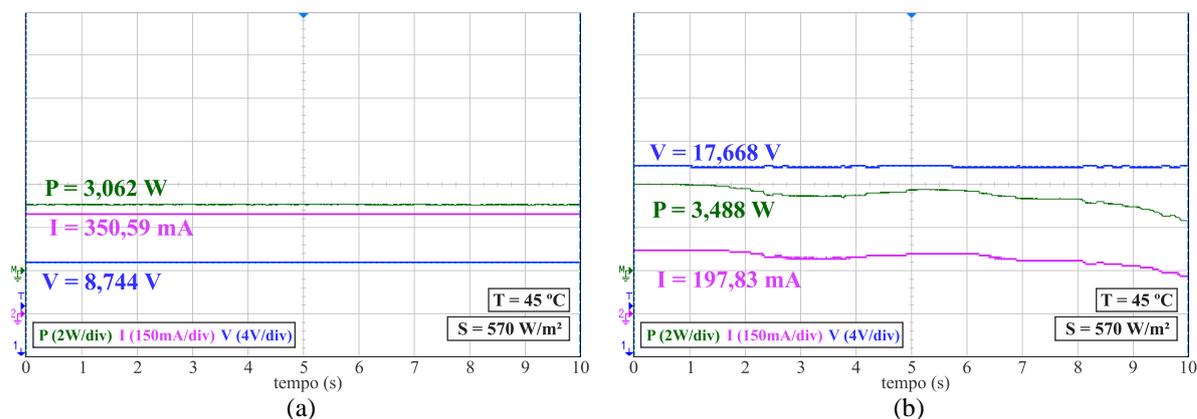


Fig. 5.13 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 870 \text{ W/m}^2$ e $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

O comportamento observado anteriormente não se repetiu nessa condição, sendo a potência média do método da razão cíclica fixa superior apenas ao método da tensão constante. Como destacado no teste anterior, a diminuição da irradiância provoca o deslocamento do ponto de máxima potência, reduzindo a potência de saída das técnicas que são configuradas para operar na STC. A técnica do gradiente de temperatura obteve o terceiro melhor desempenho, atrás dos métodos P&O e I&T. A estabilidade do ponto de operação do método I&T foi responsável pela maior potência média quando comparado ao método P&O, que oscila constantemente a tensão e corrente do módulo.

Diminuindo o valor da irradiância que chega até o módulo através de duas camadas do tecido Voal, resultando em uma irradiância estimada de 570 W/m^2 , foram obtidos os resultados da Fig. 5.14. Nesse teste, a temperatura foi mantida no mesmo valor dos ensaios anteriores.



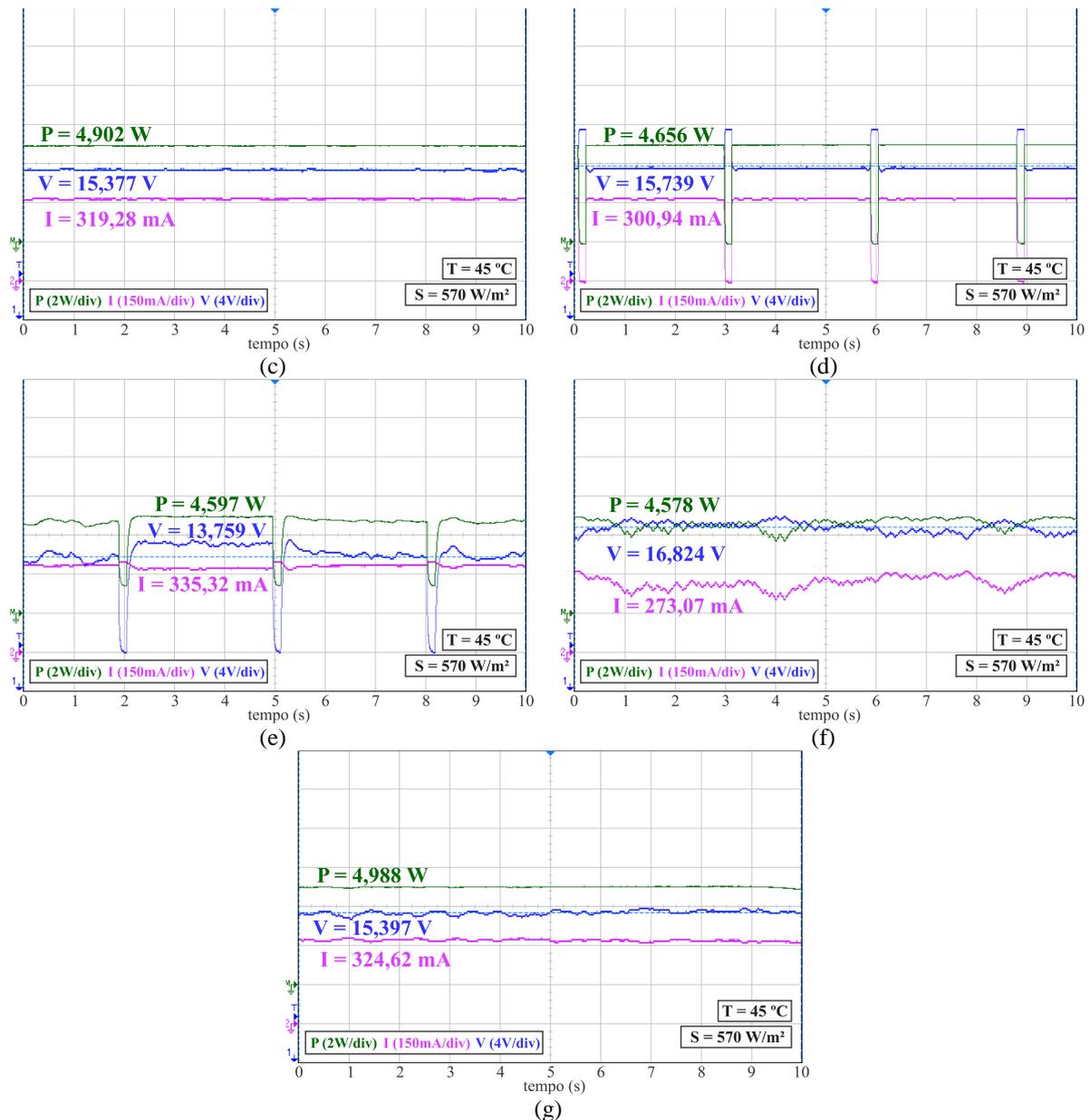
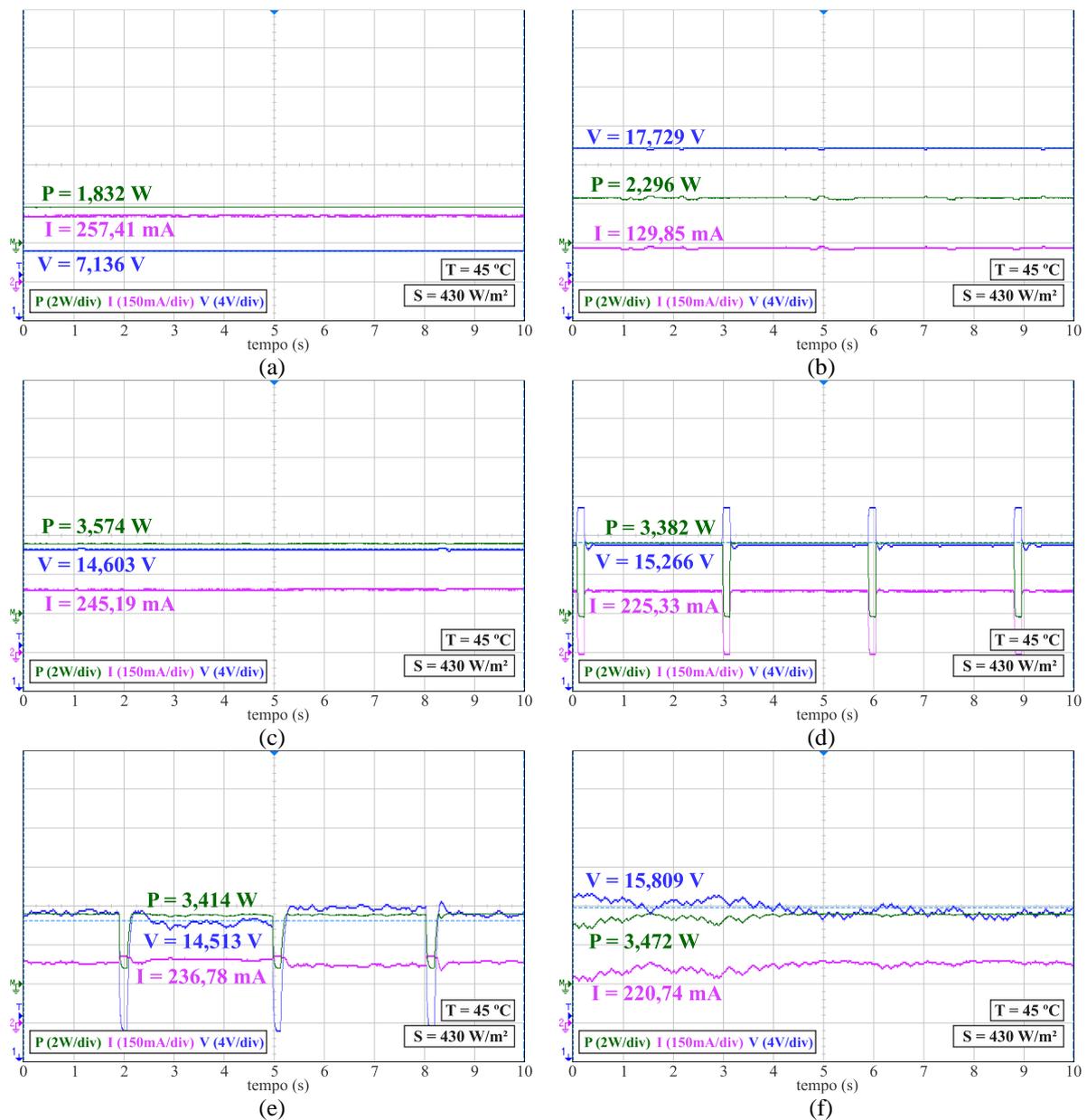


Fig. 5.14 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 570 \text{ W/m}^2$ e $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

No resultado da Fig. 5.14b observa-se que a potência inicial da técnica da tensão constante era de, aproximadamente, 4,0 W. A potência sofreu uma redução ao longo do ensaio em função da variação da irradiância, evidenciado pela variação da corrente do módulo. Contudo, a potência extraída por essa técnica foi superior ao método da razão cíclica fixa, que possui um desempenho reduzido em níveis baixos de irradiância. A potência média obtida com os métodos da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito são semelhantes. A constante abertura do circuito para medição das grandezas de controle provoca a redução da potência obtida, tendo em vista que nenhuma potência será entregue à carga durante a etapa de

medição. A oscilação do ponto de operação reduziu drasticamente a potência obtida através do método P&O, superior apenas aos métodos da tensão constante e razão cíclica fixa. A potência extraída pelo método I&T foi superior aos demais métodos, estando as técnicas do gradiente de temperatura e da tensão de circuito aberto em segundo e terceiro lugares, respectivamente.

No quarto teste, reduziu-se a irradiância para o valor de 430 W/m^2 através de três camadas de tecido Voal, e a temperatura permaneceu no valor de $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Os resultados são mostrados na Fig. 5.15.



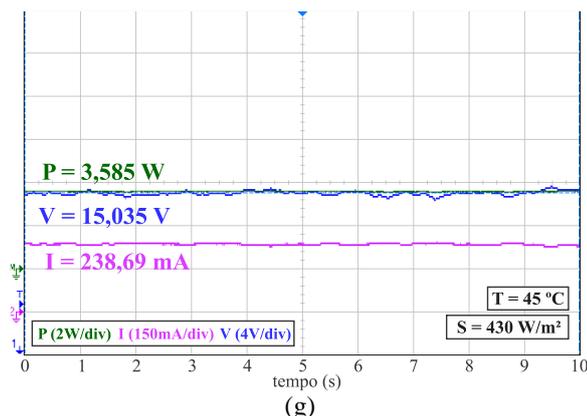
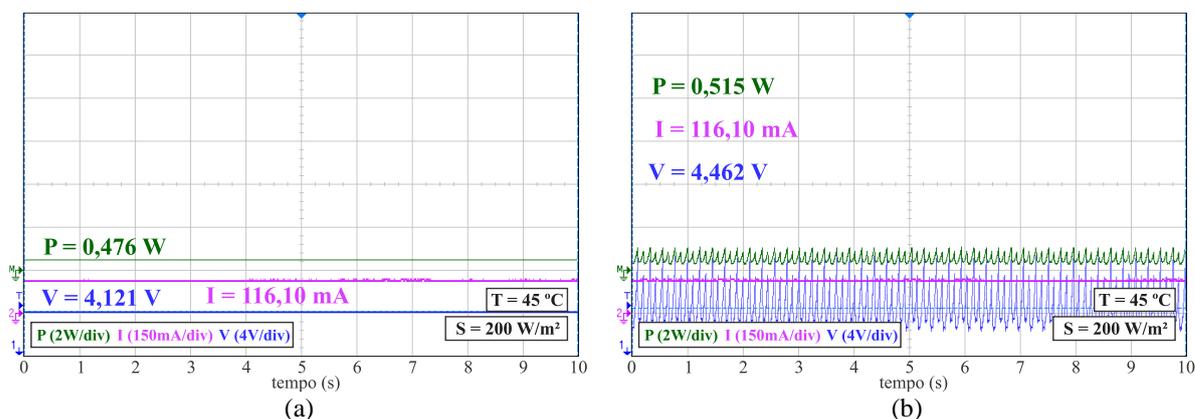


Fig. 5.15 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 430 \text{ W/m}^2$ e $T = 45 \text{ }^\circ\text{C}$.

Apesar do valor de temperatura não ser tão elevado em relação à STC, com uma diferença de $20 \text{ }^\circ\text{C}$, a potência extraída pela técnica do gradiente de temperatura, vista na Fig. 5.15c, é 55% maior do que o valor obtido pela técnica da tensão constante, Fig. 5.15b. A simples adição da leitura de temperatura na definição da tensão de máxima potência é a responsável pelo aumento no desempenho. Novamente, observa-se a redução no desempenho da técnica da razão cíclica fixa para valores baixos de irradiância, que já havia sido evidenciado por meio dos resultados de simulação da Fig. 4.20. A estabilidade do ponto de operação da técnica I&T permitiu a extração de uma potência superior em relação às demais técnicas porém, a potência média da técnica do gradiente de temperatura aproximou-se desse valor. Apesar da oscilação do ponto de operação, o método P&O obteve o terceiro maior valor de potência durante o ensaio.

O último teste para esse nível de temperatura, $45 \text{ }^\circ\text{C}$, teve como objetivo a redução para um nível baixo de irradiância, 200 W/m^2 , com o intuito de observar o comportamento dos métodos em uma situação de potência de saída reduzida. Esse nível de irradiância foi obtido através de oito camadas do tecido Voal, sendo os resultados mostrados na Fig. 5.16.



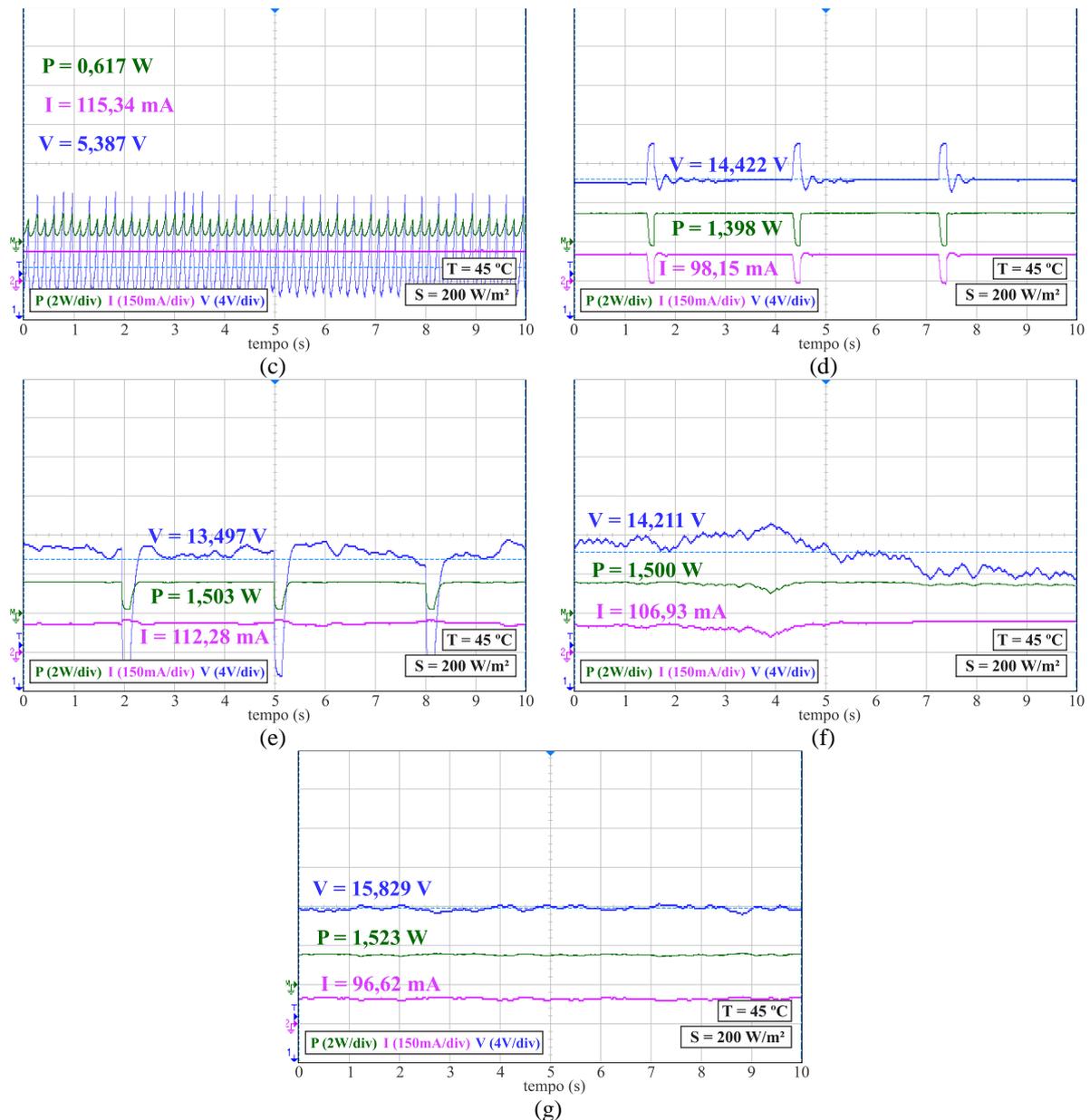


Fig. 5.16 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 200\text{ W/m}^2$ e $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

