

## Estudo Dinâmico da Arquitetura de Otimizadores Solares de Potência Completa em Série Sujeitos a Limitações dos Conversores

Fernando Rafael Arnhold da Silva\* Valdemar Moreira Cavalcante Junior\* Tiago Alves Fernandes\*  
Márcio Evaristo da Cruz Brito\* Fabrício Bradaschia\*

\*Departamento de Engenharia Elétrica, UFPE, Recife, Brasil,  
E-mails: [fernando.arnhold@ufpe.br](mailto:fernando.arnhold@ufpe.br), [valdemar.moreira@ufpe.br](mailto:valdemar.moreira@ufpe.br), [tiago.alvesfernandes@ufpe.br](mailto:tiago.alvesfernandes@ufpe.br),  
[marcio.evaristo@ufpe.br](mailto:marcio.evaristo@ufpe.br), [fabricao.bradaschia@ufpe.br](mailto:fabricao.bradaschia@ufpe.br)

---

**Abstract:** With the severe shortage of electrical energy in the world and the rising demand, we will become more and more dependent on energy and pay more and more for it. Unfortunately, when available energies become expensive and scarce, they end up being used regardless of environmental needs and prices. However, it is necessary to invest in solutions that can provide cheaper energy with less impact on the environment, and one of the ways to do this is research in the area of photovoltaics, which makes the process of extracting energy from photovoltaic panels cheaper and more efficient. Faced with this path that solves the problem, it is important to study photovoltaic panel architectures to verify how they work, what their limitations are, and how they behave in the face of these limitations. One architecture that is becoming popular is the architecture of full power optimizers connected in series with the inverter. Thus, in this article this architecture will be studied with the objective of understanding its limitations and behavior. At the end, it will be possible to better understand how this architecture works and what its limitations are.

**Resumo:** Com a grave escassez de energia elétrica no mundo e a alta da demanda verifica-se que cada vez mais seremos mais dependentes energeticamente e pagaremos cada vez mais caro por ela. Infelizmente, quando as energias disponíveis se tornam caras e escassas, elas acabam sendo utilizadas independentemente das necessidades ambientais e dos preços. No entanto, é preciso investir em soluções que possam fornecer energia mais barata e com menor impacto ao meio ambiente, e um dos caminhos nesse sentido é a pesquisa na área de energia fotovoltaica, o que torna mais barato e eficiente o processo de extração de energia dos painéis fotovoltaicos. Diante desse caminho que soluciona a problemática, é importante estudar arquiteturas de painéis fotovoltaicos para verificar como elas funcionam, quais são suas limitações e qual seu comportamento mediante estas limitações. Uma arquitetura que está se popularizando é a arquitetura de otimizadores de potência completa ligados em série com o inversor. Assim, neste artigo será estudada essa arquitetura com o objetivo compreender suas limitações e comportamento. Ao final, pode-se entender melhor como esta arquitetura funciona e quais as suas limitações.

**Keywords:** Fotovoltaica; Architecture; Cascaded Full Power Optimizers; Modeling; Non-Linear System; Stability; Operation Limitations.

**Palavras-chaves:** Fotovoltaica; Arquitetura; Otimizadores de Potência Completa em série; Modelagem; Sistema não Linear; Estabilidade; Limitações de Operação.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Devido à alta e crescente demanda por energia elétrica em conjunto com uma baixa oferta causada por crises e problemas geopolíticos, os países estão, cada vez mais, dependentes da busca por novas fontes de energia. Outro grave problema existente são os efeitos do uso exagerado de energias que prejudicam o meio ambiente. Infelizmente, a buscas por novas fontes de energia não, necessariamente, são baratas e não são fontes que minimizam os impactos ambientais. Assim, torna-se necessário investir em soluções que possam ser

economicamente viáveis e, ao mesmo tempo tenham baixos impactos ambientais. Uma possível solução é a energia fotovoltaica. Entretanto, para que esta energia possa ser, cada vez mais, economicamente viável e com menores impactos ambientais mais pesquisas são necessárias nesta área.

Um assunto relevante é estudar as arquiteturas usadas na tentativa de otimizar, modelar e verificar seus comportamentos em diversas situações. Uma arquitetura que está sendo constantemente estudada é a de otimizadores solares de potência completa ligados em série. Em Fu (2019) é realizado

uma análise completa da estabilidade e modelagem desta arquitetura usando metodologias lineares e sem modelar comportamentos limitantes dos conversores. No artigo de Bratcu (2011) foi feito um estudo desta arquitetura para otimizar o rastreamento do ponto de máxima potência, mas não foi verificado a estabilidade deste ponto e nem realizado uma modelagem do sistema. No trabalho de Wang (2020) foi produzido uma modelagem dinâmica da arquitetura acoplada a uma rede de larga escala, mas este artigo não analisa os problemas de limitação de tensão e não aborda metodologias não lineares para ter uma verificação global da estabilidade. No artigo de Orduz (2013) foi realizado uma ampla análise da arquitetura com conversores CC/CC com perdas. Em Oi (2020), Sun (2017) e Gao (2018) foram elaborados diversas análises de topologias, otimização e comportamento de conversores com perdas, mas não abordaram a análise de estabilidade e não modelaram o sistema em situação de limitação. Sendo assim, diante das lacunas existentes na literatura, este trabalho tem como objetivo modelar o sistema de maneira simplificada, verificar os problemas que ocorrem no sistema quando acontecem limitações de potência, corrente ou tensão e verificar a estabilidade de forma não linear do sistema com essas adversidades.

