

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GABRIEL SIMÕES DE GOUVÊA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS P&O, IC E *EXTREMUM*  
*SEEKING* APLICADO AO MPPT DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO**

**APUCARANA**

**2022**

**GABRIEL SIMÕES DE GOUVÊA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS P&O, IC E *EXTREMUM*  
*SEEKING* APLICADO AO MPPT DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO**

**Comparative study between P&O, IC and Extremum Seeking techniques  
applied to MPPT of a photovoltaic array**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do  
Curso de Bacharelado Engenharia Elétrica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Willian Ricardo Bispo  
Murbak Nunes

**APUCARANA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GABRIEL SIMÕES DE GOUVÊA**

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE AS TÉCNICAS P&O, IC E *EXTREMUM*  
*SEEKING* APLICADO AO MPPT DE UM ARRANJO FOTOVOLTAICO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Elétrica do  
Curso de Bacharelado Engenharia Elétrica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Data de aprovação: 29/novembro/2022

---

Willian Ricardo Bispo Murbak Nunes  
Doutor em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Sebastian Jesus de Manrique Machado  
Doutor em Engenharia Elétrica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Uiliam Nelson Lenzion Tomaz Alves  
Doutor em Engenharia Elétrica  
Instituto Federal do Paraná

**APUCARANA**

**2022**

## RESUMO

Este trabalho propõe realizar uma análise comparativa entre três técnicas para rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês, *Maximum Power Point Tracking*) de um arranjo fotovoltaico. Arranjos fotovoltaicos apresentam uma curva característica na qual apresenta um ponto ideal onde consegue-se extrair a máxima potência possível. Algoritmos MPPT buscam alcançar esse ponto de operação, porém os arranjos fotovoltaicos apresentam uma natureza não linear e apresentam incertezas devido às variações de irradiância e temperatura, o que prejudica o desempenho de algoritmos tradicionais. O método da condutância incremental (IC, do inglês, *Incremental Conductance*), do perturba e observa (P&O) e o controlador extremal (ESC, do inglês, *Extremum Seeking Control*) são analisados neste estudo. Este trabalho adota as duas primeiras técnicas, que são consideradas clássicas na área de MPPT, com o intuito de comparar com a terceira técnica proposta como mais eficiente que as outras duas. Todas as técnicas a serem abordadas não necessitam da modelagem matemática do sistema fotovoltaico, o que é uma vantagem para contornar as não linearidades e incertezas intrínsecas do sistema. Por fim, espera-se que os resultados obtidos via simulação comprovem a melhor performance do *Extremum Seeking Control* em comparação com as outras técnicas propostas.

**Palavras-chave:** fotovoltaico; conversor cc/cc; controle extremal; controle adaptativo.

## ABSTRACT

This work proposes to carry out an analysis between three methods to maximum power point tracking (MPPT) of a photovoltaic array. The photovoltaic arrays present a characteristic curve in which it presents an ideal operating point which it can be extract the maximum power possible. MPPT's algorithms perform the search of this operating point, although photovoltaic arrays have a nonlinear nature and present some uncertainties due to irradiance and tempature variations, which harm the performance usual algorithms. The Incremental Conductance (IC) method, the Perturb and Observe (P&O) and Extremum Seeking Control (ESC) are analyzed in this study. This work brings the two first techniques, which are classic MPPT methods, for compararison with the third technique which is proposed as the most efficient between the techniques presented. All the techniques brought on this work do not depend on the mathematical model of the PV system which is an advantage for avoid the non linearities and intrinsic uncertainties of the system. At the end of this work are expected that the obtained results via simulation prove that Extremum Seeking Control presents the better performance compared to the other proposed techniques.

**Keywords:** photovoltaic; dc/dc converter; extremum seeking control; adaptive control.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Matriz de energia elétrica brasileira por tipo de fonte referente ao ano 2021. . . . .   | 10 |
| Figura 2 – Matriz de energia elétrica brasileira por tipo de fonte referente aos anos 2020 e 2025. . . . .  | 11 |
| Figura 3 – Topologias de arranjos fotovoltaicos conectados à rede elétrica; (a) centralizado, (b) <i>multistring</i> , (c) <i>string</i> , (d) módulo CA. . . . . | 17 |
| Figura 4 – Topologia de um arranjo fotovoltaico isolado com banco de bateria em paralelo. . . . .   | 17 |
| Figura 5 – Circuito proposto para a realização do MPPT. . . . .   | 18 |
| Figura 6 – Topologias de conversores CC/CC; (a) Conversor <i>Buck</i> , (b) Conversor <i>Boost</i> , (c) Conversor <i>Buck-Boost</i> . . . . .                    | 20 |
| Figura 7 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica. . . . .   | 21 |
| Figura 8 – Curvas características I-V e P-V de um módulo PV para temperatura fixa e irradiância variando. . . . .   | 23 |
| Figura 9 – Curvas características I-V e P-V de um módulo PV para irradiância fixa e temperatura variando. . . . .   | 24 |
| Figura 10 – Circuito e blocos de controle do arranjo fotovoltaico. . . . .  | 25 |
| Figura 11 – Fluxograma do algoritmo P&O. . . . .  | 26 |
| Figura 12 – Gráfico característico P-V de um painel fotovoltaico. . . . .   | 27 |
| Figura 13 – Fluxograma do algoritmo IC. . . . .   | 28 |
| Figura 14 – Diagrama de blocos do método ESC. . . . .   | 30 |
| Figura 15 – Curvas características do módulo escolhido. . . . .   | 32 |
| Figura 16 – Sistema montado no <i>software</i> Simulink. . . . .  | 34 |
| Figura 17 – Algoritmos IC e P&O montados no Simulink. . . . .   | 35 |
| Figura 18 – Método ESC montado no Simulink. . . . .   | 36 |
| Figura 19 – Evolução temporal de potência considerando a técnica P&O para o cenário 1 . . . . .   | 37 |
| Figura 20 – Evolução temporal de potência considerando a técnica IC para o cenário 1 . . . . .  | 38 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figura 21 – Evolução temporal de potência considerando a técnica ESC para o cenário 1 . . . . .</b>    | <b>38</b> |
| <b>Figura 22 – Evolução temporal do sinal de controle das três técnicas para o cenário 1. . . . .</b>     | <b>39</b> |
| <b>Figura 23 – Evolução temporal de potência considerando a técnica P&amp;O para o cenário 2. . . . .</b> | <b>40</b> |
| <b>Figura 24 – Evolução temporal de potência considerando a técnica IC para o cenário 2. . . . .</b>      | <b>40</b> |
| <b>Figura 25 – Evolução temporal de potência considerando a técnica ESC para o cenário 2. . . . .</b>     | <b>41</b> |
| <b>Figura 26 – Evolução temporal do sinal de controle das três técnicas para o cenário 2. . . . .</b>     | <b>42</b> |
| <b>Figura 27 – Evolução temporal de potência considerando a técnica P&amp;O para o cenário 3. . . . .</b> | <b>43</b> |
| <b>Figura 28 – Evolução temporal de potência considerando a técnica IC para o cenário 3. . . . .</b>      | <b>43</b> |
| <b>Figura 29 – Evolução temporal de potência considerando a técnica ESC para o cenário 3. . . . .</b>     | <b>44</b> |
| <b>Figura 30 – Evolução temporal do sinal de controle das três técnicas para o cenário 3. . . . .</b>     | <b>44</b> |

## LISTA DE TABELAS

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tabela 1 – Valores e unidades das constantes apresentadas. . . . .</b>            | <b>23</b> |
| <b>Tabela 2 – Valores dos parâmetros requeridos. . . . .</b>                         | <b>32</b> |
| <b>Tabela 3 – Especificações técnicas do painel escolhido. . . . .</b>               | <b>33</b> |
| <b>Tabela 4 – Valores dos componentes inseridos no Simulink. . . . .</b>             | <b>35</b> |
| <b>Tabela 5 – Resumo dos parâmetros analisados de cada cenário proposto. . . . .</b> | <b>45</b> |



## SUMÁRIO

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| <b>1</b>   | <b>INTRODUÇÃO</b>   | <b>9</b>  |
| <b>1.1</b> | <b>PROBLEMA PROPOSTO</b>  | <b>11</b> |
| <b>1.2</b> | <b>JUSTIFICATIVA</b>  | <b>12</b> |
| <b>1.3</b> | <b>OBJETIVOS</b>  | <b>12</b> |
| 1.3.1      | Objetivo geral  | 12        |
| 1.3.2      | Objetivos específicos   | 12        |
| <b>1.4</b> | <b>ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>1.5</b> | <b>CONCLUSÕES PARCIAIS</b>  | <b>13</b> |
| <b>2</b>   | <b>REVISÃO DA LITERATURA</b>                                      | <b>14</b> |
| <b>2.1</b> | <b>ESTADO DA ARTE</b>   | <b>14</b> |
| <b>3</b>   | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                      | <b>16</b> |
| <b>3.1</b> | <b>ESTRUTURA DO ARRANJO FOTOVOLTAICO</b>                          | <b>16</b> |
| 3.1.1      | Componentes de um arranjo fotovoltaico                            | 16        |
| 3.1.2      | Topologias de um arranjo fotovoltaico                             | 17        |
| <b>3.2</b> | <b>CONVERSOR CC/CC</b>  | <b>19</b> |
| <b>3.3</b> | <b>MODELAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO</b>                          | <b>20</b> |
| 3.3.1      | MODELAGEM CÉLULA FOTOVOLTAICA                                     | 20        |
| <b>3.4</b> | <b>RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA</b>                   | <b>23</b> |
| <b>3.5</b> | <b>MÉTODO PERTURBA E OBSERVA</b>                                  | <b>25</b> |
| <b>3.6</b> | <b>MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL</b>                          | <b>27</b> |
| <b>3.7</b> | <b>EXTREMUM SEEKING CONTROL (ESC)</b>                             | <b>29</b> |
| <b>3.8</b> | <b>CONCLUSÕES PARCIAIS</b>  | <b>31</b> |
| <b>4</b>   | <b>SISTEMA PROPOSTO E AMBIENTE DE SIMULAÇÃO</b>                   | <b>32</b> |
| <b>4.1</b> | <b>PROJETO DO ARRANJO E DO CONVERSOR</b>                          | <b>32</b> |
| <b>4.2</b> | <b>AMBIENTE DE SIMULAÇÃO</b>                                      | <b>34</b> |
| <b>4.3</b> | <b>CONCLUSÕES PARCIAIS</b>  | <b>36</b> |
| <b>5</b>   | <b>RESULTADOS</b>   | <b>37</b> |
| <b>5.1</b> | <b>CENÁRIO 1: VALORES CONSTANTES DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA</b> | <b>37</b> |

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 5.2 | CENÁRIO 2: VALOR CONSTANTE DE TEMPERATURA COM DEGRAU DE IRRADIÂNCIA . . . . . | 39 |
| 5.3 | CENÁRIO 3: VALOR CONSTANTE DE IRRADIÂNCIA COM DEGRAU DE TEMPERATURA . . . . . | 42 |
| 5.4 | DISCUSSÕES . . . . .  | 45 |
| 5.5 | CONCLUSÕES PARCIAIS . . . . .   | 46 |
| 6   | CONCLUSÕES FINAIS . . . . .   | 47 |
|     | REFERÊNCIAS . . . . .   | 48 |

## 1 INTRODUÇÃO

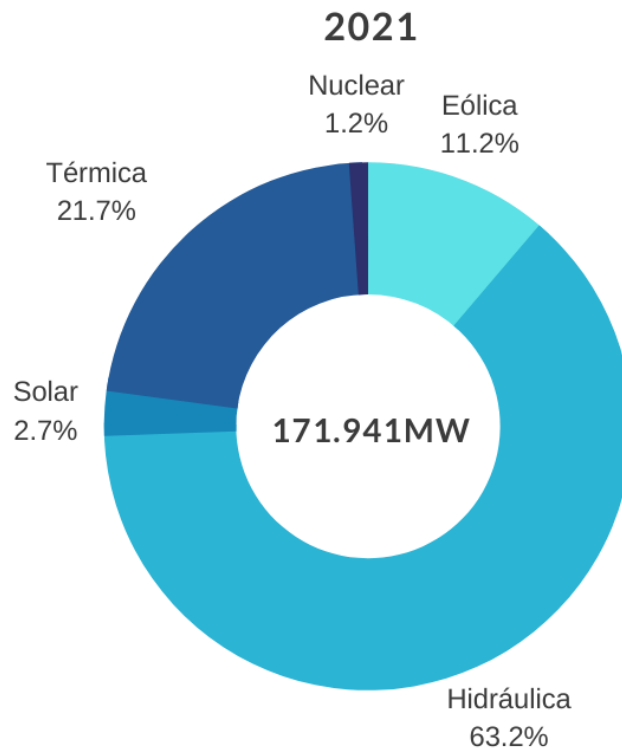
Com o aumento da população e da indústria o já alto consumo da energia elétrica apenas tende a aumentar, ou seja, uma maior carga para ser alimentada. Assim, é necessário buscar novos tipos de fontes para alimentar essa carga crescente da rede elétrica. Como a grande parte da energia é provinda de fontes não renováveis e as demais já popularizadas apresentam um alto custo para instalação e manutenção (por exemplo, usina de nuclear) ou depende de fatores geográficos para seu funcionamento (por exemplo, usina hidroelétrica). Assim, a alternativa se torna investir em novas tecnologias de geração de energia. Devido a essa necessidade, o aumento de uso de gerações de energia alternativas na última década é evidente. Gerações como fotovoltaica, eólica, biomassa e oceânica (maré e ondas) tem sido algumas alternativas para o problema de demanda de energia, com destaque para as fontes de energia fotovoltaica e eólica que crescem anualmente.

Igualmente, vale ressaltar a agenda 2030 da ONU (Organização das Nações Unidas) para o desenvolvimento sustentável, que estabelece compromissos dos governos, que participam da agenda, em efetivarem políticas públicas de estímulo ao desenvolvimento sustentável. O objetivo 7 da agenda trata especificamente de se alcançar uma energia limpa e acessível para toda a população. No Brasil, foi criado em 2002 o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas), que tem como objetivo aumentar a participação de fontes de energia renováveis no cenário elétrico brasileiro. Ainda em 2012, a resolução normativa N°482 da ANEEL trouxe regulamentação para a micro e minigeração, permitindo unidades geradoras fazerem uso da geração distribuída. Então, é possível perceber um esforço nacional e ao mesmo tempo mundial para haver uma maior diversidade da matriz energética.

A partir de informações providas do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é possível analisar os dados da energia elétrica no Brasil. Um desses dados é a capacidade de geração instalada do SIN (Sistema Interligado Nacional) no que se refere à quantidade de energia elétrica é gerada e o tipo de fonte é proveniente a energia. Em 2021, gráfico apresentado na Figura 1 é possível visualizar a presença da fonte renovável solar, que detêm 2,7% da totalidade que correspondem a cerca de 4.695 MW, e que se comparado com o ano anterior, Figura 2(a), houve um crescimento em sua matriz energética que em 2020 configurava apenas 1,8%, cerca de 3.063 MW, ou seja há um crescimento da energia solar não só no mundo, mas também no Brasil. O gráfico apresentado na Figura 2(b), que refere-se a valores previstos para o ano de 2025, reforça esse crescimento, onde a fonte solar corresponde a 3,9%, cerca de 7.188 MW da totalidade da matriz energética brasileira. Conforme a energia solar vem ganhando espaço na geração de energia, a quantidade de estudos voltados para essa área também cresce. Nesse sentido, esse trabalho propõe uma análise comparativa de técnicas de rastreamento de potência na área de geração de energia fotovoltaica.

A energia fotovoltaica, por se tratar de uma geração que pode se tornar bastante compacta comparadas às demais - podendo ser instalada em telhados de casas, por exemplo, tem

**Figura 1 – Matriz de energia elétrica brasileira por tipo de fonte referente ao ano 2021.**

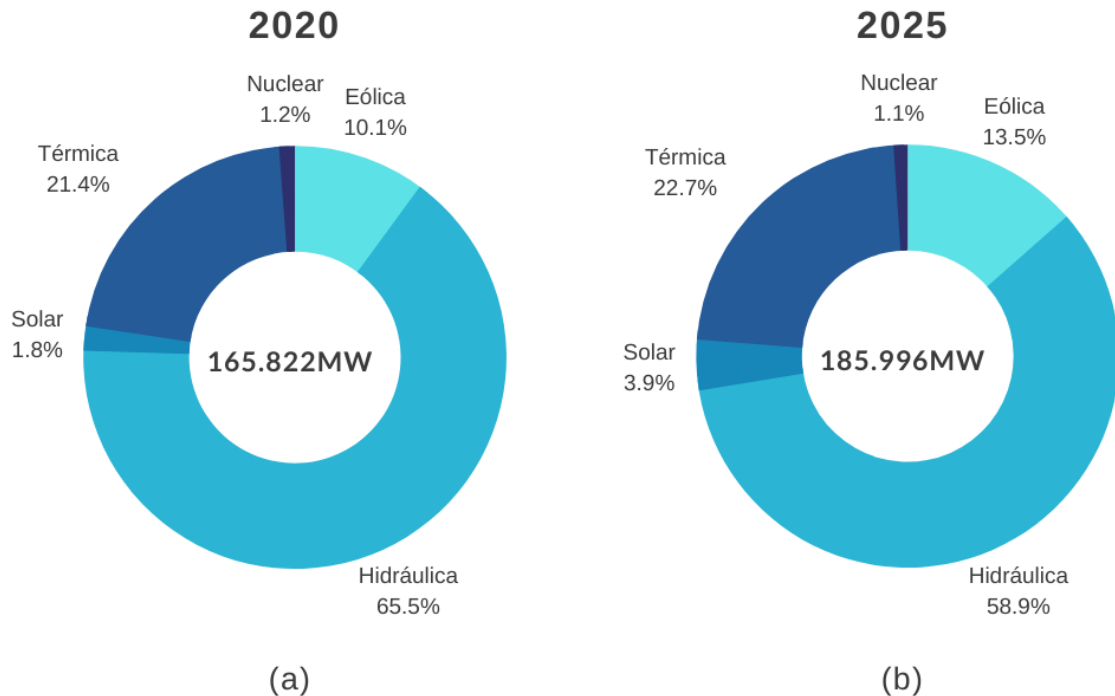


**Fonte: Adaptado do site do ONS (2022).**

vido a forma de geração alternativa de energia elétrica que mais ganhou espaço no mercado; ao mesmo tempo que é uma geração modular, o que facilita o aumento da instalação ao conectar novos módulos, e não possui partes móveis, o que por sua vez aumenta a vida útil do arranjo. O funcionamento de uma célula fotovoltaica tem como princípio o efeito fotovoltaico, descoberto por Edmond Becquerel em 1839, ao observar uma diferença de potencial, quando expostas a luz, em placas metálicas, envoltas por um eletrólito. Assim, a partir desse efeito a primeira célula fotovoltaica foi apresentada na reunião anual da *Nacional Academy* em 1954 nos Estados Unidos, sendo uma criação de Calvin Fuller (VALLÊRA; BRITO, 2006).

