

Input Filter Capacitance and Inductance Design for Photovoltaic Systems

D. Vidor, *Student Member, IEEE*, N. Rigo, *Student Member, IEEE*, and J. Pinheiro, *Member, IEEE*

Abstract—This work selects a procedure to use a photovoltaic panel model that use only the datasheet data. After a model selection, the revised equations are presented and used to estimate the power reduction when pulsed input current and continuous input current converters are connected to photovoltaic panels. The ripple produced by these converters reduces the extracted power from the panels even if a maximum power point tracking technique is used. The study shows that on pulsed input current converters the capacitance filter is needed. For these converters there is a significant power reduction, or the maximum power point tracking is unfeasible in some situations. For panels connected to continuous input current converters the work shows that the worst situation is to design the inductor filter on small solar irradiance. The connection of photovoltaic panel with inverters is review and the produced ripple is related with the power reduction of extracted power. The contributions of this paper are providing guidelines, equations and graphs in order to design input filters to ensure that the connected converter can achieve its best operation point and the best maximum power point tracking control for many conditions.

Index Terms—Filter for PV Converters, Photovoltaic cells, Photovoltaic effects, Power conversion, Solar Panels.

I. INTRODUÇÃO

UM sistema fotovoltaico, de forma simplificada, pode ser descrito por três partes: o painel fotovoltaico (PV), o conversor de potência e a carga. O painel fotovoltaico gera energia elétrica em forma de corrente contínua e sua curva característica corrente versus tensão ($I - V$) é apresentada na Fig. 1. A corrente e a tensão variam com a incidência da irradiação solar e a temperatura, onde a irradiação solar tem maior influência na corrente e a temperatura sobre a tensão gerada nos terminais de saída. O conversor de potência é frequentemente um conversor chaveado em corrente contínua ou um inversor [1-2]. Eles gerenciam a energia total disponível que flui do painel para a carga, sendo essas cargas geralmente equipamentos elétricos ou sistemas de armazenamento.

Dalton L. R. Vidor, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (e-mail: dvidor@cpovo.net).

Nataniel M. Rigo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (e-mail: natanielrigo@gmail.com).

José, R. Pinheiro, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil (e-mail:jrenes@gepoc.ufsm.br).

Esses conversores são controlados para extrair a máxima energia do painel, tanto em sistemas que são conectados à rede elétrica comercial quanto em sistemas que são conectados a baterias.

Um painel fotovoltaico é identificado pela sua potência de pico (W_p), no entanto, um conjunto de características devem ser observadas de acordo com a aplicação. A definição da potência de pico de um painel fotovoltaico é feita sob condições de teste padrão (STC – *Standard Test Conditions*), considerando a irradiação solar de teste padrão, ou seja, $1000 W/m^2$ sob uma distribuição espectral padrão para AM 1.5 (air mass) de massa de ar e temperatura da célula de $25^\circ C$.

A Fig. 1 apresenta uma curva do PV nessas condições. A influência da variação da irradiação solar na curva característica $I - V$ de uma célula fotovoltaica de silício cristalino é apresentada nos artigos [3-6], onde foi estudada e modelada. Nos trabalhos os pesquisadores afirmam que os modelos utilizados correspondem aos resultados experimentais [7]. Para o presente trabalho, o modelo de um diodo foi escolhido e revisado, pois os parâmetros são obtidos de forma simples e os resultados são muito próximos do painel fotovoltaico real.

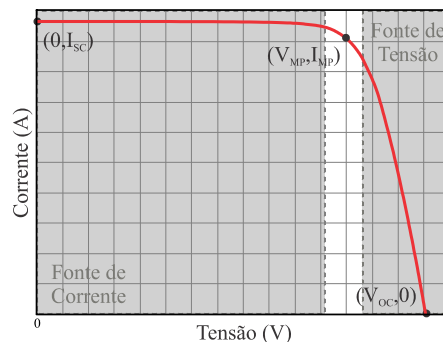


Fig. 1. Curva Característica I-V da Célula Fotovoltaica [7].

