

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DANILO HENRIQUE WOLLZ

**MONITORAMENTO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO EM TEMPO  
REAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO A  
INTERFACE GRÁFICA LABVIEW**

PROPOSTA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

DANILO HENRIQUE WOLLZ

**MONITORAMENTO, MODELAGEM E SIMULAÇÃO EM TEMPO  
REAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO A  
INTERFACE GRÁFICA LABVIEW**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso Superior de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico da Elétrica – DAELE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva  
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Poltronieri Sampaio

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016



**Universidade Tecnológica Federal do Paraná**  
**Campus Cornélio Procópio**  
**Departamento de Engenharia Elétrica**  
**Curso de Engenharia Elétrica**



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Danilo Henrique Wollz**

**Monitoramento, modelagem e simulação em tempo real de sistemas fotovoltaicos usando a interface gráfica LabVIEW.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:00hs do dia 16/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof(a). Dr(a). Sergio Augusto Oliveira da Silva - Presidente (Orientador)

---

Prof(a). Dr(a). Leonardo Poltronieri Sampaio - (Coorientador)

---

Prof(a). Dr(a). Cristiano Marcos Agulhari - (Membro)

---

Prof(a). Dr(a). Fábio Renan Durand - (Membro)

Dedico a Deus, fonte de sabedoria e conhecimento.

Dedico também a toda minha família, em especial aos meus pais, Juarez António Wollz e Vera Lúcia Ribeiro Wollz, a minha irmã Damares Ribeiro Wollz, aos meus avós, Juarez Wollz e Loíde Ferreira Wollz, ao meu tio Luíz Fernando Wollz, e a todos os meus amigos por me ajudarem a trilhar este caminho.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus que permitiu que tudo isso acontecesse, e por ter me dado forças para superar todos os desafios encontrados.

A minha família, os meus pais, Juarez António Wollz e Vera Lúcia Ribeiro Wollz, que nunca mediram esforços para garantir meus estudos, e minha irmã Damares que sempre me apoiou em minhas escolhas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva, pela oportunidade e suporte na elaboração deste trabalho, pelas correções, incentivos e conselhos.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Leonardo Pontronieri Sampaio, pela contribuição e colaboração para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores Fábio Renan Durand e Cristiano Marcos Agulhari, participantes da banca de avaliação.

A todos os professores do Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da UTFPR – câmpus Cornélio Procópio.

Aos meus amigos e companheiros do grupo de pesquisas do LEPQER, Leonardo Bruno Garcia Campanhol, Vinícios Dário Bacon, Guilherme Pelz, Fernando Alves Negrão, Marcelo Takami e Fernando Marcos de Oliveira, pelos auxílios e conselhos relacionados ao trabalho e pela ótima convivência.

A empresa PESQUEIRO ENERGIA S/A que, por intermédio do engenheiro eletricista Evandro Terra Junior, realizou a doação de equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

## EPÍGRAFE

*“Enquanto você sonha, você está fazendo o rascunho do seu futuro”.*

Charles Chaplin

## RESUMO

WOLLZ, Danilo Henrique. **Monitoramento, modelagem e simulação em tempo real de sistemas fotovoltaicos utilizando a interface gráfica LabVIEW**. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Este trabalho propõe o emprego de um sistema de monitoramento em tempo real desenvolvido a partir da interface gráfica LabVIEW, aplicado em sistemas de geração de energia fotovoltaica. A partir de informações referentes a radiação solar incidente sobre o arranjo fotovoltaico e temperatura do mesmo, o sistema é capaz de estimar qual a máxima potência que o arranjo é capaz de gerar naquele instante. Além disso, o sistema adquire ao mesmo tempo informações reais da corrente e da tensão do arranjo fotovoltaico, sendo possível comparar os valores estimados com os adquiridos a fim de verificar se o sistema está gerando a máxima potência que é capaz de fornecer. O sistema de monitoramento é aplicado em um protótipo desenvolvido em laboratório, composto pelo conversor CC-CC *boost* quadrático para o estágio de elevação de tensão e pelo conversor CC-CA *Full-Bridge* para a conexão com a rede elétrica. É realizada a modelagem destes conversores para o projeto dos controladores das malhas de controle, onde estes controladores são embarcados em um processador digital de sinais. Desta maneira, por meio de simulações computacionais e resultados experimentais, o sistema de monitoramento desenvolvido é avaliado, o que permite validar o estudo realizado para o desenvolvimento deste trabalho.

**Palavras-chave:** Monitoramento, Interface Gráfica LabVIEW, Sistemas Fotovoltaicos, Conversores Estáticos de Potência.

## ABSTRACT

**WOLLZ, Danilo Henrique. Monitoring, modeling and real-time simulation of photovoltaic systems using the LabVIEW graphical interface.** Final Paper to get a degree in the Electrical Engineering Course. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

This study proposes the use of a monitoring system in real time, developed from the LabVIEW graphical interface and applied to photovoltaic power generation systems. From information related to the incident solar radiation on the PV array and the temperature of it, the system is able to estimate the maximum power that the arrangement is capable of generating at that moment. In addition, the system acquires at the same time actual information of current and voltage of the PV array, being possible to compare the estimated values with those acquired in order to verify if the system is generating the maximum power that is able to supply. The monitoring system is diligent to a prototype developed in laboratory, composed by a DC-DC quadratic boost converter to the voltage rise stage and the DC-AC full-bridge converter for connection into the grid. Is accomplished the modeling of converters for the design of controllers in control loops, where these controllers are embedded in a digital signal processor. This way, by computer simulations and experimental results, the monitoring system developed is evaluated which enables to validate the study for the development of this work.

**Keywords:** Monitoring, LabVIEW Graphical Interface, Photovoltaic Systems, Static Power Converters.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Esquemático do sistema de monitoramento proposto.....   | 20 |
| Figura 2 – Exemplo de uma $VI$ .....   | 21 |
| Figura 3 – Esquema básico de uma célula fotovoltaica.....  | 23 |
| Figura 4 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.....  | 25 |
| Figura 5 – Curva característica $I \times V$ do painel fotovoltaico.....   | 27 |
| Figura 6 – Curva característica $P \times V$ do painel fotovoltaico.....   | 28 |
| Figura 7 – Característica de potência do PV para diferentes níveis de radiação solar.....  | 28 |
| Figura 8 – Característica de potência do PV para diferentes níveis de temperatura.....   | 29 |
| Figura 9 – Topologias de sistemas PV. (a) Topologia centralizada. (b) Topologia <i>string</i> . (c) Topologia <i>AC module</i> ..... | 30 |
| Figura 10 - Conversor <i>boost</i> clássico.....   | 31 |
| Figura 11 – Conversor <i>boost</i> quadrático.....   | 33 |
| Figura 12 – Esquema do método de MPPT tensão constante.....  | 34 |
| Figura 13 – Fluxograma do método de MPPT P&O.....  | 35 |
| Figura 14 – Fluxograma do método de MPPT <i>IC</i> .....   | 36 |
| Figura 15 – Inversor monofásico VSI <i>Full-Bridge</i> .....   | 37 |
| Figura 16 – Inversor monofásico VSI <i>Full-Bridge</i> conectado à rede elétrica.....  | 38 |
| Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema PLL monofásico.....  | 39 |
| Figura 18 – Modelo do conversor <i>boost</i> quadrático.....   | 41 |
| Figura 19 – Modelo do conversor <i>boost</i> quadrático durante a primeira etapa de operação.....                                    | 42 |
| Figura 20 – Modelo do conversor <i>boost</i> quadrático durante a primeira etapa de operação.....                                    | 43 |
| Figura 21 - Diagrama em blocos da malha interna de controle de corrente do conversor <i>boost</i> quadrático.....                    | 46 |
| Figura 22 – Diagrama em blocos das malhas de controle de tensão e corrente do conversor <i>boost</i> quadrático.....                 | 47 |
| Figura 23 – Resposta em frequência das funções $G_{ib_d}$ , $G_{C_{MA_{ib}}}$ e $G_{PI_{MA_{ib}}}$ .....                             | 51 |
| Figura 24 – Resposta em frequência das funções $G_{vb_d}$ , $G_{C_{MA_{vb}}}$ e $G_{PI_{MA_{vb}}}$ .....                             | 53 |
| Figura 25 – Topologia do inversor <i>full-bridge</i> conectado à rede elétrica.....  | 54 |
| Figura 26 – Diagrama em blocos das malhas de controle de corrente e de tensão do conversor CC-CA <i>Full-Bridge</i> .....            | 56 |
| Figura 27 – Resposta em frequência das funções $G_{FB_i}$ , $G_{C_{MA_i}}$ e $G_{PI_{MA_i}}$ .....                                   | 58 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 28 – Resposta em frequência das funções $G_{FBv}$ , $G_{CMAv}$ e $G_{PIMAv}$ .....  | 60 |
| Figura 29 – Esquema de ligação dos sensores com a DAQ.....   | 63 |
| Figura 30 – Aba um da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.....  | 64 |
| Figura 31 – Aba dois da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.....  | 65 |
| Figura 32 – Aba três da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.....  | 65 |
| Figura 33 – Aba quatro da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.....  | 66 |
| Figura 34 – Aba cinco da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.....   | 67 |
| Figura 35 – Curvas IxV e PxV do painel PV via sistema de monitoramento na condição de operação 01.....                                   | 69 |
| Figura 36 – Valores estimados e simulados de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ via sistema de monitoramento na condição de operação 01..... | 69 |
| Figura 37 – Valores de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ do sistema PV via MATLAB/Simulink na condição de operação 01.....                  | 70 |
| Figura 38 – Curvas IxV e PxV do painel PV via sistema de monitoramento na condição de operação 02.....                                   | 71 |
| Figura 39 – Valores estimados e simulados de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ via sistema de monitoramento na condição de operação 02..... | 72 |
| Figura 40 – Valores de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ do sistema PV via MATLAB/Simulink na condição de operação 02.....                  | 73 |
| Figura 41 – Curvas IxV e PxV do painel PV via sistema de monitoramento na condição de operação 03.....                                   | 74 |
| Figura 42 – Valores estimados e simulados de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ via sistema de monitoramento na condição de operação 03..... | 75 |
| Figura 43 – Valores de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ do sistema PV via MATLAB/Simulink na condição de operação 03.....                  | 76 |
| Figura 44 – Esquemático do protótipo conectado a uma carga local.....  | 79 |
| Figura 45 – Curvas características $I \times V$ e $P \times V$ do painel fotovoltaico.....   | 80 |
| Figura 46 – valores de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ monitorados e estimados.....   | 80 |
| Figura 47 – Valores de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ (1A/div;20V/div;20W/div).....  | 81 |
| Figura 48 - Curvas características $I \times V$ e $P \times V$ do painel fotovoltaico.....   | 82 |
| Figura 49 - Valores de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ monitorados e estimados.....   | 83 |
| Figura 50 - Valores de $V_{PV}$ , $I_{PV}$ e $P_{PV}$ (1A/div;20V/div;100W/div).....   | 83 |
| Figura 51 – Esquemático do protótipo conectado a rede elétrica.....  | 85 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 52 - Valores de $v_s$ e $i_{ca}$ do sistema fotovoltaico (600mA/div;50V).....     | 86 |
| Figura 53 – Valores estimados e monitorados do sistema PV armazenados em formato .txt... | 87 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Especificações para Projeto do controlador PI da malha de corrente do conversor <i>boost</i> quadrático..... | 49 |
| Tabela 2 – Ganhos dos controladores PI da malha de corrente do conversor <i>boost</i> quadrático..                      | 51 |
| Tabela 3 – Especificações para Projeto do controlador PI da malha de tensão do conversor <i>boost</i> quadrático.....   | 52 |
| Tabela 4 – Ganhos dos controladores PI da malha de tensão do conversor <i>boost</i> quadrático...                       | 54 |
| Tabela 5 – Especificações para Projeto do controlador PI da malha de corrente do conversor <i>Full-Bridge</i> .....     | 56 |
| Tabela 6 – Ganhos dos controladores PI da malha de corrente do conversor <i>Full-Bridge</i> .....                       | 58 |
| Tabela 7 – Especificações para Projeto do controlador PI da malha de tensão do conversor <i>Full-Bridge</i> .....       | 59 |
| Tabela 8 – Ganhos dos controladores PI da malha de tensão do conversor <i>Full-Bridge</i> .....                         | 61 |
| Tabela 9 – Valores de radiação solar e temperatura na condição de operação 01.....                                      | 68 |
| Tabela 10 – Valores de radiação solar e temperatura na condição de operação 02.....                                     | 71 |
| Tabela 11 – Valores de radiação solar e temperatura na condição de operação 03.....                                     | 74 |
| Tabela 12 – Valores da carga RC local.....  | 78 |
| Tabela 13 – Resultados experimentais.....   | 84 |



## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>16</b> |
| 1.1 PROBLEMA .....  | 17        |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....   | 18        |
| 1.3 OBJETIVO GERAL.....   | 18        |
| 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 19        |
| <b>2 ESQUEMÁTICO DO TRABALHO DESENVOLVIDO .....</b>                                       | <b>20</b> |
| <b>3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>   | <b>22</b> |
| 3.1 INTERFACE GRÁFICA LABVIEW .....   | 22        |
| 3.1.1 Aquisição de dados .....  | 23        |
| 3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....   | 23        |
| 3.2.1 Painel fotovoltaico.....  | 23        |
| 3.2.2 Célula Fotovoltaica.....  | 24        |
| 3.2.3 Modelo Elétrico Equivalente .....   | 25        |
| 3.2.4 Curva Característica do Painel Fotovoltaico .....                                   | 28        |
| 3.2.5 Topologias de Arranjos Fotovoltaicos.....   | 30        |
| 3.3 CONVERSORES ELEVADORES CC-CC .....  | 31        |
| 3.3.1 Conversor CC-CC <i>Boost</i> Clássico.....  | 32        |
| 3.3.2 <i>Boost</i> Quadrático .....   | 33        |
| 3.4 TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA.....                             | 34        |
| 3.4.1 Tensão Constante.....   | 35        |
| 3.4.2 Perturbe E Observe ( <i>P&amp;O – Pertub &amp; Observe</i> ) .....                  | 35        |
| 3.4.3 Condutância Incremental ( <i>IC – Incremental Conductance</i> ).....                | 36        |
| 3.5 INVERSORES MONOFÁSICOS .....  | 38        |
| 3.5.1 Inversor Fonte de Tensão em Ponte Completa.....                                     | 38        |
| 3.6 SISTEMA PLL.....  | 39        |
| 3.7 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....   | 41        |
| <b>4 MODELAGEM E CONTROLE DOS CONVERSORES .....</b>                                       | <b>42</b> |
| 4.1 MODELAGEM DO CONVERSOR <i>BOOST</i> QUADRÁTICO .....                                  | 42        |
| 4.1.1 Malha de controle de corrente do conversor <i>boost</i> quadrático.....             | 46        |
| 4.1.2 Malha de controle de tensão do conversor <i>boost</i> quadrático.....               | 48        |
| 4.2 METODOLOGIA DE PROJETO DOS CONTROLADORES .....  | 48        |
| 4.2.1 Controlador da malha de corrente do conversor <i>boost</i> quadrático .....         | 50        |
| 4.2.2 Controlador da malha de tensão .....  | 52        |
| 4.3 MODELAGEM E CONTROLE DO CONVERSOR CC-CA <i>FULL-BRIDGE</i> .....                      | 55        |
| 4.3.1 Controlador da malha de corrente .....  | 57        |
| 4.3.2 Controlador da malha de tensão .....  | 59        |
| <b>5 SISTEMA DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DESENVOLVIDO COM O SOFTWARE LABVIEW .....</b> | <b>63</b> |
| 5.1 AQUISIÇÃO DE DADOS .....  | 63        |
| 5.2 INTERFACE GRÁFICA.....  | 64        |
| 5.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....   | 68        |
| <b>6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO.....</b>   | <b>69</b> |
| 6.1 CONDIÇÃO 01 .....   | 69        |
| 6.2 CONDIÇÃO 02 .....   | 72        |
| 6.3 CONDIÇÃO 03 .....   | 74        |
| 6.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO .....   | 77        |
| <b>7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>   | <b>79</b> |
| 7.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A UMA CARGA UTILIZANDO A TÉCNICA DE MPPT P&O.....      | 79        |

|  |           |
|--|-----------|
| 7.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONCETADO A UMA CARGA UTILIZANDO A TÉCNICA DE MPPT TENSÃO CONSTANTE ..... | 83        |
| 7.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONCETADO À REDE ELÉTRICA.....  | 85        |
| 7.4 ARMAZENAMENTO DE DADOS .....   | 87        |
| <b>CONCLUSÕES.....</b>   | <b>89</b> |
| <b>PROPOSTA DE CONTINUIDADE .....</b>  | <b>90</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>91</b> |
| <b>ANEXO A.....</b>  | <b>94</b> |
| <b>ANEXO B.....</b>  | <b>95</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, estudos relacionados com fontes alternativas e renováveis de energia elétrica vêm apresentando um crescimento significativo, devido ao aumento contínuo da demanda energética aliada com a possibilidade de redução da oferta de combustíveis derivados do petróleo, juntamente com preocupações com questões ambientais e impactos econômicos. Dentre as fontes alternativas de energia, a energia elétrica proveniente dos painéis fotovoltaicos (PV, do inglês *Photovoltaic*) é considerada como sendo a fonte de energia natural mais útil, uma vez que é livre, abundante e não poluente (BRITO et al., 2011).

A rápida evolução de fontes de energia solar fotovoltaica resultou na instalação de muitos sistemas em todo o mundo. As principais desvantagens da implantação destes sistemas se devem à baixa eficiência de conversão de energia e ao fato de que o custo da instalação ainda continua elevado. Desta forma, deseja-se que estes sistemas sempre operem em sua capacidade máxima de geração de energia. No entanto, tal esforço requer reconhecimento detalhado de parâmetros do sistema, por exemplo parâmetros meteorológicos como a radiação solar e temperatura do local onde o sistema se encontra instalado, para que seja possível uma estimativa da capacidade máxima de geração de energia por um arranjo PV. Com isso, analisando a corrente e a tensão nos terminais do arranjo PV, pode ser verificado se o mesmo está produzindo a máxima energia que é capaz de gerar (KOUTROULIS; KALAITZAKIS, 2001).

Sistemas de aquisição de parâmetros meteorológicos, juntamente com outros dados operacionais do sistema, têm sido desenvolvidos para coletar e monitorar estes parâmetros, a fim de analisar o desempenho de geração de energia destes sistemas. Todas estas informações obtidas podem ser utilizadas para avaliar o desempenho da planta do sistema durante longos períodos (BLAESSER, 1997; BENGHANEM; MAATI, 1998; FORERO; HERNÁNDEZ; GORDILLO, 2005). Segundo (BLAESSER, 1997), medições realizadas para a varredura das características da curva de corrente por tensão de um arranjo fotovoltaico possuem um imenso valor no diagnóstico do sistema. Elas podem revelar módulos defeituosos, conexões comprometidas e efeitos provocados devido a mudanças repentinas das condições climáticas que, em muitas vezes, acabam sendo imperceptíveis aos olhos dos operadores.

Neste trabalho é proposto o desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real, no qual será possível obter uma caracterização detalhada do comportamento dinâmico de arranjos fotovoltaicos a partir da integração do monitoramento, modelagem e simulação destes sistemas em um mesmo ambiente gráfico, fazendo-se uso do *software*

LabVIEW. Além disso, a integração da modelagem e simulação permite comparar resultados simulados com os dados monitorados, sempre em tempo real, permitindo analisar o comportamento e o desempenho destes sistemas, verificando se o arranjo PV realmente está fornecendo a energia máxima que é capaz de produzir em determinadas condições de temperatura e radiação solar.

O sistema proposto de monitoramento em tempo real é implementado em um protótipo de um sistema fotovoltaico voltado para fins didáticos, alimentando cargas locais ou conectado à rede elétrica, desenvolvido em laboratório. Contudo este sistema de monitoramento pode ser implementado em qualquer planta de sistemas PV (*Photovoltaic*), independentemente da capacidade de geração.

## 1.1 PROBLEMA

Fatores que prejudicam o desempenho de sistemas fotovoltaicos devem-se a presença de possíveis falhas, como painéis que não se encontram em condições normais de operação e variações repentinas das condições climáticas das quais o sistema é submetido. Estas falhas podem ser imperceptíveis aos olhos dos operadores, assim o sistema pode acabar não operando em sua eficiência máxima de geração de energia (BLAESSER, 1997).

Desta forma a implementação de um sistema de monitoramento se torna importante em sistemas fotovoltaicos, onde é possível analisar o comportamento dinâmico dos mesmos. Também é possível verificar se a técnica de MPPT adotada realmente está rastreando o ponto de máxima potência que o arranjo PV é capaz de fornecer em determinadas condições de temperatura e radiação solar, se há presença de possíveis falhas, entre outros.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Os painéis fotovoltaicos apresentam baixa eficiência no processo de transformação de energia solar em energia elétrica. Além disso, o custo da instalação destes sistemas ainda podem ser considerados elevados. Buscando maximizar o desempenho do painel, são utilizadas técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência, também conhecidas com técnicas de MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), as quais gerenciam a relação entre corrente e tensão da saída do arranjo fotovoltaico, buscando o ponto ótimo de operação do sistema. Outro fator importante para a otimização destes sistemas é a implantação de um sistema de monitoramento, a fim de acompanhar o comportamento e desempenho do mesmo. Desta forma, é possível verificar se o sistema realmente está produzindo a máxima energia que é capaz de gerar, mesmo sob influências de determinadas condições de operação, como a temperatura e a radiação solar.

A contribuição deste trabalho se insere no desenvolvimento de um sistema de monitoramento e simulação em tempo real do comportamento dinâmico de sistemas fotovoltaicos fazendo-se o uso da interface gráfica LabVIEW. Com isso será possível realizar uma comparação dos parâmetros simulados a partir do modelo do arranjo PV, e compará-los com os parâmetros monitorados em tempo real em um mesmo ambiente computacional gráfico.

Desta forma será possível verificar se o arranjo PV está fornecendo a máxima potência que é capaz de gerar, bem como a presença de possíveis falhas, como módulos defeituosos e conexões comprometidas. Também é possível observar comportamento do sistema sob rápidas variações climáticas, como a radiação solar incidente e a temperatura, as quais modificam o ponto de máxima potência do arranjo PV. Desta forma, poderá ser verificado o desempenho de técnicas de MPPT implementadas.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento, modelagem e simulação em tempo real de sistemas fotovoltaicos utilizando a interface gráfica LabVIEW, visando monitorar e analisar sistemas fotovoltaicos em operação bem com aqueles em fase de implantação, os quais poderão ser simulados por meio de um modelo matemático.

#### 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar e implementar a técnica de MPPT P&O (do inglês *Perturb and Observe*) para extração da máxima potência de painéis fotovoltaicos;
- Implementar, por meio de simulação, sistemas fotovoltaicos integrados ao algoritmo de MPPT P&O;
- Implementar algoritmos de monitoramento e supervisão em tempo real no ambiente gráfico LabVIEW;
- Avaliar o desempenho da técnica de MPPT P&O a partir de um sistema PV em funcionamento;
- Desenvolver uma interface gráfica de monitoramento e avaliação do desempenho de sistema PV;
- Construção de um protótipo envolvendo o condicionamento de sinais, aquisição de dados, sistema de monitoramento, painel fotovoltaico, conversor CC-CC, Inversor de tensão para conexão com a rede elétrica.
- Estudar e implementar sistemas de condicionamento de sinais e de aquisição de dados relacionados as grandezas de tensão, corrente, temperatura e radiação solar.

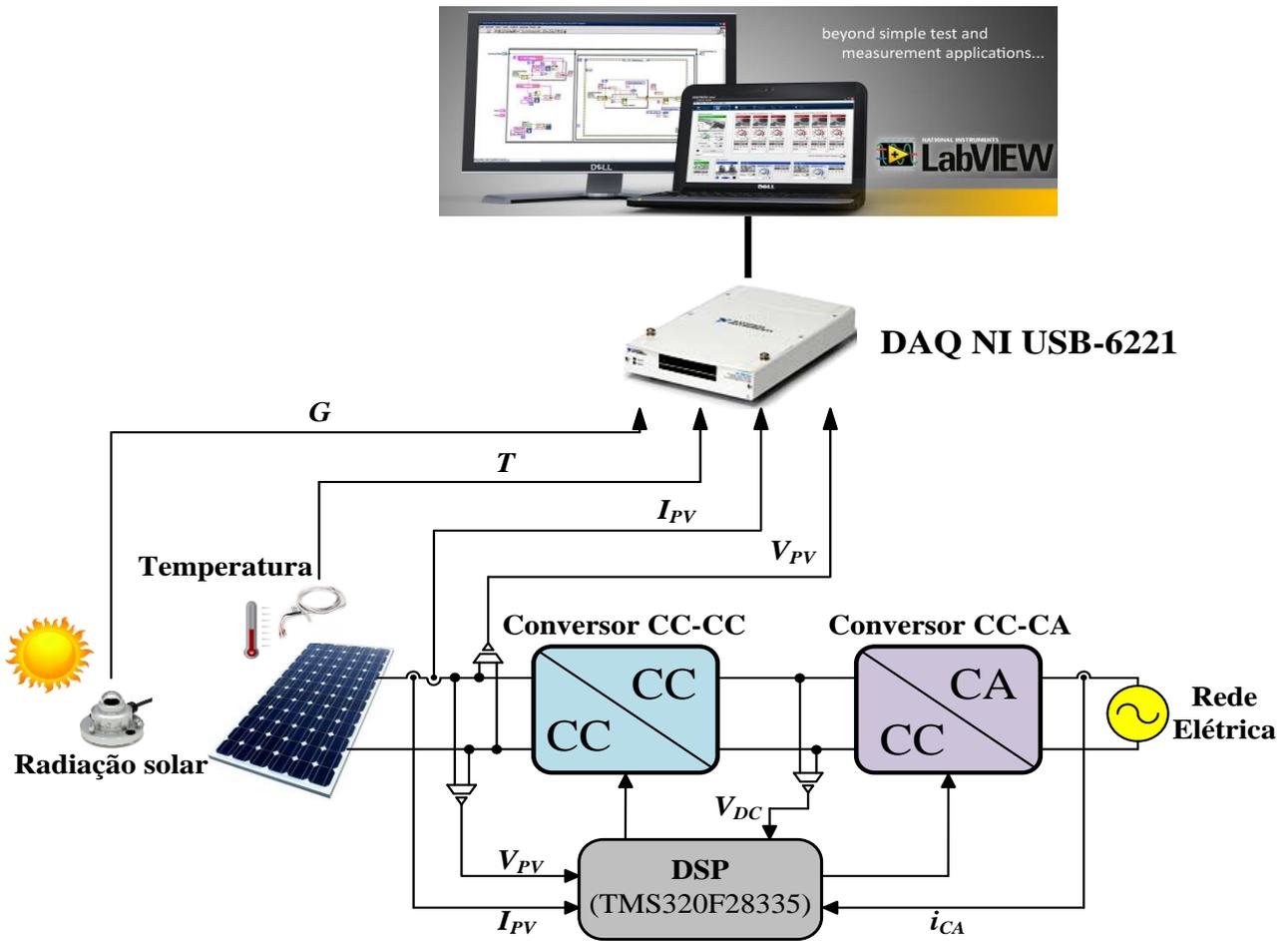
## 2 ESQUEMÁTICO DO TRABALHO DESENVOLVIDO

Este trabalho propõe o desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento em tempo real de sistemas fotovoltaicos utilizando a interface gráfica LabVIEW.

O sistema de monitoramento opera adquirindo parâmetros do sistema, como a radiação solar, temperatura, corrente e tensão nos terminais do arranjo PV, e a partir do modelo matemático do arranjo PV implementado no *software* LabVIEW, pode-se visualizar os principais parâmetros em uma mesma interface gráfica.

Para a aquisição dos sinais será utilizada a placa de aquisição de dados NI USB-6221 da *National Instruments*, que realizará a comunicação em tempo real com o *software* LabVIEW, no qual será responsável pelo processamento destes parâmetros para o monitoramento do sistema. No mesmo ambiente LabVIEW será realizada a simulação do arranjo PV, de forma a observar o comportamento dinâmico do sistema e comparar os dados simulados com os dados adquiridos, possibilitando analisar o desempenho do sistema. A Figura 1 mostra a esquematização de como será implementado o sistema de monitoramento proposto.

