

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE IOP TOMAGGI

**Análise Comparativa de Métodos de
Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
em Painéis Fotovoltaicos**

Porto Alegre

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

HENRIQUE IOP TOMAGGI

**Análise Comparativa de Métodos de Rastreamento do
Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos**

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores

Porto Alegre

2018

CIP - Catalogação na Publicação

Tomaggi, Henrique Iop
Análise Comparativa de Métodos de Rastreamento do
Ponto de Máxima Potência em Painéis Fotovoltaicos /
Henrique Iop Tomaggi. -- 2018.
73 f.
Orientador: Jeferson Vieira Flores.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto
Alegre, BR-RS, 2018.

1. Energia Solar. 2. Painéis Fotovoltaicos. 3.
Rastreamento do Ponto de Máxima Potência. 4. Sistemas
de Controle. I. Flores, Jeferson Vieira, orient. II.
Título.

Agradecimentos

Agradeço ao professor Fausto Líbano, ao meu orientador, professor Jeferson, e à minha família.

Resumo

Existe um único ponto de operação de um sistema fotovoltaico no qual é gerada a máxima potência, chamado ponto de máxima potência (*Maximum Power Point* - MPP). Portanto, o rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT) é uma das principais funções que um sistema fotovoltaico deve ter. Na literatura vários métodos foram propostos, desde os métodos convencionais, como Perturbar e Observar (P&O) e condutância incremental, até métodos inteligentes, como fuzzy e redes neurais. Neste trabalho, são feitas comparações entre os métodos P&O, fuzzy e *Extremum Seeking Control* (ESC). Para isso, é desenvolvido um ambiente de simulação composto por MATLAB/Simulink e PSIM, a fim de poder implementar os três métodos de MPPT. Esses métodos são testados em variadas situações, e seus parâmetros são ajustados para que o desempenho seja o melhor possível. Resultados oriundos de dados reais de irradiação e temperatura mostram que, em termos de eficiência, não há distinção entre os métodos. A seguir, esses métodos são implementados em um ATmega328P, o microcontrolador usado no Arduino. A técnica de *Hardware-In-the-Loop* (HIL) é então utilizada para comprovar que o comportamento no ambiente de simulação e no *hardware* são equivalentes. Com relação ao tempo de execução, o método fuzzy é o mais lento, enquanto que os outros dois têm desempenho parecido. Posteriormente, o sistema físico é validado experimentalmente nos módulos solares instalados no prédio do Instituto Eletrotécnico da UFRGS, e mais dois experimentos são realizados. O primeiro experimento consiste em cobrir e descobrir um dos módulos, e o segundo experimento, na coleta de dados em regime permanente. Os resultados permitem observar que, em relação ao tempo de acomodação, o ESC é lento, o P&O é rápido, e o fuzzy é rápido em uma direção e lento na outra. Além disso, o P&O tem o maior desvio-padrão, enquanto que os outros dois métodos obtêm valores pequenos e parecidos.

Palavras-chave: Perturbar e Observar, Fuzzy, *Extremum Seeking Control*, Rastreamento do Ponto de Máxima Potência.

Abstract

There is a single operating point of a photovoltaic system in which the maximum power is generated, called Maximum Power Point (MPP). Therefore, the Maximum Power Point Tracking (MPPT) is one of the key functions of a photovoltaic system. In the literature several methods have been proposed, from conventional methods such as Perturb and Observe (P&O) and incremental conductance, to intelligent methods such as fuzzy and neural networks. In this work, comparisons are made between the P&O, fuzzy and Extremum Seeking Control (ESC) methods. To this end, a simulation environment is developed comprised of MATLAB/Simulink and PSIM, to implement the three MPPT methods. These methods are tested in varied situations, and their parameters are adjusted to the best performance. Results originated from actual irradiation and temperature show that, in terms of efficiency, there is no difference between the methods. After that, these methods are implemented in an ATmega328P, the microcontroller used in Arduino. The Hardware-In-the-Loop (HIL) technique is then used to prove that the behavior in the simulation environment and in the hardware are equivalent. Regarding the execution time, the fuzzy method is the slowest, whilst the other two perform similarly. Subsequently, the system is experimentally validated in the solar modules installed in the building of the Electrotechnical Institute of UFRGS, and two more experiments are carried out. The first experiment consists of covering and discovering the modules, and the second experiment, of a data collection in steady state. The results allow to see that, in relation to settling time, ESC is slow, P&O is fast, and fuzzy is fast in one direction and slow in the other. In addition, P&O has the highest standard deviation, whilst the two other has both small and similar values.

Keywords: Perturb and Observe, Fuzzy, Extremum Seeking Control, Maximum Power Point Tracking.

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação esquemática de uma célula solar comercial.	14
Figura 2 – Efeito da presença e ausência de iluminação na Equação (4).	16
Figura 3 – Modelo elétrico da célula solar.	17
Figura 4 – Estrutura hierárquica de um sistema fotovoltaico.	18
Figura 5 – Curvas de potência e corrente em função da tensão em uma matriz solar.	19
Figura 6 – Efeito da irradiação sobre a curva da potência.	21
Figura 7 – Efeito da irradiação sobre a curva da corrente.	21
Figura 8 – Efeito da temperatura sobre a curva da potência.	22
Figura 9 – Efeito da temperatura sobre a curva da corrente.	22
Figura 10 – Conexão elétrica entre a matriz solar, o conversor CC-CC e a carga.	23
Figura 11 – Resultado da alteração no ângulo da reta de carga.	24
Figura 12 – Caminho percorrido pelo ponto de operação em condições meteorológicas estáveis.	25
Figura 13 – Fluxograma do método P&O.	26
Figura 14 – Esquema de um FLC.	27
Figura 15 – Sequência de passos seguidos por um FLC.	29
Figura 16 – Diagrama de blocos de um controlador que implementa o ESC.	30
Figura 17 – Fluxograma do método de ESC.	31
Figura 18 – Sistema de potência e suas divisões.	34
Figura 19 – Curva da potência do módulo solar simulado.	35
Figura 20 – Curva da corrente do módulo solar simulado.	35
Figura 21 – Ilustração do efeito de diferentes valores de <i>duty cycle</i> em uma onda quadrada.	36
Figura 22 – Diagrama de blocos do controlador que utiliza o método P&O.	37
Figura 23 – Implementação do FLC.	38
Figura 24 – Variáveis linguísticas e funções de pertinência da variação na potência.	39
Figura 25 – Variáveis linguísticas e funções de pertinência da variação na tensão.	39
Figura 26 – Variáveis linguísticas e funções de pertinência da variação no <i>duty cycle</i>	40
Figura 27 – Diagrama de blocos do controlador baseado no ESC.	41
Figura 28 – Diferentes valores de ganho e seus efeitos.	42
Figura 29 – Resultados do primeiro ensaio em relação à potência.	43
Figura 30 – Ampliação da Figura 29.	44
Figura 31 – Resultados do primeiro ensaio em relação ao <i>duty cycle</i>	44
Figura 32 – Ampliação da Figura 31.	45
Figura 33 – Resultados do segundo ensaio em relação à potência.	45
Figura 34 – Resultados do segundo ensaio em relação ao <i>duty cycle</i>	46

Figura 35 – Comportamento da irradiação ao longo do tempo na amostra selecionada.	47
Figura 36 – Potência extraída na simulação.	48
Figura 37 – <i>Duty cycle</i> calculado na simulação.	48
Figura 38 – Visão de alto nível do sistema físico.	50
Figura 39 – Curvas de potência dos módulos solares.	51
Figura 40 – Curvas de corrente dos módulos solares.	52
Figura 41 – Esquemático do conversor CC-CC e da carga.	53
Figura 42 – Sensor de tensão.	54
Figura 43 – Sensor de corrente.	55
Figura 44 – Diagrama de estados simplificado do microcontrolador.	57
Figura 45 – <i>Duty cycle</i> no ambiente de simulação.	59
Figura 46 – Diferença entre o <i>duty cycle</i> obtido na simulação e o obtido no HIL para o método P&O.	59
Figura 47 – Diferença entre o <i>duty cycle</i> obtido na simulação e o obtido no HIL para o FLC.	60
Figura 48 – Diferença entre o <i>duty cycle</i> obtido na simulação e o obtido no HIL para o método de ESC.	60
Figura 49 – Potência extraída no teste experimental.	62
Figura 50 – <i>Duty cycle</i> obtido no teste experimental.	63
Figura 51 – Ilustração dos deslocamentos no ponto de operação.	64
Figura 52 – Potência gerada no primeiro experimento.	65
Figura 53 – <i>Duty cycle</i> obtido no primeiro experimento.	65
Figura 54 – Potência gerada no segundo experimento.	66
Figura 55 – Ampliação da Figura 54.	67
Figura 56 – <i>Duty cycle</i> obtido no segundo experimento.	67
Figura 57 – Ampliação da Figura 56.	68

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Especificações do módulo solar SY-200M nas STC.	33
Tabela 2 – Regras usadas pelo FLC.	40
Tabela 3 – Eficiência dos métodos de MPPT.	49
Tabela 4 – Tempo de execução médio dos métodos de MPPT.	61
Tabela 5 – Horários de funcionamento dos métodos de MPPT.	62
Tabela 6 – Tempo de acomodação médio dos métodos de MPPT.	66
Tabela 7 – Desvio-padrão médio dos métodos de MPPT.	68

Lista de Abreviaturas e Siglas

ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
CC	Corrente Contínua
ESC	<i>Extremum Seeking Control</i>
FLC	<i>Fuzzy Logic Controller</i>
HIL	<i>Hardware-In-the-Loop</i>
MPP	<i>Maximum Power Point</i>
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracking</i>
P&O	Perturbar e Observar
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>

Lista de Símbolos

$\operatorname{arccot}(x)$	Função arco cotangente
MAX	Operador máximo
MIN	Operador mínimo
$\operatorname{sgn}(x)$	Função sinal

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Células Solares	14
2.1.1	Modelo Elétrico	15
2.1.2	Conexão em Série e em Paralelo	17
2.1.3	Ponto de Máxima Potência	19
2.1.4	Dependência da Irradiação e da Temperatura	20
2.2	Métodos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência	23
2.2.1	Princípio de Funcionamento	23
2.2.2	Perturbar e Observar	25
2.2.3	Controlador Baseado em Lógica Fuzzy	27
2.2.4	<i>Extremum Seeking Control</i>	30
3	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	33
3.1	Ambiente de Simulação	33
3.1.1	Sistema de Potência	33
3.1.2	Sistema de Controle	36
3.1.3	Especificação dos Métodos de MPPT	37
3.1.4	Teste dos Métodos de MPPT	42
3.2	Simulação com Dados Reais de Irradiação e Temperatura	46
4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	50
4.1	Descrição do Sistema Físico	50
4.1.1	Matriz Solar	51
4.1.2	Conversor CC-CC e Carga	52
4.1.3	Instrumentação	53
4.1.4	Microcontrolador e <i>Display</i>	56
4.2	Validação do Sistema Físico	58
4.3	Experimentos Realizados	61
5	CONCLUSÃO	69
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
	APÊNDICE A - FOTOS DA BANCADA EXPERIMENTAL	72

1 Introdução

A geração renovável de energia é importante na medida em que, diferentemente da geração baseada em energias fósseis, não emite gases de efeito estufa, além de permitir a geração descentralizada, o que é um fator relevante principalmente para populações que residem fora das grandes cidades, em países em desenvolvimento (KAUNDINYA; BALACHANDRA; RAVINDRANATH, 2009). Uma alternativa que cumpre esses requisitos é a energia solar, que é convertida diretamente em energia elétrica pela célula solar (BENDIB; BELMILI; KRIM, 2015). Agrupadas, as células solares formam módulos e painéis solares (VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009). Por sua vez, um conjunto de painéis solares recebe a denominação de matriz solar (FEMIA *et al.*, 2012).

A matriz solar possui um ponto ideal de operação na sua relação entre a tensão e a corrente, no qual fornece a sua potência máxima, chamado ponto de máxima potência (*Maximum Power Point* - MPP) (ALI *et al.*, 2012). Entretanto, o MPP varia significativamente com as condições de operação, como irradiação e temperatura. Assim, um dos objetivos principais do controle de matrizes solares é garantir que elas operem sempre fornecendo a sua potência máxima, técnica conhecida como rastreamento do ponto de máxima potência (*Maximum Power Point Tracking* - MPPT). Na literatura vários métodos foram propostos, desde os métodos convencionais, como Perturbar e Observar (P&O) e condutância incremental, até métodos inteligentes, como fuzzy e redes neurais. Produtos usados comercialmente usam geralmente os métodos convencionais, já que eles se caracterizam, principalmente, por implementação simples e versatilidade (BENDIB; BELMILI; KRIM, 2015). Neste trabalho, foram feitas comparações entre os métodos P&O, fuzzy e *Extremum Seeking Control* (ESC).

O método P&O é caracterizado pela injeção de uma perturbação no sistema, cujo efeito é usado para fazer com que o ponto de operação atinja o MPP. Esse efeito pode ser o aumento da potência gerada, ou sua diminuição. Se ocorrer o aumento da potência, a nova perturbação é realizada no mesmo sentido que a anterior, e se ocorrer a diminuição da potência, a nova perturbação é realizada no sentido contrário (FEMIA *et al.*, 2012).

Por outro lado, o método fuzzy provê um meio efetivo de capturar a natureza inexata e aproximada do mundo real. Portanto, esse método é particularmente vantajoso quando os processos são complexos demais para serem analisados por ferramentas tradicionais (LEE, 1990). O método fuzzy consiste de três estágios: fuzzificação, lógica de tomada de decisões e defuzzificação (ALI *et al.*, 2012). Em grande parte das implementações, a derivada da curva da potência da matriz solar é calculada e usada para buscar o MPP. Porém, neste

trabalho, o método fuzzy será derivado a partir do algoritmo do P&O (ALAJMI *et al.*, 2011).

Finalmente, o método de ESC funciona adicionando uma perturbação senoidal no ponto de operação do sistema. Após passar pela matriz solar, a mesma perturbação pode ser observada na potência gerada, a qual, se filtrada por um filtro passa-altas e multiplicada pela mesma perturbação senoidal, resulta em um sinal positivo se o ponto de operação corrente estiver à esquerda do MPP, e negativo se o ponto de operação estiver à direita do MPP. Ao integrar esse sinal, o método adaptativamente encontra o MPP (BRUNTON *et al.*, 2010).

Portanto, os objetivos deste trabalho são: comparar via simulação os métodos P&O, fuzzy e ESC; implementar esses métodos em *hardware* de baixo custo; e realizar a validação experimental em módulos solares instalados no prédio do Instituto Eletrotécnico da UFRGS.

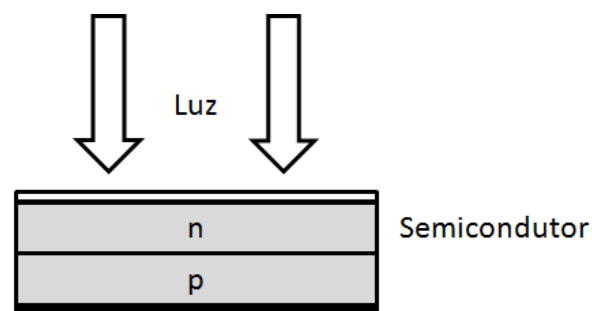
2 Revisão Bibliográfica

2.1 Células Solares

A célula solar é o dispositivo que realiza a conversão de energia luminosa em energia elétrica, um processo chamado de efeito fotovoltaico. Vários materiais exibem o efeito fotovoltaico, porém, comercialmente, apenas junções de semicondutores de silício, também denominadas junções PN, são utilizadas em células solares (GOETZBERGER; HOFFMANN, 2005). Embora as junções PN não sejam ideais, já que a sua capacidade de absorção de luz solar é baixa, o que implica em baixa eficiência, a sua fabricação é economicamente viável (VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009). Outros materiais, como disseleneto de cobre índio-gálio (CIGS) e telureto de cádmio (CdTe), são simplesmente inviáveis devido ao seu alto custo de produção (GOETZBERGER; HOFFMANN, 2005). O absoluto domínio das junções PN pode ser demonstrado a partir dos dados da participação de mercado de 2002, em que junções PN nas formas cristalina e amorfa representavam 93% do total. Esse número é resultado do grande avanço tecnológico originalmente concebido para a fabricação de transistores e circuitos integrados, que permitiu a redução do preço do silício usado nessas junções (GOETZBERGER; HOFFMANN, 2005).

A Figura 1 mostra a representação esquemática de uma célula solar comercial, que consiste em uma junção PN exposta à luz mas protegida do ambiente (VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009).

Figura 1 – Representação esquemática de uma célula solar comercial.



Fonte: Produzida pelo autor.

2.1.1 Modelo Elétrico

A corrente na junção PN é dada pela subtração de duas correntes opostas (SEDRA; SMITH, 2009):

$$I_J = I_D - I_S \quad (1)$$

onde I_D é a corrente de difusão de portadores majoritários e I_S é a corrente de deriva de portadores minoritários. Por sua vez, portadores majoritários são lacunas livres no lado P e elétrons livres no lado N, enquanto que portadores minoritários são lacunas livres no lado N e elétrons livres no lado P. Se a junção PN estiver em circuito aberto, essas duas correntes se igualam e portanto I_J será nula.

A partir da Equação (1), a relação entre a tensão e a corrente em uma junção PN pode ser obtida como (SEDRA; SMITH, 2009):

$$I_J = I_S \left(e^{V_J/V_T} - 1 \right) \quad (2)$$

onde V_J é a tensão entre os terminais e V_T é a tensão térmica, diretamente proporcional à temperatura. Na Equação (2), I_S é também chamada de corrente reversa de saturação.

Entretanto, se há luz solar incidente, os fótons que possuem energia suficiente geram portadores minoritários que são coletados e produzem uma corrente dada por (VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009):

$$I_L = \left(I_{Ln} + K_I (T - T_n) \right) \frac{G}{G_n} \quad (3)$$

onde I_{Ln} é a corrente nominal, K_I é o coeficiente de curto-circuito, T é a temperatura, T_n é a temperatura nominal, G é a irradiação e G_n é a irradiação nominal. Normalmente os valores nominais são as condições de teste padrão (*Standard Test Conditions* - STC), que consistem nos seguintes parâmetros:

- Irradiação: 1000 W/m²;
- Temperatura: 25 °C;
- Espectro de massa de ar: 1,5.

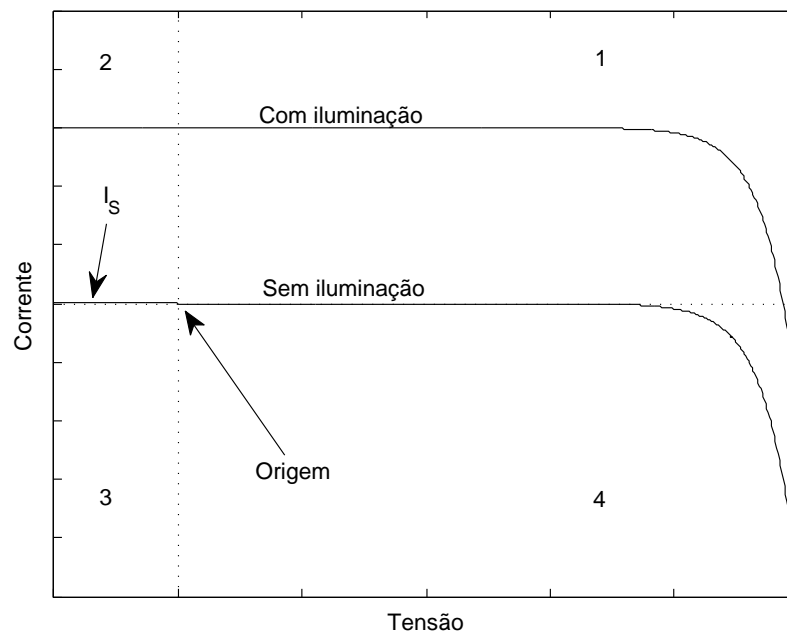
A principal consequência de (3) é a proporcionalidade entre a corrente I_L e a irradiação G a que a célula solar está submetida.

Assim, a corrente de saída da célula é dada por (VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009):

$$I = I_L - I_J \quad (4)$$

Quando não há iluminação, I_L se anula. A Figura 2 mostra como a presença e a ausência de iluminação afetam (4). A corrente I_L é considerada constante com relação à tensão e I_S é a corrente reversa de saturação referida em (2) (VILLALVA; GAZOLI; RUPPERT FILHO, 2009).

Figura 2 – Efeito da presença e ausência de iluminação na Equação (4).