Os conversores de potência são utilizados para transformar a energia do painel fotovoltaico em uma energia apropriada a ser consumida por cargas. Como os painéis fotovoltaicos ainda possuem baixa eficiência, a energia extraída deve ser otimizada a fim de reduzir o tempo de retorno financeiro, além de contribuir para que fontes fósseis ou não renováveis sejam resguardadas [8]. Para atingir este objetivo, são utilizadas técnicas de controle de rastreamento do ponto de máxima potência, do inglês a sigla MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) [3-7] e [9-10].

No ponto de máxima potência (MPP - *Maximum Power Point*) as características de tensão, corrente e impedâncias

equivalentes do painel fotovoltaico variam significativamente, portanto modelos detalhados devem ser utilizados para que se estabeleça corretamente o fluxo de energia do painel para a carga.

A característica de entrada dos conversores usados frequentemente apresentam correntes pulsadas ou correntes contínuas com ondulação. A magnitude dessas correntes com ondulação ou pulsadas modificam o ponto de operação do sistema completo e, mesmo com um controle de MPPT, não se atinge a máxima potência o tempo todo. Nenhum trabalho foi encontrado na literatura que aborde o projeto de capacitância e indutância de entrada incluindo a redução na potência extraída do painel fotovoltaico.

Os principais objetivos deste trabalho são: (i) estudar um modelo que represente o painel; (ii) avaliar as curvas de potência; (iii) a influência dos conversores na potência extraída do painel; (iv) e fornecer diretrizes, equações e gráficos sobre como projetar os filtros de entrada para esses sistemas a fim de manter o MPPT.

II. MODELO DO PAINEL FOTOVOLTAICO

A. Modelo Fotovoltaico de um Diodo

Um dos modelos mais simples utilizados para caracterizar uma célula ou painel fotovoltaico é o modelo de diodo único [4] e [11]. A partir desse modelo a característica $I - V$ da célula fotovoltaica é expressa pela equação (1), e o circuito equivalente é apresentado na Fig. 2.

$$I = I_{pv} - I_0 \left[e^{\left(\frac{v \cdot q}{k \cdot a \cdot T} \right)} - 1 \right] = I_{pv} - I_d \quad (1)$$

Onde, I_{pv} é a foto corrente, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo, q é carga de elétrons [$1.60217646 \times 10^{-19}$ C], k é a constante de Boltzmann [$1.3806503 \times 10^{-23}$ J/K] e I_d é a corrente do diodo. Além desses parâmetros em (1), T é a temperatura de operação (em Kelvin) e a é a constante de idealidade do diodo.

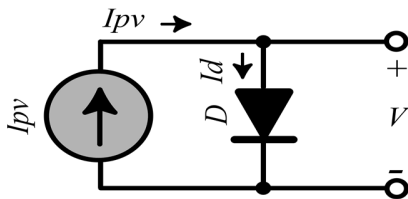


Fig. 2. Circuito equivalente simples de uma célula fotovoltaica [2].

B. Modelo do Arranjo Fotovoltaico

Na prática a característica $I - V$ de uma célula fotovoltaica não é usada com frequência como apresentada em (1). Nos arranjos fotovoltaicos ou painéis fotovoltaicos, várias células são conectadas em série ou em paralelo [7].

Na Fig. 3 é apresentado o circuito equivalente para um arranjo fotovoltaico. Esse arranjo requer que parâmetros adicionais sejam considerados na equação básica, conforme apresentado em (2).

$$I = I_{pv} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{a \cdot V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (2)$$

Onde $V_t = N_s \cdot k \cdot T / q$ é a tensão térmica do arranjo fotovoltaico, R_s e R_p são a resistência em série e resistência paralela equivalentes do arranjo, respectivamente.

Os fabricantes de painéis fotovoltaicos relatam nas folhas de dados as informações básicas como: corrente de curto-circuito, tensão de circuito aberto, potência de pico de saída, corrente e tensão no ponto de máxima potência e alguns coeficientes. Esses dados são fornecidos com referência à condição nominal de testes.

No entanto, esses dados fornecidos não são suficientes para caracterizar o modelo e para produzir as curvas características do modelo $I - V$ de um arranjo fotovoltaico [12]. A fim de que o modelo sintetize a curva do arranjo fotovoltaico, R_s e R_p devem ser encontrados e definidas a constante de idealidade e a energia do semicondutor.