Desde então, a evolução da tecnologia fotovoltaica é notável, sendo introduzidos métodos para se extrair a máxima eficiência da geração de energia do módulo fotovoltaico, esse processo de extração é conhecido como MPPT (do inglês, *Maximum Power Point Tracking*), que consiste em técnicas voltadas para realizar o rastreamento do ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico; tal ponto é apresentado pela curva P-V ou I-V do módulo fotovoltaico que acaba variando com a irradiância solar e temperatura na superfície da placa. Assim, nesse trabalho o intuito é realizar o MPPT utilizando três técnicas distintas.

**Figura 2 – Matriz de energia elétrica brasileira por tipo de fonte referente aos anos 2020 e 2025.**



**Fonte: Adaptado do site do ONS (2022).**

A primeira e segunda técnicas são o P&O (perturba e Observa) e IC (do inglês, *Incremental Conductance*), que são algoritmos clássicos na área de MPPT. A técnica P&O aplica uma perturbação/variação de tensão de saída do arranjo fotovoltaico e observa qual é a reação na potência sobre a carga. Já a técnica IC realiza o rastreamento comparando as condutâncias instantânea e incremental do arranjo PV (do inglês, *photovoltaic*). Por fim, a terceira técnica é o *Extremum Seeking Control* (ESC), um algoritmo de controle adaptativo útil para efetuar a busca extrema na resolução de problemas de otimização de uma função objetivo para sistemas com dinâmica não linear e incerta, a citar por exemplo sistemas PV (ARIYUR; KRSTIC, 2003).

## 1.1 PROBLEMA PROPOSTO

A realização do rastreamento do ponto de máxima potência é considerada uma etapa essencial para a maximização da potência gerada, porém, como foi mencionado anteriormente, os algoritmos responsáveis pelo rastreamento nem sempre apresentam um ajuste adequado com o nível de potência do módulo fotovoltaico e/ou uma rapidez na localização do ponto de máxima potência. Assim, este trabalho se propõe a utilizar uma técnica de controle que atue

sobre o sistema realizando a maximização da função objetivo (MPP) pela busca extrema com perturbação, diante as incertezas e não linearidades do processo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Portanto, com o problema apresentado na seção anterior, esse trabalho traz uma comparação de técnicas para realização do MPPT, que são elas: os algoritmos IC, P&O e o ESC. Em razão das não linearidades inerentes do sistema, tanto da célula fotovoltaica quanto do conversor CC/CC perante às variações de irradiância solar e temperatura, sua modelagem se torna de alta complexidade e conseqüentemente um desafio para técnicas de controle dependentes de modelos dinâmicos. Devido a esse fato, a escolha do método ESC é interessante por não depender da modelagem matemática do sistema, sendo necessário a especificação de uma função objetivo, que no sistema fotovoltaico se trata do ponto de máximo potência MPP (do inglês, *Maximum Power Point*) da curva característica P-V do painel.

## 1.3 OBJETIVOS

Nessa seção são abordados e apresentados os objetivos gerais e específicos que esse trabalho pretende abranger.

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral desse trabalho é comparar técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência de um arranjo fotovoltaico utilizando as técnicas: IC, P&O e ESC.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Nessa subseção são listados os objetivos específicos desse trabalho, que são:

- Estudar sobre as topologias de um arranjo fotovoltaico;
- Estudar o conceito MPPT, o algoritmo IC, o algoritmo P&O e o método de controle ESC;
- Obter as equações dinâmicas da célula fotovoltaica e o projeto do conversor *boost*;
- Implementar a simulação no *software* MATLAB/Simulink;
- Validar e comparar as técnicas propostas de MPPT para variações de irradiância e temperatura.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho se encontra dividido em 5 capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução ao assunto abordado no corpo do trabalho, além de trazer o problema a ser resolvido, as justificativas e os objetivos a serem alcançados com a realização desse trabalho. O segundo capítulo traz uma breve revisão da literatura, destacando as principais técnicas de controle aplicadas ao MPPT de arranjos fotovoltaicos. O capítulo três expõe a fundamentação teórica de conceitos necessários para compreensão do trabalho, tais como: a estrutura de um arranjo fotovoltaico, o princípio de funcionamento dos algoritmos IC, P&O e da técnica de controle ESC. Já o capítulo quatro apresenta o sistema a ser simulado nesse trabalho e o *software* a ser utilizado. O capítulo cinco traz os resultados e discussões. Por fim, o capítulo seis traz considerações finais para o trabalho.

## 1.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Nesse capítulo foi apresentado o tema principal desse trabalho, que se trata da realização do rastreamento do ponto da máxima potência e a importância desse processo na geração de energia fotovoltaica, cuja participação na matriz energética apenas tem crescido em escala global. Assim, apontou o problema a ser resolvido, a justificativa da proposta desse trabalho e os objetivos que esse trabalho tem como intuito de realizar.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesse capítulo é apresentada uma revisão da literatura, trazendo referências de artigos e monografias com o intuito de embasar e fundamentar o objetivo de comparar técnicas de MPPT.

### 2.1 ESTADO DA ARTE

Comparações entre técnicas de MPPT na área de fotovoltaica são recorrentes na literatura (SARVI; AZADIAN, 2022; LI *et al.*, 2021; PATHY *et al.*, 2019; PODDER; ROY; POTA, 2019; DANDOUSSOU *et al.*, 2017; BRITO *et al.*, 2012).

Entre os trabalhos da literatura, destaca-se Chung *et al.* (2016), no qual as técnicas P&O e IC modificada são comparadas utilizando o MATLAB Simulink para um sistema contendo conversor CC/CC *boost*. O propósito dos autores foi verificar a eficácia e velocidade de rastreamento sob condições de teste padrão (STC, do inglês *Standard Test Condition*), lenta variação de irradiância e variação da irradiância do tipo degrau.

Já em Moreira (2019) o autor propõe o algoritmo P&O com passo adaptativo para gerar uma resposta mais rápida do método na presença de variações de irradiância. OLIVEIRA (2016) realiza um estudo de performance do conversor *boost* juntamente com algoritmo IC aplicado a um arranjo fotovoltaico. Enquanto que Grundemann (2017) avalia o método P&O. Na dissertação de SILVA (2018) são abordadas diversas técnicas para a realização do MPPT, como a técnica da tensão constante (CV, do inglês, *Constant Voltage*), a técnica P&O e IC, a fim de comparar seus desempenhos na realização do MPPT.

Também são recorrentes na literatura comparações entre técnica de controle baseada em lógica *fuzzy*. Em Djalab *et al.* (2018) é feita uma análise das técnicas P&O, IC e *fuzzy* (FLC, do inglês *fuzzy logic controller*) sob condições instáveis de estado, utilizando também o *software* MATLAB Simulink, com o intuito de evidenciar as vantagens de cada técnica. Já Prakash, Vejju e Reddy (2016) efetuaram uma análise das técnicas P&O, IC e FLC, porém no artigo é proposto um novo método de MPPT baseado no chaveamento de multiportas (*multiport switch*). Essa técnica proposta tem como objetivo rastrear o MPP mais rapidamente e com menos oscilações na potência e tensão do módulo fotovoltaico. Enquanto que CARVALHO NETO (2012) apresenta uma abordagem de controle robusto aplicado ao MPPT, por meio das técnicas  $H_2$  e  $H_\infty$  ao conversor CC/CC *buck-boost* de um arranjo fotovoltaico. A aplicação dessas técnicas tem como intuito minimizar as incertezas do efeito negativo que a resistência parasita do indutor traz para o ponto de operação desejado do sistema. Porém essas técnicas exigem uma maior complexidade de implementação e ainda no caso do controle robusto há a necessidade de definição da modelagem matemática do sistema, um ponto que nesse trabalho é contornado.

Vale destacar que em condições de sobreamento parcial o desempenho de sistemas fotovoltaicos são prejudicados, uma vez que, geralmente, os algoritmos tradicionais (P&O e IC)



operam no MPP local (LMPP) em vez do MPP global (GMPP). Portanto, para lidar com condições de sombreamento parcial em arranjos fotovoltaicos, a literatura aborda diferentes estratégias de MPPT, tais como: meta-heurística de otimização bioinspirado dos morcegos (ROCHA; SAMPAIO; SILVA, 2020), enxame de partícula (PSO) (GODINHO; SAMPAIO; SILVA, 2021), colônia de formigas (ACO) (CHAO; RIZAL, 2021; PATHY *et al.*, 2019), busca gravitacional (GSA) (GODINHO; SAMPAIO; SILVA, 2021), evolução diferencial (DE) (PATHY *et al.*, 2019), ESC adaptativo (SILVEIRA *et al.*, 2021), ESC global (BIZON, 2016).

Desse modo, o ESC foi escolhido como uma técnica interessante a ser estudada e avaliada nesse trabalho. No âmbito de rastreamento do ponto de máxima potência para um painel acoplado a um inversor conectado na rede elétrica, Brunton *et al.* (2010) propuseram um controlador ESC modificado baseado na ondulação natural do inversor e apresentou um desempenho ligeiramente superior ao P&O, nos quesitos de potência gerada, convergência e estabilidade do sistema considerando variações de clima. Em Yau e Wu (2011) alcançaram maior eficiência e robustez diante o contexto de rápidas variações atmosféricas utilizando um ESC combinado com controle de modos deslizantes. Leyva *et al.* (2011) traz uma abordagem mais teórica sobre ESC com perturbação senoidal aplicado ao MPPT em um arranjo fotovoltaico, realizando análise de estabilidade por Lyapunov. Por fim, Tomaggi (2018) traz uma análise comparativa entre o P&O, lógica *fuzzy* e ESC em ambiente de simulação Simulink e PSIM, além de realizar a implementação com *hardware* de baixo custo e instalação de módulos solares.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos a respeito da estrutura de um arranjo fotovoltaico, rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), o princípio de funcionamento das técnicas P&O, IC e ESC.

#### 3.1 ESTRUTURA DO ARRANJO FOTOVOLTAICO

Nessa seção é abordada os possíveis componentes e topologias que podem ser encontrados em um arranjo fotovoltaico.

##### 3.1.1 Componentes de um arranjo fotovoltaico

Assim, em primeiro plano é necessário ter uma maior compreensão da parte estrutural, ou seja, componentes presentes em um arranjo fotovoltaico. Segundo BALFOUR, SHAW e NASH (2016), os principais componentes são:

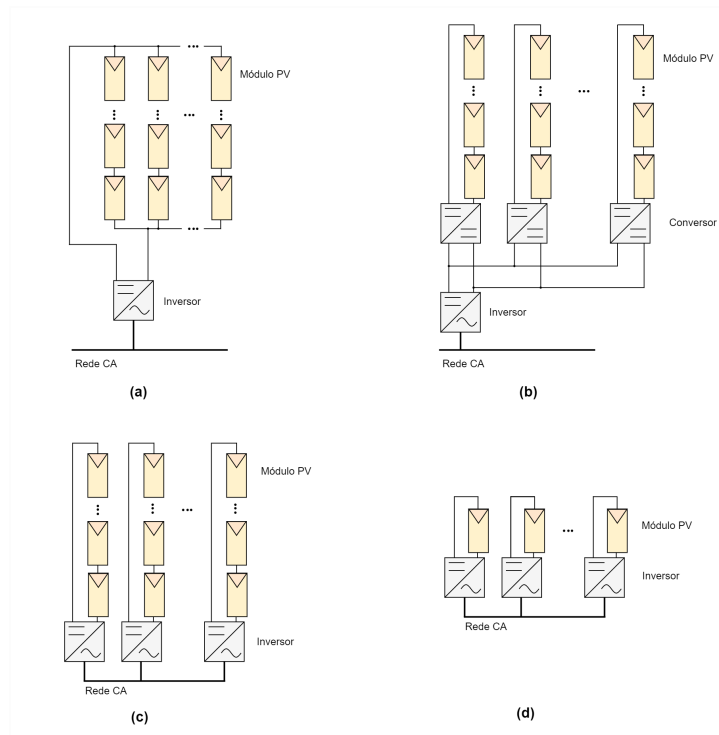
- Células: trata-se do componente responsável pela produção em si da tensão e corrente, pelo efeito fotovoltaico. São feitas de material semicondutor (geralmente silício) dopado;
- Módulo: é o conjunto de células dispostas em paralelo e em série;
- Matriz/arranjo: é o conjunto de módulos, também dispostos em paralelo e em série. Faz uso de uma estrutura de montagem para ser fixada no lugar desejado;
- Bateria: geralmente esse componente é utilizado em sistemas isolados da rede elétrica;
- Conversor CC/CC: responsável por fornecer um valor de tensão regulada para a carga CC, mas também são utilizados para realizar o MPPT do módulo;
- Inversor: componente responsável por fazer a transformação CC para CA. Utilizado quando o sistema está conectado à rede elétrica ou quando é necessário alimentar uma carga CA.
- Controlador de carga: é o sistema (conversor e controle) capaz de regular e manter (carregar ou descarregar) a tensão do banco de baterias.

Vale ressaltar que alguns arranjos fotovoltaicos não necessitam da presença de bateria ou conversor CC/CC, logo são opcionais. Além desses componentes principais é possível encontrar também algum tipo de proteção contra surtos provenientes das flutuações de energia; além do próprio cabeamento do sistema fotovoltaico.

### 3.1.2 Topologias de um arranjo fotovoltaico

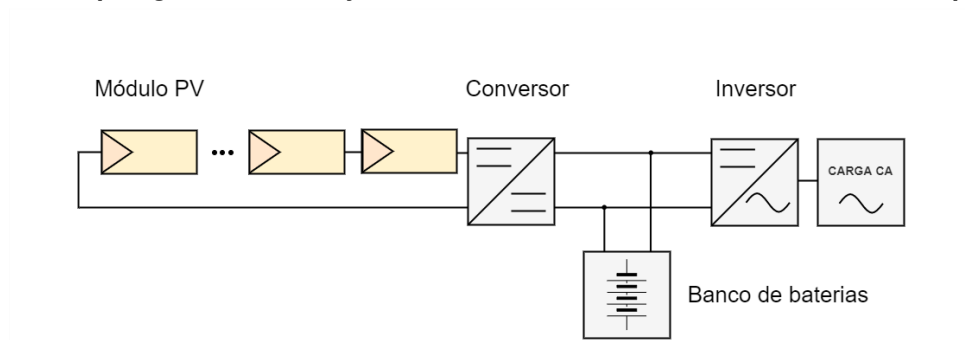
Como foi dito na subseção anterior, no arranjo fotovoltaico os módulos são dispostos em série e em paralelo; é possível, então, ter diversas posições dos módulos formando diferentes topologias. Por mais que a topologia mais usual para o sistema PV fosse uma configuração com os módulos dispostos e conectados a um único conversor DC/AC, vide Figura 3(a), essa topologia acaba apresentando uma baixa eficiência já que apresenta diodos em cada um de seus ramos para evitar o fluxos de outros ramos, o que acaba se tornando um empecilho para que o ramo opere no MPP (BRITO *et al.*, 2011).

**Figura 3 – Topologias de arranjos fotovoltaicos conectados à rede elétrica; (a) centralizado, (b) *multistring*, (c) *string*, (d) módulo CA.**



Fonte: Adaptado de Rosot (2017).

**Figura 4 – Topologia de um arranjo fotovoltaico isolado com banco de bateria em paralelo.**

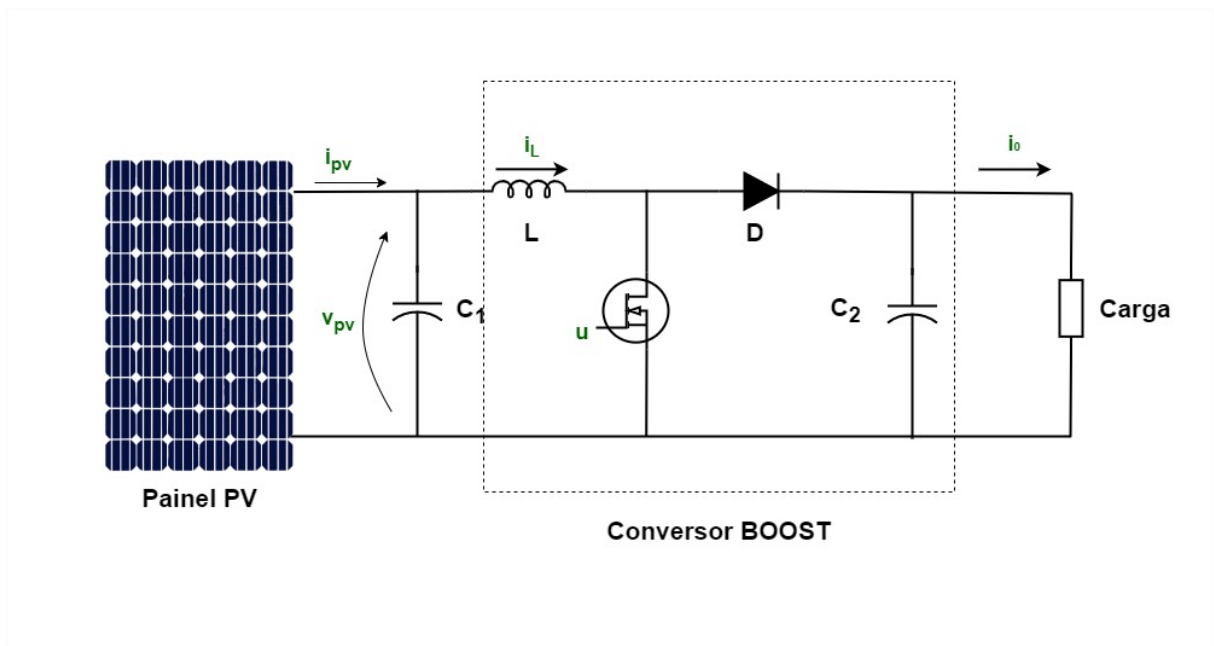


Fonte: Autoria própria (2022).