Para realizar a análise de estabilidade do sistema será usado o teorema de Lyapunov, cuja explicação e definição foram brevemente expostas na seção 2. Em seguida, no início da seção 3, será apresentado uma breve introdução sobre a arquitetura do otimizador de potência completa em série, explicitação das simplificações executadas durante o trabalho e como será o arranjo da arquitetura usada para realização das simulações. Esta seção será dividido em 4 subseções em que a primeira realiza a análise do equilíbrio dinâmico dos capacitores do lado dos painéis, a segunda demonstra, usando o teorema Lyapunov, a estabilidade destes capacitores, a terceira realiza a análise do equilíbrio dinâmico dos capacitores do lado dos inversores e a quarta demonstra a estabilidade destes capacitores usando o teorema de Lyapunov.

## 2. ANALISE DE ESTABILIDADE PELO TEOREMA DE LYAPUNOV

Neste artigo será realizado uma análise da estabilidade das arquiteturas usando o Teorema de Lyapunov (Sasthy, 1999). O teorema de Lyapunov define que existe uma condição suficiente para definir se um determinado sistema dinâmico é localmente estável em um ponto. Segundo este teorema, sendo  $X$  os estados de um sistema em que um dos seus estados de equilíbrio seja na origem e seja  $D \subset R^n$ , um domínio contendo a origem, o ponto de equilíbrio é estável se existir uma função  $E(X)$ , contínua e diferenciável, tal que:

$$\begin{aligned} E(\text{origem}) &= 0 \\ E(X) &> 0 \text{ em } D - \{0\} \\ \dot{E}(x) &\leq 0 \text{ em } D \end{aligned} \quad (1)$$

Se  $\dot{E}(x) < 0$  em  $D - \{0\}$  então, o ponto de equilíbrio é assintoticamente estável.

A função  $E(x)$  que satisfaz estas condições tem o nome de candidata de Lyapunov. Este teorema será usado para demonstrar que a arquitetura é estável em algum determinado ponto de operação.

## 3. ANÁLISE DA ARQUITETURA DE OTIMIZADORES DE POTÊNCIA COMPLETA LIGADOS EM SÉRIE

Arquitetura de um conversor de potência completa com saída conectada em série com inversor é mostrada na Fig. 1.

Esta arquitetura tem conversores CC/CC que, geralmente, são conversores elevadores, mas podem ser conversores abaixadores e elevadores-abaixadores. A escolha deste tipo de conversor é dependente da quantidade de conversores ligados em série e da tensão necessária nos terminais do inversor (conversor CC/CA) dentre outras características. Em geral, a escolha de conversores elevadores é mais realizada porque o uso desta arquitetura está associado a projetos com baixa quantidade de módulos e com requisito de alta tensão nos terminais do inversor. Para realizar o estudo, a dinâmica do conversor foi simplificada como instantânea e a conservação de potência do conversor foi mantida. Essa simplificação é adequada visto que a maior parte dos conversores CC/CC, usados nesta arquitetura, tem uma dinâmica muito rápida e baixas perdas. Estes conversores apresentam indutâncias muito pequenas e controles que conseguem ter uma dinâmica mais rápida que dez vezes a dinâmica do controle de tensão (Callegaro 2016);(Elshaer 2010). Assim, é possível simplificar a análise do sistema desprezando as dinâmicas de corrente.

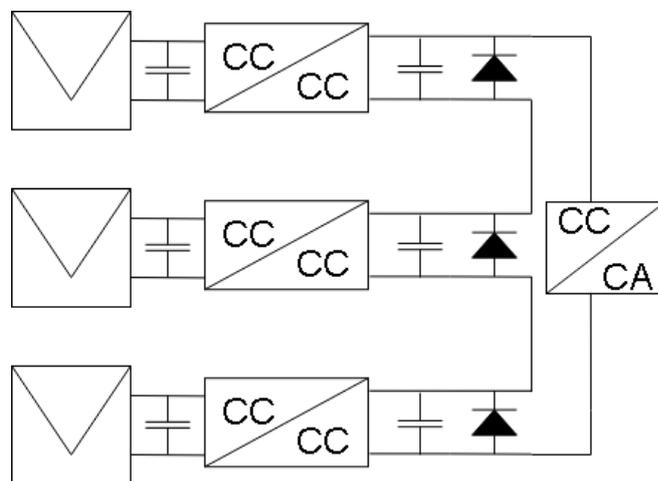


Fig. 1 Arquitetura de otimizadores de potência completa ligados em série.

Na Fig. 2 é possível verificar a arquitetura da Fig. 1 em que os conversores CC/CC foram simplificados por fontes de corrente e as correntes e tensões de cada um destes elementos foram destacados.

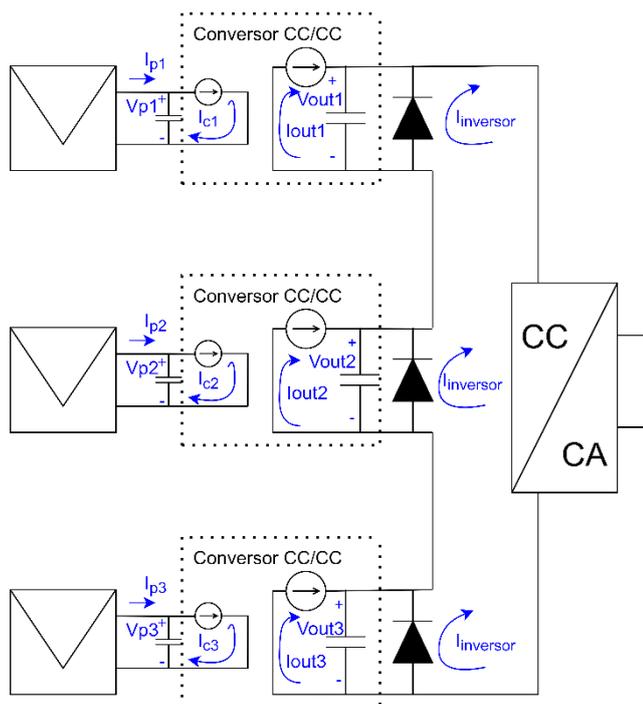


Fig. 2 Arquitetura simplificada de otimizadores de potência completa ligados em série.