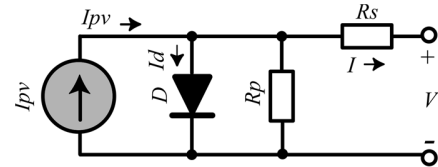


Fig. 3. Circuito equivalente de um arranjo fotovoltaico [7] e [14].

Os valores de R_s , R_p , a temperatura e a irradiação afetam a característica $I - V$ do arranjo fotovoltaico [13]. O efeito de R_s e R_p , depende da região na qual o arranjo está operando. A resistência equivalente R_s é mais efetiva na região de fonte de tensão, próximo a tensão de circuito aberto V_{OC} e R_p na região de fonte de corrente, próximo a corrente de curto-circuito I_{SC} . Observa-se que R_s depende da resistência de contato da base de metal com a camada semicondutora p e da resistência de contato da camada n com a grade de metal superior [6-7]. A resistência R_p existe devido à corrente de fuga da junção $p - n$.

O valor de R_p é alto, mas para simplificar o modelo essa resistência é negligenciada em alguns trabalhos [9] e [14]. O valor de R_s é muito baixo e, às vezes, essa resistência também é negligenciada [9].

As folhas de dados fornecem informações relacionadas à corrente de curto-circuito (I_{SC}) e, geralmente, é assumido que $I_{SC} \approx I_{pv}$, pois na prática o valor de R_s é baixo e o de R_p é alto. Essa aproximação produz erros menores do que 0,12% no modelo final. A foto corrente do arranjo fotovoltaico depende da irradiação e das variações de temperatura de acordo com (3) conforme apresentada nos trabalhos [15-18]:

$$I_{pv} = (I_{pvnom} + k_i \cdot \Delta T) \cdot \frac{G}{G_{nom}} \quad (3)$$

Onde I_{pvnom} é a foto corrente I_{pv} que foi aproximada por $I_{pvnom} = I_{SC}$ a 25°C e 1000 W/m^2 , $\Delta T = T - T_{nom}$ é a diferença entre a temperatura de operação e a temperatura nominal em Kelvin, G [W/m^2] é a irradiação de superfície e G_{nom} é a irradiação nominal.

A corrente de saturação reversa do diodo I_0 e a dependência da temperatura podem ser explícitas em (4), como em [17]:

$$I_0 = I_{0nom} \left(\frac{T_{nom}}{T} \right)^3 \cdot e^{\left[\frac{q \cdot E_g}{a \cdot k} \left(\frac{1}{T_{nom}} - \frac{1}{T} \right) \right]} \quad (4)$$

Onde E_g é o gap de energia do semiconductor e I_{0nom} é a corrente de saturação nominal, expressa por (5).

$$I_{0nom} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{V_{ocnom}}{a \cdot V_{tnom}} \right) - 1}} \quad (5)$$

Na equação (5), V_{tnom} é o estresse térmico avaliado levando em conta as células conectadas em série N_s e a temperatura nominal T_{nom} . O valor da constante do diodo a pode ser escolhido arbitrariamente conforme discutido em [14]. Valores utilizados para a são encontrados em [17]. O modelo do arranjo fotovoltaico apresentado pode ser melhorado, conforme apresentado em [7], onde o objetivo é combinar os dados experimentais com a tensão de circuito aberto do modelo para uma ampla variação de temperatura. Incluindo os coeficientes de variação da corrente e tensão (K_I e K_V) com a variação da temperatura em (5) a equação (6) é obtida.

$$I_0 = \frac{I_{sc} + K_I \Delta T}{e^{\left(\frac{V_{ocnom} + K_V \Delta T}{a \cdot V_T} \right) - 1}} \quad (6)$$

A Fig. 4 mostra a curva $I - V$ do painel fotovoltaico escolhido e obtida a partir de dados do fabricante.

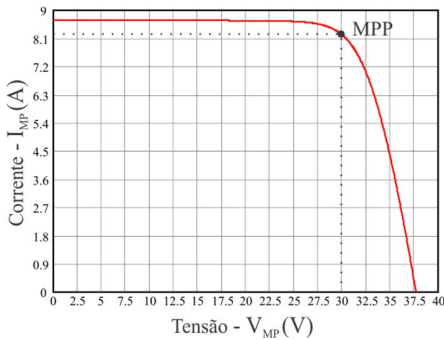


Fig. 4. Curva I-V do painel escolhido [7].