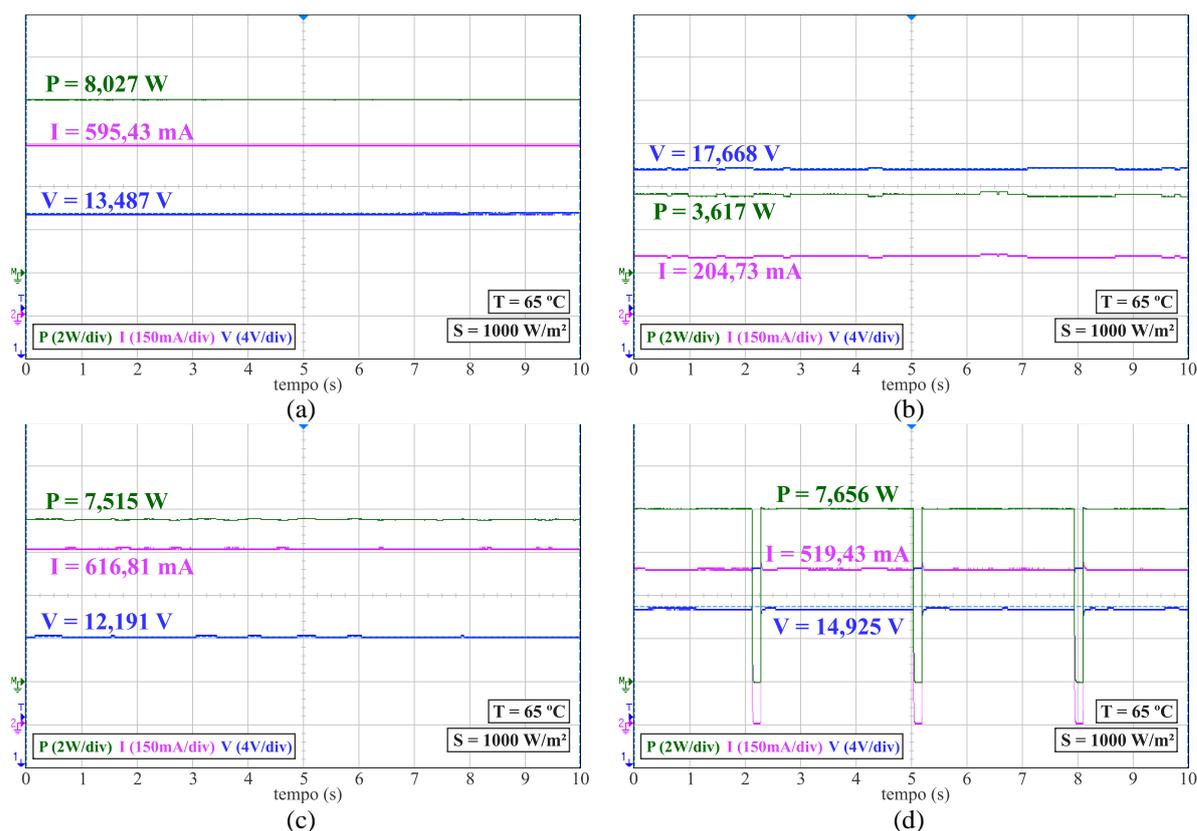
Destacam-se, nos gráficos da Fig. 5.16b e c, a incapacidade dos métodos em estabilizar o ponto de operação, fazendo com que o sistema oscile indefinidamente. Isso ocorre em função da referência de tensão estabelecida pelas técnicas, que não pode ser alcançada devido à condição de irradiância do módulo fotovoltaico. O desempenho das técnicas da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito se sobressaem em relação às técnicas da razão cíclica fixa, tensão constante e gradiente de temperatura. O ponto de controle desses métodos é definido por meio da amostragem de grandezas que são modificadas com a variação da temperatura e da irradiância, levando o módulo a operar de acordo com as condições climáticas

de cada situação. Por fim, observa-se que o maior valor de potência foi obtido através do método I&T, sobretudo em função da correta definição do ponto de operação através da amostragem da corrente de curto-circuito e da temperatura. Os métodos da corrente de curto-circuito e P&O ficaram em segundo e terceiro lugares, com valores praticamente idênticos de potência.

5.3.1.2. Comportamento estático da irradiância (65 °C)

Após a verificação do comportamento das técnicas de MPPT para temperaturas mais baixas, os mesmos testes foram realizados para a temperatura de 65 °C. A análise dessa condição se dá em função da necessidade de avaliar a influência da temperatura na potência de saída do módulo fotovoltaico.

Devido aos testes terem sido realizados em dias distintos, a irradiância estimada do primeiro ensaio foi de 1000 W/m². Os resultados para essa condição são mostrados na Fig. 5.17.



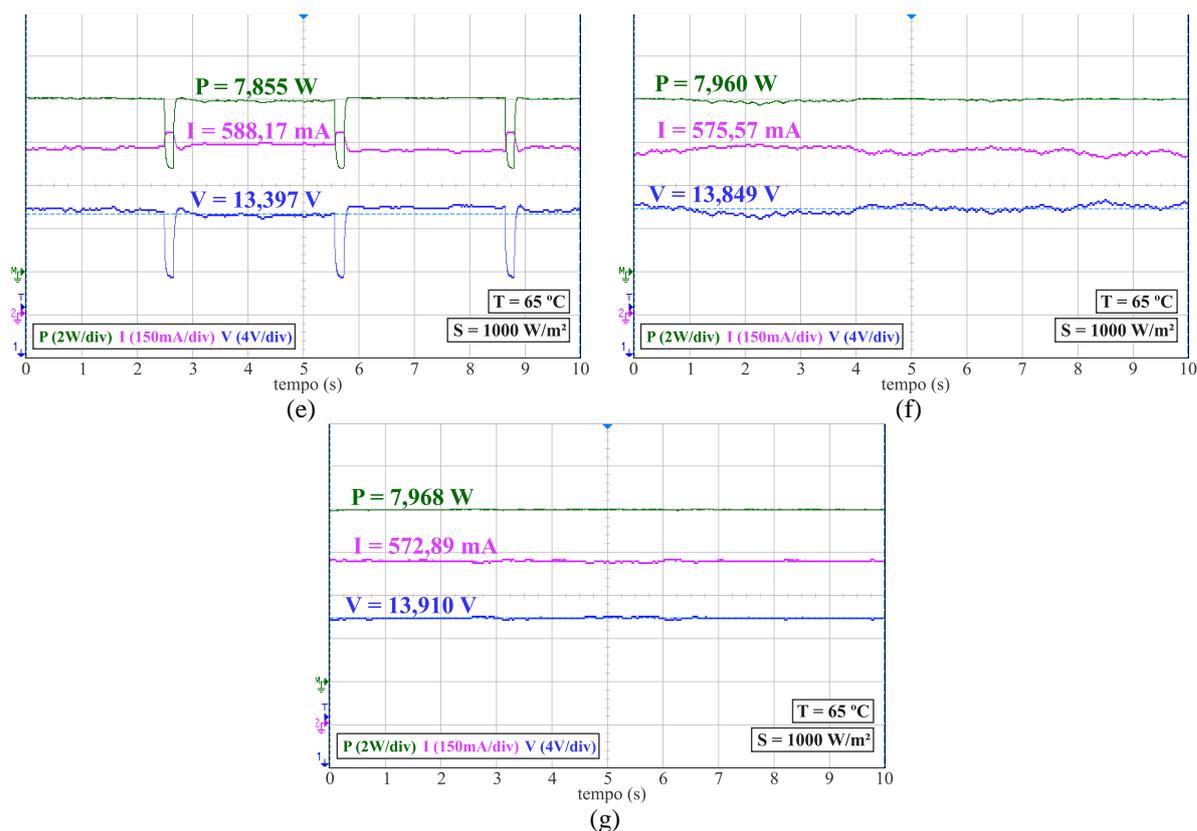
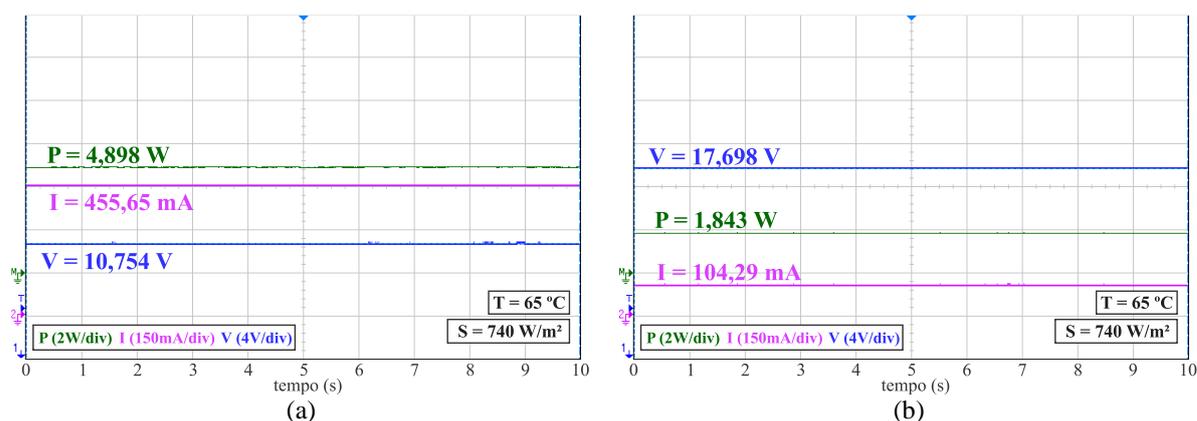


Fig. 5.17 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 1000\text{ W/m}^2$ e $T = 65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para essa condição, fica evidente a melhora na potência de saída através da técnica do gradiente de temperatura, vista na Fig. 5.17c, que é superior a 100% da potência obtida por meio do método da tensão constante, Fig. 5.17b. A potência de saída do método da razão cíclica foi ligeiramente superior à obtida pelo método I&T. O desempenho desse método merece destaque, pois o mesmo não realiza a leitura de variáveis do circuito, como a tensão, corrente ou temperatura. O método P&O foi o terceiro melhor método nessa condição, apesar da constante oscilação em torno do ponto de máxima potência. No segundo teste, Fig. 5.18, utilizou-se uma camada do tecido Voal, sendo a irradiância estimada de 740 W/m^2 .



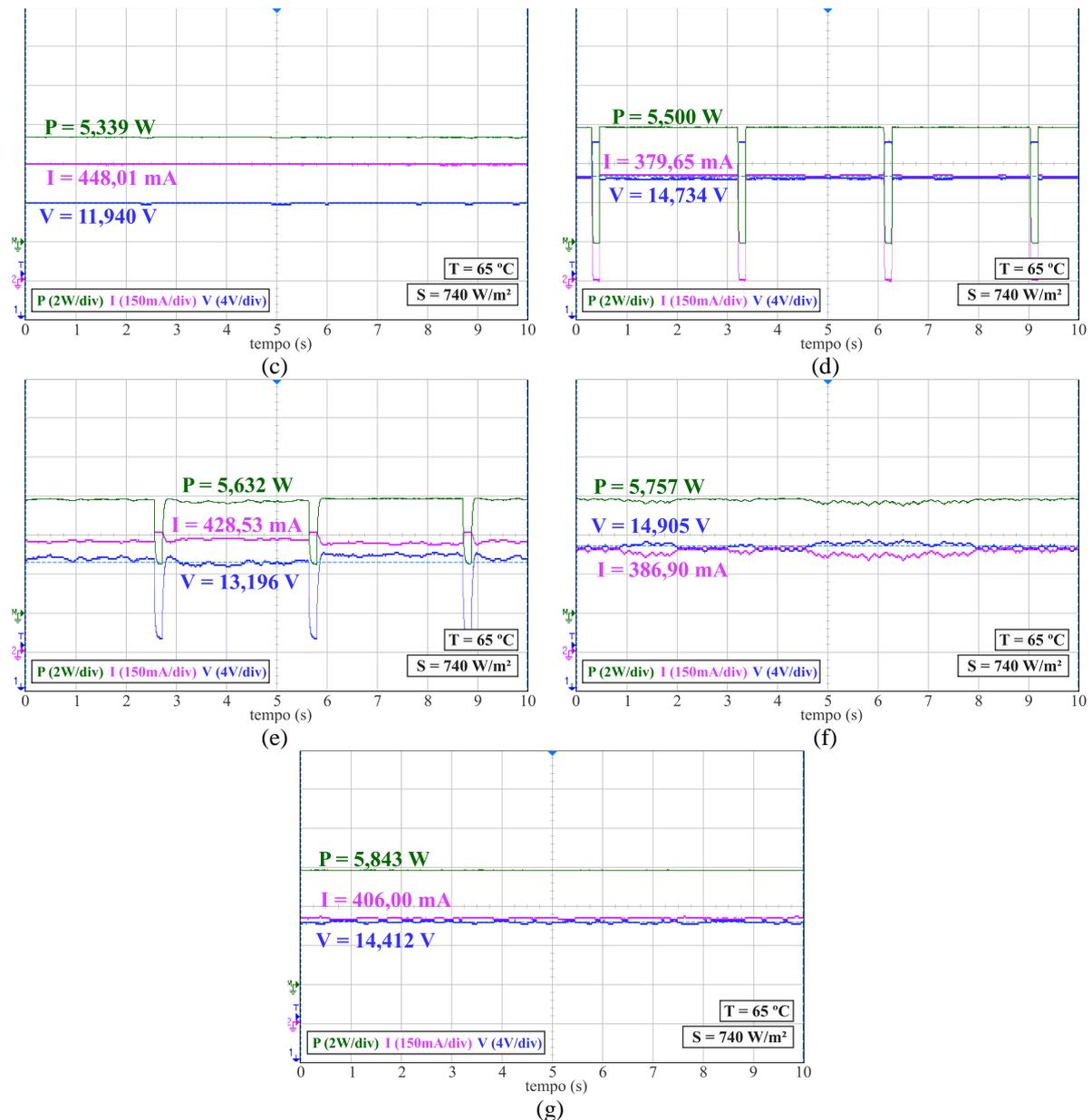


Fig. 5.18 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 740 \text{ W/m}^2$ e $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nessa condição o método I&T obteve a maior potência de saída, sobretudo devido à baixa oscilação do ponto de operação. Os métodos P&O e da corrente de curto-circuito também obtiveram uma potência satisfatória, ficando em segundo e terceiro lugares, respectivamente. Apesar do bom desempenho do método da corrente de curto-circuito, a constante abertura do sistema para monitoramento da corrente de curto-circuito do módulo provoca perdas. Uma forma de minimizar essa deficiência é diminuir a frequência de abertura do circuito, porém, isso reduziria a eficiência do método a variações bruscas da irradiância. Os resultados do terceiro teste, com uma irradiância de 570 W/m^2 , obtida com o auxílio de duas camadas do tecido Voal, podem ser observados através da Fig. 5.19.