Nessa arquitetura será suposto que os conversores podem ser simplificados como uma fonte de corrente controlada do lado do inversor. Em (2) é verificada as equações dinâmicas das tensões nos capacitores do lado do painel e nos capacitores do lado da saída do conversor.

$$\begin{aligned} C_{pi}\dot{v}_{pi} &= i_{pi} - i_{ci} \\ C_{outi}\dot{v}_{outi} &= i_{outi} - i_{inversor} \\ i_{outi} &= \frac{v_{pi}i_{ci}}{v_{outi}} \end{aligned} \quad (2)$$

Nesta equação temos, para o ramo  $i$ ,  $C_{pi}$  e  $C_{outi}$  as capacitâncias do capacitor no lado do painel e do lado do inversor,  $i_{pi}$  a corrente no painel,  $i_{ci}$  a corrente que entra no conversor CC/CC,  $i_{outi}$  a corrente na saída do conversor CC/CC e  $i_{inversor}$  a corrente drenada pelo inversor. Muitas análises serão executadas buscando verificar o comportamento do sistema na busca por pontos de equilíbrio. Chama-se ponto de equilíbrio um determinado ponto que torna nula a variação das grandezas na equação dinâmica. Este ponto de equilíbrio pode ser um ponto estável ou não. Verificar o comportamento destes diferentes tipos de ponto de equilíbrio será um dos objetivos deste trabalho. Pela escolha do autor, todas as simulações da arquitetura neste artigo serão executadas supondo uma arquitetura com 3 painéis fotovoltaicos com potência de 310W sujeitos a irradiâncias homogêneas de 1000W/m<sup>2</sup>, 600W/m<sup>2</sup> e 200W/m<sup>2</sup>, a temperatura de 25°C e com conversores CC/CC elevadores cuja limitação de potência é de 270W. Na Tabela 1, é demonstrado as características dos painéis fotovoltaicos usados na simulação nas condições padrões de teste (STC). Os valores dos capacitores usados são de 50uF e a simulação foi realizada no *MATLAB*.

Tabela 1. Características do painel fotovoltaico.

Propriedade	Valores
Nº de Diodos <i>Bypass</i>	3
Corrente de Curto-Circuito	9,08A
Tensão de Circuito Aberto	44,9V
Corrente no Ponto de Máxima Potência	8,52A
Tensão no Ponto de Máxima Potência	36,4V

Esta seção está dividida em 4 subseções. A primeira visa analisar o comportamento dinâmico dos capacitores do lado do painel em situações típicas e em situações com limitação de corrente e potência dos otimizadores. Na segunda, o objetivo é demonstrar a estabilidade dos pontos de máxima potência, usando o teorema de Lyapunov, e demonstrar quais destes pontos de equilíbrio é o mais adequado para operar. No terceiro, o objetivo é analisar o comportamento dinâmico dos capacitores do lado do inversor em situações típicas e em situações de limitação de tensão e potência dos inversores. No quarto, o objetivo é demonstrar, por meio do teorema de Lyapunov, a estabilidade do sistema para qualquer ponto de equilíbrio em um sistema sem limitação e com limitação de potência.

### 3.1 Análise do Comportamento Dinâmico dos Capacitores do Lado do Painel

Começando as análises do lado do painel, percebe-se que existem valores de corrente do painel e correntes do conversor que levam a tensão do capacitor a uma posição de equilíbrio. Primeiro, será demonstrado que para uma corrente constante do conversor e sem limitações de potência, existe uma convergência da tensão no capacitor para uma mesma condição de equilíbrio, independente do ponto de origem. Na Fig. 3 é mostrado dois distintos estados de tensão inicial convergindo para uma posição de equilíbrio em uma situação genérica representada pela primeira equação dinâmica em (1). O primeiro ponto é próximo da corrente máxima do painel e o segundo é um próximo da tensão máxima do painel.

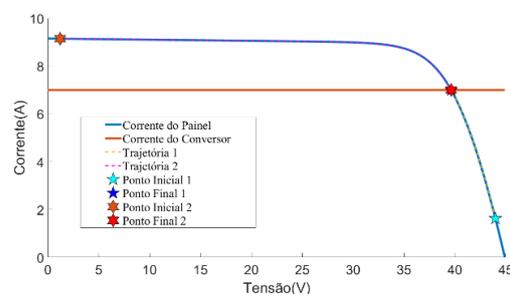


Fig. 3 Análise do comportamento dinâmico da arquitetura no lado do painel sem limitações do conversor através do comportamento da corrente.