## Interface gráfica LabVIEW



**Figura 1 – Esquemático do sistema de monitoramento proposto.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Os algoritmos envolvidos no controle dos conversores de potência serão embarcados em um controlador digital de sinais modelo F28335 da *Texas Instruments*.

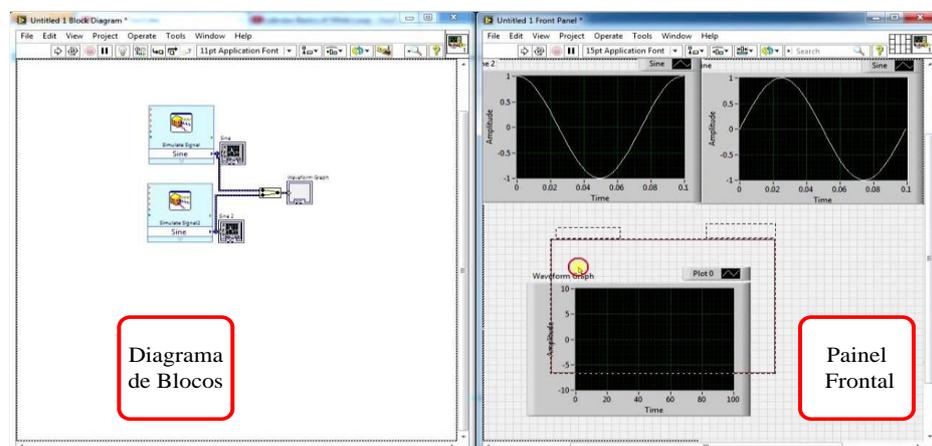
Na próxima seção será apresentado o desenvolvimento teórico, ou seja, serão abordados os conceitos teóricos necessários para a compreensão do desenvolvimento do sistema de monitoramento proposto e do protótipo onde será implementado este sistema.

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 INTERFACE GRÁFICA LABVIEW

O LabVIEW com sua linguagem de programação gráfica, linguagem G, é ideal para criar aplicações flexíveis, escaláveis e sofisticadas de instrumentos que atendem às necessidades específicas de um projeto de pesquisa. Pesquisadores podem desenvolver aplicações para interfaces com sinais reais, analisar e visualizar dados, desenvolver e algoritmos, integrar bibliotecas externas de computação científica e linguagens de programação baseadas em texto e implementar diretamente a aplicação final usando tecnologia comercialmente disponível, tudo de maneira rápida e com custo mínimo de desenvolvimento. Independente do conhecimento de programação do usuário, o LabVIEW torna o desenvolvimento rápido e fácil na comunidade científica.

Os programas desenvolvidos no LabVIEW são chamados de *VI's* (*Virtual Instruments*). Toda *VI* é composta, basicamente, de duas partes principais: o *Front Panel* (Painel Frontal) e o *Block Diagram* (Diagrama de Blocos). O painel frontal pode ser entendido como uma interface do usuário, no qual estão presentes os controles, entrada de dados e valores, e os indicadores que representam as saídas de dados e resultados. O diagrama de blocos é equivalente a código fonte do programa, no qual estão presentes todas as estruturas de cálculo, de repetição, captura de sinais e outras, as quais são conectadas por “linhas” que representam fluxos de dados. A Figura 2 mostra um exemplo de uma *VI*.



**Figura 2 – Exemplo de uma VI.**  
**Fonte: Autoria própria.**

### 3.1.1 Aquisição de dados

O LabVIEW fornece uma gama de elementos necessários para do desenvolvimento de ferramenta flexível para resolução de problemas, sendo eles:

- Ferramentas de aquisição de dados;
- Ferramentas de análise de dados;
- Ferramentas de visualização de dados.

Este *software* ainda permite analisar e visualizar estes dados em tempo real (*online*) enquanto eles fazem a aquisição. Devido a isso o LabVIEW é uma ferramenta poderosa no que diz respeito a aquisição e processamento de dados, apresentando uma ampla aplicabilidade em diversas funções, principalmente no desenvolvimento de sistemas de monitoramento.

A *National Instruments* oferece uma família completa de hardware de aquisição de dados para aplicações de bancada, portáteis e industriais que usam diversos tipos de barramentos, incluindo *PCI/PCI Express, CompactPCI, PXI/PXIe, PCMCIA, USB, Ethernet e IEEE 1394*, para diversos sistemas operacionais, incluindo *Windows, Linux*, entre outros.

O condicionamento de sinais é outro elemento importante dos sistemas de aquisição de dados pois envolve amplificação, isolamento, atenuação, mudanças de níveis, filtragem e outras operações que são aplicadas a sinais antes da aquisição (NATIONAL INSTRUMENTS, 2015).

## 3.2 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

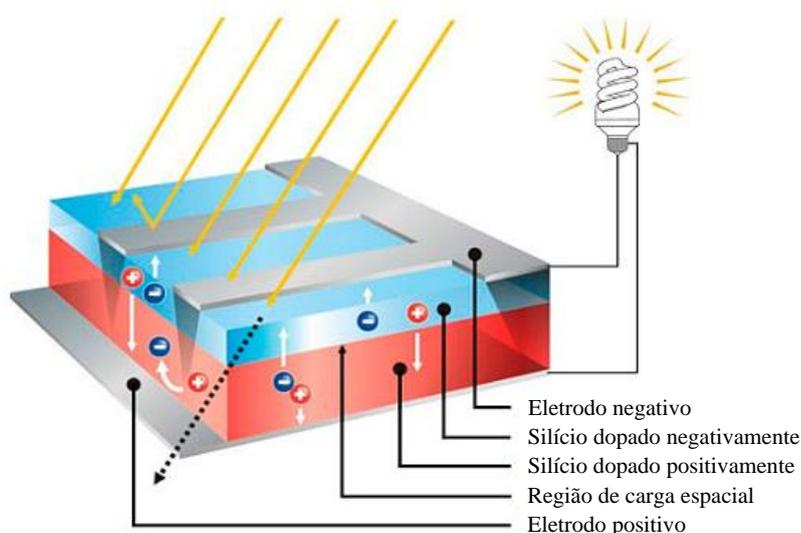
### 3.2.1 Painel fotovoltaico

O painel fotovoltaico é constituído a partir de células fotovoltaicas, onde estas representam a menor unidade em um sistema fotovoltaico. Dentre as fontes alternativas de geração de energia elétrica, a energia proveniente dos painéis fotovoltaicos vem sendo considerada como fonte de energia natural mais útil, uma vez que é livre, abundante, não produz gases poluentes e se encontra distribuída ao longo da Terra (BRITO et al. 2011).

Outras características dos painéis fotovoltaicos são sua alta confiabilidade, destacam-se por ser uma fonte silenciosa, apresentam possibilidades de associações, necessitam de baixa manutenção, provocam baixo impacto na fauna e flora local e podem ser facilmente integrados às construções, gerando eletricidade localmente, sem a necessidade de linhas de transmissão que acarretam perdas e alto impacto ambiental (IMHOFF, 2007).

### 3.2.2 Célula Fotovoltaica

A célula fotovoltaica representa a menor unidade em um sistema fotovoltaico. Trata-se de um dispositivo semicondutor que converte a energia luminosa incidente em energia elétrica. Estas células são formadas, basicamente, por duas camadas de material semicondutor formando uma junção p-n, também denominados fotodiodos, como mostra a Figura 3.



**Figura 3 – Esquema básico de uma célula fotovoltaica.**  
Fonte: Adaptado de (FOTOVOLTEC, 2015)

Atualmente cerca de 80% das células fotovoltaicas são baseadas em alguma variação de silício (Si). Os principais materiais utilizados em células fotovoltaicas são apresentados a seguir (PORTAL SOLAR, 2015):

- Silício Monocristalino

A tecnologia monocristalina é a mais antiga e também uma das mais caras. Contudo possui eficiência mais elevada, variando de 14 a 21%. São produzidas a partir de um único cristal de silício ultrapuro, onde o mesmo é fatiado formando lâminas de silício individuais, onde são tratadas e transformadas em células fotovoltaicas.

- Silício Policristalino

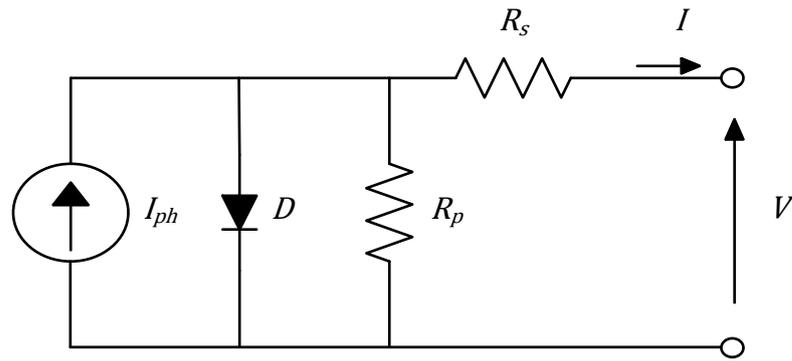
A grande diferença entre as células monocristalinas e policristalinas está no método utilizado na fundição dos cristais. Nas células policristalinas os cristais de silício são fundidos em um bloco, onde há a formação de múltiplos cristais. Quando este bloco é fatiado, é possível observar esta formação múltipla de cristais. A eficiência destas células varia de 13 a 16,5%.

- Silício Amorfo (a-Si)

Apresentam técnica de fabricação chamada de empilhamento, onde várias camadas de células solares de silício amorfo podem ser combinadas. Apresentam eficiência que varia de 6 a 9%. Apesar de possuírem eficiências menores em relação as células mono e policristalinas, apenas 1% do silício utilizado em células solares de silício cristalino é necessário nas células solares de silício amorfo. Contudo, o empilhamento é caro.

### 3.2.3 Modelo Elétrico Equivalente

A Figura 4 mostra o circuito elétrico equivalente simplificado que descreve o comportamento eletrônico de uma célula fotovoltaica (CASARO; MARTINS,2008).



**Figura 4 – Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.  
Fonte: Autoria Própria.**

Com este modelo matemático equivalente e aplicando a primeira lei de Kirchhoff, é possível equacionar o comportamento da corrente gerada pela tensão de saída, dada por:

$$I = I_{ph} - I_r \left[ e^{q \left( \frac{V + IR_s}{nkT} \right)} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1)$$

Onde:

$V, I$  - Tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula fotovoltaica;

$I_{ph}$  - Fotocorrente;

$I_r$  - Corrente de saturação reversa da célula;

$q$  - Carga do elétron ( $1,6 \times 10^{-19}$  C);

$n$  - Fator de idealidade da junção p-n;

$k$  - Constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K);

$T$  - Temperatura ambiente (K);

$R_s, R_p$  - Resistências série e paralela do circuito equivalente.

Como pode ser observado na Figura 4, o circuito elétrico equivalente da célula fotovoltaica é composto por uma fonte de corrente  $I_{ph}$ , que depende diretamente dos parâmetros  $G$  (Irradiação solar) e  $T$  (Temperatura ambiente), verificadas a partir das expressões (2) e (3). As resistências representam as características não ideais da célula, onde  $R_s$  é a resistência em série que representa as perdas por condução e  $R_p$  é a resistência em paralelo que representa as correntes de fuga. O Fator de idealidade ( $n$ ) da junção p-n depende da tecnologia empregada no painel fotovoltaico. Usualmente, em células fotovoltaicas produzidas de silício cristalino o

valor do fator de idealidade é igual 2, enquanto que para células de silício amorfo o valor é igual a 1,2.

Nas equações (2), (3) e (4) são mostrados como podem ser obtidos os parâmetros  $I_{ph}$ ,  $I_r$  e  $I_{rr}$ , respectivamente.

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha(T - T_r)] \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (2)$$

$$I_r = I_{rr} \left( \frac{T}{T_r} \right)^3 e^{\left[ \left( \frac{qE_G}{nk} \right) \left( \frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (3)$$

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} \frac{V_{oc}}{R_p}}{e^{\left( \frac{qV_{oc}}{n k T_r} \right) - 1}} \quad (4)$$

Onde:

$I_{sc}$  - Corrente de curto-circuito por célula;

$V_{oc}$  - Tensão de circuito aberto da célula;

$\alpha$  - Coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$ ;

$T_r$  - Temperatura de referência (298 K);

$I_{rr}$  - Corrente de saturação reversa de referência (STC – *Standard Test Conditions*);

$G$  - Irradiação solar ( $\text{W/m}^2$ );

$E_G$  - Energia da banda proibida (1,1eV).

A Equação (1) do circuito não pode ser resolvida algebricamente. Neste caso é necessário utilizar algum método numérico, tal como o método de Newton Raphson (CASARO; MARTINS, 2008) para obter os valores de tensão e corrente. O método iterativo utilizado de Newton-Raphson pode ser representado a seguir:

$$x_{n+1} = x_n - f(x_n)/f'(x_n) \quad (5)$$

Onde:

$n$  - n-ésima iteração do algoritmo;

$f'(x_n)$  - derivada da função  $f$  em  $x_n$ .

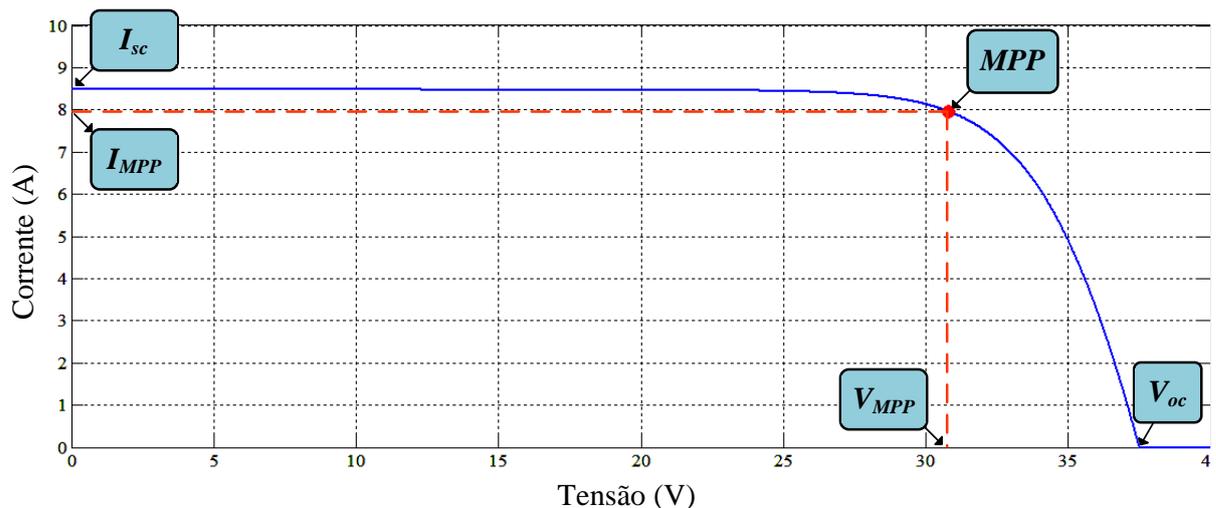
Com a aplicação deste método numérico é possível encontrar valores de correntes correspondentes. Desta forma, para determinar a corrente  $I$  deve ser utilizada a expressão (6), enquanto que a expressão (7) corresponde a sua derivada.

$$f(I) = I_{ph} - I - I_r \left[ e^{q \left( \frac{V+IR_s}{nkT} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (6)$$

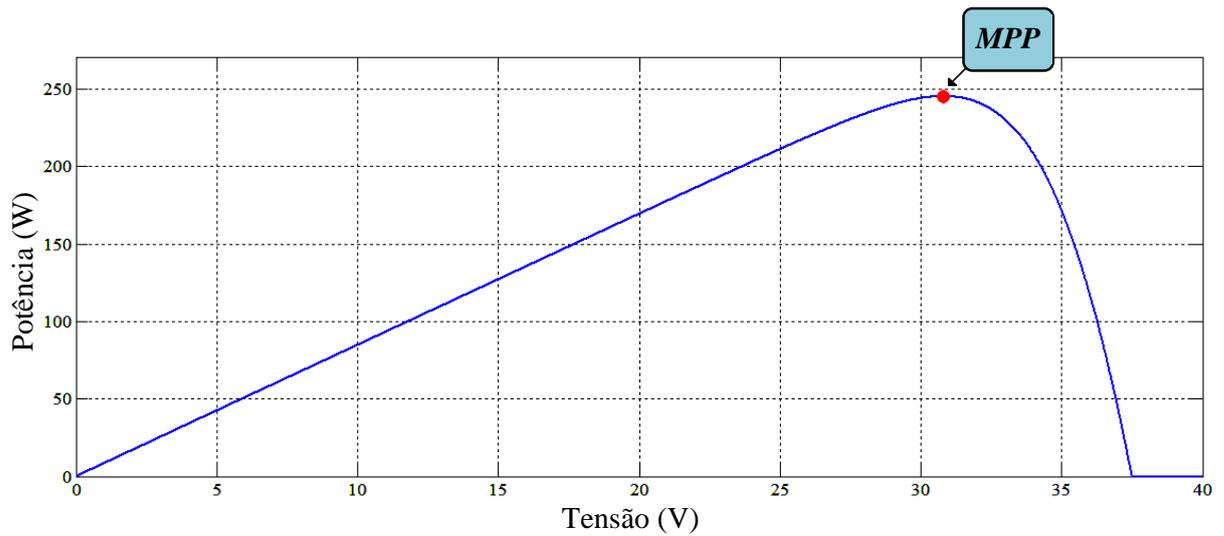
$$f'(I) = -1 - I_r e^{q \left( \frac{V+IR_s}{nkT} \right)} \frac{qR_s}{nkT} - \frac{R_s}{R_p} \quad (7)$$

### 3.2.4 Curva Característica do Painel Fotovoltaico

A solução das equações do modelo matemático da célula fotovoltaica resulta em uma curva característica  $I \times V$  não linear de um painel fotovoltaico, como mostra a Figura 5. O ponto *MPP* (*Maximum Power Point*) significa a região de operação em que o painel PV opera com a máxima potência,  $I_{sc}$  é a corrente de curto circuito,  $V_{oc}$  é a tensão de circuito aberto,  $V_{MPP}$  e  $I_{MPP}$  corresponde a tensão e a corrente no ao ponto de potência máxima do painel PV, respectivamente (OLIVEIRA, 2015). Também é possível determinar outro parâmetro como a potência máxima por meio da curva  $P \times V$ , mostrada na Figura 6.



**Figura 5 – Curva característica  $I \times V$  do painel fotovoltaico.  
Fonte: Autoria própria.**

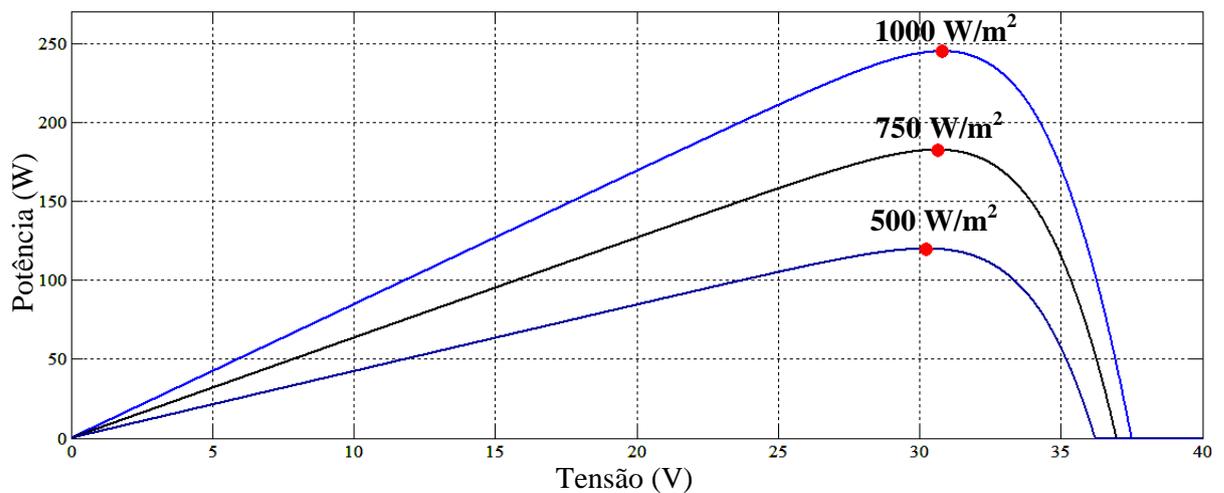


**Figura 6 – Curva característica  $P \times V$  do painel fotovoltaico.  
Fonte: Autoria própria.**

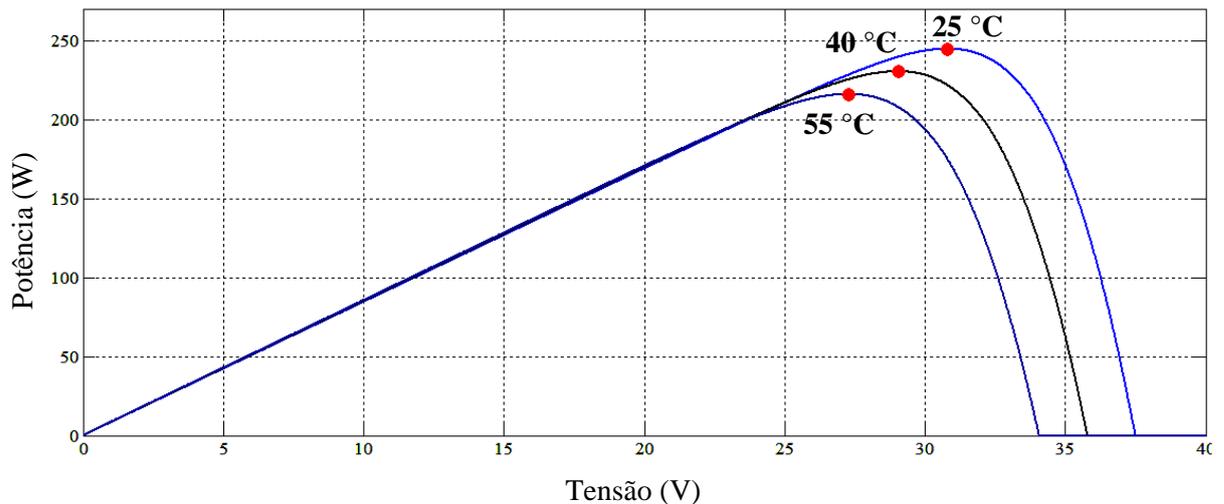
Variações nas condições climáticas, como radiação solar e temperatura, nas quais o painel é submetido resultam em mudanças do ponto de operação de um arranjo fotovoltaico, como pode ser verificado nas Figuras 7 e 8.

A radiação solar que incide sobre um painel fotovoltaico influencia diretamente na corrente que o mesmo é capaz de produzir. Por outro lado, a tensão é pouco influenciada pela variação da radiação solar.

Variação da temperatura pouco influencia na corrente gerada pelo painel, no entanto a tensão apresenta variação mais considerável.



**Figura 7 – Característica de potência do PV para diferentes níveis de radiação solar.  
Fonte: Autoria própria.**



**Figura 8 – Característica de potência do PV para diferentes níveis de temperatura.**

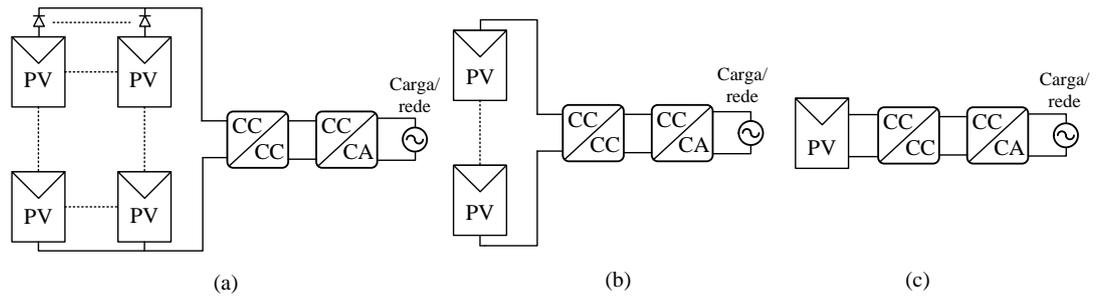
**Fonte: Autoria própria.**

Para o levantamento das curvas características  $I \times V$  e  $P \times V$  foi utilizado o *software* MATLAB, utilizando as informações contidas no *datasheet* do painel Sunmodule SW 245 poly, presente no Anexo A, sendo este o painel presente em laboratório que será utilizado para a execução deste trabalho.

A análise das curvas características  $I \times V$  e  $P \times V$  é de grande importância na caracterização de um sistema fotovoltaico, pois é a partir desta análise que se obtêm os principais parâmetros que determinam a qualidade e desempenho do projeto.

### 3.2.5 Topologias de Arranjos Fotovoltaicos

São três as variações de topologias mais utilizadas em sistemas fotovoltaicos, sendo elas a topologia centralizada, topologia em *string* e a topologia *AC module*, onde são mostradas nas Figuras 9(a), 9(b) e 9(c), respectivamente (KJER, 2005; CALAIS, MYRZIK, 2002).



**Figura 9 – Topologias de sistemas PV. (a) Topologia centralizada. (b) Topologia string. (c) Topologia AC module.**  
**Fonte: Autoria própria.**

A tendência em aplicações de baixa potência, como é caso do presente trabalho, é a utilização da topologia *AC modules*, também denominados de micro inversores. Esta topologia apresenta como principal característica a utilização de um único painel, onde o alcance de potência é tipicamente de 200 a 300W (BRITO et al, 2011; GALOTTO JUNIOR et al, 2010).

As vantagens da utilização desta topologia são descritas a seguir:

- A técnica de MPPT utilizada se torna mais eficiente devido a utilização de um único painel;
- O sistemas apresenta maior confiabilidade e modularidade;
- Facilidade de manutenção;
- Não há sombreamento parcial.

Apresenta-se como desvantagem desta topologia o baixo nível de tensão de entrada, onde o uso de um estágio elevador deste nível de tensão se faz necessário, no qual reflete em uma dificuldade de projetar um sistema com alto rendimento.

### 3.3 CONVERSORES ELEVADORES CC-CC

Os conversores CC-CC podem exercer dupla função em um sistema fotovoltaico, cuja a principal é adequar o nível de tensão gerado nos terminais do painel no nível de tensão desejado no barramento CC, possibilitando com isso padronizar a tensão dos equipamentos que serão conectados ao barramento CC. A outra função que pode ser incorporada aos conversores estáticos CC-CC que conectam os painéis fotovoltaicos ao barramento CC é a função de

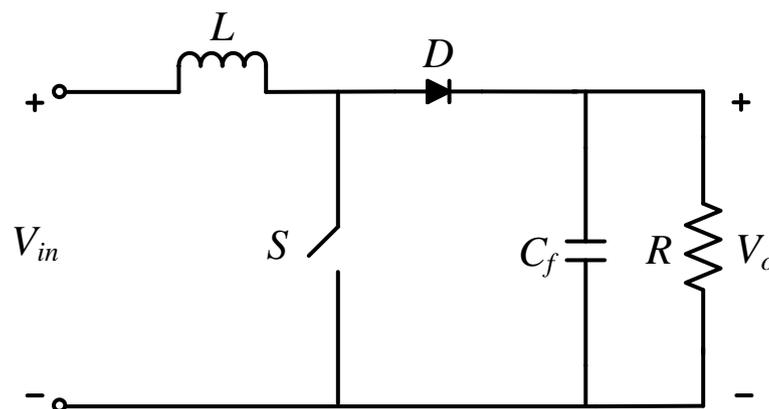
seguidor do ponto de máxima potência do painel, imposta pelas técnicas de MPPT, onde o ponto de máxima potência de um painel varia com o nível de radiação e com a temperatura. Desta forma o MPPT possibilita extrair a máxima potência gerada pelos painéis fotovoltaicos em diferentes condições de insolação e de temperatura (ROSEMBACK, 2004).

Como a maioria dos painéis apresentam eficiência não superior a 23%, é importante a determinação da topologia adequada do conversor para determinadas aplicações, pois o condicionamento da energia fornecida pelo arranjo PV deve apresentar um rendimento maior que 90%, no qual permite que a energia oriunda do PV seja aproveitada da melhor forma possível (ALVES, 2013).