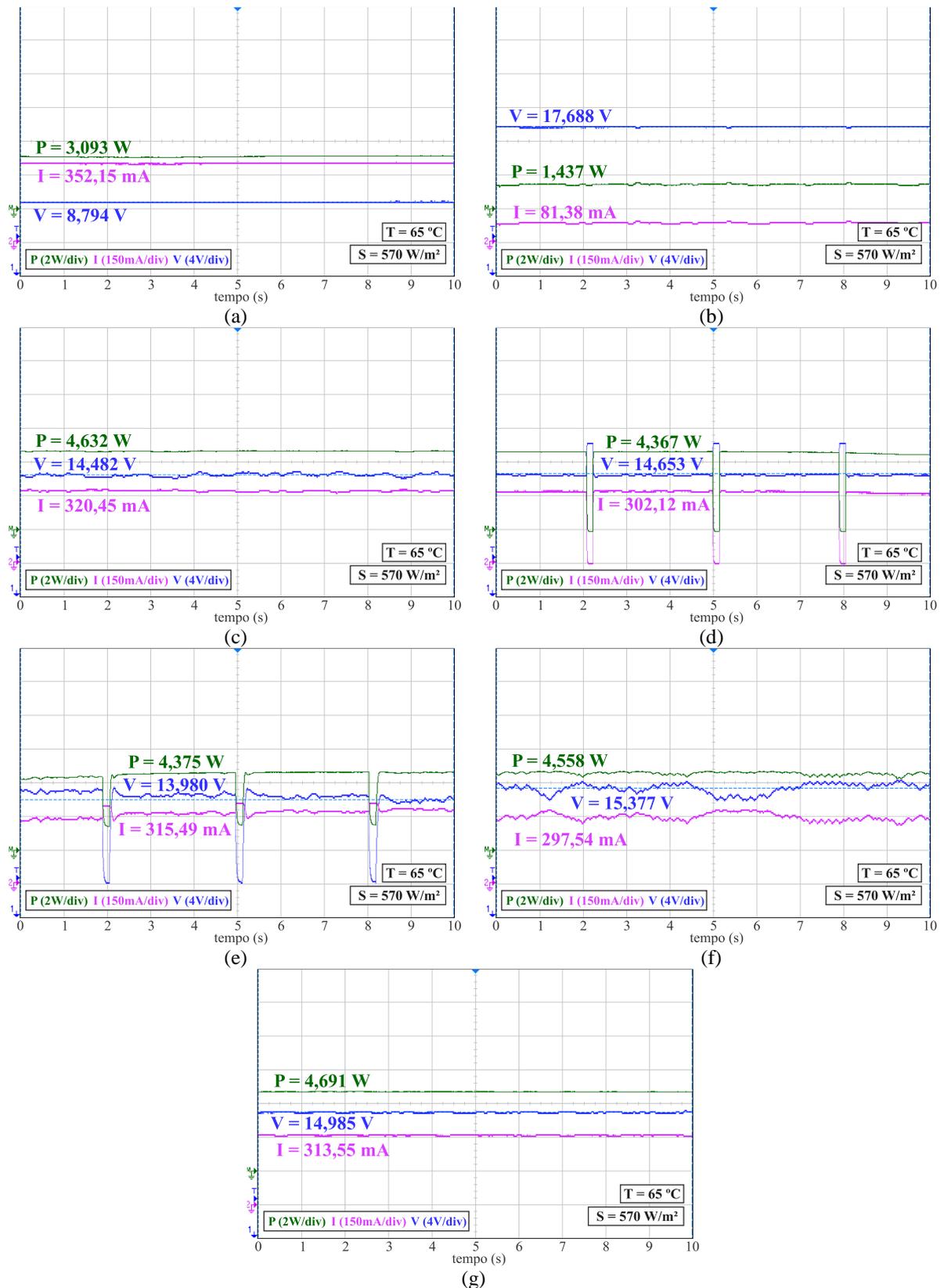
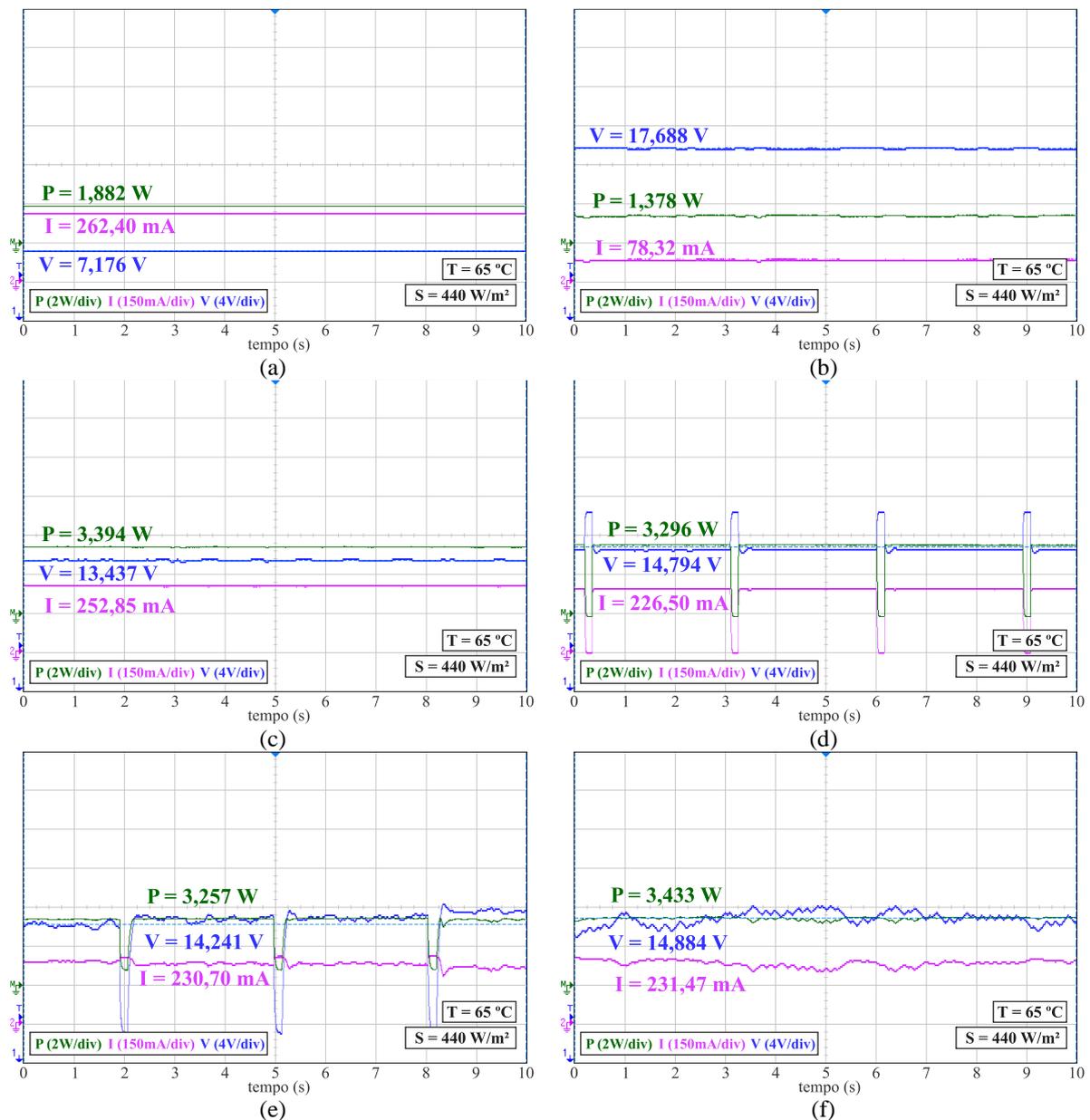


Fig. 5.19 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 570 \text{ W/m}^2$ e $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$.

A melhora da potência de saída observada no método do gradiente de temperatura, quando comparado ao método da tensão constante, é acentuada nessa condição. Isso se deve à redução da tensão de máxima potência quando ocorre o aumento da temperatura e a diminuição da irradiância. O desempenho dos métodos da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito foram equivalentes porém, abaixo do esperado, tendo em vista que a potência obtida foi superior apenas aos métodos da tensão constante e da razão cíclica fixa. Isso ocorre devido à não-linearidade das constantes k_V e k_I , que levaram os métodos a operarem abaixo do ponto de máxima potência. A correta amostragem dos valores de temperatura e da corrente de curto-circuito permitiram ao método I&T obter o melhor desempenho nesse ensaio, seguido pelo método P&O e do gradiente de temperatura. No ensaio seguinte, reduziu-se ainda mais a irradiância, para o valor de 440 W/m^2 , com o uso de três camadas do tecido Voal, obtendo-se os resultados da Fig. 5.20.



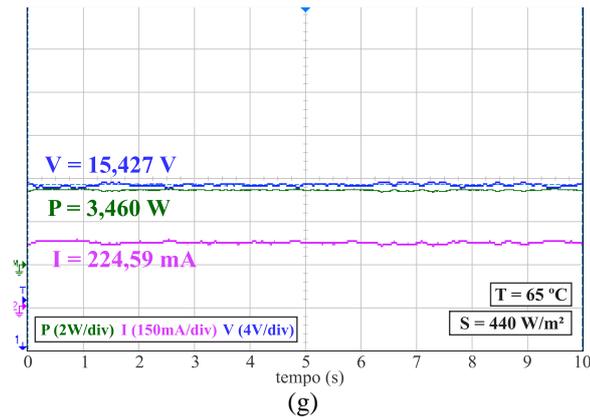
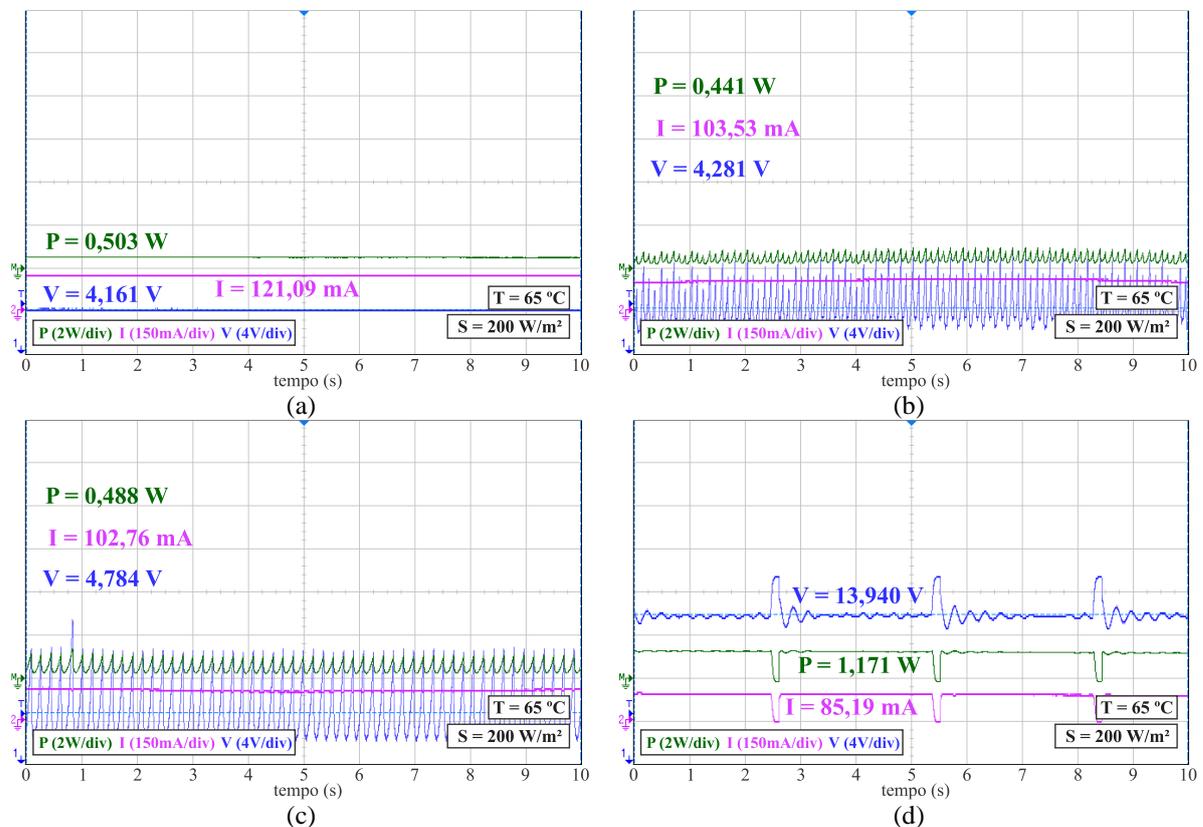


Fig. 5.20 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 440 \text{ W/m}^2$ e $T = 65 \text{ °C}$.

As técnicas de melhor desempenho neste teste foram iguais às do ensaio anterior: I&T, P&O e gradiente de temperatura. A proximidade entre os valores de irradiância tornou os resultados semelhantes, assim como o comportamento das técnicas. No último teste para a temperatura de 65 °C , os sistemas foram submetidos a uma irradiância de 200 W/m^2 , obtida com o uso de oito camadas do tecido Voal. A potência de saída das técnicas pode ser vista na Fig. 5.21.



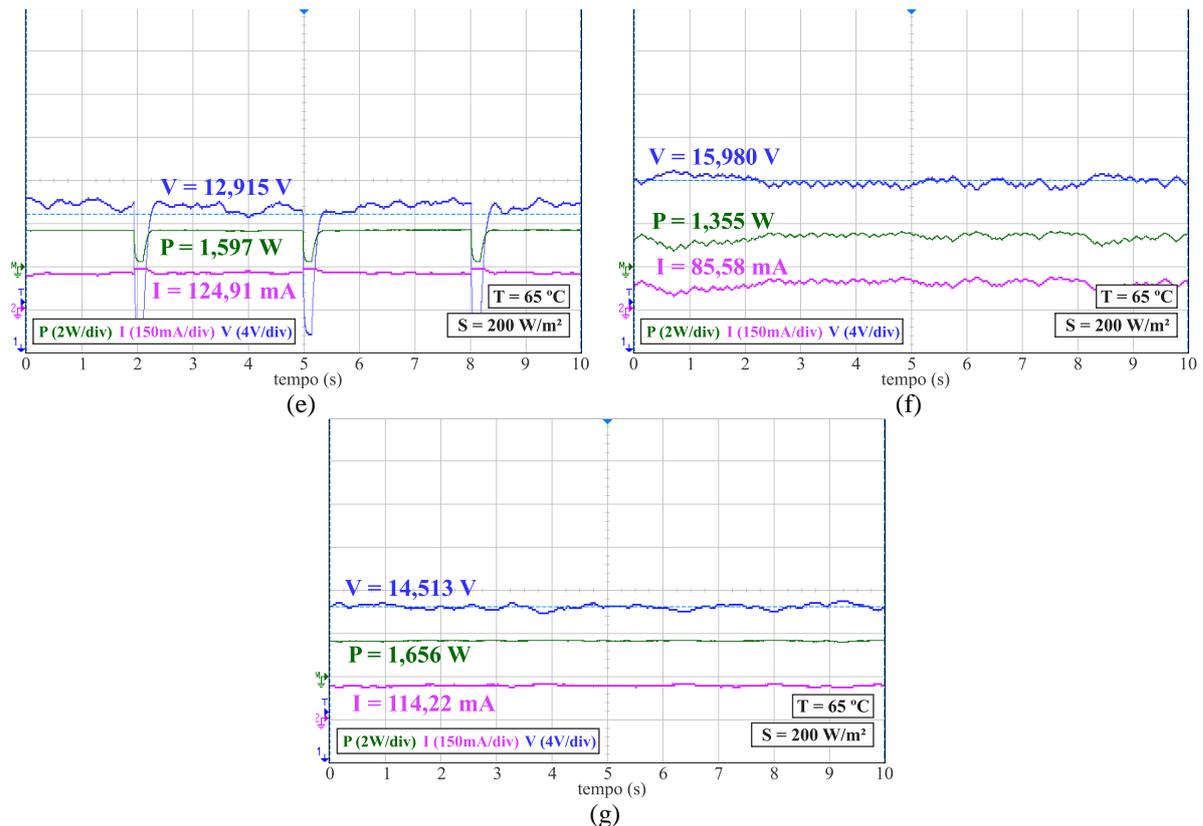


Fig. 5.21 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Condição de $S = 200 \text{ W/m}^2$ e $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$.

Assim como ocorrido durante a situação apresentada na Fig. 5.16, os métodos da tensão constante e gradiente de temperatura foram incapazes de estabilizar o ponto de operação. Como o valor da tensão de máxima potência é estabelecido em função da irradiância na condição de teste (1000 W/m^2), os métodos não conseguem atingir esse ponto de operação, provocando oscilações no sistema. Devido à sensibilidade no controle da tensão de máxima potência para essa situação, os métodos que realizam a leitura da corrente obtiveram maiores valores de potência, como o método I&T, da corrente de curto-circuito e P&O.

5.3.2. Comportamento dinâmico

5.3.2.1. Variação da temperatura

A avaliação dos efeitos da variação da temperatura se faz necessária devido à redução da potência máxima do módulo fotovoltaico, como observado na Seção 3.2, com o aumento da temperatura. Os ensaios foram realizados em um espaço de tempo de duas horas, tendo em vista a característica de variação lenta da temperatura. Devido ao intervalo de tempo entre as primeiras

e últimas amostras, a irradiância sofreu uma pequena variação, de cerca de 7%. Cada ensaio teve a duração de 500 segundos, onde a temperatura sofreu uma variação de 15 °C. A limitação de tempo do ensaio foi em função da janela de amostragem do osciloscópio, que possui um valor máximo de 500 segundos.

Durante os testes foram utilizados três módulos KS-10 distintos. Apesar de serem do mesmo modelo, os módulos apresentam pequenas diferenças em suas características, que puderam ser observadas através da curva $I \times V$ de cada um dos módulos. Essas diferenças não prejudicaram a análise da potência gerada. Os testes de variação da temperatura podem ser vistos na Fig. 5.22.

A perturbação observada na Fig. 5.22a, técnica da razão cíclica fixa, foi causada pela passagem de nuvens e consequente alteração da irradiância. Apesar da potência obtida no ensaio ser inferior a outras três técnicas (I&T, P&O e corrente de curto-circuito), a técnica se mostra uma alternativa interessante nessa situação, tendo em vista que a mesma não realiza a amostragem de nenhuma variável do sistema. Esse comportamento já havia sido observado através dos resultados da seção 5.3.1, sobretudo nos ensaios com valores de irradiância próximos à STC. Por meio da análise da resposta do método da tensão constante observa-se uma redução acentuada da potência de saída, de cerca de 40%. Esse efeito é devido à dependência da tensão de máxima potência com a temperatura, evidenciado pelo comportamento do método do gradiente de temperatura. O desempenho do método da tensão de circuito aberto foi superior somente ao método da tensão constante. A influência da temperatura na relação entre a tensão de circuito aberto e a tensão de máxima potência resulta na menor potência obtida. Para a técnica da corrente de curto-circuito, que obteve o terceiro melhor desempenho nesse ensaio, a menor dependência da corrente de máxima potência com a temperatura, mostrada no Capítulo 3, permite ao método extrair um maior valor de potência.

O comportamento dos métodos P&O e I&T foi semelhante, com uma vantagem para o I&T. A constante busca pelo MPP do método P&O causa uma oscilação na tensão e corrente de saída, o que, consequentemente, faz a potência oscilar. Esse comportamento foi evidenciado através das simulações do Capítulo 4. Nessa comparação, a vantagem da técnica I&T se dá, principalmente, pela não oscilação do ponto de operação e pelo controle através da corrente de máxima potência, que é menos susceptível à variação da temperatura.