Na Fig. 3 percebe-se que, independente do estado inicial, o sistema convergiu para uma mesma posição final, independente da condição de partida. Em contrapartida a este experimento, caso o conversor tenha limitação de potência, este equilíbrio não ocorre da mesma forma. A equação do capacitor do painel para uma solicitação de corrente constante com limitação de potência no conversor pode ser modelada pela equação (3).

$$C\dot{v} = i_p - i_c$$

$$i_c = \begin{cases} i_{max} & \text{Se } i_{ref} > i_{max} \text{ e } v \cdot i_{ref} < P_{max} \\ P_{max}/v & \text{Se } v \cdot i_{ref} > P_{max} \\ i_{ref} & \text{Se } i_{ref} < i_{max} \text{ e } v \cdot i_{ref} < P_{max} \end{cases} \quad (3)$$

Em (3)  $v$  é a tensão no capacitor,  $i_c$  é a corrente que entra no conversor CC/CC,  $i_p$  é a corrente no painel,  $i_{max}$  representa o limite máximo de corrente do conversor,  $i_{ref}$  é a corrente de referência do conversor e  $P_{max}$  é a potência máxima do conversor. A equação da corrente do conversor pode ser simplificada por  $i_c = \text{mínimo}(i_{cd}, i_{co}, P_{max}/v_p)$ . Assim, para um sistema operando com uma corrente de referência constante e perto da corrente de curto-circuito, demonstra-se através do Fig. 4 que para dois diferentes pontos de partida temos diferentes pontos de equilíbrio.

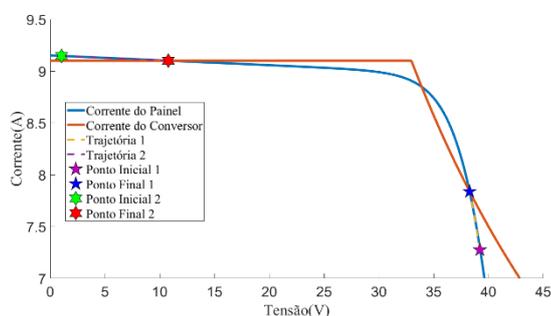


Fig. 4 Análise do comportamento dinâmico da arquitetura no lado do painel com limitações do conversor através do comportamento da corrente.

Na Fig.4 percebe-se que o primeiro ponto convergiu para um ponto de equilíbrio próximo ao ponto de curto-circuito e o segundo convergiu para um ponto em que a limitação de potência ocorre. O resultado desta simulação traz a problemática da existência de diferentes pontos estáveis para diferentes pontos iniciais. Para entender esse problema é necessário perceber que a corrente do conversor, apesar da referência ter sido constante, difere para diferentes pontos. Assim, para esta corrente de referência sujeita a uma restrição de potência e corrente, pode existir mais de um ponto de equilíbrio.

Outra situação hipotética, que é mais frequente de acontecer, é operar com uma corrente do conversor que estabiliza no ponto de máxima potência. Um exemplo de gráfico que representa a função da corrente fornecida pelo painel e a região das

possíveis correntes drenáveis pelos conversores é mostrado na Fig. 5.

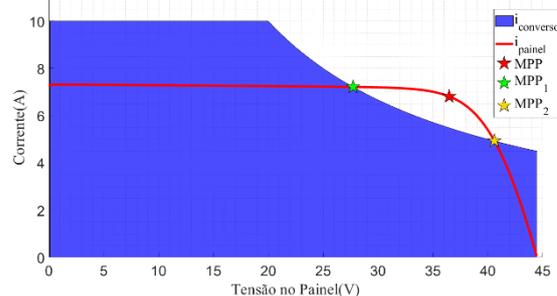


Fig. 5 Análise das limitações da arquitetura no lado do painel com limitações do conversor através do comportamento da corrente.

Na Fig. 5 é possível verificar a área em azul que representa os valores possíveis de corrente e tensão que podem ser submetidos nos terminais do conversor. Ou seja, qualquer ponto na curva da corrente de painel que estiver fora da região azul é um ponto que não existe uma possível corrente do conversor que permite equilibrar a tensão no capacitor do painel. Assim, percebe-se que  $MPP$  não pode ser alcançado e que  $MPP_1$  e  $MPP_2$  são pontos que oferecem a máxima potência extraível do conversor. Nas situações em que não ocorre a limitação de potência, existirá apenas um ponto de máxima potência.

Para os casos em que há limitação de potência, será analisado qual dos pontos de máxima potência é o mais adequado para operar com estabilidade. Com a finalidade de verificar qual destes é o mais adequado será simulada a arquitetura, como descrito anteriormente. A corrente drenada terá valor de referência igual à corrente máxima do conversor. Nesta análise, o sistema terá 2 pontos iniciais. Um ponto será perto do ponto de máxima corrente do painel e o outro perto da máxima tensão do painel. O resultado desta análise é mostrado na Fig. 6

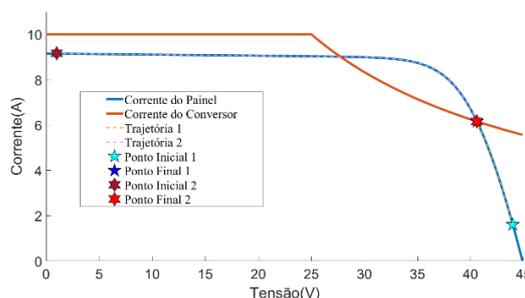


Fig. 6 Análise da estabilidade da arquitetura no lado do painel com limitações do conversor através do comportamento da corrente.

Com base na Fig. 7 percebe-se que ambos os pontos foram estabilizados em  $MPP_2$ . Não será demonstrado, mas para situações em que não há limitação de potência a convergência, ocorre de forma semelhante ao que ocorre com o ponto  $MPP_2$ . Outra possibilidade que pode acontecer é a presença de sombreamentos parciais no painel. Com a existência de sombreamentos parciais ocorre uma deformação na curva da

corrente do painel, mas que não afeta a análise dos pontos de máxima potência. Na Fig. 7 é possível verificar um gráfico, semelhante a Fig. 5, representado as limitações do conversor para um painel sujeito a sombreamentos parciais.