Assim, Brito traz topologias com conexão em série, Figuras 3(b) (*multistring*) e 3(c) (*string*), para o arranjo fotovoltaicos, que não apresentam os diodos, conseqüentemente não há perda neles. Assim, essas topologias trazem uma maior eficiência quanto a potência fornecida pelo ramo, permitindo operar no MPP. Já na Figura 3(d) (módulo CA), traz um arranjo onde cada painel apresenta um inversor conectado, para melhorar o MPPT do painel, mesmo sofrendo o efeito de sombreamento. Contudo, caso estejam em conexão série e sofrendo com o sombreamento esse arranjo se torna ineficiente no rastreamento do MPP, além de apresentarem um alto custo de implementação.

Apesar de as topologias apresentadas serem empregadas para sistemas *on-grid* (conectado à rede elétrica) sua adaptação para sistemas *off-grid* (isolado da rede elétrica) é possível. Geralmente, nesses sistemas há a presença de um banco de baterias para fazer o armazenamento da energia produzida pelo arranjo; esse banco de baterias é conectado em paralelo com o arranjo. A Figura 4 apresenta a esquemática de uma topologia com um banco de baterias em paralelo. Esse tipo de sistema de geração *off-grid* é amplamente usada para localidades isoladas de grandes centros urbanos onde a concessionária de distribuição de energia não consegue chegar.

**Figura 5 – Circuito proposto para a realização do MPPT.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Assim, devido a uma maior simplicidade, o sistema que é abordado nesse trabalho é um sistema *off-grid*, que tem o circuito apresentado na Figura 5. É utilizado um conversor CC/CC *boost* para realizar o rastreamento do ponto de máxima potência, já que é um tipo amplamente utilizado por diversos estudos similares. Apesar de esse conversor apresentar uma corrente de

entrada pulsada, o que afeta a vida útil do painel solar, sua arquitetura é simples o que facilita a modelagem do sistema.

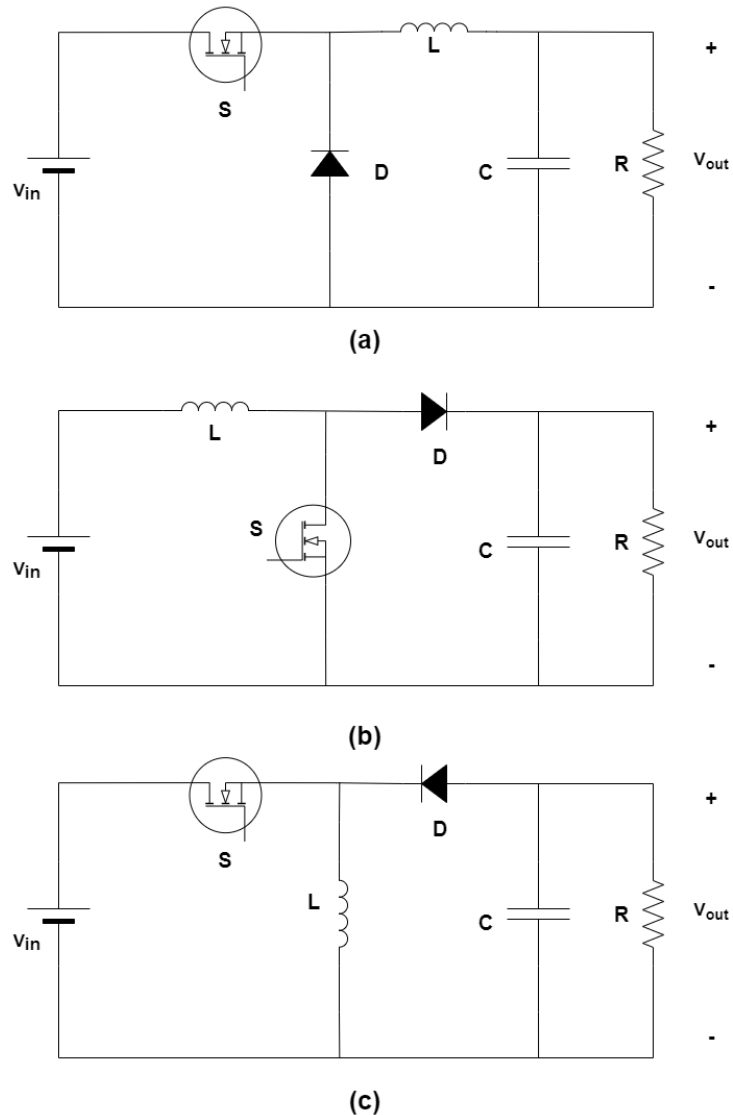
### 3.2 CONVERSOR CC/CC

Um conversor CC/CC é um circuito responsável por receber um determinado valor de tensão CC que se deseja regular e devolve esse valor regulado em seus terminais de saída. Esses conversores podem se apresentar em três tipos de topologias clássicas, sendo que a primeira é a topologia abaixadora de tensão, conhecida como topologia *Buck*, mostrada na Figura 6(a), e tem como objetivo devolver um valor de tensão menor quando comparado com o valor de entrada; a segunda topologia possível é a elevadora de tensão, conhecida como topologia *Boost*, mostrada na Figura 6(b), e tem o objetivo de devolver um valor acima do valor de entrada; e a terceira topologia possível, mostrada na Figura 6(c), é a abaixadora-elevadora (*Buck-Boost*), que se trata de uma combinação entre as topologias anteriores, e devolve um valor de tensão mediano quando comparado com os valores devolvidos pelo *Buck* e pelo *Boost*.

Para esses conversores existem dois tipos de funcionamento de acordo com a corrente que transita pelo indutor do circuito. O primeiro tipo é o funcionamento em modo contínuo que apresenta uma corrente no indutor sempre diferente de zero para um período de chaveamento; o segundo tipo é o funcionamento em modo descontínuo que apresenta uma corrente no indutor de valor nulo por um breve período durante o chaveamento.

Para sistemas fotovoltaicos esses conversores atuam como os agentes responsáveis por realizar o rastreamento do ponto de máxima potência. Neste trabalho, será adotado a topologia de conversor CC/CC do tipo *Boost*.

Figura 6 – Topologias de conversores CC/CC; (a) Conversor *Buck*, (b) Conversor *Boost*, (c) Conversor *Buck-Boost*



Fonte: Autoria própria (2022).

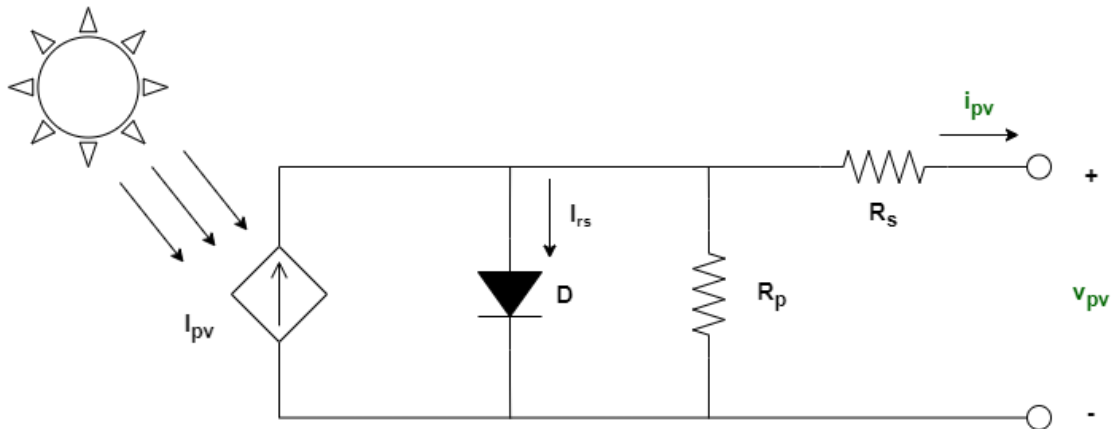
### 3.3 MODELAGEM DO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Esta seção apresenta as equações dinâmicas da célula fotovoltaica, a fim, de elucidar a complexidade da modelagem do arranjo fotovoltaico e seus termos não lineares. Considere  $x(t) = x$ , de tal forma que as variáveis ao estarem explícitas será para enfatizar a dependência no domínio do tempo.

#### 3.3.1 MODELAGEM CÉLULA FOTOVOLTAICA

O circuito equivalente de uma célula fotovoltaica é apresentado na Figura 7 e é utilizado nessa seção para equacionar a corrente fornecida pelo arranjo fotovoltaico.

Figura 7 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.



Fonte: Autoria própria (2022).

Em relação a Figura 7 considere que  $R_p$  é a resistência em paralelo e  $R_s$  é a resistência em série, representando o efeito da resistividade e massa da célula fotovoltaica (DJALAB *et al.*, 2018), respectivamente;  $I_{pv}$  é a corrente fotoelétrica da célula e  $I_{rs}$  é a corrente de saturação reversa do diodo. Como uma única célula fornece cerca de 1W a 2W, é necessário conectar  $n_s$  células em série para se conseguir o valor suficiente para a tensão de saída e é necessário conectar  $n_p$  células em paralelo para se conseguir ao valor suficiente para a corrente de saída do painel (HARRABI *et al.*, 2017). Com isso, é possível encontrar a equação de relação entre a corrente  $i_{pv}$  e a tensão  $v_{pv}$ , tal que

$$i_{pv} = n_p I_{pv} - n_p I_{rs} \left( e^{\frac{k_{pv}(v_{pv} + R_s i_{pv})}{n_s}} - 1 \right) - \frac{v_{pv} + R_s i_{pv}}{R_p}, \quad (1)$$

sendo que  $I_{rs}$ ,  $I_{pv}$  e  $k_{pv}$  são definidos por:

$$I_{rs} = I_{rr} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 e^{qE_{gp} \frac{(1/T_r - 1/T)}{pK}}, \quad (2)$$

$$I_{pv} = (I_{cc} + K_l(T - T_r)) \frac{G}{G_r},$$

$$k_{pv} = \frac{q}{pKT},$$

onde  $q$  é a carga elétrica fundamental,  $K$  é a constante de Boltzmann,  $T$  é a temperatura da célula,  $p$  é o fator característico de junção  $p - n$  ideal,  $I_{rr}$  é a corrente de saturação reversa do diodo para a temperatura de referência  $T_r$ ,  $I_{cc}$  é a corrente de curto-circuito para a temperatura

de referência  $T_r$ , e para a irradiância de referência  $G_r$ ,  $E_{gp}$  é a energia de banda do semicondutor da célula,  $K_l$  é o coeficiente de temperatura da corrente de curto-circuito e  $G$  é a irradiância incidente na célula.

Analisando as equações (1) e (2) é fácil notar que  $e^{\frac{k_{pv}(v_{pv}+R_s i_{pv})}{n_s}}$  e  $e^{qE_{gp} \frac{(1/T_r - 1/T)}{pK}}$  da equação se tratam termos não lineares, o que dificulta o projeto de controladores baseado em modelagem matemática, embora seja possível por meio de ferramentas como *fuzzy* Takagi-Sugeno. Além disto, constata-se que o parâmetro  $I_{rr}$  é de difícil especificação numérica para fins de simulação.

A Figura 12 indicou que o ponto de máxima potência da curva característica de um módulo fotovoltaico é alcançado quando a derivada  $\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}}$  atinge o valor nulo. Assim, desconsiderando as resistências paralela e série presentes em (1) e sabendo que  $P_{pv} = i_{pv}v_{pv}$  é possível concluir que

$$\begin{aligned} \frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} &= i_{pv} + v_{pv} \frac{di_{pv}}{dv_{pv}}, \\ &= i_{pv} - v_{pv} I_{rs} \frac{n_p k_{pv}}{n_s} e^{\frac{k_{pv} v_{pv}}{n_s}}, \end{aligned} \quad (3)$$

Assim, para se atingir o ponto de máxima potência do módulo fotovoltaico é necessário que

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = i_{pv} - v_{pv} I_{rs} \frac{n_p k_{pv}}{n_s} e^{\frac{k_{pv} v_{pv}}{n_s}} = 0.$$

Ora, considerando a modelagem da célula PV apresentada fica evidente a dificuldade e complexidade da utilização do modelo matemático não-linear para a síntese de controladores. Embora seja possível realizar uma descrição por meio de combinação convexa de modelos lineares locais, como o *fuzzy* Takagi-Sugeno, é fundamental que a modelagem corresponda ao comportamento dinâmico do sistema físico. Por exemplo, Chiu e Ouyang (2011) apresentaram uma modelagem dinâmica em espaço de estado de um arranjo fotovoltaico com conversor *buck*. Entretanto, o modelo não aproxima de forma adequada o comportamento em malha aberta do sistema não linear. Isso tende a resultar em controladores com desempenho pouco otimizado ou até mesmo tornar ineficaz o atendimento de requisitos de desempenho transitório ou de regime permanente Piazzetta (2022). Por tal razão, neste trabalho o projeto de controle não será baseado na modelagem matemática do sistema fotovoltaico.

A Tabela 1 apresenta os valores das constantes apresentadas na demonstração da modelagem da célula fotovoltaica.



**Tabela 1 – Valores e unidades das constantes apresentadas.**

| Símbolo  | Valor                   | Unidade             |
|----------|-------------------------|---------------------|
| $q$      | $1,6 \cdot 10^{-19}$    | [C]                 |
| $K$      | $1,3805 \cdot 10^{-23}$ | [J/K]               |
| $p$      | [1, 5]                  | -                   |
| $E_{gp}$ | 1,1                     | [eV]                |
| $T_r$    | 298,15                  | [K]                 |
| $G_r$    | 1000                    | [W/m <sup>2</sup> ] |

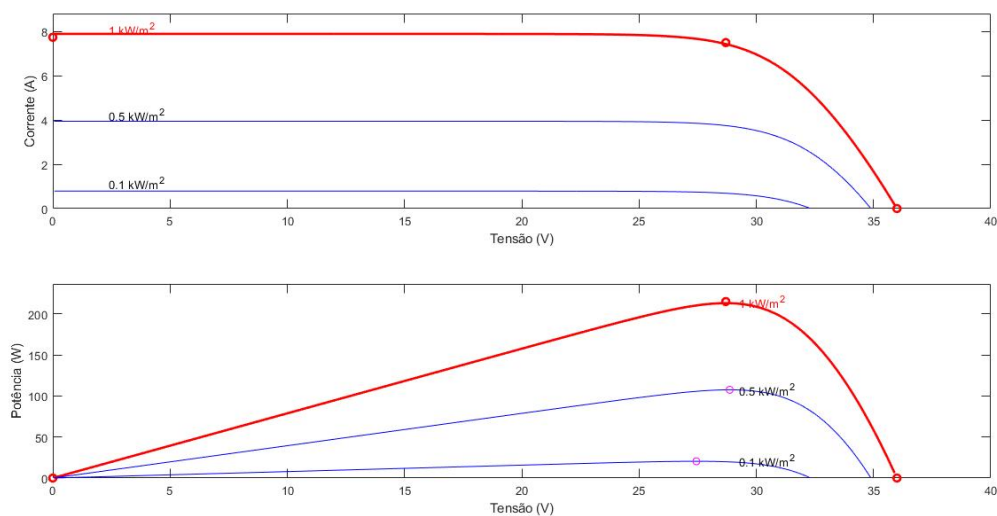
Fonte: Chiu (2010).

### 3.4 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

A irradiação solar e temperatura que incidem sobre o arranjo fotovoltaico, acabam por influenciar a potência máxima que a célula pode gerar. Essa influência é perceptível nas curvas características  $P - V$  e  $I - V$  do painel solar, Figuras 8 e 9. As Figuras em questão trazem as curvas características de um módulo PV de 215W. É possível verificar a alteração do ponto de operação da curva quando, por exemplo, se mantém uma temperatura fixa e a irradiância incidente varia; o mesmo ocorre para uma irradiância fixa e temperatura variando.

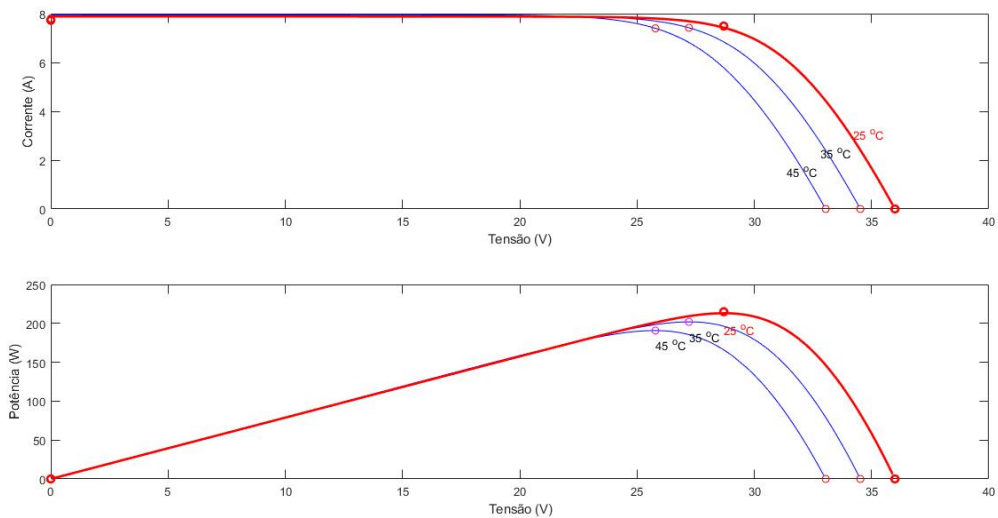
Assim, observando os gráficos, apresentados na Figura 8, é possível notar que com um aumento da irradiância do dispositivo a tensão gerada na célula aumenta, ou seja, aumenta a energia elétrica gerada. Porém com o aumento da temperatura incidente na célula, a tensão gerada tende a diminuir, como na Figura 9 (OLIVEIRA; MARCATO; AGUIAR, 2019).

**Figura 8 – Curvas características I-V e P-V de um módulo PV para temperatura fixa e irradiância variando.**



Fonte: Autoria própria (2022).