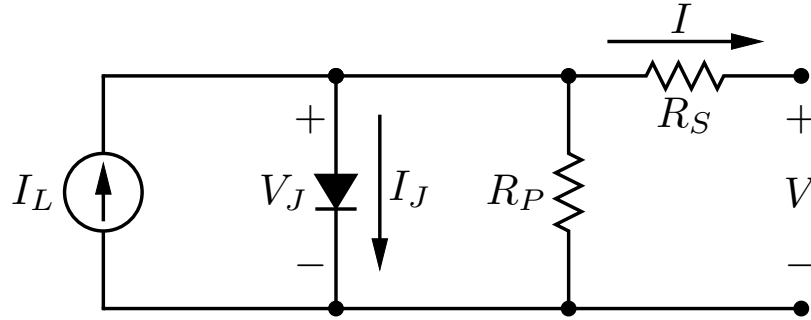
Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 2, em que os números indicam a localização dos quadrantes, o primeiro e terceiro quadrantes denotam as regiões em que a célula solar fornece energia, enquanto que o segundo e quarto quadrantes denotam as regiões em que a célula solar absorve energia. Dessa forma, é possível constatar que, quando não há iluminação, o gráfico de (4) atravessa apenas o segundo e quarto quadrantes, ou seja, nessa condição não há geração de energia. Por outro lado, quando há iluminação, o gráfico passa também pelo primeiro quadrante, no qual o ponto de operação deve estar a fim de que a célula solar forneça energia (FEMIA *et al.*, 2012).

Todavia, é preciso considerar as perdas que ocorrem internamente, causadas principalmente por correntes de fuga e pela resistência dos contatos metálicos (FEMIA *et*

al., 2012). Para isso, duas resistências, uma em paralelo, R_P , e outra em série, R_S , são incluídas no modelo elétrico da célula solar, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Modelo elétrico da célula solar.



Fonte: Produzida pelo autor.

A Equação (4) pode então ser redefinida para:

$$I = I_L - I_J - \frac{V_J}{R_P} \quad (5)$$

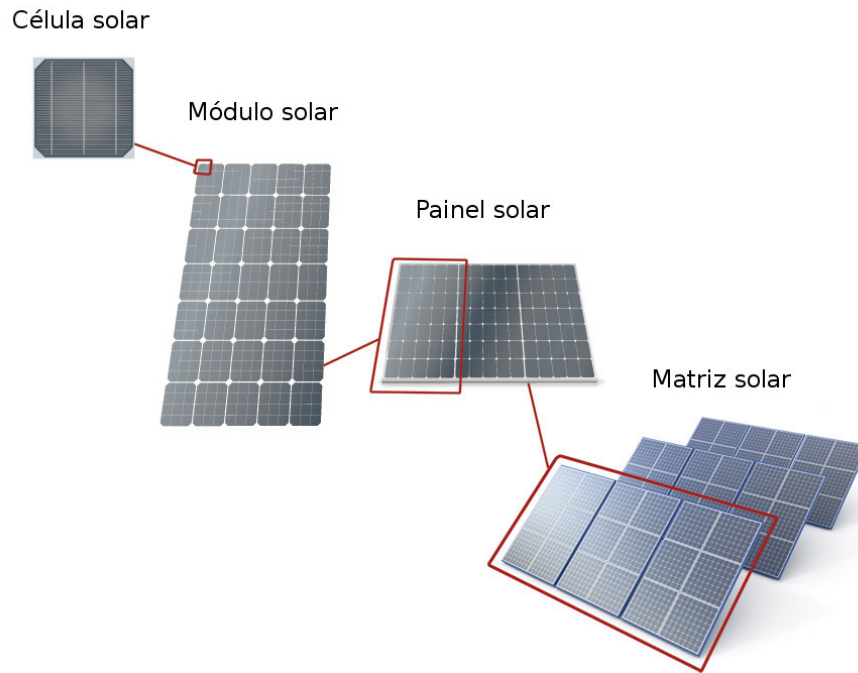
Considerando $V_J = V + R_S I$ e I_J definida em (2), (5) pode ser expandida como segue:

$$I = I_L - I_S \left(e^{\frac{V + R_S I}{V_T}} - 1 \right) - \frac{V + R_S I}{R_P}$$

2.1.2 Conexão em Série e em Paralelo

Uma célula solar isolada submetida à irradiação possui potência de saída relativamente baixa. Por isso, elas devem ser conectadas em série e em paralelo a fim de aumentar a potência fornecida (BENDIB; BELMILI; KRIM, 2015). Células solares conectadas em série formam módulos solares, dos quais dois ou três são conectados em paralelo para formar painéis solares. Um arranjo de painéis solares forma uma matriz solar (FEMIA *et al.*, 2012). A Figura 4 exhibe a estrutura hierárquica de um sistema fotovoltaico.

Figura 4 – Estrutura hierárquica de um sistema fotovoltaico.



Fonte: Produzida pelo autor.

O modelo elétrico da célula solar mostrado na Figura 3 pode ser usado também para descrever o comportamento de um módulo solar, um painel solar ou mesmo uma matriz solar. Com esse fim, supondo N_P ramos conectados em paralelo contendo cada um N_S células solares, todas elas idênticas e igualmente iluminadas, as seguintes equações podem ser usadas (FEMIA *et al.*, 2012):

$$I_{L, \text{matriz}} = N_P I_{L, \text{célula}}$$

$$I_{S, \text{matriz}} = N_P I_{S, \text{célula}}$$

$$V_{T, \text{matriz}} = N_S V_{T, \text{célula}}$$

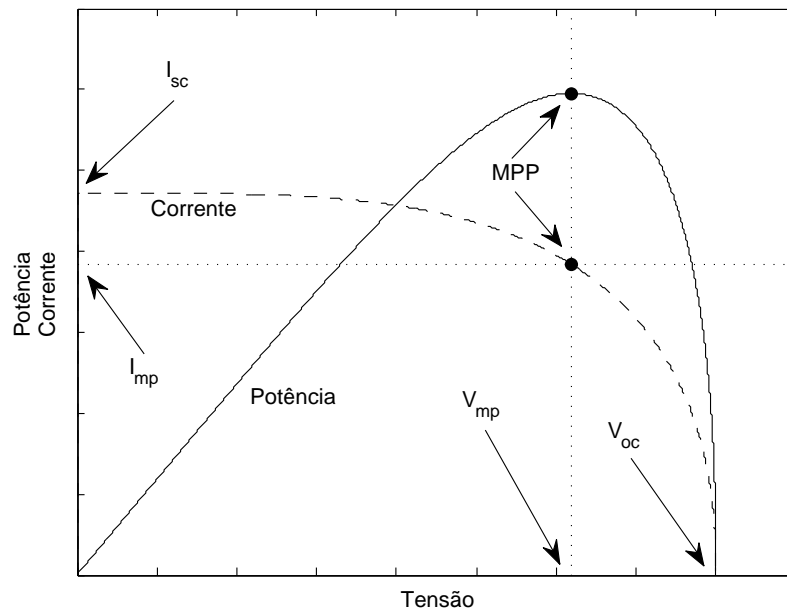
$$R_{S, \text{matriz}} = \frac{N_S}{N_P} R_{S, \text{célula}}$$

$$R_{P, \text{matriz}} = \frac{N_S}{N_P} R_{P, \text{célula}}$$

2.1.3 Ponto de Máxima Potência

A Figura 5 mostra curvas que representam a potência e a corrente em função da tensão em uma matriz solar. Essas curvas podem ser derivadas a partir da Equação (5).

Figura 5 – Curvas de potência e corrente em função da tensão em uma matriz solar.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 5 são indicados quatro valores notáveis:

- V_{oc} : a tensão de circuito aberto;
- I_{sc} : a corrente de curto-circuito;
- V_{mp} : a tensão no MPP;
- I_{mp} : a corrente no MPP.

O MPP pode ser definido como o ponto de operação ótimo no qual a matriz solar fornece a potência máxima, dada por:

$$P_{max} = V_{mp}I_{mp} \quad (6)$$

Esses valores de tensão e corrente podem ser estimados como (GOETZBERGER; HOFFMANN, 2005):

$$V_{mp} = K_1V_{oc}$$

$$I_{mp} = K_2 I_{sc}$$

onde K_1 é uma constante entre 0,75 e 0,9 e K_2 é uma constante entre 0,85 e 0,95.

Por sua vez, o fator de preenchimento é dado por (RASHID, 2011):

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}}$$

Quanto mais próximo o fator de preenchimento estiver da unidade, mais parecida com o retângulo ideal estará a curva da corrente em função da tensão. Em outras palavras, maior será a qualidade da célula solar.

Por fim, a eficiência pode ser obtida como (GOETZBERGER; HOFFMANN, 2005):

$$\eta = \frac{V_{mp} I_{mp}}{P_{in}}$$

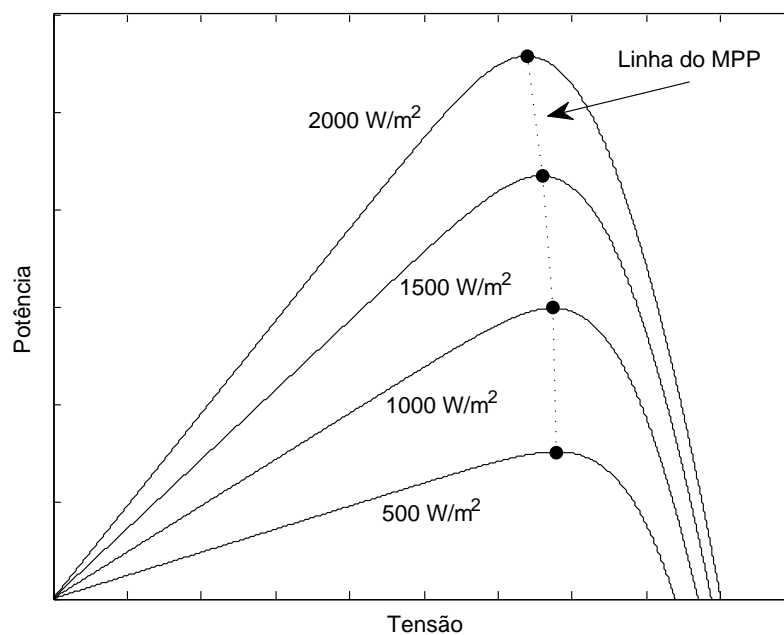
onde P_{in} é a potência recebida pela matriz solar através da irradiação. Células solares fabricadas atualmente possuem eficiência entre 13% e 16% e, em laboratório, a maior eficiência atingida foi de 24,7% (GOETZBERGER; HOFFMANN, 2005).

2.1.4 Dependência da Irradiação e da Temperatura

O desempenho da matriz solar é fortemente influenciado pelas alterações na irradiação e na temperatura. Contudo, a temperatura geralmente varia de forma lenta ao longo de um dia. Assim, a maior perturbação no ponto de operação são as mudanças no nível de irradiação. Isso é devido à sua rápida e imprevisível taxa de variação, que pode alcançar usualmente 30 W/m²/s (FEMIA *et al.*, 2012).

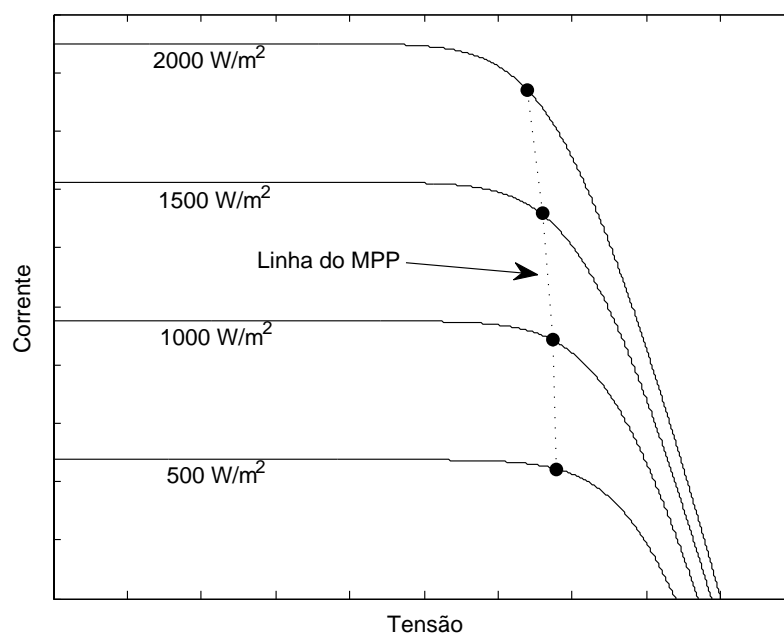
As Figuras 6 e 7 mostram que, com o aumento da irradiação, a tensão de circuito aberto aumenta de forma logarítmica, e a corrente de curto-circuito aumenta linearmente. Enquanto que as Figuras 8 e 9 demonstram que, com o aumento da temperatura, a tensão de circuito aberto diminui, e a corrente de curto-circuito aumenta levemente (RASHID, 2011).

Figura 6 – Efeito da irradiação sobre a curva da potência.



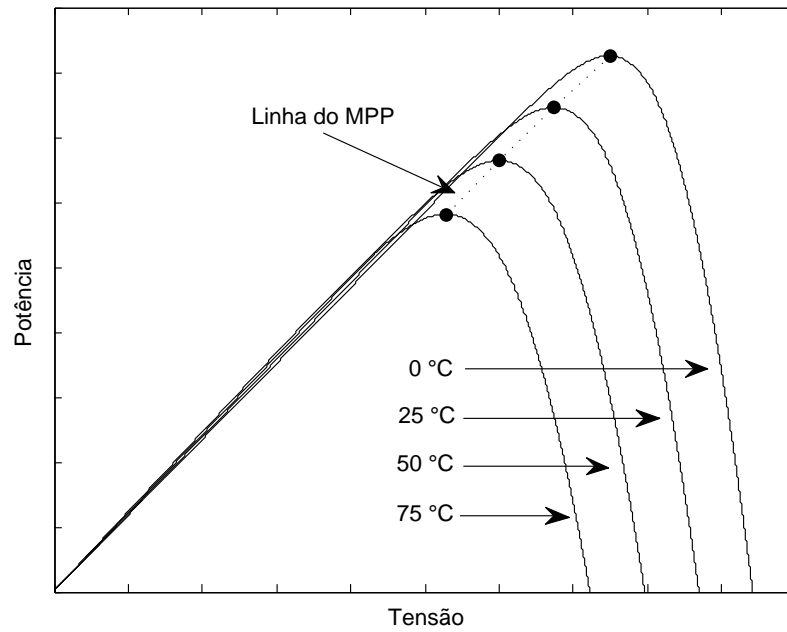
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 7 – Efeito da irradiação sobre a curva da corrente.



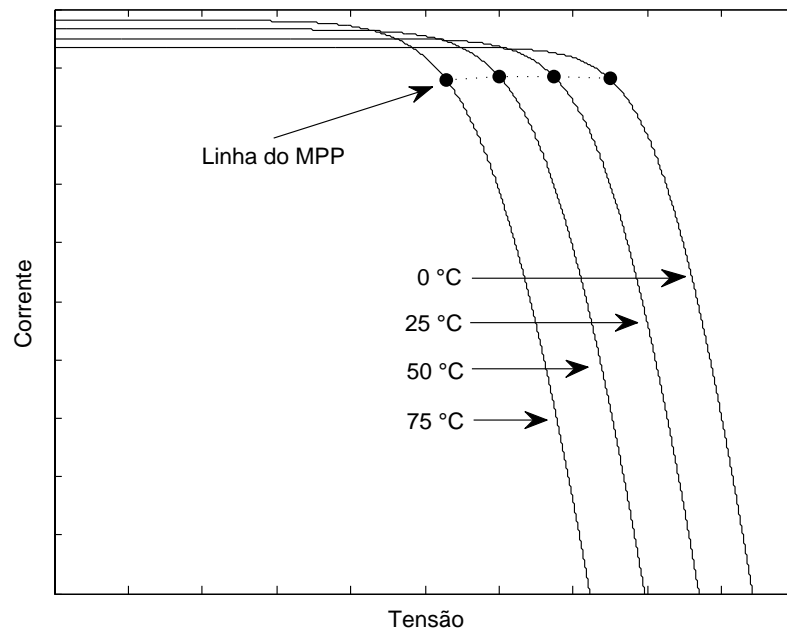
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 8 – Efeito da temperatura sobre a curva da potência.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 9 – Efeito da temperatura sobre a curva da corrente.



Fonte: Produzida pelo autor.

2.2 Métodos de Rastreamento do Ponto de Máxima Potência

Uma carga resistiva ou bateria diretamente conectada na saída de uma matriz solar certamente não é a escolha mais adequada do ponto de vista da eficiência. A razão é a impossibilidade de variar a sua relação entre a tensão e a corrente com vistas a atingir o MPP (FEMIA *et al.*, 2012).

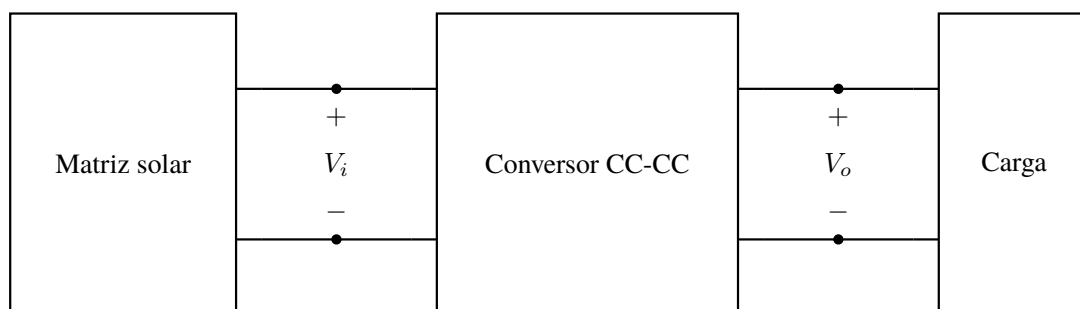
Portanto, é imprescindível a utilização de uma *interface* entre a matriz solar e a carga, que permita adaptar uma à outra de modo que a matriz solar forneça sempre a potência máxima. Em grande parte dos casos, essa interface consiste em um conversor CC-CC, ainda que existam outras técnicas ou formas. Entretanto, é o controlador que, por meio do *duty cycle* empregado no seu chaveamento, ajusta dinamicamente o conversor CC-CC e torna efetivamente possível a geração máxima de energia. Com esse fim, o controlador emprega um método de MPPT. Ou seja, em resumo, a função básica do conversor CC-CC e do controlador é manter o ponto de operação da matriz solar próximo do MPP independentemente das condições de operação (RASHID, 2011).

A maior parte dos métodos de MPPT depende das medidas de corrente e tensão da matriz solar. O conhecimento da irradiação e da temperatura normalmente é dispensado, pois os instrumentos de medição são caros e, em largas matrizes solares, necessitariam ser em grande número. Além disso, geralmente os métodos de MPPT são realizados digitalmente, devido à sua flexibilidade e baixo custo de implementação. Assim, dependendo da complexidade do método, podem ser utilizados desde sistemas simples e de baixo custo até sistemas mais caros (FEMIA *et al.*, 2012).

2.2.1 Princípio de Funcionamento

A Figura 10 mostra a conexão elétrica entre a matriz solar, o conversor CC-CC e a carga. O controlador está implícito no bloco do conversor CC-CC.

Figura 10 – Conexão elétrica entre a matriz solar, o conversor CC-CC e a carga.



Fonte: Produzida pelo autor.

Assim, a relação entre a entrada e a saída em regime permanente pode ser definida como (RASHID, 2011):

$$M(D) = \frac{V_o}{V_i} \quad (7)$$

onde D é o *duty cycle*. Se a carga for puramente resistiva, (7) implica que a impedância vista nos terminais da matriz solar será (FEMIA *et al.*, 2012):

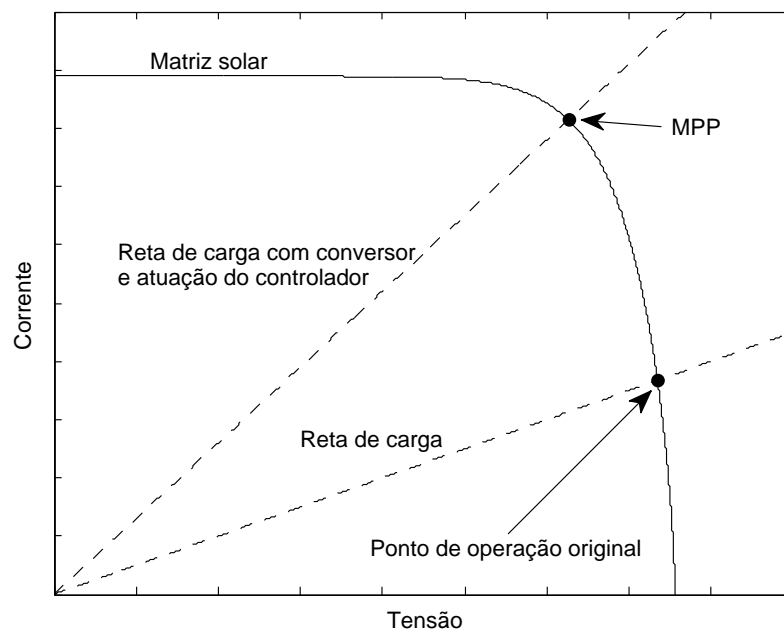
$$R_i = \frac{R}{M(D)^2} \quad (8)$$

onde R é a resistência da carga. Graficamente, (8) significa que o ângulo da reta de carga é função do *duty cycle*, dado que (FEMIA *et al.*, 2012):

$$\theta = \text{arccot}(R_i)$$

A Figura 11 mostra o resultado da alteração no ângulo da reta de carga, produzida pelo controlador a fim de que o ponto de operação resulte no MPP.