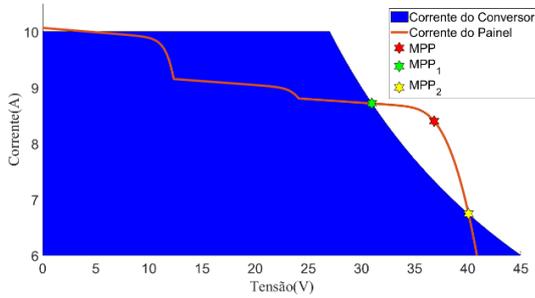


Fig. 7 Análise das limitações da arquitetura no lado do painel com sombreamento parcial e com limitações do conversor através do comportamento da corrente.

Pela Fig.7 é possível perceber que surgem os mesmos pontos  $MPP_1$  e  $MPP_2$  que são limitados pela limitação de potência do conversor e que preservam as mesmas características de estabilidade mostradas na Fig.6. Assim, para formalizar o resultado da estabilidade dos pontos de máxima potência que foram demonstrados nesta seção, será verificado a estabilidade destes pontos, segundo o teorema de Lyapunov.

### 3.2 Análise da Estabilidade nos Capacitores do Lado do Painel

Para a problemática dos pontos de equilíbrio mostrados na Fig. 5, será verificada a estabilidade, segundo Lyapunov, para esclarecer se os pontos são estáveis. A primeira etapa é transladar as funções para o ponto de análise por meio da transformação  $v = v_{eq} + \Delta v$  em que  $v_{eq}$  é a tensão no estado de análise e  $\Delta v$  é a variação de tensão em relação a este ponto. As equações, neste sistema transladado, são representadas pelas equações:

$$C\dot{\Delta v} = i_p(v_{eq} + \Delta v) - i_c(v_{eq} + \Delta v) \quad (4)$$

$$i_c(\Delta v) = \text{mínimo} \left( i_{max}, i_{ref}, \frac{P_{max}}{v_{eq} + \Delta v} \right)$$

A segunda etapa é obter uma equação que pode ser candidata de Lyapunov. Para este sistema é mostrado na equação abaixo uma candidata de Lyapunov com sua derivada.

$$E(\Delta v) = (\Delta v)^2 \quad (5)$$

$$\dot{E}(\Delta v) = 2\Delta v\dot{\Delta v}$$

Claramente, através de (5) percebe-se que  $E(0) = 0$  e que  $E(\Delta v) > 0$  para todo  $\Delta v \neq 0$  para ambos os pontos,  $MPP_1$  e  $MPP_2$ . Entretanto, visualizar a condição  $\dot{E}(\Delta v) < 0$  para todo  $\Delta v \neq 0$  solicita uma análise computacional. Para o caso do ponto  $MPP_1$  para uma corrente de referência com valor maior e uma igual ao valor do ponto  $MPP_1$  é demonstrado, através da Fig. 8, a derivada da equação candidata de Lyapunov para

as variações de tensão em relação ao ponto de equilíbrio  $MPP_1$ .

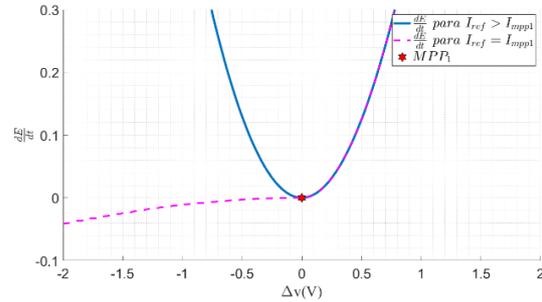


Fig. 8 Análise da estabilidade da arquitetura no lado do painel com limitações do conversor através da derivada da candidata de Lyapunov no ponto  $MPP_1$ .

Através da Fig. 8 percebe-se que o teorema não pode demonstrar a estabilidade no ponto  $MPP_1$  para nenhum dos casos, pois nas vizinhanças da origem as derivadas da equação candidata de Lyapunov não são menores que zero em todas as direções. Para o caso do ponto  $MPP_2$  para uma corrente de referência com valor maior e uma igual à corrente do ponto  $MPP_2$  é demonstrado, através da Fig. 9, a derivada da equação candidata de Lyapunov para as variações de tensão em relação ao ponto de equilíbrio.

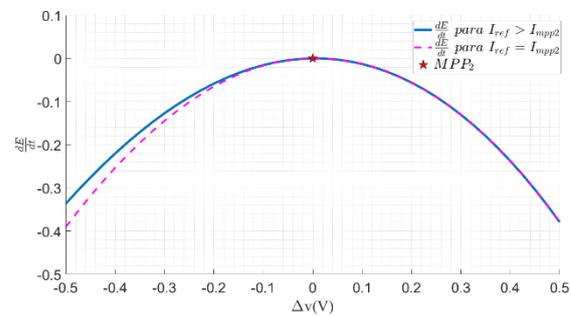


Fig. 9 Análise da estabilidade da arquitetura no lado do painel com limitações do conversor através da derivada da candidata de Lyapunov no ponto  $MPP_2$ .

Na Fig. 9 percebe-se que o sistema é estável no ponto  $MPP_2$  para ambos os casos de corrente, pois nas vizinhanças da origem as derivadas da função de Lyapunov são menores que zero em todas as direções. Por fim, foi verificado que para os casos de conversores que sofrem limitação de potência e de corrente o ponto de operação adequado é o  $MPP_2$ . Sabendo disso, o conversor deverá operar sempre maximizando a potência extraída do conversor e operando no ponto de máxima potência com estabilidade. Para o caso em que não há limitação de corrente e potência, os pontos  $MPP_1$  e  $MPP_2$  tornam-se em um mesmo ponto e a estabilidade deste ponto ocorre da exata maneira como é demonstrada para o ponto  $MPP_2$ .