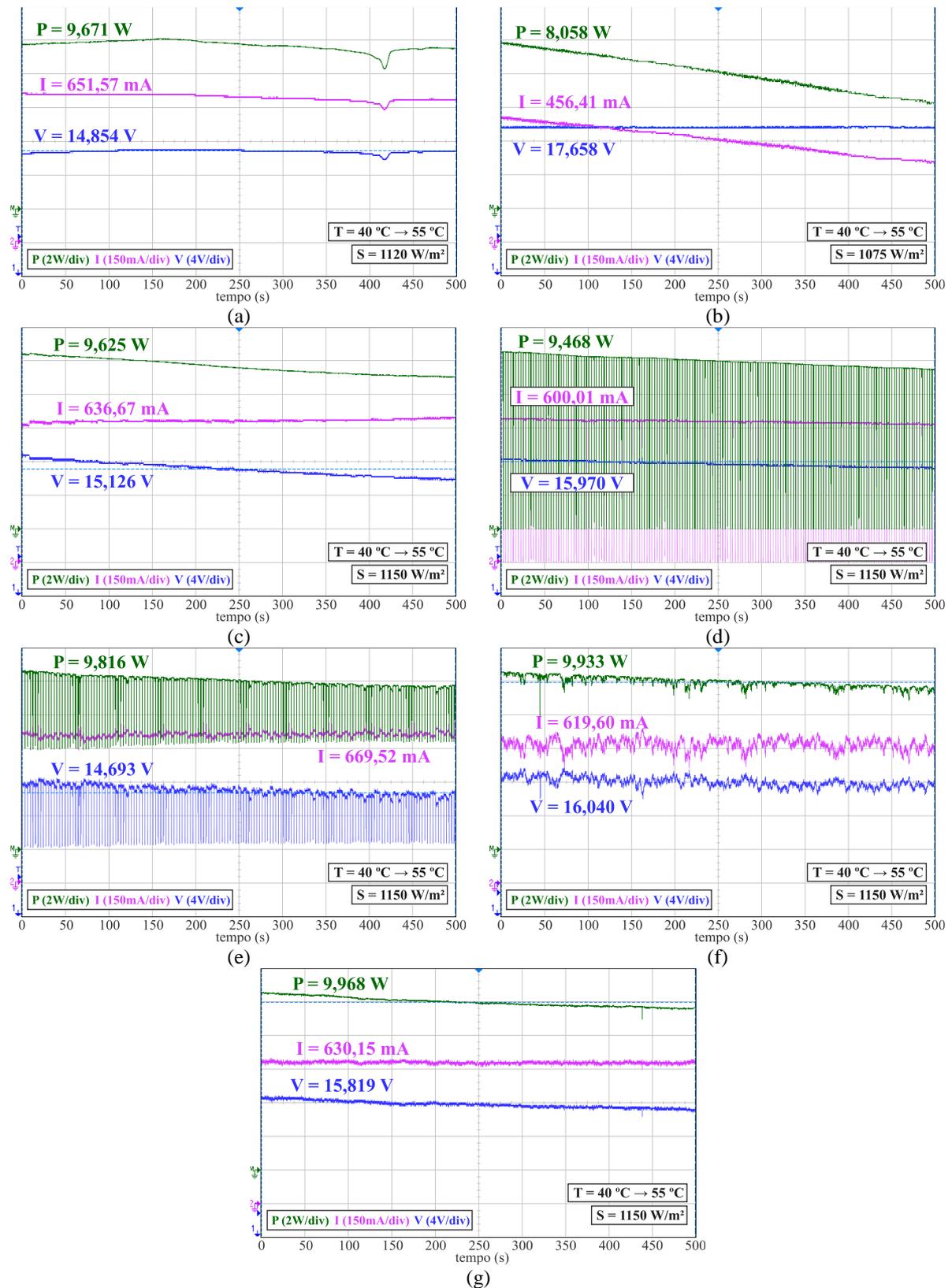
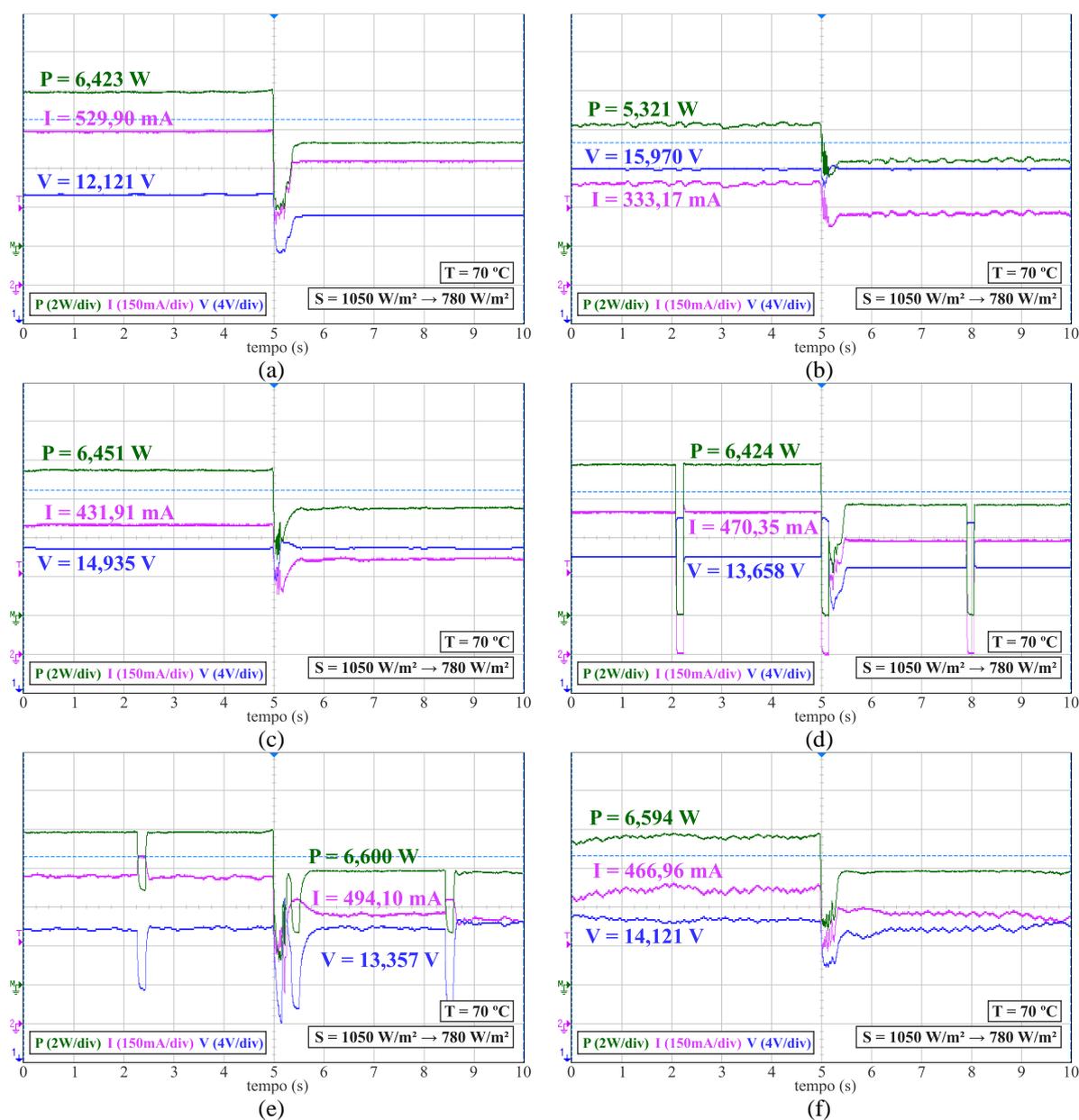


Fig. 5.22 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T; para uma condição de variação da temperatura de $15 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.3.2.2. Variação da irradiância

Após a verificação do comportamento das técnicas para situações de variação da temperatura, a capacidade de obter o ponto de máxima potência, em situações de variação da irradiância, será avaliada. A forma de se obter os diferentes níveis de irradiância é semelhante à utilizada nos ensaios da seção 5.3.1, com o auxílio de camadas de tecido que reduzem a irradiância incidente no módulo. Utilizaram-se combinações de 1, 3 e 8 camadas do tecido Voal, Dessa forma, foi possível modificar a irradiância em, aproximadamente, 25%, 50% e 75%, respectivamente. No primeiro teste, avaliou-se o comportamento dos métodos para uma variação de 1050 W/m^2 a 780 W/m^2 (100% para 75%, aproximadamente). Os resultados podem ser vistos na Fig. 5.23.



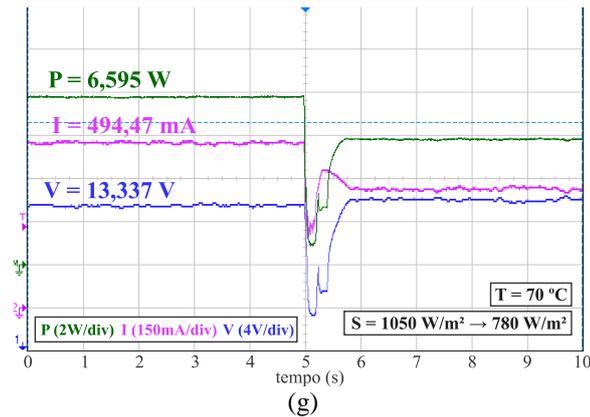
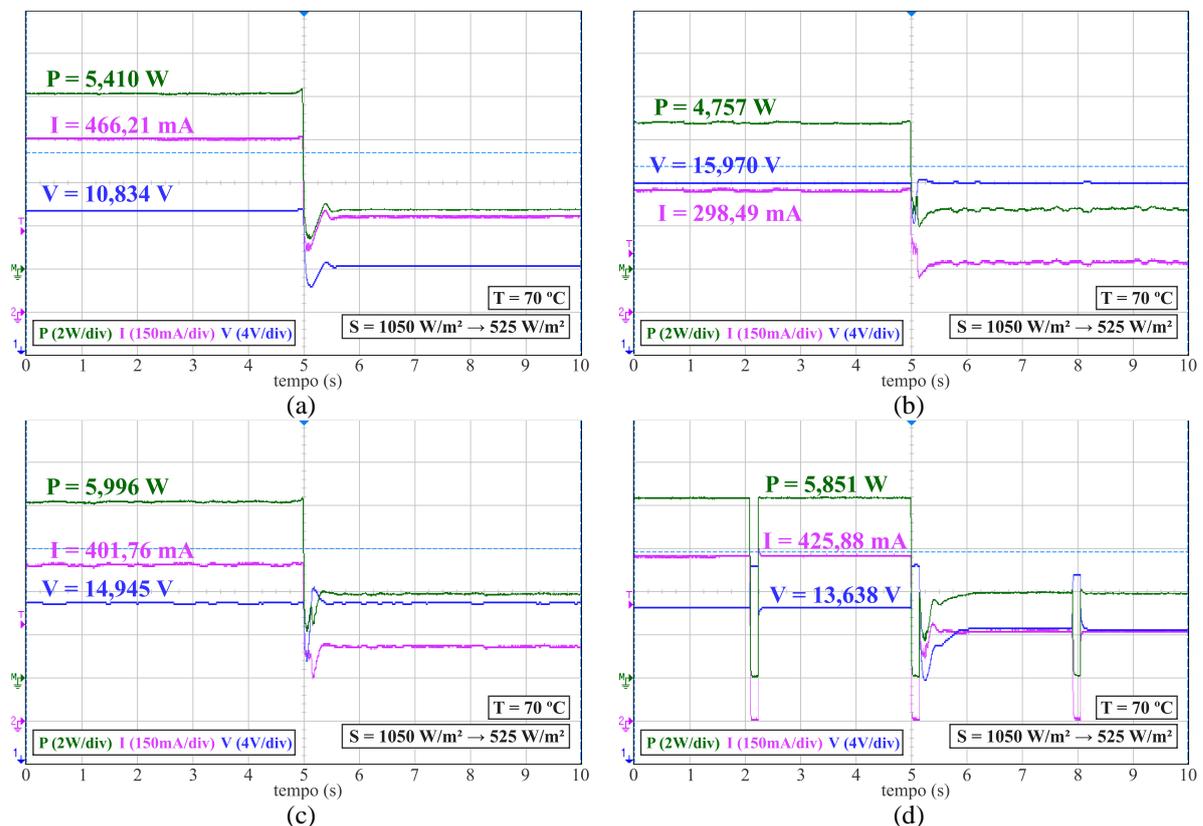


Fig. 5.23 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Irradiância variando de 1050 W/m² para 780 W/m² e T = 70 °C.

Nessa situação, a potência gerada pelos métodos da corrente de curto-circuito, I&T e P&O foi praticamente a mesma. A potência do método da corrente de curto-circuito foi ligeiramente superior à dos outros dois métodos em cerca de 0,1%. Isso ocorreu, sobretudo, em função da variação do ponto de operação ter coincido com o instante de amostragem da corrente de curto-circuito, o que possibilitou a rápida atualização do ponto de operação e, conseqüentemente, melhor desempenho. A segunda situação, correspondente a uma variação da irradiância de 1050 W/m² para 525 W/m² (100% para 50%, aproximadamente), é apresentada na Fig. 5.24.



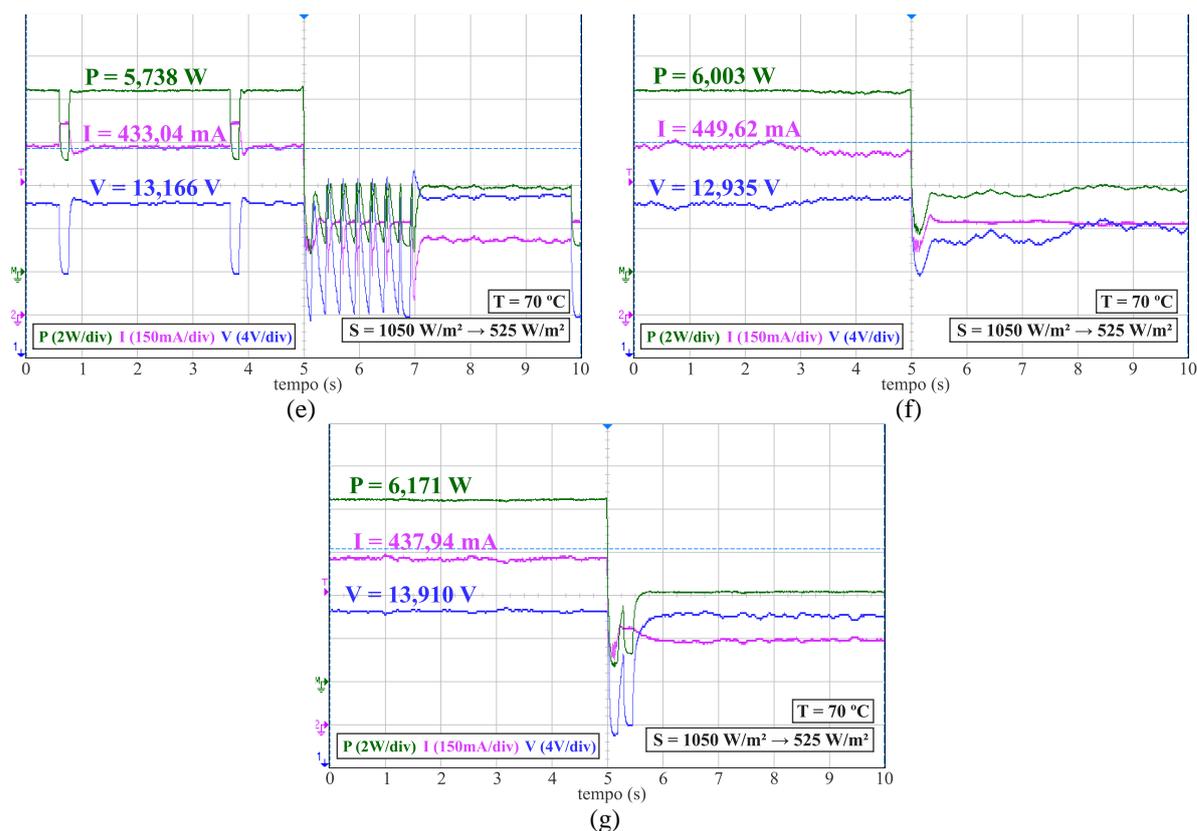
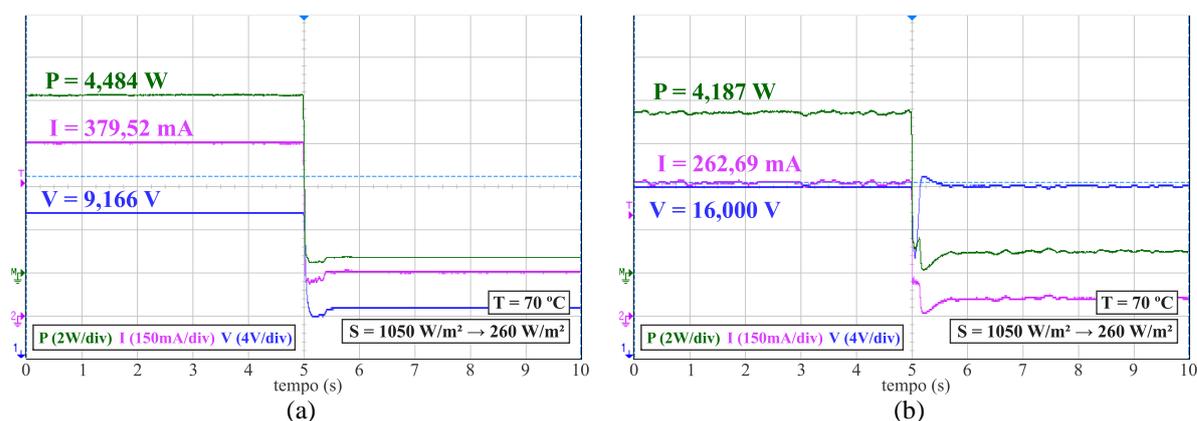


Fig. 5.24 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Irradiância variando de 1050 W/m^2 para 525 W/m^2 e $T = 70^\circ\text{C}$.

Para esse teste, o método I&T obteve a maior potência de saída, juntamente com o método do gradiente de temperatura e o método P&O. Diferente do que ocorreu no ensaio anterior, a demora na atualização da referência da corrente de curto-circuito, na Fig. 5.24e, causou a oscilação do ponto de operação e a diminuição na potência de saída. Além disso, é interessante observar a melhora de potência que o método do gradiente de temperatura possui em relação ao método da tensão constante, antes e depois da variação, que é superior a 20%. Na última variação negativa da irradiância, realizou-se uma modificação de 1050 W/m^2 a 260 W/m^2 (100% para 25%, aproximadamente). Os resultados são mostrados na Fig. 5.25.