Figura 11 – Resultado da alteração no ângulo da reta de carga.



Fonte: Produzida pelo autor.

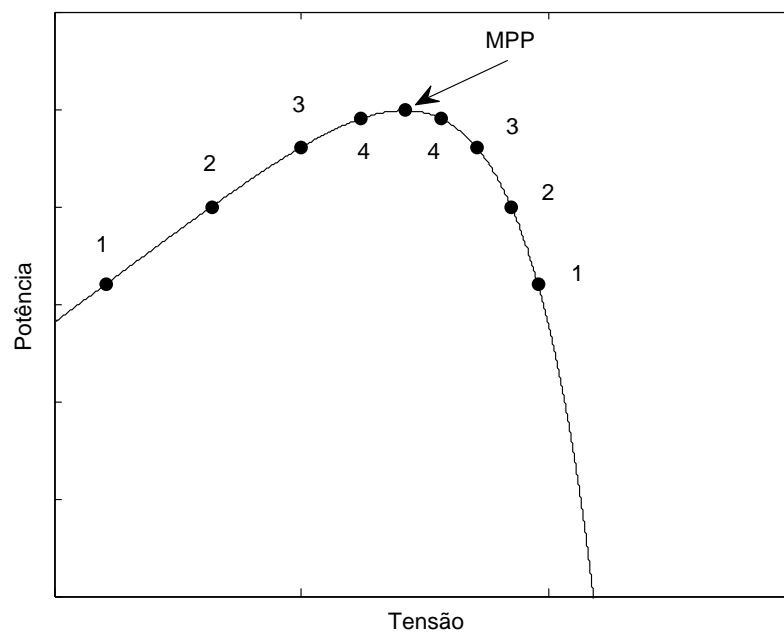
A seguir, alguns métodos de MPPT serão apresentados e suas características serão analisadas.

2.2.2 Perturbar e Observar

Este método periodicamente perturba a tensão da matriz solar e, depois disso, calcula se a potência fornecida aumentou ou diminuiu. Se aumentou, o ponto de operação está agora mais próximo do MPP e a próxima perturbação será na mesma direção que a anterior. Caso contrário, o ponto de operação está agora mais distante do MPP e a próxima perturbação será na direção oposta (BENDIB; BELMILI; KRIM, 2015). Esse processo é repetido até que o MPP seja atingido e então o ponto de operação começa a oscilar em torno do MPP (ALI *et al.*, 2012).

A Figura 12 ilustra graficamente o caminho percorrido pelo ponto de operação em condições meteorológicas estáveis. Os pontos numerados ilustram a sequência de passos até o MPP.

Figura 12 – Caminho percorrido pelo ponto de operação em condições meteorológicas estáveis.



Fonte: Produzida pelo autor.

Portanto, depois de medir a tensão e a corrente da matriz solar, são calculadas a potência, a variação na potência e a variação na tensão:

$$P[n] = V[n]I[n]$$

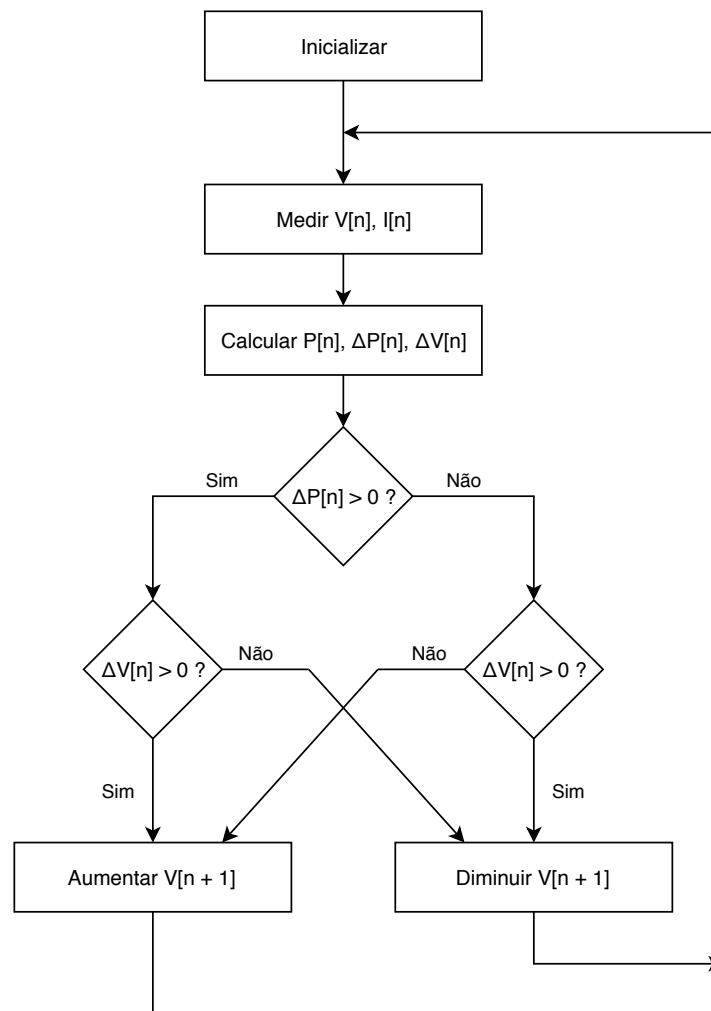
$$\Delta P[n] = P[n] - P[n - 1]$$

$$\Delta V[n] = V[n] - V[n - 1]$$

Então, é necessário decidir se a tensão da matriz solar deve aumentar ou diminuir. Para isso, o primeiro teste é se $\Delta P[n] > 0$ e o segundo é se $\Delta V[n] > 0$. Se o primeiro teste for verdadeiro, a tensão da matriz solar deve aumentar ou diminuir conforme ela tenha, respectivamente, aumentado ou diminuído na amostra passada. Senão, a tensão da matriz solar deve aumentar caso tenha diminuído, e diminuir caso tenha aumentado.

A Figura 13 exibe o fluxograma do método P&O.

Figura 13 – Fluxograma do método P&O.



Fonte: Produzida pelo autor.

A versão mais básica do método P&O utiliza um tamanho de perturbação fixo, que é selecionado com base no tempo de acomodação e na amplitude da oscilação em regime permanente. Outra decisão a ser feita é relativa à frequência de atuação, cujo

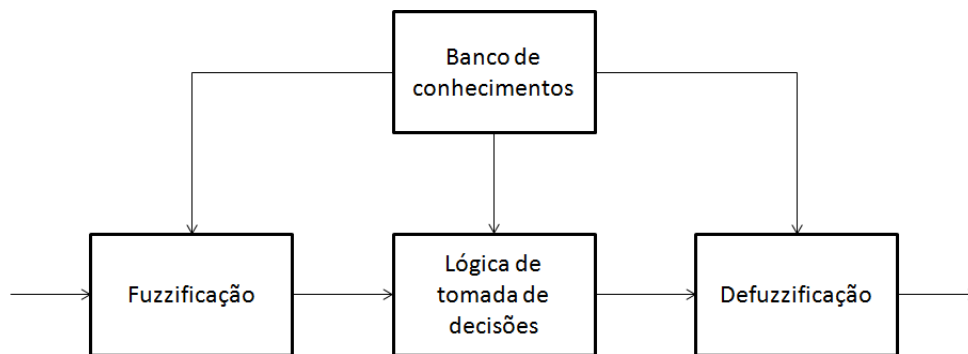
período precisa ser maior que o tempo de acomodação da dinâmica do conversor, mas pode acarretar em baixa velocidade de convergência (FEMIA *et al.*, 2012).

Algumas vantagens deste método são a versatilidade, isto é, este método não depende das características da matriz solar, a facilidade de implementação, baixo custo e bom desempenho. Por outro lado, há desvantagens tais como a oscilação em torno do MPP em regime permanente e a possibilidade de rastreamento na direção errada em casos de mudança na irradiação (SERA *et al.*, 2013).

2.2.3 Controlador Baseado em Lógica Fuzzy

O controlador baseado em lógica fuzzy (*Fuzzy Logic Controller* - FLC) é fundamentado nos conceitos da lógica fuzzy, o qual tenta trazer características do pensamento humano e da linguagem natural aos sistemas de controle tradicionais. Portanto, essencialmente o FLC traduz uma estratégia de controle linguística originada de conhecimento especializado em uma estratégia de controle automática (LEE, 1990). A Figura 14 mostra os quatro componentes principais de um FLC: a fuzzificação, o banco de conhecimentos, a lógica de tomada de decisões e a defuzzificação.

Figura 14 – Esquema de um FLC.



Fonte: Produzida pelo autor.

O banco de conhecimentos contém informações sobre a aplicação e as metas de controle. Esses conhecimentos incluem informações sobre as características elétricas da matriz solar e o modo como o FLC deve atuar a fim de que o MPP seja alcançado. Por sua vez, a fuzzificação é a conversão dos valores de entrada em variáveis linguísticas representadas por conjuntos fuzzy, os quais são descritos por funções de pertinência. A lógica de tomada de decisões tem a capacidade de realizar inferências usando um conjunto de regras, as quais possuem a seguinte forma:

SE (um conjunto de condições é satisfeito) ENTÃO (um conjunto de ações é tomado)

Assim, essas regras são formadas pelo antecedente, que são condições fornecidas pelo ambiente, e pelo conseqüente, que é uma ou mais ações de controle. Finalmente, a defuzzificação é a obtenção de valores numéricos a partir dos conjuntos fuzzy que especificam as possíveis ações de controle através de suas variáveis linguísticas (LEE, 1990).

A Figura 15 ilustra a sequência de passos seguidos por um FLC. O número de variáveis de entrada, variáveis linguísticas e regras pode ser maior ou menor, este é apenas um exemplo. Na Figura 15, as variáveis de entrada são x e y , as quais sofrem o processo de fuzzificação, ou seja, são convertidas nas variáveis linguísticas A_1 e A_2 para a variável de entrada x , e B_1 e B_2 para a variável de entrada y . Então, a lógica de tomada de decisões, usa o operador MIN para fazer a operação de agregação nos antecedentes dados pelas regras 1 e 2, e o operador MAX para a operação de composição entre os conseqüentes das mesmas regras. Do conjunto fuzzy final, um valor numérico é retirado utilizando a defuzzificação pelo método do centroide, o qual é definido como:

$$z_c = \frac{\int Z\mu(Z) dZ}{\int \mu(Z) dZ}$$

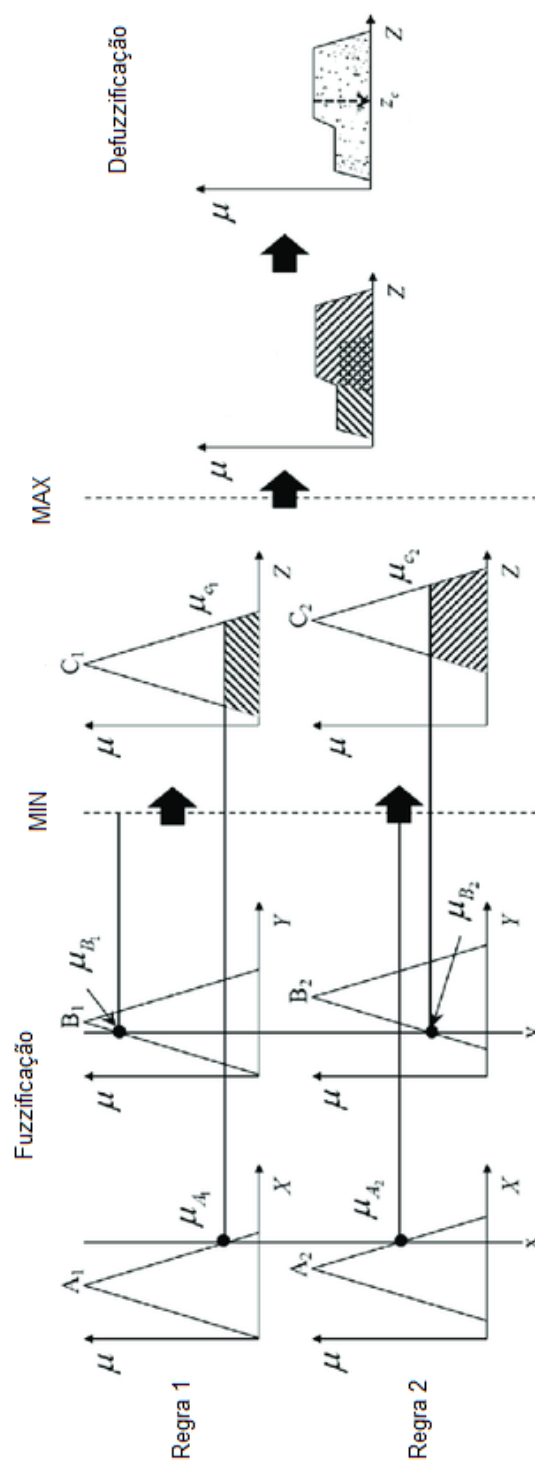
Uma possível implementação concreta do FLC é baseada no comportamento do P&O, de modo a ter suas vantagens e eliminar os seus defeitos (ALAJMI *et al.*, 2011). Assim, da mesma forma que o P&O, as entradas do FLC são a variação na potência e na tensão, definidas respectivamente como:

$$\Delta P[n] = P[n] - P[n - 1]$$

$$\Delta V[n] = V[n] - V[n - 1]$$

O FLC tem a vantagem de trabalhar com entradas imprecisas, não precisar de um modelo matemático e não ter problemas com não linearidades (ALI *et al.*, 2012). Além disso, a experiência mostra que o FLC apresenta resultados superiores àqueles obtidos por algoritmos de controle convencionais. Entretanto, não há um procedimento sistemático para a realização de um FLC, pois os conceitos associados são subjetivamente definidos e estabelecidos empiricamente (LEE, 1990). Outras desvantagens incluem a dependência das características da matriz solar, o alto custo computacional e a complexidade de implementação (BENDIB; BELMILI; KRIM, 2015).

Figura 15 – Sequência de passos seguidos por um FLC.



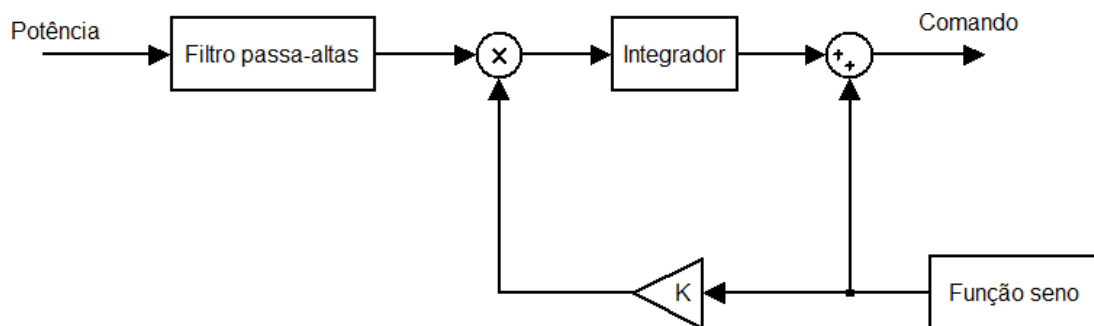
Fonte: Produzida pelo autor.

2.2.4 Extremum Seeking Control

O ESC é um método de controle adaptativo que lida com sistemas onde a relação entre a entrada e a saída possui um extremo (máximo ou mínimo) cuja localização não é previamente conhecida. O objetivo do ESC é encontrar a referência que atinge esse extremo (CHOI *et al.*, 2002). Assim, o ESC vai forçar a matriz solar a operar no MPP através do aumento ou diminuição da tensão em seus terminais (LEYVA *et al.*, 2006).

A Figura 16 mostra o diagrama de blocos de um controlador que implementa o ESC.

Figura 16 – Diagrama de blocos de um controlador que implementa o ESC.



Fonte: Produzida pelo autor.

O funcionamento do ESC pode ser explicado de forma intuitiva como segue. Dado que a função seno é um sinal periódico lento em relação ao comportamento dinâmico do conversor, a potência gerada apresenta uma resposta também periódica, de mesma frequência, que está ou em fase ou invertida em relação à função seno (KRSTIĆ; WANG, 2000). Então, o filtro passa-altas retira o valor médio desse sinal, e a função seno atenuada ou amplificada pelo fator K demodula o sinal filtrado através da operação de multiplicação. O sinal resultante possui um valor médio positivo se a potência estiver em fase com a função seno, e possui um valor médio negativo em caso contrário.

É importante destacar que se o sistema estiver operando à esquerda ou à direita do MPP, então a potência está em fase ou invertida em relação à função seno, respectivamente. Disso resulta que a integração do sinal demodulado faz com que o sinal de comando rastreie adaptativamente o MPP (BRUNTON *et al.*, 2010).

Após medir a tensão e a corrente da matriz solar, a potência é calculada como segue:

$$P[n] = V[n]I[n]$$

Então, a potência é filtrada em um filtro passa-altas, que pode ser implementado por uma equação de diferenças como segue (OPPENHEIM; SCHAFER; BUCK, 1999):

$$F[n] = \sum_{k=1}^N a_k F[n-k] + \sum_{k=0}^M b_k P[n-k]$$

onde a_k e b_k são coeficientes constantes e N é a ordem do filtro. Depois, $F[n]$ é multiplicado pelo produto do ganho K com a função seno atrasada:

$$A[n] = KS[n-1]F[n]$$

Em que a função seno é dada por:

$$S[n] = \alpha \text{sen}(\Omega n)$$

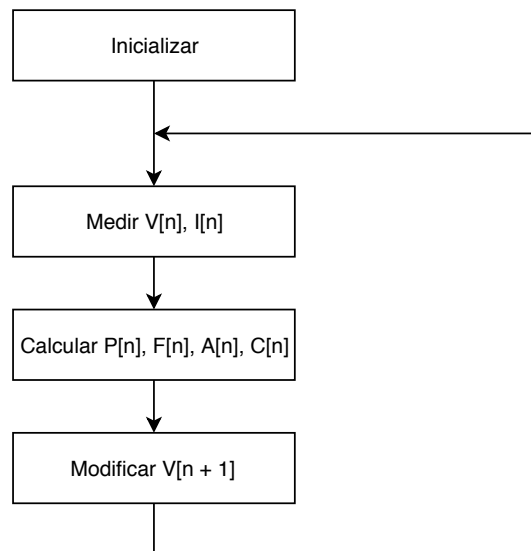
onde α é a amplitude e Ω é a frequência da função seno. Finalmente, $A[n]$ é integrado e $C[n]$ é obtido:

$$C[n] = \sum_{k=0}^n A[k] + S[n]$$

Assim, o valor de $C[n]$ define a escala e a direção, isto é, aumento ou diminuição, com os quais a tensão da matriz solar deve ser alterada.

O fluxograma do ESC está na Figura 17.

Figura 17 – Fluxograma do método de ESC.



Fonte: Produzida pelo autor.

O principal atrativo do ESC é a garantia de estabilidade em um intervalo de parâmetros do controlador. Além disso, o ESC não depende das características da matriz solar, possui rápida convergência e apresenta bom desempenho em regime permanente (BRUNTON *et al.*, 2010). Por outro lado, uma vez encontrado o MPP, o ESC oscila ao seu redor em vez de colocar o sistema exatamente no MPP (MOURA; CHANG, 2010).

3 Resultados de Simulação

3.1 Ambiente de Simulação

Primeiramente, todos os métodos de MPPT foram testados em um ambiente de simulação composto por PSIM (Powersim) e MATLAB/Simulink (MathWorks). O uso de dois programas é justificado pela inerente separação entre o sistema de potência, composto pela matriz solar, o conversor CC-CC, a carga e o gerador PWM, e o sistema de controle, que contém o algoritmo de MPPT. Assim, o sistema de potência foi implementado no PSIM, e o sistema de controle, no MATLAB/Simulink.