Para finalizar, será apresentado um gráfico 3D na Fig. 10 demonstrando que para a situação da simulação predefinida, as

tensões do lado do painel são estáveis operando nos devidos pontos de máxima potência e com as devidas correntes de referência.

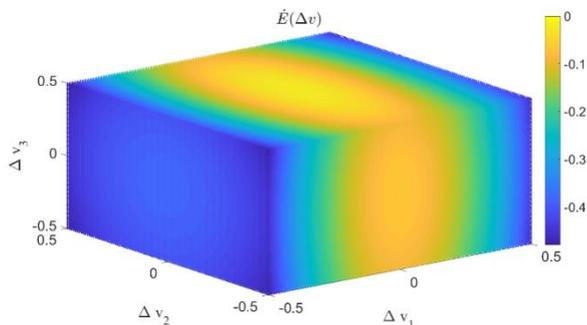


Fig. 10 Análise de estabilidade da arquitetura no lado do painel sujeita a limitações de potência do conversor no ponto de equilíbrio em um gráfico 3D.

Através do resultado mostrado na Fig. 9 é possível perceber, segundo o critério de Lyapunov, que o ponto de operação é estável, pois a derivada da função de Lyapunov é menor que zero em todos os pontos diferentes da origem.

### 3.3 Análise do Comportamento Dinâmico dos Capacitores do Lado do Inversor

Nesta análise será assumido a conservação de potência pelo conversor e que o sistema do lado do painel opera sempre no ponto da máxima potência estável. O gráfico da corrente de saída em função da variação de tensão na saída para diversos valores de irradiância e com temperatura constante é mostrado na Fig. 11. Devido a limitação do conversor elevador, não é possível manter o conversor operando no ponto de máxima potência quando a saída do conversor opera com tensões abaixo da tensão de MPP. Assim, quando a tensão de saída se torna menor que VMPP, o painel é obrigado a trabalhar fora do MPP e o conversor irá operar com a tensão de saída igual à tensão de entrada. Perceba que a única curva que teve sua potência limitada foi a que possui os painéis com irradiância de 1000W/m<sup>2</sup>. Nota-se que para curvas com limitação de potência, o ponto inicial de operação é a tensão do segundo ponto de máxima potência (o estável), demonstrado na seção anterior. A inexistência de pontos anteriores a ele deve-se a incapacidade do sistema de operar nestas regiões pela limitação de potência.

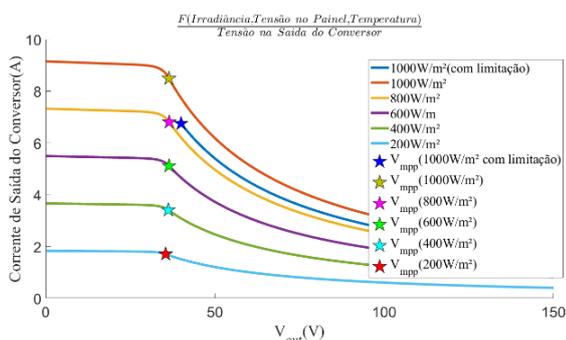


Fig. 11 Curva da corrente do conversor em função da tensão nos terminais de saída e da irradiância no painel.

Na Fig.11 pode-se verificar a variação da corrente da saída do conversor em função da tensão de saída. Com esta relação definida, pode-se reescrever a equação de cada um dos capacitores do lado do inversor, mostrada em (2), em que a corrente de saída do conversor é uma função da tensão de saída e da irradiância, temperatura e tensão no painel.

$$C_{outi}\dot{v}_{outi} = i_{outi}(v_{outi}) - i_{inversor} \quad (6)$$

Em (6)  $i_{outi}$  é a corrente de saída do conversor que, para a análise, será suposto que o painel está operando sempre no ponto de MPP com exceção das operações com tensão abaixo da tensão de máxima potência. Para o caso em que a tensão da saída do conversor chega a zero, devido à alta corrente do inversor, o diodo entra em condução fazendo com que qualquer corrente excedente do inversor acabe passando pelo diodo, ao invés do capacitor. Assim, a equação dinâmica do capacitor que considera a situação da tensão nula é mostrada em (7).

$$\begin{aligned} C_{outi}\dot{v}_{outi} &= i_{outi} - i_{inversor} + i_{diodo} \\ i_{diodo} &= \text{máximo}(i_{inversor} - i_{cci}, 0) \end{aligned} \quad (7)$$

Nesta equação  $i_{cci}$  é a corrente de curto-circuito do painel e  $i_{diodo}$  é a corrente que passa no diodo, apenas quando a tensão é zero e a corrente do inversor é maior que a corrente de curto-circuito. Assim, pode-se entender o comportamento da arquitetura para quaisquer parâmetros atribuídos no sistema. Para verificar o comportamento deste sistema, será realizado uma simulação, com a descrição citada anteriormente em que a corrente de saída é representada pelas curvas mostradas na Fig. 11, que as tensões iniciais nos capacitores do lado do inversor começam com um mesmo valor e que a corrente do inversor tem um valor constante. Na Fig. 12 verifica-se a trajetória das tensões sendo guiadas para os pontos de equilíbrio.