A seguir serão apresentadas algumas topologias de conversores CC-CC que podem ser utilizados a fim de elevar a tensão disponibilizada pelos painéis fotovoltaicos.

### 3.3.1 Conversor CC-CC *Boost* Clássico

O conversor *boost* clássico é a topologia mais básica e mais utilizada para o estágio de elevação da tensão em sistemas fotovoltaicos, pois apresenta baixas perdas condutivas e simplicidade (TSENG; LIANG, 2004). Sua configuração é apresentada pela Figura 10.



**Figura 10 - Conversor *boost* clássico.**  
**Fonte: Autoria própria.**

O ganho estático deste conversor é dado pela expressão (8), onde  $D$  é razão entre o tempo no qual a chave  $S$  se encontra ligada ( $T_{on}$ ) e o tempo total do período ( $T_s$ ), também denominado como razão cíclica, sendo representado pela expressão (9).

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{1-D} \quad (8)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (9)$$

A variável  $G$  é o ganho estático em tensão do conversor,  $V_o$  é a tensão média de saída e  $V_{in}$  é a tensão média da entrada do conversor.

Nota-se, a partir da expressão (8), que o ganho de tensão deste conversor tende ao infinito quando a razão cíclica se aproxima ao valor unitário. Na prática, o ganho aplicado neste conversor é normalmente limitado abaixo de 10 ( $G < 10$ ), devido as perdas associadas ao indutor, capacitor, a chave de potência e o diodo (TSENG; LIANG, 2004), ocasionando queda do rendimento deste conversor para valores elevados de razão cíclica.

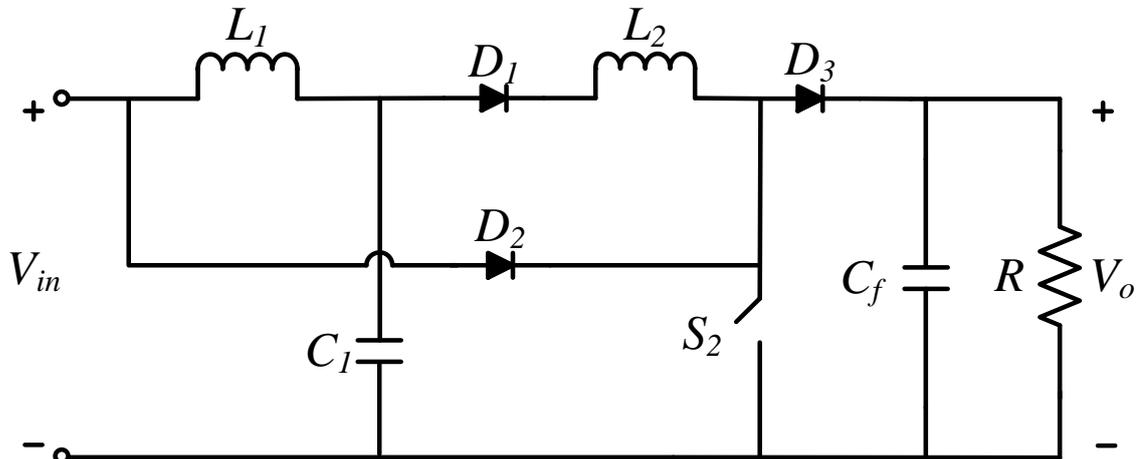
Outra questão importante que deve ser levado em consideração é que se a razão cíclica  $D$  trabalhasse próximo ao valor unitário, uma pequena variação de  $D$  implicaria em uma elevada variação de  $G$ , dificultando o sistema de controle aplicado no conversor e a resposta dinâmica do mesmo (ALVES, 2013).

### 3.3.2 Boost Quadrático

Uma forma para contornar a necessidade de se trabalhar com ganhos elevados de conversores CC-CC é a utilização de um conversor denominado *boost* quadrático. Também conhecido na literatura como conversor *boost* em cascata de dois estágios (LUO; YE, 2004), este conversor apresenta um ganho estático de tensão igual ao quadrado do ganho do conversor *boost* clássico. O ganho  $G$  deste conversor é apresentado na expressão (9).

$$G = \left(\frac{1}{1-D}\right)^2 \quad (9)$$

Como desvantagem deste conversor, há um aumento do número de elementos, sendo necessários dois diodos, um indutor e um capacitor a mais que o conversor *boost* clássico. Sua configuração é apresentada pela Figura 11.



**Figura 11 – Conversor *boost* quadrático.**  
Fonte: Autoria própria.

### 3.4 TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA

Embora todas as vantagens apresentadas pela geração de energia elétrica por parte dos painéis fotovoltaicos, a eficiência da conversão de energia é atualmente baixa e o custo inicial para sua implantação ainda é considerada elevada. Desta forma, torna-se necessária a utilização de técnicas de extração da máxima potência (MPPT) a fim de obter o melhor aproveitamento de energia elétrica gerada por um arranjo PV. Como apresentado no Capítulo 6, há apenas um ponto de máxima potência (*MPP*) onde o mesmo varia de acordo com as condições climáticas.

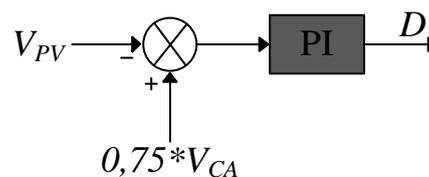
Em (BRITO et al., 2013) são apresentadas diversas técnicas de MPPT presentes na literatura. Algumas destas técnicas que são amplamente utilizadas serão apresentadas nas subseções a seguir.

### 3.4.1 Tensão Constante

Este método utiliza resultados empíricos, indicando que a tensão no MPP ( $V_{MPP}$ ) é da ordem de 70 a 80% da tensão de circuito aberto ( $V_{oc}$ ) do painel fotovoltaico para a condição atmosférica padrão.

A tensão nos terminais do PV varia muito pouco com a variação da radiação solar ao longo do dia. Assim, assegurando-se que a tensão no módulo constante é possível operar próximo do MPP. Contudo, esta técnica torna-se interessante de ser aplicado em regiões onde a temperatura não sofre grandes variações ao longo do dia.

A implementação desta técnica é realizada com uma malha fechada em tensão conforme diagrama da Figura 12. Este método necessita apenas de um sensor para a tensão de saída do PV.



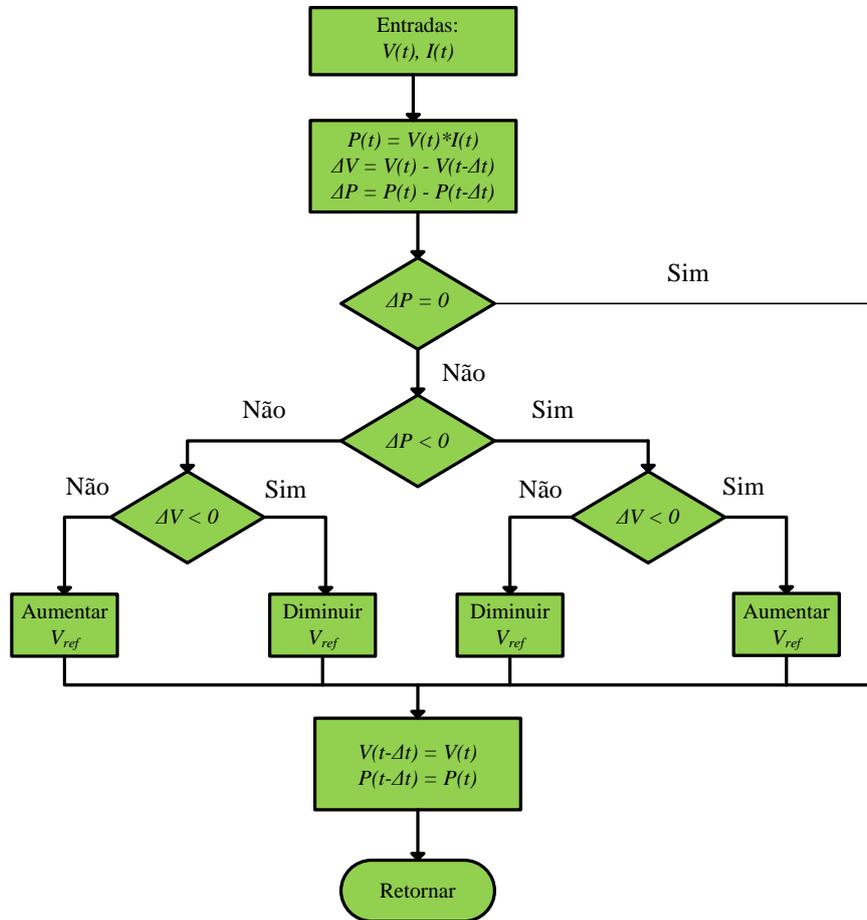
**Figura 12 – Esquema do método de MPPT tensão constante.**  
**Fonte: Autoria própria**

### 3.4.2 Perturbe E Observe (*P&O – Pertub & Observe*)

O princípio de funcionamento deste método de MPPT está na busca do ponto de máxima potência (MPP) observando as variações de tensão e potência do painel, onde sua operação consiste em incrementar ou decrementar periodicamente o sinal de saída do referido algoritmo. Caso a tensão varie e a potência aumente, o sistemas de controle muda o ponto de operação naquela direção; caso contrário, muda o ponto de operação na direção oposta. Uma vez que o sentido para a variação da tensão é conhecido, a tensão é variada a uma taxa constante.

É importante salientar que este método possui alguns inconvenientes, tal que grandes taxas de variação causa grandes oscilações ao redor do ponto de máxima potência, enquanto que para pequenas taxas de variação resulta em uma resposta lenta do sistema. Esta taxa é um parâmetro que deve ser ajustado para possibilitar o balanço entre a resposta mais rápida com a

menor oscilação em regime permanente (BRITO et al., 2013; OLIVEIRA, 2015). O fluxograma básico deste método é apresentado na Figura 13 abaixo.



**Figura 13 – Fluxograma do método de MPPT P&O.**  
Fonte: Autoria própria.

### 3.4.3 Condutância Incremental (IC – Incremental Conductance)

Este método de MPPT é baseado no fato de que a inclinação da curva de potência do PV é nula no ponto de máxima potência ( $dP/dV = 0$ ), positiva à esquerda e negativa à direita. Este método busca o MPP de maneira similar ao método *P&O*. Assim, o MPP pode ser obtido em função do incremento na condutância do sistema PV (BRITO et al., 2013). Através da expressão (10) é possível obter as condições do algoritmo *IC*, onde (11) representa a condição do MPP, (12) representa a condição à esquerda e (13) representa a condição à direita do MPP. O fluxograma deste método é apresentado na Figura 14.

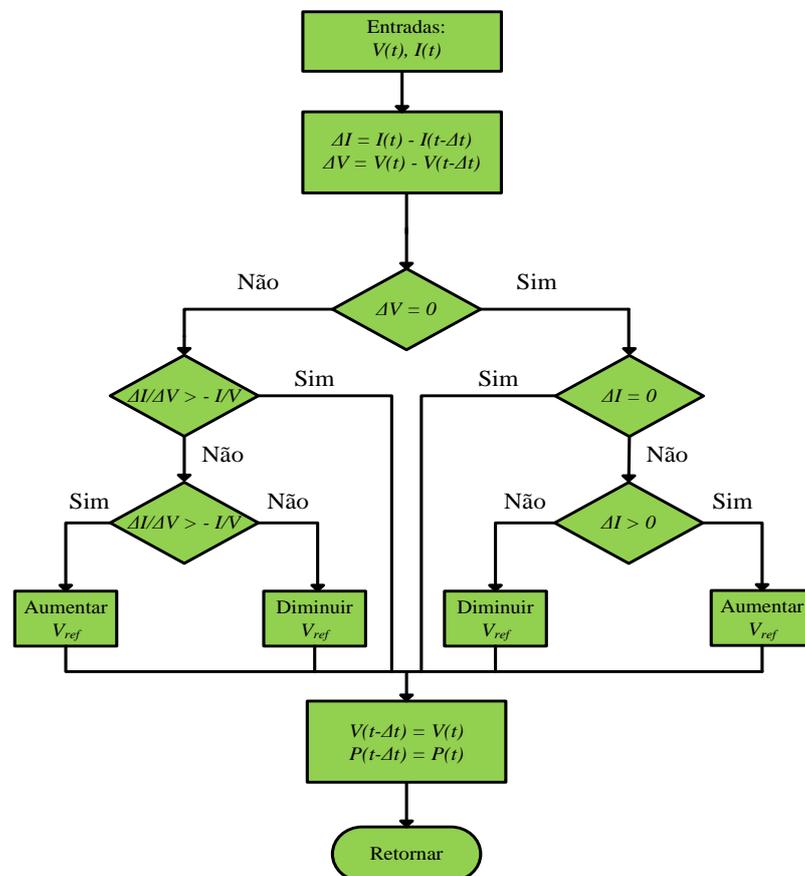
$$\frac{dp}{dv} = \frac{d(vi)}{dv} = i + v \left( \frac{di}{dv} \right) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\Delta i}{\Delta v} = -\frac{i}{v} \quad (11)$$

$$\frac{\Delta i}{\Delta v} > \frac{i}{v} \quad (12)$$

$$\frac{\Delta i}{\Delta v} < \frac{i}{v} \quad (13)$$

As vantagens deste método consistem na sua implementação que pode ser tanto por meio digital quanto analógico, e também, uma vez alcançado o MPP, as perturbações são encerradas até que se observem alterações na corrente do painel, além de possuir um bom fator de rastreamento. Um ponto chave deste método é que ele não perde facilmente o rastreamento do ponto ótimo devido a mudanças climáticas bruscas. Já as suas principais desvantagens estão relacionadas ao cálculo das derivadas de potência, provocando um aumento da complexidade na implementação do algoritmo.



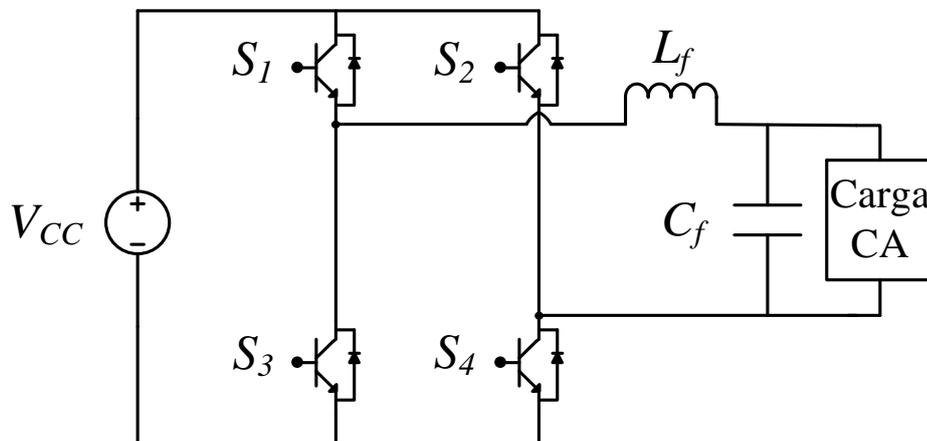
**Figura 14 – Fluxograma do método de MPPT IC.**  
Fonte: Autoria própria

### 3.5 INVERSORES MONOFÁSICOS

Os painéis fotovoltaicos geram energia na forma CC, ou seja, corrente contínua. Contudo, a maioria dos equipamentos eletroeletrônicos comercialmente encontrados necessita de energia na forma CA, ou seja, corrente alternada. Para isso, faz-se necessária a utilização de inversores entre a carga e o sistema fotovoltaico para condicionar a energia fornecida pelos painéis à forma comercial, ou seja, tensões de 127V ou 220V CA, na frequência de 60 Hz. Esta padronização também se faz necessário quando o inversor é conectado à rede elétrica, para que o sistema fotovoltaico opere injetando potência ativa na rede.

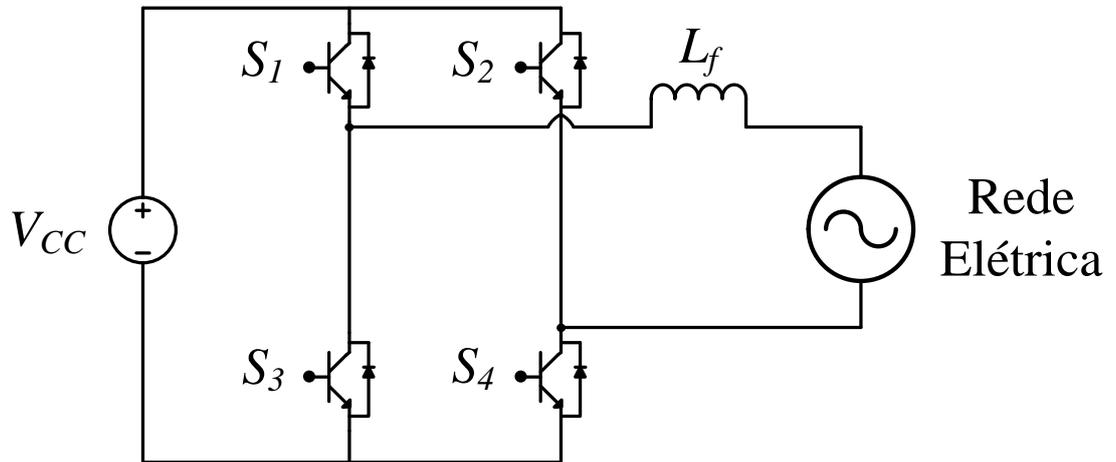
#### 3.5.1 Inversor Fonte de Tensão em Ponte Completa

A estrutura de potência do conversor CC-CA fonte de tensão em ponte completa (VSI – *Voltage Source Inverter Full-Bridge*) é apresentada na Figura 15. Este conversor consiste de dois braços inversores compostos por um par de chaves comandadas em antiparalelo com diodos de roda-livre. Para uma dada potência, os níveis de tensão e corrente, nos semicondutores, serão os menores se comparados com outras topologias monofásicas (MARTINS; BARBI, 2008). Essa característica se constitui uma das grandes vantagens dessa estrutura, razão pela qual esta topologia foi escolhida para ser implementada neste trabalho.



**Figura 15 – Inversor monofásico VSI Full-Bridge.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Para sistemas fotovoltaicos conectado à rede elétrica a estrutura de potência do inversor é adaptada como mostra a Figura 16, onde este apresenta um comportamento como fonte de corrente.



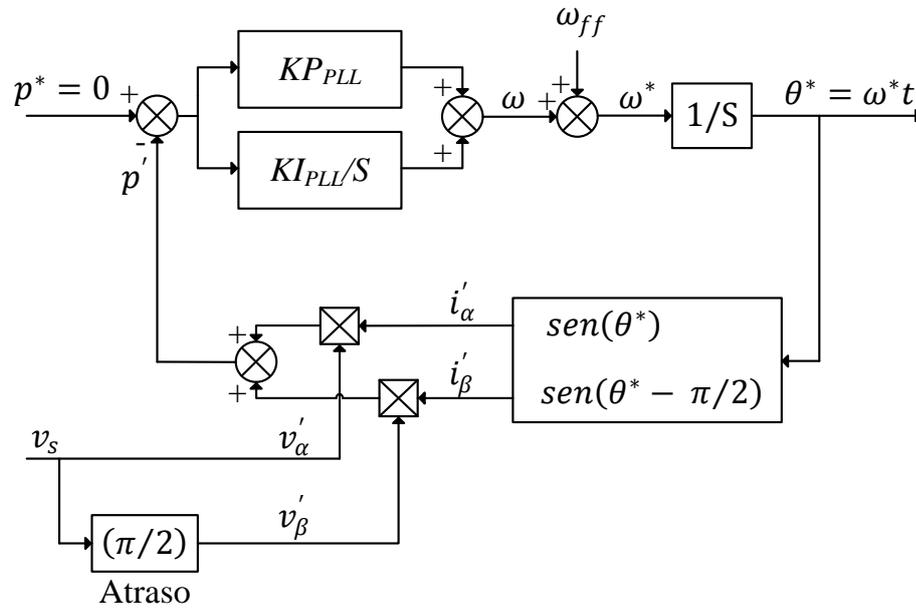
**Figura 16 – Inversor monofásico VSI Full-Bridge conectado à rede elétrica. Fonte: Autoria Própria.**

### 3.6 SISTEMA PLL

Em determinadas aplicações envolvendo conversores estáticos de potência, algumas informações da rede elétrica precisam ser obtidas, tais como ângulo de fase e frequência. Essas informações são utilizadas para o sincronismo entre estes conversores e a rede, para que seja possível a injeção da energia proveniente do sistema PV na mesma.

Essas informações da rede são obtidas através de sistemas PLL (*Phase-Locked Loop*). Na literatura, diversas topologias de sistemas PLL monofásicas têm sido apresentadas (SILVA, S. A. O. et al., 2006; MODESTO, 2008; BACON et al., 2013).

Para a aplicação neste trabalho foi considerado o sistema PLL monofásico (SILVA, S. A. O. et al., 2008), cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 17.



**Figura 17 – Diagrama de blocos do sistema PLL monofásico.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

O sistema PLL apresentado na Figura 18 é baseado na teoria da potência ativa instantânea trifásica (p-PLL). Assim, como este sistema utiliza o eixo estacionário bifásico de coordenadas  $\alpha\beta$ , uma tensão fictícia de quadratura  $v'_\beta$  necessita ser gerada, de modo a assegurar que esta seja ortogonal à tensão monofásica medida. Para obtenção do sistema bifásico fictício, a tensão monofásica  $v_\alpha$  medida da rede elétrica, é considerada a própria tensão  $v'_\alpha$ , e para a obtenção da tensão  $v'_\beta$ , realiza-se uma defasagem de 90 graus na tensão  $v_\alpha$ .

A equação (14) apresenta a matriz que representa este eixo estacionário bifásico fictício, e a equação (15) apresenta a matriz que representa as correntes fictícias. Desta forma a potência ativa instantânea fictícia do sistema PLL pode ser calculada por (16).

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha(\omega t) \\ v_\alpha(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p \text{sen}(\omega t) \\ V_p \text{sen}(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha(\theta^*) \\ i_\alpha(\theta^* - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$p' = V_p \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\theta^*) + V_p \text{sen}(\omega t - \pi/2) \text{sen}(\theta^* - \pi/2) \quad (16)$$

O objetivo do sistema PLL é anular a componente  $p'$  da potência instantânea fictícia. Assim, quando  $p'$  for igual a zero, o sinal de saída do PLL estará atracado com a componente de frequência fundamental do sinal de entrada. Portanto, a dinâmica do PLL deverá ajustar a saída do controlador PI na frequência angular de referência  $\omega^* = 2\pi f$ , onde  $f$  é a frequência nominal da rede elétrica. O ângulo de fase  $\theta^*$  é obtido pela integração de  $\omega^*$ , a qual deverá ser idêntica a frequência angular da rede  $\omega$ . Desse modo,  $\theta^*$  é usado para calcular as correntes fictícias  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  devem ser ortogonais às tensões  $v'_\alpha$  e  $v'_\beta$ , respectivamente.

### 3.7 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Foi realizada uma breve abordagem a respeito do *software* LabVIEW, apresentando suas principais características pelas quais este ambiente gráfico foi adotado para o desenvolvimento do sistema de monitoramento em tempo real proposto.

Foi apresentado o princípio de geração de energia por parte de um painel fotovoltaico, também suas características, o modelo elétrico equivalente de uma célula, bem como as topologias utilizadas de arranjos fotovoltaicos, onde a topologia *AC module* será considerada na execução do presente trabalho.

São amplas as possibilidades de escolhas de topologias para conversores CC-CC elevadores na literatura. Cada topologia apresenta vantagens e desvantagens, podendo ser operacionais, de projeto e de custo, onde este último fator apresenta grande relevância na escolha da estrutura, onde o projetista deve decidir qual a melhor topologia para determinada aplicação. Para a utilização no protótipo a ser desenvolvido optou-se pelo conversor CC-CC *Boost* quadrático, pela necessidade de um ganho elevado devido a utilização de um único painel PV.

Foi apresentado a importância da aplicação de técnicas de MPPT a fim de maximizar a eficiência do painel fotovoltaico. Para a aplicação deste trabalho será considerado a técnica *P&O*, pois, além de possuir um bom rastreamento do ponto de máxima potência, não possui uma implementação complexa.

Para o estágio de conversão CC-CA foi apresentado o inversor *Full-Bridge* onde este fará a conexão do sistema com a rede elétrica. Para esta conexão o sistema PLL se faz necessário para que ocorra o sincronismo do sistema com a rede elétrica.

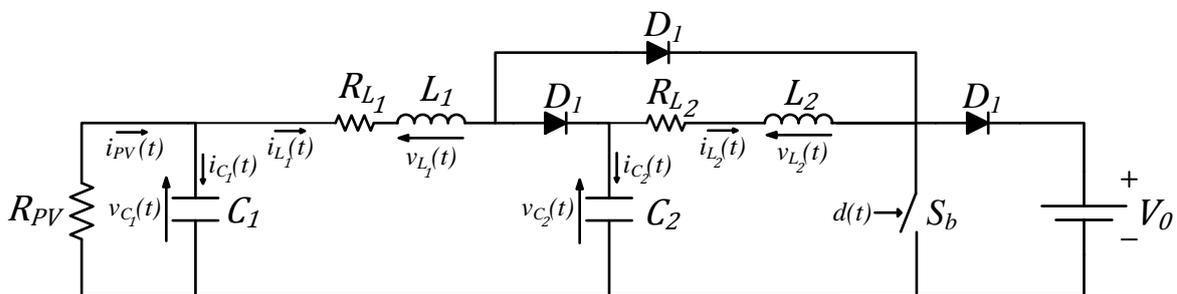
## 4 MODELAGEM E CONTROLE DOS CONVERSORES

Neste trabalho é utilizada a topologia de dois estágios de processamento de energia elétrica gerada pelo painel PV. O primeiro estágio é composto pelo conversor CC-CC *boost* quadrático, onde este tem a função de adequar o nível de tensão do terminal do painel fotovoltaico e também realizar o rastreamento da máxima potência, a partir do algoritmo de MPPT. Já o segundo estágio é composto pelo inversor monofásico, onde este tem como objetivo injetar a energia oriunda do painel PV junto a rede elétrica.

Este capítulo ocupa-se aos procedimentos de projetos dos controladores dos conversores utilizados neste trabalho.

### 4.1 MODELAGEM DO CONVERSOR *BOOST* QUADRÁTICO

Para a modelagem do conversor *boost* quadrático, operando como rastreador do ponto de máxima potência de um arranjo fotovoltaico, o circuito deste conversor é modificado conforme mostra a Figura 18, onde o mesmo processo é realizado em (CARVALHO et al., 2013). Contudo, neste trabalho serão consideradas as resistências séries dos indutores, devido a implementação prática deste conversor, sendo que em (CARVALHO et al., 2013) foi utilizado para a modelagem um circuito ideal do conversor *boost* quadrático.



**Figura 18 – Modelo do conversor *boost* quadrático.  
Fonte: Autoria Própria.**

Conforme pode ser visualizado na Figura 18, a tensão de saída  $V_0$  é considerada fixa, onde a saída deste conversor é conectada ao barramento CC do inversor, cuja tensão deste barramento é controlada pela malha de controle de tensão do conversor CC-CA. A resistência  $R_{PV}$  representa a impedância de saída do painel fotovoltaico para a situação de máxima potência, sobre condições de radiação solar e temperatura padrões (STC).

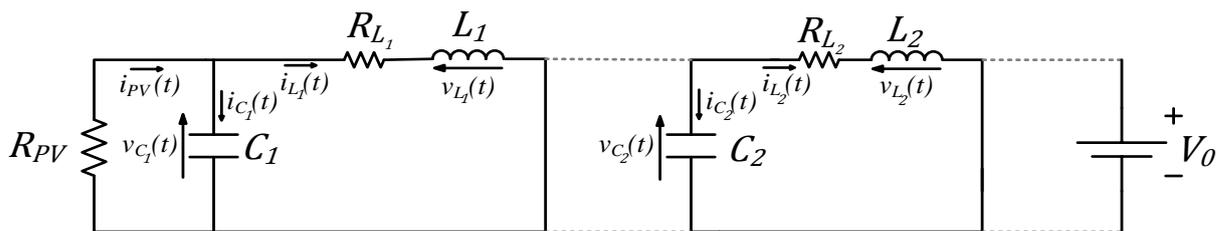
O método de controle aplicado no conversor *boost* quadrático foi o controle multimalhas (MORALES-SALDAÑA et al., 2007). Este método constitui-se em duas malhas de controle, sendo elas uma malha externa de tensão e uma malha interna de corrente. A malha externa é responsável pelo controle da tensão  $v_{C_1}(t)$ , cuja tensão de referência é definida pelo algoritmo do MPPT, e a malha interna é responsável pelo controle da corrente  $i_{L_1}(t)$ , cuja corrente de referência é o próprio sinal de saída da malha externa de tensão.