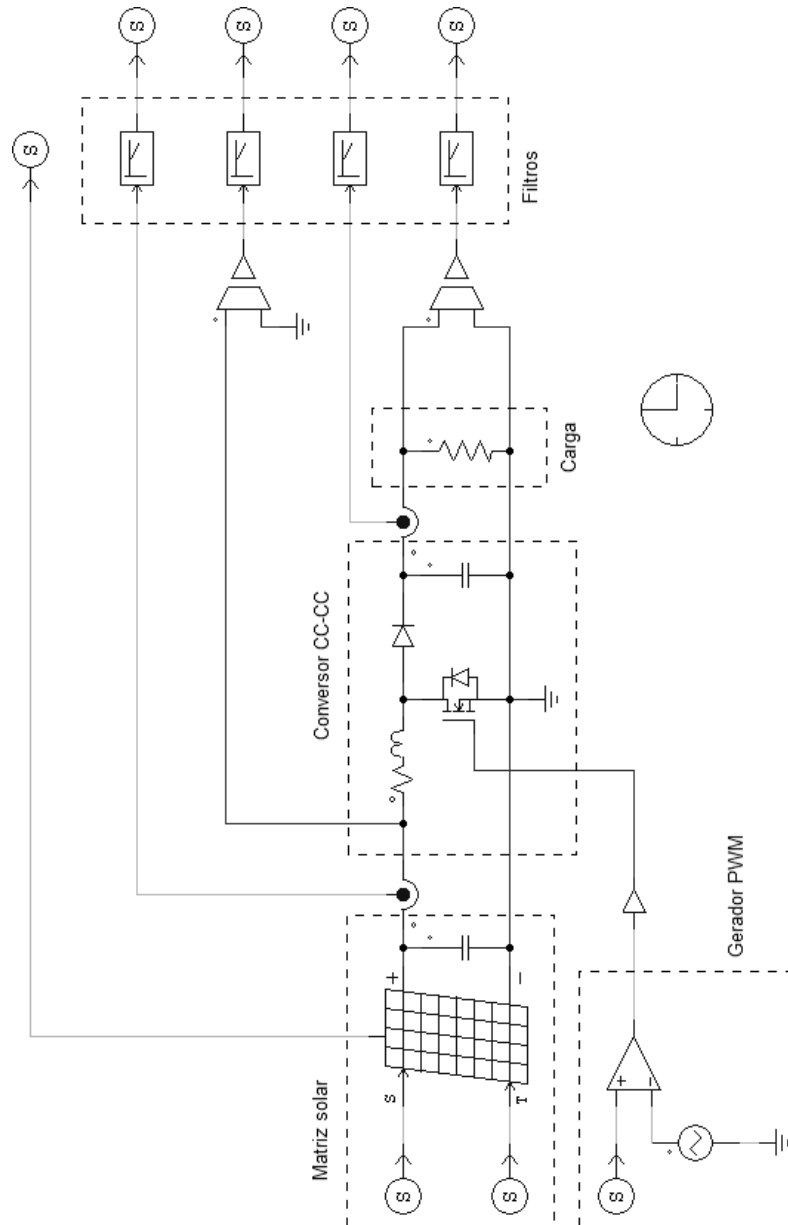
3.1.1 Sistema de Potência

A Figura 18 mostra o sistema de potência e suas divisões. A matriz solar foi modelada por um único módulo solar, modelo SY-200M (Shenzhen Suoyang New Energy), cujas especificações nas STC estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Especificações do módulo solar SY-200M nas STC.

Parâmetro	Descrição	Valor
P_{max}	Máxima potência	200 W
V_{oc}	Tensão de circuito aberto	46,5 V
I_{sc}	Corrente de curto-circuito	5,62 A
V_{mp}	Tensão no MPP	37,5 V
I_{mp}	Corrente no MPP	5,33 A

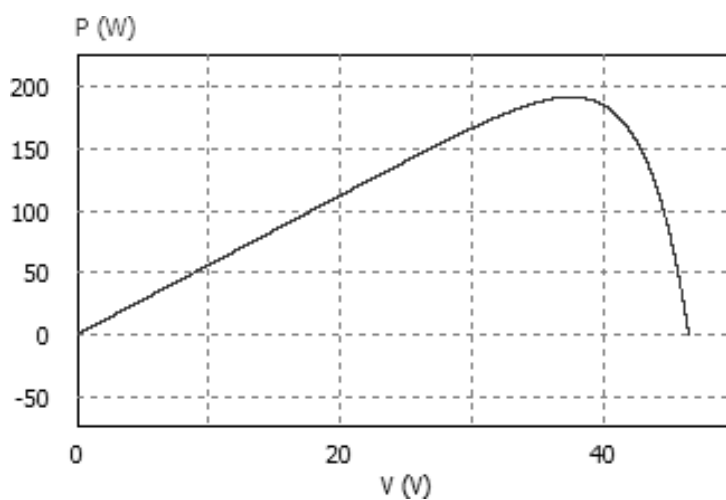
Figura 18 – Sistema de potência e suas divisões.



Fonte: Produzida pelo autor.

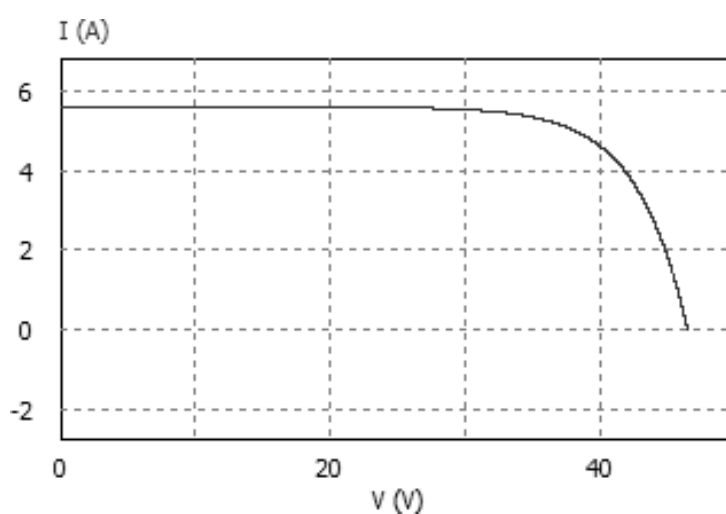
Os valores numéricos da irradiação e da temperatura são gerados a partir do Simulink. As Figuras 19 e 20 mostram as curvas características da potência e corrente do módulo solar simulado, respectivamente.

Figura 19 – Curva da potência do módulo solar simulado.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 20 – Curva da corrente do módulo solar simulado.



Fonte: Produzida pelo autor.

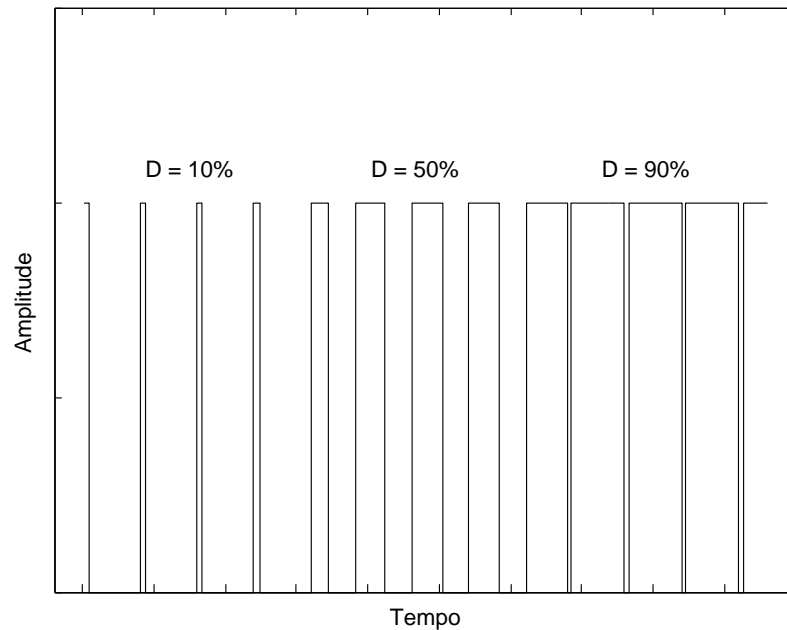
Por sua vez, o conversor CC-CC é um conversor com topologia *boost*, cuja relação entre a entrada e a saída em regime permanente é (RASHID, 2011):

$$M(D) = \frac{1}{1 - D}$$

onde D é o *duty cycle*. Como $0\% \leq D \leq 100\%$, a tensão de saída do conversor *boost* é sempre maior que a tensão de entrada.

O gerador PWM gera uma onda quadrada de frequência 31,25 kHz cujo *duty cycle* é informado pelo sistema de controle. A Figura 21 ilustra como diferentes valores de *duty cycle* afetam uma onda quadrada. Além disso, os filtros de Butterworth de primeira ordem e frequência de corte $f_c = 30$ Hz foram considerados com o fim de eliminar o *ripple* oriundo do chaveamento.

Figura 21 – Ilustração do efeito de diferentes valores de *duty cycle* em uma onda quadrada.



Fonte: Produzida pelo autor.

A carga é uma simples resistência de 100Ω , a qual possui o único objetivo de dissipar a potência gerada pela matriz solar.

3.1.2 Sistema de Controle

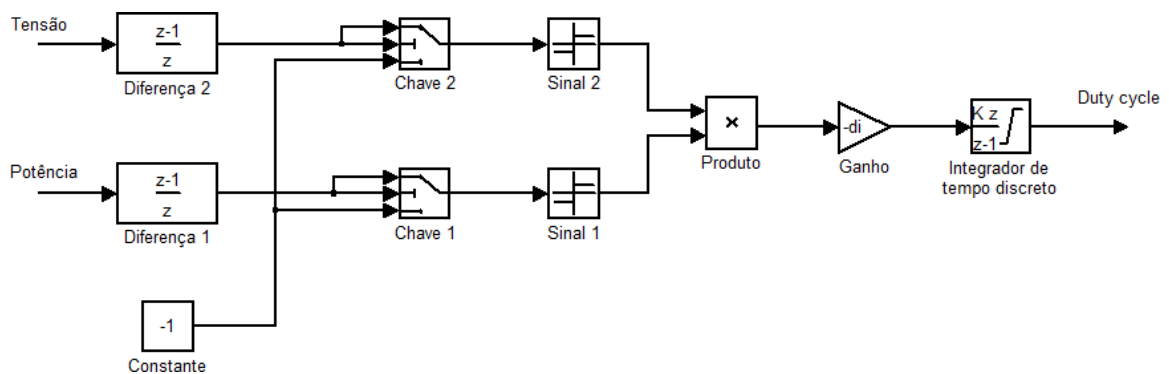
A parte comum do sistema de controle, independente do método de MPPT utilizado, recebe os sinais de potência máxima, tensão e corrente na saída da matriz solar e na saída do conversor *boost*. Porém, apenas os sinais de tensão e corrente da matriz solar são utilizadas nos métodos de MPPT. A esses sinais é adicionado um ruído uniforme entre -10 mV e 10 mV ou entre -10 mA e 10 mA, conforme o sinal for de tensão ou corrente, para que a simulação apresente resultados mais próximos da realidade, já que em qualquer medida realizada sempre há um erro associado (WEBSTER, 1998). A taxa de amostragem desses sinais foi fixada em 20 Hz, pois normalmente os algoritmos de MPPT são executados a uma frequência entre 1 Hz e 20 Hz (SERA *et al.*, 2013).

3.1.3 Especificação dos Métodos de MPPT

– P&O

O diagrama de blocos do controlador que utiliza o método P&O está representado na Figura 22. O único parâmetro deste método é a amplitude da perturbação, que foi selecionada empiricamente em $D_i = 1\%$ visando o melhor compromisso entre a velocidade de convergência e o desempenho em regime permanente.

Figura 22 – Diagrama de blocos do controlador que utiliza o método P&O.



Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 22, os blocos Sinal 1 e Sinal 2 implementam a função sinal, definida como:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} -1 & \text{se } x < 0, \\ 0 & \text{se } x = 0, \\ 1 & \text{se } x > 0. \end{cases}$$

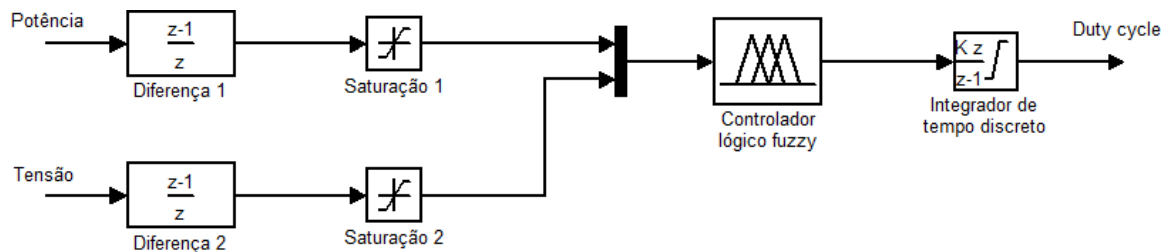
A saída desses blocos e seu produto têm o mesmo objetivo que as decisões apresentadas no fluxograma do método P&O, mostrado na Figura 13. Isso porque o que importa naqueles casos é o sinal das variações de tensão e potência. E assim, obtido o valor da variação no *duty cycle*, o *duty cycle* propriamente dito é calculado, por meio do integrador, como:

$$D[n + 1] = D[n] + \Delta D[n] \tag{9}$$

– FLC

A implementação do FLC está na Figura 23. Os blocos Saturação 1 e Saturação 2 apenas ajustam as respectivas variações na potência e na tensão para os valores de entrada suportados pelo FLC.

Figura 23 – Implementação do FLC.

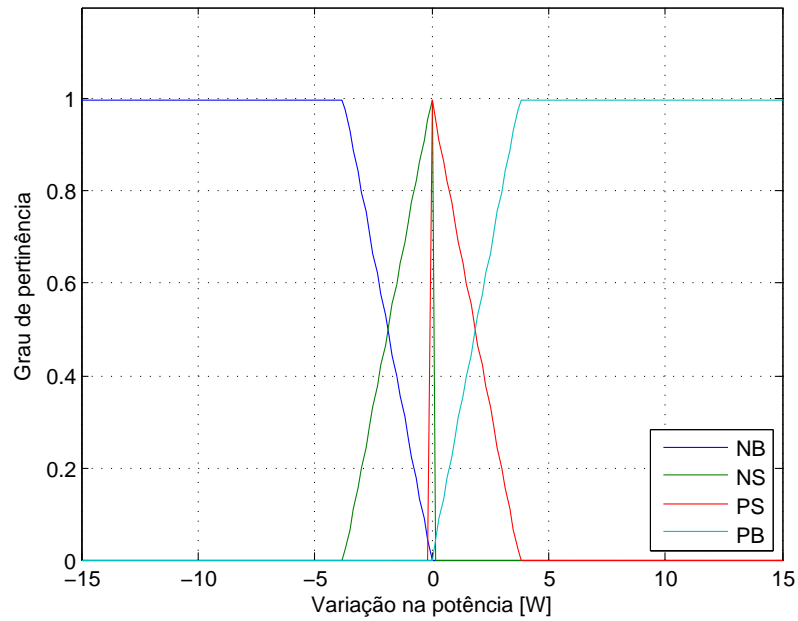


Fonte: Produzida pelo autor.

As variáveis linguísticas e as correspondentes funções de pertinência da variação na potência, na tensão e no *duty cycle* estão nas Figuras 24, 25 e 26. As variáveis linguísticas e seus significados são:

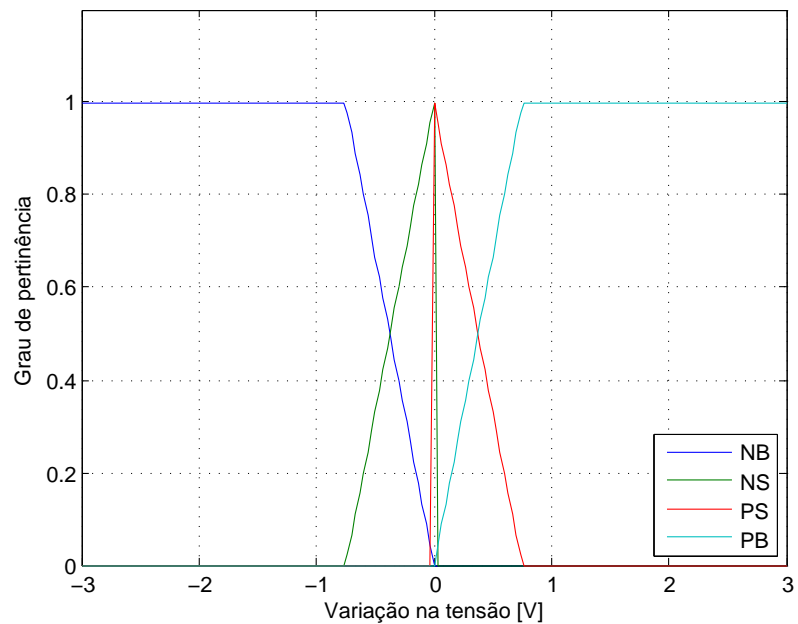
- NB: *Negative Big* (Negativo Grande);
- NS: *Negative Small* (Negativo Pequeno);
- PS: *Positive Small* (Positivo Pequeno);
- PB: *Positive Big* (Positivo Grande).

Figura 24 – Variáveis linguísticas e funções de pertinência da variação na potência.



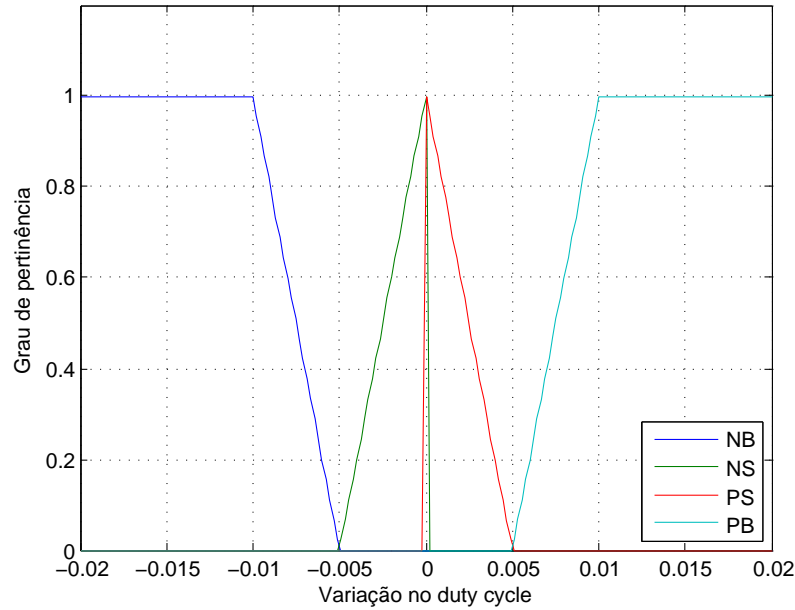
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 25 – Variáveis linguísticas e funções de pertinência da variação na tensão.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 26 – Variáveis linguísticas e funções de pertinência da variação no *duty cycle*.



Fonte: Produzida pelo autor.

Por sua vez, a lógica de tomada de decisões usa as regras constantes na Tabela 2.

Tabela 2 – Regras usadas pelo FLC.

Regra	Antecedente	Consequente
1	SE $\Delta P = NB$ E SE $\Delta V = NB$	ENTÃO $\Delta D = NB$
2	SE $\Delta P = NB$ E SE $\Delta V = NS$	ENTÃO $\Delta D = NB$
3	SE $\Delta P = NB$ E SE $\Delta V = PS$	ENTÃO $\Delta D = PB$
4	SE $\Delta P = NB$ E SE $\Delta V = PB$	ENTÃO $\Delta D = PB$
5	SE $\Delta P = NS$ E SE $\Delta V = NB$	ENTÃO $\Delta D = NS$
6	SE $\Delta P = NS$ E SE $\Delta V = NS$	ENTÃO $\Delta D = NS$
7	SE $\Delta P = NS$ E SE $\Delta V = PS$	ENTÃO $\Delta D = PS$
8	SE $\Delta P = NS$ E SE $\Delta V = PB$	ENTÃO $\Delta D = PS$
9	SE $\Delta P = PS$ E SE $\Delta V = NB$	ENTÃO $\Delta D = PS$
10	SE $\Delta P = PS$ E SE $\Delta V = NS$	ENTÃO $\Delta D = PS$
11	SE $\Delta P = PS$ E SE $\Delta V = PS$	ENTÃO $\Delta D = NS$
12	SE $\Delta P = PS$ E SE $\Delta V = PB$	ENTÃO $\Delta D = NS$
13	SE $\Delta P = PB$ E SE $\Delta V = NB$	ENTÃO $\Delta D = PB$
14	SE $\Delta P = PB$ E SE $\Delta V = NS$	ENTÃO $\Delta D = PB$
15	SE $\Delta P = PB$ E SE $\Delta V = PS$	ENTÃO $\Delta D = NB$
16	SE $\Delta P = PB$ E SE $\Delta V = PB$	ENTÃO $\Delta D = NB$

Após calcular a variação no *duty cycle*, o integrador obtém o *duty cycle* através da Equação (9). As regras e as funções de pertinência, bem como o método de defuzzificação,

foram estabelecidos em um processo iterativo, isto é, diversas combinações foram testadas e a escolhida foi a que apresentou melhor desempenho.

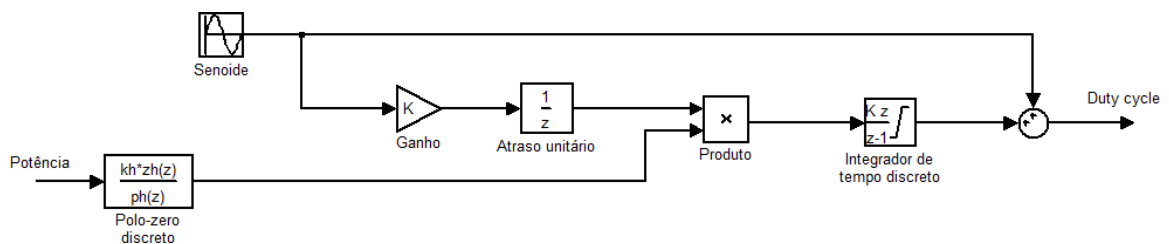
– ESC

Os parâmetros disponíveis do ESC são:

- α : amplitude da função seno;
- Ω : frequência da função seno;
- K : ganho;
- f_h : frequência de corte do filtro passa-altas;
- N : ordem do filtro passa-altas.