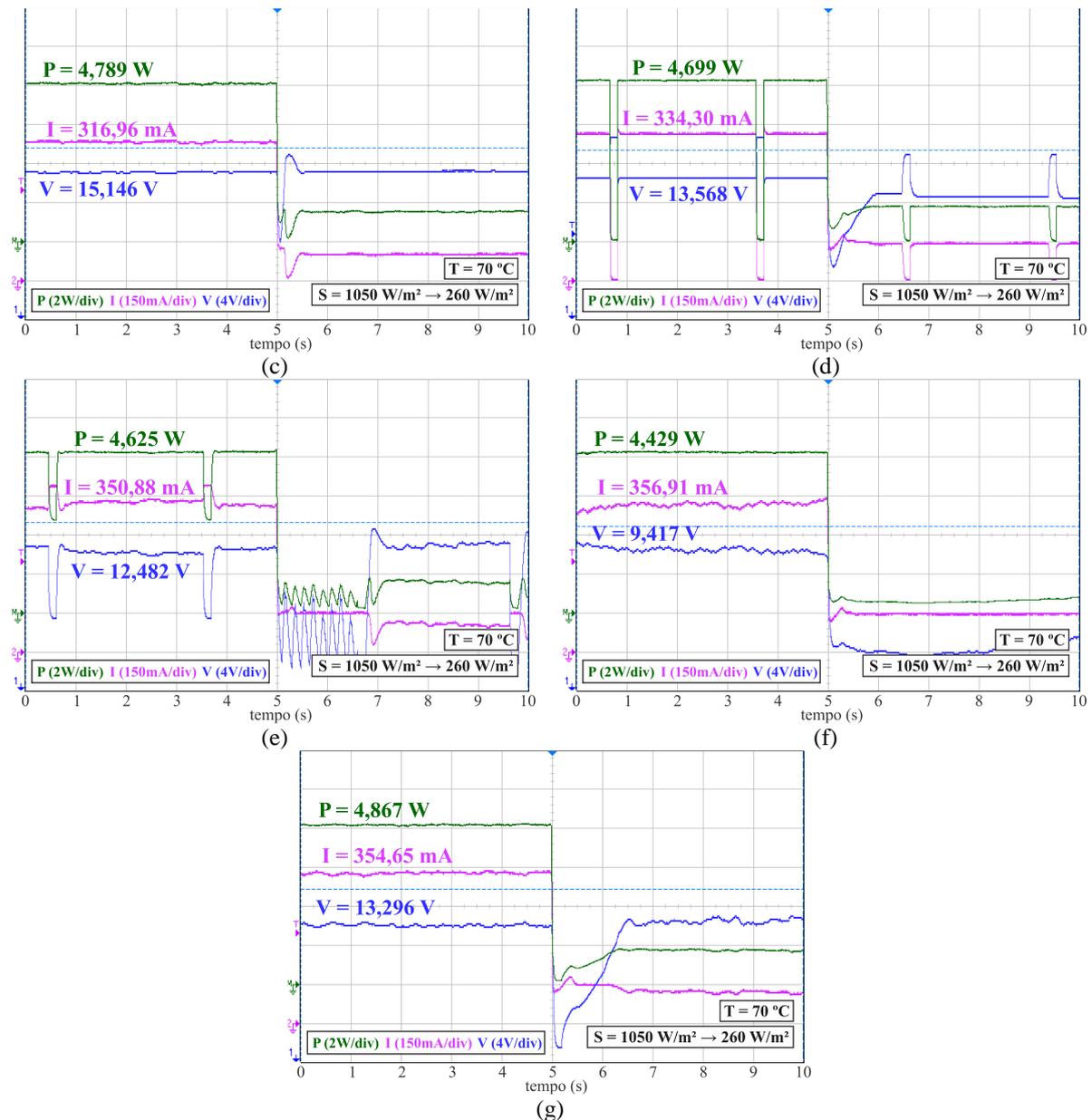
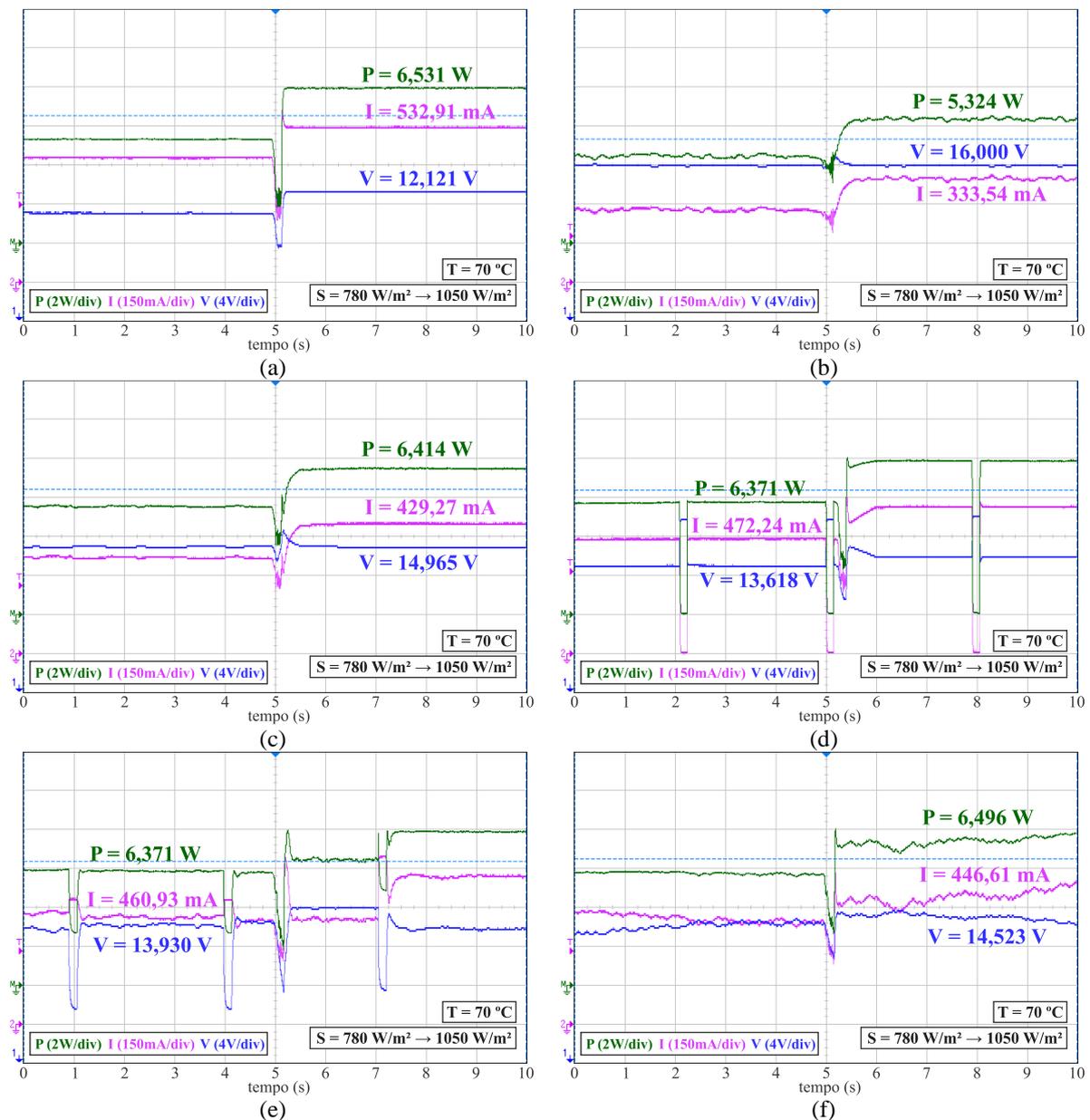


Fig. 5.25 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Irradiância variando de 1050 W/m² para 260 W/m² e T = 70 °C.

Apesar da demora do método I&T em estabilizar o ponto de operação, a potência média obtida por essa técnica foi maior do que os métodos do gradiente de temperatura e da tensão de circuito aberto, que alcançaram o segundo e terceiro maior valor de potência, respectivamente. É interessante observar ainda a velocidade com que o ponto de operação do método P&O estabilizou-se, apesar do ponto obtido estar abaixo da máxima potência disponível. Esse comportamento é uma deficiência dessa técnica, que não é adequada a situações de variações abruptas de irradiância, como destacado no Capítulo 2.

Os próximos testes irão avaliar o comportamento das técnicas para variações positivas da irradiância, na mesma proporção dos testes anteriores. No primeiro caso mostrado na Fig. 5.26, a irradiância modificou-se de 780 W/m^2 para 1050 W/m^2 (75% para 100%).

O método I&T obteve o melhor desempenho nesse ensaio, juntamente com as técnicas da razão cíclica fixa e P&O. A rápida atualização do ponto de operação, ocorrido após a modificação da condição de irradiância, permitiu a extração do maior valor de potência do módulo fotovoltaico. Apesar do método P&O ter alcançado o terceiro maior valor de potência, o elevado tempo de rastreamento do ponto de máxima potência, após a variação da irradiância, foi responsável pelo desempenho inferior aos outros dois métodos. No teste seguinte, a irradiância foi modificada de 525 W/m^2 a 1050 W/m^2 (50% para 100%) e os resultados podem ser vistos na Fig. 5.27.



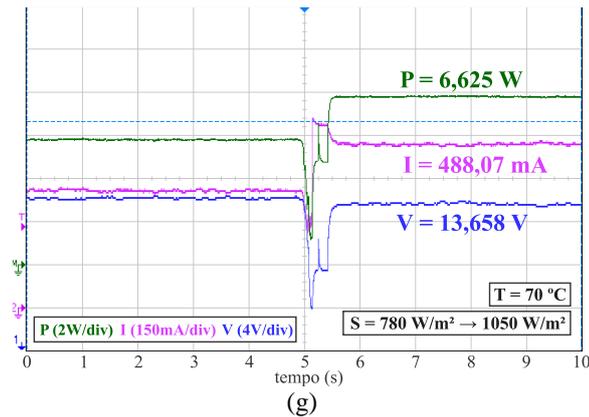
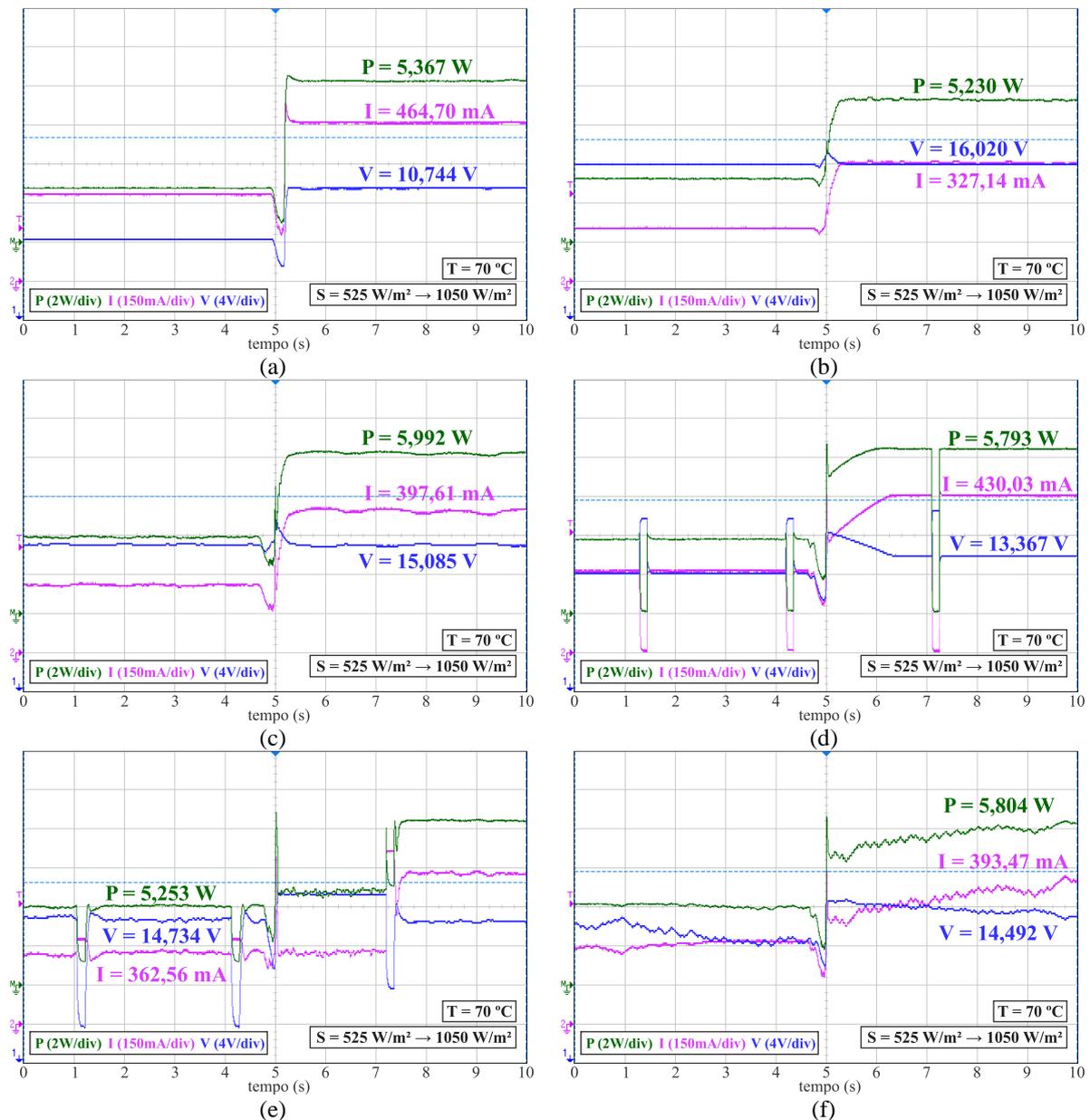


Fig. 5.26 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Irradiância variando de 780 W/m^2 para 1050 W/m^2 e $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$.



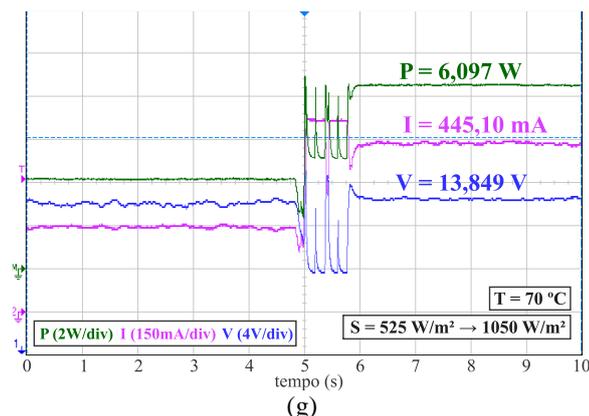
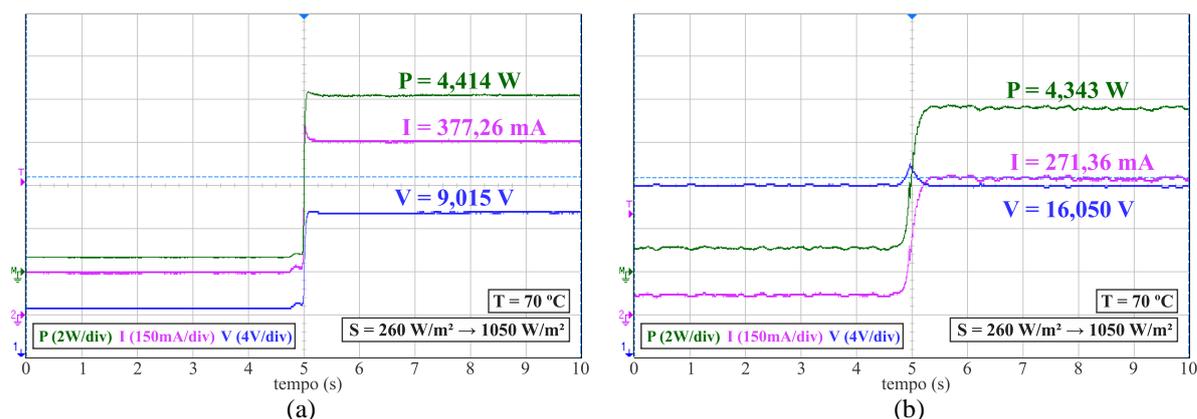


Fig. 5.27 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Irradiância variando de 525 W/m² para 1050 W/m² e T = 70 °C.

Os resultados dessa variação evidenciam a deficiência da técnica da corrente de curto-circuito quando ocorre uma alteração das condições do módulo entre as amostras. No instante 5 segundos da Fig. 5.27e, ocorreu a variação da irradiância, porém, somente após o instante 7 segundos um novo valor da corrente de curto-circuito foi amostrado, o que permitiu ao método alcançar o novo ponto de máxima potência. Situação semelhante ocorreu com o método I&T, que demorou cerca de 0,75 segundos para atualizar seu ponto de operação após a variação da irradiância. Contudo, a técnica I&T obteve a maior potência de saída, ficando a técnica do gradiente de temperatura em segundo lugar e a da tensão de circuito aberto em terceiro. Finalmente, realizou-se um ensaio de variação da irradiância de 260 W/m² a 1050 W/m² (25% para 100%), cujos resultados são mostrados na Fig. 5.28.