**Figura 9 – Curvas características I-V e P-V de um módulo PV para irradiância fixa e temperatura variando.**

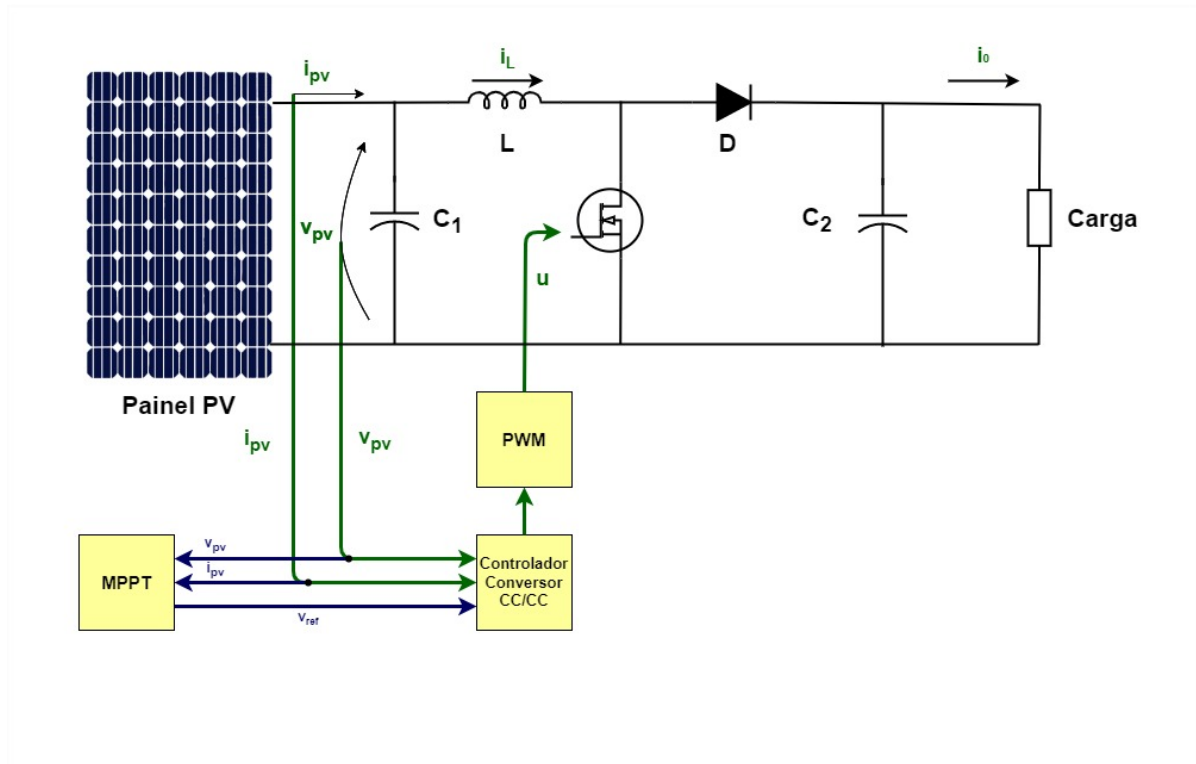


**Fonte: Autoria própria (2022).**

Portanto, os algoritmos de MPPT são importantes para se alcançar a máxima potência da curva para as variações do sistema PV, levando em consideração os fatores de temperatura e irradiância sobre a placa. Esse algoritmos são separados em três topologias: *online*, *offline* e híbrido. A topologia *online* se caracteriza por necessitar de medidas instantâneas da corrente e da tensão do sistema fotovoltaico; um exemplo dessa topologia é a técnica de condutância incremental (IC). Métodos *offline* fazem necessário informações da curva característica, temperatura e irradiância sobre o módulo fotovoltaico. Por fim os híbridos são uma mistura do *online* e do *offline* (FARAYOLA; HASAN; ALI, 2017).

Além disto, um conversor CC/CC é acoplado junto ao módulo fotovoltaico. Um sinal PWM (do inglês, *pulse width modulated*) é aplicado no conversor CC/CC, proveniente de um controlador, que gera um *duty ratio* variável com base na corrente e tensão do módulo e com isto pode-se assegurar o ponto de máxima potência (RAJ; JOSHUA, 2017). Observe a Figura 10 para melhor compreensão.

Figura 10 – Circuito e blocos de controle do arranjo fotovoltaico.



Fonte: Autoria própria (2022).

### 3.5 MÉTODO PERTURBA E OBSERVA

O algoritmo perturba e observa (P&O) é um dos métodos mais utilizados para MPPT (PODDER; ROY; POTA, 2019; BRITO *et al.*, 2012). Como o próprio nome do algoritmo sugere, o princípio básico de atuação se trata de aplicar perturbações na tensão de saída do arranjo fotovoltaico, para então observar a alteração gerada no comportamento da potência de saída. Essas perturbações na tensão são dadas por acréscimos ou decréscimos em seu valor. A partir dessa observação, duas reações na potência podem ser notadas: caso a variação na potência de saída  $\Delta P$  for positiva, a variação de tensão continua na mesma direção, ou seja, se a perturbação primária tenha sido  $+\Delta V$ , então a próxima perturbação deve ser de  $+\Delta V$ ; o mesmo vale para uma perturbação primária de  $-\Delta V$ . Já se a variação na potência de saída for negativa, isso significa que a próxima variação de tensão deve ser na direção oposta da anterior, ou seja, se a perturbação primária tenha sido  $-\Delta V$ , então a próxima perturbação deve ser de  $+\Delta V$  (GOMES *et al.*, 2016).

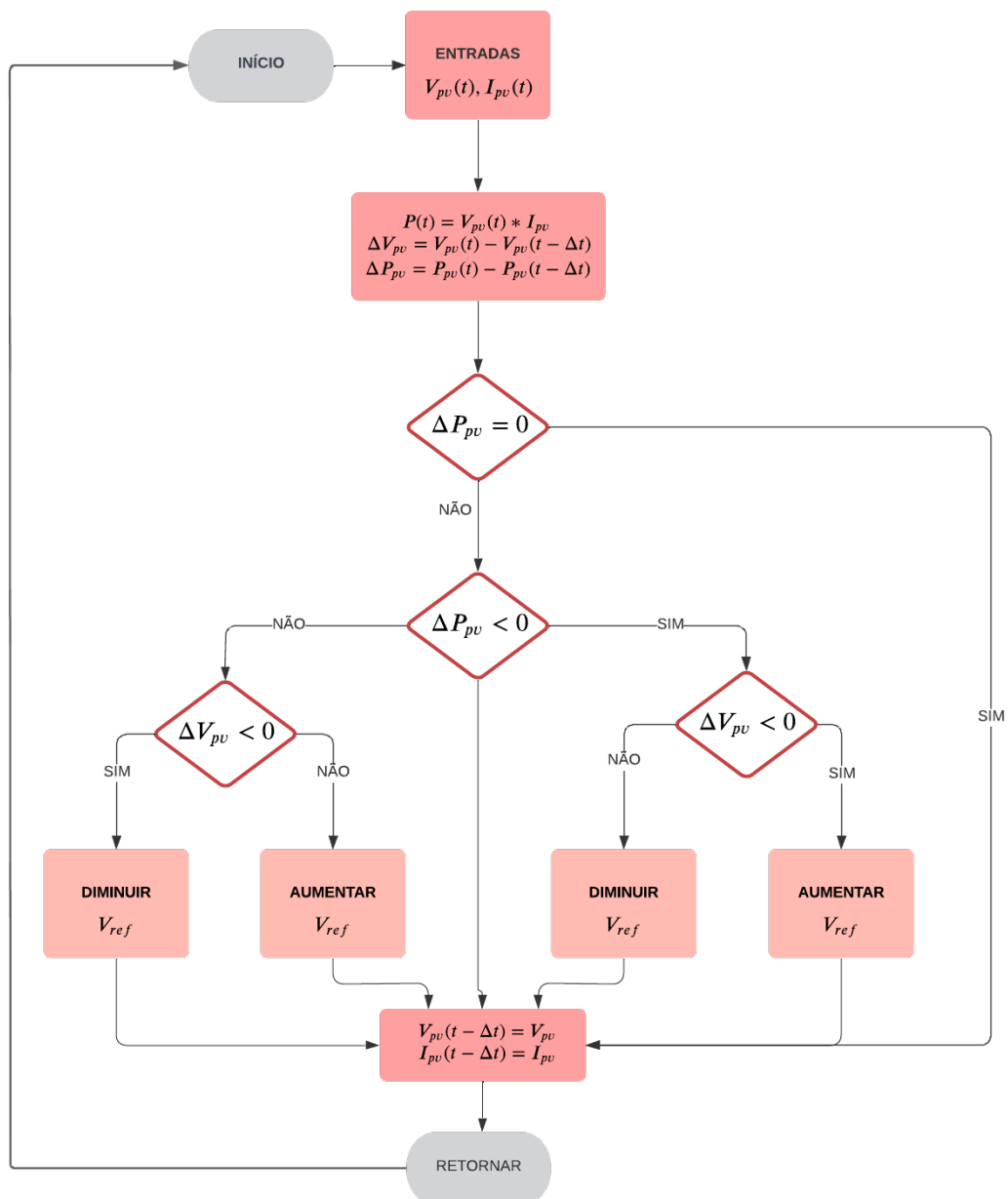
As limitações desse método são:

- primeiro, o tamanho do passo que é aplicado na variação da tensão, o que acaba influenciando na velocidade de convergência do sistema. Caso o passo de variação seja muito grande, o sistema atinge o MPP em menor tempo, porém apresenta maior

erro em regime (MOREIRA, 2019). Já para um passo de variação muito pequeno, o erro em regime é menor, porém o tempo de estabilização é maior.

- segundo, é a dificuldade do método de encontrar o MPP em baixos valores de irradiações e baixa performance quando acontecem mudanças rápidas nas condições meteorológicas.

**Figura 11 – Fluxograma do algoritmo P&O.**



Fonte: Adaptada de Moreira (2019).

### 3.6 MÉTODO DA CONDUTÂNCIA INCREMENTAL

Este algoritmo também é um clássico na área de MPPT, devido ao fato de possuir uma dificuldade média em sua implementação (ALVES *et al.*, 2015). O princípio desse método é tentar alcançar o ponto de máxima potência comparando as condutâncias instantânea e incremental do arranjo fotovoltaico, utilizando as medidas de corrente e tensão para obter a derivada da potência em relação a tensão (PEREIRA; SOUZA; SANTOS, 2016). Assim,

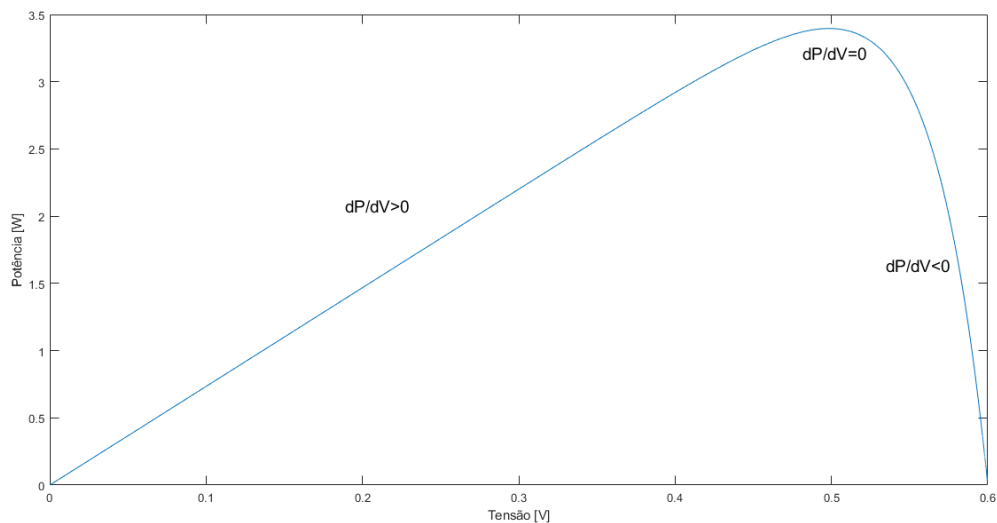
$$\begin{aligned}\frac{\delta P}{\delta V} &= \frac{\delta(V \cdot I)}{\delta V} \\ &= I + V \frac{\delta I}{\delta V}\end{aligned}\quad (4)$$

onde,  $P$  é a potência medida em Watts,  $V$  é a tensão medida em Volts,  $I$  é a corrente medida em Ampères.

Como se trata do cálculo da derivada da curva  $P - V$  do arranjo fotovoltaico, observe a Figura 12 onde é possível evidenciar que:

- se  $\frac{\delta P}{\delta V} = 0$ , o ponto de operação se encontra no MPP;
- se  $\frac{\delta P}{\delta V} > 0$ , o ponto de operação se encontra à esquerda do MPP;
- se  $\frac{\delta P}{\delta V} < 0$ , o ponto de operação se encontra à direita do MPP.

**Figura 12 – Gráfico característico P-V de um painel fotovoltaico.**

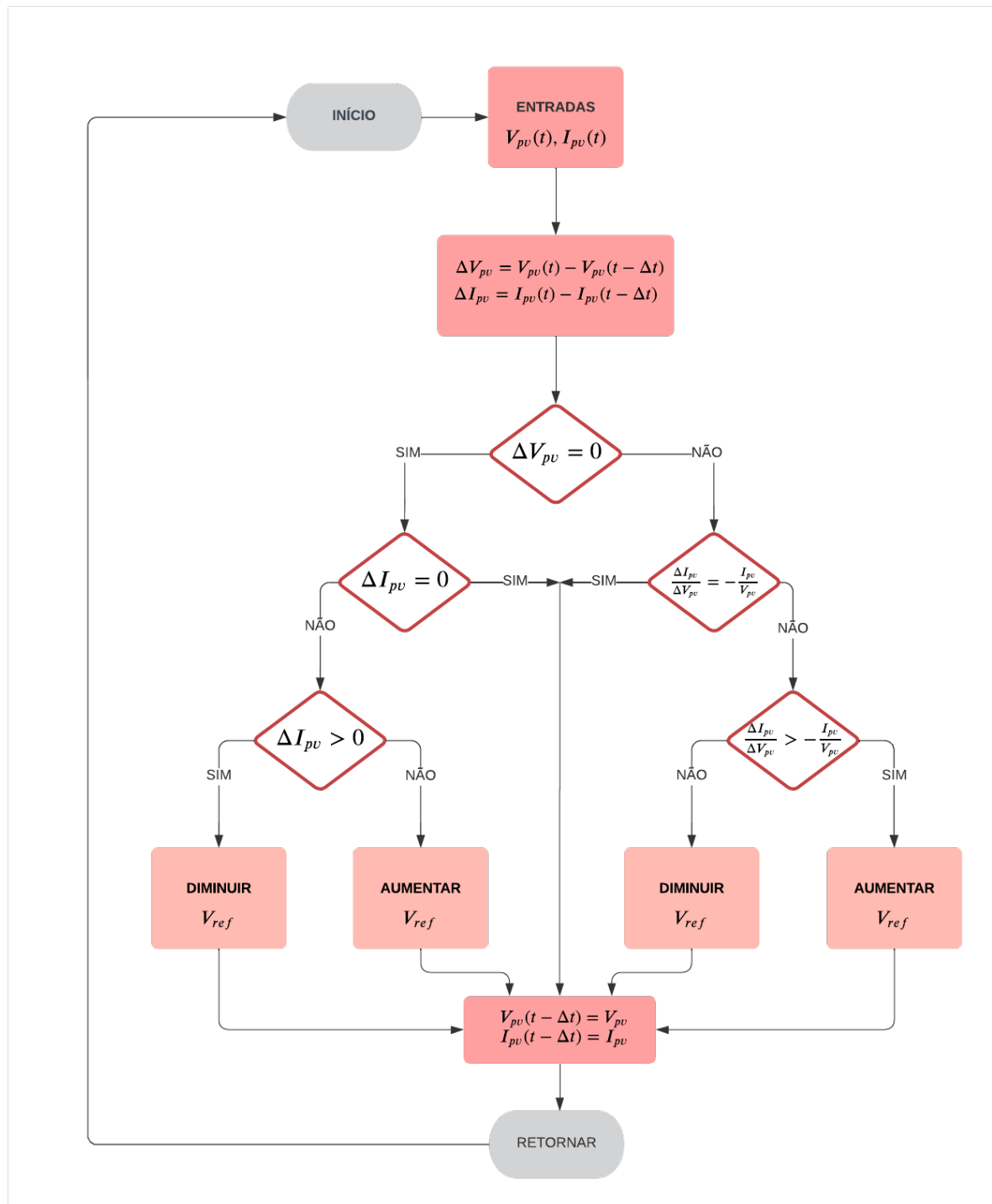


**Fonte: Autoria própria (2022).**

Assim, de acordo com essa análise é feito o incremento ou decremento do valor da tensão da célula fotovoltaica. O passo desse incremento ou decremento pode ser fixo e pré-

determinado, ou pode ser variável (adaptativo) o que pode resultar em uma melhora do desempenho do método (LOPES FILHO; FRANCO; VIEIRA, 2019). Observe o fluxograma do algoritmo apresentado na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma do algoritmo IC.



Fonte: Adaptada de Ricci *et al.* (2015).

### 3.7 EXTREMUM SEEKING CONTROL (ESC)

No mundo real sabe-se que os sistemas lidam com ambiente dotado de incertezas, com isto surge a necessidade de projetar controladores com realimentação que possam se adaptar a tais incertezas.

Uma classe de controladores para esta finalidade são os adaptativos. Basicamente, há três subclasses principais:

1. controle adaptativo baseado em modelos clássicos, que utiliza principalmente modelos do sistema controlado;
2. controle adaptativo baseado em aprendizado, que usa técnicas baseadas em modelo e baseadas em dados para projetar controladores adaptativos modulares; e
3. controle adaptativo orientado por dados, que é baseado na interação do controlador com o sistema (BENOSMAN *et al.*, 2021).