A Figura 27 mostra o diagrama de blocos do controlador baseado no ESC.

Figura 27 – Diagrama de blocos do controlador baseado no ESC.



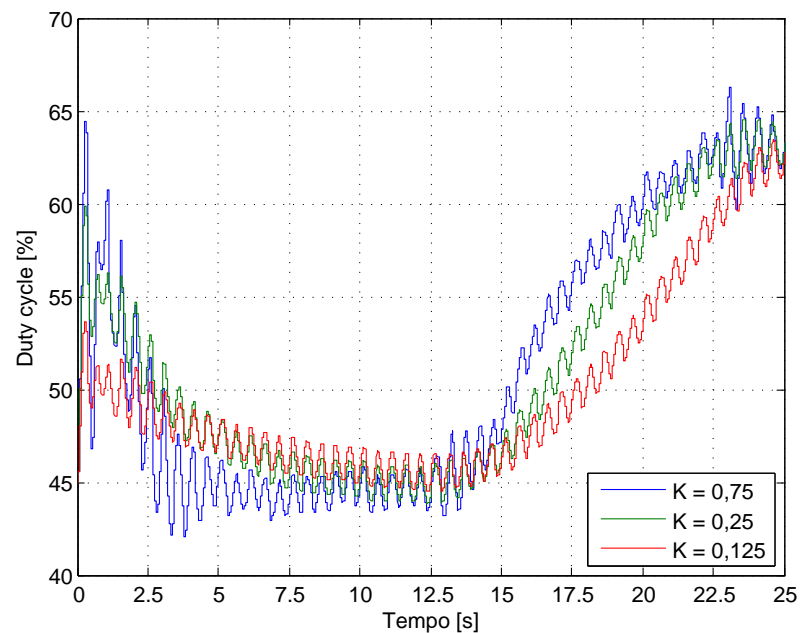
Fonte: Produzida pelo autor.

A amplitude da função seno foi definida para $\alpha = 1\%$, de modo a não incorrer em demasiada oscilação em torno do MPP em regime permanente, e a frequência, para $\Omega = 2\pi/10$ rad, que corresponde a 2 Hz. A frequência de corte do filtro passa-altas precisa ser menor que a frequência da função seno, então ela foi selecionada em $f_h = 0,2$ Hz. Isso ocorre porque o filtro passa-altas não pode atenuar a frequência da função seno (MOURA; CHANG, 2010). Dado que o ESC não é limitado a trabalhar com filtros de primeira ordem, a ordem do filtro passa-altas foi fixada em $N = 2$ (BRUNTON *et al.*, 2010).

O ganho foi o último parâmetro a ser definido, pois enquanto que os outros parâmetros podem ser escolhidos arbitrariamente ou facilmente justificados, não é fácil identificar as consequências do ganho no sistema em malha fechada. Assim, depois de um processo empírico, o ganho foi fixado em $K = 0,75$, pois é o menor valor capaz de manter o sistema no MPP quando há uma derivada na irradiação equivalente a $30 \text{ W/m}^2/\text{s}$, a

qual é a sua taxa usual de mudança (FEMIA *et al.*, 2012). A Figura 28 mostra diferentes valores de ganho e seus efeitos, mantendo os outros parâmetros constantes, em um cenário de mudança de irradiação de 200 W/m^2 para 500 W/m^2 em 10 s, com a temperatura fixa em $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 28 – Diferentes valores de ganho e seus efeitos.



Fonte: Produzida pelo autor.

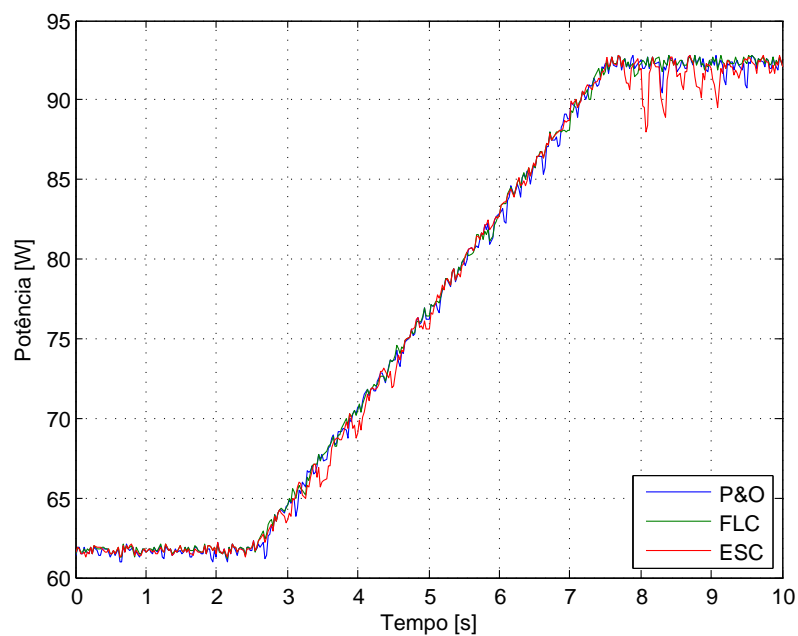
A Figura 28 permite concluir que valores menores que $K = 0,75$ são ineficazes para rastrear o MPP nessas condições. Em compensação, não foi definido um ganho maior porque valores grandes de K , ainda que permitam velocidades de convergência maiores, também aumentam a sensibilidade a distúrbios (MOURA; CHANG, 2010).

3.1.4 Teste dos Métodos de MPPT

Dois testes básicos para verificar o correto funcionamento dos métodos de MPPT são a variação rápida na irradiação e a variação rápida na temperatura. Desse modo, foi simulado um aumento de irradiação de 350 W/m^2 para 500 W/m^2 em 5 s, a uma temperatura constante de $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$, após o sistema entrar em regime permanente. Também foi simulada uma diminuição de temperatura de $12,5 \text{ }^\circ\text{C}$ para $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ em 5 s, a uma irradiação de 500 W/m^2 . Embora uma diminuição de temperatura tal como a simulada não seja factível, ainda assim é um teste que possui utilidade para o fim mencionado.

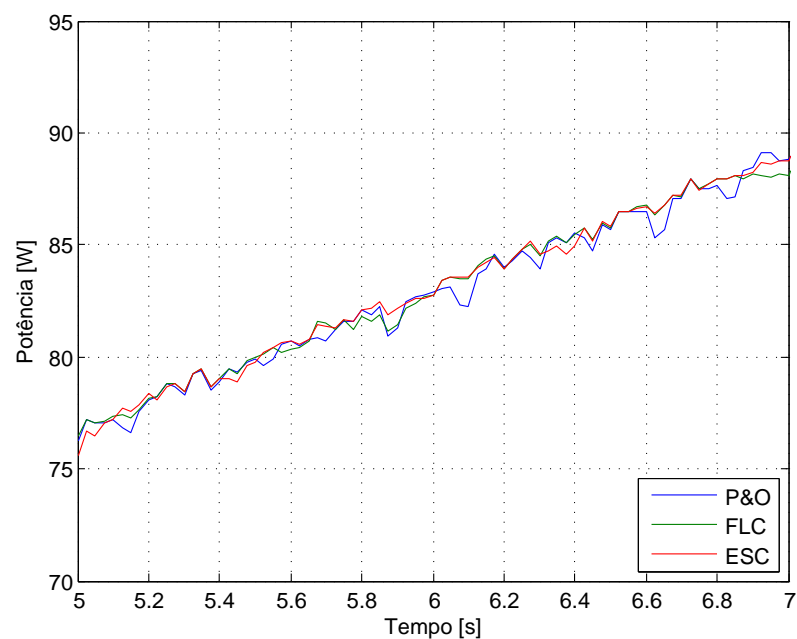
As Figuras 29 e 31 mostram os resultados do primeiro ensaio em relação à potência e ao *duty cycle*, respectivamente, para os três métodos de MPPT. As correspondentes ampliações das Figuras 29 e 31 estão nas Figuras 30 e 32.

Figura 29 – Resultados do primeiro ensaio em relação à potência.



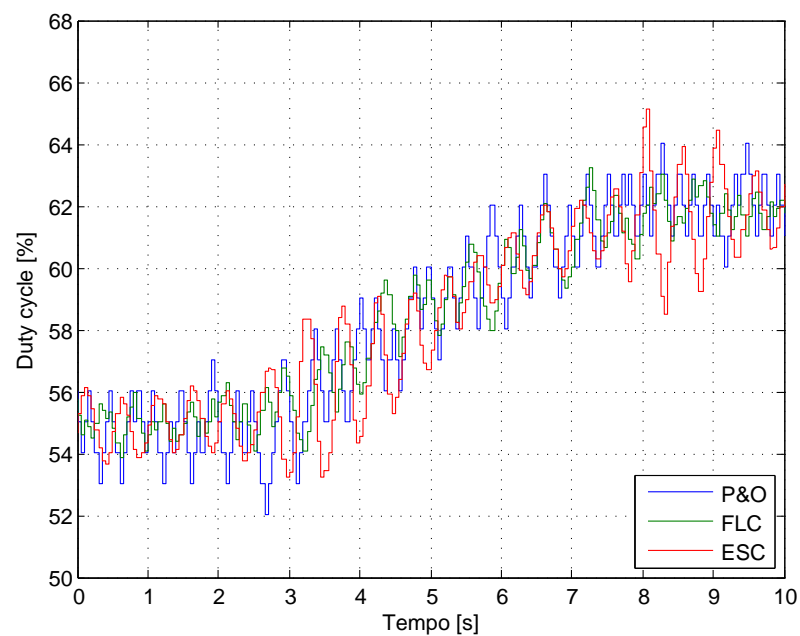
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 30 – Ampliação da Figura 29.



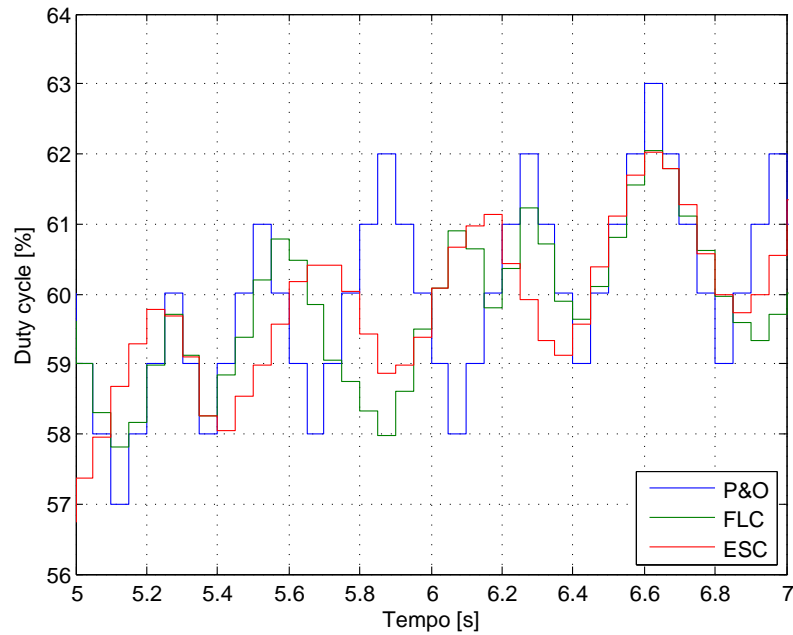
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 31 – Resultados do primeiro ensaio em relação ao *duty cycle*.



Fonte: Produzida pelo autor.

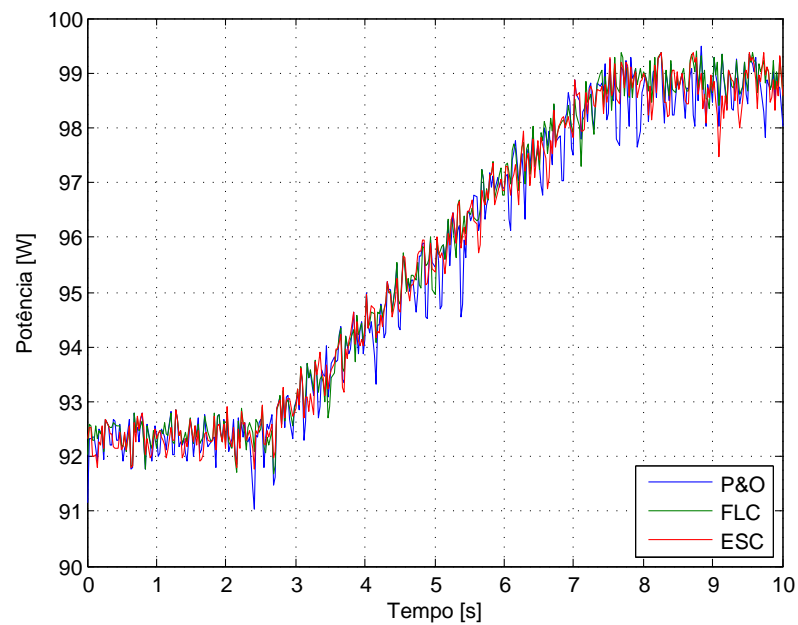
Figura 32 – Ampliação da Figura 31.



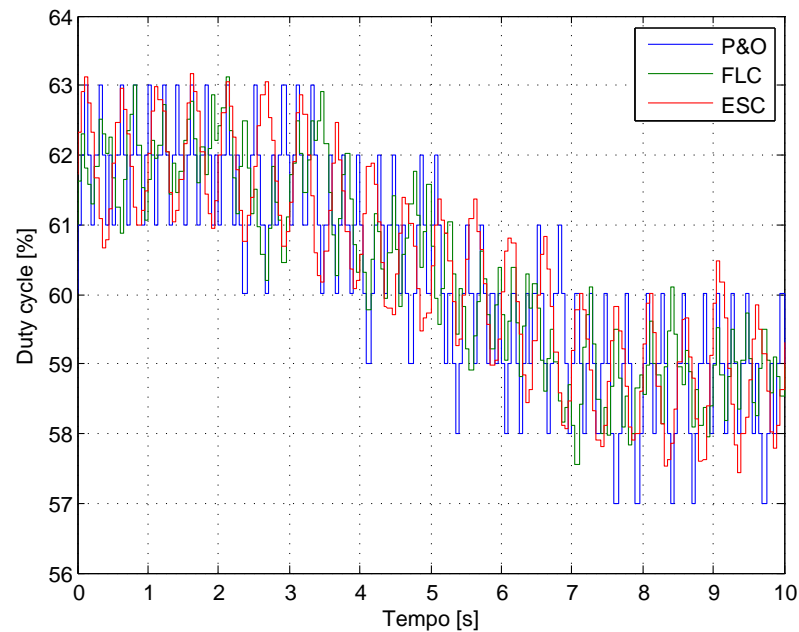
Fonte: Produzida pelo autor.

Por sua vez, as Figuras 33 e 34 mostram os resultados do segundo ensaio em relação à potência e ao *duty cycle*.

Figura 33 – Resultados do segundo ensaio em relação à potência.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 34 – Resultados do segundo ensaio em relação ao *duty cycle*.

Fonte: Produzida pelo autor.

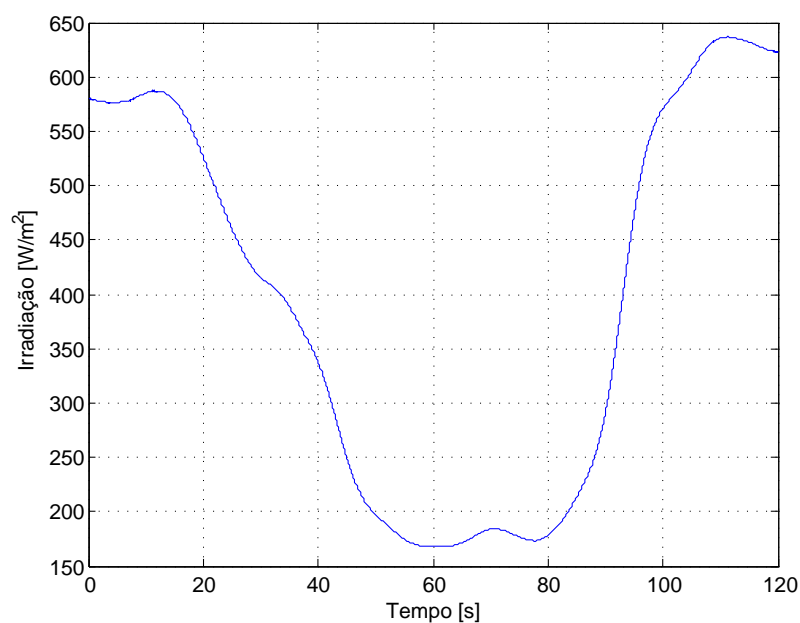
Com base nesses resultados, é possível afirmar que os métodos de MPPT operam adequadamente, pois são sempre capazes de alterar o *duty cycle* para seguir o MPP. O formato da curva da potência em função do tempo é uma rampa que cresce no primeiro ensaio e também cresce no segundo ensaio, como esperado.

A sensibilidade a distúrbios causada pelo relativamente alto valor de K no ESC pode ser bem observada na Figura 29. Quando a derivada de irradiação cessa abruptamente, há uma grande oscilação em torno do MPP que causa perdas em comparação com os outros métodos. De outro modo, porém, o controlador não seria capaz de seguir essa curva, acarretando em perdas ainda maiores.

3.2 Simulação com Dados Reais de Irradiação e Temperatura

Para comparar os métodos de MPPT de maneira mais efetiva, foram usados dados reais de irradiação e temperatura. Os dados de irradiação foram coletados em Alderville, no Canadá, uma vez a cada minuto, ou sempre que a irradiação mudasse mais que 5 W/m^2 em um intervalo mínimo de 10 ms. O sistema de medição de Alderville possui 24 unidades, cada uma equipada com dois pirômetros (OJIBWAY ALDERVILLE FIRST NATION, 2015). Da grande quantidade de dados disponíveis, foi retirada uma amostra de 120 s entre as 11h24min e as 11h26min, horário local, do dia 08/10/2015. A Figura 35 mostra o comportamento da irradiação ao longo do tempo.

Figura 35 – Comportamento da irradiação ao longo do tempo na amostra selecionada.

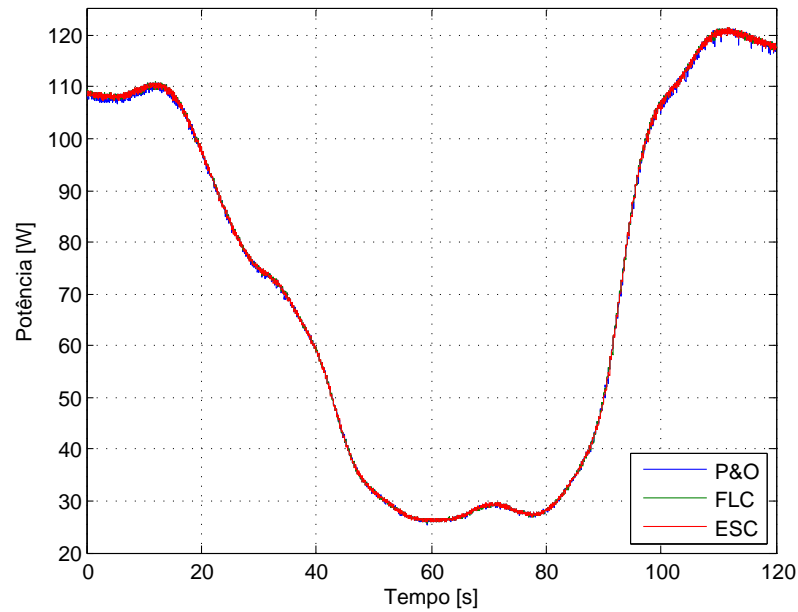


Fonte: Produzida pelo autor.

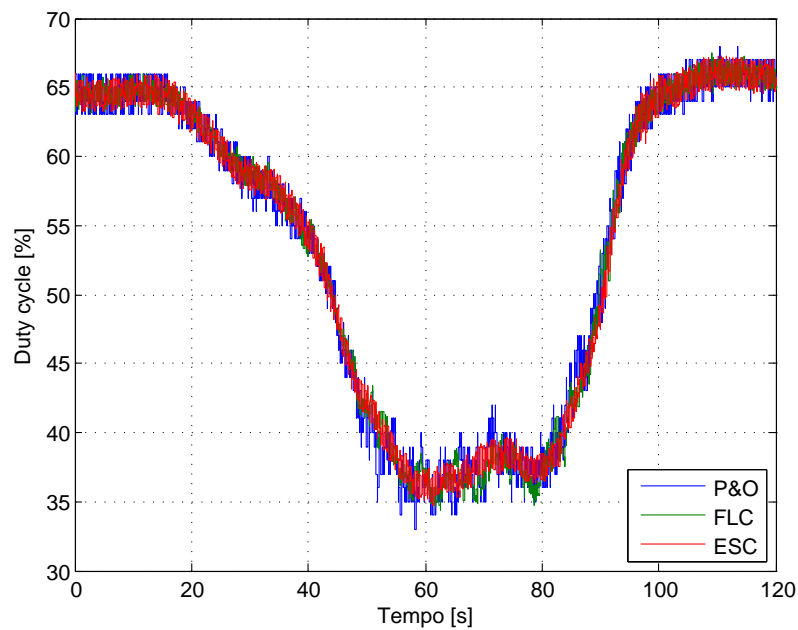
A temperatura, por sua vez, foi adquirida na estação meteorológica de Peterborough, a qual dista 22 km de Alderville (GOVERNMENT OF CANADA, 2015). Como não havia registro no horário exato da amostra, a temperatura foi obtida pela média aritmética das medidas feitas às 11h e às 12h do mesmo dia, resultando em 13,25 °C, e considerada constante ao longo da simulação.

