

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO  
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

RODOLPHO CORDEIRO GARCIA

**RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA EM CONEXÃO SÉRIE DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O CONTROLE  
GRANULAR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO 2

CORNÉLIO PROCÓPIO  
2017

RODOLPHO CORDEIRO GARCIA

**RASTREAMENTO DA MÁXIMA POTÊNCIA EM CONEXÃO SÉRIE DE  
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO O CONTROLE  
GRANULAR**

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. Leonardo Poltronieri Sampaio.

Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2017



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



## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Rodolpho Cordeiro Garcia**

**Rastreamento da máxima potência em conexão série de sistemas fotovoltaicos utilizando o controle granular.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:30hs do dia 12/06/2017 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). Leonardo Poltronieri Sampaio - Presidente (Orientador)

---

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

---

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

---

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Augusto Modesto - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho primeiramente a Deus e à minha família, principalmente a meu pai Adolfo Cordeiro Garcia e minha mãe Nalú Fátima dos Santos, que tanto me apoiaram e que me deram forças para seguir em frente sempre.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me fortalece em todos meus projetos de vida.

Agradeço a minha família, principalmente minha mulher Thaisa Caroline Cruz, que esteve comigo em todas as horas difíceis. Agradeço a minha mãe Nalu Fátima dos Santos e meu pai Adolfo Cordeiro Garcia por toda a dedicação, apoio e amor nessa trajetória de estudos, me dando condições de ir além e que me motivam a orgulha-los.

Agradeço a meus irmãos Rodrigo Cordeiro Garcia e Roberta Cordeiro Garcia que certamente também tiveram contribuição em minha jornada.

Agradeço a todos meus amigos que me auxiliaram durante este período, dentro e fora da UTFPR: Daniel Frederico Mazari, Júlio Frauzino, Inácio Maximiliano Marchetti, Pedro Petri e a tantos outros que podem não ter percebido mas fizeram a diferença.

Agradeço a meu orientador Prof. Dr. Leonardo Poltronieri Sampaio e Coorientador Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva pelo compartilhamento de experiências, ensinamentos e sabedoria nesta trajetória além de toda equipe LEPQER.

Aos meus colegas de sala.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

GARCIA, Rodolpho Cordeiro. **Rastreamento da máxima potência em conexão série de sistemas fotovoltaicos utilizando o controle granular**. 2017. 72 f Trabalho de Conclusão de Curso – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Considerando a utilização da energia oriunda de sistemas fotovoltaicos (PV), este trabalho apresenta um estudo comparativo do sistema PV tradicional com o sistema PV *multi-string*. O sistema tradicional é composto por três painéis PVs associados em série e ligados ao conversor elevador CC-CC tipo *Boost*. Para realizar a busca pelo ponto de máxima potência (MPP) é empregado o algoritmo tradicional *Perturb & Observe* (P&O). Por outro lado, os sistemas tradicionais podem sofrer influência de sombreamentos parciais, quando ocorre uma irradiação solar não uniforme sobre o arranjo PV, assim, este é comparado com um sistema *multi-string*, o qual é composto por três conversores CC-CC *Boost*, onde cada conversor elevador possui um único painel PV conectado na sua entrada, e a saída dos conversores são associadas em série e conectados a um barramento CC. No sistema *multi-string* foi empregada duas metodologias distintas para o rastreamento do MPP (MPPT), a primeira é denominada distribuído de simples variável (SV-P&O), a qual emprega o algoritmo P&O para cada conversor elevador, o qual opera verificando a variação de potência de cada painel PV, necessitando da leitura da tensão e corrente de saída de cada painel, ou seja, é necessário um total de seis sensores. Por outro lado, a segunda metodologia denominada controle granular multivariável (MV-P&O), opera verificando a variação de potência na saída no barramento CC, ou seja, requer o somente de dois sensores. Por meio de resultados obtidos por simulações computacionais, os sistemas são avaliados e comparados, considerando a operação do sistema sem sombreamento e com sombreamento parcial.

**Palavras-chave:** Painel fotovoltaico. Sombreamento parcial. Topologia *multi-string* em cascata. Rastreamento de máxima potência. Controle granular.

## ABSTRACT

GARCIA, Rodolpho Cordeiro. **Maximum power tracking in series connection of photovoltaic systems using granular control.** 2017. 72 p. Course Completion Work - Higher Course of Electrical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Considering the use of energy from photovoltaic (PV) systems, this work presents a comparative study of the traditional PV system with the multi-string PV system. The traditional system consists of three PV panels associated in series and connected to the Boost DC-DC converter. The Perturb & Observe (P&O) algorithm is used to perform the maximum power point search (MPP). On the other hand, traditional systems can be influenced by partial shading when a non-uniform solar irradiation occurs on the PV array, so it is compared to a multi-string system, which consists of three DC-DC Boost converters, Where each inverter has a single PV panel connected to its input, and the output of the inverters are connected in series and connected to a DC bus. In the multi-string system two different MPP (MPPT) traces were used, the first one is called a simple variable distributed (SV-P&O), which uses the P&O algorithm for each upconverter, which operates verifying the variation Of power of each PV panel, necessitating the reading of the voltage and output current of each panel, that is, a total of six sensors are required. On the other hand, the second methodology called multivariate granular control (MV-P&O), operates by verifying the power variation in the output on the DC bus, that is, requires only two sensors. By means of results obtained by computational simulations, the systems are evaluated and compared, considering the operation of the system without shading and partial shading.

**Keywords:** Photovoltaic panel. Partial shading. Cascading multi-string topology. Maximum power tracking. Granular control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade mundial fotovoltaica acumulada, com projeção para 2021. .....	8
Figura 2 - Topologia de sistema fotovoltaico proposta no estágio CC. ....	14
Figura 3 - Painel fotovoltaico. ....	15
Figura 4 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício destacando: (1) região tipo n; (2) região tipo p; zona de carga espacial, onde se formou a junção p-n e o campo elétrico; (4) geração de par de elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos. ....	16
Figura 5 - Modularidade do sistema fotovoltaico (a) célula, (b) módulo, (c) arranjo. .....	18
Figura 6 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica. ....	18
Figura 7 - Curva <b>IPV-VPV</b> (corrente-tensão) dado um valor de <b><math>R_p</math></b> e <b><math>R_s</math></b> . ....	20
Figura 8 - Característica de curva não linear do PV para variações de radiação (a) e variações de temperatura (b). ....	21
Figura 9 - Topologia monofásica centralizada: string e/ou paralela (a), string de único estágio (b), multi-string de duplo estágio (c) e módulo CA (d). ....	23
Figura 10 - Topologia monofásica centralizada multi-string em série. ....	24
Figura 11 – Curva característica P-V (potência-tensão) do arranjo PV sob efeito de sombreamento parcial. ....	25
Figura 12 - Conversor CC-CC tipo Boost com geração PV na entrada. ....	27
Figura 13 - Funcionamento do conversor tipo Boost com geração PV na entrada: primeira etapa fechada (a) e segunda etapa aberta (b). ....	28
Figura 14 - Inversor Full-Bridge VSI. ....	31
Figura 15 - Modulação SPWM a três níveis. ....	32
Figura 16 - Diagrama de blocos $\alpha\beta$ -pPLL. ....	33
Figura 17 - Topologia do controle granular de simples variável. ....	36
Figura 18 - Fluxograma P&O. ....	37
Figura 19 - Topologia de controle granular multivariável. ....	39
Figura 20 - Fluxograma MV-P&O. ....	40

Figura 21 – Esquemático de boost considerando a resistência no indutor e o painel PV como uma resistência fornecendo energia. ....	42
Figura 22 - Controle da malha de tensão e corrente do Boost.....	45
Figura 23 – Malha de tensão: diagrama de bode sem (esquerda) e com o compensador PI (direita). ....	50
Figura 24 – Resposta ao degrau da FTMF de tensão do conversor Boost.....	51
Figura 25 – Malha de corrente: diagrama de bode sem (esquerda) e com o compensador PI (direita). ....	51
Figura 26 – Resposta ao degrau da FTMF de corrente do conversor Boost....	52
Figura 27 – Método de distribuição de radiação utilizado para controle distribuído (SV-P&O) e granular (MV-P&O): condição 1 em STC (a); condição 2 com apenas 1 PV sombreado em 30% (b); e condição 3 com apenas 1 PV sombreado 70% (c). ....	53
Figura 28 – Método de distribuição de radiação utilizado para controle distribuído (SV-P&O) e granular (MV-P&O): condição 1 em STC (a); condição 2 com apenas 1 PV sombreado em 30% (b); e condição 3 com apenas 1 PV sombreado 70% (c). ....	53
Figura 29 – Panorama de potência para modelo tradicional com 3 painéis PV. Condição 1 ou STC (a); condição 2 com sombreamento parcial de 30% de um PV (b); e condição 3 com sombreamento parcial de 70% de um PV (c). ....	54
Figura 30 - Simulações para MPPT tradicional P&O: Condição 1 (a); Condição 2 e condição 3 (c). ....	55
Figura 31 – Simulações para MPPT distribuído SV-P&O: Condição 1 (a); Condição 2 e condição 3 (c). ....	56
Figura 32 – a Simulações para MPPT granular MV-P&O: Condição 1 (a); Condição 2 e condição 3 (c). ....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Capacidade instalada e geração elétrica do Brasil.....	9
Tabela 2 – Coeficientes da Equação da corrente de saída da célula PV.....	19
Tabela 3 – Parâmetros do painel PV policristalino da SolarWorld Sunmodule Plus SW 245 .....	49
Tabela 4 - Parâmetros do sistema PV.....	49
Tabela 5 – Parâmetros de projeto de controladores do Boost. ....	50
Tabela 6 - Panorama de máximos globais de potência.....	54
Tabela 7 - Resultados simulados para tradicional P&O. ....	58
Tabela 8 - Resultados simulados pra distribuído SV-P&O e granular MV-P&O. ....	58

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>4</b>
1.1 ESTRUTURA DO DOCUMENTO .....	7
1.2 PANORAMA ENERGÉTICO .....	7
1.3 PROBLEMA .....	10
1.4 JUSTIFICATIVA .....	11
1.5 OBJETIVO GERAL .....	12
1.6 OBJETIVO ESPECÍFICO .....	12
<b>2 MÉTODO DA PESQUISA</b> .....	<b>13</b>
<b>3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS</b> .....	<b>15</b>
3.1 EFEITO FOTOVOLTAICO .....	16
3.2 PAINEL FOTOVOLTAICO .....	17
3.2.1 Modelo de um painel fotovoltaico .....	18
3.3 TOPOLOGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	22
3.3.1 Configuração centralizada multi-string .....	23
3.4 SOMBREAMENTO PARCIAL .....	25
<b>4 TOPOLOGIA DE CONVERSORES CC-CC E CC-CA</b> .....	<b>27</b>
4.1 CONVERSOR BOOST .....	27
4.1.1 Dimensionamento dos elementos passivos .....	28
4.2 INVERSOR EM PONTE COMPLETA (FB) .....	30
4.2.1 Modulação de três níveis .....	31
4.2.2 Sistema de detecção do ângulo de fase da rede (PLL) .....	33
<b>5 TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)</b> .....	<b>35</b>
5.1 CONTROLE DISTRIBUÍDO DE SIMPLES VARIÁVEL (SV-P&O) .....	36
5.2 CONTROLE GRANULAR MULTIVARIÁVEL (MV-P&O) .....	38
<b>6 MODELAGEM CA DE PEQUENOS SINAIS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE EQUAÇÕES MÉDIAS</b> .....	<b>41</b>
6.1 PLANTA DE CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC BOOST .....	42
6.1.1 Obtenção das equações médias do conversor CC-CC Boost .....	43
6.1.2 Função transferência da malha de tensão e de corrente do conversor CC-CC Boost .....	45
<b>7 CONTROLADORES PI</b> .....	<b>47</b>
<b>8 RESULTADOS</b> .....	<b>49</b>
8.1 PROJETO DOS CONTROLADORES PI .....	49
8.2 SISTEMAS PV EM ESTUDO .....	52
8.3 RESULTADOS PARA MPPT TRADICIONAL P&O .....	54
8.4 RESULTADOS PARA MPPT DISTRIBUÍDO SV-P&O .....	55
8.5 RESULTADOS PARA MPPT GRANULAR MV-P&O .....	56
8.6 RASTREABILIDADE DE MÉTODOS MPPT .....	57
<b>9 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>59</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A constante evolução tecnológica e necessidade cada vez maior na geração de energia elétrica, aliada a uma preocupação da sociedade com a escassez dos recursos naturais e dos impactos ambientais causados, evidenciam como complemento da matriz energética atual, as fontes energéticas renováveis. Nas últimas décadas, o processo de geração de energia elétrica, especificamente das fontes renováveis de menor impacto ambiental, dentre elas a energia eólica e solar, tem sido foco de diversos debates quanto ao método de geração.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008) e o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB, 2014), a energia solar fotovoltaica (PV - *Photovoltaic*), é classificada-se como uma fonte de energia limpa, virtualmente inesgotável e gratuita, obtida a partir da conversão direta da luz, na forma de radiação eletromagnética.

Além da ANEEL (2008) e CRESESB (2014), a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE, 2012) apresentam o cenário brasileiro como promissor, uma vez que mesmo os menores índices de irradiação solar brasileiro, superam as melhores irradiações de países como a Alemanha, onde a tecnologia é amplamente incentivada e difundida.

Apesar da dependência direta com as condições climáticas, esta energia PV apresenta possibilidade de geração vantajosa de energia em menor escala e também em locais de difícil acesso ao consumidor (VIGLUS, 2015).

A unidade fundamental do transdutor de energia solar, na forma de radiação, em elétrica é chamada de célula fotovoltaica ( $C_{PV}$ ). Este dispositivo é basicamente fabricado de material semicondutor, empregando em sua grande maioria o silício cristalino (VILLALVA, GAZOLI, 2013; MOURA JUNIOR, K.J., 2015; OLIVEIRA, F. M., 2015). Associações, série e paralela de células formam um módulo PV e associação destes, formam um arranjo PV ou painel PV (SAMPAIO, 2013; VILLALVA, GAZOLI, 2013).

Observando o fator confiabilidade de módulos PV, a potência se mantém acima de 90% nos primeiros 10 anos e acima de 80% após 20 anos. A energia consumida, desde o mineral de silício até sua purificação para células PVs, é de 9 a

17 vezes menor que a produção de energia ao longo dos 30 anos de vida útil, portanto de baixo impacto ambiental (ABINEE, 2012).

A eficiência de conversão de um painel, gira em torno de 13 à 18%, e tem energia de saída na forma de corrente contínua (CC). Apresenta duas curvas com característica não linear: I-V (corrente-tensão) e P-V (potência-tensão) dependente das características construtivas e condições climáticas, como níveis de radiação solar e temperatura (CASARO; MARTINS, 2008; SAMPAIO, 2013; VILLALVA; GAZOLI, 2013; CRESESB, 2014; OLIVEIRA et al., 2015).

Ao longo do dia o painel nem sempre opera em condições de teste padrão (STC – *Standard Test Conditions*), fornecidas pelo fabricante, pois sofre variações de radiação e temperatura, além do baixo fator de conversão devido a energia solar ser difusa e de baixa densidade (CRESESB, 2014), portanto, uma técnica de rastreamento de máxima potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*) deve ser incorporada ao sistema PV (CASARO; MARTINS, 2008; MIYATAKE et al., 2011; BRITO et al., 2011; MOURA JUNIOR, 2015; OLIVEIRA et al., 2015).

Segundo Brito et al. (2011) existem várias técnicas de MPPT, dentre elas, o algoritmo perturba e observa (P&O – *Perturb and Observe*) destaca-se por não depender dos parâmetros construtivos do fabricante e manter alto fator de rastreamento de potência, considerando uma radiação uniforme sobre o arranjo PV (SAMPALIO, 2013).

Segundo Femia et al. (2008) e Petrone et al. (2013), o controle distribuído do rastreamento de máxima potência (D-MPPT – *Distributed Maximum Power point Tracking*) apresenta conversores CC independentes, executando seu próprio controle MPPT.

O controle granular é uma variação D-MPPT, que configura uma estrutura também com conversores CC independentes, porém um único controle que de “grão em grão” incrementa ou decrementa a razão cíclica de cara conversor e realiza MPPT baseado na variação potência de saída do barramento (PETRONE et al., 2013).

Baseado em Brito et al. (2013), a conexão, em cascata (série), destas estruturas, chama-se de topologia *multi-string*. Se o *multi-string* for conectado a um único inversor, o sistema possui característica centralizada.

Maiores detalhes são descritos no capítulo 6 deste trabalho. O trabalho terá foco no estágio CC, porém como trabalhos futuros poderá ser continuada como uma

topologia centralizada.

O trabalho será comparativo, conforme seguintes casos de estudo:

- CASO 1: Inicialmente, o estágio CC é configurado por um único *string*, com 3 painéis PV em série, conectados a um único conversor elevador, para controle MPPT utilizando P&O.
- CASO 2: O segundo caso, apresenta 3 PVs, conectadas em cascata, configurando um *multi-string*. Cada estrutura é formada por um único PV em série com um conversor elevador tipo Boost e apresenta um controle distribuído, baseado no algoritmo do P&O clássico de simples variável (SV-P&O), composto por três MPPTs.
- Caso 3: O último caso, foco do trabalho, utiliza a mesma configuração do estágio CC do segundo caso, porém o controle aplicado será granular, apesar de baseado no P&O clássico, utiliza múltiplas variáveis (MV-P&O), onde um único MPPT, baseado na variação de potência na saída do arranjo PV (barramento CC), distribui três sinais de referência para chaveamento de conversores Boost.

O sistema PV proposto para análise e simulações irá até o estágio CC, porém será realizado um breve estudo neste trabalho:

- Estágio CC-CA, com base em uma topologia convencional centralizada, utilizando um único inversor em ponte-completa (FB – *Full-Bridge*) com modulação senoidal por largura de pulso (SPWM – *Senoidal Pulse-Width Modulation*) à três níveis (positivo, negativo e zero) controlado por tensão (VSI – *Voltage Source Inverter*) através de indutor de acoplamento  $L_f$ , levando em consideração a resistência interna deste indutor de acoplamento  $R_{L_f}$  (SAMPAIO, 2010).
- Um sistema de detecção do ângulo da rede (PLL – *Phase-Locked Loop*) é utilizado no estágio inversor, para suprir a necessidade de sincronismo do sistema com a rede elétrica, obtendo informações, como ângulo de fase, frequência e até mesmo à amplitude de tensão na rede. O sincronismo é desejado porque a injeção de corrente na rede elétrica deve ser realizada em contra fase com a tensão, na frequência fundamental (SILVA et al., 2008).

## 1.1 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

Este documento encontra-se dividido em oito capítulos, o primeiro e presente capítulo trata-se da introdução do documento.

O segundo capítulo apresenta o método de pesquisa e a topologia completa a ser desenvolvida no presente trabalho. Aborda um breve panorama energético global utilizando tecnologia PV evidenciando a importância do estudo de sistema PV, bem como fontes auxiliares na matriz de energia.

O terceiro capítulo apresenta o contexto geral do sistema PV, desde o processo físico de conversão da energia solar pelo efeito fotovoltaico, características construtivas e elétricas do painel PV, as principais topologias centralizadas e os efeitos do sombreamento parcial.