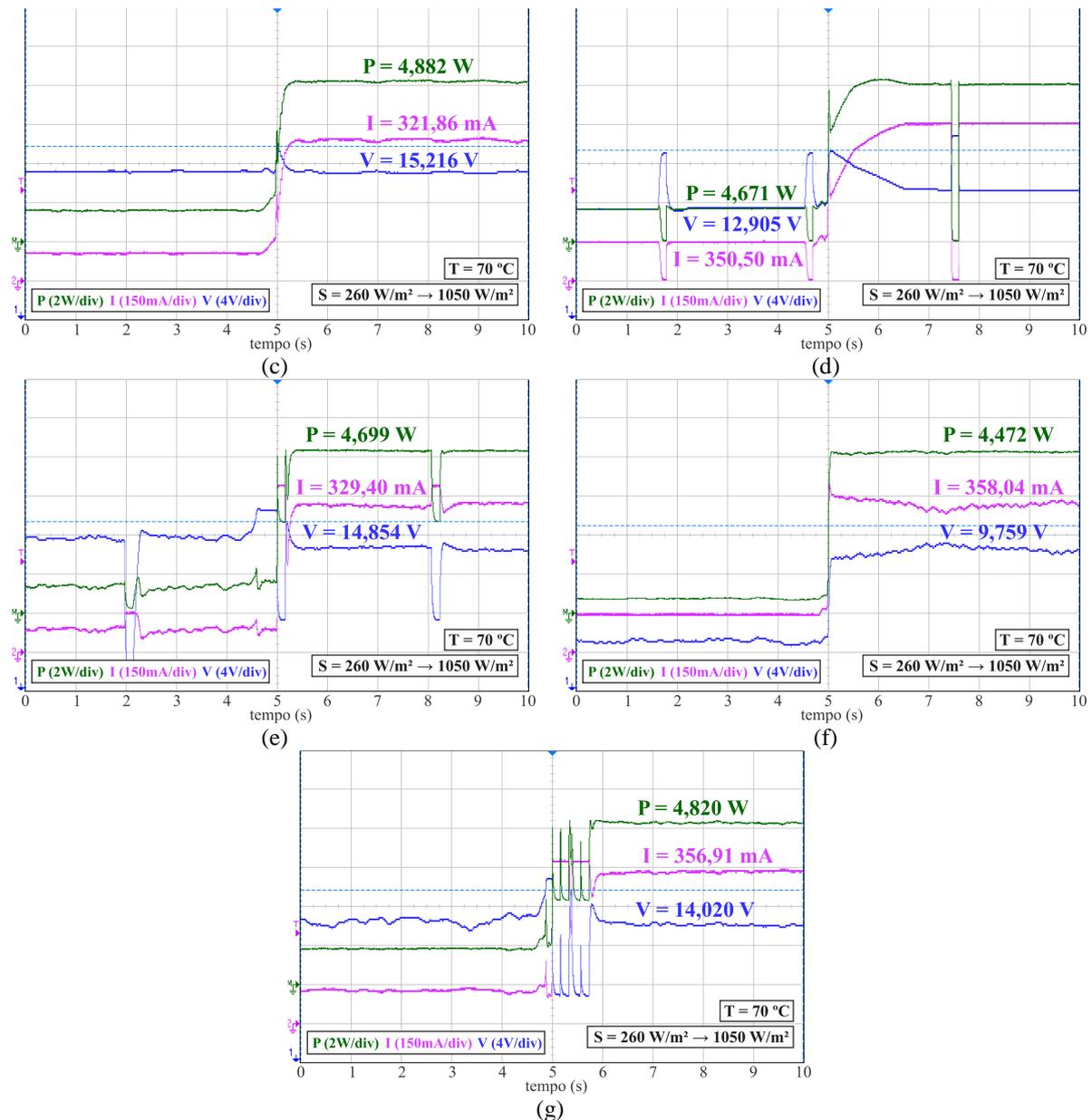


Fig. 5.28 - Tensão, corrente e potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Irradiância variando de 260 W/m² para 1050 W/m² e T = 70 °C.

Os métodos com as maiores potências de saída, para esse ensaio, são: gradiente de temperatura, I&T e corrente de curto-circuito. O atraso na definição do ponto de máxima potência do método I&T resultou na menor potência de saída da técnica, quando comparada à do gradiente de temperatura. Diferente do que ocorreu com o método I&T, a rápida atualização da variável de controle da técnica da corrente de curto-circuito permitiu um melhor desempenho dessa técnica durante o ensaio.

Com o intuito de simplificar a análise dos resultados, apresentam-se nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6, os resultados para os diferentes ensaios. Para cada ensaio, são indicados em vermelho

os melhores resultados, em laranja os métodos que obtiveram o segundo melhor desempenho e, em verde, os classificados em terceiro.

Tabela 5.4 - Comparação das técnicas para diferentes níveis de irradiância, com temperatura constante ($T = 45\text{ °C}$).

Irradiância ($T = 45\text{ °C}$)	Método						
	Dcte	Vcte	Vtemp	Voc	Isc	P&O	I&T
1150 W/m ²	9,988	9,082	10,188	9,781	9,937	10,055	10,191
870 W/m ²	6,355	5,054	7,179	6,878	7,097	7,289	7,320
570 W/m ²	3,062	3,488	4,902	4,656	4,597	4,578	4,988
430 W/m ²	1,832	2,296	3,574	3,382	3,414	3,472	3,585
200 W/m ²	0,476	0,515	0,617	1,398	1,503	1,500	1,523
Total	21,713	20,435	26,460	26,095	26,548	26,894	27,607

Tabela 5.5 - Comparação das técnicas para diferentes níveis de irradiância, com temperatura constante ($T = 65\text{ °C}$).

Irradiância ($T = 65\text{ °C}$)	Método						
	Dcte	Vcte	Vtemp	Voc	Isc	P&O	I&T
1000 W/m ²	8,027	3,617	7,515	7,656	7,855	7,960	7,968
740 W/m ²	4,898	1,843	5,339	5,500	5,632	5,757	5,843
570 W/m ²	3,093	1,437	4,632	4,367	4,375	4,558	4,691
440 W/m ²	1,882	1,378	3,394	3,296	3,257	3,433	3,460
200 W/m ²	0,503	0,441	0,488	1,171	1,597	1,355	1,656
Total	40,116	29,151	47,828	48,085	49,264	49,957	51,225

Tabela 5.6 - Comparação das técnicas para variações na irradiância, com temperatura constante ($T = 70\text{ °C}$).

Variação da Irradiância ($T = 70\text{ °C}$)	Método						
	Dcte	Vcte	Vtemp	Voc	Isc	P&O	I&T
100% p/ 75%	6,423	5,321	6,451	6,424	6,600	6,594	6,595
100% p/ 50%	5,410	4,757	5,996	5,851	5,738	6,003	6,171
100% p/ 25%	4,484	4,187	4,789	4,699	4,625	4,429	4,867
75% p/ 100%	6,513	5,324	6,414	6,371	6,371	6,496	6,625
50% p/ 100%	5,367	5,230	5,992	5,793	5,253	5,804	6,097
25% p/ 100%	4,414	4,343	4,882	4,671	4,699	4,472	4,820
Total	32,611	29,162	34,524	33,809	33,286	33,798	35,175

Os dados das tabelas permitem verificar o melhor rendimento do método I&T proposto, que possui desempenho 2,3% superior à segunda melhor técnica.

5.4. Comparação entre os resultados de simulação e os experimentais

Após a análise dos resultados experimentais, buscou-se comparar os valores obtidos e o comportamento dos métodos, para as mesmas condições, em um ambiente computacional. Para

essa análise, escolheu-se o *software* PSIM[®] e seu modelo físico de módulos fotovoltaicos, sobretudo devido à possibilidade de inserir o código de programação através de blocos DLL (blocos que implementam rotinas em linguagem C) e observar o comportamento de cada uma das técnicas de forma semelhante à execução dos métodos nos testes experimentais. Os parâmetros do módulo fotovoltaico simulado no PSIM[®] estão definidos na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Parâmetros do módulo KS-10 utilizado no software PSIM[®].

Parâmetro	Especificação
Número de células	36
Irradiância de referência	1000 W/m ²
Temperatura de referência	25 °C
Resistência série	0,05 Ω
Resistência <i>shunt</i>	6 kΩ
Corrente de curto-circuito	0,6287 A
Corrente de saturação	9,905 x 10 ⁻⁷ A
Energia de banda proibida	1,12 eV
Fator de idealidade	1,74
Coefficiente de temperatura	3,357 x 10 ⁻⁴ V/°C

Para avaliar o comportamento do sistema real e do sistema simulado, a Fig. 5.29 traz a curva $I \times V$ do módulo KS-10 para diferentes condições de irradiância, sendo a temperatura mantida em 67 °C.

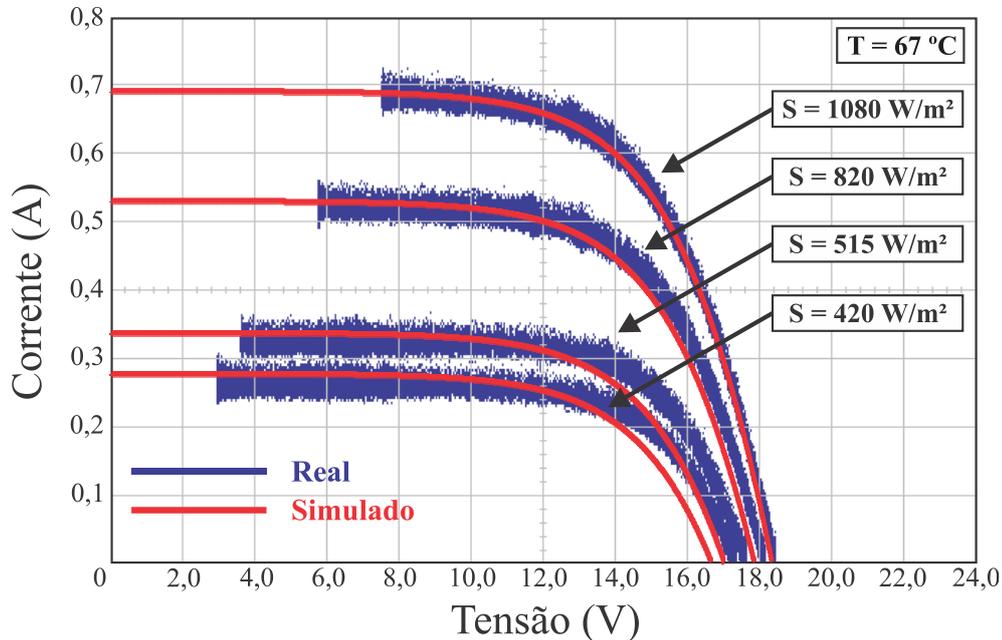


Fig. 5.29 - Comparação da curva $I \times V$ dos sistemas real e simulado para diferentes condições de irradiância.

O comportamento do circuito real e do circuito simulado, observado através da Fig. 5.29, são semelhantes. A primeira condição utilizada na comparação de resultados foi para uma irradiância fixa de 1000 W/m² e uma temperatura de 65 °C. Os resultados são apresentados na Fig. 5.30, sendo os gráficos do simulador sobrepostos às curvas reais. As amostras de corrente e tensão das técnicas da

tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito foram omitidas para facilitar a visualização dos resultados. O valor máximo teórico de potência, obtido através do simulador, é de 7,848 W.

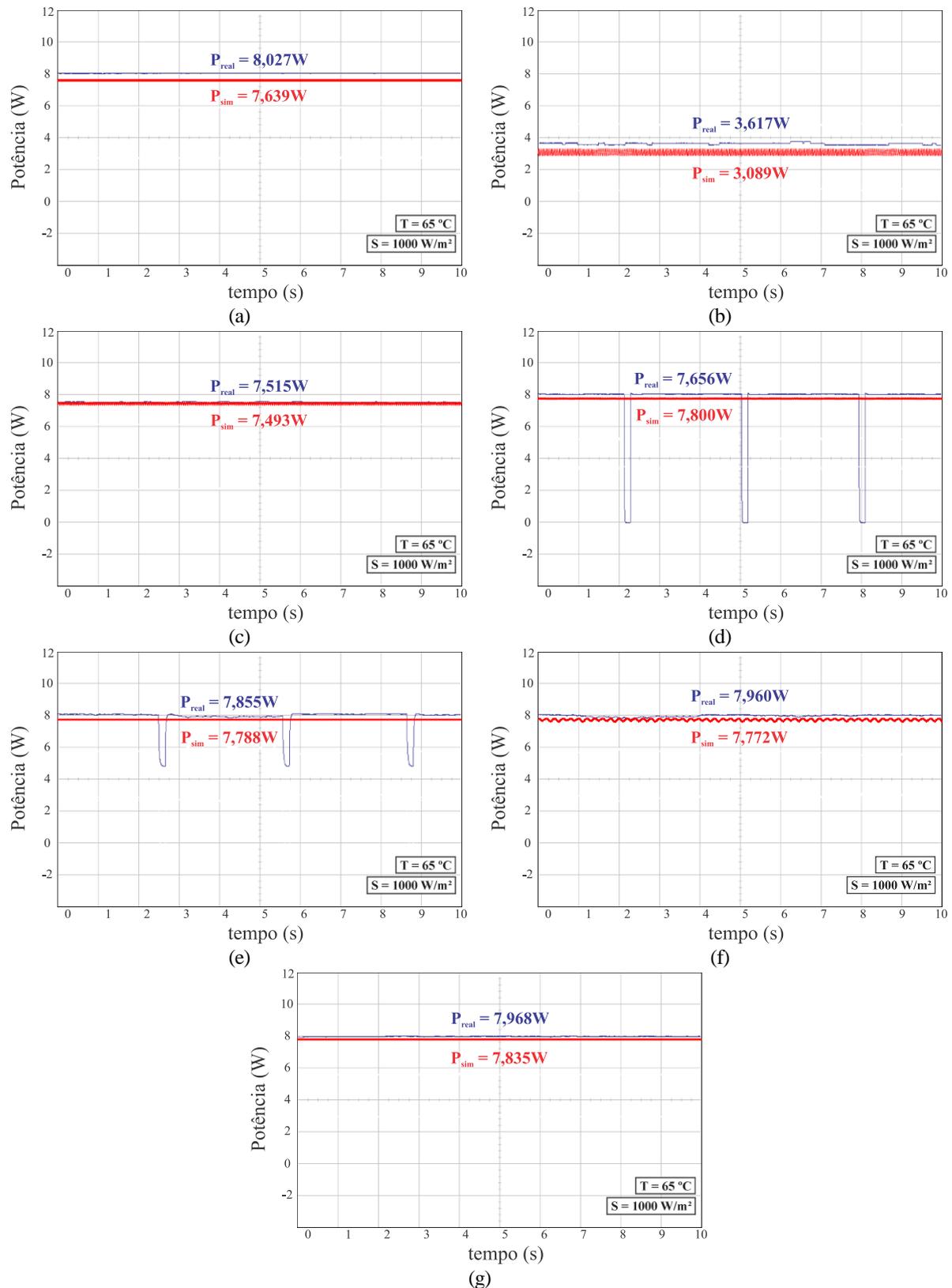
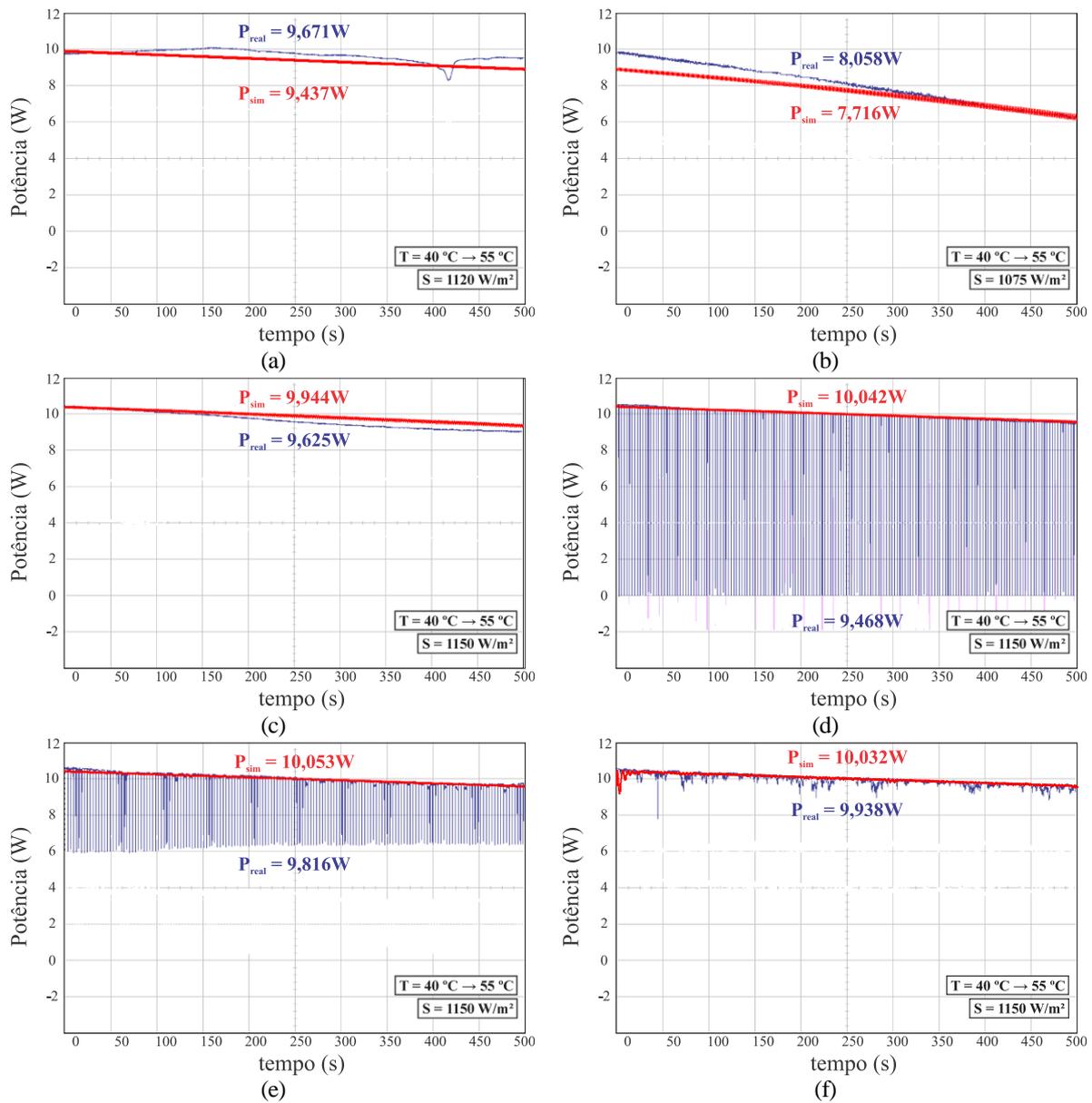


Fig. 5.30 - Potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Comparação entre os resultados experimentais e de simulação para $S = 1000 \text{ W/m}^2$ e $T = 65 \text{ }^\circ\text{C}$.