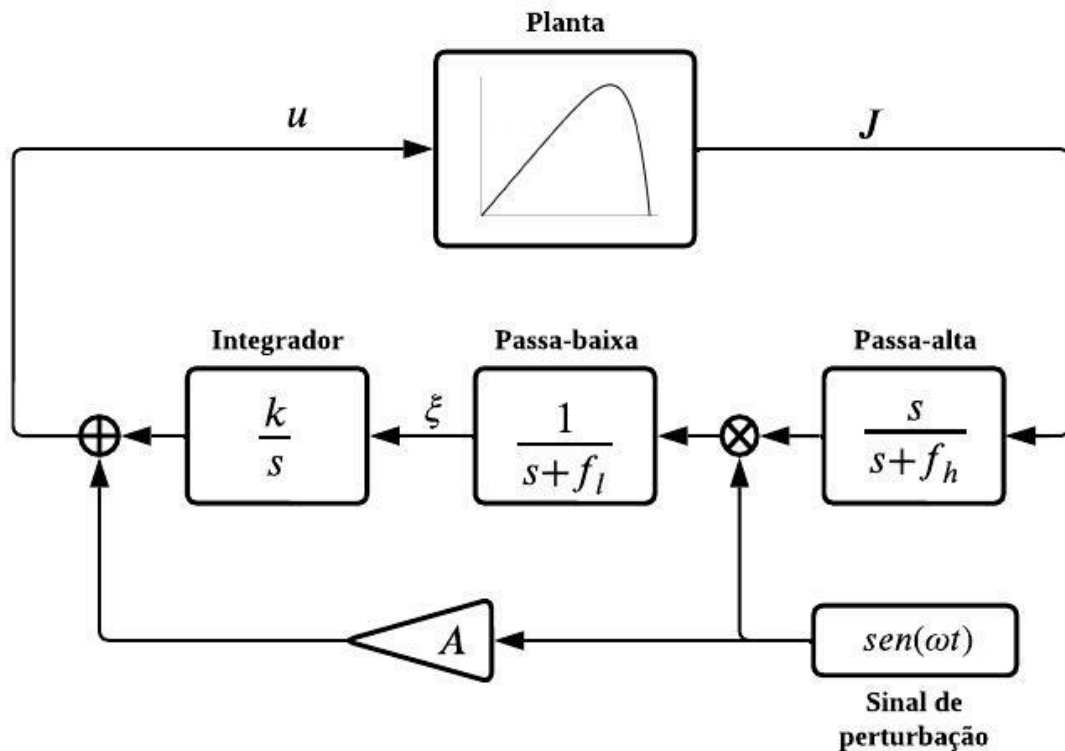
Neste trabalho é utilizado o controlador adaptativo orientado por dados, ou seja, de busca extremal, aqui denominado como ESC. Os primeiros trabalhos de pesquisa sobre ESC reportam-se na década de 1920 por meio de Leblanc (1922) e de outras aplicações bem-sucedidas, como por exemplo, controle de fluxo de combustível para atingir pressão máxima, controle de processo de combustão para motores e fornos a gás, entre outros (DOCHAIN; PERRIER; GUAY, 2011).

Embora tenha sido uma técnica conhecida há muitos anos, a comunidade científica enxergava com muita desconfiança o ESC por não haver comprovações matemáticas sólidas que assegurassem a estabilidade dos sistemas. Após os trabalhos de Krstić (KRSTIĆ; WANG, 2000; KRSTIĆ, 2000), que fundamentaram a análise de estabilidade do ESC, o interesse dos pesquisadores aumentou e conseqüentemente diversas aplicações passaram a adotar esta técnica, tais como: estimação de atitude em satélites (QUEIROZ *et al.*, ), estimulação neuromuscular (PAZ *et al.*, 2019), cultivo de microalgas em fotobiorreatores (LETCHINDJIO; DEWASME; WOUWER, 2021), controle de congestionamento de tráfego (YU *et al.*, 2021), entre outros.

O *Extremum Seeking Control* (ESC) é um método de controle da classe adaptativa, e atua sobre sistemas que possuam necessariamente algum extremo - seja esse extremo positivo ou negativo. A grande vantagem desse método é a não necessidade de conhecimento explícito da planta, logo, a modelagem matemática do sistema não é necessária para o controlador atuar. Quando aplicado a um sistema PV, o método tem como entrada a potência de saída do arranjo, e como saída retorna uma tensão de referência que é aplicado ao conversor. A dinâmica do controlador é apresentada pelo diagrama de blocos da Figura 14.

Analisando o diagrama apresentado, nota-se que o controlador faz uso de um sinal de perturbação senoidal  $p$  externo à planta, a qual deve ser muito menor que a frequência do sistema para que a convergência do algoritmo seja alcançada (ARIYUR; KRSTIC, 2002).

Figura 14 – Diagrama de blocos do método ESC.



Fonte: Autoria própria (2022).

Essa perturbação aplicada à planta gera na potência do arranjo componentes CC e CA, porém apenas a segunda componente é de interesse, desse modo é necessário o uso de um filtro passa-alta que retorna apenas a componente CA da potência, que pode estar em fase ou não quando comparado ao sinal de perturbação. O sinal filtrado, então é demodulado após a multiplicação com o sinal  $p$ , resultando em também uma senoide que passa por um filtro passa-baixa para ser extraída a componente CC do sinal, chamado de  $\xi$  para então passar por pelo integrador com ganho (MOURA JUNIOR, 2015).

Portanto, a tensão de referência que o método retorna pode estar abaixo ou acima do valor ótimo; caso a entrada da planta esteja em fase com a saída, a tensão de referência se encontra abaixo do valor desejado, obrigando com que o integrador aumente seu valor; já se a entrada esteja em contra fase com a saída, a tensão de referência se encontra acima do valor ótimo, sendo necessário que o integrador diminua seu valor.

Por fim, o ganho  $k$  e a amplitude  $A$  garantem a convergência do controlador, sendo responsáveis diretos pelo tempo de estabelecimento do sistema. Vale ressaltar que quanto menor for o valor de  $A$ , menor também é a oscilação do sinal no MPP.



### **3.8 CONCLUSÕES PARCIAIS**

Nesse capítulo foram abordados os principais tópicos para a compreensão da realização desse trabalho, tais como: as topologias de arranjos fotovoltaicos e como podem influenciar na geração da energia; os tipos de conversores CC/CC e qual é a função exercida sobre o arranjo fotovoltaico. Em seguida foram apresentadas as equações dinâmicas de uma célula fotovoltaica, pontuando a complexidade devido suas não linearidades. Por fim, foram apresentados o conceito do processo de rastreamento de ponto de máxima potência, a partir dos algoritmos P&O, IC e ESC. No próximo capítulo será apresentado projeto do arranjo fotovoltaico, do conversor e o desenvolvimento no ambiente de simulação.

## 4 SISTEMA PROPOSTO E AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

### 4.1 PROJETO DO ARRANJO E DO CONVERSOR

Após a apresentação dos conceitos fundamentais para melhor compreensão do trabalho, é possível projetar o arranjo fotovoltaico a ser simulado. Para isso considere as especificações do arranjo PV, cujos valores constam na Tabela 2.

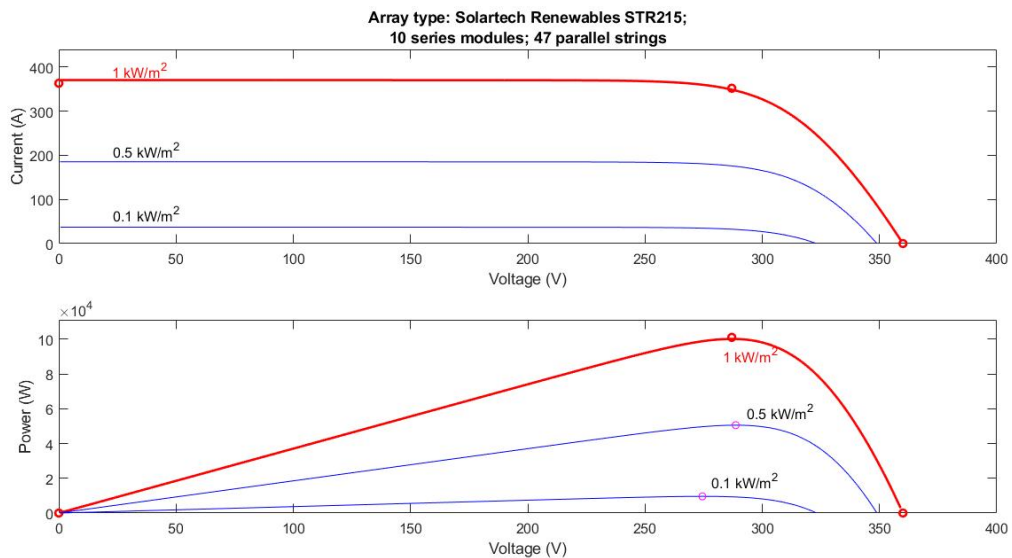
**Tabela 2 – Valores dos parâmetros requeridos.**

| Parâmetro           | Simbologia | Valor     | Unidade |
|---------------------|------------|-----------|---------|
| Tensão de entrada   | $V_{in}$   | 250 - 350 | [V]     |
| Tensão de saída     | $V_{out}$  | 500       | [V]     |
| Potência de saída   | $P_{out}$  | 100       | [kW]    |
| Varição de tensão   | $\Delta V$ | 1         | [%]     |
| Varição de corrente | $\Delta I$ | 5         | [%]     |
| Frequência          | $f$        | 5         | [kHz]   |

Fonte: Autoria própria (2022).

O painel escolhido pertence à base de dados do Simulink, cuja potência é de 215W. Sua curva característica P-V e I-V para uma temperatura fixa em  $25^{\circ}C$  são mostradas na Figura 15 e a Tabela 3 apresenta as especificações técnicas do painel.

**Figura 15 – Curvas características do módulo escolhido.**



Fonte: Autoria própria (2022).

Com os parâmetros necessários definidos é possível iniciar os cálculos para o projeto do capacitor e indutor que são utilizados no conversor *Boost*. Assim, o primeiro passo é definir a quantidade de módulos, tanto em série quanto em paralelo, que são necessários para satisfazer a potência de saída de  $100kW$ . Logo, para um número de módulos em série ( $n_s$ ) de 10, o

**Tabela 3 – Especificações técnicas do painel escolhido.**

| Parâmetro                  | Simbologia | Valor | Unidade |
|----------------------------|------------|-------|---------|
| Potência nominal           | $P_{nom}$  | 215   | [W]     |
| Tensão de circuito aberto  | $V_{oc}$   | 36    | [V]     |
| Corrente de curto-circuito | $I_{cc}$   | 7.73  | [A]     |
| Tensão no MPP              | $V_{mpp}$  | 28.7  | [V]     |
| Corrente no MPP            | $I_{mpp}$  | 7.49  | [A]     |
| Num. de células            | Ncel       | 60    | [un.]   |

**Fonte: Autoria própria (2022).**

número de módulos em paralelo ( $n_p$ ) que mais se aproxima de satisfazer o valor de potência de saída do arranjo é de 47. Desse modo,

$$\begin{aligned} P_{out} &= n_s \cdot n_p \cdot P_{nom} \\ &= 47 \cdot 10 \cdot 215 = 101.05kW \end{aligned}$$

e a tensão de entrada do conversor é dada por

$$\begin{aligned} V_{in} &= V_{mpp} \cdot n_s \\ &= 28.7 \cdot 10 = 287V. \end{aligned}$$

Em seguida, é possível encontrar os valores do capacitor e indutor do conversor utilizando as equações (5) e (6) de Rashid (2009).

$$L = \frac{V_{in} \cdot (V_{out} - V_{in})}{\Delta I \cdot f_c \cdot V_{out}} \quad (5)$$

$$C = \frac{I_{out} \cdot (V_{out} - V_{in})}{\Delta V \cdot f_c \cdot V_{out}} \quad (6)$$

Porém primeiro é necessário calcular os parâmetros faltantes  $\Delta V$  e  $\Delta I$  em seus valores em Volts e Ampère, e  $I_{out}$ . Assim,

$$\begin{aligned} I_{out} &= \frac{P_{out}}{V_{out}} \\ &= \frac{101050}{500} = 202.1A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta I &= 5\% \cdot I_{out} \cdot \frac{V_{out}}{V_{in}} \\ &= 5\% \cdot 202.1 \cdot \frac{500}{287} = 17.60A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta V &= 1\% \cdot V_{out} \\ &= 1\% \cdot 500 = 5V\end{aligned}$$

Por fim, os valores de L e C necessários para o arranjo projetado são

$$L = \frac{287 \cdot (500 - 287)}{17.60 \cdot 5000 \cdot 500} = 1.3890mH$$

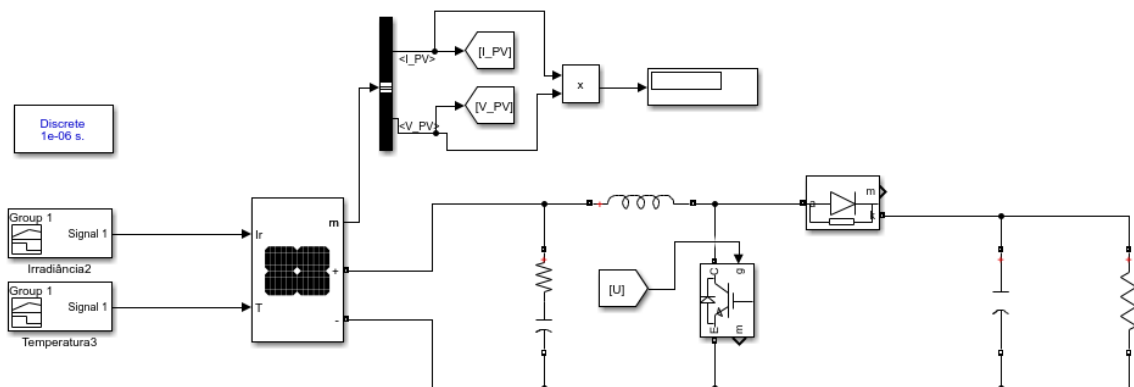
$$C = \frac{202.1 \cdot (500 - 287)}{5 \cdot 5000 \cdot 500} = 3443.8\mu F.$$

Com o arranjo e o conversor devidamente projetados, a próxima etapa a se executada é a montagem do sistema no ambiente de simulação; o *software* escolhido para realizar as simulações necessárias é descrito na seção 4.2.

## 4.2 AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

Para se realizar as comparações entre os métodos propostos, o ambiente de simulação escolhido foi o Simulink da *Mathworks*, que se trata de um *software* bem estruturado e completo para realizações de simulações de diversas áreas da engenharia. Desse modo o sistema projetado na seção 4.1 é montado no Simulink, conforme apresentado na Figura 16.

**Figura 16 – Sistema montado no *software* Simulink.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

Considerando a Figura 5, os valores dos componentes do sistema estão expressos na Tabela 4.

Em seguida é montado os sistemas que geram o sinal chaveado de entrada no *switch*, ou seja, os algoritmos IC e P&O, e a técnica de controle ESC. A Figura 17 representa ambos os algoritmos IC e P&O, sendo que a diferença entre cada método refere-se ao código dentro do

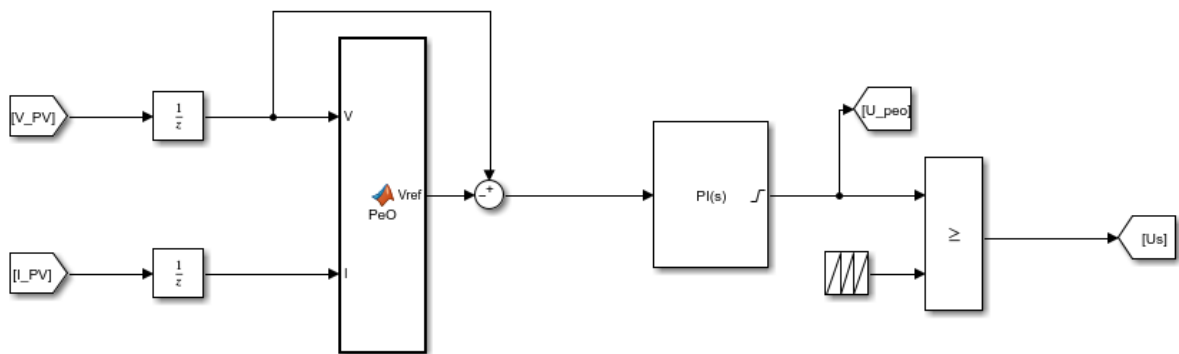
**Tabela 4 – Valores dos componentes inseridos no Simulink.**

| Simbologia | Valor  | Unidade     |
|------------|--------|-------------|
| $C_1$      | 1000   | $[\mu F]$   |
| $C_2$      | 3443.8 | $[\mu F]$   |
| $R_{C1}$   | 1      | $[m\Omega]$ |
| $L$        | 1.3890 | $[mH]$      |
| $R$        | 2      | $[\Omega]$  |

Fonte: Autoria própria (2022).

bloco que tem como saída a tensão de referência, que se torna entrada do controlador PI, inserido aqui para garantir a estabilidade do sistema; seus ganhos foram ajustados empiricamente.

**Figura 17 – Algoritmos IC e P&O montados no Simulink.**



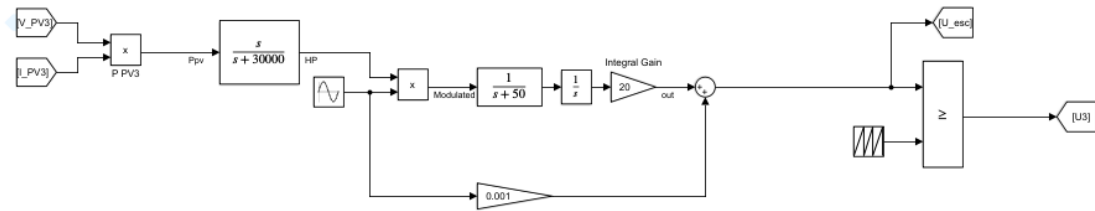
Fonte: Autoria própria (2022).

É válido ressaltar, ao observar a Figura 17, os blocos de *unit delay* em que as variáveis  $V_{pv}$  e  $I_{pv}$  passam por, antes de entrarem no algoritmo. A função desses blocos é atrasar tais variáveis em uma certa fração da frequência de chaveamento, para evitar uma interpretação errônea por parte do algoritmo. A tensão e corrente de saída do arranjo podem apresentar uma pequena oscilação que pode ser interpretada como uma mudança atmosférica pelo algoritmo obrigando-lo a buscar o novo MPP, porém se trataria de um falso verdadeiro; logo, o atraso nas variáveis de entrada garante com que o método MPPT aguarde uma fração de tempo para então verificar se houve uma mudança verdadeira nos valores de entrada. A frequência escolhida para esse bloco é um quinto da frequência de chaveamento do sistema ( $5000Hz$ ). Já o controlador PI é inserido na saída do algoritmo para otimizar a busca pelo MPP, cujo os valores adotados foram de 0,00005 para o proporcional e de 0,008 para o integrador.

Já para o método de controle ESC é apresentado na Figura 18.

Os valores de ganho do método foram ajustados empiricamente, devido a necessidade de ajuste dos parâmetros do controlador a cada conjunto de variáveis de entrada. Porém sabe-se que o ganho que multiplica diretamente o sinal perturbação do sistema deve ser um valor pequeno para garantir uma menor oscilação em regime, logo fixa-se um valor condizente a essa descrição para esse ganho; 0,001 nesse trabalho. Com isso, é possível variar o ganho

**Figura 18 – Método ESC montado no Simulink.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

do ramo principal do diagrama de blocos, que apresenta uma maior influência no tempo de estabelecimento do sistema; nesse trabalho foi definido um valor de 20 para esse ganho.