O quarto capítulo aborda a topologia de duplo estágio. O estágio CC apresenta características da topologia do conversor elevador CC-CC. Neste capítulo também é apresentado o conversor CC-CA e a estratégia para conexão com a rede elétrica, utilizando um algoritmo PLL para detecção do ângulo da rede.

O quinto capítulo apresenta a estratégia de controle para rastreamento de máxima potência em um sistema PV, dividindo em uma topologia granular clássica e uma topologia granular multivariável proposta para redução do efeito do sombreamento parcial e dos custos de sensoriamento do sistema.

O sexto capítulo aborda a modelagem CA de pequenos sinais, utilizando técnicas de equações médias para equacionar as plantas de controle para malha de corrente do conversor *Boost*.

O sétimo apresenta o projeto dos ganhos dos controladores proporcional e integral.

O oitavo capítulo apresenta os resultados do trabalho.

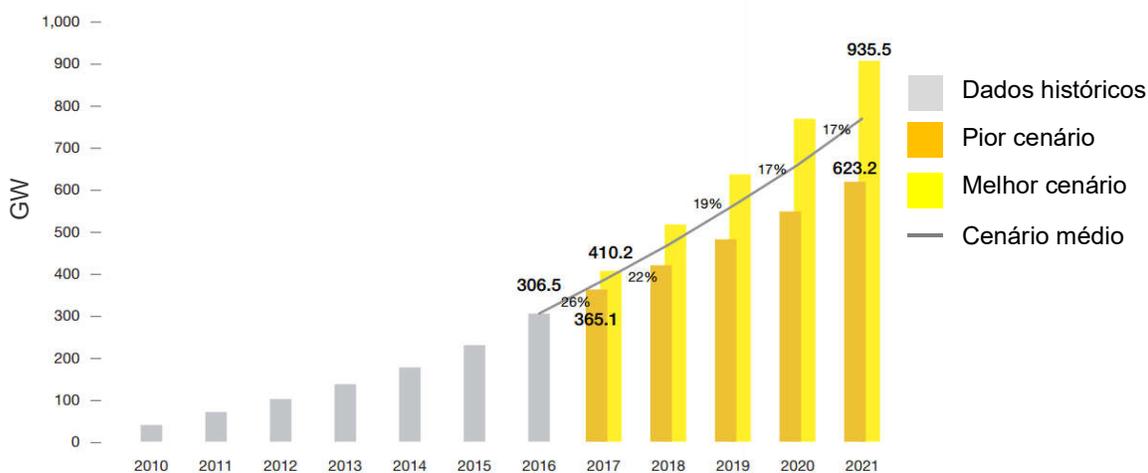
## 1.2 PANORAMA ENERGÉTICO

Os dados (2014-2018) da perspectiva global do mercado de energia solar (*Global Market Outlook for Solar Power*) apresentados no relatório de 2016 da

Associação Europeia da Indústria Fotovoltaica (EPIA – *European Photovoltaic Industry Association*), a projeção mostrava um crescimento no acumulado solar PV de 277GW no pior cenário e até 306GW no melhor cenário, isso para o ano de 2016, considerando os já acumulados 229GW do ano base de 2015.

Confrontando os dados do mesmo material da EPIA (2017), mostra que o acumulado no ano base de 2016 atingiu o nível de aproximadamente 306,5GW que corresponde ao melhor cenário de crescimento projetado, conforme Figura 1, validando a projeção estipulada.

Este crescimento é consequência da preocupação com o meio ambiente, ao incentivo de governos e barateamento de implantação da tecnologia PV. Dependendo da evolução dos mercados solares nos próximos anos, o total de capacidade instalada em 2021, considerando a projeção média, teria crescimento e acumulado em torno de 780 GW.



**Figura 1 - Capacidade mundial fotovoltaica acumulada, com projeção para 2021.**

**Fonte: Adaptado EPIA, 2017.**

O destaque é o crescimento acelerado do uso da tecnologia dos países Ásia-Pacífico, principalmente a China e Índia. O Japão deverá adicionar 29,6GW, considerando o cenário médio até 2021, terá um crescimento três vezes maior que o ascendente cenário mexicano, considerado o próximo grande mercado solar. China, EUA e Índia, terão incremento de sua capacidade, respectivamente 120GW, 70GW e 66GW (EPIA, 2017).

De acordo com o Centro de Referência para Energia Solar e Eólica (CRESESB, 2014), apesar de possuir um acumulado ainda em 112MW, os piores cenários de radiação brasileira ultrapassam os melhores cenários do país alemão, cuja capacidade de geração fotovoltaica instalada, acumula 41GW ou 13,4% do acumulado global (EPIA, 2017).

Com dados do último relatório da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), ano base do ano de 2015, conforme Tabela 1 considerando a geração distribuída, o Brasil teve um aumento de 268,75% da fonte solar PV, considerando a variação de um ano para outro (BEN, 2016).

**Tabela 1 – Capacidade instalada e geração elétrica do Brasil.**

Fonte energética	Capacidade instalada (MW)				Geração elétrica <sup>1</sup> (GWh)		
	2015	GD* 2015	2014	Variação (%)	2015	2014	Variação (%)
<b>Hidrelétrica</b>	91.650	0,8	89.193	<b>2,75</b>	359.743	373.439	<b>-3,67</b>
<b>Térmica</b>	<b>Gás Natural</b>				79.490	81.073	<b>-1,95</b>
	<b>Biomassa</b>				47.394	44.987	<b>5,35</b>
	<b>Derivados do Petróleo</b>	39.564	2,3	37.827	<b>4,59</b>	25.662	<b>-18,61</b>
	<b>Carvão Vapor</b>				19.096	18.385	<b>3,87</b>
<b>Nuclear</b>	1.990	-	1.990	<b>0,00</b>	14.734	15.378	<b>-4,19</b>
<b>Eólica</b>	7.633	0,1	4.888	<b>56,16</b>	21.625	12.210	<b>77,11</b>
<b>Solar PV</b>	21	13,3	15	<b>40,00</b>	59	16	<b>268,75</b>
<b>Outras</b>	-	-	-	-	13.682	13.524	<b>1,17</b>
<b>Total</b>	<b>140.858</b>	<b>16,50</b>	<b>133.913</b>	<b>104</b>	<b>581.485</b>	<b>590.541</b>	<b>327,83</b>

<sup>1</sup> Inclui Geração Distribuída (GD).

Fonte energética do tipo térmica considera: Biomassa (lenha, bagaço de cana e lixívia); Petróleo (inclui óleo diesel e combustível); e Carvão mineral.

Fonte: Adaptado BEN, 2016.

Declínios de preço do sistema PV, de cerca de 75% em menos de dez anos, têm trazido competitividade em diversos países e segmentos de mercado. Em paralelo com esta evolução, o volume anual do mercado PV multiplicou por quarenta vezes em menos de uma década (EPIA, 2015). Apesar do baixo risco de financiamento inerente

à tecnologia, o acesso ao capital é um grande desafio para um setor em contínuo crescimento. A energia a partir da microgeração PV, além de consumo local, pode ser exportado a concessionária de energia elétrica, através de injeção de potência ativa na rede elétrica, gerando créditos para dedução da fatura (VILLALVA, GAZOLI, 2013, BEN, 2016).

Conforme consultas *online* em outubro de 2015, segundo a Brasiled (2015) um painel de silício monocristalino, da Hilight® com 60 células e 250Wp tinha custo de 3,83R\$/Wp e segundo Minha Casa Solar (2015) um painel de silício policristalino, da Canadian Solar® com 60 células e 255Wp tinha custo de a 3,71R\$/Wp.

### 1.3 PROBLEMA

A forma de energia elétrica gerada por um painel PV de alta potência, em torno de 30 a 40V (SOLAR WORLD, 2015), apresenta-se na forma CC e com níveis de tensão bem abaixo do pico na rede elétrica monofásica, desta forma a geração e injeção direta na rede é inviável.

Analisando o estágio CC, para alcançar níveis de tensão acima do pico da rede elétrica, sem estágio elevador, impossibilita aplicar uma técnica MPPT, neste estágio, além da necessidade de grande associação em série de painéis formando um *string*.

O problema de utilizar *string* está na condição, de o sombreamento parcial ou da distribuição não uniforme de radiação e/ou temperatura sobre os painéis, reduzir a potência disponível no arranjo, devido ao aparecimento de múltiplos máximos de potência: um máximo global ( $M_G$ ) e um ou mais máximos locais ( $M_L$ ) (BRITO et al., 2013; PETRONE et al., 2013; MOURA JUNIOR, 2015; OLIVEIRA et al., 2015).

As curvas padrão apresentam não linearidades, portanto existe um ponto de máxima potência (MPP - Maximum Power Point) específico, no joelho da curva I-V e no pico da curva P-V, considerando radiação e temperatura uniforme sobre um painel PV e como a conversão energética de painéis PV de silício cristalino, os mais utilizados, apresentam eficiência abaixo de 20%, é essencial o uso de técnicas MPPT (PETRONE et al., 2013; SAMPAIO 2013; OLIVEIRA, 2014; MOURA JUNIOR, 2015).

Segundo Brito et al. (2011) várias técnicas convencionais de MPPT, apresentam alto fator de rastreabilidade do máximo global de potência em condições climáticas uniformes sobre o arranjo PV, caso contrário podem ficar atacadados sobre um falso ponto, pois o sombreamento parcial em vários painéis, conectados em paralelo, oferece mais de um ponto de potência, sendo apenas um deles o máximo global e os demais máximos locais.

O sombreamento parcial, variações de radiação e temperatura reduzem a potência disponível de grandes associações série e eficiência do controle MPPT (MIYATAKE et al., 2011).

A conexão de *strings* em cascata, origina um arranjo *multi-string* que também aumenta a tensão disponível no barramento e diminui o efeito do sombreamento sobre o arranjo PV, pois um *string* não interfere em outro. A desvantagem está na quantidade de sensores do arranjo PV, sendo necessário dois sensores por *string* para controle MPPT (BRITO et al. 2013; PETRONE et al, 2013).

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

A energia solar, apresenta uma série de vantagens: é uma fonte energética gratuita, não poluente, inesgotável, demanda manutenção mínima, além da possibilidade de utilizar a potência gerada para uso local ou injeção na rede elétrica (VILLALVA, GAZOLI, 2013; CRESESB, 2014). No Brasil existe alta incidência de radiação solar e ocorre investimentos na área, como o Leilão de Energia de Reserva (LER), 2015, contratando empreendimentos de geração fotovoltaica no país (BEN, 2016; ANEEL, 2015).

O objetivo é extrair a máxima potência dos sistema PV e fornecer para a rede elétrica. Aplica-se um controle granular MV-P&O. Este controle apresenta estágio elevador, portanto pode-se aplicar um controle MPPT. Apesar de aumentar a lógica computacional, realiza-se um único controle MPPT multivariável de maneira granular, diminuindo a quantidade de sensores, e os custos, comparada a uma topologia clássica D-MPPT, pois a leitura da variação de potência é realizada no barramento CC, sendo necessário apenas um sensor de corrente e de tensão, por sistema PV.

Utiliza uma estrutura composta por um painel PV em série com um conversor CC elevador. Esta estrutura associada em cascata origina uma topologia *multi-string*, desta forma o efeito do sombreamento parcial é minimizado. Como o uso de um único PV não gera máximos locais, técnicas convencionais de MPPT (BRITO et al., 2011), possuem ótima rastreabilidade. A topologia *multi-string* minimiza o efeito do sombreamento no sistema PV, pois o sombreamento de um painel não interfere em outro.

### 1.5 OBJETIVO GERAL

Implementação de uma estratégia de controle granular baseado no algoritmo do P&O clássico, onde apenas um controle multivariável, de grão em grão, realiza MPPT. Sistema composto por três *strings* independentes, cada um deles associados a um conversor elevador CC-CC tipo Boost conectados em série, para redução: da quantidade de sensoriamento do sistema PV e redução do efeito de sombreamentos parciais ocasionados por variações climáticas, no caso a irradiação solar.

### 1.6 OBJETIVO ESPECÍFICO

Destaca-se como objetivos específicos deste trabalho:

- apresentar o sistema fotovoltaico, o qual é utilizado na conversão da energia solar em elétrica e estudo de sistema desde a geração até injeção na rede;
- estudo de topologias de sistemas PV;
- estudo da topologia de conversores CC-CC elevadores tipo *Boost*;
- descrever o problema do efeito do sombreamento parcial em sistemas PV;
- implementar algoritmos de MPPT: P&O tradicional, distribuído perturba e observa (SV-P&O) e do controle granular multivariável (MV-P&O);
- simulação computacional do sistema proposto até o estágio CC em ambiente MATLAB/SIMULINK®.

## 2 MÉTODO DA PESQUISA

O trabalho foi iniciado com a escolha da grande área da Engenharia Elétrica, a qual a Eletrônica de Potência tem um grande destaque, principalmente nas questões envolvendo Energias Renováveis. O tema de pesquisa foi definido considerando a necessidade cada vez maior da geração de energia elétrica que causem menores impactos ao meio ambiente, realizando, um levantamento teórico e a revisão bibliográfica das principais pesquisas científicas nesta área.

Dentro da sub área foi definido um tema que tivesse como objetivo a injeção de potência na rede elétrica a partir da geração PV, que utiliza o Sol como fonte renovável.

Dada a problematização do tema, realizou-se uma pesquisa mais específica e revisão mais apurada, a fim de obter uma maior fundamentação teórica sobre as principais topologias e os métodos de controle, com a intenção de auxiliar a execução da proposta.

Estudo de métodos de MPPT, topologias para minimizar o efeito de sombreamento parcial e definição do modelo elétrico e matemático de um painel PV, além de simulações em ambiente MATLAB/SIMULINK®.

A hierarquia do sistema fotovoltaico, aplicado a uma rede elétrica monofásica, parte de uma topologia de controle granular para realização de MPPT, onde um único controle multivariável é responsável pelo chaveamento de todos os conversores CC-CC, no caso proposto serão três conversores elevadores tipo *Boost*.

A topologia *multi-string* em cascata foi utilizada para associar três estruturas de forma granular, desta maneira espera-se manter o parâmetro de projeto da tensão do barramento CC, ainda sim ser uma alternativa para minimizar o efeito de sombreamento parcial do sistema PV.

A estratégia do rastreamento de máxima potência utilizando uma técnica granular e baseia-se no algoritmo do P&O para multivariáveis, chamado de MV-P&O. O controle granular proposto analisa a variação de potência no barramento, portanto o sistema no estágio CC utiliza apenas dois sensores, um de corrente e outro de tensão para controle em malha aberta e mais três sensores de tensão na saída de

cada painel PV. O modelo proposto para este trabalho pode ser expresso pela Figura 2.

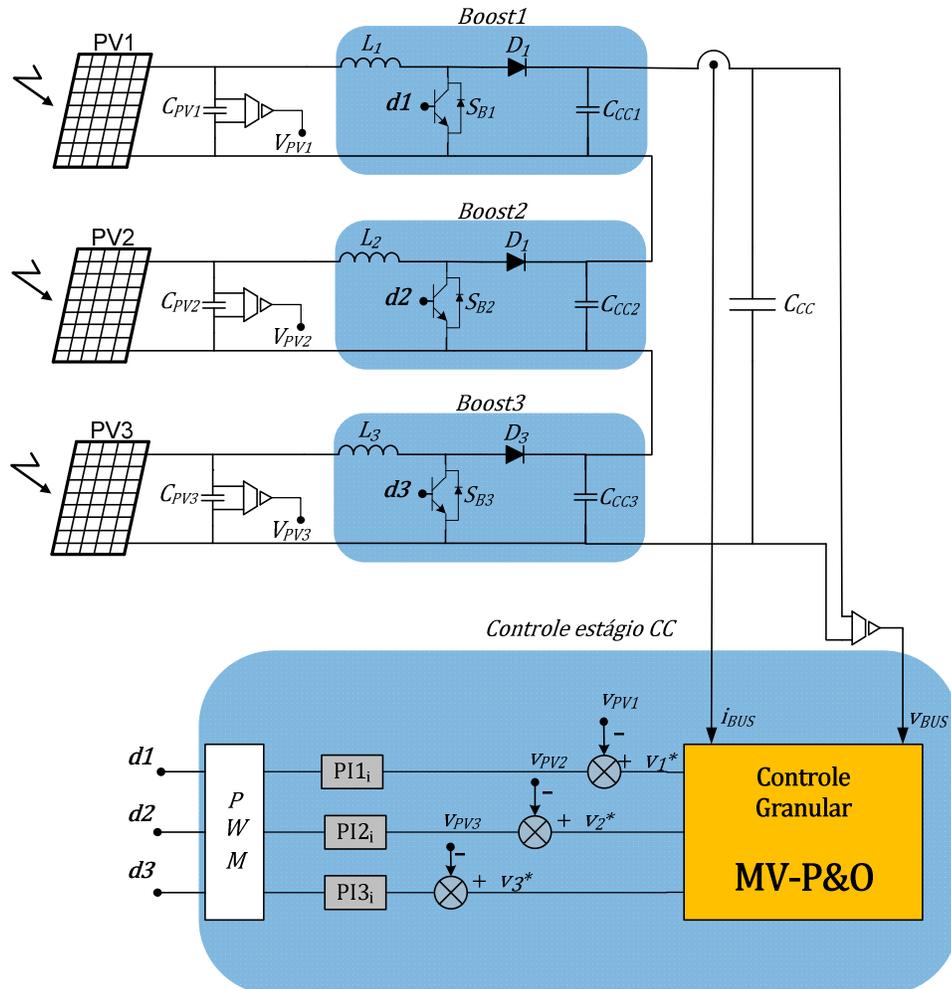


Figura 2 - Topologia de sistema fotovoltaico proposta no estágio CC.

Fonte: Autoria Própria.

Concluídas as simulações, serão realizadas simulações da topologia clássica e da topologia proposta para efeito comparativo dos resultados obtidos do sistema PV e validação da topologia proposta.

No decorrer do trabalho é apresentado o panorama energético e desenvolvimento teórico, abordando os principais conceitos necessários para a compreensão do sistema PV aplicado.

### 3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

O processo físico de conversão de luz solar em energia elétrica recebe o nome de efeito fotoelétrico. Foi experimentalmente descoberto em 1839, pelo físico francês Alexandre E. Becquerel, onde descobriu que alguns materiais produzem, ainda que pequena, uma certa quantidade de corrente, devido a exposição a luz. Após quase 50 anos Charles Fritts, de maneira ineficiente, inseriu selênio, à consideradas primeiras células PV. Em 1905, Albert Einstein, descreveu a natureza da luz e o efeito fotoelétrico que lhe redeu um prêmio Nobel em física. No ano de 1949, Billing e Plessnar medem a eficiência de fotocélulas de silício cristalino, ao mesmo tempo em que a teoria da junção *p-n* de Shockely é divulgada. Em 1954, dado os esforços dos pesquisadores norte-americanos Daryl Chapin, Calvin Fuller e G.L. Pearson, foi construído nos Laboratórios Bell, Estados Unidos, o primeiro módulo ou painel PV, com eficiência em torno de 6%, e já incorporava lâminas de silício cristalino, com características semelhantes às encontradas hoje, conforme Figura 3 (KININGER, 2003; FADIGAS, 2012; CRESESB, 2014).