Para a obtenção das funções de transferência das duas malhas de controle,  $G_{vbi}(s)$  e  $G_{ibd}(s)$ , realizou-se a modelagem do conversor utilizando a técnica de modelagem a pequenos sinais (ERIKSON, 2001).

Para um melhor entendimento, as duas etapas de operação deste conversor serão apresentadas a seguir.

I) 1ª ETAPA DE OPERAÇÃO – Chave  $S_b$  fechada.

O circuito do conversor durante esta etapa pode ser representado pela Figura 19.



**Figura 19 – Modelo do conversor *boost* quadrático durante a primeira etapa de operação.**

**Fonte: Autoria Própria.**

A partir da análise deste circuito as seguintes equações foram determinadas:

$$v_{L_1}(t) = L_1 \frac{di_{L_1}(t)}{dt} = v_{C_1}(t) - i_{L_1}(t)R_{L_1} \quad (17)$$

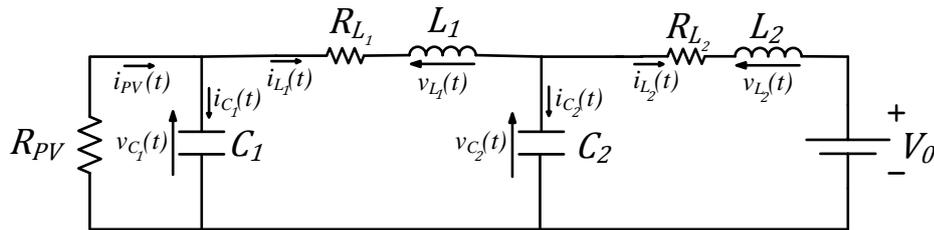
$$i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_{C_1}(t)}{dt} = i_{PV}(t) - i_{L_1}(t) = -\frac{v_{C_1}(t)}{R_{PV}} - i_{L_1}(t) \quad (18)$$

$$v_{L_2}(t) = L_2 \frac{di_{L_2}(t)}{dt} = v_{C_2}(t) - i_{L_2}(t)R_{L_2} \quad (19)$$

$$i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_{C_2}(t)}{dt} = -i_{L_2}(t) \quad (20)$$

II) SEGUNDA ETAPA DE OPERAÇÃO - Chave  $S_b$  aberta.

Nesta etapa o circuito pode ser analisado conforme mostra a Figura 20.



**Figura 20 – Modelo do conversor *boost* quadrático durante a primeira etapa de operação.**

Fonte: Autoria Própria.

Analisando esta segunda etapa de operação obtém-se as seguintes expressões:

$$v_{L_1}(t) = L_1 \frac{di_{L_1}(t)}{dt} = v_{C_1}(t) - i_{L_1}(t)R_{L_1} - v_{C_2}(t) \quad (21)$$

$$i_{C_1}(t) = C_1 \frac{dv_{C_1}(t)}{dt} = -\frac{v_{C_1}(t)}{R_{PV}} - i_{L_1}(t) \quad (22)$$

$$v_{L_2}(t) = L_2 \frac{di_{L_2}(t)}{dt} = v_{C_2}(t) - i_{L_2}(t)R_{L_2} - V_0 \quad (23)$$

$$i_{C_2}(t) = C_2 \frac{dv_{C_2}(t)}{dt} = i_{L_1}(t) - i_{L_2}(t) \quad (24)$$

Determinadas as expressões das correntes nos capacitores e das tensões nos indutores, referentes as duas etapas de operação, determina-se a média destas variáveis a cada período de chaveamento  $T_s$ , que pode ser definida pela seguinte expressão (25).

$$\langle x(t) \rangle_{T_s} = \frac{1}{T_s} \int_t^{t+T_s} x(\tau) d\tau \quad (25)$$

Desta forma, a partir de (25), obtêm-se as seguintes equações:

$$L_1 \frac{d \langle i_{L_1}(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle v_{C_1}(t) \rangle_{T_s} - \langle i_{L_1}(t) \rangle_{T_s} R_{L_1} - d'(t) \langle v_{C_2}(t) \rangle_{T_s} \quad (26)$$

$$C_1 \frac{d \langle v_{C_1}(t) \rangle_{T_s}}{dt} = - \frac{\langle v_{C_1}(t) \rangle_{T_s}}{R_{PV}} - \langle i_{L_1}(t) \rangle_{T_s} \quad (27)$$

$$L_2 \frac{d \langle i_{L_2}(t) \rangle_{T_s}}{dt} = \langle v_{C_2}(t) \rangle_{T_s} - \langle i_{L_2}(t) \rangle_{T_s} R_{L_2} - d'(t) V_0 \quad (28)$$

$$C_2 \frac{d \langle v_{C_2}(t) \rangle_{T_s}}{dt} = - \langle i_{L_2}(t) \rangle_{T_s} R_{L_2} + d'(t) \langle i_{L_1}(t) \rangle_{T_s} \quad (29)$$

onde  $d'(t)$  representa a razão cíclica complementar de  $d(t)$ .

Após serem determinados os valores médios das variáveis de estado, determina-se o modelo de pequenos sinais, perturbando as variáveis no ponto de operação a cada período de chaveamento  $T_s$ . Considera-se que estas variáveis são compostas pelo seu valor médio e pelas pequenas perturbações ao redor deste ponto, como mostra as expressões (30), (31), (32) e (33). Introduzem-se também perturbações na razão cíclica (34) e no seu valor complementar (35). Portanto:

$$\langle v_{C_1}(t) \rangle_{T_s} = V_{C_1} + \hat{v}_{C_1}(t) \quad (30)$$

$$\langle i_{L_1}(t) \rangle_{T_s} = I_{L_1} + \hat{i}_{L_1}(t) \quad (31)$$

$$\langle v_{C_2}(t) \rangle_{T_s} = V_{C_2} + \hat{v}_{C_2}(t) \quad (32)$$

$$\langle i_{L_2}(t) \rangle_{T_s} = I_{L_2} + \hat{i}_{L_2}(t) \quad (33)$$

$$d(t) = D + \hat{d}(t) \quad (34)$$

$$d'(t) = D' - \hat{d}(t) \quad (35)$$

Aplicando as expressões (30), (31), (32), (33), (34), e (35) em (26), (27), (28) e (29), fazendo as devidas simplificações matemáticas e linearizando as expressões, ou seja, as componentes de segunda ordem e os termos médios podem ser considerados nulos, obtêm-se

as seguintes equações diferenciais que regem o sistema, que podem ser escritas na forma matricial, como segue abaixo:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L_1}(t) \\ \hat{v}_{C_1}(t) \\ \hat{i}_{L_2}(t) \\ \hat{v}_{C_2}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_{L_1}/L_1 & 1/L_1 & 0 & -D'/L_1 \\ -1/C_1 & -1/C_1 R_{PV} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -R_{L_2}/L_2 & 1/L_2 \\ D'/C_2 & 0 & -1/C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{L_1}(t) \\ \hat{v}_{C_1}(t) \\ \hat{i}_{L_2}(t) \\ \hat{v}_{C_2}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{C_2} \\ 0 \\ V_0 \\ -I_1/C_2 \end{bmatrix} \hat{d}(t) \quad (36)$$

A partir de (36) e (27), serão determinadas as duas malhas de controle do conversor *boost* quadrático, sendo elas a malha de controle de corrente  $G_{ib_d}(s)$  e a malha de controle de tensão  $G_{vbi}(s)$ .

#### 4.1.1 Malha de controle de corrente do conversor *boost* quadrático

A função de transferência  $G_{ib_d}(s)$  é determinada utilizando a expressão (36).

$$G_{ib_d}(s) = C(sI - A)^{-1}B \quad (37)$$

Onde:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_1}}{L_1} & \frac{1}{L_1} & 0 & -\frac{D'}{L_1} \\ \frac{1}{C_1} & -\frac{1}{C_1 R_{PV}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{R_{L_2}}{L_2} & \frac{1}{L_2} \\ \frac{D'}{C_2} & 0 & -\frac{1}{C_2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} V_{C_2} \\ 0 \\ V_0 \\ -\frac{I_1}{C_2} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

Assim, resolvendo a expressão (37) obtêm-se  $G_{ib_d}(s)$ , dada por (39).

$$G_{ib_d}(s) = \frac{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3}{b_0 s^4 + b_1 s^3 + b_2 s^2 + b_3 s + b_4} \quad (39)$$

Onde:

$$a_0 = C_1 C_2 L_2 V_{C_2};$$

$$a_1 = C_1 D' I_1 L_2 + C_1 C_2 R_{L_2} V_{C_2} + C_2 L_2 R_{PV} V_{C_2};$$

$$a_2 = C_1 V_{C_2} + C_1 D' V_0 + C_1 D' I_1 L_2 R_{L_2} + D' I_1 L_2 R_{PV} + C_2 R_{L_2} R_{PV} V_{C_2};$$

$$a_3 = R_{PV} V_{C_2} + D' R_{PV} V_0 + D' I_1 R_{L_2} R_{PV};$$

$$b_0 = C_1 C_2 L_1 L_2;$$

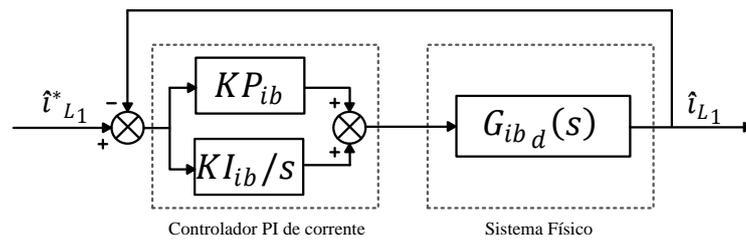
$$b_1 = C_1 C_2 L_1 R_{L_2} + C_1 C_2 L_2 R_{L_1} + C_2 L_1 L_2 R_{PV};$$

$$b_2 = C_1 L_2 D'^2 + C_1 L_1 + C_2 L_2 + C_1 C_2 R_{L_1} R_{L_2} + C_2 L_2 R_{L_1} R_{PV};$$

$$b_3 = C_1 R_{L_1} + C_2 R_{L_2} + L_1 R_{PV} + C_1 D'^2 R_{L_2} + D'^2 L_2 R_{PV} + C_2 R_{L_1} R_{L_2} R_{PV};$$

$$b_4 = R_{L_2} R_{PV} D'^2 + R_{L_1} R_{PV} + 1.$$

A Figura 21 mostra o diagrama de blocos da malha interna de controle de corrente. Esta malha deve garantir que a corrente no indutor  $L_1$  siga a corrente de referência fornecida pela malha externa de controle de tensão.



**Figura 21 - Diagrama em blocos da malha interna de controle de corrente. Fonte: Autoria própria.**

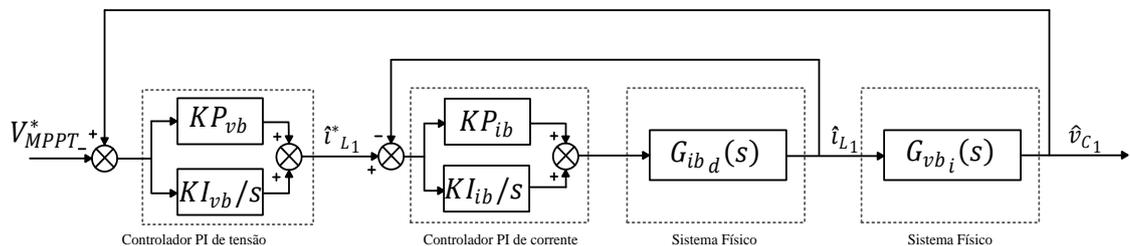
#### 4.1.2 Malha de controle de tensão do conversor *boost* quadrático

Rearranjando a expressão (27) e aplicando a transformada de Lapçace, obtém-se a função de transferência da malha externa de controle de tensão  $G_{vbi}(s)$ , dada por (41).

$$C_1 d \frac{\hat{v}_{C_1}(t)}{dt} = -\frac{\hat{v}_{C_1}(t)}{R_{PV}} - \hat{i}_{L_1}(t) \quad (27)$$

$$G_{vbi}(s) = \frac{\hat{v}_{C_1}(s)}{\hat{i}_{L_1}(s)} = -\frac{R_{PV}}{C_1 R_{PV} s + 1} \quad (41)$$

A Figura 22 mostra o diagrama de blocos da malha externa de controle de tensão, juntamente com a malha interna de controle de corrente. A malha de tensão deve garantir que a tensão sobre o capacitor  $C_1$ ,  $v_{C_1}(t)$ , seja a tensão estipulada pelo algoritmo de MPPT.



**Figura 22 – Diagrama em blocos das malhas de controle de tensão e corrente do conversor *boost* quadrático.**

**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.2 METODOLOGIA DE PROJETO DOS CONTROLADORES

A metodologia de projetos dos controladores utilizados neste trabalho é apresentada em (ANGELICO; CAMPANHOL; SILVA, 2014). Esta metodologia pode ser dividida em três etapas, como segue:

1ª Etapa – Consiste no cálculo do ângulo de fase a ser compensado ( $\varphi_c$ ) para a obtenção da margem de fase desejada  $MF_d$  na frequência de cruzamento  $\omega_c$  especificada no projeto, de acordo com o ângulo de fase  $\varphi_p$  da planta na frequência desejada conforme (42).

$$\varphi_c = MF_d - (\varphi_p|_{\omega_c} + 180^\circ) \quad (42)$$

2ª Etapa – Consiste na inclusão de um compensador de fase  $C(s)$ , representado por (43), em série com a função de transferência da planta  $G_P(s)$ , onde  $T$  é uma constante, de forma a ajustar o ângulo de fase do sistema compensado em malha aberta ( $G_{MAC}$ ), representado por (44), de acordo com a margem de fase desejada.

$$C(s) = \frac{Ts + 1}{s} \quad (43)$$

$$G_{MAC}(s) = C(s)G_P(s) \quad (44)$$

3ª Etapa – Por fim, esta etapa consiste na inclusão de uma ganho  $K_c$ , dado por (45), que é incluído em série com o sistema compensado, de modo a fazer com que o módulo do sistema compensado em malha aberta tenha um valor de 0 dB na frequência de corte desejada  $\omega_c$ .

$$K_c = \frac{1}{|G_{MAC}|_{\omega_c}} \quad (45)$$

Seguindo esta metodologia de projeto, são determinados os controladores PI a serem utilizados nas malhas de controle de corrente e tensão do conversor *boost* quadrático, e das malhas de corrente e tensão do conversor *full-bridge*.

Para um melhor entendimento a margem de fase está relacionado com a estabilidade, bem como o amortecimento do sistema. Quanto menor a margem de fase menos amortecido será o sistema e este irá apresentar *overshoot* e um comportamento mais oscilatório. Em sistemas chaveados, procura-se manter a margem de fase entre  $45^\circ$  e  $90^\circ$  (SILVA, 2001).

Já a frequência de cruzamento está relacionada com o tempo de resposta do sistema, ou seja, quanto maior  $\omega_c$ , menor será o tempo de resposta. Por outro lado, frequências de corte muito elevadas, ao se aproximarem da frequência de chaveamento  $f_s$ , não permite que o sistema

possa ser tratado como um sistema contínuo. Além disso, os *ripples* de alta frequência impostos pelo chaveamento nas variáveis controladas podem interferir no controle do sistema.

#### 4.2.1 Controlador da malha de corrente do conversor *boost* quadrático

Os parâmetros de projeto do controlador da malha de corrente do conversor *boost* quadrático estão inseridos na Tabela 1.

**Tabela 1 – Especificações para Projeto do controlador PI da malha de corrente do conversor *boost* quadrático.**

|                                    |   |
|------------------------------------|---|
| Frequência de chaveamento          | $f_s = 20 \text{ kHz}$                      |
| Margem de fase desejada            | $M_{F_d} = 85^\circ$                        |
| Frequência de cruzamento desejada  | $\omega_{cib} = 2\pi f_s / 6 \text{ rad/s}$ |
| Indutor $L_1$                      | $L_1 = 1,5 \text{ mH}$                      |
| Resistência do indutor $L_1$       | $R_{L_1} = 0,18 \Omega$                     |
| Indutor $L_2$                      | $L_2 = 2,5 \text{ mH}$                      |
| Resistência do indutor $L_2$       | $R_{L_2} = 0,22 \Omega$                     |
| Capacitância $C_1$                 | $C_1 = 990 \mu\text{F}$                     |
| Capacitância $C_2$                 | $C_2 = 990 \mu\text{F}$                     |
| Tensão inicial do barramento $C_1$ | $V_{C_1} = 37,5 \text{ V}$                  |
| Tensão inicial do barramento $C_2$ | $V_{C_2} = 37,5 \text{ V}$                  |
| Corrente inicial do indutor $L_1$  | $I_1 = 7 \text{ A}$                         |
| Razão cíclica inicial $D$          | $D = 0,5$                                   |
| Tensão de saída do conversor       | $V_o = 230 \text{ V}$                       |
| Resistência $R_{PV}$               | $R_{PV} = 4,23 \Omega$                      |
| Ganho do modulador PWM             | $K_{PWM_b} = 2,67 \times 10^{-4}$           |

**Fonte: Autoria Própria.**

Na primeira etapa, o ângulo de fase  $\varphi_{ib}$  apresentada pela planta  $G_{ib_d}$  na frequência de cruzamento especificada  $\omega_{cib}$  é determinado utilizando a expressão (46). Em seguida, calcula-

se por meio de (47) o ângulo de fase a ser compensado  $\varphi_{cib}$ . A constante  $T_{ib}$  é calculada conforme (48).

$$\varphi_{ib} = \angle K_{PWM_b} G_{ib_d}(j\omega)|_{\omega=\omega_{cib}} \rightarrow \varphi_{ib} = -89,8^\circ \quad (46)$$

$$\varphi_{cib} = MF_d - (\varphi_{b_i} + 180^\circ) \rightarrow \varphi_{cib} = -15,2^\circ \quad (47)$$

$$T_{ib} = -\frac{1}{\operatorname{tg}(\varphi_{cib})\omega_{cib}} \rightarrow T_{ib} = 2,94 \times 10^{-4} \quad (48)$$

Na segunda etapa determina-se, por meio de (49), o compensador de fase  $C_{ib}(s)$ . Em seguida, este compensador é inserido em série com a planta  $G_{ib_d}(s)$ , obtendo  $G_{MA_{ib}}(s)$ , dado por (50).

$$C_{ib}(s) = \frac{(T_{ib} + 1)}{s} \quad (49)$$

$$G_{C_{MA_{ib}}}(s) = C_{ib}(s)G_{ib_d}(s) \quad (50)$$

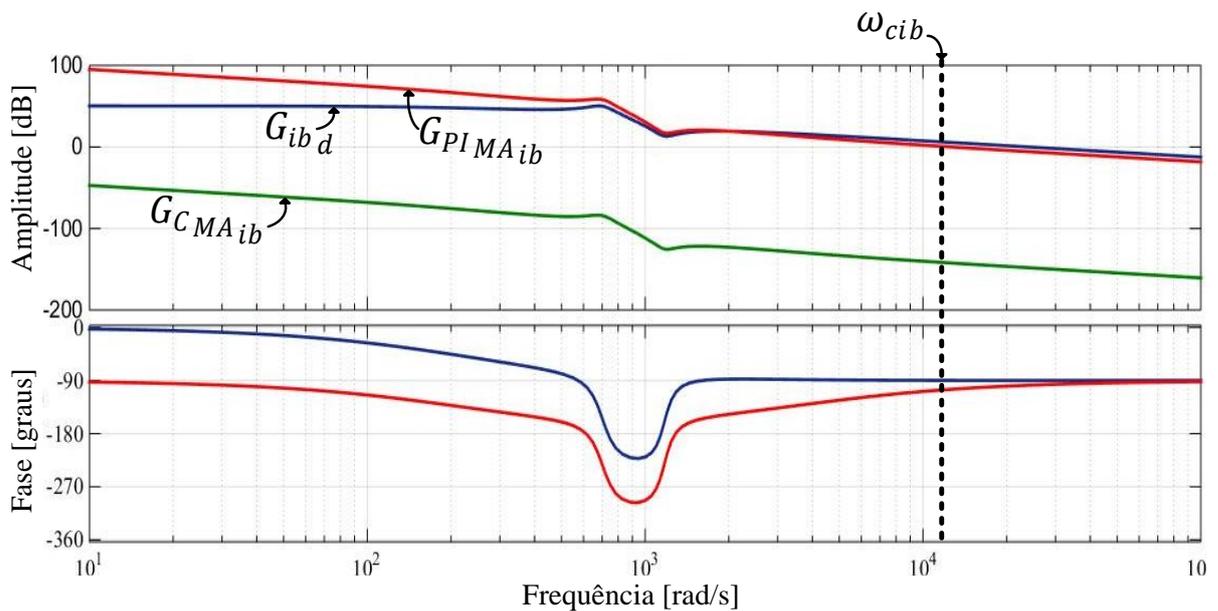
A partir de  $G_{C_{MA_{ib}}}$  obtêm-se seu respectivo valor de módulo. Com este valor de módulo determina-se o ganho  $K_{C_{ib}}$ , conforme mostra a equação (51).

$$K_{C_{ib}} = \frac{1}{|G_{C_{MA_{ib}}}(s)|} \rightarrow K_{C_{ib}} = 1,31 \times 10^7 \quad (51)$$

Com o valor de  $K_{C_{ib}}$  obtêm-se a função de transferência  $G_{PI_{MA_{ib}}}(s)$ , conforme é dado pela equação (52).

$$G_{PI_{MA_{ib}}}(s) = K_{PWM_b} K_{C_{ib}} G_{C_{MA_{ib}}}(s) \quad (52)$$

A Figura 23 mostra a resposta em frequência de  $G_{ib_d}$ ,  $G_{C_{MAib}}$  e  $G_{PI_{MAib}}$ . Através deste diagrama, verifica-se ângulo de fase de  $G_{FB_i}$  de  $-89,8^\circ$ . O sistema compensado  $G_{C_{MA_i}}$  apresenta um ângulo de fase de aproximadamente  $-105^\circ$  em  $\omega_c$ , ou seja, o sistema teve um atraso de fase de  $15,2^\circ$ . Após a inclusão do ganho  $K_{C_i}$ , a curva de magnitude passou a cruzar a linha de 0dB na frequência  $\omega_c$ . Desta forma, o sistema compensado  $G_{PI_{MA_i}}$  apresenta  $75^\circ$  de margem de fase na frequência de  $1,26 \times 10^4$  rad/s, comprovando que o controlador PI projetado atende as especificações desejadas.



**Figura 23 – Resposta em frequência das funções  $G_{ib_d}$ ,  $G_{C_{MAib}}$  e  $G_{PI_{MAib}}$ .  
Fonte: Autoria Própria.**

**Tabela 2 – Ganhos dos controladores PI da malha de corrente do conversor *boost* quadrático.**

$$\begin{aligned}
 KP_{bi} &= 3,84 \cdot 10^3 \\
 KI_{bi} &= 1,31 \cdot 10^7
 \end{aligned}$$

**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.2.2 Controlador da malha de tensão

Os parâmetros de projeto do controlador da malha de corrente do conversor *boost* quadrático estão inseridos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Especificações para Projeto do controlador PI da malha de tensão do conversor *boost* quadrático.**

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| Frequência de chaveamento         | $f_s = 20 \text{ kHz}$                        |
| Margem de fase desejada           | $M_{F_d} = 89^\circ$                          |
| Frequência de cruzamento desejada | $\omega_{cvb} = 2\pi f_s / 200 \text{ rad/s}$ |
| Capacitância $C_1$                | $C_1 = 990 \mu\text{F}$                       |
| Resistência $R_{pV}$              | $R_{pV} = 4,23 \Omega$                        |

**Fonte: Autoria Própria.**

Na primeira etapa, o ângulo de fase  $\varphi_{vb}$  da planta  $G_{vb_i}$  na frequência de cruzamento especificada  $\omega_{cvb}$  é determinado utilizando (53). Em seguida, calcula-se por meio de (54) o ângulo de fase a ser compensado  $\varphi_{cvb}$ . A constante  $T_{vb}$  é calculada conforme (55).

$$\varphi_{vb} = \angle G_{vb_i}(j\omega)|_{\omega=\omega_{cvb}} \rightarrow \varphi_{vb} = -69,1^\circ \quad (53)$$

$$\varphi_{cvb} = M_{F_d} - (\varphi_{vb} + 180^\circ) \rightarrow \varphi_{cvb} = -21,8^\circ \quad (54)$$

$$T_{vb} = -\frac{1}{\text{tg}(\varphi_{cvb})\omega_{cvb}} \rightarrow T_{vb} = 3,98 \times 10^{-3} \quad (55)$$

Na segunda etapa determina-se, por meio de (56), o compensador de fase  $C_{vb}(s)$ . Em seguida, este compensador é inserido em série com a planta  $G_{vb_i}(s)$ , obtendo  $G_{MA_{vb}}(s)$ , dado por (57).

$$C_{vb}(s) = \frac{(T_{vb} + 1)}{s} \quad (56)$$

$$G_{C_{MA_{vb}}}(s) = C_{vb}(s)G_{vb_i}(s) \quad (57)$$

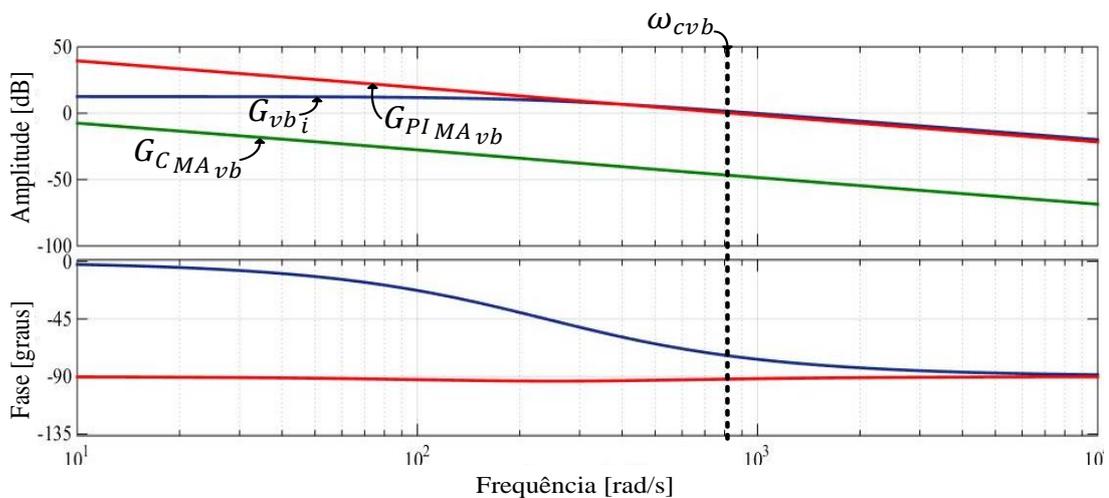
A partir de  $G_{C_{MA_{vb}}}$  obtêm-se seu respectivo valor de módulo. Com este valor de módulo determina-se o ganho  $K_{C_{vb}}$ , conforme mostra a equação (58).

$$K_{C_{vb}} = \frac{1}{|G_{C_{MA_{vb}}}(s)|} \rightarrow K_{C_{vb}} = 1,55 \times 10^2 \quad (58)$$

O ganho  $K_{C_{vb}}$  é inserido em série com o sistema  $G_{C_{MA_{vb}}}(s)$ , obtendo a expressão completa do controlador PI de tensão. O sistema controlado em malha aberta  $G_{PI_{MA_{vb}}}(s)$  é dado por (59).

$$G_{PI_{MA_{vb}}}(s) = K_{C_{vb}} G_{C_{MA_{vb}}}(s) \quad (59)$$

A Figura 24 mostra a resposta em frequência de  $G_{vb_i}$ ,  $G_{C_{MA_{vb}}}$  e  $G_{PI_{MA_{vb}}}$ . Através deste diagrama, pode-se verificar que o ângulo de fase de  $G_{vb_i}$  é  $-69,2^\circ$ . Já o sistema compensado  $G_{C_{MA_{vb}}}$  apresenta um ângulo de fase de aproximadamente  $-89,8^\circ$  em  $\omega_c$ , ou seja, o sistema teve um atraso de fase de  $20,7^\circ$ . Após a inclusão do ganho  $K_{C_i}$ , a curva de magnitude passou a cruzar a linha de 0dB na frequência  $\omega_c$ . Desta forma, o sistema compensado  $G_{PI_{MA_i}}$  apresenta, aproximadamente,  $89^\circ$  de margem de fase na frequência de 628 rad/s, comprovando que o controlador PI projetado atende as especificações desejadas.