Assim, os resultados da simulação estão nas Figuras 36 e 37, as quais mostram a potência extraída e o *duty cycle* calculado a partir de cada método.

Figura 36 – Potência extraída na simulação.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 37 – *Duty cycle* calculado na simulação.

Fonte: Produzida pelo autor.

Na Figura 37, aparentemente no método de ESC o *duty cycle* é mais estável, ficando em consequência mais tempo perto do MPP. A Figura 36, entretanto, mostra que isso não

é refletido na potência. De qualquer forma, o indicador que determina se essa suposição é válida ou não é a eficiência.

A eficiência de cada método pode ser dada por:

$$\eta_M = \frac{P}{P_{max}} \quad (10)$$

onde P é a potência extraída e P_{max} é a potência máxima, definida pela Equação (6). Assim, a Tabela 3 foi construída, a qual mostra a eficiência dos métodos de MPPT calculada por meio da Equação (10).

Tabela 3 – Eficiência dos métodos de MPPT.

Método de MPPT	Eficiência
P&O	99,29%
FLC	99,4%
ESC	99,35%

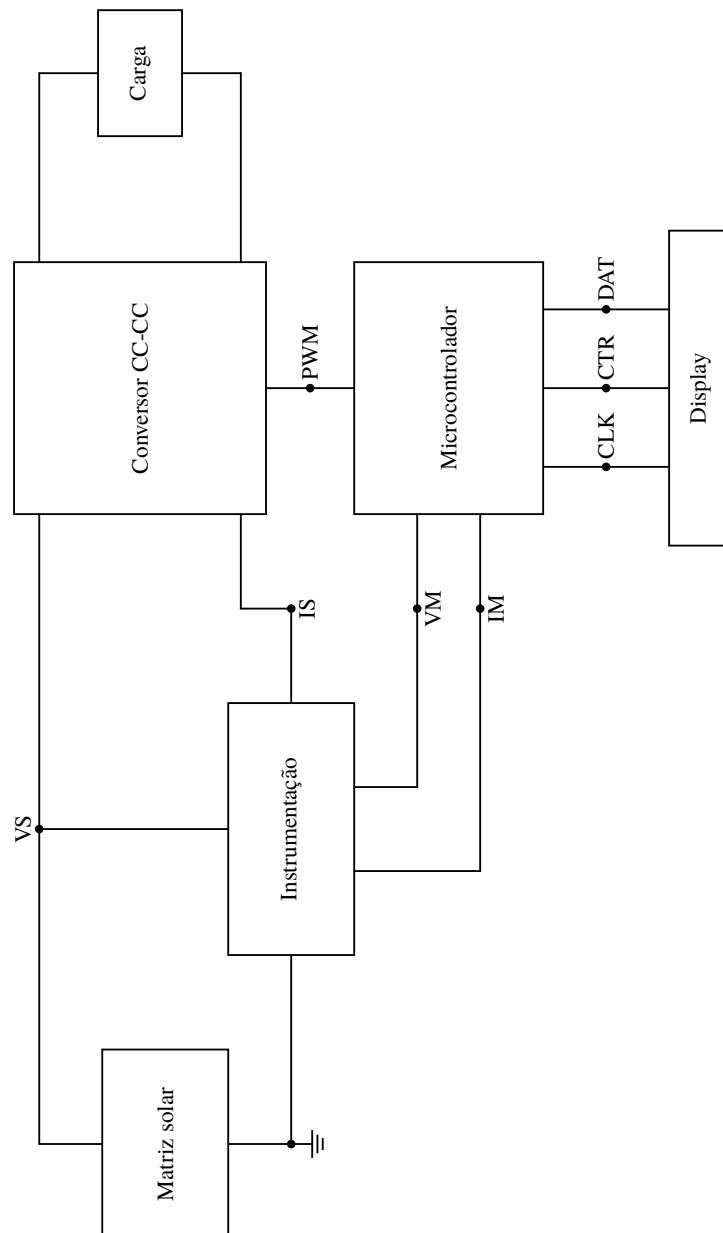
A observação dos dados constantes da Tabela 3 permite constatar que, pelo menos em relação à eficiência, os três métodos de MPPT são muito similares. Em outras palavras, são igualmente eficientes.

4 Resultados Experimentais

4.1 Descrição do Sistema Físico

A Figura 38 mostra a visão de alto nível do sistema físico.

Figura 38 – Visão de alto nível do sistema físico.



Fonte: Produzida pelo autor.

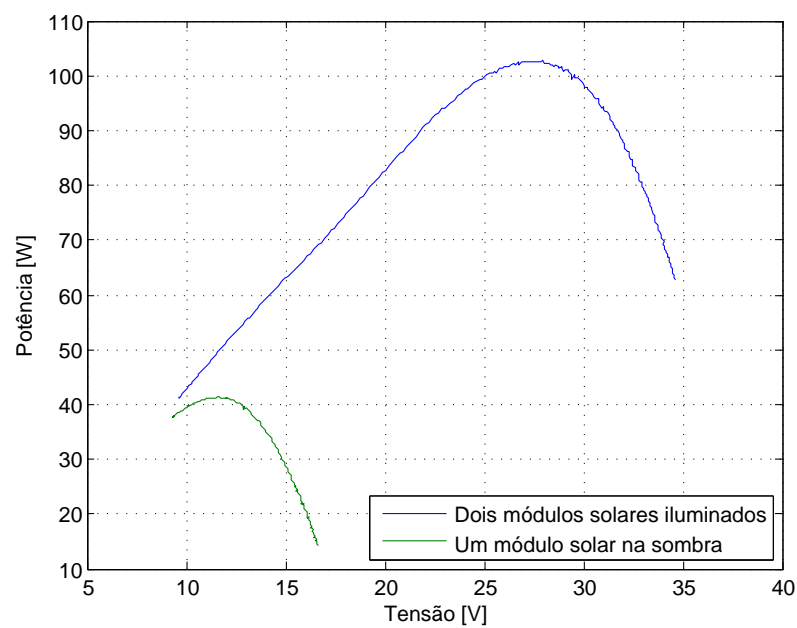
Nas próximas subseções, cada bloco será analisado em detalhes.

4.1.1 Matriz Solar

A matriz solar é composta de dois módulos solares em série sem indicação de modelo, provavelmente por não cumprirem suas especificações. Desse modo, não é possível afirmar com precisão valores como a tensão de circuito aberto, V_{oc} , e a corrente de curto-circuito, I_{sc} , nas STC. Em vez disso, uma varredura no *duty cycle* foi realizada a fim de obter as curvas aproximadas de potência e corrente.

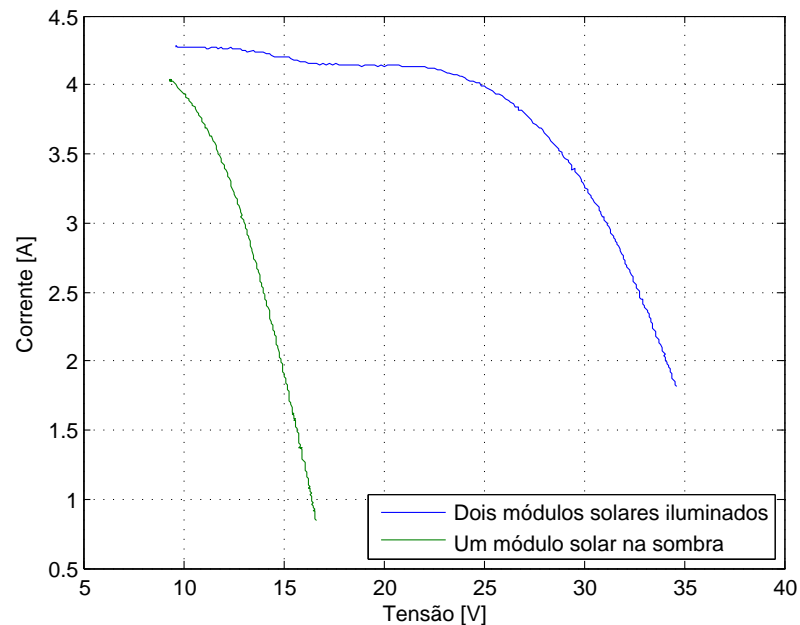
As Figuras 39 e 40 mostram, portanto, as curvas de potência e corrente, em duas situações. Na primeira, os dois módulos solares estavam iluminados, e na segunda, um dos módulos solares estava na sombra. A variação de *duty cycle* foi de 20% a 80%.

Figura 39 – Curvas de potência dos módulos solares.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 40 – Curvas de corrente dos módulos solares.



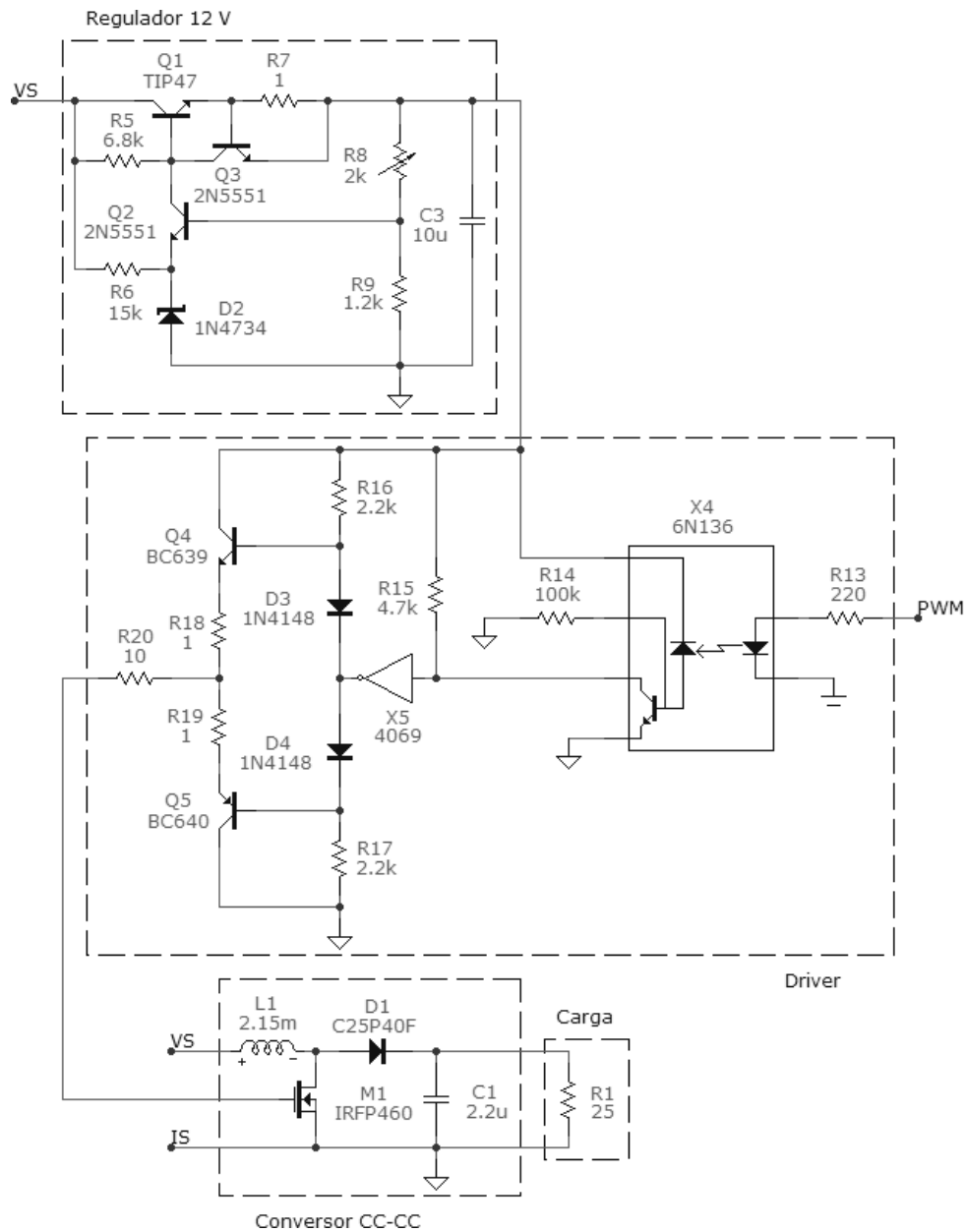
Fonte: Produzida pelo autor.

Quando um dos módulos solares está na sombra, a corrente gerada é nula, consequência da Equação (3). Como eles estão em série, isso implicaria que a corrente resultante seria nula. Não é o que acontece, entretanto, porque os módulos solares são fabricados com um diodo de *bypass* em antiparalelo, o qual coloca o módulo solar efetivamente em curto-circuito quando na sombra (FEMIA *et al.*, 2012). Então, do ponto de vista do resto do sistema, a matriz solar aparece como constituída de apenas um módulo solar, e não mais dois, já que o outro foi colocado em curto-circuito pelo diodo de *bypass*.

4.1.2 Conversor CC-CC e Carga

O conversor CC-CC é um conversor com topologia *boost* junto aos circuitos auxiliares de regulador de tensão de 12 V e *driver*. Por sua vez, a carga é um banco de resistores de potência cuja resistência equivalente é de 25 Ω , capaz de dissipar 200 W. O esquemático do conversor CC-CC e da carga está na Figura 41.

Figura 41 – Esquemático do conversor CC-CC e da carga.



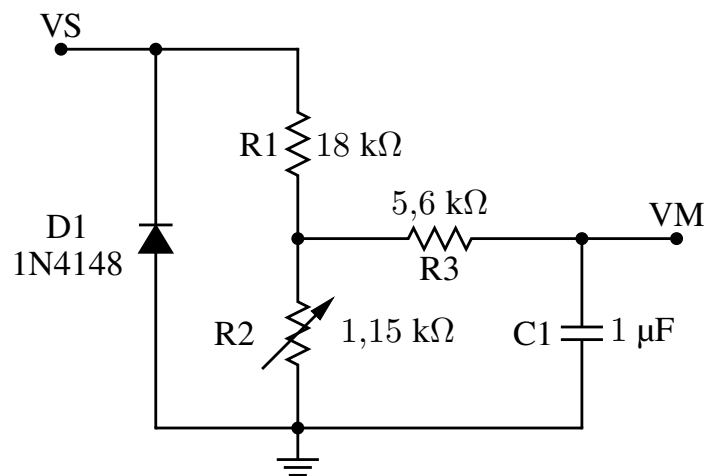
Fonte: Produzida pelo autor.

4.1.3 Instrumentação

Para medir a tensão e a corrente na matriz solar foram projetados dois circuitos independentes. A saída de ambos os circuitos, entretanto, deve ser em tensão, na escala de 0 V a 3 V, pois essa é a escala do conversor analógico-digital (*Analog to Digital Converter* - ADC) do microcontrolador.

A Figura 42 mostra o sensor de tensão.

Figura 42 – Sensor de tensão.



Fonte: Produzida pelo autor.

A tensão máxima a ser medida foi definida em 50 V. Portanto, o fator de redução do divisor de tensão formado por R1 e R2 precisa ser:

$$\frac{R2}{R1 + R2} = \frac{3}{50} \quad (11)$$

Substituindo $R1 = 18 \text{ k}\Omega$ em (11) implica em:

$$R2 = 1,15 \text{ k}\Omega$$

O filtro passa-baixas composto por R3 e C1 possui a função de remover o *ripple* do chaveamento. A sua frequência de corte é dada por:

$$\frac{1}{2\pi R3 C1} = 30 \text{ Hz} \quad (12)$$

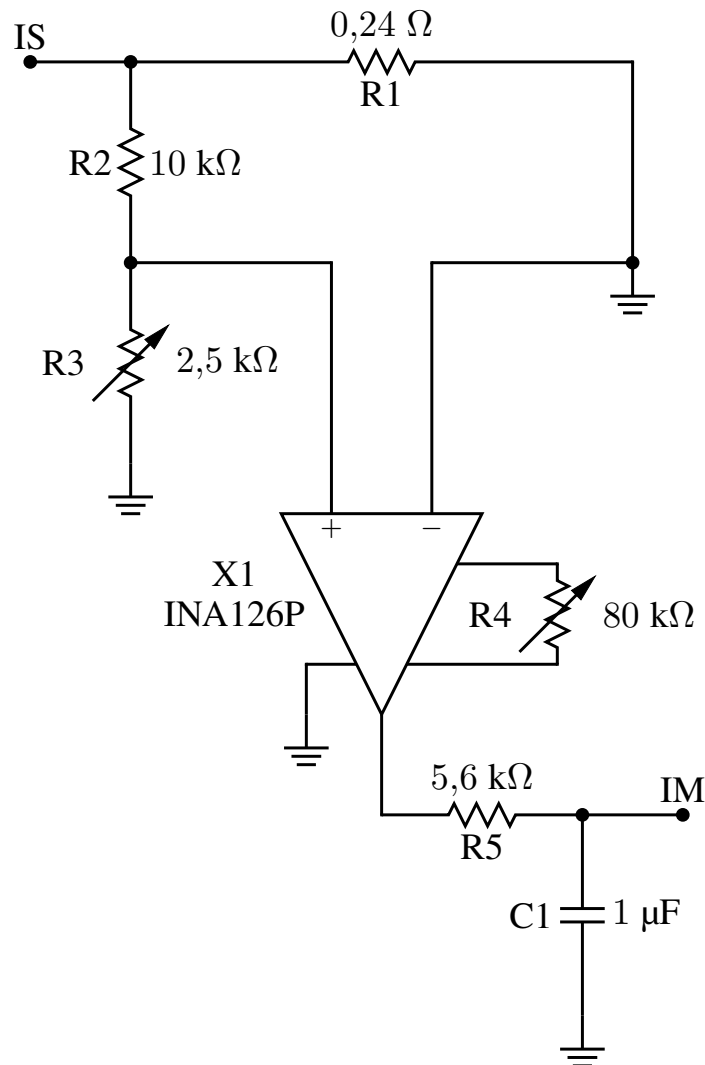
Se $C1 = 1 \text{ }\mu\text{F}$, (12) significa que:

$$R3 = 5,6 \text{ k}\Omega$$

E o diodo D1 é um dispositivo de proteção com o objetivo de evitar que tensões negativas no nó VS se propaguem ao ADC, representado pelo nó VM.

Por sua vez, o sensor de corrente está representado na Figura 43.

Figura 43 – Sensor de corrente.



Fonte: Produzida pelo autor.

Foi estabelecido que o sensor de corrente deve medir até 10 A. Nesse caso, assumindo que a corrente passa integralmente por R1, resulta que:

$$10 \text{ A} \times G R1 \frac{R3}{R2 + R3} = 3 \text{ V} \quad (13)$$

onde G é o ganho do amplificador de instrumentação X1, definido como:

$$G = 5 + \frac{80 \text{ k}\Omega}{R4} \quad (14)$$

Fixando arbitrariamente que $G = 6$, (14) implica que:

$$R4 = 80 \text{ k}\Omega$$

Então, substituindo $G = 6$ e $R1 = 0,24 \text{ }\Omega$ em (13):

$$\frac{R3}{R2 + R3} = \frac{1}{5} \quad (15)$$

Se $R2 = 10 \text{ k}\Omega$ em (15), por conseguinte:

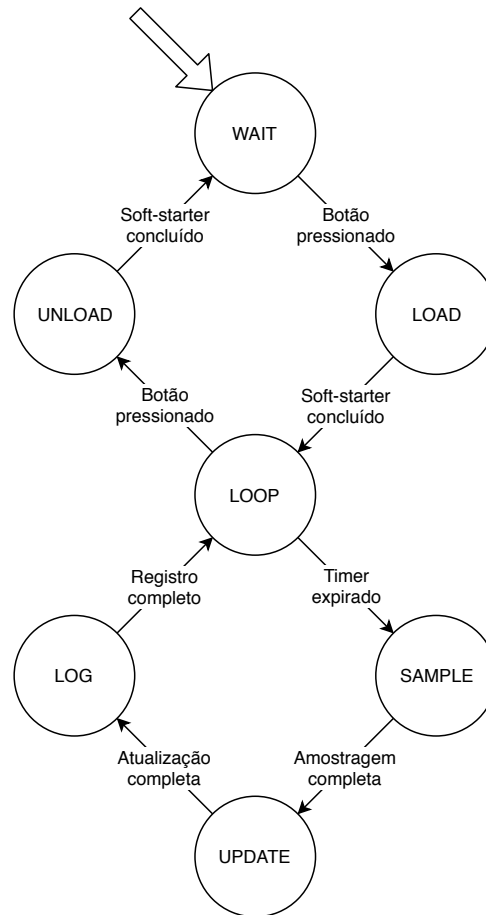
$$R3 = 2,5 \text{ k}\Omega$$

Na saída do amplificador X1 há um filtro passa-baixas com a mesma função e os mesmos componentes que o sensor de tensão.