**Figura 3 - Painel fotovoltaico.**  
**Fonte: Adaptado Solar World, 2015.**

Dentro desse conceito, são descritos o efeito PV para obtenção de energia elétrica, as características de conversão e construtivas dos painéis PV, os efeitos climáticos e a topologia empregada em sistemas PV.

### 3.1 EFEITO FOTOVOLTAICO

A luz solar, na forma de radiação ou ondas eletromagnéticas, é o combustível utilizado para conversão em energia elétrica. Considerando a produção de eletricidade o efeito fotoelétrico, aplicado a materiais semicondutores, origina o efeito PV que é a base do sistema em estudo (VILLALVA; GAZOLI 2013). Uma célula formada por uma camada de material semiconductor do tipo  $p$ , dopado com boro, e outra camada tipo  $n$ , dopado com fósforo, possui respectivamente, excedentes e falta de elétrons (excesso de lacunas). Quando recebem radiação, cria-se na zona de depleção (junção  $p-n$ ) um campo elétrico, também chamada de tensão elétrica ou diferença de potencial. Caso exista dois eletrodos conectados a célula, exposição à radiação solar e um caminho fechado, conforme Figura 4, origina-se uma corrente elétrica (CRESESB, 2014).

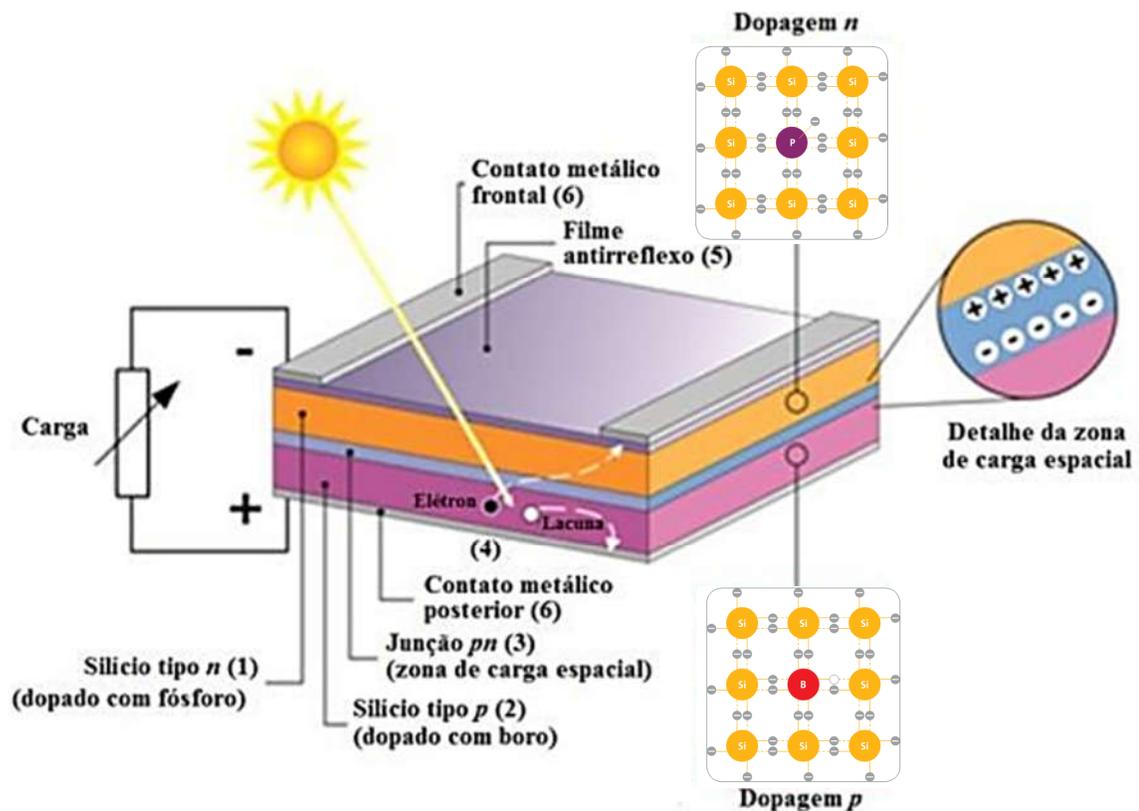


Figura 4 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício destacando: (1) região tipo  $n$ ; (2) região tipo  $p$ ; zona de carga espacial, onde se formou a junção  $p-n$  e o campo elétrico; (4) geração de par de elétron-lacuna; (5) filme antirreflexo; (6) contatos metálicos.

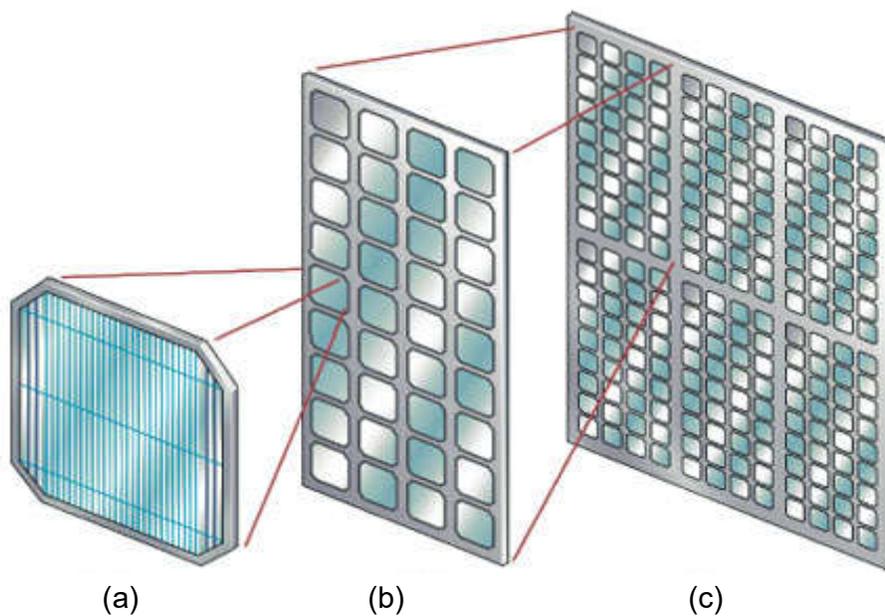
**Fonte: Adaptado CRESESB, 2014.**

A grandeza utilizada para expressar a quantidade de radiação solar que incide sobre a superfície, chama-se irradiação e na forma instantânea de irradiância. Sua unidade é dada em watt por metro quadrado ( $W/m^2$ ). Os dados de módulos ou painéis PVs, são fornecidos pelos fabricantes em condições de teste padrão (STC – *Standard Test Condition*) com temperatura de  $25^\circ C$ , massa de ar (AM – *Air Mass*) de 1,5 e radiação de  $1000W/m^2$  (VILLALVA; GAZOLI, 2013).

### 3.2 PAINEL FOTOVOLTAICO

O dispositivo com capacidade de conversão direta da energia da luz solar em energia elétrica, considerando a menor unidade básica em um sistema fotovoltaico, chama-se célula fotovoltaica (CPV). Quanto maior o valor instantâneo da intensidade de luz (irradiância) sobre a célula, maior será a geração de corrente, e do fluxo de eletricidade, considerando uma temperatura constante (KININGER, 2003). As CPVs são fabricadas principalmente a partir de lâminas de silício cristalino, dominando o mercado mundial com produção acima dos 85% e dividem-se em monocristalino e policristalino, com eficiências médias de conversão em torno de 18% e 14%, respectivamente. Outras tecnologias comercializadas são baseadas em filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS) e silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), com rendimento médio menor em torno de 7% a 11%. (CASARO; MARTINS, 2008; CRECESB, 2014).

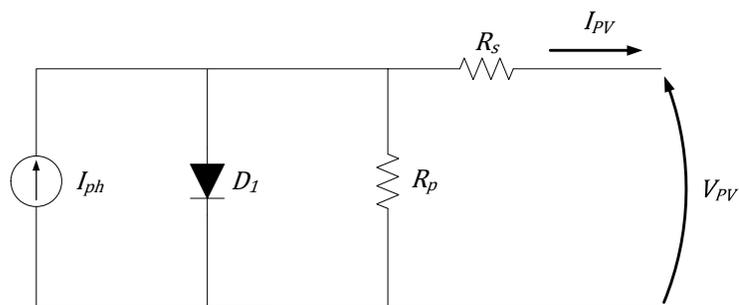
O sistema fotovoltaico possui modularidade, conforme Figura 5, visto que dependendo da aplicação é necessário maior corrente, conectando células em paralelo, ou maior tensão conectando células em série. Associação série, paralelo ou mista de CPVs, origina um módulo ou painel PV e a associação entre módulos chama-se arranjo PV. A tensão de saída disponível em dispositivo PV possui formato CC. O nível de tensão, corrente e potência varia conforme algumas características de construção e externas como junção *p-n*, sua modularidade, do nível de irradiância e da temperatura (SAMPAIO, 2013).



**Figura 5 - Modularidade do sistema fotovoltaico (a) célula, (b) módulo, (c) arranjo.**  
**Fonte: Adaptado GEOPOWER, 2015.**

### 3.2.1 Modelo de um painel fotovoltaico

O modelo matemático para explicar o comportamento elétrico de um painel PV, com maior precisão, deve partir da idealização de uma CPV em um circuito elétrico equivalente, conforme a Figura 6.



**Figura 6 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.**  
**Fonte: Autoria própria.**

Considera-se a radiação incidente sobre a célula como uma fonte de corrente em paralelo com um diodo (junção  $p-n$ ), a resistência série ( $R_s$ ) representa a resistência da lâmina do material semiconductor, das resistências de contatos e dos terminais de saída, enquanto a resistência paralela ( $R_p$ ) representa as impurezas e não idealidades da junção  $p-n$  (KININGER, 2003; CASARO; MARTINS, 2008; SAMPAIO, 2013). Aplica-se o teorema de *Thévenin* ao circuito elétrico da Figura 6, e obtém-se a equação (1).

$$I_{PV} = I_{ph} - I_r \left[ e^{q \left[ \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{\eta k T} \right]} - 1 \right] - \frac{V_{PV} + I_{PV} R_s}{R_p} \quad (1)$$

Os coeficientes da Equação (1) – (4), seguem discriminados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Coeficientes da Equação da corrente de saída da célula PV.**

COEFICIENTES	DEFINIÇÃO
$V_{PV}, I_{PV}$	Tensão e corrente nos terminais de saída de uma célula solar;
$I_{ph}$	Fotocorrente;
$I_r$	Corrente de saturação reversa da célula;
$q$	Carga do elétron ( $1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ );
$\eta$	Fator de idealidade da junção $p-n$ ;
$k$	Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$ );
$T, T_r$	Temperatura ambiente e temperatura de referência (298), Kelvin;
$R_s, R_p$	Resistência série e paralela da célula;
$I_{SC}$	Corrente de curto-circuito por célula;
$\alpha$	Coefficiente de temperatura de $I_{SC}$ ;
$P_{sun}$	Intensidade de radiação solar, $\text{W/m}^2$ ;
$I_{rr}$	Corrente de saturação reversa de referência;
$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto.

Fonte: Autoria própria.

Segundo Casaro e Martins (2008), a fotocorrente ( $I_{ph}$ ) gerada, é representado pela Equação (2), está diretamente relacionada com a radiação solar e a temperatura

sobre a superfície do gerador fotovoltaico. A corrente de saturação reversa ( $I_r$ ) e a corrente reversa ( $I_{rr}$ ), são obtidos pelas Equações (3) e (4).

$$I_{ph} = [I_{ph} + \alpha(T - T_r)] \frac{P_{sun}}{1000} \quad (2)$$

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

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

Baseado na equação (1), obtém-se a curva característica, não linear, de um painel PV com parâmetros de entrada constantes para radiação e temperatura. Observa-se o ponto de máxima potência (MPP - *Maximum Power Point*) no “joelho” da curva dado uma corrente de máxima potência ( $I_{MPP}$ ) e respectiva tensão de máxima potência ( $V_{MPP}$ ).

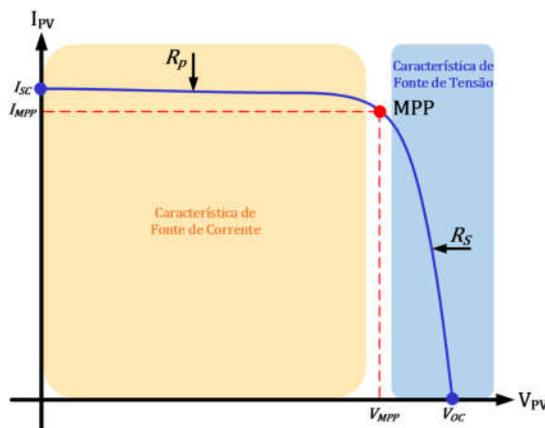
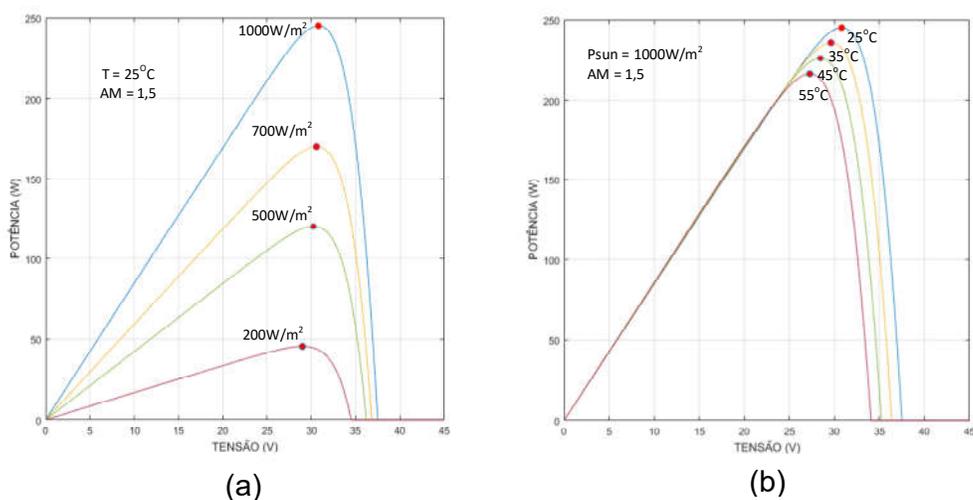


Figura 7 - Curva  $I_{PV}$ - $V_{PV}$  (corrente-tensão) dado um valor de  $R_p$  e  $R_s$ .  
Fonte: Adaptado SAMPAIO, 2013.

Segundo Casaro e Martins (2008) a resistência  $R_p$  representa as perdas na junção  $p-n$  e resistência série  $R_s$  representa as perdas por condução no material. As resistências  $R_p$  e  $R_s$  são parâmetros de ajuste da curva característica não linear de uma CPV e apresentam respectivamente característica de fonte de corrente antes do

MPP e como fonte de tensão depois do MPP, sendo a extremidade esquerda o ponto de corrente de curto-circuito ( $I_{SC}$  – *Short Circuit Current*) e na direita a tensão de circuito-aberto ( $V_{OC}$  – *Open Circuit Voltage*), conforme Figura 7.

Verifica-se que a curva de um painel PV variará ao longo do dia, devido a alterações de radiação solar, temperatura e parâmetros construtivos devido ao tempo de uso. Desta forma, é necessária a utilização de técnicas de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT), descritas no Capítulo 6, para extrair a máxima potência do painel, rastreando esse ponto ao longo da curva (SAMPAIO, 2013). As curvas características P-V (potência-tensão) para variações de radiação geram maior impacto na corrente de MPP e variações de temperatura, impactam, ainda que em menor severidade, na tensão de MPP disponível, conforme Figura 8, considerando que em ambos os casos AM constante.



**Figura 8 - Característica de curva não linear do PV para variações de radiação (a) e variações de temperatura (b).**

**Fonte: Autoria própria.**

### 3.3 TOPOLOGIA DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Serão analisadas as topologias centralizadas, ou seja, quando apresentam apenas um único inversor para condicionamento de energia CC em CA. A topologia descentralizada é composta por duas ou mais combinações gerador-inversor (MOURA JUNIOR, 2015).

As conexões dos painéis em série originam uma string, onde o arranjo PV possui maior nível de tensão, porém, quando necessita-se de maior nível de corrente, os *strings* são associados em paralelo. Em associação paralela é necessário diodo *bypass* com cada ramo paralelo para impedir a circulação de corrente reversa, conforme Figura 9 (a). Nesta topologia mista, associado diretamente ao estágio inversor, devido aos diodos *bypass*, o sistema tem perdas adicionais de condução, além de não apresentar controle no estágio CC e limitar o nível de potência disponível de todo o arranjo PV, quando ocorre uma radiação não uniforme ou o sombreamento parcial sobre painéis. (BRUM, 2010; BRITO et. al. 2013).

Na geração CC, configurado como *string* ou módulo CA o uso de diodos *bypass* são desconsiderados. Conforme Figura 9 (b), o arranjo PV é composto apenas de *string*, com grande quantidade de painéis em série para atingir níveis de tensão acima do pico da rede monofásica, porém continua sem controle no estágio CC e um único PV da string em condição de radiação e temperatura não uniforme ou sobre o efeito do sombreamento parcial, interfere diretamente nos outros painéis do arranjo PV.

Considerando a mesma potência de projeto, a associação de *strings* em cascata, origina uma topologia *multi-string*, que reduz o efeito do sombreamento parcial do arranjo PV. Quando o *multi-string* apresenta um conversor elevador por *string*, no estágio CC, conforme Figura 9 (c), reduz a quantidade de painéis PV, para garantir o mesmo nível de tensão do *string*, além de minimizar o efeito do sombreamento parcial existe a possibilidade de aplicar um controle utilizando técnicas de MPPT, com a finalidade de buscar o melhor aproveitamento da energia convertida (MIYATAKE et al., 2011; BRITO et al., 2013; SAMPAIO, 2013; OLIVEIRA, 2014, MOURA JUNIOR, 2015).

A configuração módulo ou painel CA é utilizado para aplicações de baixa potência (MARKS; SUMMERS; BETZ, 2012). Conforme Figura 9 (d), conecta-se um painel PV diretamente ao inversor, e mesmo que ocorra sombreamento, a conversão, sempre que possível, ocorre em MPP (BRUM, 2010; BRITO et. al. 2011).