**Figura 24 – Resposta em frequência das funções  $G_{vb_i}$ ,  $G_{C_{MA_{vb}}}$  e  $G_{PI_{MA_{vb}}}$ .**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Tabela 4 – Ganhos dos controladores PI da malha de tensão do conversor *boost* quadrático.

|   |
|---|
| $KP_{bv} = 0,821$ $KI_{bv} = 2,22 \cdot 10^2$ |
|---|

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.3 MODELAGEM E CONTROLE DO CONVERSOR CC-CA *FULL-BRIDGE*

Conversores CC-CA, ou inversores, quando operam conectados à rede elétrica, necessitam de uma referência de corrente adequada para que a potência ativa possa ser injetada na mesma. Desta forma, para que o inversor imponha uma corrente senoidal na rede elétrica, o controle da malha de corrente deve atuar. Assim, o modelo matemático da planta do inversor deve ser obtido para que seja possível o projeto do controlador da malha de corrente.

A topologia do conversor CC-CA monofásico *full-bridge* está apresentada na Figura 25.

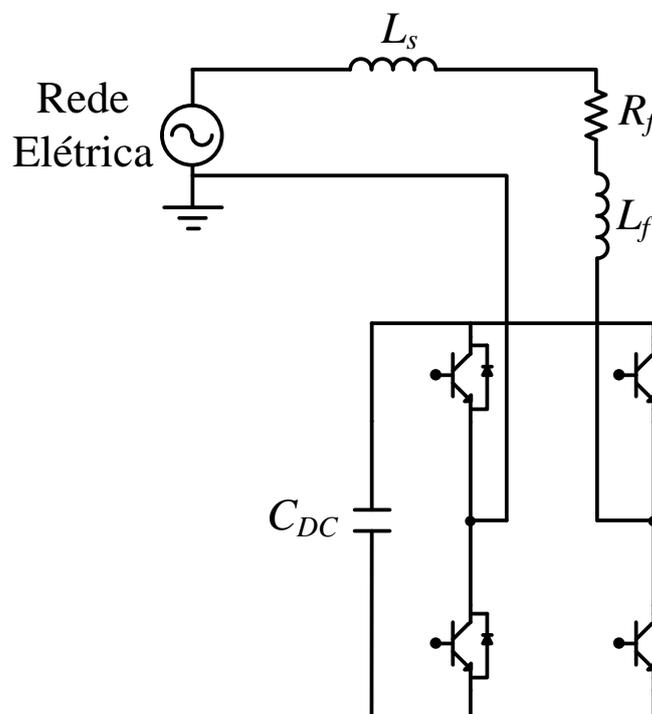


Figura 25 – Topologia do inversor *full-bridge* conectado à rede elétrica.  
Fonte: Autoria Própria.

A modelagem do conversor CC-CA *full-bridge* foi realizada de acordo com os métodos apresentados em (CAMPANHOL, 2012). Desta forma a função de transferência da malha de corrente é representada conforme (60).

$$G_{FB_i} = \frac{\hat{i}_{ca}(s)}{\hat{d}(s)} = K_{PWM} \frac{V_{dc}}{L_f s + R_f} \quad (60)$$

Os termos  $\hat{i}_{ca}$  e  $\hat{d}(s)$  representam as componentes oscilantes, da razão cíclica e da corrente a ser sintetizada pelo conversor, respectivamente, e o termo  $V_{dc}$  corresponde ao valor da tensão sobre o barramento CC.

O ganho  $K_{PWM}$  pode ser calculado conforme a equação (61) (LINDEKE,2003), onde  $P_{PWM}$  corresponde ao valor de pico da triangular(portadora).

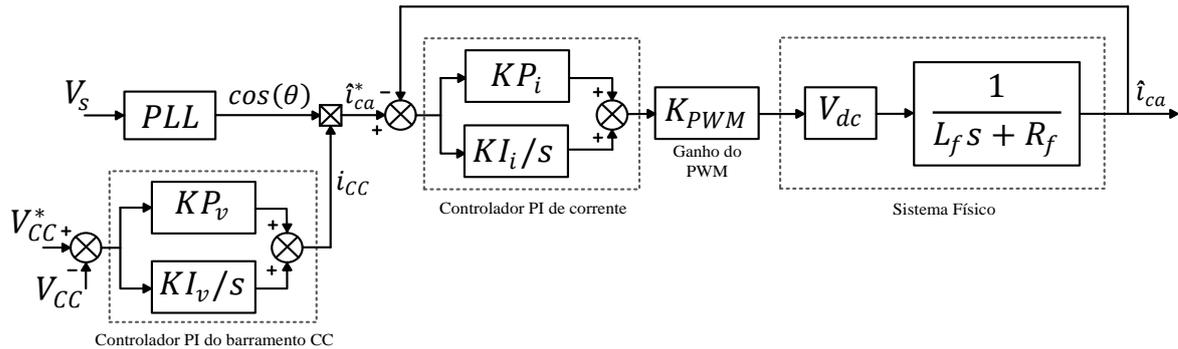
$$K_{PWM} = \frac{2}{P_{PWM}} \quad (61)$$

A malha de controle de tensão do barramento CC é responsável em manter a tensão no barramento no valor de referência especificado. A velocidade da malha de tensão deve apresentar uma ação lenta para que não distorça a corrente a ser injetada na rede. Portanto esta malha deve atuar somente na amplitude da corrente de referência, de modo que o controle do inversor altere o fluxo de potência ativa entre a rede e o barramento CC, de forma a compensar as perdas do conversor e manter constante a tensão no barramento.

A função de transferência da planta do barramento CC é dada por (62) (CAMPANHOL, 2012; ANGELICO *et al.*, 2014), onde  $V_p$  é a tensão de pico da rede elétrica,  $C_{dc}$  é o valor da capacitância do barramento CC do inversor e  $V_{dc}$  corresponde ao valor da tensão do barramento.

$$G_{FB_v}(s) = \frac{V_p}{2C_{dc}V_{dc}s} \quad (62)$$

A Figura 26 apresenta o diagrama de blocos da malha de controle de corrente (malha interna) juntamente com a malha de controle de tensão do barramento CC (malha externa).



**Figura 26 – Diagrama em blocos das malhas de controle de corrente e de tensão do conversor CC-CA Full-Bridge.**

Fonte: Autoria Própria.

#### 4.3.1 Controlador da malha de corrente

Como parâmetros de projeto do controlador PI da malha de corrente, consideram-se os dados inseridos na Tabela 5.

**Tabela 5 – Especificações para Projeto do controlador PI da malha de corrente do conversor Full-Bridge.**

|   |   |
|---|---|
| Frequência de chaveamento                   | $f_s = 20 \text{ kHz}$                      |
| Margem de fase desejada                     | $M_{Fd} = 85^\circ$                         |
| Frequência de cruzamento desejada           | $\omega_{ci} = 2\pi f_s / 12 \text{ rad/s}$ |
| Indutância do indutor de acoplamento        | $L_f = 4,14 \text{ mH}$                     |
| Resistência série do indutor de acoplamento | $R_{L_f} = 0,22 \Omega$                     |
| Tensão do barramento CC                     | $V_{dc} = 230 \text{ V}$                    |
| Ganho do modulador PWM                      | $K_{PWM} = 5,33 \times 10^{-4}$             |

Fonte: Autoria Própria.

Na primeira etapa da metodologia de projeto, encontra-se o ângulo de fase  $\varphi_{FB_i}$  apresentado pela planta  $G_{FB_i}$  na frequência de cruzamento desejada  $\omega_c$  utilizando a equação (63). Após encontrar  $\varphi_{FB_i}$ , determina-se o ângulo de fase a ser compensado  $\varphi_{CFB_i}$  por meio da

equação (64), e a constante  $T$  é determinada utilizando a expressão (64), conforme segue abaixo:

$$\varphi_{FB_i} = \angle G_{FB_i}(j\omega)|_{\omega=\omega_{ci}} = \angle \frac{K_{PWM}V_{dc}}{L_f(j\omega_{ci}) + R_{Lf}} \rightarrow \varphi_{FB_i} = -89,7^\circ \quad (64)$$

$$\varphi_{C_{FB_i}} = M_{Fd} - (\varphi_{FB_i} + 180^\circ) \rightarrow \varphi_{C_{FB_i}} = -5,3^\circ \quad (65)$$

$$T_v = -\frac{1}{\operatorname{tg}(\varphi_{C_{FB_i}})\omega_{ci}} = \rightarrow Ti = 1,03 \times 10^{-3} \quad (66)$$

A partir do valor da constante  $T$ , são obtidas as funções  $C_i(s)$  e  $G_{C_{MA_i}}(s)$ , conforme mostram as equações (66) e (67), respectivamente.

$$C_i(s) = \left( \frac{T_i s + 1}{s} \right) \quad (66)$$

$$G_{C_{MA_i}}(s) = C_i(s)G_{FB_i}(s) \quad (67)$$

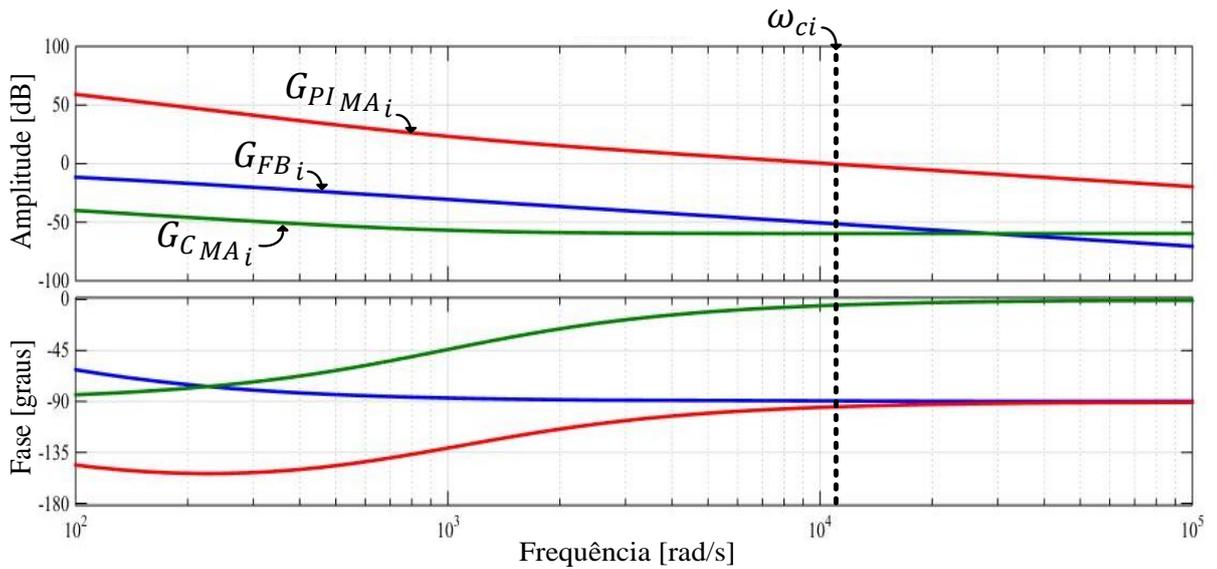
A partir de  $G_{C_{MA_i}}$ , obtêm-se seu respectivo valor de módulo. Com este valor de módulo determina-se o ganho  $K_{C_i}$ , conforme mostra a equação (68).

$$K_{C_i} = \frac{1}{|G_{C_{MA_i}}(s)|} \rightarrow K_{C_i} = 3,41 \times 10^5 \quad (68)$$

Com o valor de  $K_{C_i}$  obtêm-se a função de transferência  $G_{PI_{MA_i}}(s)$ , conforme é dado pela equação (69).

$$G_{PI_{MA_i}}(s) = K_{PWM}K_{C_i}G_{C_{MA_i}} \quad (69)$$

A Figura 27 mostra a resposta em frequência de  $G_{FBi}$ ,  $G_{CMAi}$  e  $G_{PIMAi}$ . Através deste diagrama, verifica-se ângulo de fase de  $G_{FBi}$  de  $-89,8^\circ$ . O sistema compensado  $G_{CMAi}$  apresenta um ângulo de fase de aproximadamente  $-113^\circ$  em  $\omega_c$ , ou seja, o sistema teve um atraso de fase de  $23,2^\circ$ . Após a inclusão do ganho  $K_{Ci}$ , a curva de magnitude passou a cruzar a linha de 0dB na frequência  $\omega_c$ . Desta forma, o sistema compensado  $G_{PIMAi}$  apresenta  $67^\circ$  de margem de fase na frequência de  $17,952 \times 10^3$  rad/s, comprovando que o controlador PI projetado atende as especificações desejadas.



**Figura 27 – Resposta em frequência das funções  $G_{FBi}$ ,  $G_{CMAi}$  e  $G_{PIMAi}$ .**  
**Fonte: Autoria Própria.**

**Tabela 6 – Ganhos dos controladores PI da malha de corrente do conversor *Full-Bridge*.**

|                          |
|--------------------------|
| $KP_i = 352$             |
| $KI_i = 3,41 \cdot 10^5$ |

**Fonte: Autoria Própria.**

#### 4.3.2 Controlador da malha de tensão

Os parâmetros de projeto do controlador PI da malha de tensão estão inseridos na Tabela 7.

**Tabela 7 – Especificações para Projeto do controlador PI da malha de tensão do conversor Full-Bridge.**

|   |  |
|---|--|
| Frequência de ondulação do barramento CC    | $f_o = 120 \text{ Hz}$                   |
| Margem de fase desejada                     | $M_{Fd} = 83^\circ$                      |
| Frequência de cruzamento desejada           | $\omega_{cv} = 2\pi f_o/9 \text{ rad/s}$ |
| Capacitância do barramento CC               | $C_{dc} = 705 \mu\text{F}$               |
| Resistência série do indutor de acoplamento | $R_{Lf} = 0,22 \Omega$                   |
| Tensão do barramento CC                     | $V_{dc} = 230 \text{ V}$                 |
| Tensão de pico da rede                      | $V_p = 180 \text{ V}$                    |

**Fonte: Autoria Própria.**

Verifica-se na Tabela 5 que a frequência de ondulação da tensão do barramento CC ( $f_o$ ) é especificada em 120 Hz, devido a analogia com o retificador monofásico em ponte completa (MODESTO, 2007).

Na primeira etapa o ângulo de fase  $\varphi_{FB_v}$  da planta  $G_{FB_v}$ , na frequência de cruzamento especificada  $\omega_{cv}$  é encontrado utilizando (70). Posteriormente calcula-se, por meio de (71) o ângulo de fase a ser compensado  $\varphi_{CFB_v}$  e  $T_v$  através de (72), como segue:

$$\varphi_{FB_v} = \angle G_{FB_v}(j\omega)|_{\omega=\omega_{cv}} \rightarrow \varphi_{FB_i} = -90^\circ \quad (70)$$

$$\varphi_{CFB_v} = M_{Fd} - (\varphi_{FB_v} + 180^\circ) \rightarrow \varphi_{CFB_v} = -7^\circ \quad (71)$$

$$T_v = -\frac{1}{\text{tg}(\varphi_{CFB_v})\omega_{cv}} \rightarrow T_v = 0,0972 \quad (72)$$

Na segunda etapa encontra-se, por meio de (73), o compensador de fase, e em seguida o compensador é inserido em série com a planta  $G_{FB_v}$ , obtendo  $G_{C_{MA_v}}$  por meio de (74).

$$C_v(s) = \left( \frac{T_v s + 1}{s} \right) \quad (73)$$

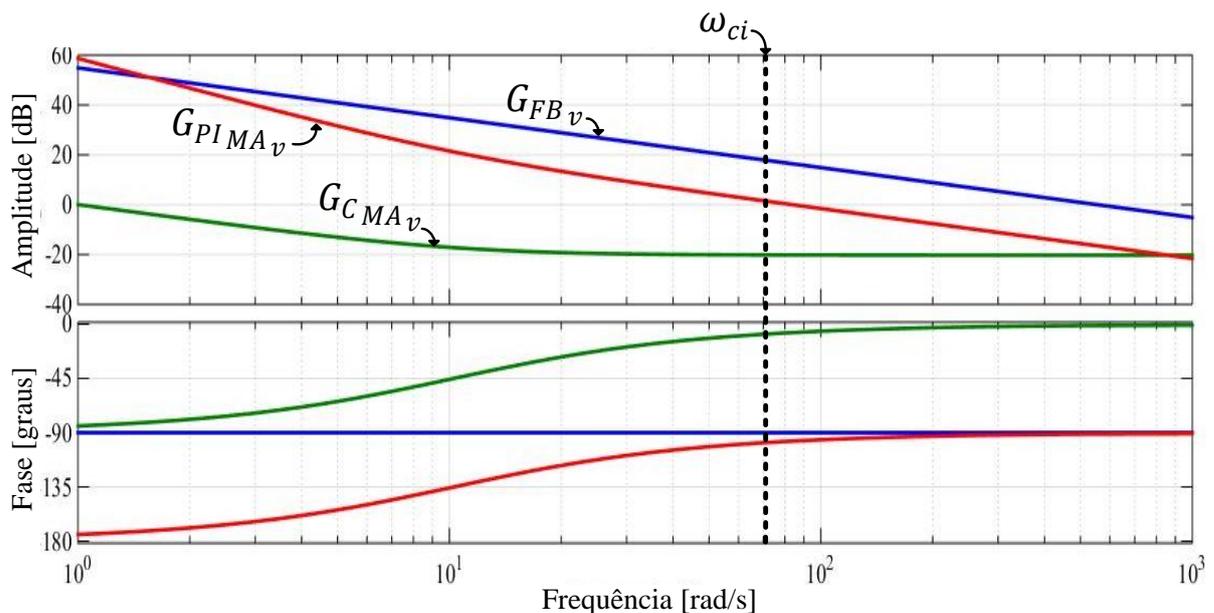
$$G_{C_{MA_v}}(s) = C_v(s)G_{FB_v}(s) \quad (74)$$

A partir de  $G_{C_{MA_v}}$  obtêm-se o seu respectivo valor de módulo. Com este valor, e utilizando a expressão (75), determina-se o ganho  $K_{C_v}$ . Este ganho é inserido em série com o sistema  $G_{C_{MA_v}}$ , obtendo a expressão completa do controlador PI. O sistema controlado em malha aberta  $G_{PI_{MA_v}}$  é dado por (76).

$$K_{C_v} = \frac{1}{|G_{C_{MA_v}}(s)|} \rightarrow K_{C_i} = 1,54 \quad (75)$$

$$G_{PI_{MA_v}}(s) = K_{C_v} G_{C_{MA_v}} \quad (76)$$

A Figura 28 mostra a resposta em frequência de  $G_{FB_v}$ ,  $G_{C_{MA_v}}$  e  $G_{PI_{MA_v}}$ . Através deste diagrama, verifica-se o ângulo de fase de  $G_{FB_v}$  de  $-90^\circ$ . Já o sistema compensado  $G_{C_{MA_v}}$  apresenta um ângulo de fase de  $-97^\circ$  em  $\omega_{c_v}$ , ou seja, o sistema teve um atraso de fase de  $7^\circ$ . Após a inclusão do ganho  $K_{C_v}$ , a curva de magnitude passou a cruzar a linha de 0dB na frequência  $\omega_{c_v}$ . Portanto, o sistema compensado  $G_{PI_{MA_v}}$  apresenta  $83^\circ$  de margem de fase na frequência  $\omega_{c_v}$ , indicando que o controlador PI projetado atende as especificações desejadas.



**Figura 28 – Resposta em frequência das funções  $G_{FB_v}$ ,  $G_{C_{MA_v}}$  e  $G_{PI_{MA_v}}$ .  
Fonte: Autoria Própria.**

**Tabela 8 – Ganhos dos controladores PI da malha de tensão do conversor Full-Bridge.**

---

|                |
|----------------|
| $KP_v = 0,149$ |
| $KI_v = 1,154$ |

---

**Fonte: Autoria Própria**

## 5 SISTEMA DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DESENVOLVIDO COM O SOFTWARE LABVIEW

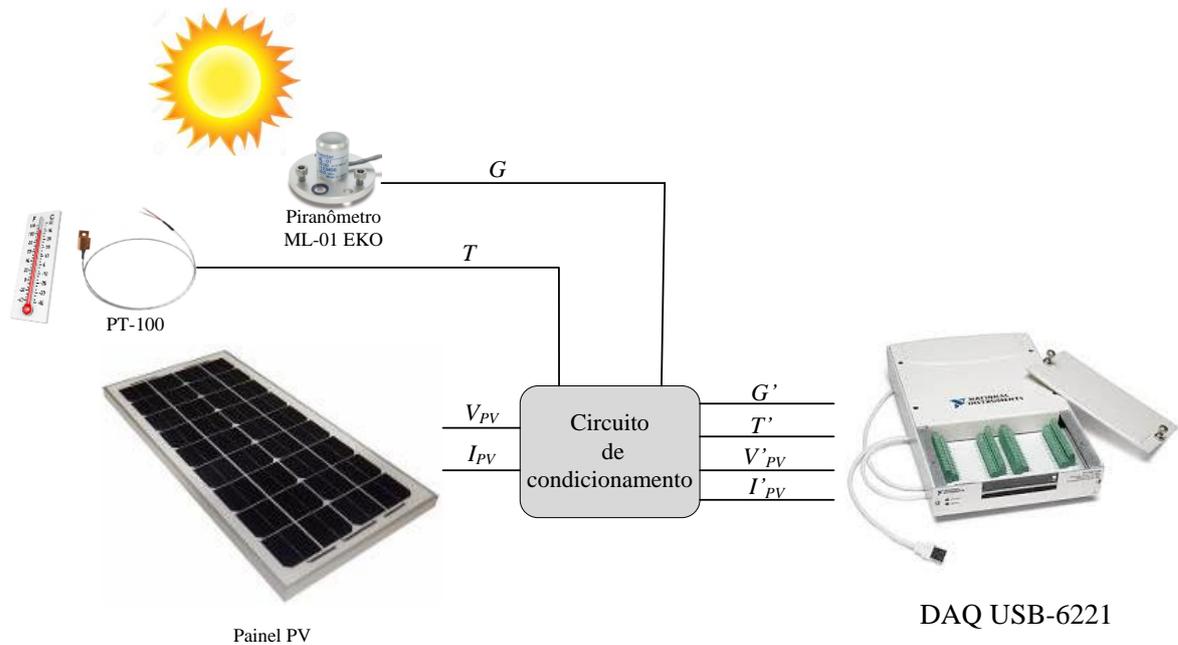
Este capítulo trata do desenvolvimento do sistema de monitoramento em tempo real proposto, utilizando o software LabVIEW. Será descrito também todos os equipamentos que compõe este sistema.

### 5.1 AQUISIÇÃO DE DADOS

Este sistema opera adquirindo dados, provenientes de sensores, relacionados com a temperatura, radiação solar, corrente e a tensão nos terminais do arranjo fotovoltaico.

Os sinais oriundos destes sensores são adquiridos utilizando a placa de aquisição de dados DAQ NI USB-6221, que é um equipamento próprio da *National Instruments*, projetado para realizar a comunicação em tempo real com o *software* LabVIEW.

Para o sensoriamento da radiação solar foi utilizado um piranômetro fixo, modelo ML-01 EKO, e para a medição da temperatura na superfície do arranjo fotovoltaico foi utilizado um sensor de temperatura para superfície, modelo PT-100 SFCSD-50-B-3-TF-10. Para a conexão destes sensores com a placa de aquisição DAQ NI USB-6221, ou simplesmente DAQ, foi necessária a utilização de circuitos eletrônicos de condicionamento, de forma a adequar os níveis dos sinais a níveis compatíveis com a placa de aquisição. A Figura 29 mostra, de forma simplificada, o esquema de conexão dos sensores com a placa de aquisição DAQ.



**Figura 29 – Esquema de ligação dos sensores com a DAQ.**  
**Fonte: A autoria Própria.**

Os dados adquiridos são transmitidos ao computador, por meio de conexão USB, para que estes possam ser processados pelo sistema desenvolvido no ambiente LabVIEW.

A placa de aquisição de dados, utilizada neste trabalho, apresenta grande desempenho no que diz respeito a velocidade na aquisição de dados. Esta possui uma taxa de amostragem de 250 KHz e uma resolução de 16 Bits, comprovando sua ampla aplicação em sistemas que necessitam de grande precisão na aquisição e processamento de dados. Mais informações técnicas são encontradas em (<http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-10>).

## 5.2 INTERFACE GRÁFICA

Depois de realizada a aquisição dos dados por meio da DAQ, o sistema desenvolvido no ambiente gráfico LabVIEW ocupa-se em receber e processá-los. Com o modelo matemático do painel fotovoltaico, apresentado no Capítulo 3, e com os dados referentes à radiação solar e à temperatura, ocorre a simulação em tempo real deste painel, ou arranjo de painéis, onde as curvas  $I \times V$  e  $P \times V$  são plotadas continuamente. Desta forma é possível verificar o ponto

máximo de potência a todo momento, bem como o comportamento deste ponto sob mudanças repentinas de radiação solar e temperatura.

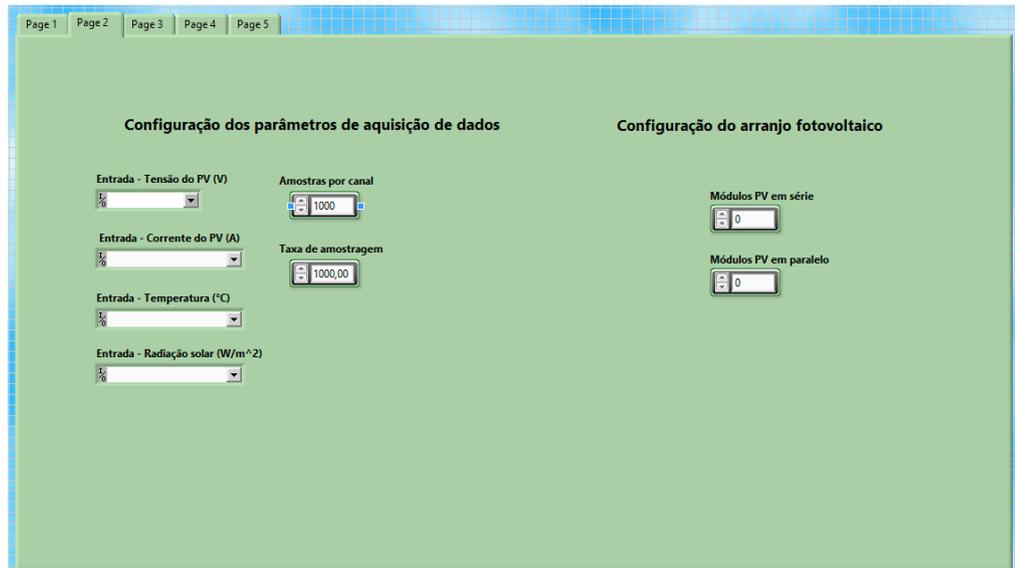
A interface foi desenvolvida em forma de abas. Isso facilita ao usuário a visualização dos gráficos presentes nas abas, uma vez que não há a necessidade de rolagem da tela, nem a minimização da mesma. Desta forma, além deste sistema ser preciso, ele acaba sendo prático, onde não é necessário grande conhecimento específico para seu manuseio.

A Figura 30 mostra a aba de abertura da interface do sistema. No total são cinco abas que compõem a interface do sistema.