4.1.4 Microcontrolador e *Display*

O microcontrolador é a parte central do sistema físico. Suas atribuições são converter os valores analógicos dos sensores através do ADC, executar o método de MPPT, gerar o sinal PWM para o conversor CC-CC, controlar o *display* e armazenar dados em um cartão de memória SD. O funcionamento do microcontrolador pode ser resumido em um diagrama de estados simplificado como está na Figura 44.

Figura 44 – Diagrama de estados simplificado do microcontrolador.



Fonte: Produzida pelo autor.

O microcontrolador usado é o microcontrolador ATmega328P (Atmel), o qual é o principal componente do Arduino, uma placa de desenvolvimento acessível e de baixo custo. Na programação, entretanto, o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino não foi utilizado, mas apenas a biblioteca AVR Libc através da linguagem C.

Na Figura 44, a seta mais larga indica o ponto em que a execução começa, isto é, no estado WAIT. Nesse estado, o microcontrolador está suspenso e o *duty cycle* é sempre de 0%. Se um botão externo for pressionado, entretanto, o microcontrolador passa ao estado LOAD, no qual a rotina de *soft-starter* é executada. Essa rotina tem por objetivo levar o *duty cycle* lentamente de 0% ao valor inicial de 20%. E assim, o estado LOOP é atingido, no qual o microcontrolador monitora se o mesmo botão externo foi pressionado ou se o *timer* expirou. O *timer* é configurado para expirar a cada 50 ms, o que corresponde a uma taxa de 20 Hz, ou seja, a frequência de amostragem.

Se o *timer* expirou o próximo estado é o SAMPLE, em que o microcontrolador amostra a tensão e a corrente, nessa ordem. O ATmega328P possui um único ADC, que é

compartilhado entre oito canais por meio de um multiplexador. Disso resulta que a tensão e a corrente não são amostrados exatamente no mesmo instante, mas sim sequencialmente. O tempo entre uma e outra amostra, entretanto, pode ser desprezado, visto que é de apenas 13 μ s. Após a amostragem, o microcontrolador, no estado UPDATE, tem a função de executar o método de MPPT, que recebe a tensão e a corrente e calcula a variação no *duty cycle*, que pode ser de 5% no máximo, e -5% no mínimo. A variação é então somada ao *duty cycle*, que é corrigido se necessário para estar entre 5% e 80%. Esses limites servem para evitar danos ao circuito do conversor CC-CC. Finalmente, o microcontrolador vai para o estado LOG, consulta o relógio de tempo real DS1307 (Maxim) e grava os valores obtidos de hora, minuto e segundo do dia, mês e ano atual, bem como a tensão, corrente e *duty cycle*, no cartão de memória SD (SanDisk). Então, o microcontrolador, enquanto está no estado LOOP, espera o *timer* expirar de novo.

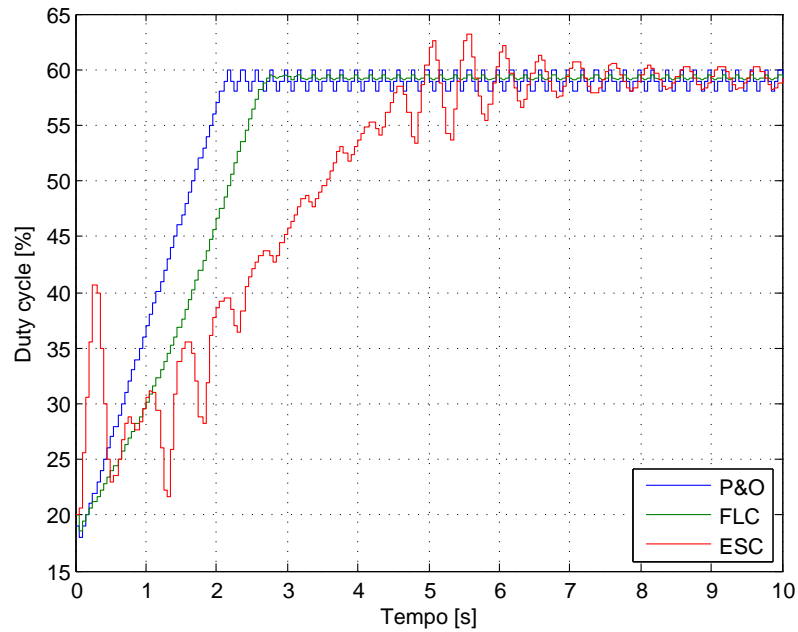
Se, porém, o botão externo for pressionado, o próximo estado é o UNLOAD. Nesse estado, o microcontrolador executa a rotina de *soft-starter* novamente, mas desta vez para levar o *duty cycle* suavemente a 0%. Quando esse processo for concluído, o microcontrolador volta ao estado WAIT.

Já o *display* serve para informar o valor do *duty cycle* em tempo real. Assim, anomalias no funcionamento do método de MPPT, como grandes variações no *duty cycle* em curtos períodos de tempo, podem ser detectadas no momento em que estiverem ocorrendo. O *display* é atualizado sempre, não importa o estado em que o microcontrolador se encontre.

4.2 Validação do Sistema Físico

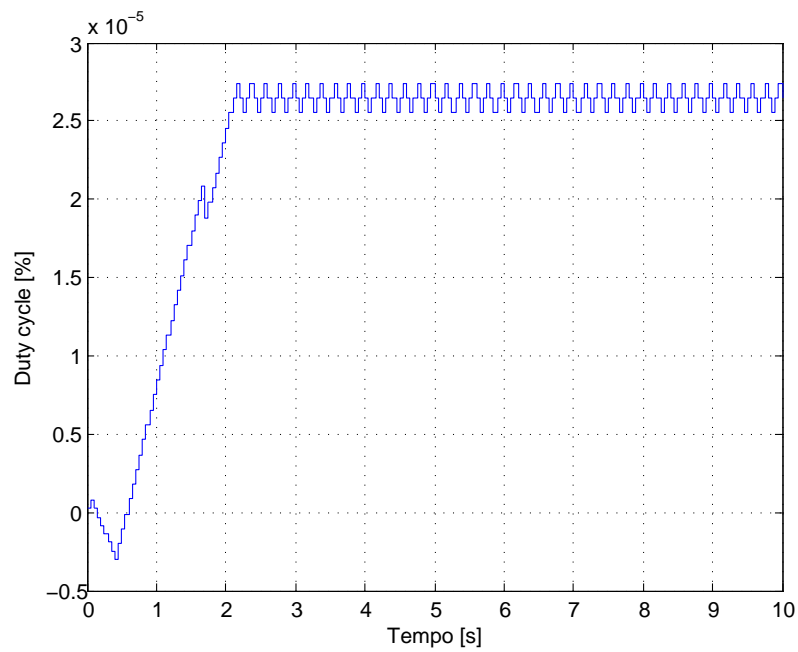
O processo de investigar a implementação de um controlador em um sistema físico em um sistema virtual recebe o nome de *Hardware-In-the-Loop* (HIL) (STEURER *et al.*, 2007). Com esse fim, é necessário executar as implementações dos controladores no sistema físico e no ambiente de simulação nas mesmas condições e verificar seus resultados. Neste caso, a base de comparação foi constituída pelo seu comportamento ao serem ligados. A irradiação e a temperatura foram mantidas constantes em 400 W/m² e 25 °C, respectivamente. Excepcionalmente para estes testes, não houve adição de ruído aos sinais de tensão e corrente. A Figura 45 mostra o *duty cycle* no ambiente de simulação para os três métodos de MPPT, enquanto que as Figuras 46, 47 e 48 mostram a diferença entre o *duty cycle* obtido na simulação e o obtido no HIL.

Figura 45 – *Duty cycle* no ambiente de simulação.



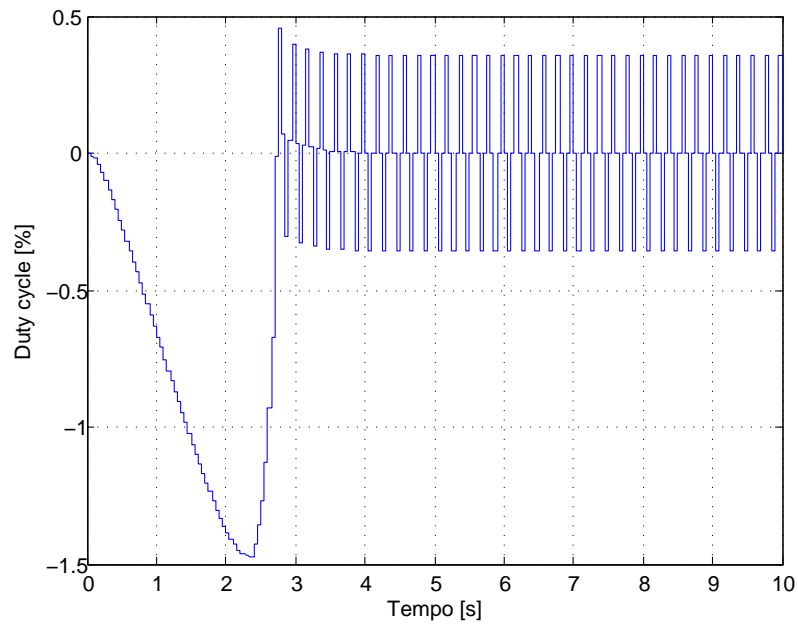
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 46 – Diferença entre o *duty cycle* obtido na simulação e o obtido no HIL para o método P&O.



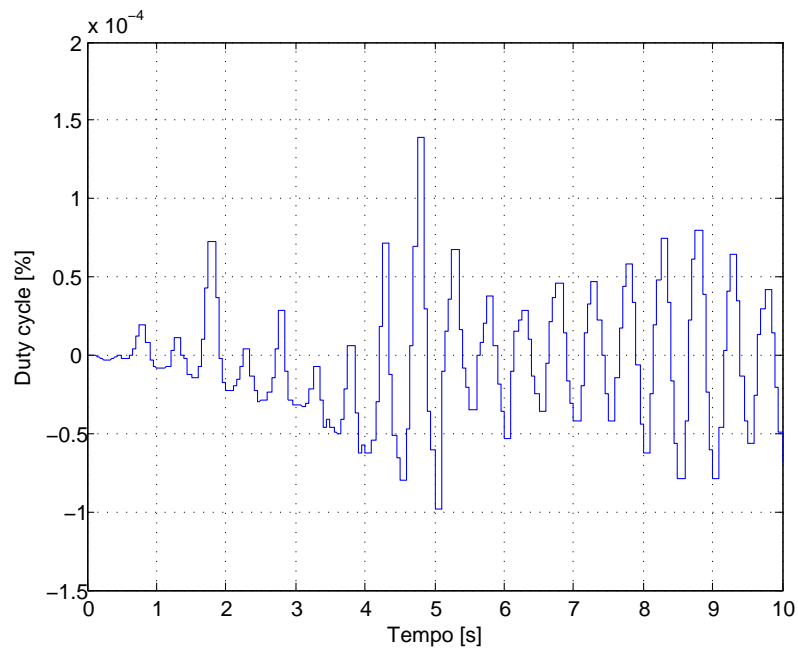
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 47 – Diferença entre o *duty cycle* obtido na simulação e o obtido no HIL para o FLC.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 48 – Diferença entre o *duty cycle* obtido na simulação e o obtido no HIL para o método de ESC.



Fonte: Produzida pelo autor.

As Figuras 46, 47 e 48 demonstram que os controladores reagem da mesma forma, pois a diferença entre o *duty cycle* obtido na simulação e o obtido no HIL é mínima nos métodos P&O e ESC, e pequena no FLC, embora significativamente maior que nos outros métodos. A razão dessa diferença existir reside fundamentalmente na diferente representação dos números de ponto flutuante no sistema físico e no ambiente de simulação. No Simulink, esses números possuem precisão dupla, enquanto que o AVR Libc suporta apenas precisão simples. À medida que os cálculos vão sendo realizados, a perda de precisão fica mais evidente, e é por esse motivo que o método P&O apresenta uma diferença da ordem de $1 \times 10^{-4}\%$ de *duty cycle*, enquanto que, em relação ao FLC, essa diferença é da ordem de 1%. Em outras palavras, isso acontece porque diferentemente do P&O, o FLC precisa realizar uma grande quantidade de operações.

O HIL também foi usado para medir o tempo de execução médio dos métodos de MPPT, que são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tempo de execução médio dos métodos de MPPT.

Método de MPPT	Tempo de execução
P&O	70,77 μ s
FLC	1914 μ s
ESC	171,8 μ s

O tempo de execução do algoritmo é outro parâmetro relacionado ao número de cálculos. A consequência de um tempo de execução maior é a limitação da frequência de amostragem, pois o método de MPPT precisa ser completado antes do próximo *duty cycle* ser aplicado. Neste caso, o ESC possui o dobro do tempo de execução do P&O, mas ainda assim são durações relativamente próximas em comparação com o FLC, que demora em média dez vezes mais que o ESC.

4.3 Experimentos Realizados

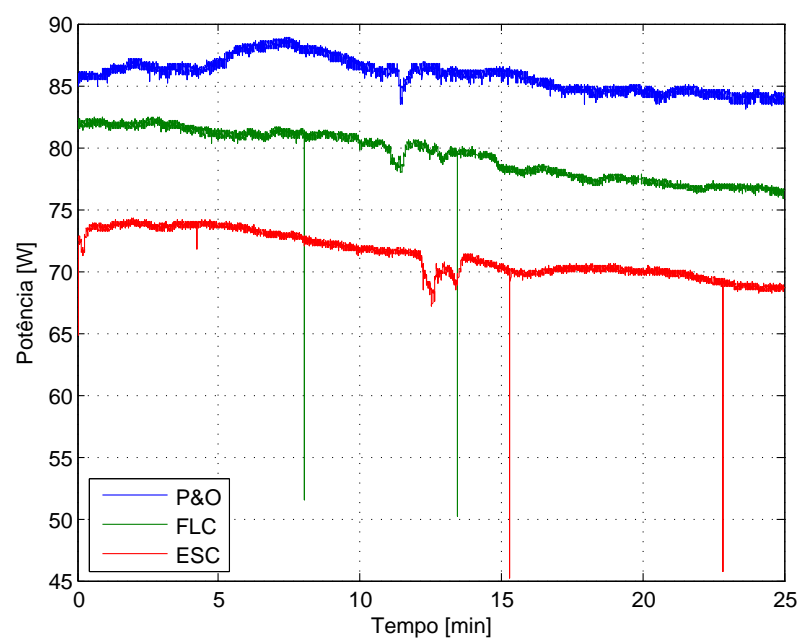
A validação do sistema físico através do HIL permite a realização de experimentos usando, dessa vez, um sistema real. Mesmo assim, primeiramente, no dia 30/10/2018, cada método de MPPT foi deixado em funcionamento por 25 min a fim de confirmar experimentalmente a ausência de erros. Os horários de funcionamento dos métodos estão na Tabela 5.

Tabela 5 – Horários de funcionamento dos métodos de MPPT.

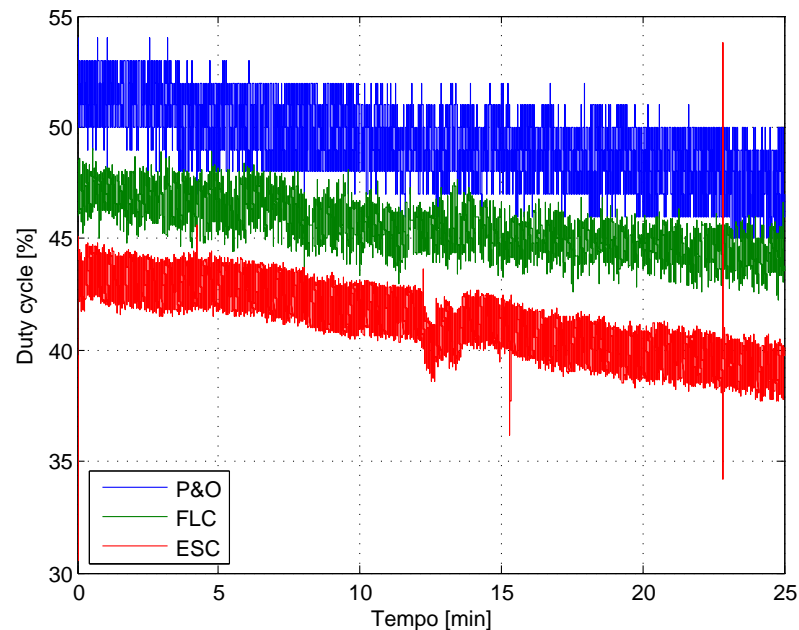
Método de MPPT	Início	Término
P&O	14h39min	15h04min
FLC	15h08min	15h33min
ESC	15h36min	16h01min

Os resultados estão nas Figuras 49 e 50, as quais mostram a potência gerada e o *duty cycle* obtido, respectivamente.

Figura 49 – Potência extraída no teste experimental.



Fonte: Produzida pelo autor.

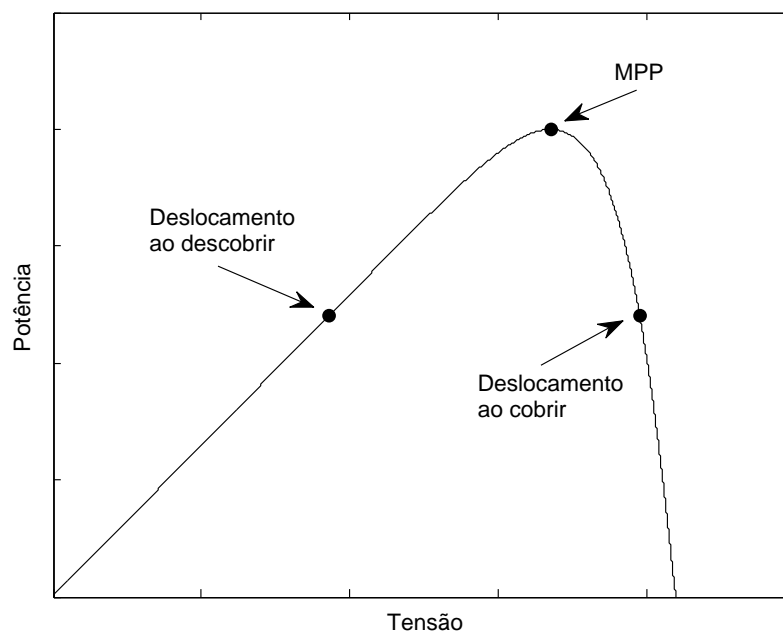
Figura 50 – *Duty cycle* obtido no teste experimental.

Fonte: Produzida pelo autor.

As Figuras 49 e 50 deixam claro que os métodos de MPPT funcionam bem, pois a potência gerada é a mesma esperada para um dia claro como foi o dia desses testes, isto é, sem grandes variações. Na Figura 49 é possível observar súbitas quedas de muito curta duração na potência. Esses eventos não são ruídos na instrumentação, mas possivelmente nuvens rápidas ou aves que bloquearam um dos módulos solares por um instante de tempo. Além disso, é importante notar que a diferença nos níveis de potência gerada em cada método é natural, já que eles não foram executados simultaneamente. No presente caso, o método de P&O foi executado quando havia mais irradiação, e portanto mais potência disponível, enquanto que o ESC foi executado quando havia menos irradiação.

Depois disso, foram realizados dois experimentos no dia 08/11/2018, entre as 11h59min e as 12h41min. O primeiro experimento foi cobrir e descobrir um dos módulos solares, causando deslocamentos súbitos no ponto de operação para a direita e para a esquerda, respectivamente. Esses deslocamentos estão ilustrados na Figura 51. Em outras palavras, a Figura 51 significa que, ao cobrir um dos módulos solares, o *duty cycle* precisa aumentar, e ao descobrir, o *duty cycle* precisa diminuir.

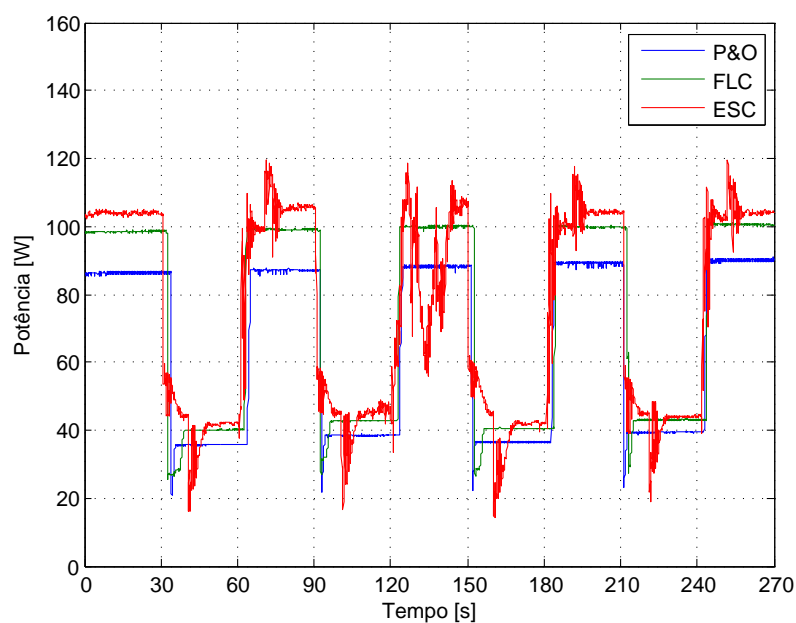
Figura 51 – Ilustração dos deslocamentos no ponto de operação.