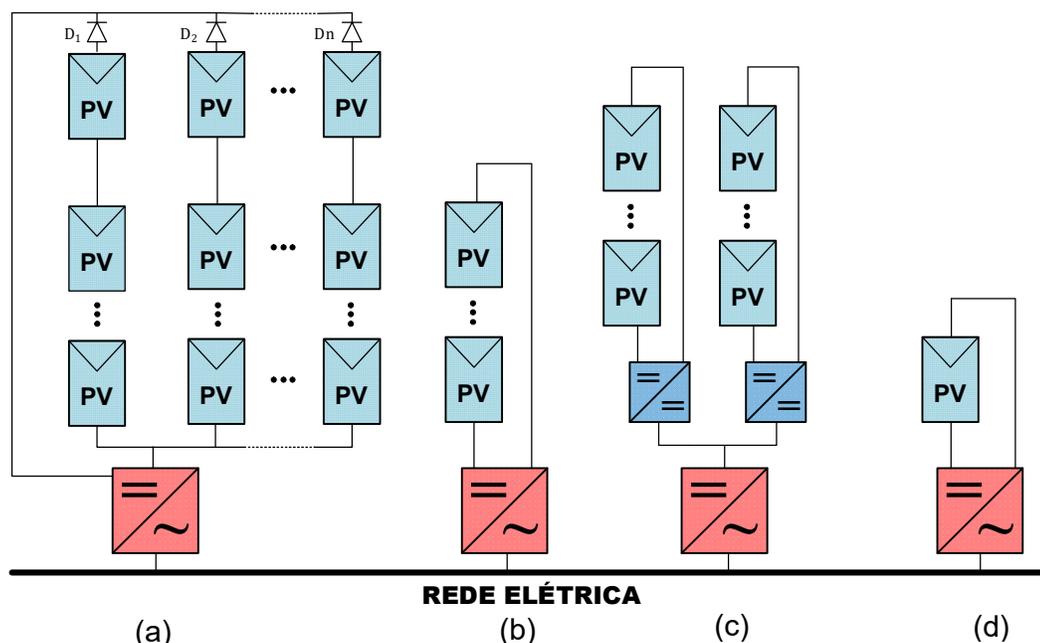


Figura 9 - Topologia monofásica centralizada: *string* e/ou paralela (a), *string* de único estágio (b), *multi-string* de duplo estágio (c) e módulo CA (d).

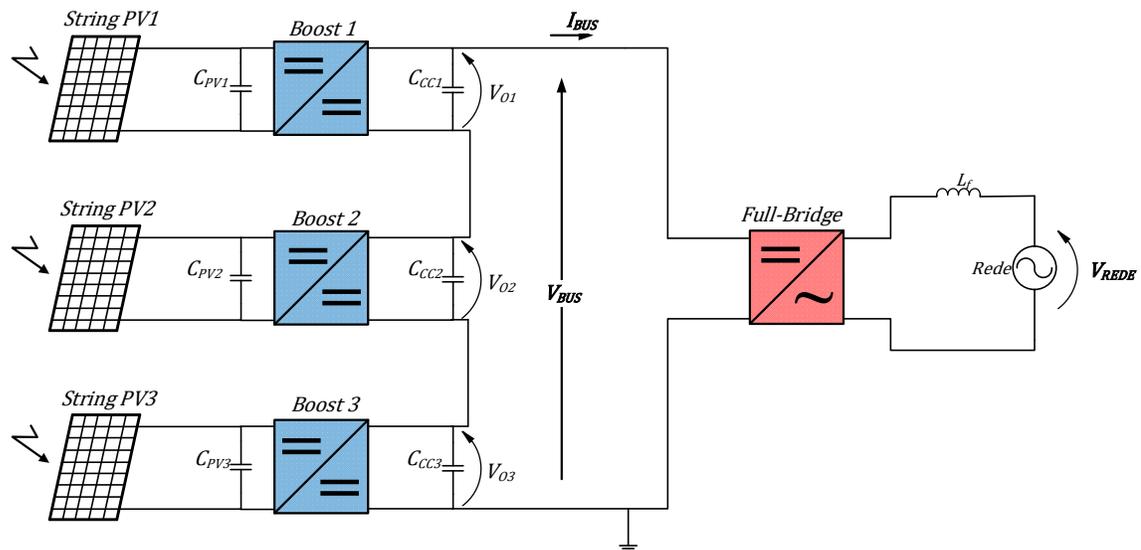
Fonte: Autoria própria.

Os sistemas PV conectados à rede elétrica, ainda podem ser classificados em monofásicos ou trifásicos. Na próxima sub seção 4.3.1, é apresentado características do foco do trabalho, uma topologia monofásica centralizada *multi-string* em série, de três *string* PV, com estágio CC elevador.

### 3.3.1 Configuração centralizada *multi-string*

As topologias mais comuns apresentam um ou dois estágios, a proposta como trabalhos futuros, conforme Figura 10, é utilizar duplo estágio: um conversor CC-CC para elevação do nível de tensão no barramento e controle MPPT; aliado a um

conversor CC-CA para sincronização com a rede com sistema PLL (*Phase-Locked Loop*), discutido no Capítulo 5, e injeção de energia ativa. Geralmente utiliza-se um conversor elevador tipo *Boost* a cada *string* e associação *multi-string* em série conectada a um inversor em ponte completa (*Full-Bridge*), discutidos no Capítulo 4 (BRITO et al., 2011).



**Figura 10 - Topologia monofásica centralizada *multi-string* em série.**  
Fonte: Autoria própria.

Além de fácil expansão do sistema, essa topologia centralizada na saída, limitando-se ao condicionamento da potência nominal de projeto do inversor, segundo Brum (2010) e Moura Junior (2015), apresenta algumas vantagens, devido a entrada *multi-string* descentralizada, onde cada *string* possui um conversor elevador em série:

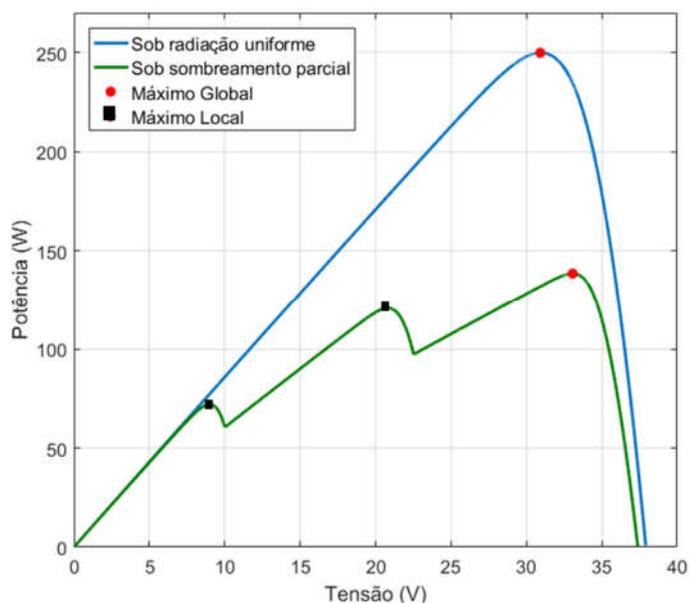
- MPPT de cada *string*;
- melhora na eficiência;
- menor custo;
- redução da quantidade de painéis PV por *string* para obter o mesmo nível de tensão de saída projetada;
- redução dos efeitos do sombreamento parcial;
- redução de tensão sobre os elementos ativos e passivo do estágio CC;

- possibilidade de diferentes orientações do arranjo PV;
- associação série de *strings* com diferentes níveis de potência conectadas ao mesmo barramento.

### 3.4 SOMBREAMENTO PARCIAL

Segundo Petrone et al. (2013) e Oliveira et al. (2015) para strings que possuem apenas um ou mais painéis em STC, existe apenas um máximo de potência que pode ser extraído do arranjo PV, desconsiderando-se o sombreamento.

A desvantagem da topologia adotada pelo trabalho, ocorre devido ao sombreamento parcial no *string*, que apresentam múltiplos máximos locais ( $M_L$ ) e um máximo global ( $M_G$ ) presente na curva característica do *string*, conforme Figura 11, desta forma técnicas convencionais de MPPT, podem ficar atoladas em um  $M_L$  e apresentar baixo fator de rastreamento e conseqüentemente extrair uma potência inferior ao disponível pelo arranjo PV (MIYATAKE et al., 2011; MOURA JUNIOR, 2015).



**Figura 11 – Curva característica P-V (potência-tensão) do arranjo PV sob efeito de sombreamento parcial.**

Fonte: Autoria própria.

Caso um painel PV é totalmente iluminado enquanto ocorre sombreamento parcial em um segundo painel, devido a uma nuvem, árvore ou até mesmo o ângulo de isolamento (MOURA JUNIOR, 2015), a corrente que flui através primeiro painel PV será a mesma, entretanto a tensão gerada pelo segundo painel será menor e assim por diante, dada ao sombreamento em cada painel, como descrito em (MIYATAKE et al., 2011).

A curva característica P-V do painel PV, apresenta múltiplos máximos de potência, sendo o um deles o máximo global, que é o objetivo do MPPT, porém com o sombreamento parcial a técnica pode ficar atracada a um máximo local.

## 4 TOPOLOGIA DE CONVERSORES CC-CC E CC-CA

O estudo de painéis PV apresenta uma tensão e corrente de saída do PV na forma CC, sendo necessário uma elevação de tensão para níveis acima da pico da rede monofásica, para que o estágio inversor, possa impor na forma CA, a potência condicionada do barramento CC, na rede elétrica. A utilização de conversores CC-CC do tipo elevadores possibilita a aplicação de um controle MPPT, para buscar o ponto ótimo de operação (PETRONE et al., 2013; MOURA JUNIOR, 2015; OLIVEIRA et al. 2015). O trabalho apresenta, no primeiro estágio de conversão, a topologia de conversor CC-CC elevador tipo *Boost*.

Será realizado um breve estudo sobre os inversores ou conversores CC-CA. São dispositivos de conversão de uma fonte de energia CC em uma fonte de energia CA, podendo controlar o nível do valor eficaz da tensão de saída e da frequência fundamental (SAMPAIO, 2010).

### 4.1 CONVERSOR BOOST

O conversor tipo *Boost* é empregado pelo baixo custo, eficiência, trabalha diretamente com energia CC na entrada e apresenta elevação da tensão CC na saída. Seu esquemático elétrico pode ser representado, conforme Figura 12.

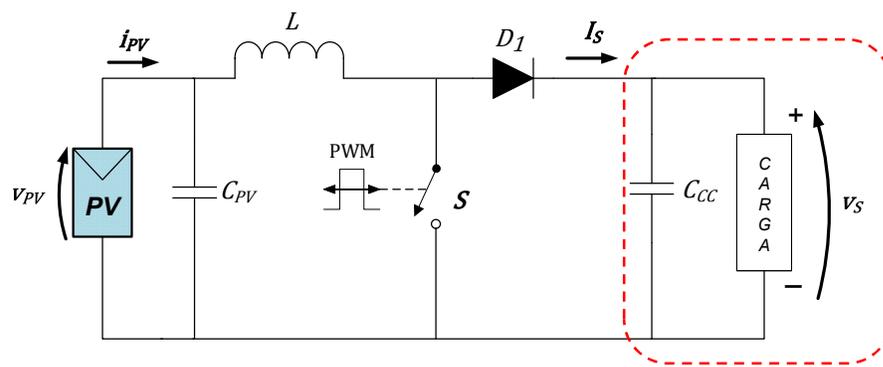


Figura 12 - Conversor CC-CC tipo *Boost* com geração PV na entrada.

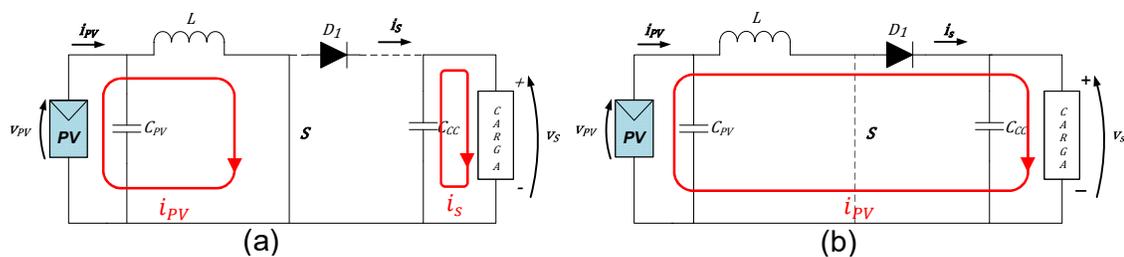
Fonte: Autoria própria.

A topologia utilizada por esse conversor contém um filtro indutivo na entrada ( $L$ ) em série com a fonte de entrada, uma chave modulada em alta frequência, (20kHz), controlada por modulação de largura de pulso (PWM – *Pulse-Width Modulation*). Possui um diodo rápido e sua saída apresenta um filtro capacitivo ( $C$ ) em paralelo com a carga, que devido ao comportamento de fonte de tensão, os elementos dentro da área tracejada na Figura 12, podem ser reduzidos a uma fonte CC para redução na complexidade do equacionamento do seu ganho estático ( $G$ ) (MOURA JUNIOR, 2015; OLIVEIRA et al. 2015).

Segundo Varjão (2013) a principal desvantagem deste conversor é a ondulação da corrente de saída. Quanto maior o ganho de conversão, maior será a ondulação, gerando perdas de condução, reduzidos pelo capacitor ( $C_{cc}$ ).

#### 4.1.1 Dimensionamento dos elementos passivos

Os elementos passivos de entrada e saída podem ser equacionados a partir da primeira etapa de funcionamento do conversor, considerado em regime estacionário, adotando a chave ( $S$ ) fechada, conforme Figura 13 (a), onde o elemento indutivo ( $L$ ) armazena energia proveniente da fonte geradora, no caso uma string PV, o diodo ( $D_1$ ) não conduz e a carga é alimentada pela elemento capacitivo ( $C_{cc}$ ) que nesta etapa descarrega e mantém a tensão de saída ( $V_S$ ).



**Figura 13 - Funcionamento do conversor tipo Boost com geração PV na entrada: primeira etapa fechada (a) e segunda etapa aberta (b).**

Fonte: Autoria própria.

Nesta primeira etapa, onde a chave está conduzindo, com a malha de entrada e de saída equaciona-se, respectivamente o indutor e o capacitor.

O equacionamento inicia pela definição, pelo projetista, do período total de chaveamento ( $T_s$ ), dado pela Equação (5), sendo a soma do período de chave fechada ( $T_{on}$ ) e de chave aberta ( $T_{off}$ ). A frequência de chaveamento ( $f_s$ ) e a razão cíclica ( $D$ ) também são definidas pelo projetista, dadas respectivamente pela Equação (6) e Equação (7).

$$T_s = T_{on} + T_{off} \quad (5)$$

$$f_s = \frac{1}{T_s} \quad (6)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_s} \quad (7)$$

Define-se, em condições ideais, a Equação (8), como a tensão sobre o indutor e a Equação (9), como a corrente circulante no capacitor.

$$v_L = L \frac{d\Delta i_{pV}}{dt} \quad (8)$$

$$i_C = C \frac{d\Delta v_S}{dt} \quad (9)$$

Fechando a malha de entrada ( $i_{pV}$ ), na primeira etapa, em que a chave está fechada: e substituindo Equações (6) e (7) na Equação (8), fazendo uma manipulação algébrica isola-se  $L$ . Como  $v_{pV}$  é proporcional a tensão sobre o indutor, obtém-se a Equação (10).

$$L = \frac{v_{pV} D}{f_s \Delta i_{pV}} \quad (10)$$

Fechando a malha de saída ( $i_S$ ), na primeira etapa, em que a chave está fechada: e substituindo Equações (6) e (7) na Equação (9), fazendo uma manipulação algébrica isola-se  $C_{CC}$ . Como  $i_o$  é proporcional a corrente sobre o capacitor, obtém-se a Equação (11).

$$C_{CC} = \frac{i_s D}{f_s \Delta V_s} \quad (11)$$

A segunda etapa de funcionamento, conforme Figura 13 (b), apresenta razão cíclica proporcional ao tempo de chave aberta ( $-T_{off}$ ), ou seja, de acordo com a Equação (12). Fechando a malha também pode-se dimensionar L: substituindo Equações (5), (6) e (7) na Equação (8). Como  $v_{PV}$  é proporcional a tensão sobre o indutor, obtém-se a Equação (13).

$$D' = (1 - D) \quad (12)$$

$$L = \frac{(v_{PV} - v_s) D'}{f_s \Delta i_{PV}} \quad (13)$$

Como a Equação do ganho estático é definido pela relação de saída pela entrada, conforme Equação (14), igualando as Equações (10) e (13), considera-se o momento de comutação da chave aberta pra fechada e fazendo uma manipulação matemática, obtém-se o ganho estático do conversor Boost, dado a Equação (15).

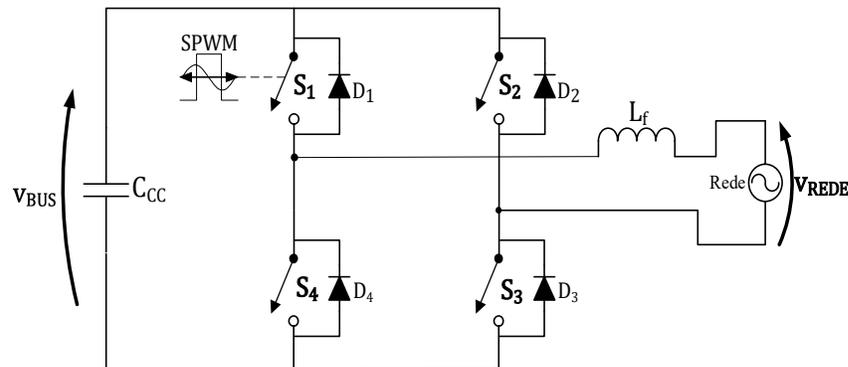
$$G = \frac{V_{saída}}{V_{entrada}} \quad (14)$$

$$G_{Boost} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (15)$$

#### 4.2 INVERSOR EM PONTE COMPLETA (FB)

O inversor monofásico FB, totaliza quatro chaves de potência conectadas a um barramento CC composto por um capacitor ( $C_{CC}$ ), e um indutor de acoplamento ( $L_f$ ) para controle de injeção de corrente na rede (MOURA JUNIOR, 2015), conforme esquemático da Figura 14.

Oferece operação de maiores potências comparadas ao inversor de meia ponte (*Half-Bridge*) e as chaves são projetadas para bloquear uma tensão direta igual à solicitada pela entrada, o controle do barramento CC é mais simples, além da possibilidade de implementação de uma modulação PWM de três níveis, que deve ser aplicado a cada uma das quatro chaves (SAMPAIO, 2010).



**Figura 14 - Inversor Full-Bridge VSI.**

Fonte: Autoria própria.

A comutação das chaves do inversor FB, ocorre na operação das chaves diagonais de forma complementar. Quando as chaves  $S_1$  e  $S_3$ , conduzem (fecham), simultaneamente as chaves  $S_2$  e  $S_4$  bloqueiam (abrem) e a tensão de saída apresenta semiciclo positivo. De maneira contrária ocorre quando as chaves  $S_2$  e  $S_4$  conduzem, simultaneamente  $S_1$  e  $S_3$ , porém o semiciclo é negativo. Para que não ocorra curto entre as chaves, deve ser considerado um tempo morto, entre a condução das mesmas (OLIVEIRA et al. 2015).