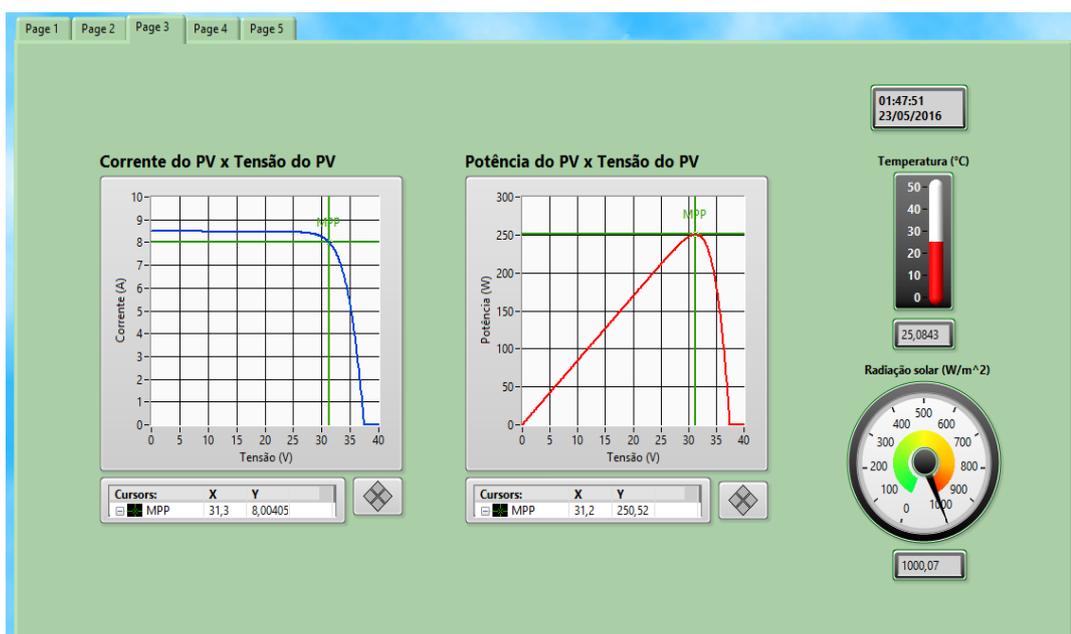
**Figura 30 – Aba um da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Na aba dois, mostrada pela Figura 31, o usuário insere as configurações, como quais portas da DAQ serão utilizadas, bem como as grandezas adquiridas em cada porta, e como está composto o arranjo fotovoltaico. Como dito anteriormente, este sistema de monitoramento pode ser empregado em qualquer planta de sistemas fotovoltaicos. Também na aba dois, o usuário determina a taxa de amostragem dos sinais e a quantidade de amostras.



**Figura 31 –** Aba dois da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.  
**Fonte:** Autoria Própria.

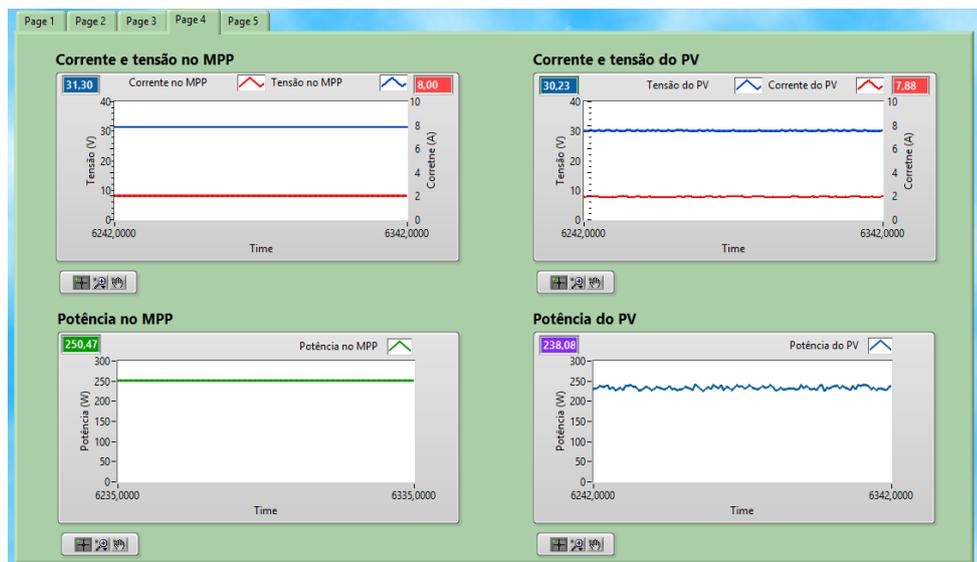
Na aba três, mostrada pelo Figura 32, está presente as curvas características  $I \times V$  e  $P \times V$ , obtidas a partir da radiação solar e temperatura e pelo modelo matemático no painel apresentado na Seção 3.2.3 . Nas duas curvas características é possível verificar onde se localiza o ponto de máxima potência (MPP), e também os valores de corrente e tensão que estão relacionados a este ponto.



**Figura 32 –** Aba três da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.  
**Fonte:** Autoria Própria.

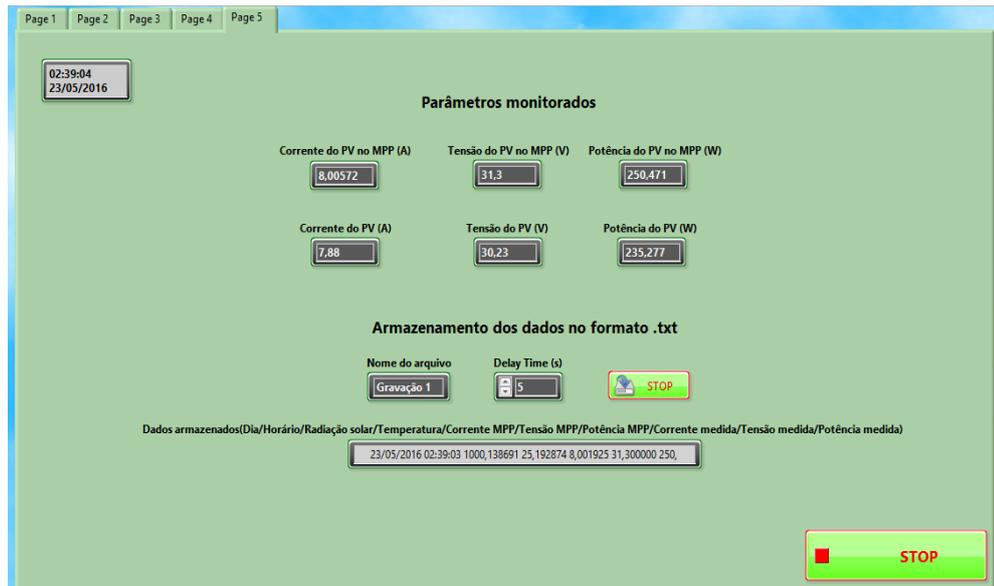
Na aba quatro, mostrada pela Figura 33, estão contidos quatro gráficos. O gráfico superior esquerdo mostra os valores estimados de corrente e tensão no ponto de potência máxima estimada, cuja potência pode ser visualizada no gráfico inferior esquerdo. O gráfico superior direito mostra a corrente e a tensão medidas nos terminais do arranjo PV. A partir destes valores calcula-se a potência real que o arranjo está fornecendo. Esta potência pode ser verificada através do gráfico inferior direito.

O principal objetivo desta aba é que o usuário possa comparar os valores estimados com os valores monitorados. Com isso pode-se determinar se o sistema realmente está operando no ponto de máxima potência, ou próximo, a fim de analisar se a técnica de MPPT realmente está se comportando de maneira efetiva, ou se há alguma falha presente no sistema que possa estar afetando o desempenho do sistema.



**Figura 33 – Aba quatro da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Por fim, na aba cinco, Figura 34, se encontram todos os parâmetros, estimados e monitorados, bem como a data e o horário da operação deste sistema. Além disso, esta aba traz a opção de realizar a gravação destes dados, num intervalo de tempo definido pelo usuário. Esta gravação é feita no formato txt. Optou-se pelo uso deste formato devido ao fato que este pode ser aberto em diversos programas, como o EXCEL, WORD, MatLab, entre outros, para a elaboração de relatórios.



**Figura 34 – Aba cinco da interface do sistema de monitoramento desenvolvido.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Os botões de *stop* presentes nesta aba são para que o usuário possa parar a gravação dos dados ou para que possa parar a execução do sistema.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Tratou-se neste capítulo o desenvolvimento do sistema de monitoramento em tempo real utilizando o *software* LabVIEW, desde o processo de aquisição dos dados por meio da placa de aquisição DAQ NI USB-6221, até a interface gráfica desenvolvida deste sistema.

Além de ser um sistema eficiente, e que pode ser implementado em qualquer planta de sistemas fotovoltaicos, não apresenta grande dificuldade para seu manuseio, onde a interface gráfica é apresentada em uma forma mais iterativa com o usuário, mas sempre mantendo sua eficiência e precisão.

Também, há a possibilidade de monitoramentos e estudos durante longos períodos, uma vez que todos os dados monitorados podem ser armazenadas, em um intervalo de tempo que pode ser ajustado pelo usuário.

## 6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos por meio de simulação computacional. Para a simulação do sistema de monitoramento, os dados a serem monitorados e adquiridos foram gerados pelo próprio LabVIEW. O software MATLAB/Simulink foi utilizado para a simulação do sistema fotovoltaico, composto pelo painel fotovoltaico, pelo conversor CC-CC *boost* quadrático e pelo conversor CC-CA *Full-Bridge*.

Para a análise dos resultados foram simuladas três condições de operação, onde cada condição de operação apresenta valores distintos de radiação solar e temperatura. Os mesmos parâmetros, em cada condição de operação, são utilizados tanto no sistema de monitoramento quanto no sistema simulado via MATLAB/Simulink.

As escolhas dos valores de radiação solar e de temperatura foram escolhidas de forma arbitrária, não sendo, necessariamente, condições atmosféricas reais. O propósito destes valores utilizados é para observar como a mudança do ponto máximo de potência, o MPP, ocorre de forma significativa para cada condição de temperatura e radiação solar.

### 6.1 CONDIÇÃO 01

A Tabela 5 apresenta os valores de radiação solar e temperatura referentes a condição de operação 01.

**Tabela 9 – Valores de radiação solar e temperatura na condição de operação 01.**

$$G = 1000 \text{ W/m}^2$$

$$T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

**Fonte: Autoria Própria**

Os resultados obtidos a partir do sistema de monitoramento são mostrados nas Figuras 35 e 36.

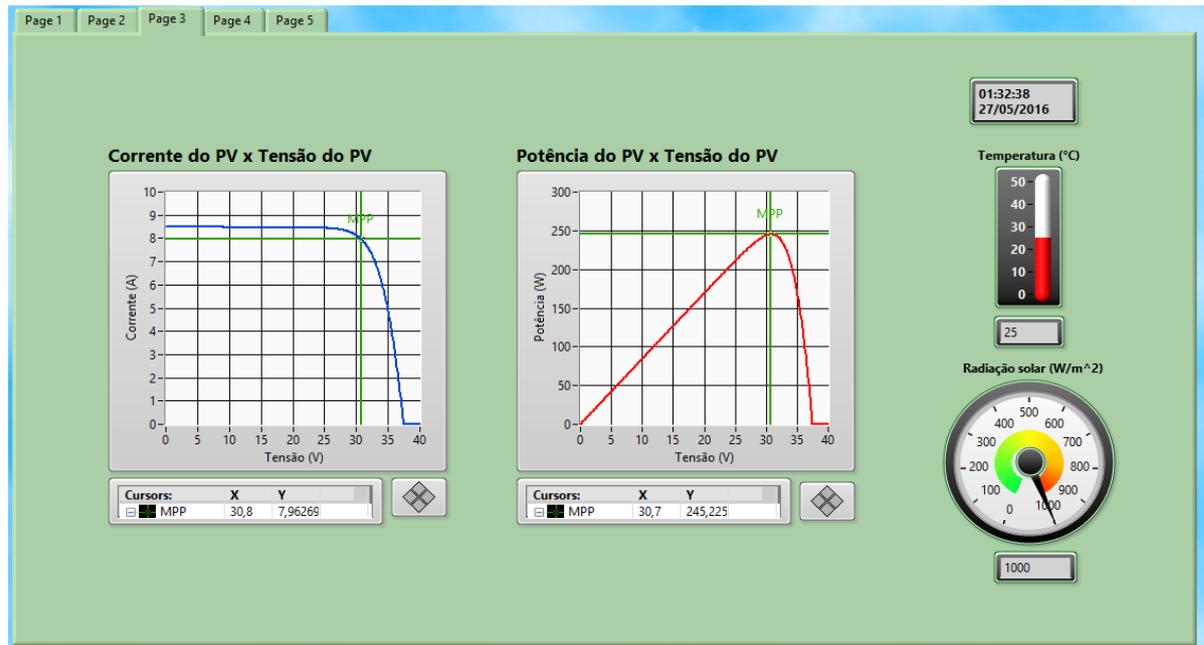


Figura 35 – Curvas IxV e PxV do painel PV via sistema de monitoramento na condição de operação 01.

Fonte: Autoria Própria.

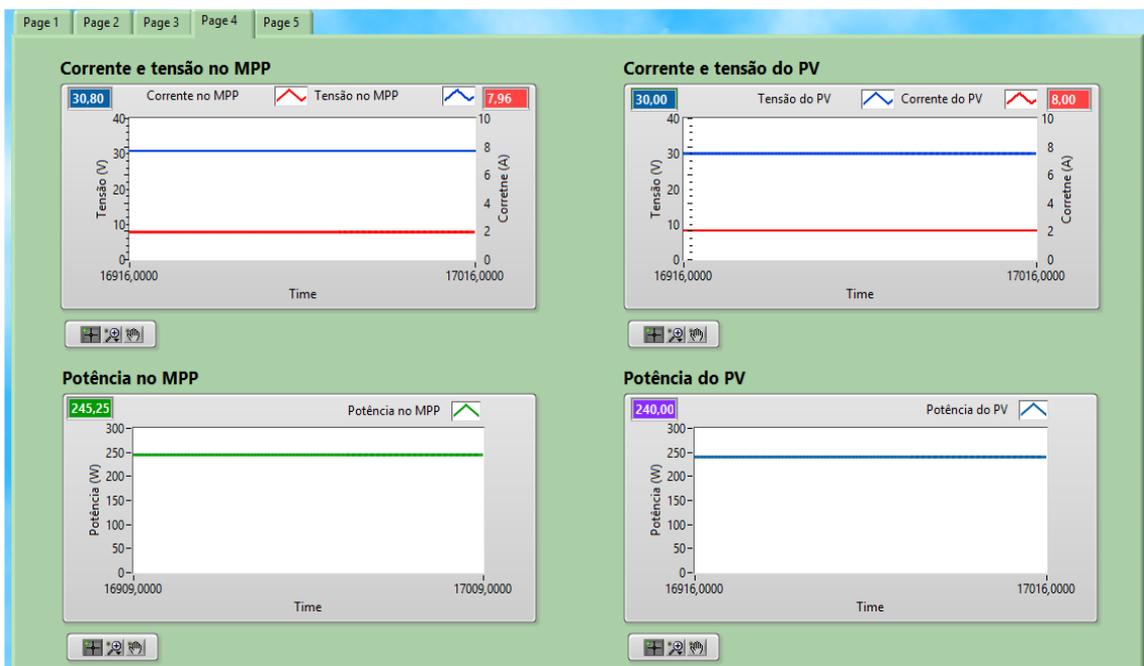
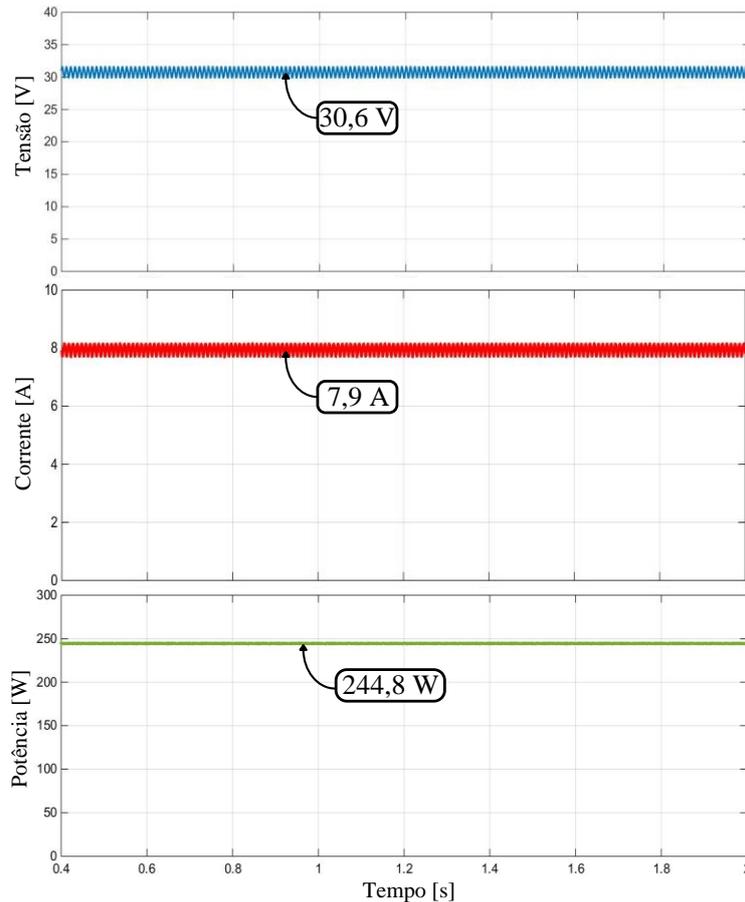


Figura 36 – Valores estimados e simulados de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  via sistema de monitoramento na condição de operação 01.

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados obtidos via simulação em MATLAB/Simulink na condição de operação 01 são mostrados na Figura 37.



**Figura 37 – Valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  do sistema PV via MATLAB/Simulink na condição de operação 01.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Nota-se com os dados obtidos para a condição de operação 01 que o MPP estimado pelo sistema de monitoramento via LabVIEW e pela simulação do sistema fotovoltaico via MatLab/Simulink é o ponto de máxima potência nominal do painel fotovoltaico utilizado, ou seja, corresponde ao ponto de potência máxima nas condições padrões de teste, em torno de 245 W.

## 6.2 CONDIÇÃO 02

A Tabela 6 apresenta os valores de radiação solar e temperatura referentes a condição de operação 02.

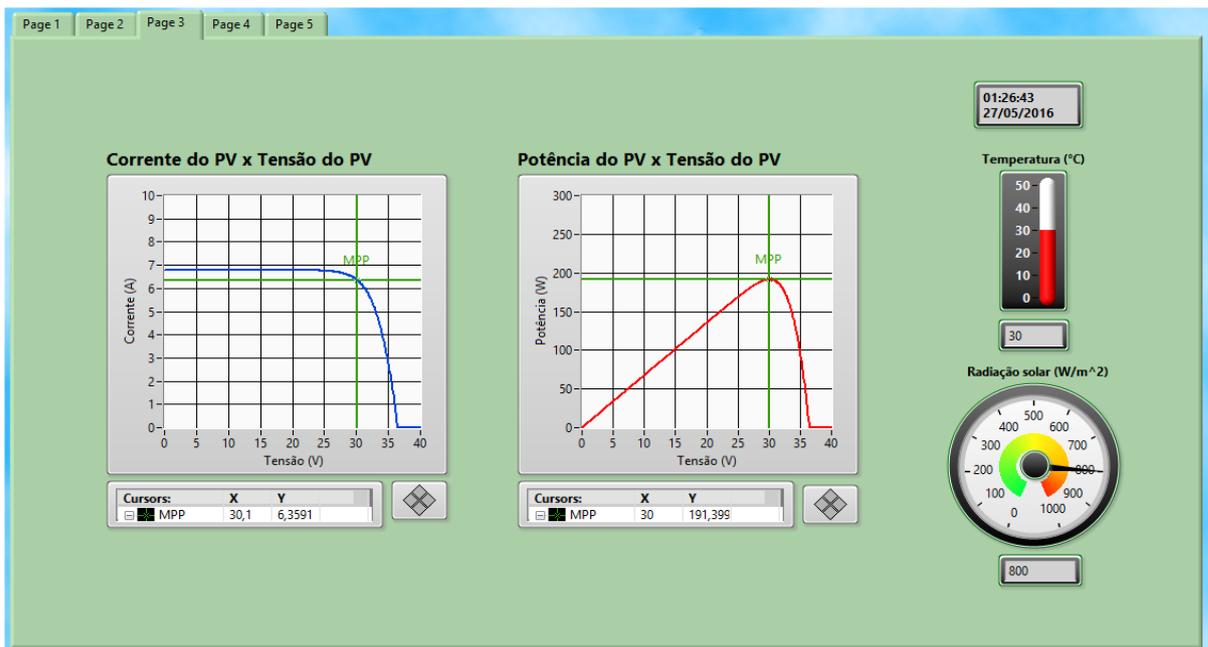
**Tabela 10 – Valores de radiação solar e temperatura na condição de operação 02.**

$$G = 800 \text{ W/m}^2$$

$$T = 30 \text{ } ^\circ\text{C}$$

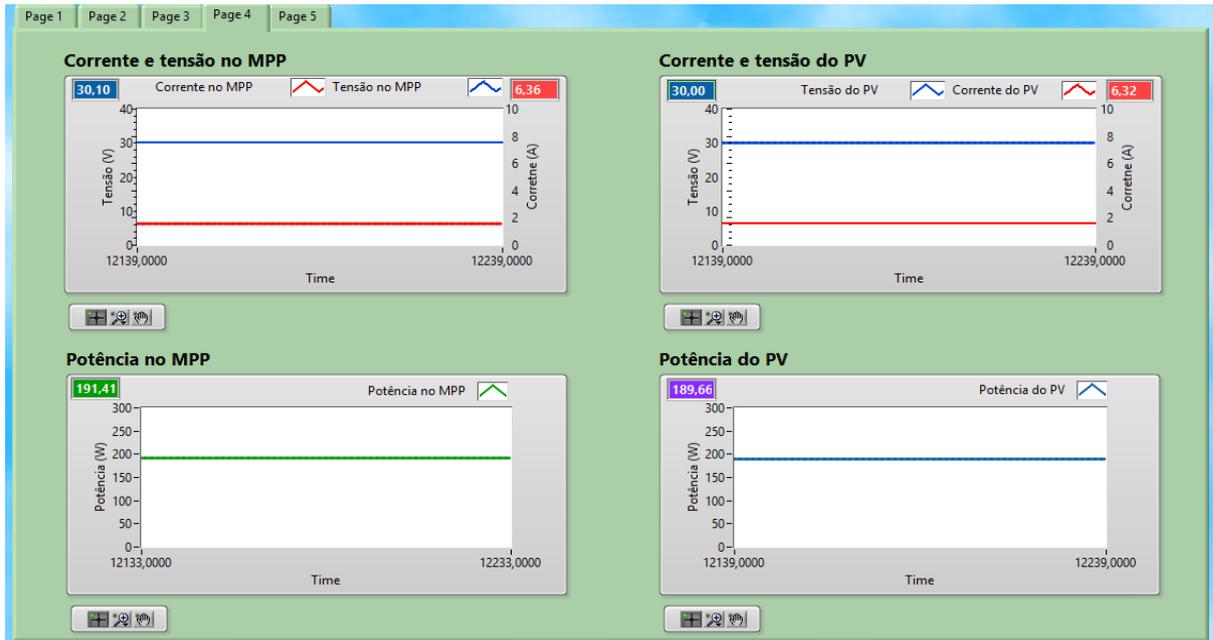
**Fonte: Autoria Própria**

Os resultados obtidos a partir do sistema de monitoramento são mostrados nas Figuras 38 e 39.



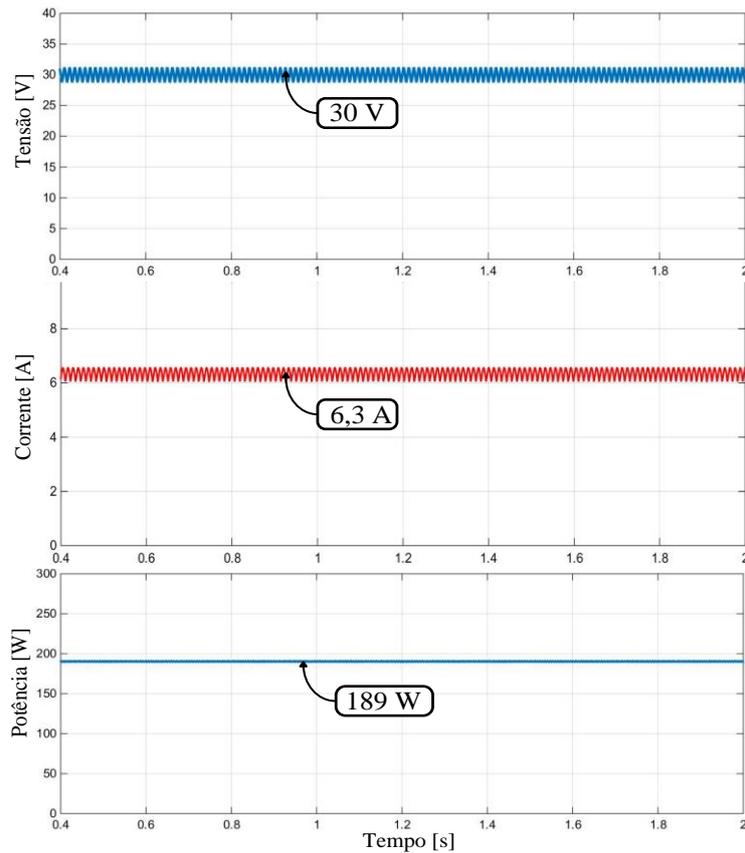
**Figura 38 – Curvas IxV e PxV do painel PV via sistema de monitoramento na condição de operação 02.**

**Fonte: Autoria Própria.**



**Figura 39 – Valores estimados e simulados de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  via sistema de monitoramento na condição de operação 02.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Os resultados obtidos via simulação em MATLAB/Simulink na condição de operação 02 são mostrados na Figura 40.



**Figura 40 – Valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  do sistema PV via MATLAB/Simulink na condição de operação 02.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Para esta condição optou-se em utilizar valores de radiação e temperatura que causaria uma alteração do ponto de máxima potência do painel fotovoltaico. Como apresentado na seção 3.2, a variação da radiação solar modifica consideravelmente a corrente do painel, já a variação da temperatura implica diretamente na tensão do painel. Desta forma, nesta condição de operação, foi definido uma radiação solar inferior a  $1000 \text{ W/m}^2$  e uma temperatura superior a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  para validar este comportamento por parte do painel fotovoltaico.

### 6.3 CONDIÇÃO 03

A Tabela 7 apresenta os valores de radiação solar e temperatura referentes a condição de operação 03.