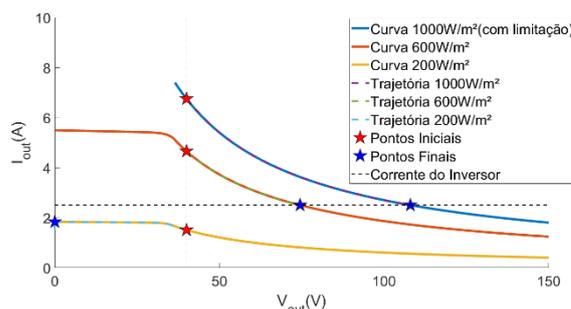


Fig. 12 Análise da estabilidade da arquitetura no lado do inversor através do comportamento da corrente.

Repare que nesta simulação o conversor com irradiância igual a 200W/m<sup>2</sup> foi desativado pela insuficiência de corrente e que todos os outros conversores ativos tiveram uma corrente de saída igual à corrente do inversor. Em resumo, os conversores que não tiverem pontos na sua curva com magnitude de corrente suficiente para equilibrar a corrente do inversor serão desativados e os remanescentes terão suas correntes com

magnitude igual à corrente do inversor. Uma observação relevante que pode ser realizada é verificar a tensão do barramento, soma das tensões dos conversores, e as tensões de saída dos conversores em função da corrente do inversor. Na Fig. 13 pode ser verificado essa curva.

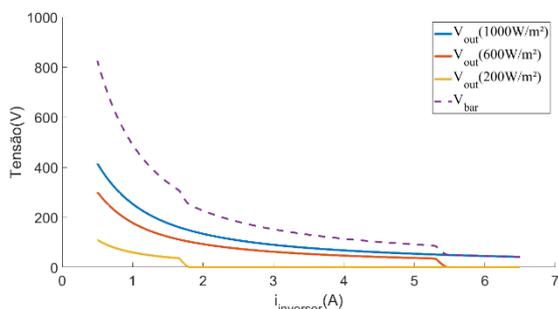


Fig. 13 Gráfico da tensão do barramento e das tensões de saídas dos conversores em função da corrente do inversor.

Por meio da Fig. 13 é possível verificar que para baixas correntes do inversor a tensão do barramento fica muito alta e para altas correntes do inversor a tensão do barramento fica baixa. Através desta figura é possível perceber que uma das maneiras de controlar a tensão do barramento é através da corrente do inversor. Na próxima seção será analisada a estabilidade dos pontos de equilíbrio dos capacitores no lado do inversor.

### 3.4 Análise da Estabilidade dos Capacitores no Lado do Inversor

Por meio do teorema de Lyapunov, será demonstrado que os pontos de equilíbrio dos capacitores, do lado do inversor, são pontos estáveis. Para verificar esta estabilidade deve-se primeiro obter as equações dinâmicas transladas no tempo, depois encontrar uma equação candidata de Lyapunov e verificar se esta satisfaz os requisitos em (1). Em (8) é demonstrado a equação dinâmica transladada e uma possível equação candidata de Lyapunov com sua derivada.

Em (8) temos  $\Delta v = (\Delta v_1, \Delta v_2, \Delta v_3)$ . Claramente, através de (8) é possível perceber que  $E(0,0,0) = 0$  e que  $E(\Delta v) > 0$  para todo  $\Delta v \neq (0,0,0)$ . Para verificar a condição de  $\dot{E}(\Delta v) \leq 0$  para todo  $\Delta v$  é usado uma análise gráfica mostrada na Fig. 13. Nesta análise gráfica é representado apenas um ponto de operação para um determinado valor de corrente do inversor.

$$\begin{aligned}
 C\dot{\Delta v}_i &= i_{outi}(\Delta v_i) - i_{inversor} + i_{diodo} \\
 E(\Delta v) &= \sum_{i=1}^3 (\Delta v_i)^2 \\
 \dot{E}(\Delta v) &= \sum_{i=1}^3 (2\Delta v_i \dot{\Delta v}_i)
 \end{aligned} \tag{8}$$

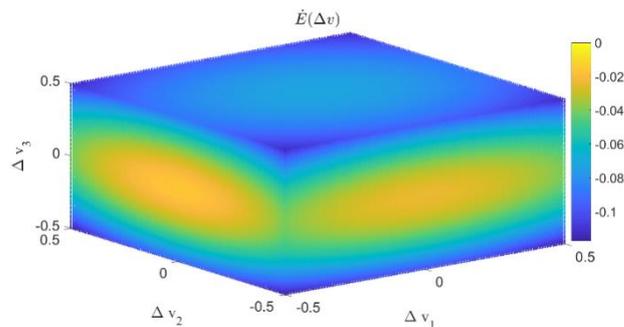


Fig. 14 Análise da estabilidade da arquitetura no lado do inversor através da derivada da candidata de Lyapunov no ponto de equilíbrio para cada um dos capacitores.

Com base na Fig. 14 é possível verificar que a derivada da candidata de Lyapunov tem seus valores sempre negativos para todo  $\Delta v \neq (0,0,0)$ . Assim, pode-se dizer que o ponto de equilíbrio é estável. Realizando esta análise para todos os valores de corrente do inversor, que promove novos pontos de equilíbrio, verifica-se que todos eles geram pontos estáveis, segundo Lyapunov.