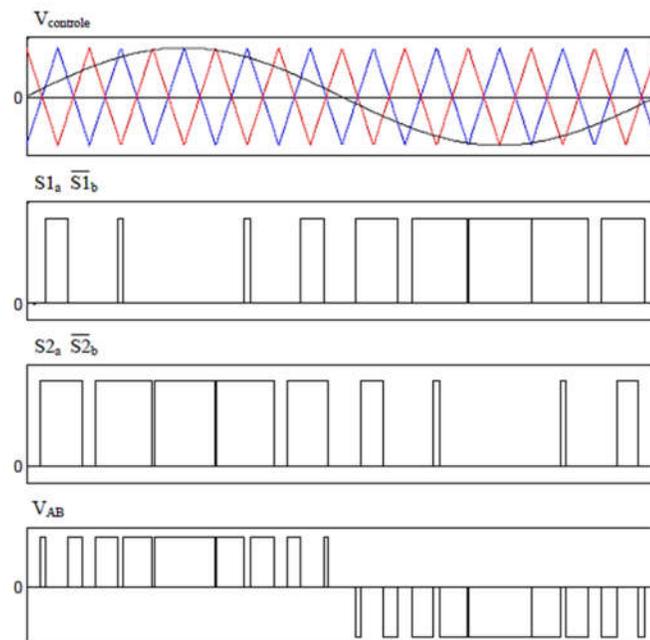
#### 4.2.1 Modulação de três níveis

A forma da tensão de saída do inversor depende da técnica utilizada no controle das chaves. A modulação mais utilizada em um FB, consiste em uma modulação por largura de pulso (PWM - *Pulse-Width Modulation*) que consiste na

comparação de um sinal de referência, com outro sinal triangular chamados respectivamente de modulante e de portador, de forma a obter o sinal de controle com frequência fixa e largura de pulso variável (SAMPAIO, 2010; CAMPANHOL, 2012; OLIVEIRA, 2014).

Convencionalmente, utiliza-se em topologias monofásicas controle por fonte tensão (VSI – *Voltage Source Inverter*), sobre o indutor de acoplamento, e a modulação PWM com portadora modulante senoidal (SPWM - *Senoidal Pulse-Width Modulation*). Essa modulação pode ser implementada em dois níveis de tensão (positivo e negativo) ou três níveis (positivo, negativo e zero), conforme Figura 15 e apresentando ondas retangulares em ambas. Utiliza-se a SPWM unipolar, com a finalidade de reduzir o conteúdo harmônico e minimizar o tamanho/volume do filtro quando comparado com a modulação bipolar (RASHID, 2010).

Será implementado um inversor FB monofásico VSI com modulação SPWM unipolar a três níveis, no qual, conforme Oliveira (2015), apresenta uma tensão de saída com o dobro da  $f_s$ , onde conseqüentemente ocorre aumento na comutação na saída do FB, possibilitando a redução da  $L_f$ .



**Figura 15 - Modulação SPWM a três níveis.**

Fonte: Autoria própria.

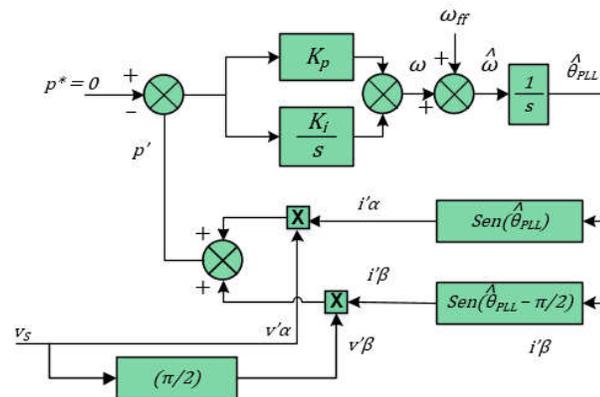
#### 4.2.2 Sistema de detecção do ângulo de fase da rede (PLL)

Para injeção de energia na rede, existe a necessidade de injeção de corrente em contra fase com o ângulo de fase da tensão da rede e na mesma frequência fundamental, sendo necessário uma estratégia de detecção destes parâmetros. Dentro deste contexto, estuda-se sistemas para atracamento com a rede, para obter o sincronismo com a mesma. Esses sistemas, também denominados PLL, obtêm informações do ângulo de fase, frequência e até mesmo a amplitude da tensão da rede (SILVA et al., 2009).

Segundo BACON et al. (2014) para que o sistema PLL obtenha resultado satisfatório, o mesmo deve ser capaz de detecção do ângulo de fase, mesmo havendo distúrbios na rede elétrica, como transitório de tensão, harmônicos, saltos de fase e subtensão.

Será adotado no trabalho um sistema PLL, chamado de  $\alpha\beta$ -pPLL, conforme Figura 16, que baseia-se em uma teoria de potência ativa trifásica instantânea (pPLL). Como o trabalho apresenta aplicação em rede monofásica, o pPLL é adaptado para desenvolvimento de um eixo estacionário bifásico na coordenada fictícia  $\alpha\beta$ .

Para adequar a atracção do PLL aplicado, onde se deve extrair apenas a componente fundamental da rede elétrica, desta forma a geração da tensão  $v_\alpha$  fictícia é realizada pela tensão de saída defasada em  $90^\circ$  (SILVA et al. 2006; MOURA JUNIOR, 2015).



**Figura 16 - Diagrama de blocos  $\alpha\beta$ -pPLL.**  
**Fonte: Adaptado SILVA, 2006.**

Para obtenção do sistema bifásico fictício, a tensão monofásica medida ( $v_a$ ) da rede elétrica, é considerada a própria tensão  $v'_\alpha$ , e para obtenção da tensão  $v'_\beta$ , que deve ser ortogonal a  $v'_\alpha$ , uma defasagem deve ser aplicada na tensão monofásica medida. A Equação (16), representa, na forma matricial, o eixo bifásico fictício  $\alpha\beta$  aplicado (SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008; OLIVEIRA, 2014).

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a(\omega t) \\ v_a(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t) \\ \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (16)$$

A Equação (17), também na forma matricial, representa as correntes fictícias  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  do sistema PLL, que devem ser, respectivamente, ortogonais as tensões  $v'_\alpha$  e  $v'_\beta$  para eliminar a potência fictícia  $p'$ .

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a(\theta^*) \\ i_a(\theta^* - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (17)$$

As Equações (18) e (19) representam  $p'$ , composta por um valor CC e uma perturbação CA.

$$p' = V_p \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\theta^*) + V_p \text{sen}(\omega t - \pi/2) \text{sen}(\theta^* - \pi/2) \quad (18)$$

$$p' = v'_\alpha i'_\alpha + v'_\beta i'_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (19)$$

Quando a potência fictícia tem seu valor CC anulado, existe o atracamento do sinal de saída do PLL com a componente da rede na frequência fundamental  $f$ .

A dinâmica do PLL deverá ajustar a saída do controlador PI na frequência angular de referência  $\omega^* = 2\pi f$ . O ângulo de fase de referencia  $\theta^*$  é obtido pela integração de  $\omega^*$ , a qual deverá ser idêntica à frequência angular da rede  $\omega$  (SILVA et al. 2006).

## 5 TÉCNICAS DE RASTREAMENTO DO PONTO DE MÁXIMA POTÊNCIA (MPPT)

A geração de energia através do uso de painéis PV apresenta vantagens, devido a fonte, luz solar, ser uma virtualmente inesgotável e gratuita, entretanto apresenta-se com baixa densidade e difusa, portanto apresenta baixa eficiência de conversão em energia elétrica (CRESESB, 2014).

Segundo Casaro e Denizar (2008) painéis de silício cristalino apresentam entre 14% e 18% para tecnologias policristalinas e monocristalinas, respectivamente. Devido ao baixo fator de conversão e a curva característica não linear, variações climáticas, como níveis de irradiação e temperatura interferem no ponto de máxima potência, sendo necessário rastreá-lo, por meio de técnicas de MPPT.

Considerando um único painel PV, é necessário salientar que há apenas um MPP, tanto em condição de radiação padrão ou radiação não uniforme, e este varia de acordo com as condições climáticas (MIYATAKE et al., 2011, SAMPAIO, 2013).

Diversas técnicas de MPPT têm sido empregadas (Brito et al., 2013), os principais métodos possuem fator de rastreamento, dentre eles, os métodos P&O e o Beta podem ser considerados como os principais métodos para aplicações fotovoltaicas com fator de rastreamento acima de 94%, desconsiderando o sombreamento.

O método P&O, não depende dos parâmetros construtivos do PV, de forma a ser aplicado a qualquer painel independente do fabricante (SAMPALIO, 2013).

Um controle MPPT distribuído ou D-MPPT é um controle comumente dedicado a um único painel PV associado em série a um conversor CC-CC elevador, formando um *string*. O arranjo PV apresenta-se na sua grande maioria em *multi-string*, geralmente em cascata, e possui associação centralizada no estágio CA (PETRONE et al., 2013).

Ainda segundo Petrone et al. (2013) o controle granular pode ser aplicado na mesma topologia de sistemas distribuídos, porém a principal diferença é que o controle D-MPPT possui um MPPT para cada string e o controle granular, um único MPPT multivariável realiza a ação de rastreamento do ponto de máxima potência para todos os stings.

## 5.1 CONTROLE DISTRIBUÍDO DE SIMPLES VARIÁVEL (SV-P&O)

É preciso rastrear a máxima potência de operação de cada painel, utilizando-se de técnicas de controle MPPT, que requerem um sensor de corrente e tensão para cada módulo PV (PETRONE, 2013).

Segundo Femia et al. (2008) e Petrone et al. (2013), técnicas de D-MPPT podem ser aplicados a sistemas PV. Baseado no controle distribuído e no algoritmo clássico P&O de simples variável (SV-P&O).

Esta topologia SV-P&O requer um controle de MPPT por *string*, ou seja, um sensor de corrente e tensão para monitoramento da potência de entrada do conversor elevador CC-CC tipo Boost de cada string, conforme Figura 17.

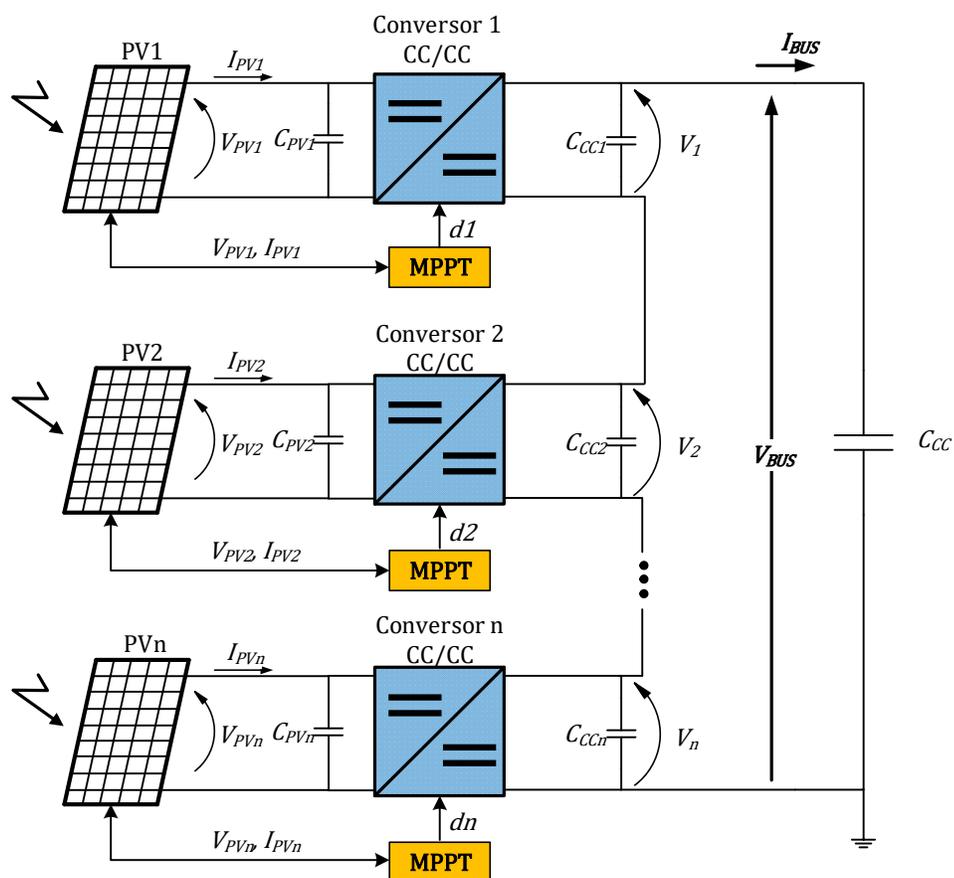
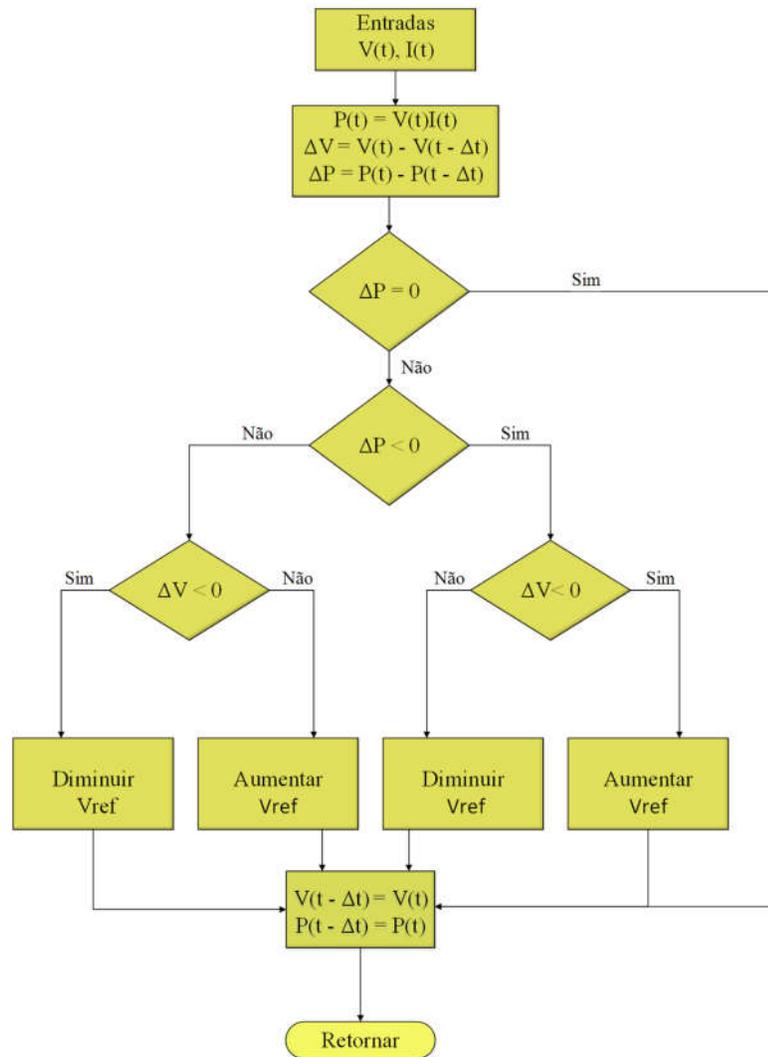


Figura 17 - Topologia do controle granular de simples variável.

Fonte: Autoria Própria.

O funcionamento do método SV-P&O, pode ser explicado pelo fluxograma, conforme Figura 18, de um P&O tradicional, aplicado a cada conjunto de painel PV e conversor CC-CC dedicado.



**Figura 18 - Fluxograma P&O.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Incrementando ou decrementando a razão cíclica ( $d$ ), conforme a variação de potência, oscilando em torno do ponto de máxima potência, ocorre a leitura de corrente e tensão da saída do painel PV, ou seja, a potência de entrada do estágio

CC, onde a potência atual ( $P(t)$ ), a variação de tensão ( $\Delta V$ ) e a variação de potência ( $\Delta P$ ) são condições iniciais.

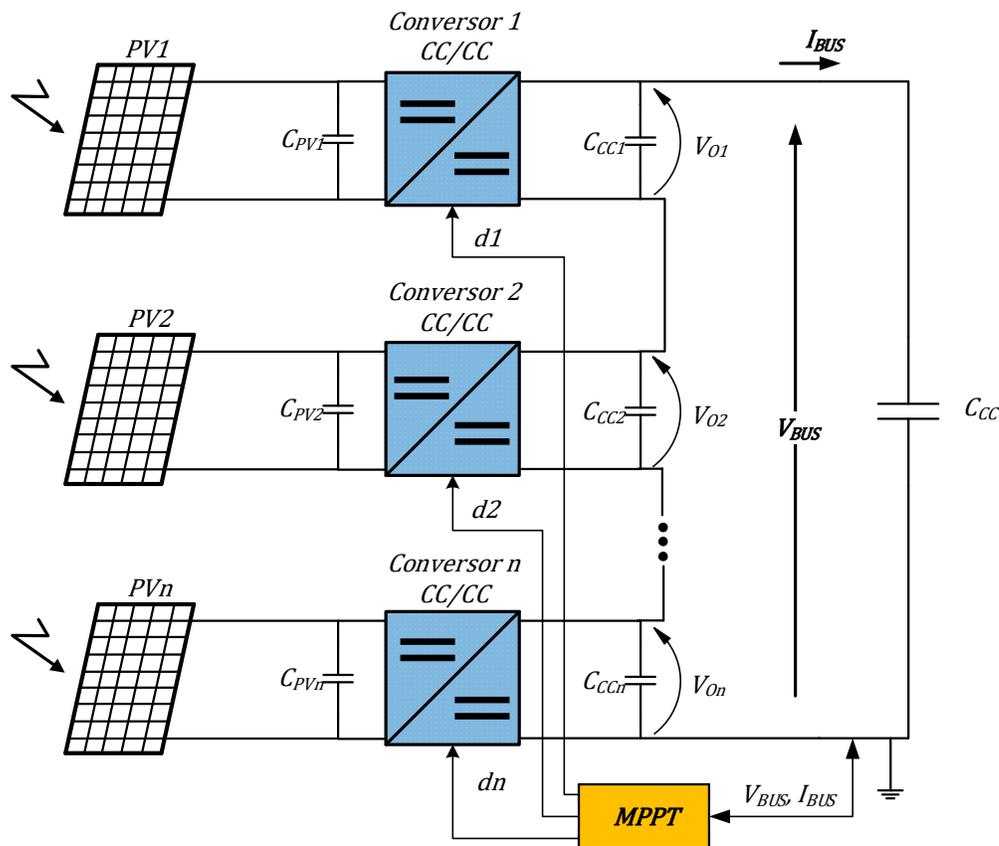
Caso a  $\Delta P$  seja nula a razão cíclica atual mantida, caso a  $\Delta P$  seja negativa e a  $\Delta V$  negativa, incrementa-se  $d$  atual, quando a  $\Delta P$  ainda continua negativa e a  $\Delta V$  é positiva, decrementa-se  $d$ . O oposto ocorre para variação positiva de potência. Em todas as iterações do algoritmo a tensão anterior e a potência anterior são atualizadas com a valor atual lido e calculado respectivamente.

## 5.2 CONTROLE GRANULAR MULTIVARIÁVEL (MV-P&O)

Em uma associação *multi-string* em cascata, o número de sensores encarece o sistema PV. O trabalho propõe um controle granular, que utiliza o conceito distribuído de strings, porém um único MPPT será responsável por cada ação de controle MPPT de todos os string, portanto, é um controle de múltiplas variáveis (MV-P&O).