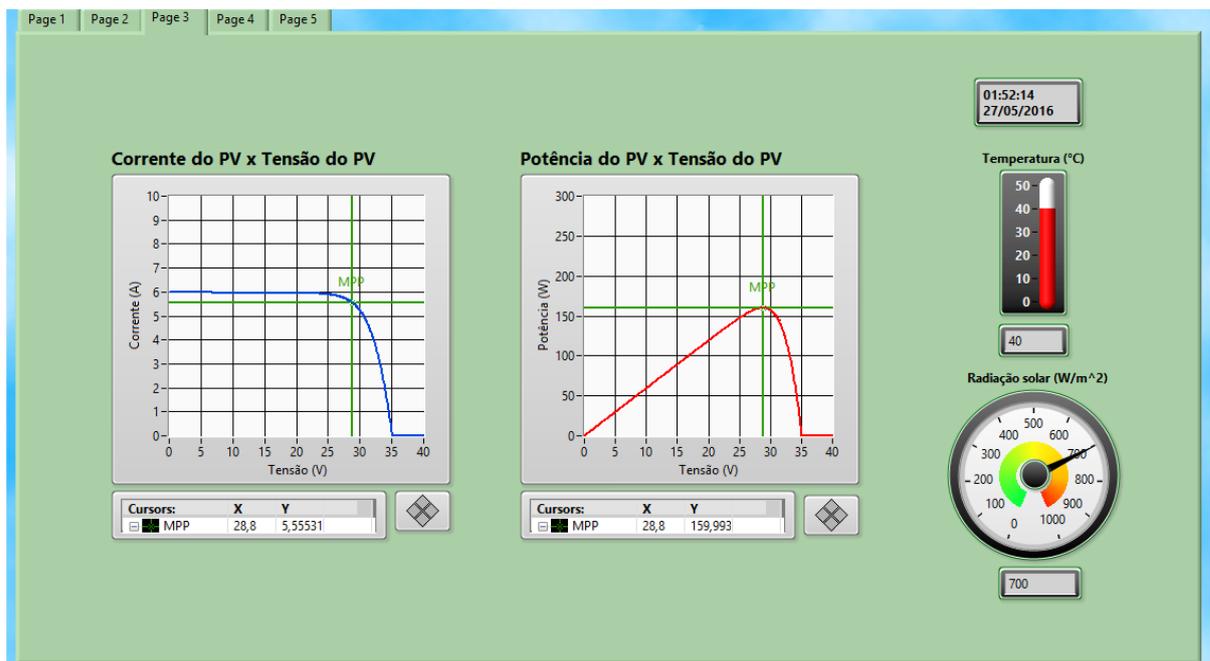
**Tabela 11 – Valores de radiação solar e temperatura na condição de operação 03.**

$$G = 700 \text{ W/m}^2$$

$$T = 40 \text{ }^\circ\text{C}$$

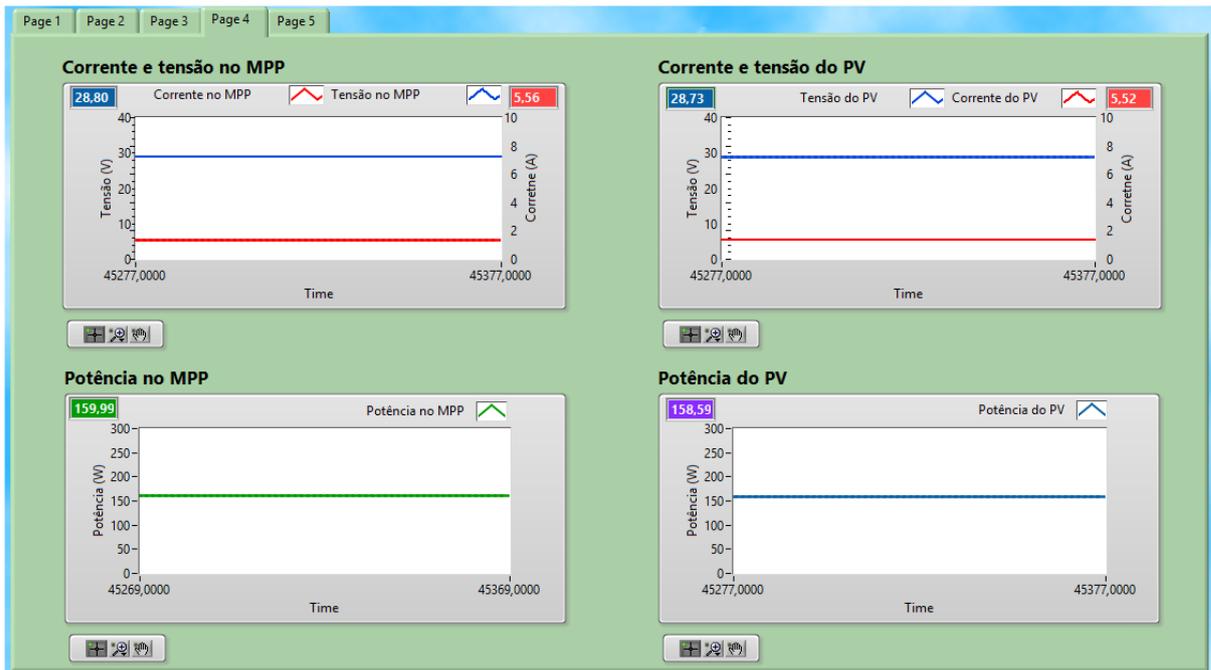
**Fonte: Aatoria Própria**

Os resultados obtidos a partir do sistema de monitoramento são mostrados nas Figuras 41 e 42.



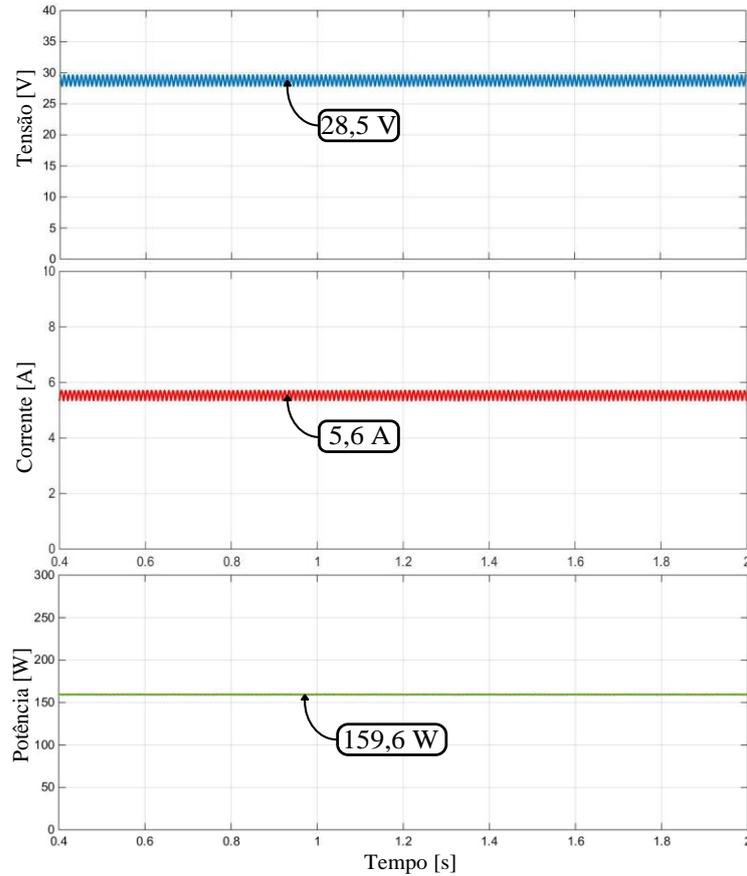
**Figura 41 – Curvas IxV e PxV do painel PV via sistema de monitoramento na condição de operação 03.**

**Fonte: Aatoria Própria.**



**Figura 42 – Valores estimados e simulados de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  via sistema de monitoramento na condição 03 de operação.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Os resultados obtidos via simulação em MATLAB/Simulink na condição de operação 03 são mostrados na Figura 43.



**Figura 43 – Valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  do sistema PV via MATLAB/Simulink na condição de operação 03.**

**Fonte: Autoria Própria.**

Nesta última condição de operação, foram definidos valores de radiação solar e temperatura onde o painel fotovoltaico apresenta uma potência máxima inferior ao das condições apresentadas anteriormente. É possível verificar que, independente da condição atmosférica em que o painel está submetido, a técnica de MPPT implementada sempre rastreia o ponto máximo de potência, independentemente de sua magnitude.

#### 6.4 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Com os dados obtidos a partir da simulação do sistema de monitoramento, observa-se que nas três condições de temperatura e radiação solar apresentadas, o sistema apresenta valores estimados de tensão e corrente que representam o ponto máximo de potência que o painel PV é capaz de fornecer em cada condição de operação. Estes valores podem ser observados na aba

três do sistema de monitoramento, onde esta aba apresenta as curvas características do PV em cada condição de radiação solar e temperatura. Desta forma é possível verificar que estes valores de corrente e tensão do painel fotovoltaico são próximos com os valores obtidos via simulação do sistema PV, via MatLab/Simulink, para as mesmas condições de radiação solar e temperatura.

Além disso, também é possível verificar o bom desempenho do rastreamento do ponto de máxima potência por parte da técnica de MPPT P&O, em que em todas as variações climáticas apresentadas, o sistema operou muito próximo ao MPP. As ondulações presentes na potência rastreado é uma característica própria desta técnica, que opera sempre perturbando a tensão de referência nos terminais do painel.

## 7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais do sistema de monitoramento desenvolvido aplicado em um protótipo desenvolvido em laboratório, composto por um painel PV, pelo conversor CC-CC *boost* quadrático e pelo conversor CC-CA *Full-Bridge*. Os parâmetros do fabricante do painel fotovoltaico utilizado encontra-se no *datasheet* presentes no anexo A.

Serão apresentados os resultados obtidos com o protótipo operando em dois casos. O primeiro caso o protótipo opera com o painel fotovoltaico e o conversor *boost* quadrático, onde a energia proveniente do painel é transferida a uma carga *RC* local. Já no segundo caso o protótipo opera com o painel fotovoltaico, o conversor CC-CC *boost* quadrático e o conversor CC-CA *full-bridge*, onde a energia proveniente do painel fotovoltaico é injetada junto a rede elétrica convencional.

Para o primeiro caso são implementadas e analisadas duas técnicas de MPPT, sendo elas a técnica de MPPT P&O e a técnica de MPPT Tensão Constante, a fim de analisar o desempenho das duas técnicas a partir do sistema de monitoramento. Já para o segundo caso manteve-se a técnica de MPPT P&O.

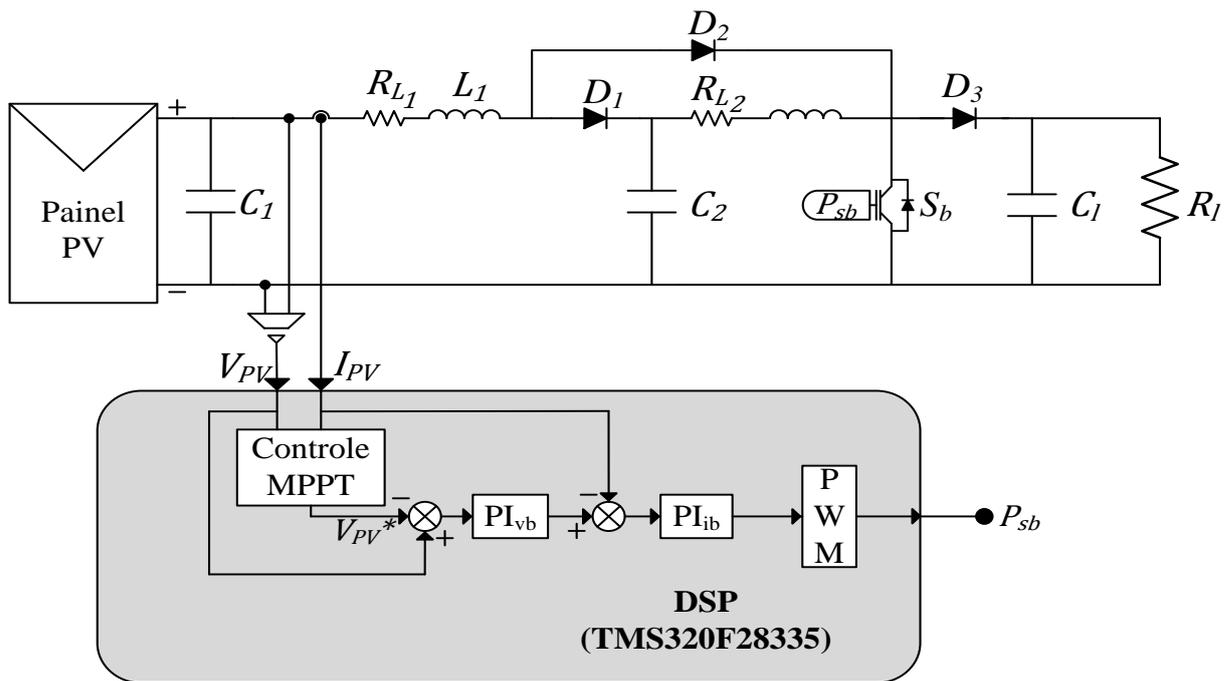
### 7.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A UMA CARGA UTILIZANDO A TÉCNICA DE MPPT P&O

A Figura 44 mostra o esquemático do protótipo para este caso de operação, onde este opera transferindo a energia proveniente do painel fotovoltaico para uma carga *RC* local. Os valores referente a carga estão inseridos na Tabela 12.

**Tabela 12 – Valores da carga RC local.**

|                                      |
|--------------------------------------|
| $C_l = 470 \mu F$ $R_l = 100 \Omega$ |
|--------------------------------------|

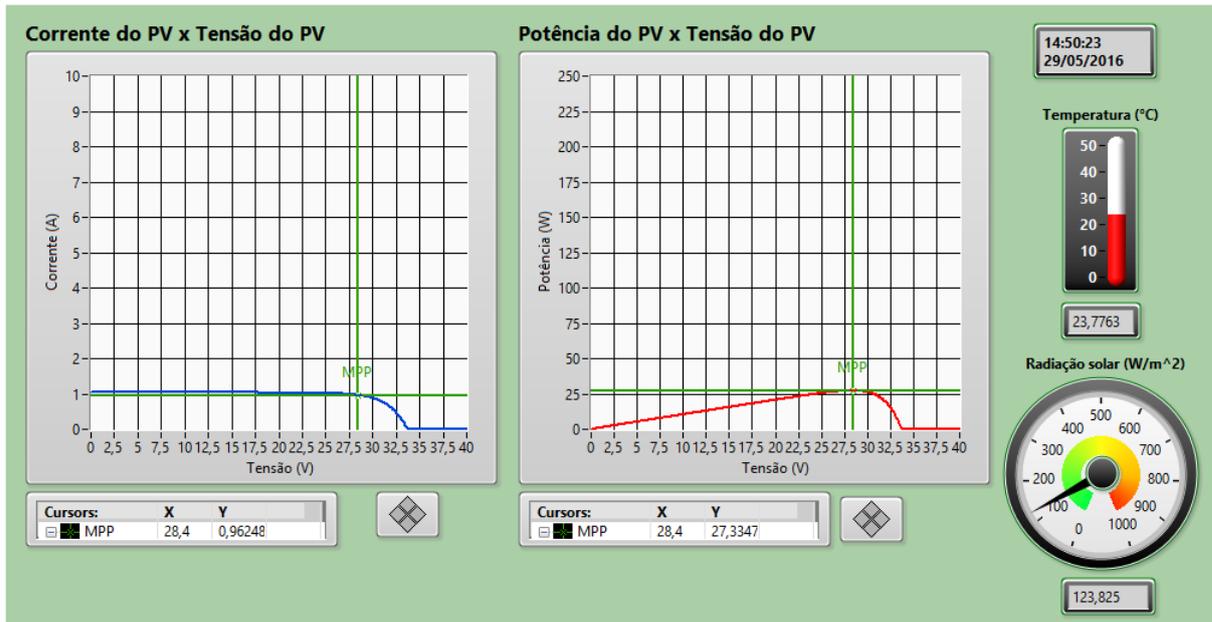
**Fonte: Autoria Própria**



**Figura 44 – Esquemático do protótipo alimentando uma carga local.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

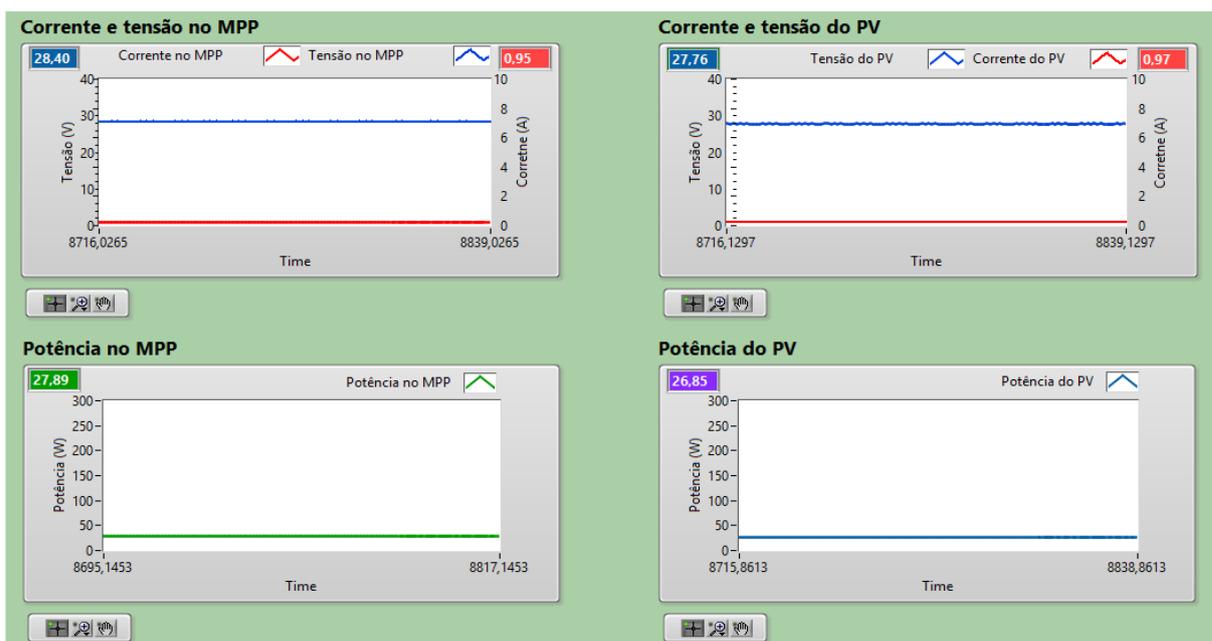
Neste caso já é possível verificar o desempenho do MPPT P&O e validar o sistema de monitoramento desenvolvido, pois o que se deseja monitorar é quão eficiente está sendo a extração de energia do painel fotovoltaico, independente se esta energia está sendo transferida a uma carga local ou sendo injetada na rede elétrica.

A Figura 45 apresenta as curvas características  $I \times V$  e  $P \times V$  do painel fotovoltaico e os valores respectivos da radiação solar e da temperatura, naquele instante, onde estas informações se encontram na aba três da interface gráfica do sistema. Verifica-se também o horário em que o protótipo estava operando.



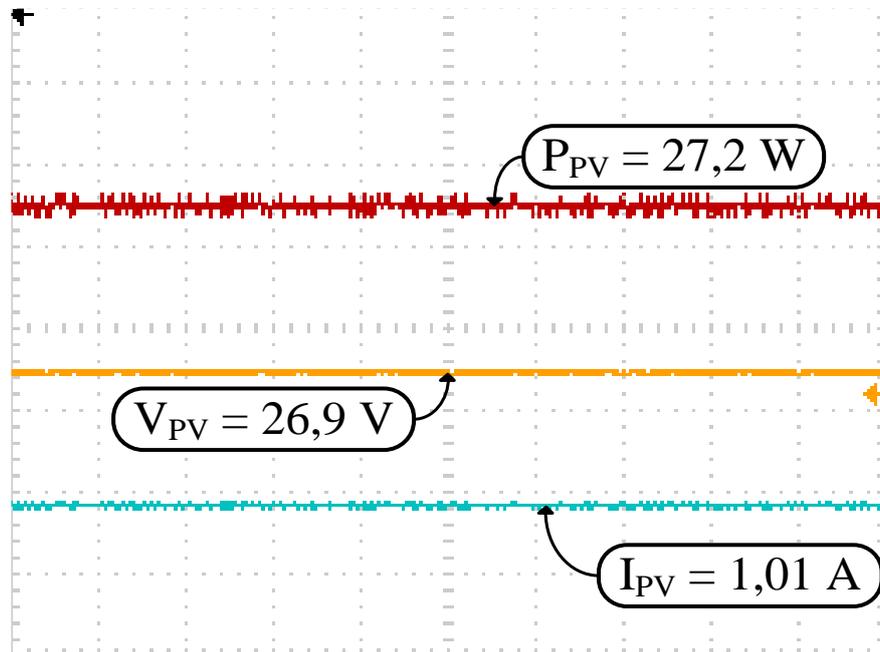
**Figura 45 – Curvas características  $I \times V$  e  $P \times V$  do painel fotovoltaico.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

A Figura 46 mostra os valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  monitorados pelo sistema e os valores estimados para o ponto de máxima potência, a partir dos valores da radiação solar e da temperatura, que se encontram na aba quatro da interface gráfica. Os valores estimados de  $I_{PV}$  e  $V_{PV}$  presentes nesta aba, que estão relacionados ao ponto de potência máxima estimada, são os valores obtidos a partir das curvas características do painel fotovoltaico presentes na aba três.



**Figura 46 – valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  monitorados e estimados.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

A Figura 47 mostra os valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  do sistema fotovoltaico adquiridos a partir de um osciloscópio Tektronix TPS2024B.



**Figura 47 – Valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  (1A/div;20V/div;20W/div).  
Fonte: Autoria Própria.**

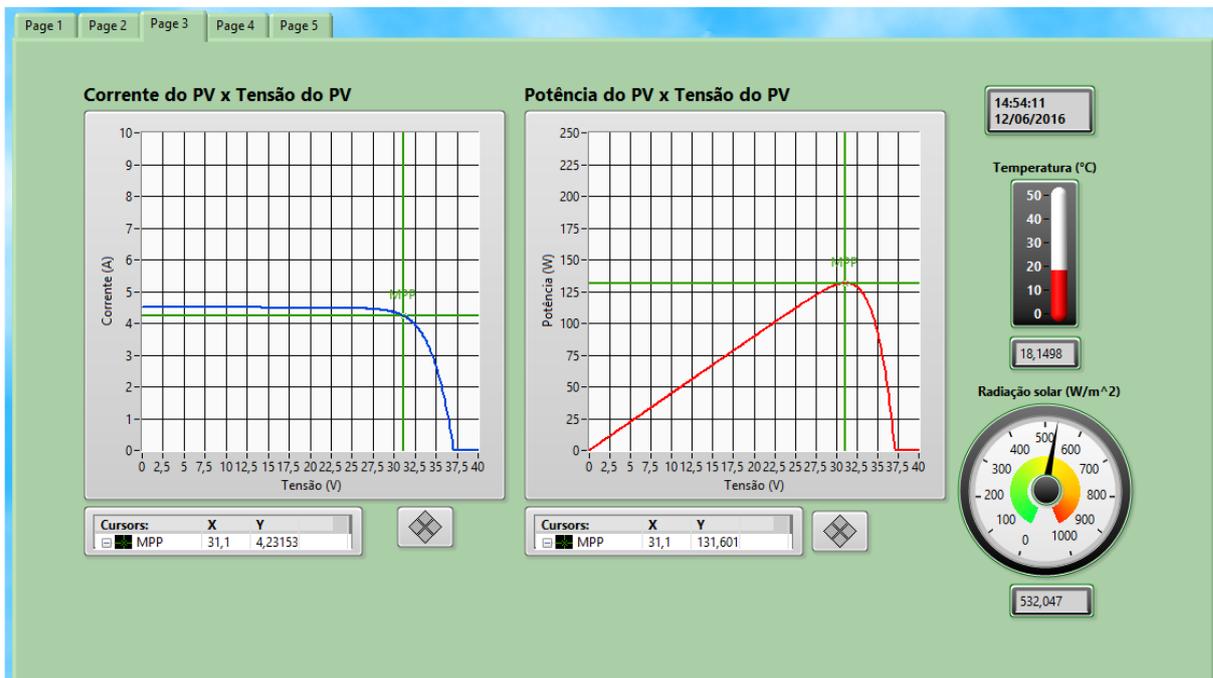
Nota-se que a potência estimada e a potência real medida pelo sistema de monitoramento apresentam valores muito próximos. Isto indica que o MPPT P&O teve um bom desempenho, pois o sistema estava operando muito próximo da potência máxima estimada para aquela atual condição de radiação solar e temperatura, sendo verificada também a partir dos resultados obtidos com o auxílio de um osciloscópio.

É importante observar que a potência extraída do painel fotovoltaico apresenta um valor baixo, mesmo o sistema operando em um horário que, teoricamente, apresentaria um índice de radiação solar mais elevado. Contudo, neste dia o tempo se encontrava um pouco fechado, com a presença de muitas nuvens, provocando uma queda considerável da radiação solar incidente sobre o painel, o que explica a baixa potência extraída do mesmo.

As oscilações presentes na Figura 45 é uma característica do MPPT P&O, onde o mesmo comportamento foi discutido e verificado a partir das simulações via MATLAB/Simulink apresentadas no Capítulo 6.

## 7.2 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO A UMA CARGA UTILIZANDO A TÉCNICA DE MPPT TENSÃO CONSTANTE

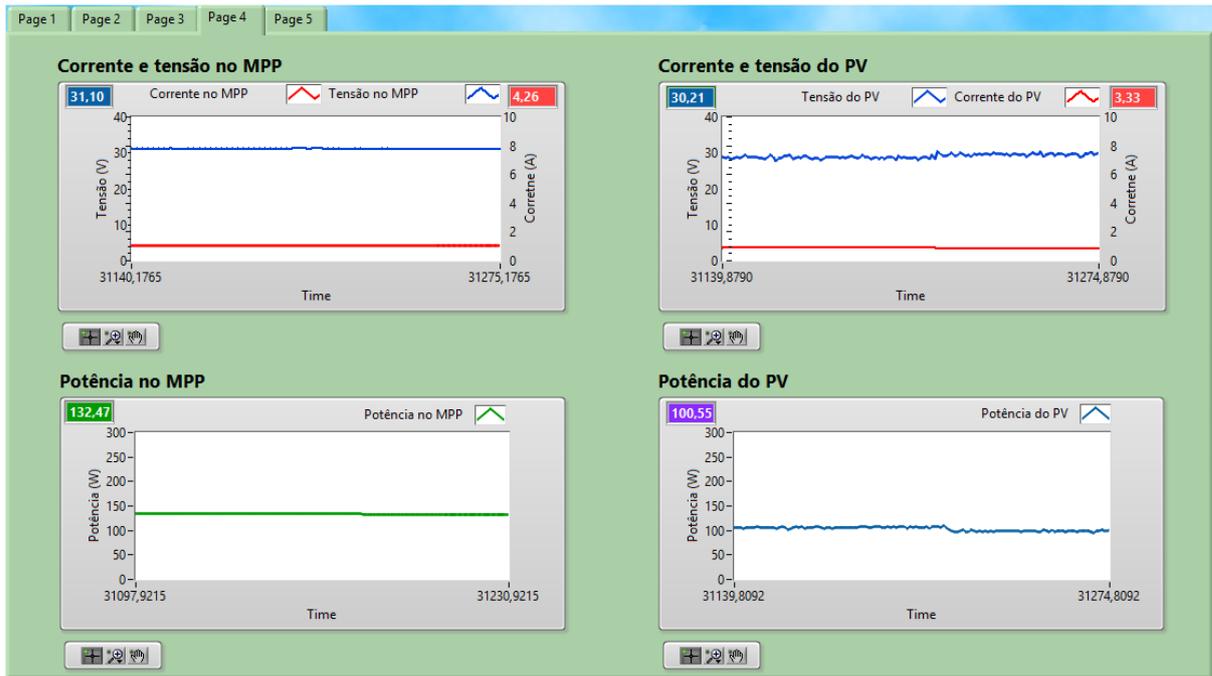
Mantendo o protótipo na configuração mostrada pela Figura 44, a técnica de MPPT utilizada para estes novos testes é a técnica Tensão Constante. A Figura 48 mostra a aba três do sistema de monitoramento.



**Figura 48 – Curvas características  $I \times V$  e  $P \times V$  do painel fotovoltaico.  
Fonte: Autoria Própria.**

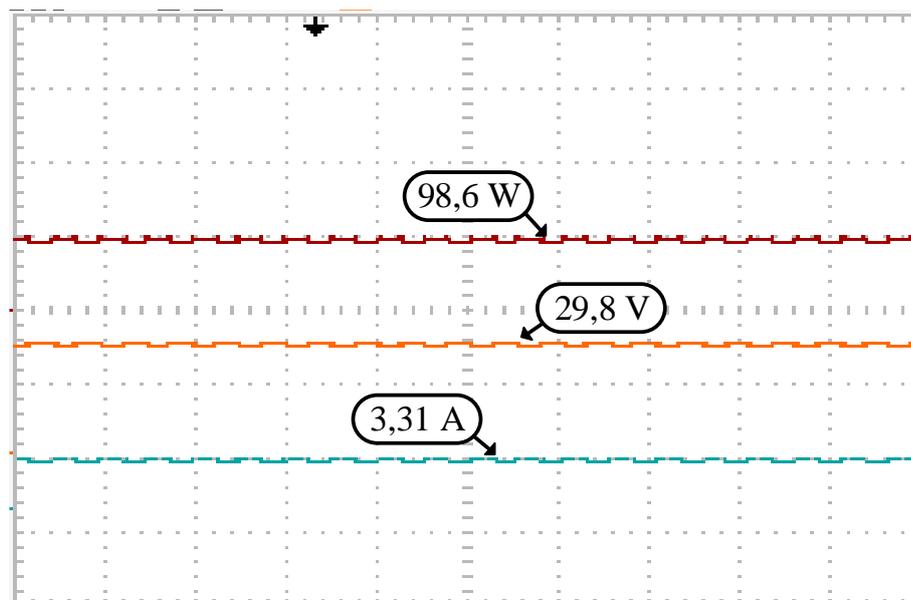
É possível verificar que a radiação solar para este teste já apresentava um valor razoavelmente elevado em relação ao teste anterior. Isto é porque o tempo neste dia se encontrava mais limpo, com poucas nuvens.