### 4.3 CONCLUSÕES PARCIAIS

Neste capítulo foram apresentados o projeto do sistema a ser simulado, que resulta na definição dos valores do indutor e capacitor do conversor, bem como as implementações do arranjo fotovoltaico e dos algoritmos de MPPT no ambiente do Simulink. No capítulo seguinte serão apresentados os resultados das três técnicas propostas para MPPT em três cenários de avaliação.

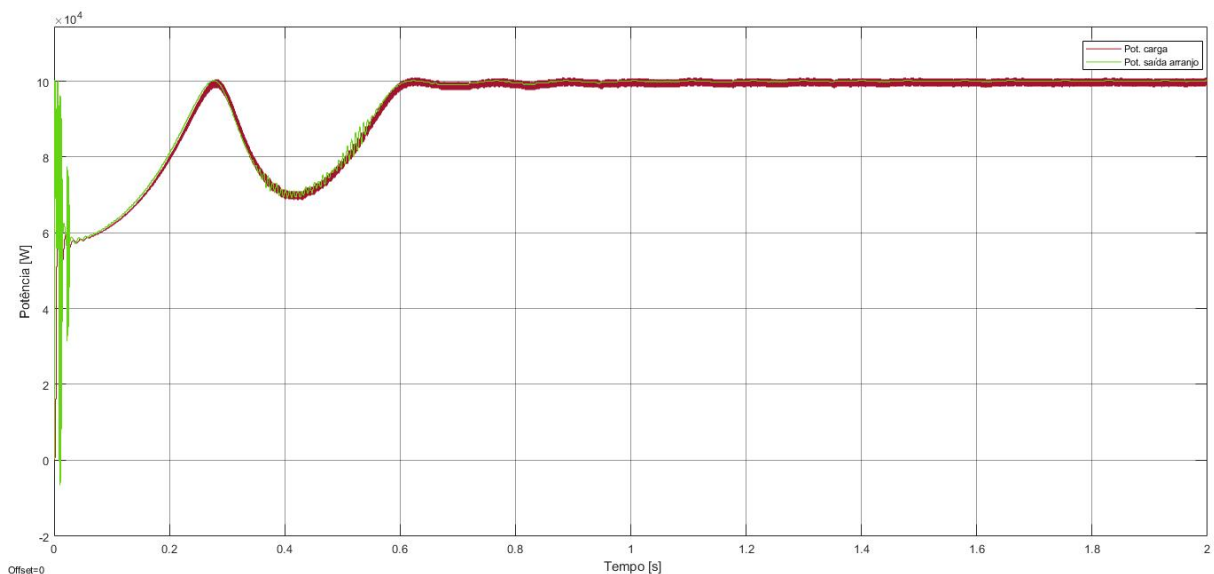
## 5 RESULTADOS

Neste capítulo o arranjo fotovoltaico é posto sob três cenários diferentes de irradiância e temperatura para avaliar o desempenho de cada técnica proposta nesse trabalho. As três situações são: valores de irradiância e temperatura contantes, degrau de irradiância com temperatura constante e degrau de temperatura. Por fim, são apresentados as discussões a respeito da resposta do arranjo em relação a cada um dos cenários propostos. A análise é feita comparando o tempo de estabelecimento e o erro de regime de cada um dos métodos.

### 5.1 CENÁRIO 1: VALORES CONSTANTES DE IRRADIÂNCIA E TEMPERATURA

Nesse cenário os valores de entrada do arranjo, ou seja, irradiância e temperatura assumem um valor constante para realizar a análise de performance das técnicas de MPPT. Os valores adotados são os valores de STC, ou seja,  $1000W/m^2$  para irradiância e de  $25^{\circ}C$  para a temperatura. A Figura 19 apresenta a resposta temporal da potência de saída do arranjo e a potência em cima da carga utilizando a técnica P&O.

**Figura 19 – Evolução temporal de potência considerando a técnica P&O para o cenário 1**

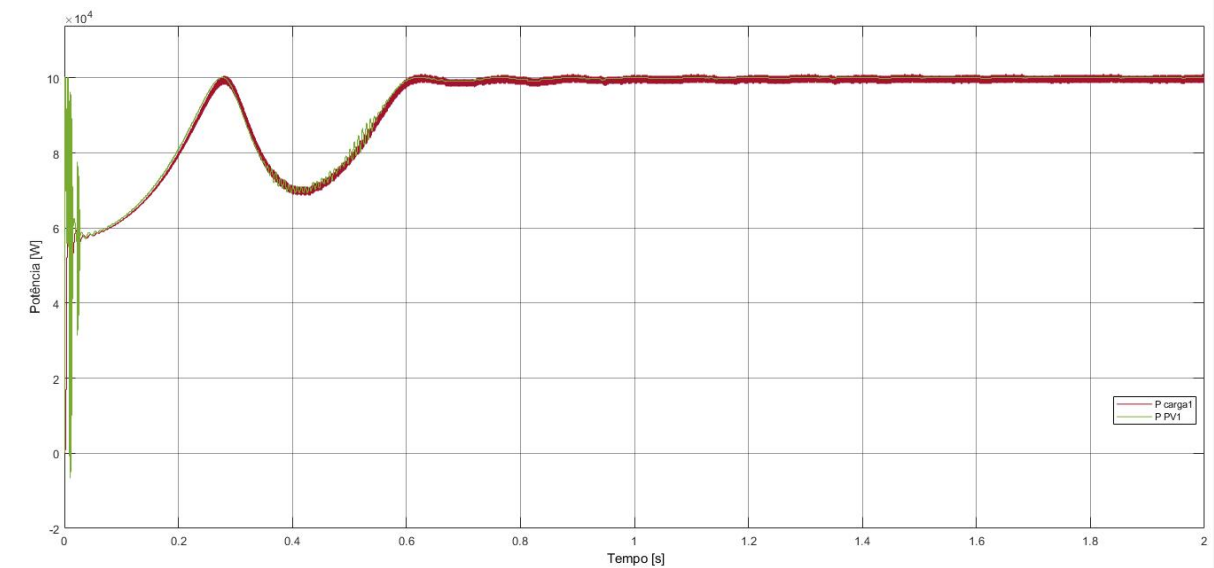


**Fonte: Autoria própria (2022).**

Analisando o gráfico nota-se que o tempo de estabelecimento do sistema com o método utilizado é de aproximadamente 0,8s; o erro em regime entre a potência de saída do arranjo e a potência esperada é de aproximadamente de 1,011%, já o erro em regime entre o valor da potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo é de aproximadamente 0,391%.

Por sua vez, a Figura 20 traz a resposta temporal considerando o algoritmo IC. Essa segunda técnica acaba sendo bem similar em dinâmica quando comparada com o P&O; logo de forma similar ao método anterior, o tempo de estabelecimento também é de aproximadamente

**Figura 20 – Evolução temporal de potência considerando a técnica IC para o cenário 1**

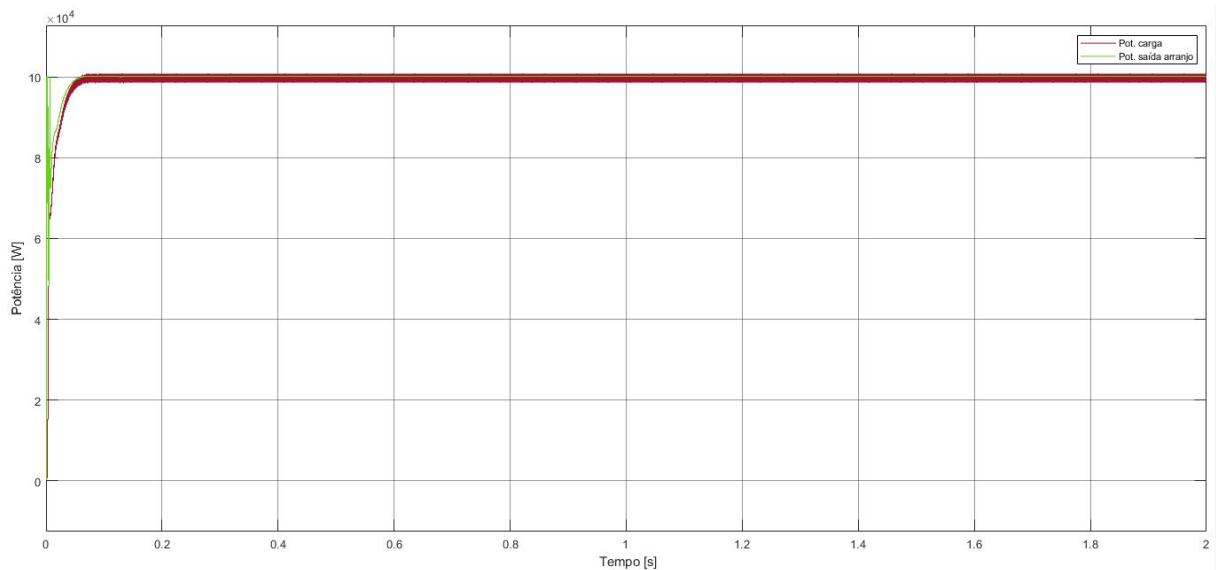


**Fonte: Autoria própria (2022).**

de 0,8s. Quanto ao erro em regime entre a potência de saída do arranjo e a potência esperada para o sistema houve uma queda para 1,010%. Já o erro em regime entre o valor da potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo houve uma pequena queda e atinge o valor de 0,389%.

Por fim, a Figura 21 traz a evolução temporal das potências de saída do arranjo e em cima da carga quando utilizado ESC.

**Figura 21 – Evolução temporal de potência considerando a técnica ESC para o cenário 1**



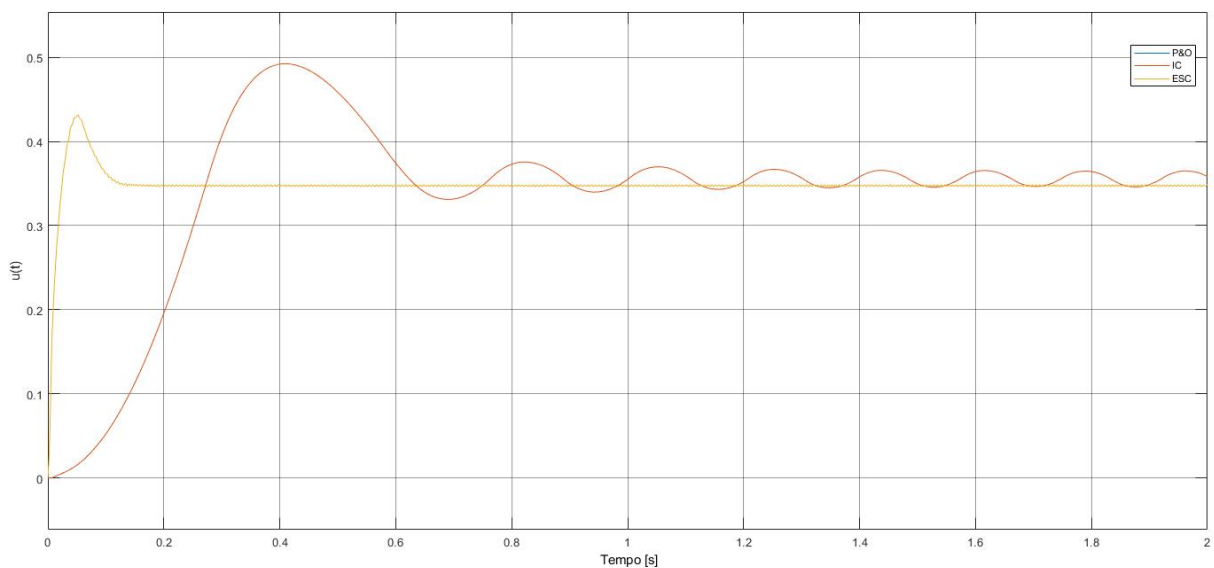
**Fonte: Autoria própria (2022).**



Evidentemente, o ESC apresenta os melhores resultados dentre as três técnicas, ao analisar sua resposta temporal. O método apresenta um tempo de estabelecimento de aproximadamente de  $0,09s$ , cerca de 8,8 vezes menor que as técnicas clássicas. Quanto ao seu erro em regime entre a potência esperada e a potência de saída do arranjo atinge o valor de  $0,972\%$ ; já o erro em regime entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo é de  $0,392\%$ .

Agora, a Figura 22 traz a evolução temporal do sinal de controle  $U$  para as três técnicas analisadas.

**Figura 22 – Evolução temporal do sinal de controle das três técnicas para o cenário 1.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

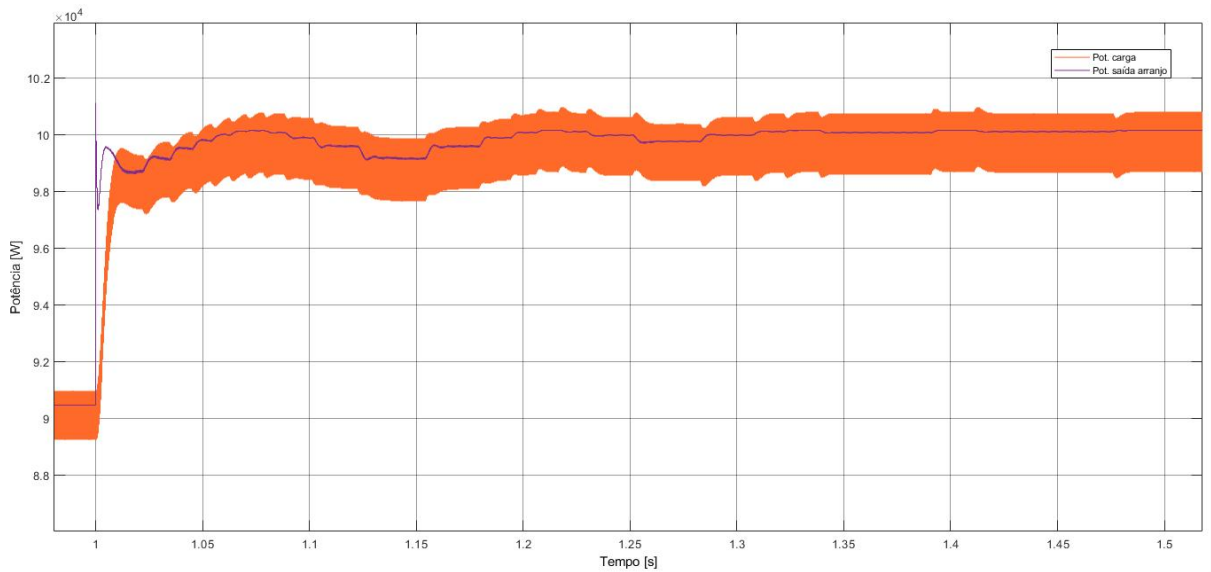
Ao observar a ação de controle nota-se que o ESC (curva laranja na Figura 22) apresenta um esforço de controle menos oscilatório em relação aos algoritmos P&O e do IC. Já ao observar as curvas referentes aos métodos P&O e IC é possível notar a sobreposição das duas curvas, apontando a grande similaridade entre os dois métodos.

## **5.2 CENÁRIO 2: VALOR CONSTANTE DE TEMPERATURA COM DEGRAU DE IRRADIÂNCIA**

Nesse segundo cenário o valor de temperatura permanece constante em  $25^{\circ}C$ , porém o valor de irradiância sofre um degrau de  $900W/m^2$  para  $1000W/m^2$ . Vale ressaltar que essa diferença brusca de valor pode ser interpretado, em termos atmosféricos, como uma passagem rápida de nuvem no céu. A Figura 23 apresenta a resposta temporal da potência de saída do arranjo e a potência em cima da carga utilizando a técnica P&O.

A perturbação causada pelo degrau de irradiância faz com que o tempo de estabelecimento do algoritmo P&O após o degrau dure aproximadamente  $0,35s$ , cerca de  $0,45s$  a menos

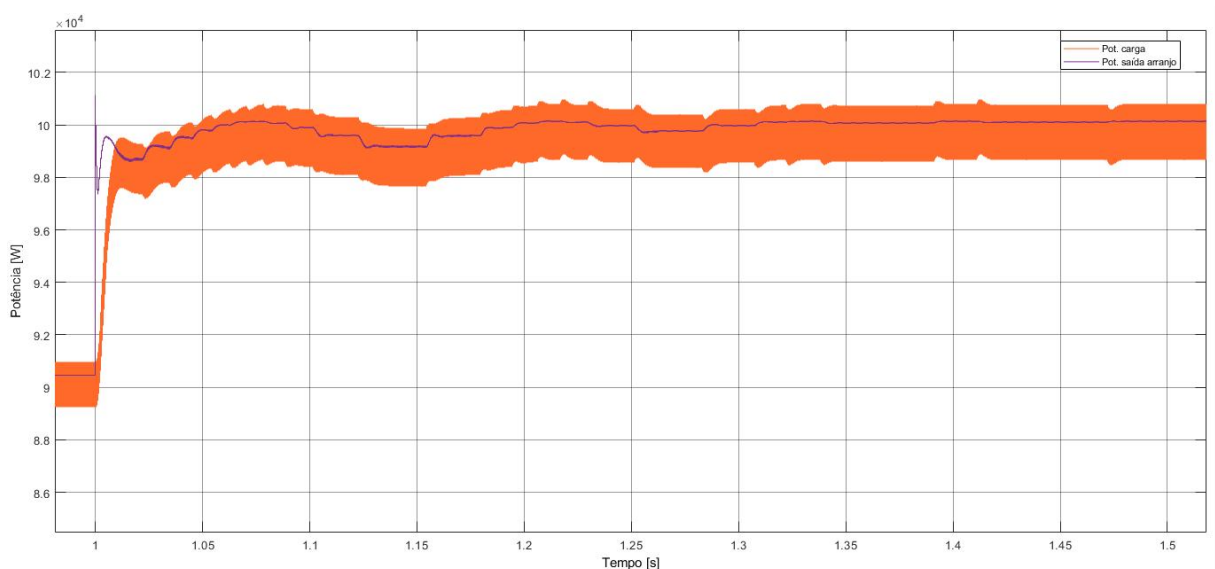
**Figura 23 – Evolução temporal de potência considerando a técnica P&O para o cenário 2.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

que o valor registrado na inicialização da simulação. O erro em regime entre a potência de saída do arranjo e a potência esperada é de 0,981%, logo houve uma queda com em relação ao cenário 1. Já o erro em regime entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo atinge o valor de 0,381%, que quando comparado com o valor do primeiro cenário também houve uma pequena queda no valor.