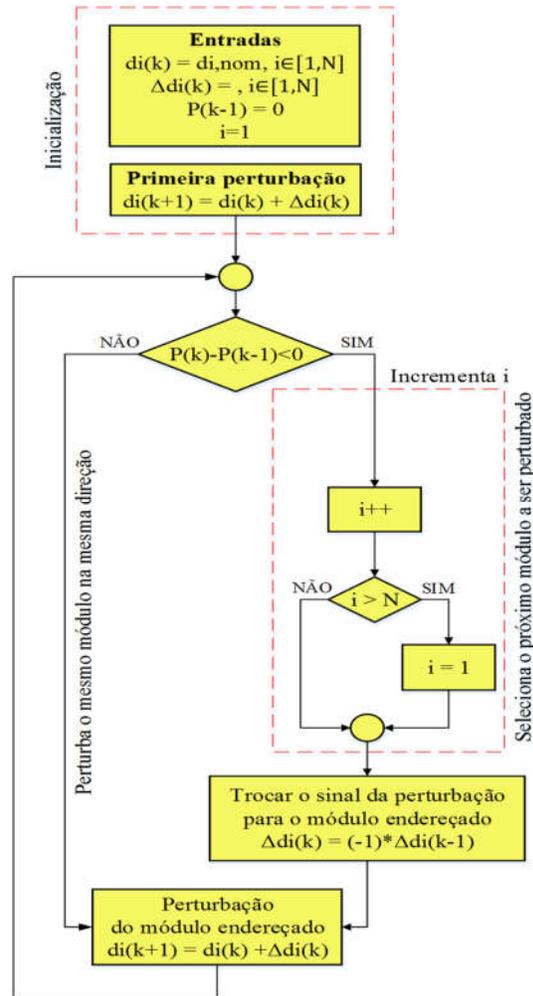
Outra particularidade do controle granular segundo Petrone et al. (2013) é que avalia a variação de potência na saída do barramento CC e portanto aplica pequenos incrementos ou decrementos, buscando o máximo de potência do sistema.

Apesar de também ser uma variação do método tradicional P&O, a lógica envolvida no controle granular precisa ser reescrita, baseado na variação de potência de saída do barramento e da quantidade de strings no sistema a ser controlado. O sistema em malha aberta utiliza somente um sensor de corrente e tensão para controle de potência disponível baseado em leituras na saída do barramento CC, conforme Figura 19. Desta forma espera-se um fator de rastreamento aceitável, com menores custos de implantação do sistema PV (PETRONE, 2013).



**Figura 19 - Topologia de controle granular multivariável.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

Baseado no conceito de incremento e decremento da razão cíclica, define-se uma lógica que perturba cada painel baseado na variação de potência do barramento. Dada as condições iniciais para a razão cíclica atual ( $d_i(k)$ ) somada a um incremento ( $\Delta d_i(k)$ ) ocorre a primeira perturbação no primeiro painel, caso a variação de potência seja negativa, perturba-se o mesmo painel, quando a potência anterior é maior que a atual, ocorre incremento do indexador ( $i$ ) e a perturbação ocorre no próximo painel, invertendo o sinal de  $\Delta d_i(k)$ . Quando o número máximo de painéis é excedido, volta-se a perturbar o primeiro painel e com o inverso do  $\Delta d_i(k)$  anterior. Os  $\Delta d_i(k)$  dos outros painéis são mantidos, respectivamente, conforme Figura 20.



**Figura 20 - Fluxograma MV-P&O.**  
**Fonte: Autoria Própria.**

O controle granular baseia-se na mesma disposição de strings que o método distribuído ou D-MPPT, onde cada string possui um conversor CC elevador e um único painel PV e a conexão em cascata destas strings para manter a corrente e somar os níveis de tensão.

Desta forma apesar de ser um controle multivariável cada string terá apenas um máximo global de potência, pois mesmo com sombreamento, não existirá máximos locais apenas uma redução na potência gerada pelo painel, portanto o efeito do sombreamento parcial é reduzido quando comparado ao método clássico, que possui vários painéis em série e estes ligados a um único conversor CC elevador para o sistema.

## 6 MODELAGEM CA DE PEQUENOS SINAIS ATRAVÉS DA TÉCNICA DE EQUAÇÕES MÉDIAS

Segundo Erickson e Maksimovic (2001) o objetivo da modelagem de pequenos sinais é prever a influência de variações de baixa frequência na razão cíclica sobre o comportamento das correntes e tensões do conversor, além de ignorar a ondulação e seus harmônicos de chaveamento. O trabalho aborda uma modelagem CA para obter os modelos lineares em torno do ponto quiescente de operação, utilizando a técnica *averaging* ou chamada de equações médias, onde adota-se o período de chaveamento muito menor que a constante de tempo do conversor, podendo desconsiderar as ondulações sobre a forma de onda dos elementos passivos devido ao chaveamento, resultando uma componente de baixa frequência expresso genericamente pela Equação (20). Onde  $\langle x(t) \rangle_{T_S}$  representa a média de  $x(t)$  em um período de chaveamento  $T_S$  (ERICKSON; MAKSIMOVIC, 2001).

$$\langle x(t) \rangle_{T_S} = \frac{1}{T_S} \int_t^{t+T_S} x(\tau) d\tau \quad (20)$$

Em regime permanente, considera-se nulo o valor médio, em um período de chaveamento, dos elementos passivos, porém durante os transitórios isso não ocorre, pois apresenta valores CC e CA, respectivamente o seu valor médio constante ( $X$ ) e uma perturbação ( $x$ ), representando o valor oscilatório, genericamente apresentado pela Equação (21).

$$\langle x(t) \rangle_{T_S} = X + \hat{x}(t) \quad (21)$$

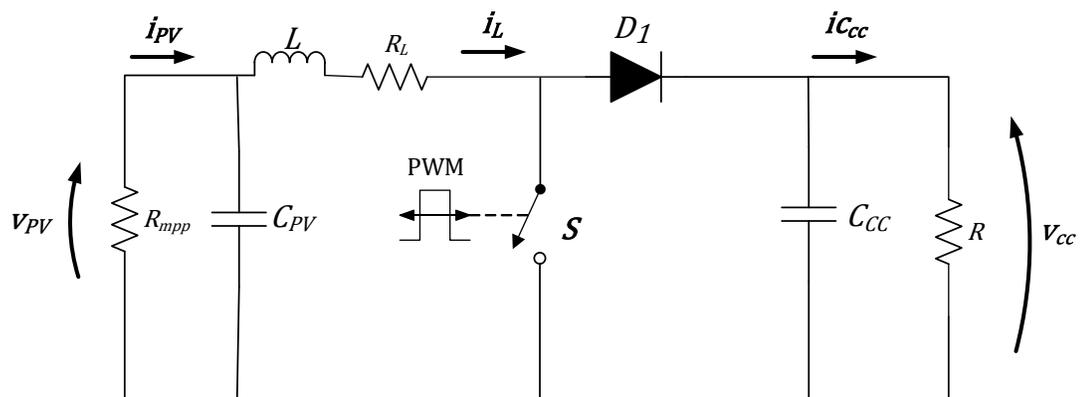
Lineariza-se as equações, considerando a derivada de um valor CC nulo, que parcelas puramente CC se anulam e desprezando as parcelas CA de segunda ordem são muito pequenas, resta para análise a influência das componentes CA de primeira ordem.

Por meio desta técnica de equações médias, a modelagem CA de pequenos sinais, depois da linearização, fornece a planta do conversor à ser controlado, para manter o dinamismo e estabilidade do sistema (SAMPAIO, 2010). Para o controle de ambos os conversores, elevador tipo *Boost* e *no* inversor FB, será controlado por dupla malha, uma de corrente interna e outra de tensão externa.

## 6.1 PLANTA DE CONTROLE DO CONVERSOR CC-CC BOOST

Considera-se a entrada, da topologia tipo *Boost*, como uma fonte de tensão constante, representando a tensão gerada pelo painel PV. Como deseja-se controlar o conversor em malha de corrente interna e outra de tensão externa, a perda referente a resistência interna do indutor ( $R_L$ ) é levada em consideração na modelagem.

O painel fotovoltaico físico, pode ser aproximado como uma resistência que fornece energia. Como a maior influência na entrada é proveniente da resistência interna do indutor ( $R_L$ ), será levado em consideração no circuito completo, conforme Figura 21



**Figura 21 – Esquemático de boost considerando a resistência no indutor e o painel PV como uma resistência fornecendo energia.**

Fonte: Autoria própria.

Como já mencionado no capítulo 5, o conversor elevador CC tipo *Boost*, apresenta duas etapas de funcionamento, com chave fechada ou aberta para um período de chaveamento ( $0 \leq t \leq T_s$ ),

A seguir serão apresentadas as principais equações de modelagem CC e de modelagem CA, de pequenos sinais, para modelagem da planta do conversor em estudo e posterior projeto de controlador proporcional e integrador (PI).

### 6.1.1 Obtenção das equações médias do conversor CC-CC *Boost*

A resistência  $R_{mpp}$  representa o painel fornecendo energia. Na primeira etapa de funcionamento com chave fechada ( $0 \leq t \leq d(t)T_s$ ), indutor está acumulando energia, diodo polarizado reversamente e capacitor fornecendo energia para carga, conforme Figura 21.

Obtém-se a Equação de corrente, tensão e corrente dos elementos passivos, respectivamente do capacitor de entrada ( $i_{C_{PV}}$ ), do indutor ( $v_L$ ) e do capacitor de saída ( $i_{C_{CC}}$ ), para primeira etapa de funcionamento, dado pelas Equações (22), (23) e (24).

$$i_{C_{PV}}(t) = C_{PV} \frac{dv_{PV}(t)}{dt} = \frac{v_{PV}(t)}{R_{mpp}} - i_L(t) \quad (22)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{PV}(t) - R_L i_L(t) \quad (23)$$

$$i_{C_{CC}}(t) = C_{CC} \frac{dv_{CC}(t)}{dt} = -\frac{v_{CC}(t)}{R} \quad (24)$$

Na primeira etapa de funcionamento com chave aberta ( $d(t)T_s \leq t \leq T_s$ ), indutor está fornecendo energia, diodo polarizado diretamente e capacitor acumulando energia.

Obtém-se a Equação de tensão e corrente dos elementos passivos, respectivamente do indutor e do capacitor de saída, para segunda etapa de funcionamento, dado pelas Equações (25) e (26). Corrente no capacitor de entrada se repete, portanto, pode ser expressa pela Equação (22).

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_{PV}(t) - R_L i_L(t) - v_{CC}(t) \quad (25)$$

$$i_{c_{cc}}(t) = C_{cc} \frac{dv_{cc}(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{v_{cc}(t)}{R} \quad (26)$$

Considera-se a razão cíclica durante a chave fechada como  $d(t)$  e durante a chave aberta como como razão cíclica complementar  $(1 - d(t))$  ou apenas  $d'(t)$ . Baseado na Equação (20) e (21), aplica-se a equação média para a corrente no capacitor de entrada ( $i_{c_{pv}}(t)$ ), tensão no indutor ( $v_L(t)$ ) e corrente no capacitor de saída ( $i_{c_{cc}}(t)$ ) para o período de chaveamento completo ( $T_s$ ).

$$\begin{aligned} \langle v_L(t) \rangle_{T_s} &= V_L + \hat{v}_L(t) \\ \langle i_L(t) \rangle_{T_s} &= I_L + \hat{i}_L(t) \\ \langle v_{pv}(t) \rangle_{T_s} &= V_{pv} + \hat{v}_{pv}(t) \\ \langle v_s(t) \rangle_{T_s} &= V_s + \hat{v}_s(t) \\ d(t) &= D + \hat{d}(t) \\ d'(t) &= (1 - d(t)) = (D' - \hat{d}(t)) \end{aligned} \quad (27)$$

A modelagem de pequenos sinais para o conversor *Boost* são definidas pelas equações (28) (29) e (30) já linearizadas, que apresentam apenas parcelas com influência das componentes CA de primeira ordem: considera-se nula a derivada de uma parcela CC, parcelas puramente CC se anulam e parcelas CA de segunda ordem são desprezíveis. Como a idealização do painel como uma fonte fornecedora de energia, deve-se considerar a tensão  $\hat{v}_{pv}(t)$  com sinal contrário ao da corrente  $\hat{i}_{pv}(t)$ .

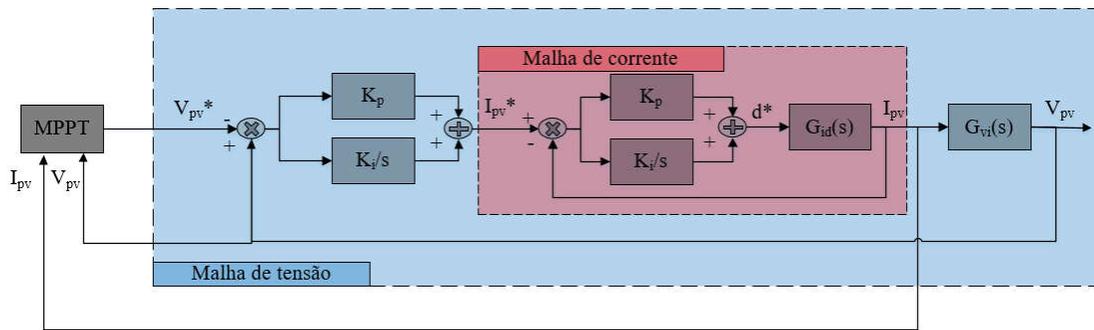
$$\langle i_{c_{pv}}(t) \rangle_{T_s} = C_{pv} \frac{d\hat{v}_{pv}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_{mpp}} \hat{v}_{pv}(t) - \hat{i}_L(t) \quad (28)$$

$$\langle v_L(t) \rangle_{T_s} = L \frac{d\hat{i}_L(t)}{dt} = \hat{v}_{pv}(t) - R_L \hat{i}_L(t) - D' \hat{v}_{cc}(t) \quad (29)$$

$$\langle i_{c_{cc}}(t) \rangle_{T_s} = C_{cc} \frac{d\hat{v}_s(t)}{dt} = D' \hat{i}_L(t) - I_L \hat{d}(t) + \frac{1}{R} \hat{v}_s(t) \quad (30)$$

### 6.1.2 Função transferência da malha de tensão e de corrente do conversor CC-CC Boost

A partir da modelagem de pequenos sinais através da técnica de equações médias, pode-se obter a função de transferência, em malha fechada, para projetar o controlador proporcional-integrativo (PI) de tensão e corrente, baseado nas plantas  $G_{vi}(s)$  (tensão – corrente) e  $G_{id}(s)$  (corrente – razão cíclica). No caso do controle tradicional e do distribuído, a referência de tensão é fornecida ( $V_{pv}^*$ ) através da técnica de MPPT. A corrente de referência ( $I_{pv}^*$ ), é a ação de controle após os PIs da malha de tensão, conforme Figura 22.



**Figura 22 - Controle da malha de tensão e corrente do Boost.**

Fonte: Autoria Própria.

Considera-se, no equacionamento da planta, parcela positiva, para projeto dos controladores da malha de tensão. Desta forma, na malha de tensão, para avaliação do erro da parcela de referência e de realimentação é invertida, ou seja, respectivamente ganho unitário negativo e ganho unitário positivo.

Com relação ao projeto dos controladores, primeiro, considera-se a corrente no indutor igual a corrente de entrada ( $\hat{i}(t) = \hat{i}_L(t)$ ), aplica-se a transformada de Laplace da Equação (29), obtendo a Equação (31).

$$\hat{v}_L(s) = sL \hat{i}_L(s) = \hat{v}_{pV}(s) - \hat{i}_L(s)R_L + \hat{d}(s)V_S - \hat{v}_S(s)D' \quad (31)$$

Considerando equações da tensão no indutor e a corrente no capacitor de entrada, aplica-se a transformada de Laplace da Equação (28), obtendo e a Equação (32).

$$\hat{i}_{C_{PV}}(s) = sC_{PV}\hat{v}_{PV}(s) = \frac{-1}{R_{mpp}}\hat{v}_{PV}(s) - \hat{i}_L(s) \quad (32)$$

Realiza-se manipulação algébrica entre a Equação (31) e Equação (32) para obter a planta da malha de tensão  $G_{vi}(s)$ , conforme Equação (33).

A partir da equação da tensão no indutor, pode-se obter a planta da malha de corrente  $G_{id}(s)$ , conforme Equação (34).

$$G_{vi}(s) = \frac{\hat{v}_{PV}(s)}{\hat{i}_L(s)} = \frac{-R_{mpp}}{sC_{PV}R_{mpp} + 1} \quad (33)$$

$$G_{id}(s) = \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{V_s (sC_{PV}R_{mpp} + 1)}{s^2(C_{PV}LR_{mpp}) + s(C_{PV}LR_L R_{mpp}) + (R_L + R_{mpp})} \quad (34)$$

Existe também a possibilidade de trabalho na planta direta de malha única  $G_{vd}(s)$ , (tensão – razão cíclica). Realiza-se manipulação algébrica entre a Equação (31) e Equação (32) para obter a planta da malha de tensão conforme Equação (35).

$$G_{vd}(s) = \frac{\hat{v}_{PV}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{-V_s R_{mpp}}{s^2(C_{PV}LR_{mpp}) + s(C_{PV}LR_L R_{mpp} + L) + (R_{mpp} + R_L)} \quad (35)$$

## 7 CONTROLADORES PI

Sendo  $K_P$  e  $K_I$  são os ganhos proporcional e integral da malha que é desejado controle (corrente ou tensão) e  $K_{PWM}$  é o ganho do modulador PWM. Sendo o ganho do  $K_{PWM}$  a ser calculado como o inverso do pico do modulador  $P_{PWM}$  conforme Equação (36) apresentada para dente de serra.

$$K_{PWM} = \frac{1}{P_{PWM}} \quad (36)$$

A metodologia para o projeto dos controladores  $PI$ , muito bem estruturada para projeto de controladores, é apresentada em (ANGELICO et al., 2014). Para melhor entendimento, assim como no artigo, o projeto pode ser dividido em três passos.

1º passo – deve-se calcular o ângulo de fase a ser compensado  $\varphi_c$ , conforme Equação (37) para então obter de 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.

$$\varphi_c = MF_d - (\varphi_p|_{\omega_c} + 180^\circ) \quad (37)$$

2º Passo – Consiste na inclusão de um compensador de fase  $C(s)$ , como em (38) em série com o ganho da planta  $G_p$ , desta maneira ajustando o ângulo de fase do ganho compensado em malha aberta  $G_{MA_c}$ , baseado na margem de fase desejada  $MF_d$ .

$$C(s) = \frac{T_s + 1}{s} = \frac{\frac{-s}{tg(\varphi_c) * \omega_c} + 1}{s} \quad (38)$$

3º Passo – baseado na inclusão de um ganho compensatório  $K_c$  dado por (39) é incluído em série com o sistema compensado, de modo a fazer com que o módulo do sistema compensado em malha aberta  $G_{MA_c}$  na frequência  $\omega_c$  tenha um ganho de 0 dB.

$$K_c = \frac{1}{|G_{MA_c}| \omega_c} \quad (39)$$

Conforme algumas análises do projeto dos controladores, após as considerações do método acima proposto espera-se uma resposta em degrau unitário que possua um sobressinal de no máximo 20% e que possua nenhuma ou pequena variabilidade em regime permanente, ou seja, siga a referência.

Quanto maior a margem de fase desejada  $MF_d$  e menor a frequência de cruzamento  $\omega_c$  mais lento e menos oscilatório será o sistema. Vale ressaltar que em um sistema com malha externa de tensão e interna de corrente, a malha externa necessita ser mais lenta que a malha interna para que o controle possua resposta satisfatória.