Esta mesma análise poderia ser executada para um sistema com limitação de tensão do barramento do inversor e limitação de potência do inversor. Para o caso de limitação de potência, uma possível solução é realizar alguma rotina, que dependendo da potência da arquitetura, algum ou alguns dos painéis devem ter sua potência limitada, além da limitação existente. Este caso tem resultados análogos aos executados anteriormente com a diferença que as limitações de potências dos conversores podem ser criadas artificialmente via *software* para não gerar sobrecarga no inversor. Para o caso de limitação de tensão pode existir uma componente da equação que caso a soma das tensões seja maior que determinado valor uma corrente drenaria toda a corrente excedente. A equação dos estados deste sistema seria:

$$\begin{aligned}
 C\dot{v}_i &= i_{cci}(v_i) - i_{inv} + i_d - i_{lim} \\
 i_{lim}(v) &= \max\left(\left(\sum v - V_{lim}\right)K_g, 0\right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

Nesta equação  $i_{lim}$  é a corrente que aparece nos terminais do inversor para limitar a tensão do barramento,  $V_{lim}$  é a tensão máxima que o inversor pode suportar e  $K_g$  é uma constante com alto valor. O passo a passo para verificar a estabilidade da arquitetura com esta modificação é semelhante ao executado anteriormente em (8). Se forem seguidos os mesmos passos e equações apresentados em (8), todas as condições para estabilidade são intuitivamente percebidas, com exceção de verificar a derivada da equação candidata de Lyapunov de forma numérica. O resultado desta derivada numérica para um determinado ponto de equilíbrio é demonstrado na Fig. 15.

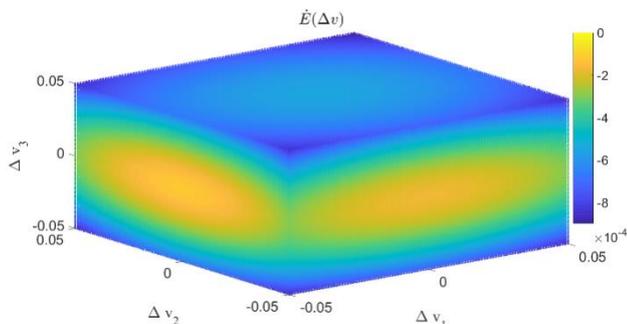


Fig. 15 Análise da estabilidade da arquitetura no lado do inversor sujeito a limitações de tensão através da derivada da candidata de Lyapunov no ponto de equilíbrio em um gráfico 3D.

Através deste gráfico 3D é possível perceber que todos os pontos da derivada da equação de Lyapunov são negativos, com exceção da origem que tem valor nulo. Assim, pode-se dizer que o ponto verificado é um ponto estável. Para verificar que o sistema é estável em todos os pontos de operações possíveis desta arquitetura, a corrente do inversor foi variada para todos os valores válidos de corrente. Todos esses pontos de operação geram gráficos semelhantes ao da Fig. 15 e por consequência, pode-se dizer que o sistema é estável em todos os pontos de operação.

#### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho conseguiu modelar e verificar o comportamento da arquitetura de otimizadores de potência completa em série com limitações. Com uma das análises foi possível verificar quais pontos de operação são mais adequados de serem utilizados quando a arquitetura opera com potência de conversor limitada, visto que nem todos os pontos de equilíbrio de máxima potência resultam em pontos estáveis. Outra análise relevante é perceber que o sistema é estável para todos os pontos de equilíbrio dos capacitores do lado do indutor mesmo com restrições de tensão e potência do inversor. Assim, pode-se dizer que este é um artigo importante para modelar de maneira simplificada a arquitetura e entender como ela se comporta na presença de adversidades. Desta forma, este trabalho pode ser muito importante no momento de projetar circuitos com otimizadores subdimensionados (mais baratos) e com inversores com limitações.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem o apoio oferecido pela FACEPE, CAPES e CNPQ que através do financiamento das bolsas de estudo, tornou possível a realização deste artigo.

#### REFERÊNCIAS

A. I. Bratcu, I. Munteanu, S. Bacha, D. Picault and B. Raison, "Cascaded DC-DC Converter Photovoltaic Systems: Power Optimization Issues," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 2, pp. 403-411, Feb. 2011

Gao, Q. et al. A direct current-voltage measurement method for smart photovoltaic modules with submodule level power optimizers. *Solar Energy*, v. 167, p. 52-60, jun. 2018.

J. Qi et al., "No Communication Control Strategy in Photovoltaic Series-Connected Power Optimizer System," 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2020

L. Callegaro, M. Ciobotaru, J. E. Fletcher, P. A. Rios and D. J. Pagano, "Design of cascaded control loop for solar power optimizer based on a buck-boost converter," 2016 IEEE 2nd Annual Southern Power Electronics Conference (SPEC), 2016, pp. 1-6, doi: 10.1109/SPEC.2016.7846136.

M. Elshaer, A. Mohamed and O. Mohammed, "Smart optimal control of DC-DC boost converter in PV systems," 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA), 2010, pp. 403-410, doi: 10.1109/TDC-LA.2010.5762913.

Orduz, Ricardo, et al. "Analytical study and evaluation results of power optimizers for distributed power conditioning in photovoltaic arrays." *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013.

Sastry S. (1999) Lyapunov Stability Theory. In: *Nonlinear Systems. Interdisciplinary Applied Mathematics*, vol 10. Springer, New York, NY, 1999.

Sun, T. T., S. Q. Shao, and J. L. Tang. "A Power Optimizer utilizing Nonlinear Adaptive Control for Distributed Photovoltaic Systems." 2017 2nd International Conference on Civil, Transportation and Environmental Engineering (ICCTE 2017). Atlantis Press, 2017.

Wang, Q. et al. Dynamic modeling and small signal stability analysis of distributed photovoltaic grid-connected system with large scale of panel level DC optimizers. *Applied Energy*, v. 259, p. 114132, fev. 2020.

Y. Fu, J. Qi, Y. Li, X. Zhang and M. Chen, "Analysis and Verification of the Stability for PV Series-Connected Power Optimizer System," 2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia), 2019.