**Figura 24 – Evolução temporal de potência considerando a técnica IC para o cenário 2.**

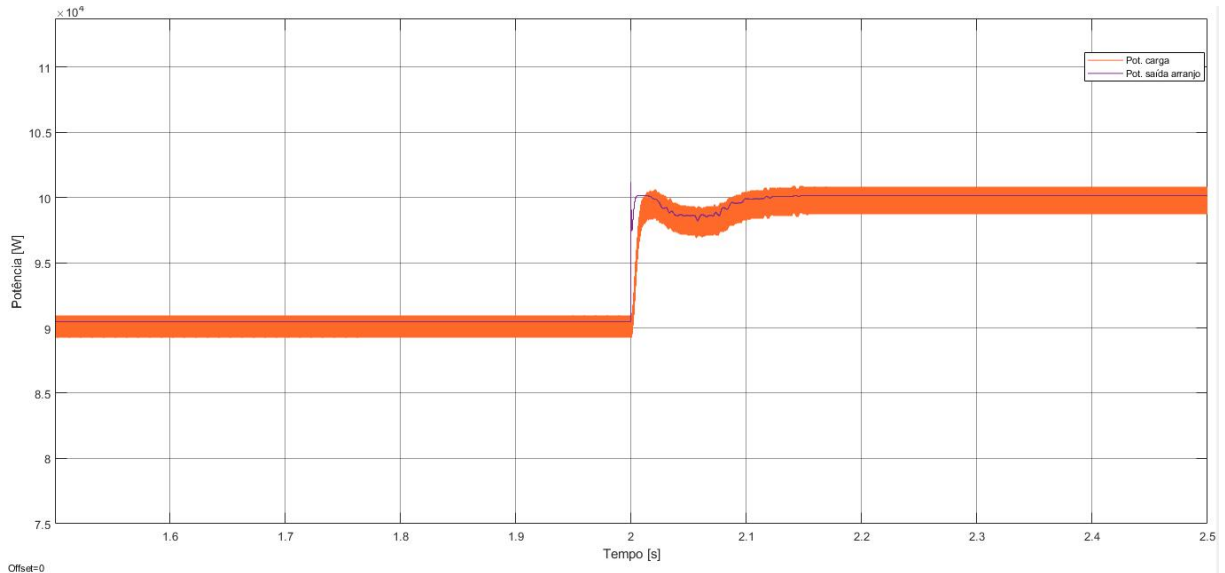


**Fonte: Autoria própria (2022).**

A Figura 24 traz a evolução temporal da potência considerando o degrau de irradiância utilizando o algoritmo IC. O algoritmo IC apresenta um tempo de estabelecimento de aproxi-

madamente de 0,35s. Seu erro em regime entre a potência esperada e a potência de saída do arranjo após o degrau atinge o valor de 0,983% e quanto ao valor entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo atinge o valor de 0,387%.

**Figura 25 – Evolução temporal de potência considerando a técnica ESC para o cenário 2.**

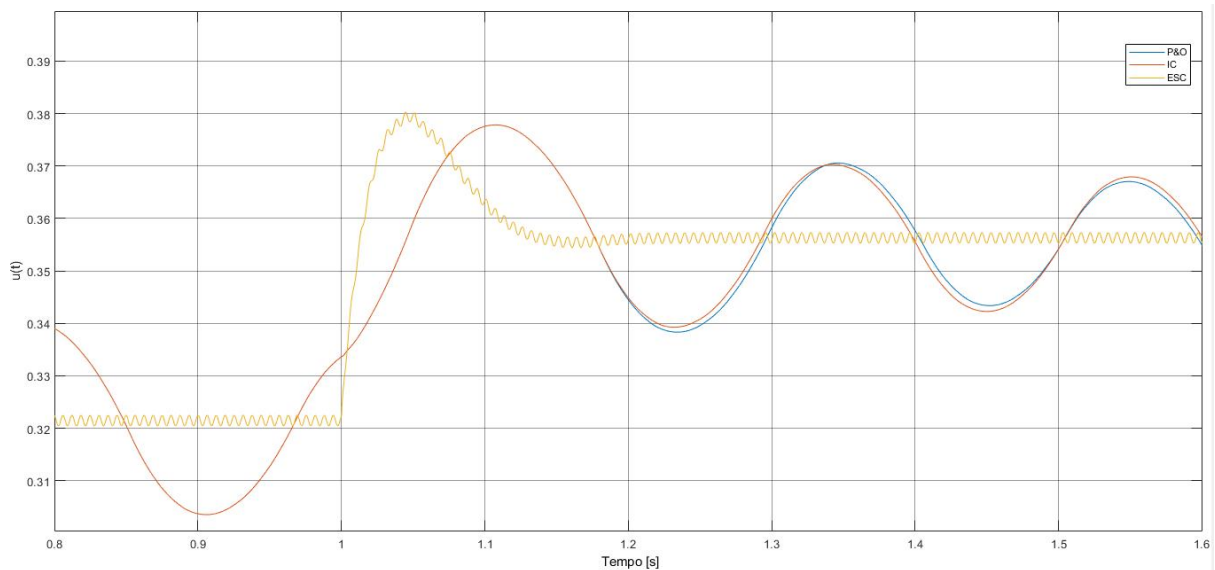


**Fonte: Autoria própria (2022).**

A resposta temporal da potência considerando o método ESC para o cenário 2 é apresentada na Figura 25. De forma análoga ao primeiro cenário, o método ESC apresenta novamente o melhor desempenho, apresentando um valor para seu tempo de estabelecimento após o degrau de 0,15s, um valor maior que o visto no cenário 1 na inicialização da simulação para o mesmo método, porém ainda se trata de um valor bem inferior aos registrados para os algoritmos clássicos. Seu erro em regime entre a potência esperada e a potência de saída do arranjo atinge o valor de 0,901% e seu erro em regime entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo é de 0,389%.

A Figura 26 traz os sinais de controle de cada um dos métodos analisados. Nota-se que o esforço de controle dos algoritmos clássicos são mais oscilatórios em relação ao ESC.

**Figura 26 – Evolução temporal do sinal de controle das três técnicas para o cenário 2.**



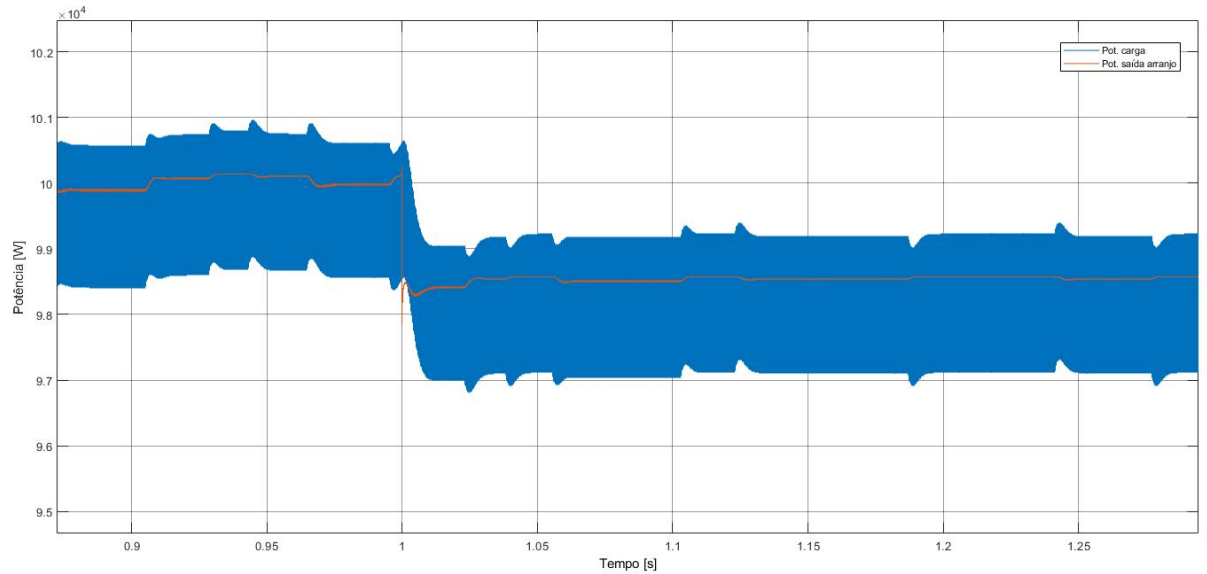
**Fonte: Autoria própria (2022).**

### **5.3 CENÁRIO 3: VALOR CONSTANTE DE IRRADIÂNCIA COM DEGRAU DE TEMPERATURA**

Nesse terceiro cenário, o valor de irradiância permanece constante em  $1000W/m^2$  e o comportamento do valor de temperatura é um sinal do tipo degrau de  $25^{\circ}C$  para  $28^{\circ}C$ . Ressaltando que essa diferença brusca de valor na temperatura é um cenário abrupto em termos atmosféricos, já que a variação de temperatura é mais suave quando comparado à irradiância. A Figura 27 apresenta a resposta temporal da potência de saída do arranjo e a potência em cima da carga utilizando a técnica P&O.

Analisando a perturbação causada pelo degrau de temperatura faz com que o tempo de estabelecimento do algoritmo P&O após o degrau dure aproximadamente 0,21s, porém o sinal ainda permanece apresentando certa oscilação. Para os valores de temperatura de  $28^{\circ}C$  e de irradiância de  $1000W/m^2$  a potência esperada para o arranjo é de 98572,4W. Desse modo, o erro em regime entre a potência de saída do arranjo e a potência esperada é de 0,013%. Já o erro em regime entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo atinge o valor de 0,367%.

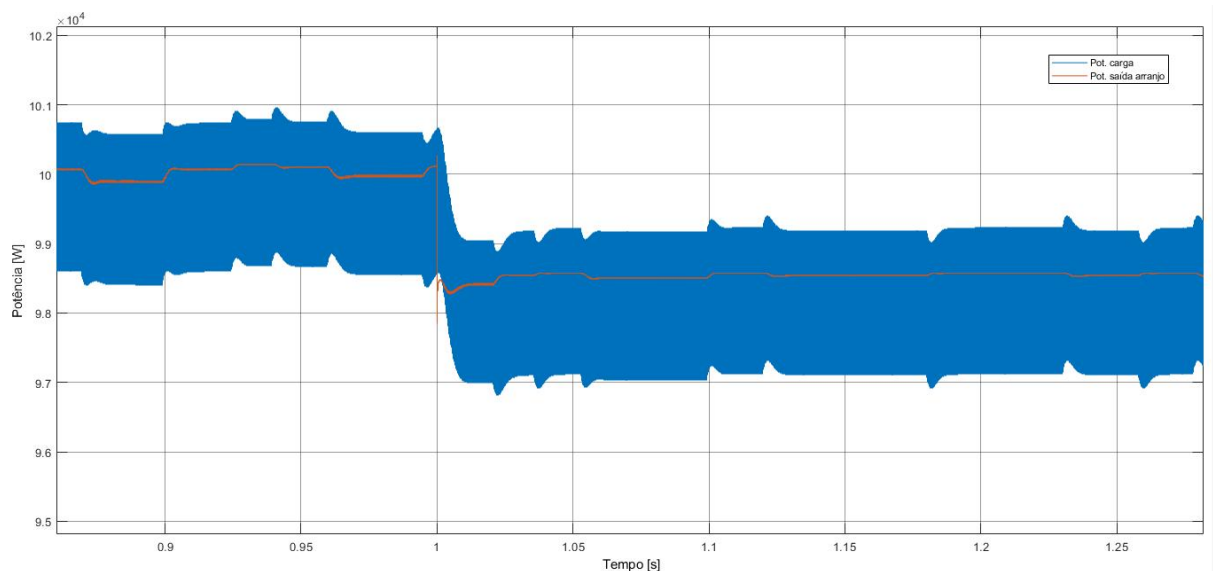
**Figura 27 – Evolução temporal de potência considerando a técnica P&O para o cenário 3.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

A Figura 28 traz a evolução temporal do degrau de irradiância para o algoritmo IC para o cenário 3.

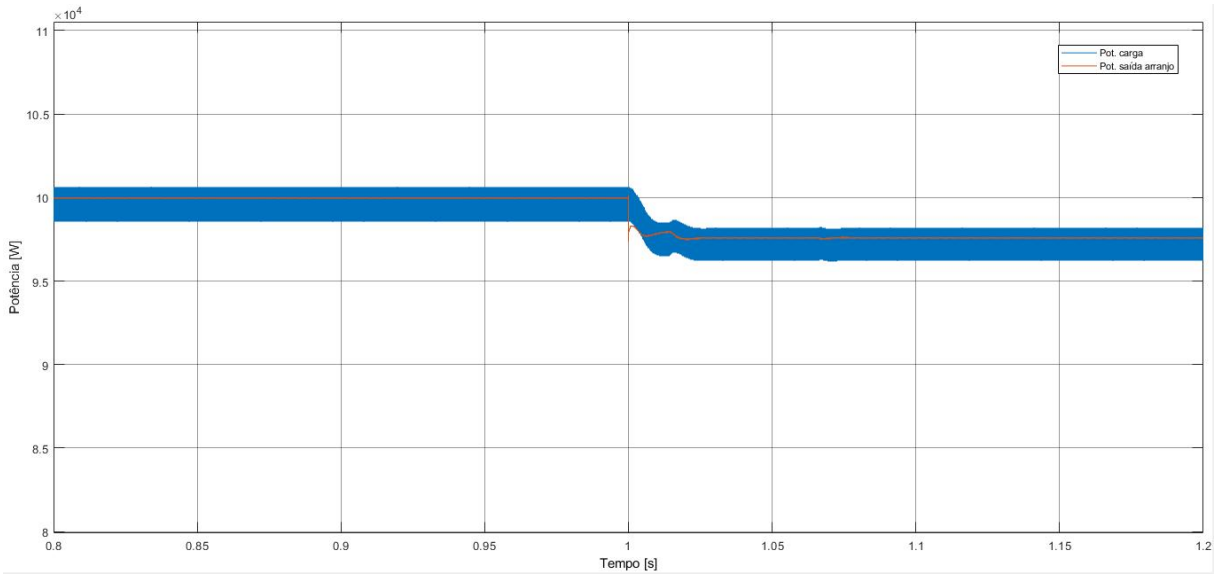
**Figura 28 – Evolução temporal de potência considerando a técnica IC para o cenário 3.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

De forma similar ao P&O o algoritmo IC apresenta um tempo de estabelecimento de aproximadamente de 0,21s, apresentando a mesma oscilação em regime que o algoritmo anterior. Seu erro em regime entre a potência esperada e a potência de saída do arranjo após o degrau atinge o valor de 0,012% e quanto ao valor entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo atinge o valor de 0,378%.

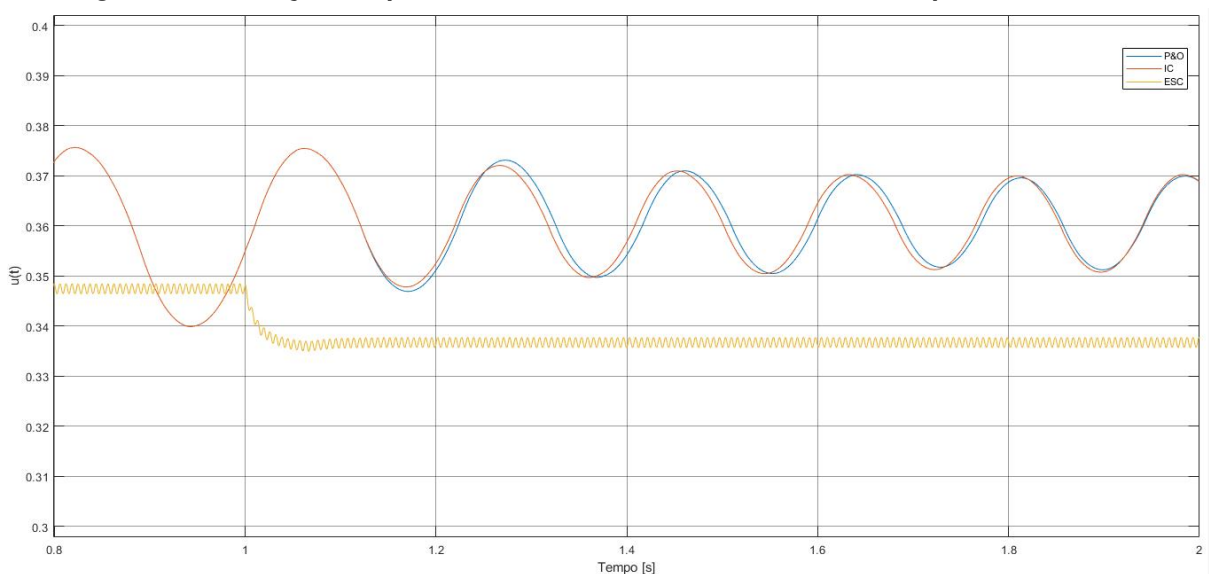
**Figura 29 – Evolução temporal de potência considerando a técnica ESC para o cenário 3.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

A resposta temporal da potência considerando o método ESC para o cenário 3 é apresentada na Figura 29. O método ESC apresenta novamente o melhor desempenho, apresentando um valor para seu tempo de estabelecimento após o degrau de aproximadamente 0,025s, um valor menor tanto para o cenário 1, quanto para o cenário 2 de variação na irradiância. Entretanto, o erro em regime entre a potência esperada e a potência de saída do arranjo apresenta um aumento e atinge o valor de 0,989% e seu erro em regime entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo é de 0,382%.

**Figura 30 – Evolução temporal do sinal de controle das três técnicas para o cenário 3.**



**Fonte: Autoria própria (2022).**

A Figura 30 traz os sinais de controle para cada um dos três métodos. Nota-se uma similaridade entre os sinais de controle do P&O e IC, enquanto que o ESC destaca-se por apresentar o menor esforço de controle entre as técnicas MPPT.

## 5.4 DISCUSSÕES

A Tabela 5 traz o resumo dos valores de tempo de estabelecimento e erro de regime para cada método e cada cenário proposto.