## 8 RESULTADOS

O modelo de painel fotovoltaico simulado, é o mesmo utilizado no Laboratório de Eletrônica de Potência, Qualidade de Energia e Energias Renováveis (LEPQER). Os parâmetros do painel PV da *SolarWorld Sunmodule Plus SW 245* policristalino é apresentado conforme dados da Tabela 3, baseados nos dados do fabricante em STC (1000 W/m<sup>2</sup> e 25°C).

**Tabela 3 – Parâmetros do painel PV policristalino da SolarWorld Sunmodule Plus SW 245 .**

Parâmetros	Valores
$I_{SC}$	8,49 A
$V_{CA}$	37,5 V
$P_{máx}$	245 W
$V_{mpp}$	30,8 V
$I_{mpp}$	7,96 A

Fonte: Autoria Própria.

### 8.1 PROJETO DOS CONTROLADORES PI

Primeiramente é definido os dados de parametrização do conversor Boost utilizado nas simulações aprestam-se na Tabela 4.

**Tabela 4 - Parâmetros do sistema PV.**

Parâmetros	Valores
Frequência nominal da rede	$f = 60\text{Hz}$
Frequência de chaveamento do conversor boost	$f_s = 20\text{kHz}$
Indutância e Resistência do conversor boost	$L = 1,34\text{mH}$ e $R_l = 0,2\Omega$
Ganho e razão cíclica em MPPT	$G=3,25$ e $d = 0,692$
Capacitor do barramento CC	$C_{cc} = 85\mu\text{F}$

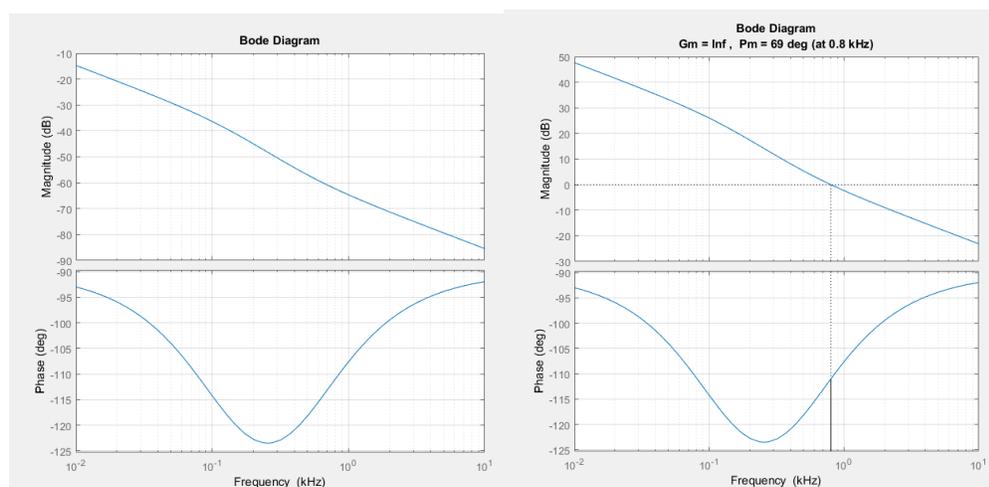
Fonte: Autoria Própria.

Os dados de parametrização nas simulações para os controladores PI para malhas de corrente e tensão do barramento CC, apresentam-se na Tabela 5.

**Tabela 5 – Parâmetros de projeto de controladores do Boost.**

Parâmetros	Valores
Frequência de cruzamento do controle PI (Corrente)	$\omega_{ci} = 3500 \text{ rad/s}$
Margem de ganho do controle PI (Corrente)	$PM_i = 69^\circ$
Ganhos do controlador PI (Corrente)	$KP_{i\text{boost}} = 0,2744 \Omega$ e $KI_{i\text{boost}} = 2,36 \times 10^{-3} \Omega/\text{s}$
Frequência de cruzamento do controle PI (Tensão)	$\omega_{cv} = 800 \text{ rad/s}$
Margem de ganho do controle PI (Tensão)	$PM_v = 85^\circ$
Ganhos do controlador PI (Tensão)	$KP_{v\text{boost}} = 0,4782 \Omega$ e $KI_{v\text{boost}} = 1,51 \times 10^{-3} \Omega/\text{s}$
Frequência de cruzamento do controle PI de (Tensão)	$\omega_{ci} = 3500 \text{ rad/s}$

Conforme definido na Tabela 5 é demonstrado os ganhos proporcional e integrativo para malha externa de tensão do conversor CC tipo Boost. As respostas em frequência para controladores da malha externa de tensão, podem ser verificados pela Figura 23.



**Figura 23 – Malha de tensão: diagrama de bode sem (esquerda) e com o compensador PI (direita).**

A resposta degrau da função transferência de malha fechada (FTMF) para malha de tensão é mostrada na Figura 24.

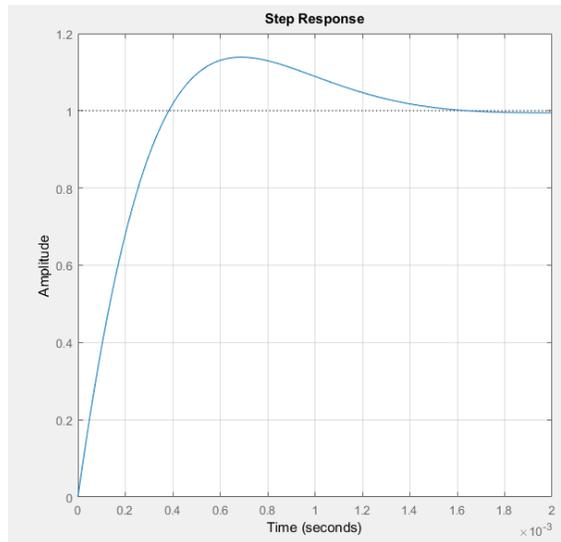


Figura 24 – Resposta ao degrau da FTMF de tensão do conversor *Boost*.

Conforme definido na Tabela 5 é demonstrado os ganhos proporcional e integrativo para malha interna de corrente do conversor CC tipo Boost. As respostas em frequência para controladores da malha de corrente, podem ser verificados pela Figura 25.

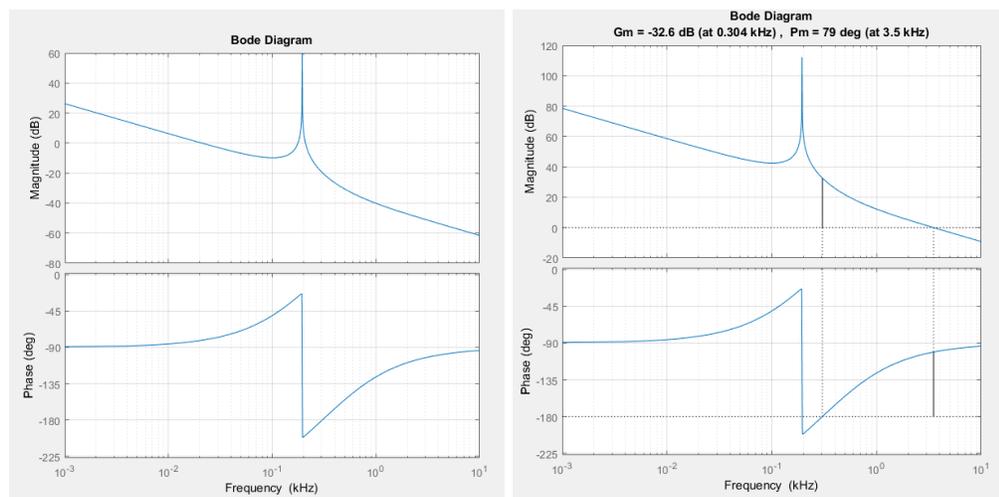
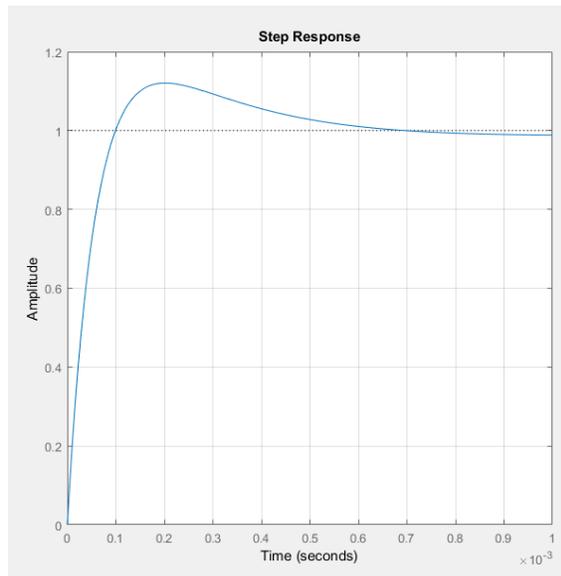


Figura 25 – Malha de corrente: diagrama de bode sem (esquerda) e com o compensador PI (direita).

A resposta degrau da função transferência de malha fechada (FTMF) para malha de corrente é mostrada na Figura 26.

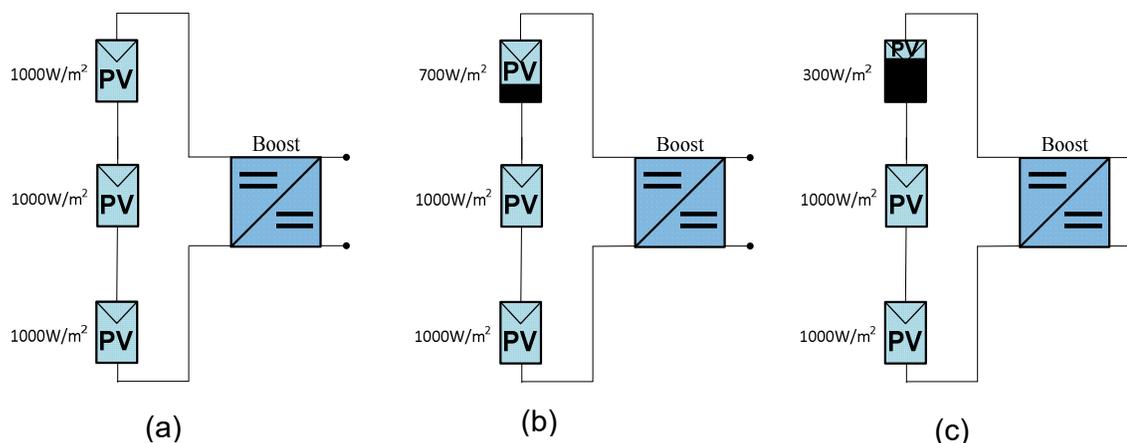


**Figura 26 – Resposta ao degrau da FTMF de corrente do conversor Boost.**

## 8.2 SISTEMAS PV EM ESTUDO

Para a realização dos testes, onde serão comparadas a técnica tradicional de MPPT P&O e duas técnicas de rastreamento de máxima potência derivadas do método tradicional, sendo elas o método MPPT distribuído chamado de SV-P&O e o modelo MPPT granular multivariável MV-P&O.

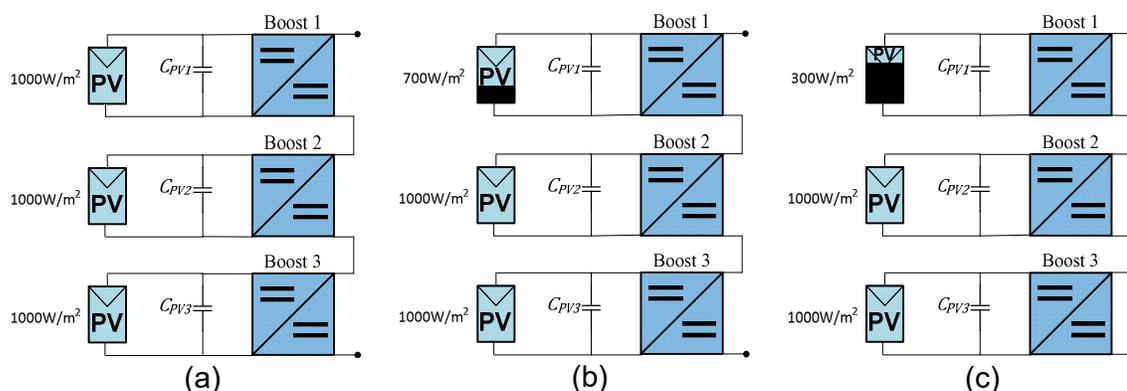
Em análise foi considerado a operação do sistema com radiação e temperatura em STC uniforme e com sombreamento parcial, como mostra a Figura 27, com relação a distribuição de irradiação para modelo tradicional, onde um único MPPT rastreando a máxima potência de 3 painéis PV em série.



**Figura 27 – Método de distribuição de radiação utilizado para controle distribuído (SV-P&O) e granular (MV-P&O): condição 1 em STC (a); condição 2 com apenas 1 PV sombreado em 30% (b); e condição 3 com apenas 1 PV sombreado 70% (c).**

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que para a Figura 28, apenas para a condição 1 não existe sombreamento parcial, ou seja, trabalha em STC. Existe sombreamento parcial para 1 dos 3 painéis PV em série, para condição 2 e 3, respectivamente, apenas 1 painel sombreado em 30%; apenas 1 painel sombreado 70%. Este arranjo multi-string atende ao controle distribuído e granular multivariável em estudo.



**Figura 28 – Método de distribuição de radiação utilizado para controle distribuído (SV-P&O) e granular (MV-P&O): condição 1 em STC (a); condição 2 com apenas 1 PV sombreado em 30% (b); e condição 3 com apenas 1 PV sombreado 70% (c).**

Fonte: Autoria própria.

A desvantagem do método tradicional P&O é a possibilidade de detectar o máximo local como referência de MPPT em casos com sombreamento parcial, desta

forma, pode-se não extrair a máxima potência. O mesmo não ocorre no controle distribuído e granular, pois o sombreamento não gera máximos locais, ou seja, dado as mesmas as condições de radiação e temperatura o efeito do sombreamento parcial é atenuado, conforme mostra panorama de potência para as 3 condições de irradiação da Figura 23.

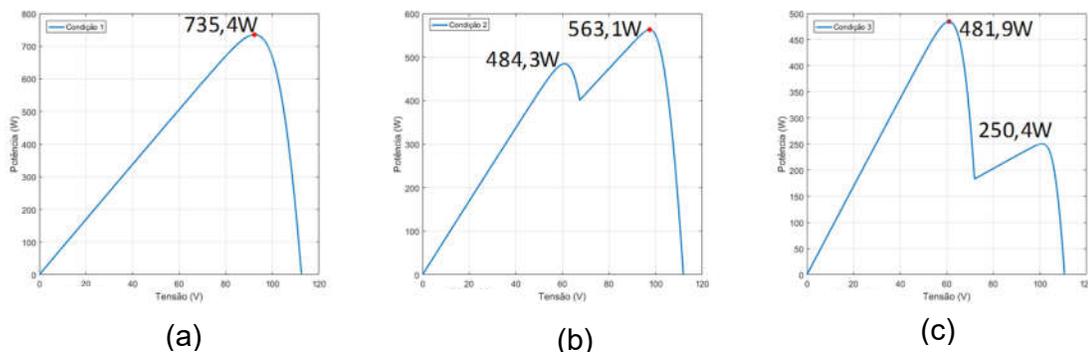
**Tabela 6 - Panorama de máximos globais de potência.**

	Máximo Global de Potência (W)		
	P&O tradicional	SV-P&O	MV-P&O
Condição 1	735	735	735
Condição 2	563	660	660
Condição 3	482	560	560

Fonte: Autoria própria.

### 8.3 RESULTADOS PARA MPPT TRADICIONAL P&O

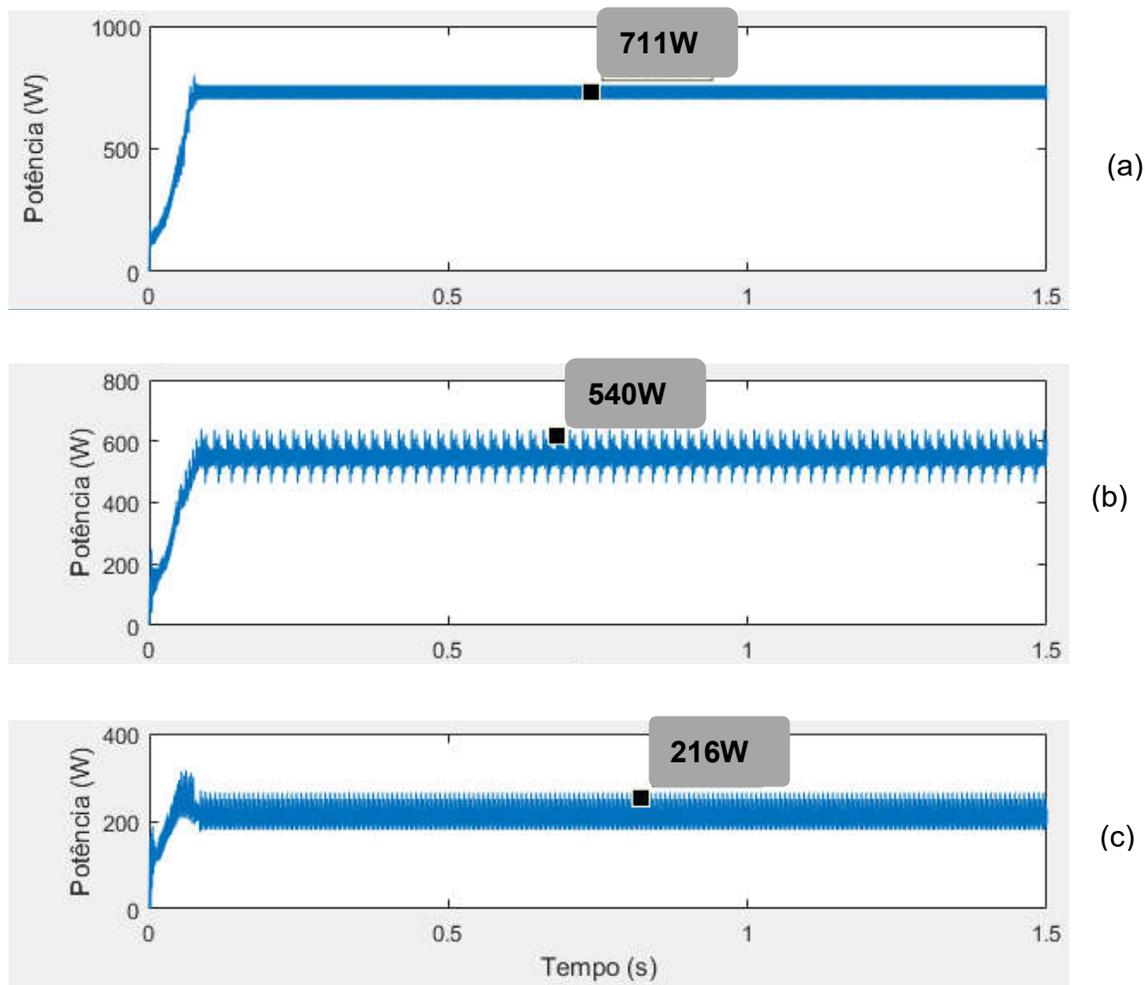
Para cada condição de radiação, existe um panorama de máxima potência, porém apenas para o método tradicional P&O, existe máximo local e máximo global, conforme expresso na Figura 29, sendo a bolinha marcada em cada situação o máximo global, cujo objetivo será o rastreamento da máxima potência utilizando os métodos citados anteriormente.