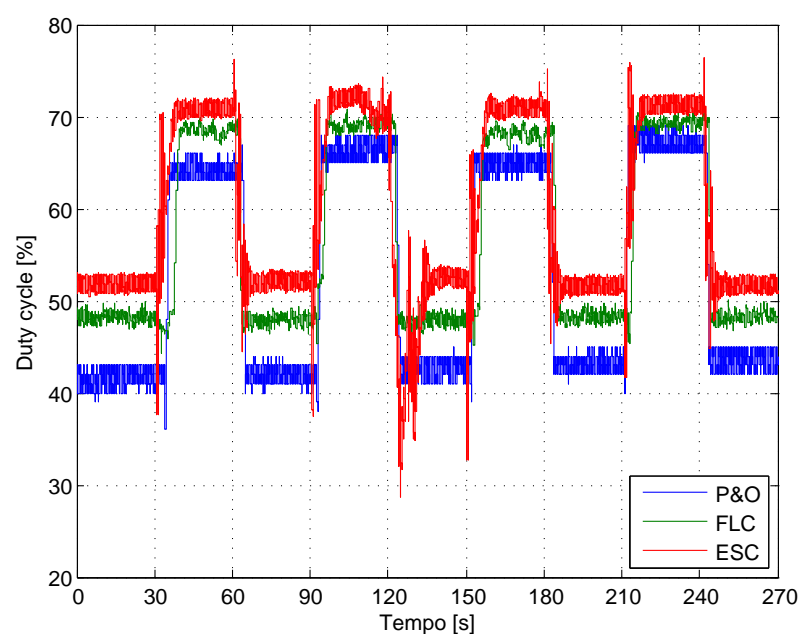
Fonte: Produzida pelo autor.

O procedimento de cobrir e descobrir foi realizado por quatro vezes, a intervalos de 30 segundos entre um e outro, para cada método de MPPT. A partir dos dados coletados podem ser obtidas as Figuras 52 e 53, que mostram a potência e o *duty cycle* calculado pelos controladores nessas condições.

Figura 52 – Potência gerada no primeiro experimento.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 53 – *Duty cycle* obtido no primeiro experimento.

Fonte: Produzida pelo autor.

Com base nesses experimentos, a média dos tempos de acomodação a 5% do valor final da potência pode ser medido, conforme mostrado na Tabela 6.

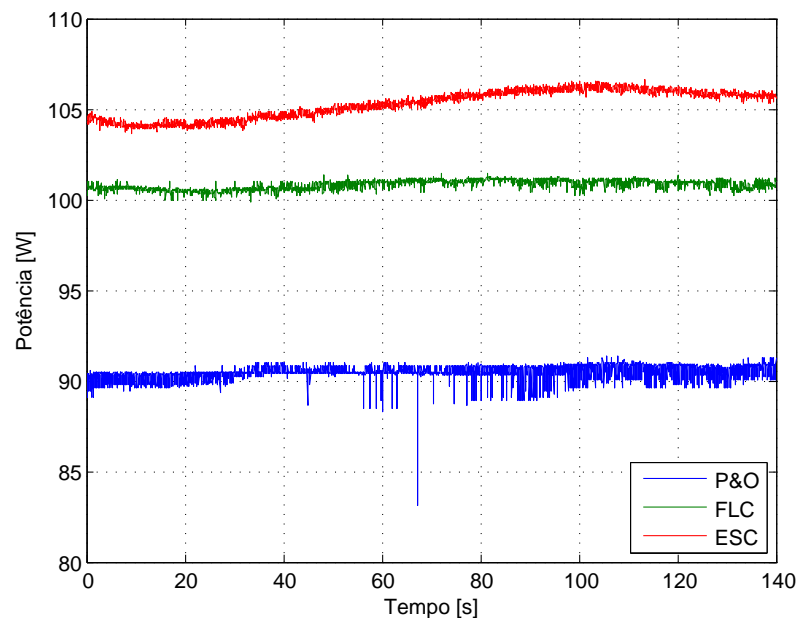
Tabela 6 – Tempo de acomodação médio dos métodos de MPPT.

Método de MPPT	Tempo de acomodação	
	ao cobrir	ao descobrir
P&O	1,4 s	1,1 s
FLC	4 s	0,7 s
ESC	5,2 s	3,6 s

Portanto, o P&O é rápido e o ESC lento, enquanto que o FLC é rápido em uma direção e lento na outra. Um dos grandes problemas do ESC nesse tipo de cenário, em que ocorre uma grande variação em um curto intervalo de tempo, é a oscilação que demora a ser amortecida. Em média, metade do tempo de acomodação do ESC contido na Tabela 6 é desperdiçado apenas com esse fim. Outra irregularidade é a assimetria no comportamento do FLC, mesmo quando as funções de pertinência da variação na potência, tensão e *duty cycle*, contidas nas Figuras 24, 25 e 26, respectivamente, são simétricas.

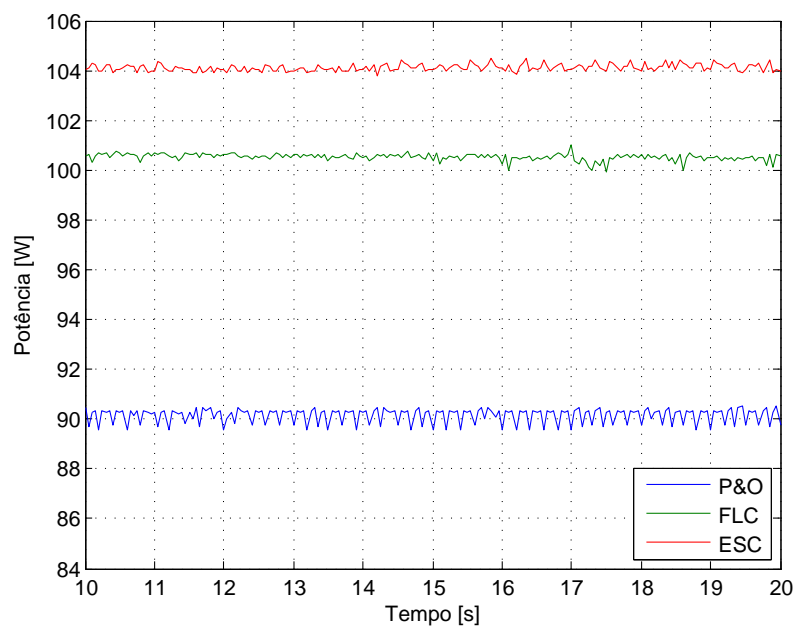
O segundo experimento foi bem mais simples, pois foi constituído apenas pelo regime permanente dos controladores, sem perturbações de qualquer natureza, com a duração de 140 s. As Figuras 54 e 56 mostram a potência e o *duty cycle* observados. As Figuras 55 e 57 são ampliações das Figuras 54 e 56, respectivamente.

Figura 54 – Potência gerada no segundo experimento.



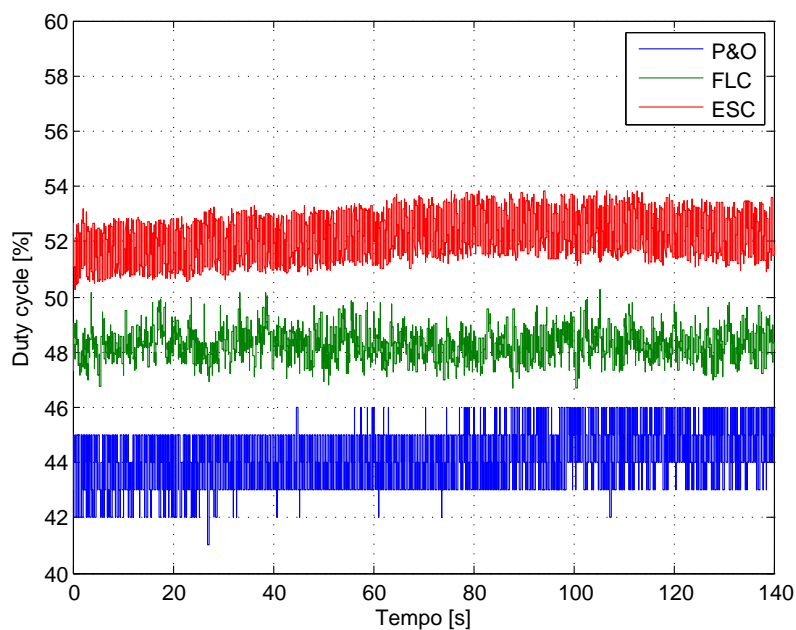
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 55 – Ampliação da Figura 54.



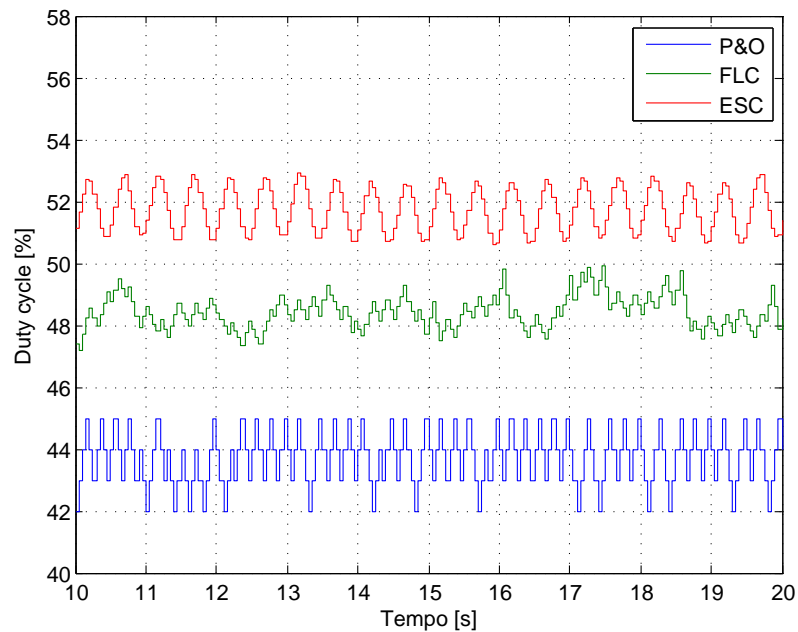
Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 56 – Duty cycle obtido no segundo experimento.



Fonte: Produzida pelo autor.

Figura 57 – Ampliação da Figura 56.



Fonte: Produzida pelo autor.

Um parâmetro que pode ser calculado a partir desses dados é o desvio-padrão da potência. Para isso, foram separados dez segmentos de igual duração, o desvio-padrão de cada um foi obtido, e a média aritmética deles resultou no desvio-padrão médio. Na Tabela 7 estão constantes os desvios-padrão médios dos métodos de MPPT.

Tabela 7 – Desvio-padrão médio dos métodos de MPPT.

Método de MPPT	Desvio-padrão
P&O	0,38 W
FLC	0,172 W
ESC	0,178 W

Um desvio-padrão menor implica em menos potência desperdiçada em regime permanente, já que a dispersão do ponto de operação em relação ao MPP é menor. Nesse sentido, o FLC e o ESC possuem igual desvio-padrão, e relativamente pequeno, porém o P&O apresenta um desvio-padrão significativamente alto.

5 Conclusão

Neste trabalho, foi desenvolvido um ambiente de simulação composto por MATLAB/Simulink e PSIM, a fim de poder implementar os três métodos de MPPT, a saber, P&O, fuzzy e ESC. Esses métodos foram testados em variadas situações, e seus parâmetros foram ajustados para que o desempenho fosse o melhor possível. Com dados reais de irradiação e temperatura, esses métodos puderam ser inspecionados mais profundamente e seus níveis de eficiência foram obtidos. Esses dados mostraram que, em termos de eficiência, não há distinção entre os métodos.

A seguir, esses métodos foram implementados em um ATmega328P, o microcontrolador usado no Arduino. O HIL foi então utilizado para verificar se o comportamento no ambiente de simulação e no *hardware* eram equivalentes, o que ficou demonstrado, embora com ressalvas no caso do método fuzzy. Uma medida de comparação também foi obtida, relacionada ao tempo de execução de cada método. O método fuzzy foi o mais lento, enquanto que os outros dois tiveram desempenho parecido.

Posteriormente, o sistema físico foi validado experimentalmente nos módulos solares instalados no prédio do Instituto Eletrotécnico da UFRGS, e mais dois experimentos foram realizados. O primeiro experimento consistiu em cobrir e descobrir um dos módulos, ocasionando brusca mudança no ponto de operação. Os resultados permitiram observar que, em relação ao tempo de acomodação, o ESC é lento, o P&O é rápido, e o fuzzy é rápido em uma direção e lento na outra. No segundo experimento, foi feita a coleta de dados em regime permanente, dos quais foi extraído o desvio-padrão de cada método. Assim, o P&O teve o maior desvio-padrão, enquanto que os outros dois métodos obtiveram valores pequenos e parecidos.

O principal trabalho futuro que pode ser feito é a reformulação do ESC por meio da adição de compensadores dinâmicos na malha fechada a fim de melhorar a velocidade de convergência. Outras sugestões incluem variações na topologia do ESC, mudanças nas funções de pertinência do método fuzzy e um projeto simultâneo formado por um controlador para o conversor CC-CC e outro controlador, em cascata, para o MPPT, baseado no ESC.

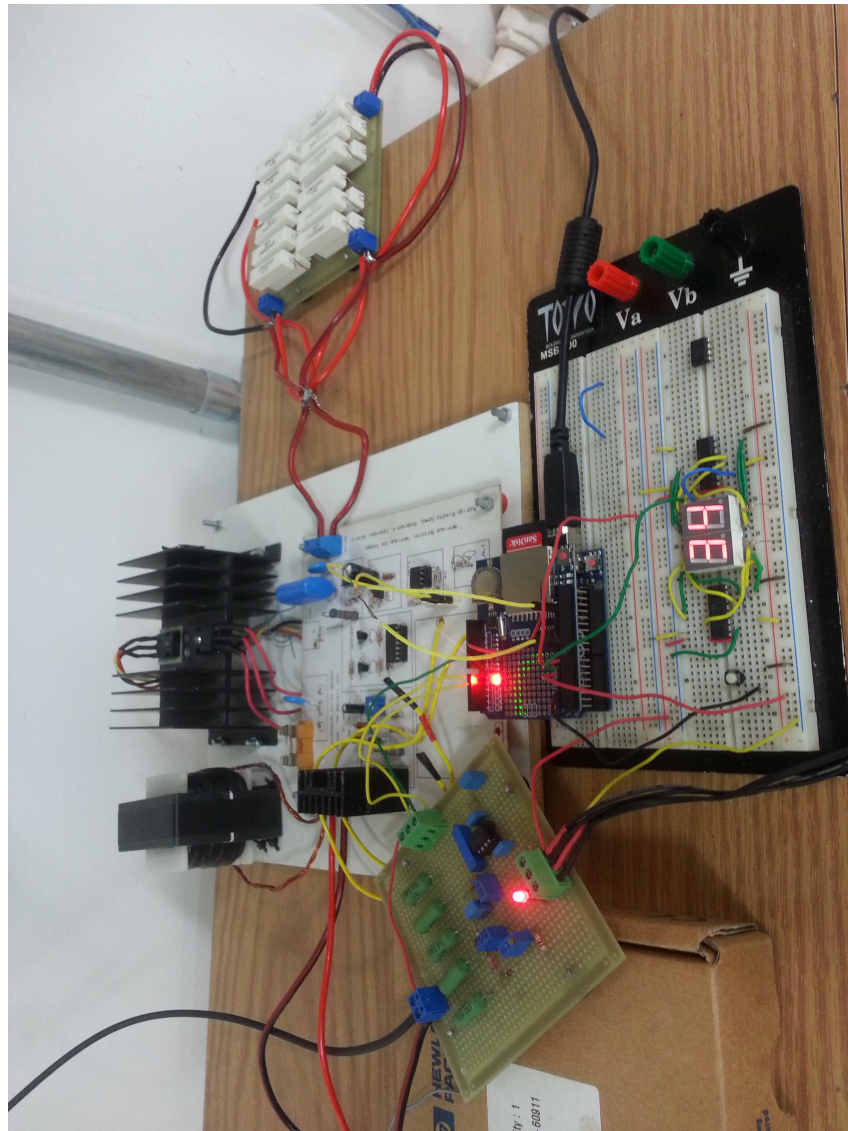
Referências Bibliográficas

- ALAJMI, B. N. *et al.* Fuzzy-Logic-Control Approach of a Modified Hill-Climbing Method for Maximum Power Point in Microgrid Standalone Photovoltaic System. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 26, n. 4, p. 1022–1030, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 28.
- ALI, A. N. A. *et al.* A Survey of Maximum PPT Techniques of PV Systems. In: *2012 IEEE Energytech*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 1–17. Citado 3 vezes nas páginas 12, 25 e 28.
- BENDIB, B.; BELMILI, H.; KRIM, F. A Survey of the Most Used MPPT Methods: Conventional and Advanced Algorithms Applied for Photovoltaic Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 637–648, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 12, 17, 25 e 28.
- BRUNTON, S. L. *et al.* Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Optimization Using Ripple-Based Extremum Seeking Control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 25, n. 10, p. 2531–2540, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 13, 30, 32 e 41.
- CHOI, J.-Y. *et al.* Extremum Seeking Control for Discrete-Time Systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 47, n. 2, p. 318–323, 2002. Citado na página 30.
- FEMIA, N. *et al.* *Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. 366 p. Citado 10 vezes nas páginas 12, 16, 17, 18, 20, 23, 24, 27, 42 e 52.
- GOETZBERGER, A.; HOFFMANN, V. U. *Photovoltaic Solar Energy Generation*. 1. ed. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. 234 p. Citado 3 vezes nas páginas 14, 19 e 20.
- GOVERNMENT OF CANADA. *Historical Climate Data*. 2015. Disponível em: <http://climate.weather.gc.ca/index_e.html>. Acesso em: 13 set. 2018. Citado na página 47.
- KAUNDINYA, D. P.; BALACHANDRA, P.; RAVINDRANATH, N. H. Grid-Connected versus Stand-Alone Energy Systems for Decentralized Power - A Review of Literature. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 13, p. 2041–2050, 2009. Citado na página 12.
- KRSTIĆ, M.; WANG, H.-H. Stability of Extremum Seeking Feedback for General Nonlinear Dynamic Systems. *Automatica*, v. 36, n. 4, p. 595–601, 2000. Citado na página 30.
- LEE, C. C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 20, n. 2, p. 404–418, 1990. Citado 3 vezes nas páginas 12, 27 e 28.
- LEYVA, R. *et al.* MPPT of Photovoltaic Systems using Extremum-Seeking Control. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, v. 42, n. 1, p. 249–258, 2006. Citado na página 30.

- MOURA, S. J.; CHANG, Y. A. Asymptotic Convergence through Lyapunov-Based Switching in Extremum Seeking with Application to Photovoltaic Systems. In: *2010 American Control Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 3542–3548. Citado 3 vezes nas páginas 32, 41 e 42.
- OJIBWAY ALDERVILLE FIRST NATION. *High-Resolution Solar Radiation Datasets*. 2015. Disponível em: <<https://www.nrcan.gc.ca/energy/renewable-electricity/solar-photovoltaic/18409>>. Acesso em: 7 ago. 2018. Citado na página 46.
- OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W.; BUCK, J. R. *Discrete-Time Signal Processing*. 2. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999. 870 p. Citado na página 31.
- RASHID, M. H. *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, and Applications*. 3. ed. Burlington: Elsevier, 2011. 1362 p. Citado 4 vezes nas páginas 20, 23, 24 e 35.
- SEDRA, A. S.; SMITH, K. C. *Microelectronic Circuits*. 6. ed. Oxford: Oxford University Press, 2009. 1456 p. Citado na página 15.
- SERA, D. *et al.* On the Perturb-and-Observe and Incremental Conductance MPPT Methods for PV Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics*, v. 3, n. 3, p. 1070–1078, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 36.
- STEURER, M. *et al.* Controller and Power Hardware-In-Loop Methods for Accelerating Renewable Energy Integration. In: *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–4. Citado na página 58.
- VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R.; RUPPERT FILHO, E. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 5, p. 1198–1208, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 12, 14, 15 e 16.
- WEBSTER, J. G. *The Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. 1. ed. Boca Raton: CRC Press, 1998. 2630 p. Citado na página 36.

Apêndice A - Fotos da Bancada Experimental

A1 - Bancada de experimentos.



Fonte: Produzida pelo autor.

A2 - Disjuntores dos módulos solares.



Fonte: Produzida pelo autor.