**Tabela 5 – Resumo dos parâmetros analisados de cada cenário proposto.**

| Parâmetro     | Método | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 |
|---------------|--------|-----------|-----------|-----------|
| $t_s$ [s]     | P&O    | 0.80      | 0.35      | 0.021     |
|               | IC     | 0.80      | 0.35      | 0.021     |
|               | ESC    | 0.09      | 0.15      | 0.025     |
| $e_{ss1}$ [%] | P&O    | 1.011     | 0.981     | 0.013     |
|               | IC     | 1.010     | 0.983     | 0.012     |
|               | ESC    | 0.972     | 0.901     | 0.989     |
| $e_{ss2}$ [%] | P&O    | 0.391     | 0.381     | 0.367     |
|               | IC     | 0.389     | 0.387     | 0.378     |
|               | ESC    | 0.392     | 0.389     | 0.382     |

**Fonte: Autoria própria (2022).**

Primeiramente, analisando as técnicas clássicas, o P&O e a IC, é possível notar que ambas as técnicas apresentam valores de tempo de estabelecimento ( $t_s$ ) muito similares; se compara cada valor dentro de cada cenário. Algo similar acontece quanto aos valores de erro em regime entre a potência de saída do arranjo e a potência esperada para o sistema ( $e_{ss1}$ ), e o erro em regime entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo PV ( $e_{ss2}$ ) desses dois métodos clássicos de MPPT, que nos três cenários apresentam valores muito próximos entre si. Essa característica notada entre o P&O e o IC é algo muito condizente com o esperado já que ambas as técnicas são muito similares entre si.

Vale ressaltar que apesar das similaridades, nota-se uma pequena vantagem do método IC em termos de erro em regime perante ao P&O no cenário 1, onde não há nenhuma variação dos parâmetros de entrada do arranjo fotovoltaico. Essa pequena vantagem acaba se invertendo no segundo e terceiro cenários propostos, nos quais a técnica P&O apresenta valores de erro em regime menores quando comparados aos valores do IC. Logo, a partir dos dados apresentados ambos os algoritmos são ótimas escolhas na realização do MPPT de um arranjo fotovoltaico.

Partindo para terceira técnica proposta e analisando os valores de tempo de estabelecimento da Tabela 5 nota-se que o ESC é o método que apresenta a melhor performance dentre as três técnicas, sendo que o menor valor registrado foi no cenário 3, referente ao degrau de temperatura. Assim, para os três cenários propostos o método ESC apresentou o menor tempo

de estabelecimento quando comparado às técnicas clássicas, o que o torna a melhor escolha entre para MPPT.

Analisando os valores de erro em regime para os cenários 1 e 2, o ESC apresenta os menores valores de  $e_{ss1}$  em cada um dos dois cenários, porém para o erro em regime entre a potência em cima da carga e a potência de saída do arranjo é o método com os maiores valores, apesar de apresentar uma diferença muito baixa, na casa de  $10^{-3}$ . O cenário 3, na contramão, foi a situação na qual o método apresentou o pior desempenho em valores de erro em regime em relação a potência esperada ( $e_{ss1}$ ); o método apresenta um valor para esse parâmetro de 0,989%, enquanto os métodos clássicos apresentam um valor cerca de 0,088% menor ao valor do ESC. Quanto ao tempo de estabelecimento, o ESC apresenta um valor cerca de 0,04s a mais que os demais métodos. Desse modo, o ESC para os ganhos propostos - apresentados na Figura 18 - e uma variação de degrau de temperatura acaba apresentando uma performance abaixo do esperado.

Entretanto, como o controle *Extremum Seeking* se trata de um método da classe adaptativa, permite que os ganhos aplicados no método sejam ajustados ao ponto de não apresentar esse problema em sua performance de atuação. Outro ponto a ser notado, é o fato, já comentado nesse trabalho, que o cenário 3 se trata de uma situação irreal, já que a temperatura ambiente se trata de uma variável atmosférica estável em pequenos espaços de tempo. Logo, uma mudança de  $3^{\circ}C$  nessa variável de um segundo para o outro é improvável de acontecer naturalmente.

Assim, de modo geral, as três técnicas de MPPT são aptas para realizar o rastreamento do MPP. Porém, a partir dos dados coletados dos cenários aplicados ao arranjo, é possível afirmar que o *Extremum Seeking Control* apresenta o melhor resultado comparado aos demais, devido ao seu tempo de estabelecimento ter sido o menor apresentado em todos os três cenários. Em adição, nos cenários 1 e 2, cujos são cenários atmosféricos possíveis que um arranjo PV pode se deparar no local em que for instalado, o método também apresentou a melhor performance em valores de erro em regime.

## 5.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

Nesse capítulo foram apresentados os resultados para cada um dos cenários propostos: valores de irradiância e temperatura constantes, situação com um degrau de irradiância e situação para um degrau de temperatura. Foram incluídos para análise os gráficos de evolução temporal das potências de saída do arranjo e em cima da carga, os gráficos dos sinais de controle e os valores de tempo de estabelecimento e erro em regime para cada uma das técnicas abordadas em cada um dos cenários propostos. Por fim, foi realizada uma discussão sobre os resultados apresentados na aplicação em MPPT. No próximo capítulo são apresentadas as conclusões finais desse trabalho.



## 6 CONCLUSÕES FINAIS

O objetivo geral desse trabalho foi apresentar e comparar três técnicas de realização do rastreamento do MPP. A premissa do trabalho esteve fundamentado sobre a importância das energias renováveis no âmbito nacional e internacional, em destaque para a energia fotovoltaica. Ainda foi apresentado a revisão da literatura, embasando e justificando o objetivo geral do trabalho.

Em seguida, este trabalho apresentou a fundamentação teórica, abordando pontos importantes para a melhor compreensão do trabalho, como os tipos de configurações de arranjo fotovoltaico e seus componentes, com destaque para o conversor CC/CC. Foi apresentado a modelagem da célula fotovoltaica, utilizando o modelo de *single-diode* para sua representação, a fim de apontar os termos não lineares das equações dinâmicas da célula, com o intuito de indicar a complexidade para síntese de controladores baseados em modelos para esta aplicação de MPPT. Para finalizar a fundamentação teórica, cada uma das três técnicas utilizadas neste estudo foram explanadas.

Ainda, o sistema a ser simulado foi projetado e definidos três cenários de situação atmosférica para testar a performance das técnicas de MPPT abordadas; e para cada um dos cenários foram expostos os resultados, trazendo os gráficos de evolução temporal das potências de saída do arranjo e em cima da carga, os gráficos dos sinais de controle e os valores de tempo de estabelecimento e erro em regime para a realização e validação das performance de cada uma dos métodos propostos.

Após as discussões dos resultados, fica claro que o ESC apresentou a melhor performance dentre as técnicas de MPPT, por apresentar menor tempo de estabelecimento do sistema e o menor erro em regime em dois dos três cenários propostos. Apesar de no terceiro cenário o valor de erro em regime do método tenha sido o maior, o cenário trata-se de uma situação atmosférica improvável de se ocorrer naturalmente e foi proposto apenas para o teste de estabilização do sistema na presença de um degrau de valor em uma de suas variáveis de entrada.

Para trabalhos futuros, sugere-se realizar validação utilizando dados reais através de estações meteorológicas instaladas em parques fotovoltaicos. E ainda, após esses estudos adicionais e de validação do método, sugere-se uma pesquisa com ênfase na escolha na prototipagem de menor custo para implementação física do ESC como método de MPPT para arranjos fotovoltaicos.

Em termos gerais, o *Extremum Seeking* e suas variantes se consolidam como uma técnica interessante para investigação científica voltada para rastreamento do ponto de máxima potência de sistemas fotovoltaicos ao apresentar melhor performance nos diferentes cenários de análise. Assim, considera-se que esse trabalho alcançou seu objetivo ao realizar a comparação do ESC com os algoritmos clássicos de MPPT. Além disso, essa monografia contribui com a literatura da área fotovoltaica, ao apresentar os fundamentos de rastreamento de ponto de máxima potência utilizando o ESC, cuja notoriedade têm sido crescente na área de controle.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, A. J. *et al.* Método MPPT para sistema fotovoltaico baseado na técnica da condutância incremental. **Revista CTS IFG Luziânia**, v. 1, n. 1, 2015.
- ARIYUR, K. B.; KRSTIC, M. Analysis and design of multivariable extremum seeking. *In: IEEE. Proceedings of the 2002 American Control Conference*. Anchorage, AK, USA, 2002. v. 4, p. 2903–2908.
- ARIYUR, K. B.; KRSTIC, M. **Real-time optimization by extremum-seeking control**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- BALFOUR, J.; SHAW, M.; NASH, N. B. Introdução ao projeto de sistemas fotovoltaicos. **São Paulo: LTD**, 2016.
- BENOSMAN, M. *et al.* Editorial for the special issue on extremum seeking control: Theory and applications. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, Wiley Online Library, v. 35, n. 7, p. 1140–1142, 2021.
- BIZON, N. Global extremum seeking control of the power generated by a photovoltaic array under partially shaded conditions. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 109, p. 71–85, 2016.
- BRITO, M. A. D. *et al.* Research on photovoltaics: review, trends and perspectives. *In: SOBRAEP. XI Brazilian Power Electronics Conference*. Natal, Brazil, 2011. p. 531–537.
- BRITO, M. A. G. D. *et al.* Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, IEEE, v. 60, n. 3, p. 1156–1167, 2012.
- BRUNTON, S. L. *et al.* Maximum power point tracking for photovoltaic optimization using ripple-based extremum seeking control. **IEEE Transactions on Power Electronics**, IEEE, v. 25, n. 10, p. 2531–2540, 2010.
- CARVALHO NETO, J. T. d. **Controle Robusto Aplicado a Conversor Buck-Boost em Sistemas Fotovoltaicos**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2012.
- CHAO, K.-H.; RIZAL, M. N. A hybrid MPPT controller based on the genetic algorithm and ant colony optimization for photovoltaic systems under partially shaded conditions. **Energies**, MDPI, v. 14, n. 10, p. 2902, 2021.
- CHIU, C.-S. TS fuzzy maximum power point tracking control of solar power generation systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, IEEE, v. 25, n. 4, p. 1123–1132, 2010.
- CHIU, C.-S.; OUYANG, Y.-L. Robust maximum power tracking control of uncertain photovoltaic systems: A unified T-S fuzzy model-based approach. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 19, n. 6, p. 1516–1526, 2011.
- CHUNG, T. M. *et al.* Comparative study of P & O and modified incremental conductance algorithm in solar maximum power point tracking. *In: 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*. Kuala Lumpur, Malaysia: IET, 2016. p. 1–6.
- DANDOUSSOU, A. *et al.* Comparative study of the reliability of mppt algorithms for the crystalline silicon photovoltaic modules in variable weather conditions. **Journal of Electrical Systems and Information Technology**, Elsevier, v. 4, n. 1, p. 213–224, 2017.

- DJALAB, A. *et al.* Analysis of MPPT methods: P & O, INC and fuzzy logic (CLF) for a PV system. *In: 2018 6th International Conference on Control Engineering & Information Technology (CEIT)*. Istanbul, Turkey: IEEE, 2018. p. 1–6.
- DOCHAIN, D.; PERRIER, M.; GUAY, M. Extremum seeking control and its application to process and reaction systems: a survey. **Mathematics and Computers in Simulation**, Elsevier, v. 82, n. 3, p. 369–380, 2011.
- FARAYOLA, A. M.; HASAN, A. N.; ALI, A. Comparison of modified incremental conductance and fuzzy logic MPPT algorithm using modified CUK converter. *In: 2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)*. Amman, Jordan: IEEE, 2017. p. 1–6.
- GODINHO, V. C. R.; SAMPAIO, L. P.; SILVA, S. A. Oliveira da. Análise comparativa entre as técnicas de MPPT PSO e GSA em sistemas fotovoltaicos submetidos a condições de sombreamentos parciais. *In: 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*. São Paulo, Brazil: IEEE, 2021. p. 368–374.
- GOMES, A. C. *et al.* Princípio de funcionamento do método perturba e observa (P&O) para rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) em sistemas fotovoltaicos utilizando o conversor boost. *In: VI Simpósio de Controle e Automação do Sul da Bahia*. Ilhéus, Brazil: UESC, 2016.
- GRUNDEMANN, W. T. **MPPT perturba e observa aplicado ao conversor Boost**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Pampa, Alegrete, 2017.
- HARRABI, N. *et al.* Peak power tracker based on TS fuzzy model for photovoltaic system. *In: 2017 25th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*. Valletta, Malta: IEEE, 2017. p. 547–552.
- KRSTIĆ, M. Performance improvement and limitations in extremum seeking control. **Systems & Control Letters**, Elsevier, v. 39, n. 5, p. 313–326, 2000.
- KRSTIĆ, M.; WANG, H.-H. Stability of extremum seeking feedback for general nonlinear dynamic systems. **Automatica**, Elsevier, v. 36, n. 4, p. 595–601, 2000.
- LEBLANC, M. Sur l'électrification des chemins de fer au moyen de courants alternatifs de fréquence élevée. **Revue générale de l'électricité**, Revue Hebdomadaire, Paris, v. 12, n. 8, p. 275–277, 1922.
- LETCINDJIO, C. G. F.; DEWASME, L.; WOUWER, A. V. An experimental application of extremum seeking control to cultures of the microalgae *scenedesmus obliquus* in a continuous photobioreactor. **International Journal of Adaptive Control and Signal Processing**, Wiley Online Library, v. 35, n. 7, p. 1285–1297, 2021.
- LEYVA, R. *et al.* Mppt based on sinusoidal extremum-seeking control in PV generation. **International Journal of Photoenergy**, Hindawi, v. 2012, 2011.
- LI, X. *et al.* A comparative study on photovoltaic MPPT algorithms under EN50530 dynamic test procedure. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 36, n. 4, p. 4153–4168, 2021.
- LOPES FILHO, G.; FRANCO, R. A. P.; VIEIRA, F. H. T. Rastreamento do ponto de máxima potência para sistemas fotovoltaicos utilizando o algoritmo de condutância incremental adaptativo. *In: Anais da VII Escola Regional de Informática de Goiás*. Goiânia, Brasil: SBC, 2019. p. 379–388.

- MOREIRA, A. V. S. **Desempenho do Método Perturba e Observa com passo adaptativo e agrupamento de pontos em módulo fotovoltaico com diodo de passagem inteligente perante o sombreamento parcial**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.
- MOURA JUNIOR, K. J. d. **Conexão de conversores CC-CC em série para redução do efeito de sombreamento em arranjos fotovoltaicos**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2015.
- OLIVEIRA, E. P. **Conversor CC-CC implementado com algoritmo MPPT para placas fotovoltaicas**. 2016. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande - Paraíba, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.
- OLIVEIRA, J. G.; MARCATO, A. L. M.; AGUIAR, E. P. de. Controlador MPPT baseado em Lógica Fuzzy Aplicado a um Sistema Fotovoltaico Conectado a uma Rede. *In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*. Ouro Preto, Brasil: SBA, 2019.
- PATHY, S. *et al.* Nature-inspired MPPT algorithms for partially shaded PV systems: a comparative study. **Energies**, MDPI, v. 12, n. 8, p. 1451, 2019.
- PAZ, P. *et al.* Model-free neuromuscular electrical stimulation by stochastic extremum seeking. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, IEEE, v. 28, n. 1, p. 238–253, 2019.
- PEREIRA, P.; SOUZA, A.; SANTOS, I. Modelagem e avaliação de desempenho das principais técnicas de controle de MPPT empregadas na geração fotovoltaica. *In: XIV CEEL*. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- PIAZZETTA, T. d. L. **Modelagem Fuzzy Takagi-Sugeno para rastreamento de máxima potência em painéis solares**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2022.
- PODDER, A. K.; ROY, N. K.; POTA, H. R. Mpppt methods for solar pv systems: a critical review based on tracking nature. **IET Renewable Power Generation**, Wiley Online Library, v. 13, n. 10, p. 1615–1632, 2019.
- PRAKASH, K.; VEJJU, P.; REDDY, B. V. Multiport switch based MPPT for stand-alone photovoltaic power systems. *In: 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*. Delhi, India: IEEE, 2016. p. 1–6.
- QUEIROZ, K. I. P. d. M. *et al.* Estimação de atitude em satélites utilizando busca extremal. *In: XV - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente-SBAI*. Rio Grande, Brasil: SBA.
- RAJ, M. P.; JOSHUA, A. M. Modeling and performance analysis of perturb & observe, incremental conductance and fuzzy logic MPPT controllers. *In: 2017 International Conference on Advances in Electrical Technology for Green Energy (ICAETGT)*. Coimbatore, India: IEEE, 2017. p. 13–18.
- RASHID, M. H. **Power electronics: circuits, devices, and applications**. India: Pearson Education, 2009.

- RICCI, M. M. *et al.* Comparação de técnicas de MPPT para um sistema fotovoltaicos com dois arranjos utilizando software PSIM®. *In: XIII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia*. Uberlândia: UFU, 2015. p. 1–6.
- ROCHA, M. V. da; SAMPAIO, L. P.; SILVA, S. A. O. da. Comparative analysis of MPPT algorithms based on bat algorithm for PV systems under partial shading condition. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Elsevier, v. 40, p. 100761, 2020.
- ROSOT, C. **Análise comparativa de conversores cc-cc elevadores de tensão aplicados a sistemas fotovoltaicos de duplo estágio de conversão de energia conectados à rede elétrica monofásica**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2017.
- SARVI, M.; AZADIAN, A. A comprehensive review and classified comparison of MPPT algorithms in PV systems. **Energy Systems**, Springer, v. 13, n. 2, p. 281–320, 2022.
- SILVA, A. d. **Estudo comparativo entre técnicas de seguimento do ponto de máxima potência em sistemas fotovoltaicos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Pernambuco, 2018.
- SILVEIRA, R. D. *et al.* An enhanced MPPT algorithm based on adaptive extremum-seeking control applied to photovoltaic systems operating under partial shading. **IET Renewable Power Generation**, Wiley Online Library, v. 15, n. 6, p. 1227–1239, 2021.
- TOMAGGI, H. I. **Análise comparativa de métodos de rastreamento do ponto de máxima potência em painéis fotovoltaicos**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- VALLÊRA, A. M.; BRITO, M. C. Meio século de história fotovoltaica. **Gazeta de Física**, v. 1, n. 2, p. 17, 2006.
- YAU, H.-T.; WU, C.-H. Comparison of extremum-seeking control techniques for maximum power point tracking in photovoltaic systems. **Energies**, MDPI, v. 4, n. 12, p. 2180–2195, 2011.
- YU, H. *et al.* Extremum seeking for traffic congestion control with a downstream bottleneck. **Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 143, n. 3, 2021.