**Figura 29 – Panorama de potência para modelo tradicional com 3 painéis PV. Condição 1 ou STC (a); condição 2 com sombreamento parcial de 30% de um PV (b); e condição 3 com sombreamento parcial de 70% de um PV (c).**

Fonte: Autoria própria.

Os dados apresentados na Figura 30, são os valores médios do regime estacionário e são relacionadas com as condições de radiação da Figura 27/Figura 29.



**Figura 30 - Simulações para MPPT tradicional P&O: Condição 1 (a); Condição 2 e condição 3 (c). Fonte: Autoria própria.**

#### 8.4 RESULTADOS PARA MPPT DISTRIBUÍDO SV-P&O

Os dados apresentados na Figura 31 são os valores médios do regime estacionário e são relacionadas com as condições de irradiação da Figura 29.

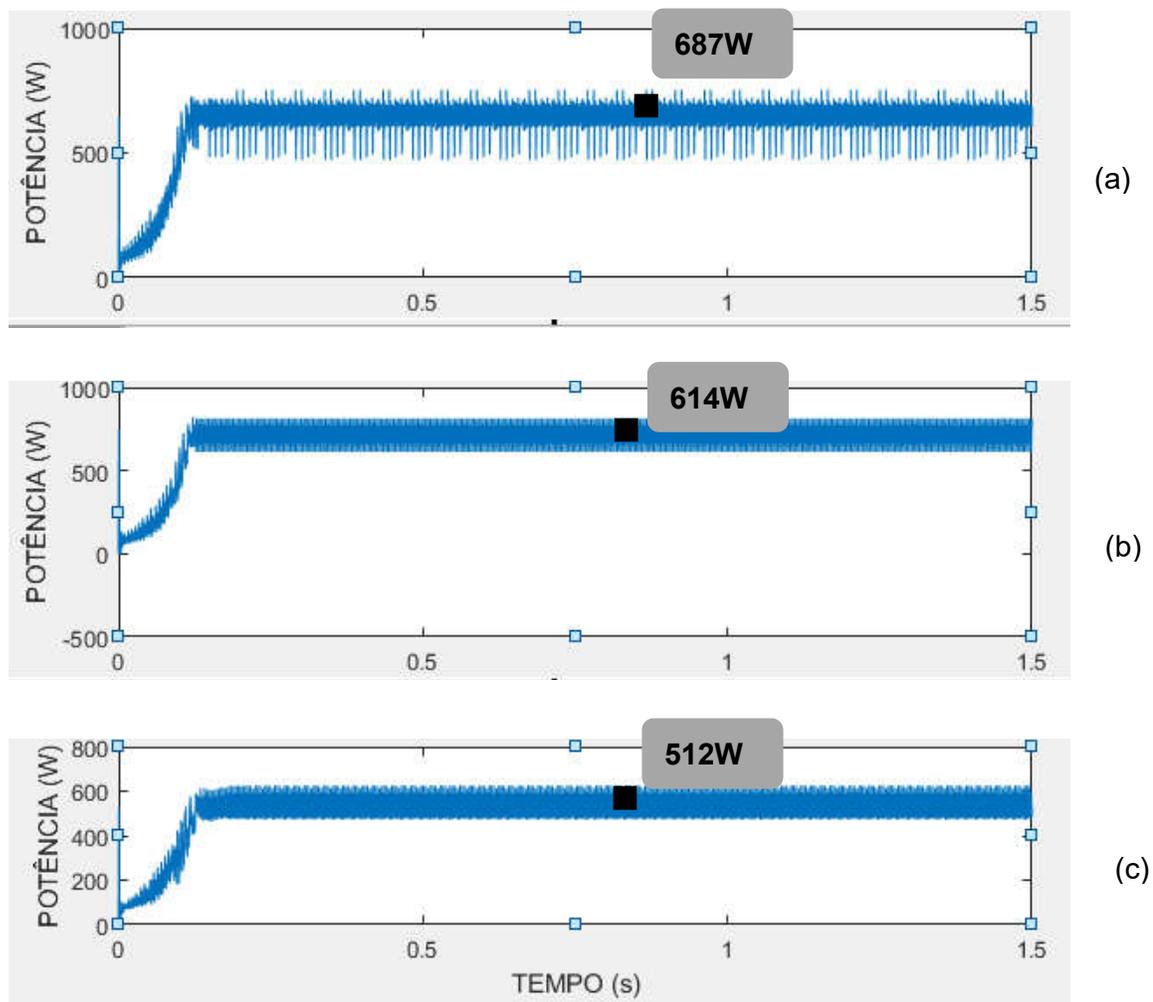


Figura 31 – Simulações para MPPT distribuído SV-P&O: Condição 1 (a); Condição 2 e condição 3 (c).

Fonte: Autoria própria.

## 8.5 RESULTADOS PARA MPPT GRANULAR MV-P&O

Os dados apresentados na Figura 31 são os valores médios do regime estacionário e são relacionadas com as condições de irradiação da Figura 29.

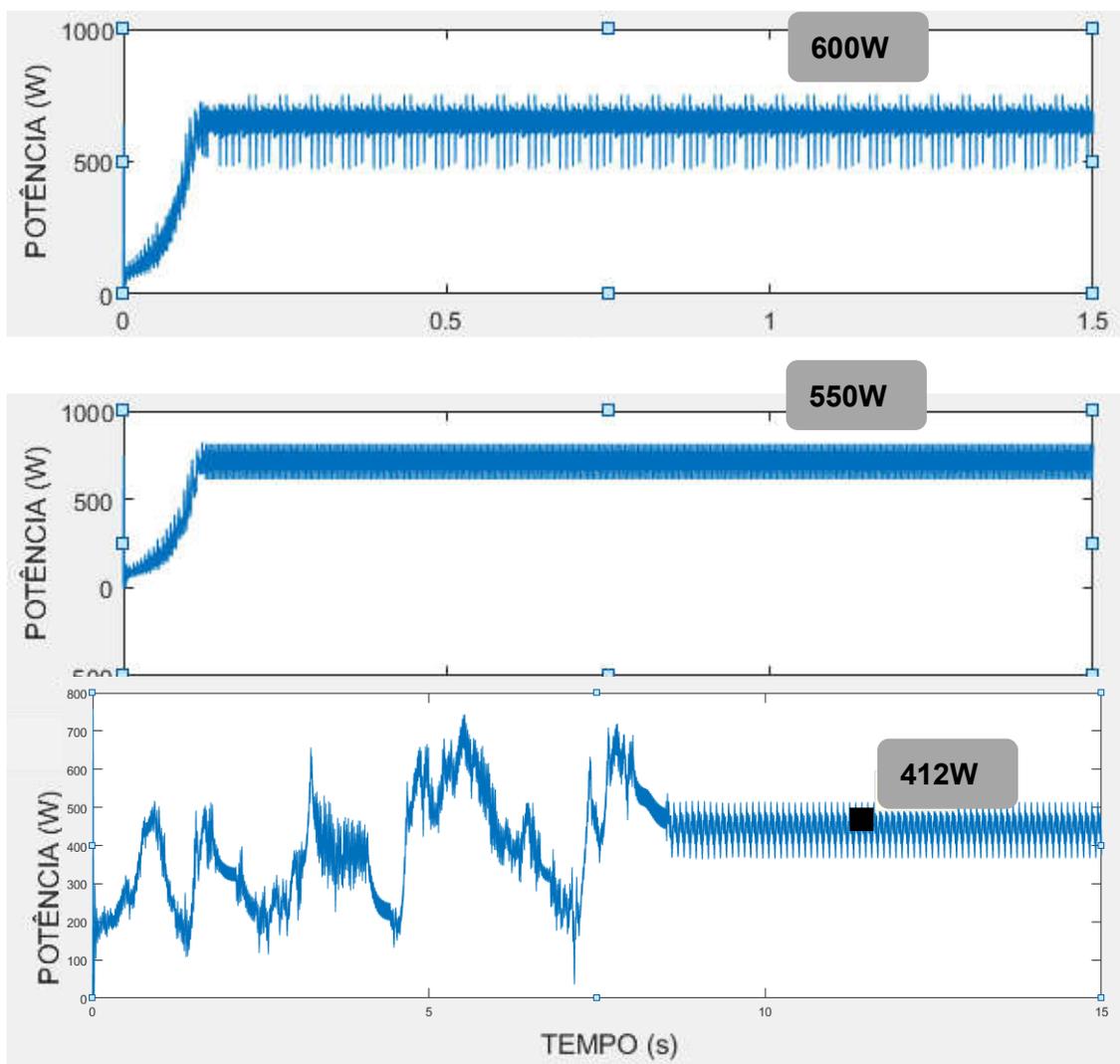


Figura 32 – a Simulações para MPPT granular MV-P&O: Condição 1 (a); Condição 2 e condição 3 (c).

Fonte: Autoria própria.

## 8.6 RASTREABILIDADE DE MÉTODOS MPPT

Os dados simulados foram destacados na Tabela 7 e Tabela 8 para facilitar análise de resultados, respectivamente para controle MPPT tradicional P&O e para controles variados do tradicional, o MPPT distribuído SV-P&O e o MPPT granular MV-P&O.

**Tabela 7 - Resultados simulados para tradicional P&O.**

	<b>Esperado</b>	<b>P&amp;O tradicional</b>
Condição 1	735	711
Condição 2	563	540
Condição 3	481	216

**Fonte: Autoria própria.**

Com base nos dados simulados foram alocados na Tabela 8 rastreabilidade dos método SV-P&O e o granular MV-P&O.

**Tabela 8 - Resultados simulados pra distribuído SV-P&O e granular MV-P&O.**

<b>Máximo Global de Potência (W)</b>			
	<b>Esperado</b>	<b>SV-P&amp;O</b>	<b>MV-P&amp;O</b>
Condição 1	735	687	600
Condição 2	660	614	550
Condição 3	560	512	412

**Fonte: Autoria própria.**

## 9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em análise ao método tradicional, pode-se observar que o MPPT tradicional P&O na condição 3, onde existe sombreamento de um painel PV em 70%, gera um máximo local de 250W, que foi rastreado pelo MPPT tradicional erroneamente (216W), pois a potência máxima disponível ou máxima global é em torno de 480W para a condição 3 de radiação solar. Outra consideração é que a medida que a medida que o nível de sombreamento aumenta a oscilação do P&O para uma mesma razão cíclica também aumenta, diminuindo o valor médio de rastreamento em regime estacionário.

Com relação ao método distribuído de simples variável SV-P&O já era esperado resultados melhores, comparado ao método tradicional, principalmente em condições de sombreamento parcial (condição 2 e 3). Entretanto é uma técnica que necessita de muitos sensores para controle, dois sensores por string.

Considerando o método granular multivariável, para parâmetros de projeto de saída do conversor *Boost* não foi vantajosa, possivelmente, porque o ganho de elevação do conversor CC é alto, em torno de 3,25 vezes o valor em da tensão de entrada em STC ( $V_{mpp}$ ), tornando o rastreamento muito oscilatório e pouco eficiente para grandes ganhos de tensão.

Portanto para os parâmetros de projeto do trabalho apresentado, o controle granular ainda não seria a melhor alternativa e sim o controle distribuído SV-P&O.

Sugere-se como trabalho futuro a adição do conversor CC-CA em cascata com a saída do sistema *multi-string*, operando em conexão com à rede elétrica, de forma a injetar toda a energia extraída do arranjo PV na rede elétrica na forma de corrente ativa. Adicionalmente, poderiam ser estudadas outras metodologias de controle granular multivariável de forma que este consiga drenar toda energia disponível do arranjo PV.

Parâmetros de projeto do conversor *Boost* com ganhos de elevação menores ou maior quantidade de *strings*, podem ser avaliadas com relação a rastreabilidade e custo / benefício, pois conforme aumenta-se a quantidade de *strings*, mantêm-se apenas um sensor de tensão e outro de corrente para analisar a variação de potência na saída do barramento CC.

## REFERÊNCIAS

ABINEE - Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.** 2012. Disponível em: < <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>>. Acesso em: 9 dez. 2016

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Relatório síntese 2016: ano base 2015.** 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/>>. Acesso em: 10 jun. 2015.

ANEEL. **Leilão de Energia de Reserva: Nº 09/2015.** Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais\\_geracao/documentos/Edital\\_2%C2%BA%20LER%20de%202015%20-%20publica%C3%A7%C3%A3o.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/Edital_2%C2%BA%20LER%20de%202015%20-%20publica%C3%A7%C3%A3o.pdf)> Acesso em: 25 out. 2015.

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. 26472659, 2014.

BEN – Balanço Energético Nacional. **Propostas para inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira.** 2012. Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2016\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2016_Web.pdf)>. Acesso em: 13 jan. 2017

BRASILED. **Painel Monocristalino Hilight 250W.** Disponível em: <<https://www.brasiled.com.br/Painel-SolarHilight-250W-Monocristalino/prod-2055826/>> Acesso em: 25 out. 2015.

BRITO, M. A. G.; GALOTTO JUNIOR, L.; SAMPAIO, L. P.; CANESIN, C. A. **Avaliação das Principais Técnicas para Obtenção de MPPT de Painéis Fotovoltaicos.** INDUSCON, 2010, 9th IEE/IAS Internacional Conference on Industry Application, 2010.

BRITO, M. A. G.; GALOTTO JUNIOR, L.; SAMPAIO, L. P.; CANESIN, C. A. N. **Evaluation of the main MPPT techniques for photovoltaic applications.** IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60, n. 3, p. 1156-1167, 2013.

CASARO; Márcio Mendes; MARTINS, Denizar Cruz. **Modelo de arranjo fotovoltaico destinado a análises em eletrônica de potência via simulação.** Eletrônica de Potência, vol. 13, no. 3, p. 141-146, Ago de 2008.

CRESESB. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Grupo de Trabalho de Energia Solar – GTES. Disponível em:

<[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)> Acesso: 05 jun. 2015.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **1º Leilão de Energia de Reserva 2015**. Disponível em:

<<http://www.epe.gov.br/leiloes/Paginas/1%C2%BA%20Leil%C3%A3o%20de%20Energia%20de%20Reserva%202015/1%C2%BALeil%C3%A3odeEnergiaDeReserva2015contrata1GWpdeenergiasolar.aspx>> Acesso: 25 out. 2015.

EPIA. **Global Market Outlook for Photovoltaics 2015-2018..** Disponível em:

<[http://helapco.gr/pdf/Global\\_Market\\_Outlook\\_2015\\_-2019\\_lr\\_v23.pdf](http://helapco.gr/pdf/Global_Market_Outlook_2015_-2019_lr_v23.pdf)>

Acesso: 19 set. 2015.

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

FEMIA, N.; LISI, G.; PETRONE, G.; Spagnuolo, G.; VITELLI, M.: “**Distributed Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic Arrays: novel approach and system analysis**”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 7, July 2008.

FEMIA, N.; LISI, G.; PETRONE, G.; Spagnuolo, G.; VITELLI, M.: “**A technique for improving P&O MPPT performances of double-stage grid-connected photovoltaic systems,**” IEEE Trans. Ind. Electron. , vol. 56, no. 11, pp. 4473-4482, Nov. 2009.

GEOPOWER. **Processo de Hierarquia Fotovoltaico**, Disponível em:

<[http://www.geopower.it/images/pagine/Aggiornamento\\_ottobre\\_09/FOTOVOLTAICO/elementi%20fv.jpg](http://www.geopower.it/images/pagine/Aggiornamento_ottobre_09/FOTOVOLTAICO/elementi%20fv.jpg)> Acesso: 30 set. 2015.

MINHA CASA SOLAR. **Painel policristalino 255W Canadian Solar**. Disponível em:

<<http://minhacasasolar.lojavirtualfc.com.br/prod,IDLoja,14743,IDProduto,4800190,painel-solar-fotovoltaico-painel-de-205w-a-260w-painel-solar-255w-canadian-solar---cs6p-255p>>

Acesso em: 25 out. 2015.

MIYATAKE, M.;VEERACHARY, M.;TORIUMI, F.; FUJII, N.; KO, H. **Maximum power point tracking of multiple photovoltaic arrays: a PSO approach**. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 47, n. 1, p. 367-380, 2011.

MOURA JUNIOR, Kleber José de. **Conexão de conversores CC-CC em série para redução do efeito de sombreamento em arranjos fotovoltaicos**. Trabalho de

conclusão de curso – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

OLIVEIRA, Fernando Marcos. **Rastreamento da Máxima Potência em Arranjos Fotovoltaicos sob Efeito de Sombreamento Parcial Baseado no Método de Otimização por Enxame de Partículas**. 2015. 98 f. Dissertação – Programa de PósGraduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2015.

OLIVEIRA, F. M.; SILVA, S. A. O.; DURAND, F. R.; SAMPAIO, L. P. **Maximum Power Point Tracking technique based on Particle Swarm Optimization method applied to a single-phase grid-tied photovoltaic system**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, ICREPQ, 2015, La Corunã, Spain, 2015, No. 13.

SILVA, S. A. O.; SAMPAIO, L. P.; OLIVEIRA, F. M.; DURAND, F. R. **Sistema Fotovoltaico Com Condicionamento Ativo De Energia Usando Mppt Baseado Em Pso E Malha Feed-forward De Controle De Tensão Do Barramento CC**, Eletrônica de Potência-SOBRAEP, vol. 21, no 2, pp. 105-116, Junho, 2016.

PETRONE, G.; RAMOS-PAJA, C. A.; SPAGNUOLO, G.; VITELLI, M. **Granular control of photovoltaic arrays by means of a multi-output mppt algorithm**. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 21, issue 5, p. 918-932, 2013.

SAMPAIO, L. P. **Uma Nova Metodologia de Projeto e Controle para o Inversor Boost (CSI) Monofásico, para o Aproveitamento de Fontes Alternativas e Renováveis de Energia Elétrica**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira: [s.n.], SP, 2010.

SAMPAIO, L. P. **Controle da injeção de potências ativa e reativa em inversor de Geração Distribuída conectado à rede de distribuição em corrente alternada em baixa tensão, empregando LMIs com realimentação de estados e critérios de D-estabilidade**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira: [s.n.], SP, 209 f. : il., 2013.

RASHID, M. H. **Power Electronics Handbook**. Butterworth-Heinemann, 3 ed., 2010.

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.; NOVOCHADLO, R.; MODESTO, R. A. **Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems**. Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE, 2008. 15-19 June 2008. p.4706-4711.

SILVA, S. A. O. da; CAMPANHOL, L. B. G.; BACON, V.D.; ANGÉLICO, B. A. **Stability analysis and performance evaluation of a Single-phase phase-locked loop algorithm using a non-autonomous adaptive filter**. Power Electronics (IET), p. 1-10, 2014.

VARJÃO, Tiago Moisés Cerqueira Pinto Bezerra. **Conversor CC/CC de elevado ganho para painel fotovoltaico**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Porto, Porto, 2013.

VIGLUS, Francisco J. **Projeto e desenvolvimento de um emulador de arranjo fotovoltaico utilizando um conversor CC-CC trifásico PWM**. 2015. 85 páginas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.