A Figura 49 mostra os valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  monitorados pelo sistema e os valores estimados para o ponto de máxima potência na respectiva condição de radiação solar e temperatura.



**Figura 49 – valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  monitorados e estimados.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

A Figura 50 mostra os valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  do sistema fotovoltaico adquiridos a partir de um osciloscópio Tektronix TPS2024B.



**Figura 50 – Valores de  $V_{PV}$ ,  $I_{PV}$  e  $P_{PV}$  (1A/div; 20V/div; 100W/div).**  
**Fonte: Autoria Própria.**

A partir dos resultados visualizados na aba três do sistema de monitoramento, é possível verificar que o sistema, para a técnica de MPPT Tensão Constante aplicada, não estava operando na máxima potência que o painel fotovoltaico era capaz de fornecer.

Para as atuais condições de radiação solar e temperatura, poderia ser extraído do painel uma potência em torno de 130 W. Contudo o sistema estava extraindo uma potência em torno de 100 W, deixando de extrair 30 W do painel, que pode ser verificado juntamente com os resultados obtidos a partir de um osciloscópio.

Desta forma, a partir do sistema de monitoramento desenvolvido, é possível verificar e analisar o desempenho de técnicas de MPPT. A partir dos resultados obtidos, nota-se que a técnica de MPPT P&O obteve um melhor fator de rastreamento.

A Tabela 13 mostra um resumo dos valores obtidos experimentalmente, para as duas técnicas de MPPT utilizadas.

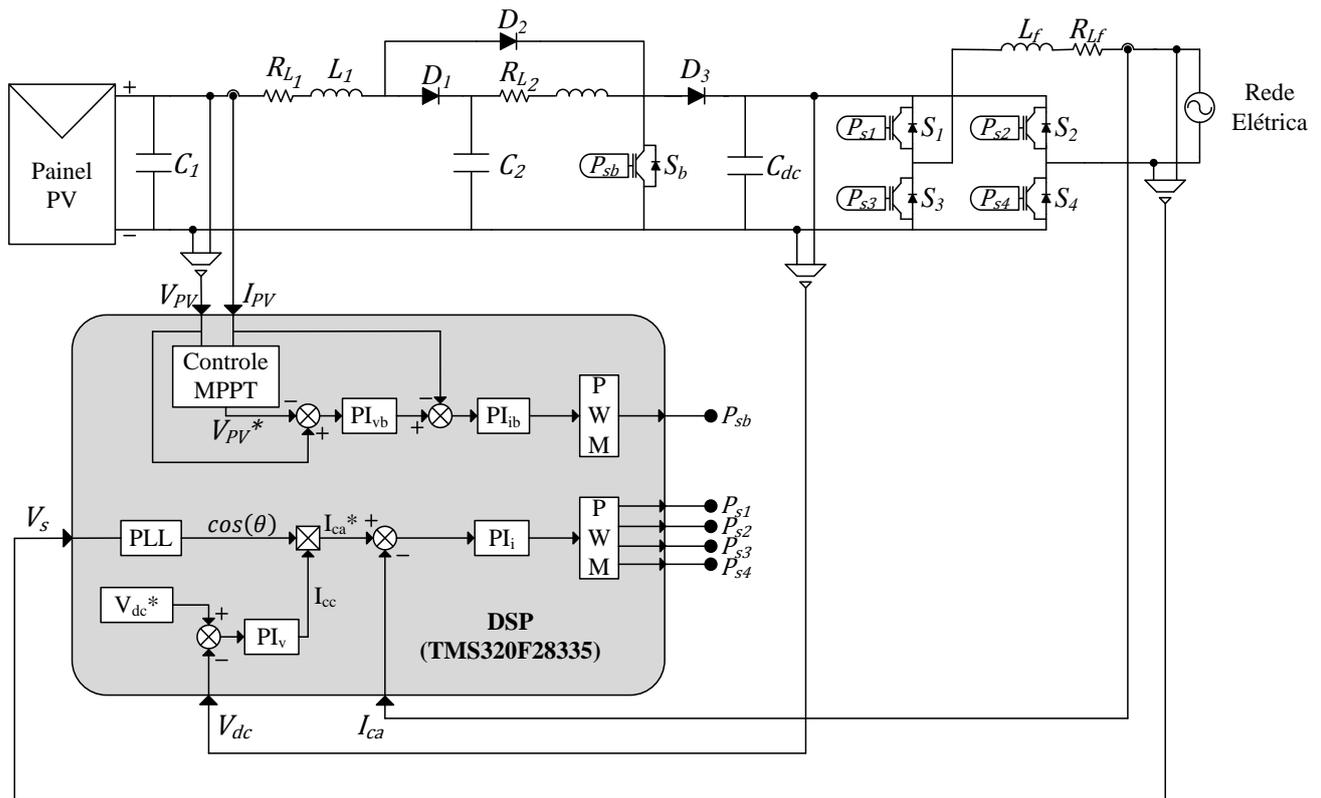
**Tabela 13 – Resultados experimentais.**

| <b>Técnica</b>          | <b>Potência máxima estimada [W]</b> | <b>Potência real extraída [W]</b> |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| <b>P&amp;O</b>          | 27,89                               | 26,85                             |
| <b>Tensão Constante</b> | 132,5                               | 100,5                             |

**Fonte: Autoria Própria.**

### 7.3 SISTEMA FOTOVOLTAICO CONECTADO À REDE ELÉTRICA

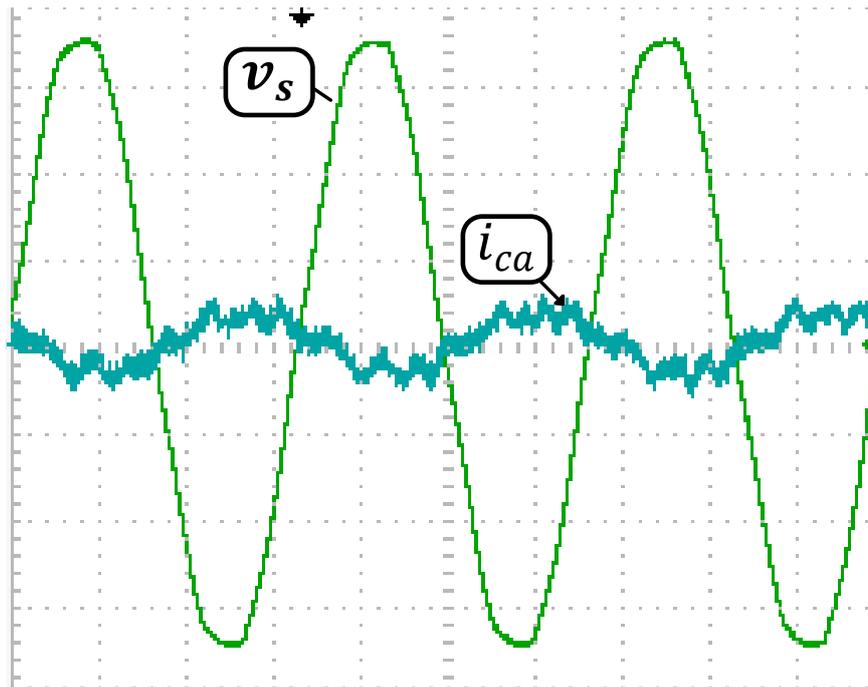
Para operação do protótipo conectado à rede elétrica, sua configuração é representada pela Figura 51.



**Figura 51 – Esquemático do protótipo conectado à rede elétrica.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

O sistema de monitoramento já pôde ser validado a partir dos testes obtidos nas Seções 7.1 e 7.2, com o sistema conectado a uma carga local.

Nesta configuração de operação do protótipo, foi extraído resultado somente da corrente injetada na rede elétrica, a fim de verificar todo o funcionamento do protótipo desenvolvido, cuja finalidade do sistema é injetar na rede elétrica a energia proveniente do painel fotovoltaico. O resultado da corrente sendo injetada na rede elétrica é mostrado pela Figura 52.



**Figura 52 - Valores de  $v_s$  e  $i_{ca}$  do sistema fotovoltaico (600mA/div;50V).  
Fonte: Autoria própria.**

Nota-se, a partir da Figura 52, que a corrente do sistema  $i_{ca}$  está em contra fase com a tensão da rede  $v_s$ , o que indica que esta corrente está sendo injetada na rede.

Verifica-se que a energia proveniente do painel fotovoltaico que está sendo injetada na rede elétrica é relativamente baixa, devido ao problema da baixa incidência de radiação solar. Por este motivo a corrente  $i_{ca}$  apresenta uma amplitude muito baixa, em torno de 300 mA. Neste caso a proporção ruído-sinal já é significativo, o que explica a forma ruidosa da corrente  $i_{ca}$ .

#### 7.4 ARMAZENAMENTO DE DADOS

Além de monitorar, o sistema desenvolvido de monitoramento em tempo real permite ao usuário realizar a gravação de todos os dados estimados e adquiridos em um formato .txt em um período desejado, onde o intervalo de gravação também é determinado pelo usuário. A Figura 53 mostra como os dados são armazenados.

| 8 - Bloco de notas  |            |           |          |           |            |          |           |            |  |  |
|---------------------|------------|-----------|----------|-----------|------------|----------|-----------|------------|--|--|
| Arquivo             | Editar     | Formatar  | Exibir   | Ajuda     |            |          |           |            |  |  |
| 12/06/2016 14:50:54 | 542,891208 | 18,216533 | 4,306209 | 31,200000 | 135,078550 | 3,692034 | 3,975168  | 14,676457  |  |  |
| 12/06/2016 14:50:59 | 540,890804 | 18,195138 | 4,290079 | 31,200000 | 133,850479 | 3,678604 | 29,922489 | 14,676457  |  |  |
| 12/06/2016 14:51:04 | 547,417481 | 18,197496 | 4,343875 | 31,200000 | 134,689688 | 3,680222 | 29,223708 | 110,072982 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:09 | 540,179577 | 18,200777 | 4,284114 | 31,200000 | 134,347916 | 3,678611 | 28,885819 | 107,549735 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:14 | 547,417997 | 18,193665 | 4,343946 | 31,200000 | 134,643716 | 3,677366 | 29,291209 | 106,259700 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:19 | 539,945859 | 18,207020 | 4,295853 | 31,100000 | 134,435181 | 3,675215 | 29,229062 | 107,714486 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:24 | 546,819939 | 18,196054 | 4,338971 | 31,200000 | 134,591969 | 3,679482 | 29,086729 | 107,423099 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:29 | 539,698456 | 18,221402 | 4,293574 | 31,100000 | 134,440279 | 3,676619 | 29,357872 | 107,024099 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:34 | 546,784912 | 18,188580 | 4,338813 | 31,200000 | 134,556613 | 3,678935 | 28,942037 | 107,937708 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:39 | 538,518682 | 18,215374 | 4,283927 | 31,100000 | 134,409227 | 3,675032 | 29,362695 | 106,475867 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:44 | 547,133665 | 18,200962 | 4,341474 | 31,200000 | 134,513701 | 3,674666 | 29,193088 | 107,908854 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:49 | 540,142250 | 18,197884 | 4,283857 | 31,200000 | 134,435759 | 3,672928 | 29,215382 | 107,274854 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:54 | 547,971748 | 18,195097 | 4,348488 | 31,200000 | 134,538848 | 3,672545 | 29,119580 | 107,305999 |  |  |
| 12/06/2016 14:51:59 | 539,392704 | 18,210569 | 4,291226 | 31,100000 | 134,455639 | 3,669448 | 29,251590 | 106,942970 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:04 | 547,871549 | 18,205649 | 4,347478 | 31,200000 | 134,540330 | 3,673323 | 28,530075 | 107,337186 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:09 | 540,290684 | 18,221588 | 4,298462 | 31,100000 | 134,483120 | 3,674166 | 29,208563 | 104,800174 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:14 | 545,536198 | 18,202624 | 4,328268 | 31,200000 | 134,518048 | 3,676621 | 28,745549 | 107,317108 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:19 | 540,964981 | 18,217867 | 4,304093 | 31,100000 | 134,479181 | 3,674314 | 28,915438 | 105,686480 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:24 | 545,286059 | 18,198030 | 4,326285 | 31,200000 | 134,507010 | 3,674575 | 28,591796 | 106,244384 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:29 | 541,396359 | 18,217965 | 4,293853 | 31,200000 | 134,478652 | 3,675040 | 29,655856 | 105,062686 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:34 | 544,204937 | 18,207026 | 4,317211 | 31,200000 | 134,489569 | 3,675306 | 28,640832 | 108,986467 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:39 | 542,481447 | 18,239227 | 4,302434 | 31,200000 | 134,477491 | 3,676479 | 28,762636 | 105,263808 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:44 | 543,710767 | 18,203425 | 4,313197 | 31,200000 | 134,481776 | 3,673671 | 28,349602 | 105,745229 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:49 | 541,702071 | 18,226130 | 4,296233 | 31,200000 | 134,462676 | 3,676343 | 28,534673 | 104,147109 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:54 | 544,055551 | 18,207928 | 4,315963 | 31,200000 | 134,470816 | 3,675718 | 29,109177 | 104,903247 |  |  |
| 12/06/2016 14:52:59 | 543,826711 | 18,233386 | 4,313632 | 31,200000 | 134,475396 | 3,678218 | 28,756082 | 106,997127 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:04 | 542,739402 | 18,202173 | 4,305206 | 31,200000 | 134,469513 | 3,677513 | 28,675362 | 105,771141 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:09 | 543,367526 | 18,219868 | 4,310080 | 31,200000 | 134,469698 | 3,676142 | 29,109526 | 105,454027 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:14 | 541,459312 | 18,199265 | 4,294698 | 31,200000 | 134,452729 | 3,677507 | 29,154324 | 107,010738 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:19 | 543,798310 | 18,231428 | 4,313432 | 31,200000 | 134,457085 | 3,680216 | 28,443246 | 107,215234 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:24 | 541,801597 | 18,207560 | 4,297377 | 31,200000 | 134,444455 | 3,678513 | 28,482520 | 104,677281 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:29 | 544,885660 | 18,227203 | 4,322474 | 31,200000 | 134,457898 | 3,678970 | 28,658238 | 104,773315 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:34 | 542,366732 | 18,207199 | 4,302045 | 31,200000 | 134,450583 | 3,677081 | 29,506275 | 105,432811 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:39 | 543,813542 | 18,216974 | 4,313809 | 31,200000 | 134,454833 | 3,678395 | 28,954071 | 108,496952 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:44 | 540,919206 | 18,195434 | 4,290309 | 31,200000 | 134,437268 | 3,676644 | 27,967765 | 106,504505 |  |  |
| 12/06/2016 14:53:49 | 545,693991 | 18,223384 | 4,329208 | 31,200000 | 134,455383 | 3,675916 | 28,325798 | 102,827506 |  |  |

**Figura 53 - Valores estimados e monitorados do sistema PV armazenados em formato .txt.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Observa a data e o horário em que se iniciou o monitoramento do sistema fotovoltaico, e o intervalo de gravação sendo de 5 segundos. Desta forma o usuário pode utilizar este arquivo para análises posteriores e também para a geração de relatórios.

A primeira e segunda coluna corresponde a data e ao horário da execução do sistema. A terceira e quarta corresponde a radiação solar e a temperatura. A quinta, sexta e sétima coluna corresponde a corrente, tensão e potência, respectivamente, estimados do painel fotovoltaico. Por fim, a oitava, nona e décima coluna corresponde aos valores reais adquiridos pelo sistema da corrente, tensão e potência do painel, respectivamente.

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foram propostos o desenvolvimento e a aplicação de um sistema de monitoramento em tempo real em sistemas de geração de energia fotovoltaica, o qual permite verificar qual a potência máxima que um arranjo fotovoltaico pode gerar em determinadas condições de temperatura e radiação solar, além de monitorar a potência real extraído do arranjo.

O sistema também permite verificar se o emprego de um algoritmo de MPPT está se comportando de forma efetiva, ou seja, se o sistema realmente está operando no ponto da máxima potência, e também se há presença de falhas no sistema de processamento de energia, onde este é composto pelos conversores estáticos de potência.

No intuito da aplicação do sistema de monitoramento, este foi implementado em um protótipo desenvolvido em laboratório, composto por um painel fotovoltaico, um conversor CC-CC *boost* quadrático e um conversor CC-CA *Full-Bridge*. A modelagem destes conversores foi realizada utilizando a técnica modelagem a pequenos sinais, onde, a partir dos modelos encontrados, foi possível projetar os controladores a serem utilizados nas malhas de controle e embarcados em um processador digital de sinais.

Com o objetivo de validar o sistema de monitoramento desenvolvido, foram obtidos resultados via simulações computacionais e resultados experimentais. Com estes resultados foi possível verificar um desempenho satisfatório por parte do sistema de monitoramento, que pode verificar o desempenho das duas técnicas de MPPT implementadas, onde a técnica de maior fator de rastreamento foi a técnica de MPPT P&O, que mesmo o sistema operação sob baixa radiação solar, o sistema operou muito próximo da máxima potência estimada. Também foi possível verificar todo o funcionamento do protótipo desenvolvido, cuja finalidade é injetar na rede a energia proveniente do painel fotovoltaico.

Por fim é importante ressaltar que este sistema de monitoramento desenvolvido pode ser aplicado a qualquer planta de sistemas fotovoltaicos.

## **PROPOSTA DE CONTINUIDADE**

São propostas de continuidade deste presente trabalho:

- Aprimorar o sistema de monitoramento desenvolvido para que possa ser visualizado remotamente;
- Realizar o monitoramento de outros parâmetros, tais como a tensão do barramento do conversor CC-CA, a tensão da rede e a corrente injetada.
- Implementar outras técnicas de controle nas malhas de controle do conversor CC-CA;
- Implementar o sistema de monitoramento junto a uma bancada móvel de um sistema fotovoltaico de dois estágios para fins didáticos.

## REFERÊNCIAS

ALVES, M. G. **Mini-inversores para aproveitamento de energia fotovoltaica, com técnicas de MPPT, sincronismo e conexão com a rede de CA em BT, proteção de ilhamento, gerenciamento da energia e da operação**. 2013. 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.

ANGELICO, B. A.; CAMPANHOL, L. B. G.; SILVA, S. A. O. Proportionalintegral/proportional-integral-derivative tuning procedure of a single-phase shunt active power filter using Bode diagram. **Power Electronics, IET**, v. 7, n. 10, p. 2647-2659, 2014.

BACON, V. D.; SILVA, S. A. O.; MODESTO, R. A. **Aplicação de Filtros Auto-Sintonizados em uma Estratégia de Controle Simplificada Para Sistemas UPS *Line-Interactive* de Baixa Potência**. UNOPAR Cient. Exatas Technol., Londrina, v. 12, n. 1, p. 5-17, Nov. 2013.

BENGHANNEM, M.; MAAFI, A.. Data Acquisition System for Photovoltaic Systems Performance Monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, vol. 47, p. 30 – 33, 1998.

BIAESSER, G. PV system measurements and monitoring: the European experience. **Solar Cells on Solar Energy Master**, vol 47, p. 167 – 176, 1997.

BRITO, M. A. G. de; SAMPAIO, L. P; GALOTTO JUNIOR, L. And CANESIN, C. A. Research on Photovoltaics: Review, Trends and Perspectives. **Power Electronics Conference on (COBEP) Brazilian**, pp. 531 – 537, 2011.

BRITO, M. A, G de; GALOTTO JUNIOR, L.; SAMPAIO, L. P.; AZEVEDO e MELO, G. de; CANESIN, C. A. Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 60, no. 3, pp.1156 -1167, 2013.

CASARO, M. M.; MARTINS, D. C. Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação. **Eletrônica de Potência – Sobraep**, vol. 13, no. 3, pp. 141-146, 2008.

ERICKSON, R. W., MAKSIMOVIC, D. **Fundamental of power electronics**. 2. ed. Colorado: University of Colorado Press, 2001.

FORERO, N.; GORDILLO, G.; Development of a monitoring system for a PV solar plant. **Energy on Conversion and Management** 47, p. 2329 – 2336, 2006.

FOTOVOLTEC. Energia Fotovoltaica – Funcionamento. Disponível em < <http://www.fotovoltec.com.br/front/tecnologia>>. Acesso em: 27 out. 2015.

GALOTTO JUNIOR, L.; BRITO, M. A. G. de; SAMPAIO, L. P. And CANESIN, C. A. Integrated Inverter Topologies for Low Power Photovoltaics Systems. **IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2010**, p. 1 – 5, 2010.

IMHOFF, J. **Desenvolvimento de conversores estáticos para sistemas fotovoltaicos autônomos**. 2007. 146 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

KJAER, S. B.; PEDERSEN, J. K.; BLAABJERG, F. A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 41, n. 5, p. 1292-1306, 2005.

KOUTROULIS, E.; KALAITZAKIS, K. Development of an integrated data-acquisition system for renewable energy sources systems monitoring. **Renewable Energy** **28**, p 139 – 152, 2003.

LUO, F. L.; YE, H. Positive output cascade boost converters. **IEE Proceedings on Electric Power Applications**, v. 151, n. 5, p. 590-606, 2004.

MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Introdução ao estudo dos conversores conversores CC-CC**. 2. ed. Florianópolis: Edição dos Autores, 2008.

MODESTO, R. A.. **Método de compensação ativa de potência aplicado a um filtro ativo paralelo monofásico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR, 2007.

MYRZIK, J. M. A.; CALAIS, M. String and module integrated inverters for single-phase grid connected photovoltaic systems - a review. **Power Tech Conference Proceedings, IEEE Bologna**, v 2, p.8, 2003.

NATIONAL INSTRUMENTS. Aquisição de dados. Disponível em <<http://www.ni.com/white-paper/8534/pt/>>. Acesso em: 5 out 2015.

OLIVEIRA, F. M.; SILVA, S. A. O.; DURAND, F. R. And SAMPAIO, L.P. Maximum Power Point Tracking Thechnique Based on Particle Swarm Optinization Method Applied to a Single-Phase Grid-Tied Photovoltaic System. **International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14)**, no. 13, April 2015.

PORTAL SOLAR. Tipos de painel solar fotovoltaico. Disponível em <<http://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 3 out 2015.

SILVA, S. A. O. da; TOMIZAKI, E.; NOVOCHADLO, R.; COELHO, E. A. A. PLL structures for utility connected systems under distorted utility conditions. In: **IEEE Industrial Electronics, IECON 2006. 34nd Annual Conference on**. Paris, France. IEEE, 2006. p. 2636-2641.

SILVA, S. A. O. da; NOVOCHADLO, R.; MODESTO, R. A. Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems. In: **Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE**. Rhodes, Greece. IEEE, 2008. p. 4706-4711.

ROSEMBACK, R. H. **Conversor CC-CC Bidirecional Buck-Boost atuando como Controlador de Carga de Baterias em um Sistema Fotovoltaico**. 2004. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2004.

TSENG, K. C.; LIANG, T. J. Novel high-efficiency step-up converter. **IEE Proceedings on Electric Power Applications**, v. 151, n. 2, p. 182-190, 2004.

ZHANG, L.; SUN, K.; FENG, L. And GE, H. A Modular Grid-Connected Photovoltaic Generation System Based on DC Bus. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 2, p. 523-531, 2011

## ANEXO A

# Sunmodule<sup>+</sup> SW 245 poly / Version 2.5 Frame

SW-02-5009US 06-2012

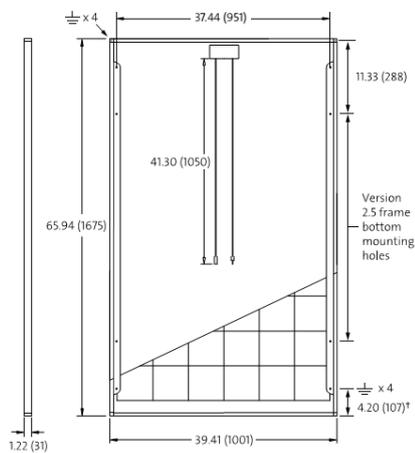
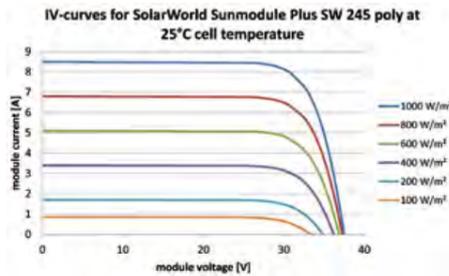
### PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)\*

|                             |           | SW 245 |
|-----------------------------|-----------|--------|
| Maximum power               | $P_{max}$ | 245 Wp |
| Open circuit voltage        | $V_{oc}$  | 37.5 V |
| Maximum power point voltage | $V_{mpp}$ | 30.8 V |
| Short circuit current       | $I_{sc}$  | 8.49 A |
| Maximum power point current | $I_{mpp}$ | 7.96 A |

\*STC: 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5

### THERMAL CHARACTERISTICS

|                       |               |
|-----------------------|---------------|
| NOCT                  | 46 °C         |
| TC $I_{sc}$           | 0.081 %/K     |
| TC $V_{oc}$           | -0.37 %/K     |
| TC $P_{mpp}$          | -0.45 %/K     |
| Operating temperature | -40°C to 85°C |



### PERFORMANCE AT 800 W/m<sup>2</sup>, NOCT, AM 1.5

|                             |           | SW 245   |
|-----------------------------|-----------|----------|
| Maximum power               | $P_{max}$ | 176.4 Wp |
| Open circuit voltage        | $V_{oc}$  | 33.7 V   |
| Maximum power point voltage | $V_{mpp}$ | 27.7 V   |
| Short circuit current       | $I_{sc}$  | 6.84 A   |
| Maximum power point current | $I_{mpp}$ | 6.37 A   |

Minor reduction in efficiency under partial load conditions at 25°C: at 200W/m<sup>2</sup>, 95% (+/-3%) of the STC efficiency (1000 W/m<sup>2</sup>) is achieved.

### COMPONENT MATERIALS

|                  |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| Cells per module | 60                                  |
| Cell type        | Poly crystalline                    |
| Cell dimensions  | 6.14 in x 6.14 in (156 mm x 156 mm) |
| Front            | tempered glass (EN 12150)           |
| Frame            | Clear anodized aluminum             |
| Weight           | 46.7 lbs (21.2 kg)                  |

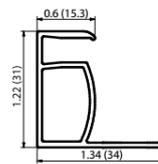
### SYSTEM INTEGRATION PARAMETERS

|                              |                   |                                   |
|------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Maximum system voltage SC II | 1000 V            |                                   |
| Max. system voltage USA NEC  | 600 V             |                                   |
| Maximum reverse current      | 16 A              |                                   |
| Number of bypass diodes      | 3                 |                                   |
| UL Design Loads*             | Two rail system   | 113 psf downward<br>64 psf upward |
| UL Design Loads*             | Three rail system | 170 psf downward<br>64 psf upward |
| IEC Design Loads*            | Two rail system   | 113 psf downward<br>50 psf upward |

\*Please refer to the Sunmodule installation instructions for the details associated with these load cases.

### ADDITIONAL DATA

|                               |               |
|-------------------------------|---------------|
| Power tolerance <sup>2)</sup> | -0 Wp / +5 Wp |
| J-Box                         | IP66          |
| Connector                     | MC4           |
| Module efficiency             | 14.61 %       |
| Fire rating (UL 790)          | Class C       |



#### VERSION 2.5 FRAME

- Compatible with both "Top-Down" and "Bottom" mounting methods
- ⚡ Grounding Locations:
  - 4 corners of the frame
  - 4 locations along the length of the module in the extended flange<sup>1</sup>

1) Sunmodules dedicated for the United States and Canada are tested to UL 1703 Standard and listed by a third party laboratory. The laboratory may vary by product and region. Check with your SolarWorld representative to confirm which laboratory has a listing for the product.

2) Measuring tolerance traceable to TUV Rheinland: +/- 2% (TUV Power Controlled).

3) All units provided are imperial. SI units provided in parentheses.

SolarWorld AG reserves the right to make specification changes without notice.

## ANEXO B

Fotografias do protótipo desenvolvido.