Para essa primeira condição, observa-se que somente os resultados das técnicas da razão cíclica fixa e da tensão constante distanciam-se ligeiramente dos resultados experimentais. Os demais métodos obtiveram valores de potência muito similares aos resultados experimentais, sobretudo as técnicas do gradiente de temperatura, corrente de curto-circuito, P&O e I&T.

Na segunda comparação, avaliaram-se os resultados para uma condição de variação da temperatura de 15 °C. Os resultados experimentais e práticos podem ser vistos na Fig. 5.31.



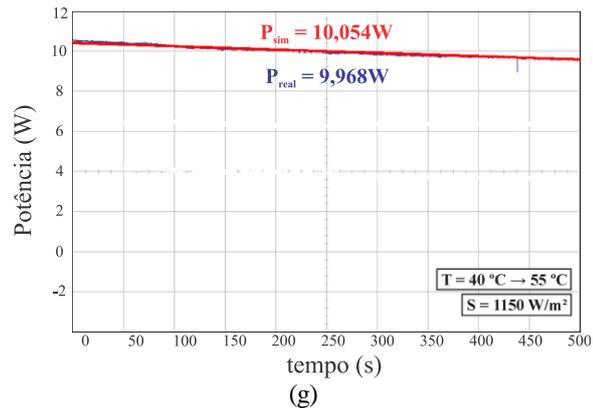
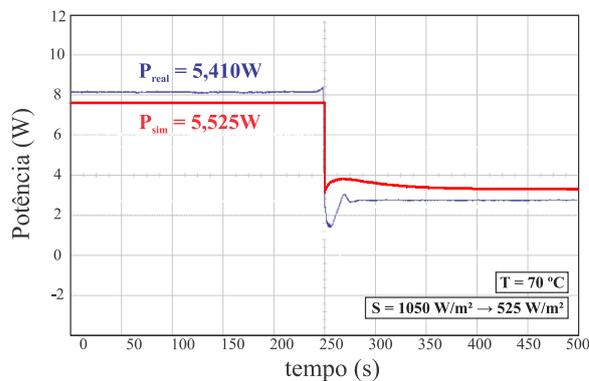
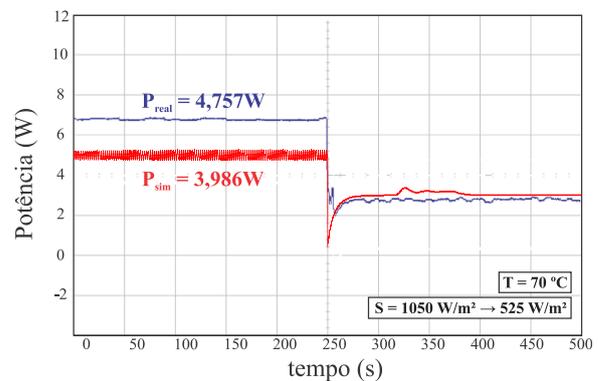


Fig. 5.31 - Potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Comparação entre os resultados experimentais e de simulação para uma variação de 15 °C na temperatura.

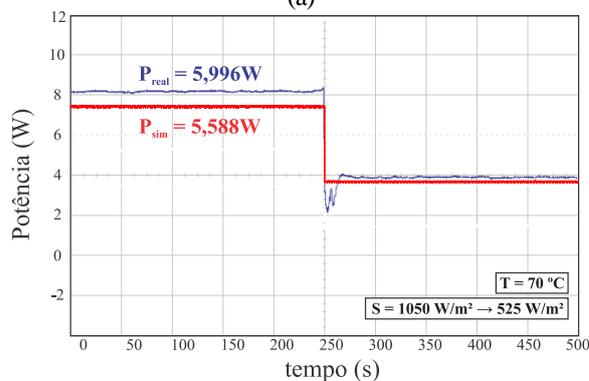
A similaridade entre os resultados de simulação e experimentais, foi ainda mais evidente nesse ensaio, causando a sobreposição das formas de onda em alguns instantes. Novamente, destaca-se a semelhança entre os resultados da técnica I&T, que obteve uma diferença inferior a 1% entre os resultados. Na Fig. 5.32 observa-se a comparação das técnicas para uma variação na irradiância.



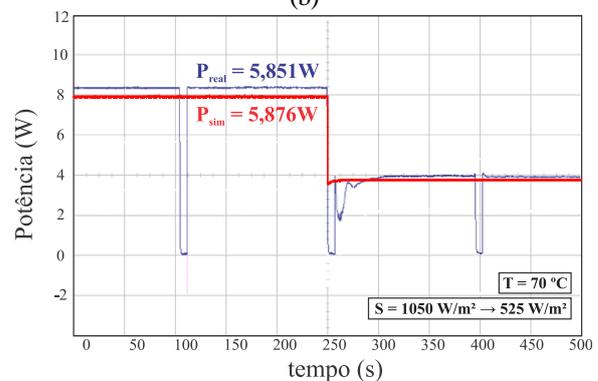
(a)



(b)



(c)



(d)

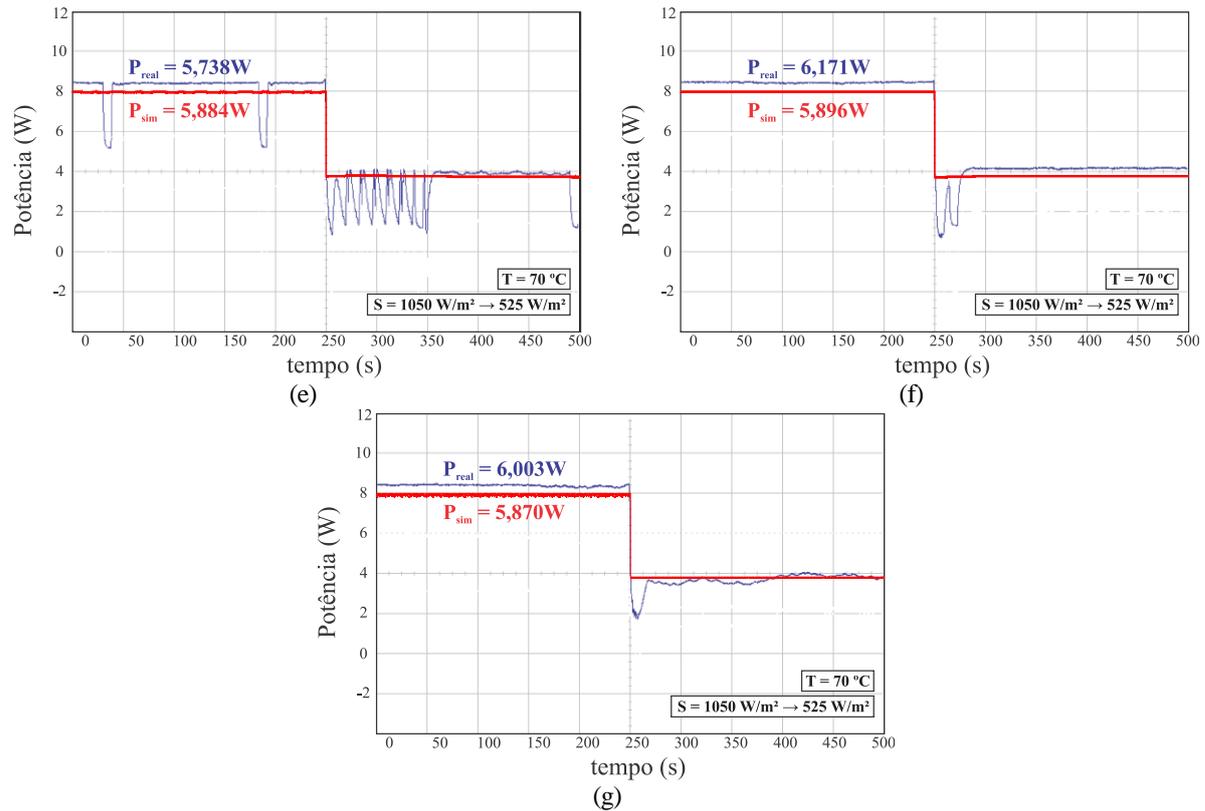


Fig. 5.32 - Potência média das técnicas: (a) razão cíclica fixa, (b) tensão constante, (c) gradiente de temperatura, (d) tensão de circuito aberto, (e) corrente de curto-circuito, (f) P&O, (g) I&T. Comparação entre os resultados experimentais e de simulação para uma variação de 50% na irradiância.

A semelhança entre os resultados experimentais e de simulação é novamente observada, o que sustenta os demais resultados apresentados, através dos quais verifica-se o rendimento superior do método I&T quando comparado aos demais métodos.

5.5. Conclusão

Ao longo do capítulo, foram apresentados os circuitos utilizados na obtenção dos resultados experimentais e os recursos para a variação da irradiância do módulo fotovoltaico. Os resultados experimentais, para situações de irradiância e temperatura constantes, bem como em condições de variação dessas grandezas, foram analisados. Em grande parte dos ensaios, o método I&T apresentou o melhor desempenho dentre todos os métodos, comprovando o comportamento observado no Capítulo 4. Além disso, a comparação entre os resultados de simulação e os resultados práticos, da seção 5.4, destaca a similaridade dos resultados do método I&T para os dois sistemas, assim como das demais técnicas, validando os resultados obtidos.

6. Conclusão Geral

Apresentou-se nesta tese de doutorado o desenvolvimento de uma nova técnica de rastreamento do ponto de máxima potência, denominada I&T, que define o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico com exatidão. O método desenvolvido estima a irradiância de forma indireta, através da amostragem da corrente de curto-circuito, e realiza a medição da temperatura do módulo para definir com grande precisão o MPP.

As medições realizadas pelo método I&T são de baixa complexidade, pois utilizam sensores simples e de custo reduzido, e permitem ao método obter um alto rendimento na extração da máxima potência dos módulos fotovoltaicos.

Ao longo do texto, apresentou-se a modelagem do módulo fotovoltaico, que utiliza equações não lineares na determinação de sua curva $I \times V$. Além disso, avaliou-se a influência das condições climáticas, sobretudo da irradiância e da temperatura, em relação à corrente e tensão de máxima potência. Observou-se que a corrente é mais sensível à irradiância do que a tensão porém, a temperatura afeta de forma mais significativa a tensão de máxima potência do módulo fotovoltaico.

No equacionamento da técnica I&T, realizaram-se análises matemáticas e simplificações para obter o parâmetro de controle da técnica. A relação existente entre a corrente de curto-circuito e a irradiância foi avaliada matematicamente. Dessa forma comprovou-se que, por meio da leitura da corrente de curto-circuito e da temperatura, é possível determinar com exatidão o ponto de máxima potência para diferentes condições de irradiância e temperatura.

Com a premissa de avaliar o desempenho do método proposto, desenvolveram-se dois modelos matemáticos em *softwares* distintos. Sete técnicas diferentes de MPPT foram confrontadas à técnica I&T e a eficiência de cada um dos métodos, comparada. Observou-se, através dos resultados computacionais, que a técnica proposta obteve o melhor desempenho, tanto em situações de variação da irradiância e da temperatura, quanto em condições estáveis das duas grandezas.

Os resultados experimentais confirmaram os estudos realizados por simulação, em que seis técnicas de MPPT, além do método proposto, foram implementadas em uma bancada de testes, desenvolvida para a realização dos ensaios. Corroborando os resultados de simulação, o

método I&T obteve um desempenho elevado nos testes experimentais, com eficiência superior aos demais métodos na maioria das situações analisadas.

Os resultados obtidos, computacionais e experimentais, mostraram que é possível determinar o ponto de máxima potência de um módulo fotovoltaico através de grandezas simples de serem medidas e de um modelamento matemático simplificado. Essa verificação é um contraponto aos sistemas de alta complexidade, que realizam a modelagem do módulo fotovoltaico por meio de inteligência artificial, com modelos matemáticos complexos e que exigem elevados esforços computacionais na determinação do MPP.

Sugere-se, como trabalhos futuros, uma nova implementação do método I&T com sensores de corrente de maior precisão, tendo em vista que essa foi uma das dificuldades durante a confecção do protótipo. Outra melhoria possível, seria a utilização de uma frequência de comutação maior para o conversor CC-CC e a utilização de um conversor *buck-boost*, que, segundo referências da literatura, possibilita que o ponto de máxima potência seja alcançado para qualquer nível de irradiância e temperatura. Além disso, a implementação do método I&T em um ASIC seria de grande interesse, tendo em vista que a integração de técnicas de MPPT em circuitos dedicados é uma tendência, devido às inúmeras possibilidades e a flexibilidade no desenvolvimento do circuito.

7. Apêndice

Serão mostrados a seguir, os diagramas de blocos para implementação das técnicas de MPPT no *software* Matlab / Simulink®.

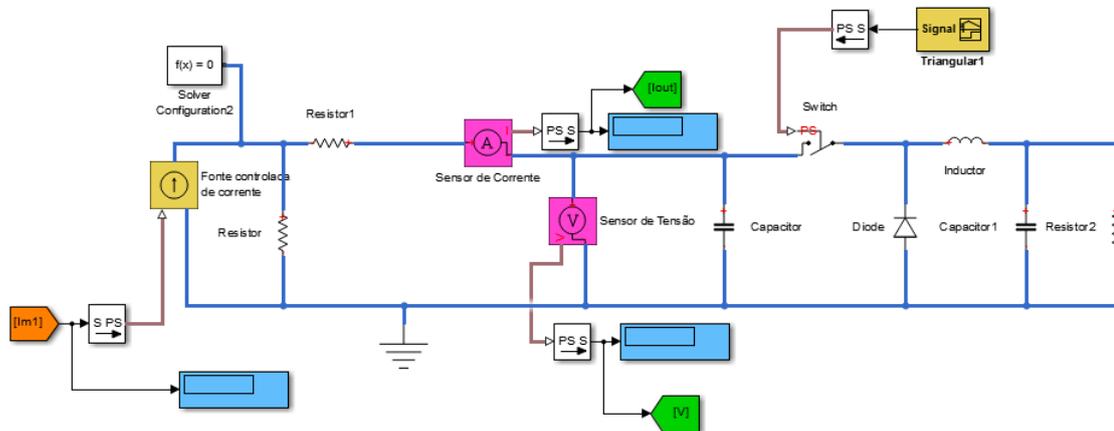


Fig. 7.1 - Diagrama de blocos do método da razão cíclica fixa no *software* Matlab/Simulink®.

Para implementação da técnica da razão cíclica fixa, basta utilizar uma onda quadrada com razão cíclica capaz de produzir a tensão de máxima potência para a STC, como visto na Fig. 7.1. O mesmo se aplica ao método da tensão constante, com seu diagrama de blocos mostrado na Fig. 7.2. Para obter o ponto de máxima potência, basta comparar a tensão de saída do módulo com a tensão de máxima potência para a condição de teste, modificando a razão cíclica do conversor à partir desse cálculo.

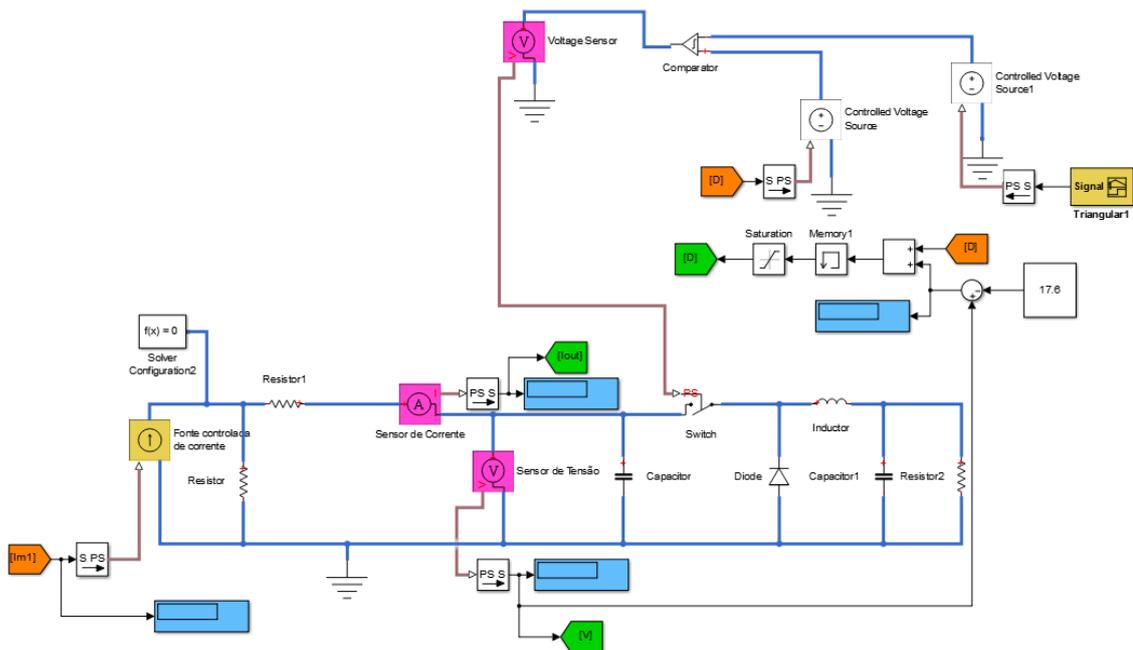


Fig. 7.2 - Diagrama de blocos do método da tensão constante no *software* Matlab/Simulink®.

Para o método do gradiente de temperatura, Fig. 7.3, basta corrigir a tensão $V_{MPP(STC)}$ de acordo com a temperatura do painel, obtendo assim o MPP.

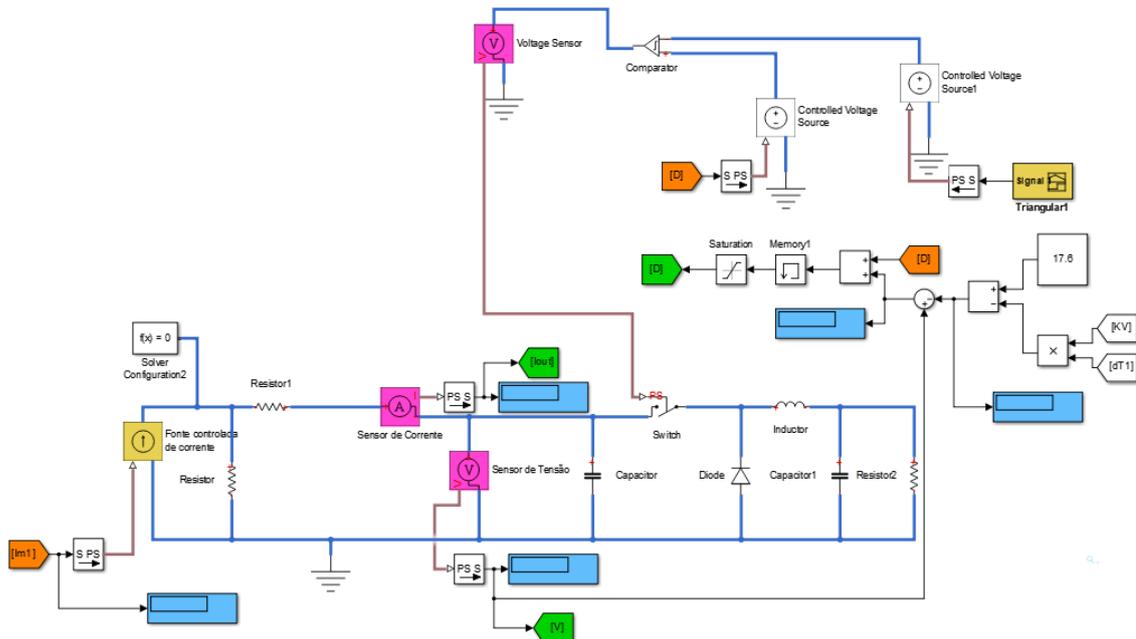


Fig. 7.3 - Diagrama de blocos do método do gradiente de temperatura no *software* Matlab/Simulink®.

Para o método da tensão de circuito aberto, Fig. 7.4, é necessário realizar a abertura do circuito para medição dessa grandeza e, após a multiplicação pela constante k_V , estabelecer o ponto de máxima potência do módulo.

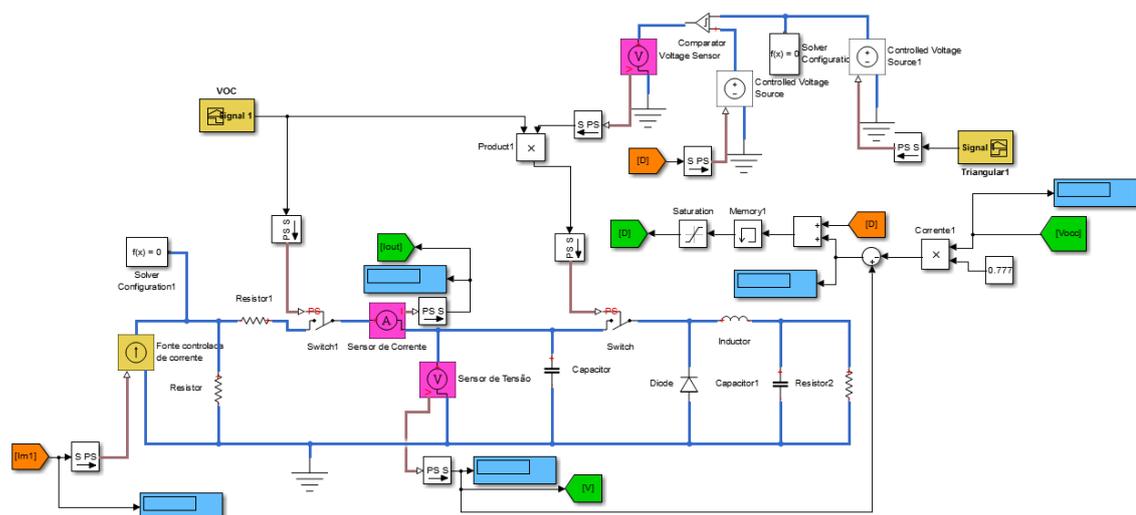


Fig. 7.4 - Diagrama de blocos do método da tensão de circuito aberto no *software* Matlab/Simulink®.

De forma semelhante, a técnica da corrente de curto-circuito, com seu diagrama de blocos apresentado na Fig. 7.5, curto-circuita o painel para obter a corrente nessa condição, que será utilizada na determinação da corrente de máxima potência.

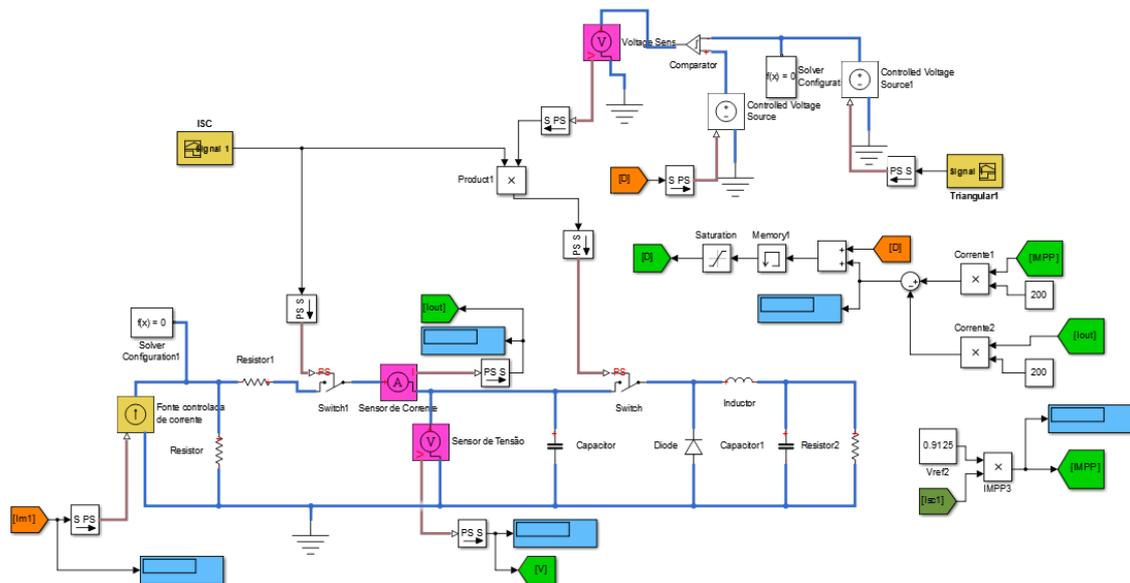


Fig. 7.5 - Diagrama de blocos do método da corrente de curto-circuito no *software* Matlab/Simulink®.

A técnica P&O, Fig. 7.6, é implementada através da análise da diferença entre a potência atual e a anterior, assim como da tensão atual com o seu valor antes da modificação da razão cíclica. De acordo com a combinação desses eventos, estabelece-se o novo ponto de operação do módulo. A razão cíclica pode ser incrementada de acordo com a configuração do passo utilizado (para os testes foi estabelecido em 0,01).

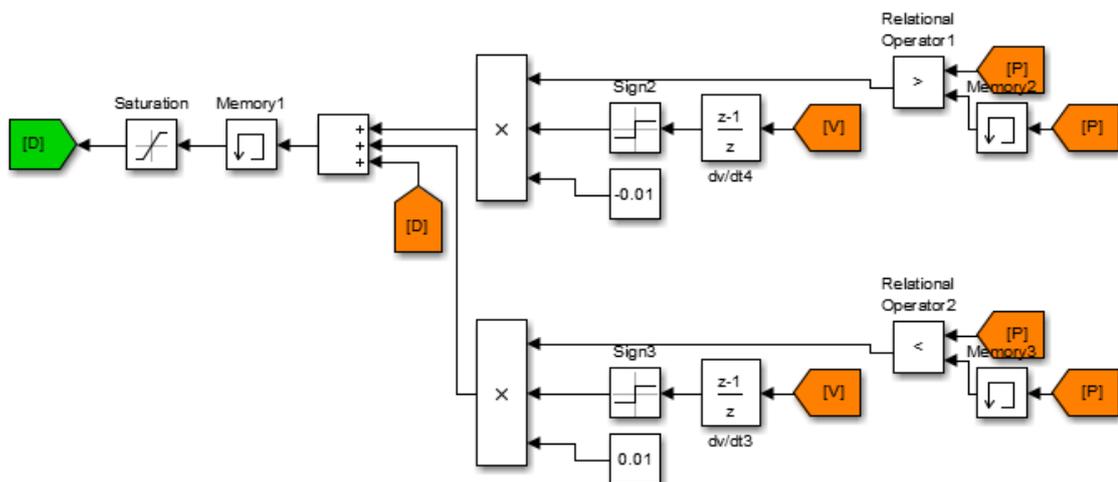


Fig. 7.6 - Diagrama de blocos do método P&O no *software* Matlab/Simulink®.

Por fim, a técnica da condutância incremental, vista na Fig. 7.7, avalia a derivada da potência em relação à derivada da tensão, para determinar o sentido de modificação da razão cíclica. De forma semelhante ao método P&O, a configuração do passo determina a velocidade de convergência da técnica.

8. Referências Bibliográficas

- [1] R. Perez and M. Perez, "A Fundamental Look at Energy Reserves for the Planet," The IEA SHC Solar Update, Vol. 50, pp. 2-3, 2009.
- [2] A. Goodrich, T. James and M. Woodhouse, Residential, Commercial, and Utility Scale Photovoltaic (PV) System Prices in the United States: Current Drivers and Cost-Reduction Opportunities, Tech Report TP-6A20-53347, NREL, Golden, CO., 2012.
- [3] M.A.G. Brito et al., "Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 3, pp. 1156-1167, Mar. 2013.
- [4] B. Subudhi and R. Pradhan, "A Comparative Study on Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Power Systems," IEEE Trans. on Sustainable Energy, Vol. 4, No. 1, pp. 89-98, Jan. 2013.
- [5] R. Faranda and S. Leva, "Energy Comparison of MPPT Techniques for PV Systems," WSEAS Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 6, pp. 446-455, June 2008.
- [6] T. Eswam and P.L. Chapman, "Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, June 2007.
- [7] H. Rezk and A.M. Eltamaly, "A Comprehensive Comparison of Different MPPT Techniques for Photovoltaic Systems," Solar Energy, Vol. 112, pp. 1-11, Feb. 2015.
- [8] M.H. Moradi et al., "A Robust Hybrid Method for Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic Systems," Solar Energy, Vol. 94, pp. 266-276, Aug. 2013.
- [9] P.C.M. Carvalho et al., "Control Method of a Photovoltaic Powered Reverse Osmosis Plant without Batteries Based on Maximum Power Point Tracking," Proc. 2004 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, São Paulo, Brazil, 2004, pp. 137-142.
- [10] T.L. Kottas, Y.S. Boutalis and A.D. Karlis, "New Maximum Power Point Tracker for PV Arrays Using Fuzzy Controller in Close Cooperation with Fuzzy Cognitive Networks," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 21, No. 3, pp. 793-803, Sep. 2006.
- [11] Yang Chen and K.M. Smedley, "A Cost-Effective Single-Stage Inverter with Maximum Power Point Tracking," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19, No. 5, pp. 1289-1294, Sep. 2004.

- [12] P. Midya et al., "Dynamic Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Applications," Proc. 27th Ann. IEEE Power Electronics Specialists Conf., Baveno, Italy, 1996, pp. 1710-1716.
- [13] D. Shmilovitz, "On the Control of Photovoltaic Maximum Power Point Tracker Via Output Parameters," IEE Proc. Electric Power Applications, Vol. 152, No. 2, pp. 239-248, Mar. 2005.
- [14] R. Enne, M. Nikolic and H. Zimmermann, "Dynamic Integrated MPP Tracker in 0.35 μm CMOS," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 28, No. 6, pp. 2886-2894, Jun. 2013.
- [15] M.G. Villalva, J.R. Gazoli and E.R. Filho, "Modeling and Circuit-Based Simulation of Photovoltaic Arrays," Revista Eletrônica de Potência, Vol. 14, No. 1, pp. 35-45, Fev. 2009.
- [16] R.F. Coelho, Estudo dos Conversores Buck e Boost Aplicados ao Rastreamento de Máxima Potência de Sistemas Solares Fotovoltaicos, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [17] http://s3tec.mit.edu/index.php?option=com_content&view=article&id=81&Itemid=130#overview - Acesso em 27/01/15.
- [18] G.B. Piland et al., "Singlet Fission: From Coherences to Kinetics," The Journal of Physical Chemistry Letters, Vol. 5, No. 13, pp. 2312-2319, June 2014.
- [19] A.S. Sedra and K.C. Smith, Microeletrônica, 5ªed, Pearson - Prentice-Hall, 2007, p. 864.
- [20] Kyocera KS-10 datasheet - <http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5210.pdf> - Acesso em 10/02/15.
- [21] M.M. Casaro and D.C. Martins, "Modelo de Arranjo Fotovoltaico Destinado a Análises em Eletrônica de Potência via Simulação," Eletrônica de Potência, Vol. 13, No. 3, pp. 141-146, Aug. 2008.
- [22] R.F. Coelho, F.M. Concer and D.C. Martins, "Analytical and Experimental Analysis of DC-DC Converters in Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Applications," Proc. IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Glendale, AZ., 2010, pp. 2778-2783.
- [23] M.H. Rashid, Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações, 4ªed., Pearson - Prentice Hall, 2015, p. 880.
- [24] J.I.L. Seguel, Projeto de um Sistema Fotovoltaico Autônomo de Suprimento de Energia Usando Técnica MPPT e Controle Digital, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

- [25] P.C.M. Bernardo, *Análise e Aplicação da Técnica de Rastreamento de Máxima Potência em um Conversor Buck para Sistemas Fotovoltaicos*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [26] V.C. Kothak and P. Tyagi, "DC to DC Converter in Maximum Power Point Tracker," *Int. Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Eng.*, Vol. 2, No. 12, pp. 6115-6125, Dec.2013.
- [27] D. Raveendhra, P. Joshi, and R. K. Verma, "Performance and control system design for FPGA based CVMPPPT boost converter for remote SPV water pumping system applications," *Proc. of the Power and Energy Systems Conf.: Towards Sustainable Energy*, 2014, pp. 1-6.
- [28] M. Park and I.K. Yu, "A study on the optimal voltage for MPPT obtained by surface temperature of solar cell," in *Proceedings of the 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, Busan, South Korea, 2004, pp. 2040-2045.
- [29] T. Noguchi, S. Togashi and R. Nakamoto, "Short-Current Pulse-Based Maximum-Power-Point Tracking Method for Multiple Photovoltaic-and-Converter Module System," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 49, No. 1, pp. 217-223, Feb. 2002.
- [30] A. Tariq and J. Asghar, "Development of an Analog Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Panel," *Int. Conf. on Power Electronics and Drives Systems*, Vol. 1, Kuala Lumpur, Malaysia, 2005, pp. 251-255.
- [31] J. Ahmad, "A Fractional Open Circuit Voltage Based Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Arrays," *2nd Int. Conf. on Software Technology and Engineering (ICSTE)*, Vol. 1, San Juan, PR., 2010, pp. 247-250.
- [32] N. Mutoh, M. Ohno and T. Inoue, "A Method for MPPT Control While Searching for Parameters Corresponding to Weather Conditions for PV Generation Systems," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 4, pp. 1055-1065, June 2006.
- [33] O. Wasynczuk, "Dynamic behavior of a class of photovoltaic power systems," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. 102, No. 9, pp. 3031-3037, Sep. 1983.
- [34] K.H. Hussein et al., "Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions," *IEE Proc. Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 142, No. 1, pp. 59-64, Jan. 1995.
- [35] Kipp & Zonen SP Lite2 Pyranometer datasheet - <http://www.kippzonen.com> - Acesso em 20/02/15.

- [36] G.E. Ahmad, H.M.S. Hussein and H.H. El-Ghetany, "Theoretical Analysis and Experimental Verification of PV Modules," *Renewable Energy*, Vol. 28, No. 8, pp. 1159-1168, July 2003.
- [37] M. Veerachary, "PSIM Circuit-Oriented Simulator Model for the Nonlinear Photovoltaic Sources," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 42, No. 2, pp. 735-740, Apr. 2006.
- [38] W. Xiao, W.G. Dunford and A. Capel, "A Novel Modeling Method for Photovoltaic Cells," *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 3, Aachen, Germany, 2004, pp. 1950-1956.
- [39] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, 2^a ed., John Wiley & Sons, 2011, p. 1166.
- [40] Jianming Xu et al., "Photovoltaic Power System with MPPT Functionality for a Small-Size Electric Vehicle," *International Journal of Photoenergy*, Vol. 2014, pp. 1-9, 2014.
- [41] J.S.C.M. Raj and A.E. Jeyakumar, "A Two Stage Successive Estimation Based Maximum Power Point Tracking Technique for Photovoltaic Modules," *Solar Energy*, Vol. 103, pp. 43-61, May 2014.
- [42] A.M. Latham et al., "Analysis and Optimization of Maximum Power Point Tracking Algorithms in the Presence of Noise," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 28, No. 7, pp. 3479-3494, July 2013.
- [43] I. Barbi, C.H.I. Font and R.L. Alves, *Projeto Físico de Indutores e Transformadores*, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Março 2002, p. 11.
- [44] Ivo Barbi, *Projetos de Fontes Chaveadas*, 2^a ed., edição do autor, 2007, p. 334.
- [45] ATMEGA 2560 datasheet - http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf - Acesso em 13/10/2015.
- [46] INA19x Current Shunt Monitor datasheet - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina195.pdf> - Acesso em 02/11/2015.
- [47] Allegro ACS712 datasheet - <http://www.allegromicro.com/~media/Files/Datasheets/-ACS712Datasheet.ashx> - Acesso em 14/10/2015.
- [48] OP07C datasheet - <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/op07c.pdf> - Acesso em 12/01/2016.