C. Modelo Melhorado

Na equação (2), os valores de R_s e R_p são desconhecidos e esses dois parâmetros são significativos para obter a curva $I - V$ que reproduza com melhor fidelidade o arranjo fotovoltaico. A referência [7] propõe um método para determinar esses valores e afirma que R_s e R_p devem ser ajustados simultaneamente a fim de melhorar a precisão do modelo, em especial no que se refere a curva potência-tensão ($P - V$) e no MPP.

O método escolhido neste trabalho assegura que $P_{MAXmodel} = P_{MAXreal} = V_{mp} \cdot I_{mp}$ no ponto de máxima

potência [7]. Fazendo $P_{MAXmodel} = P_{MAXreal}$, o relacionamento entre R_s e R_p é encontrado [15]. A equação do modelo $P_{MAXmodel}$ é apresentada em (7):

$$P_{MAXmodel} = V_{mp} \cdot \left\{ I_{pv} - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{V_{mp} + R_s \cdot I_{mp}}{a \cdot V_t} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{mp} + R_s \cdot I_{mp}}{R_p} \right\} \quad (7)$$

Em (7), isolando R_p , obtém-se (8).

$$R_p = \frac{V_{mp} \cdot (V_{mp} + R_s \cdot I_{mp})}{V_{mp} \cdot I_{mp} - V_{mp} \cdot I_0 \cdot e^{\left(\frac{V_{mp} + R_s \cdot I_{mp}}{a \cdot V_t} \right)} + V_{mp} \cdot I_0 - P_{MAXmodel}} \quad (8)$$

Um algoritmo matemático em foi realizado para encontrar os valores para R_s e R_p que produza a condição $P_{MAXmodel} = P_{MAXreal}$. O fluxograma do algoritmo é apresentado na Fig. 5.

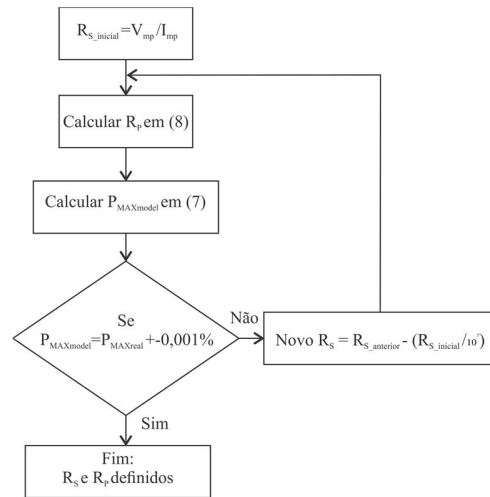


Fig. 5. Fluxograma do algoritmo.

O valor para a escolhido para este artigo é 1.0206 como encontrado em [14]. A curva $I - V$ obtida pelo modelo apresentado em (2) é similar ao encontrado nos testes do painel (PV). A tabela (1) mostra os parâmetros do modelo PV Bosch M2453BB.

TABELA I
PARÂMETROS DO PV BOSCH E DO PV AJUSTADO

Parâmetros	PV Bosch	PV Ajustado
I_{mp} (A)	8.2	8.2
V_{mp} (V)	30.1	30.1
$P_{max,e}$ (W)	245	245
I_{sc} (A)	8.7	8.7
V_{oc} (V)	37.7	37.7
K_V (V/K)	-0.32	-0.32
K_I (A/K)	0.032	0.032
N_s	60	60
T (°C)	25	25
G	1000	1000
a		1.0206
R_s (Ω)		0.345
R_p (Ω)		281.87

Os trabalhos [6], [7] e [14] confirmam que os dados experimentais, assim como os dados do modelo apresentado, coincidem, fidelizando o modelo adotado.

Utilizando o procedimento para encontrar R_s e R_p e ajustando o modelo com os dados reais, a curva de potência versus tensão é calculada e mostrada na Fig. 6.

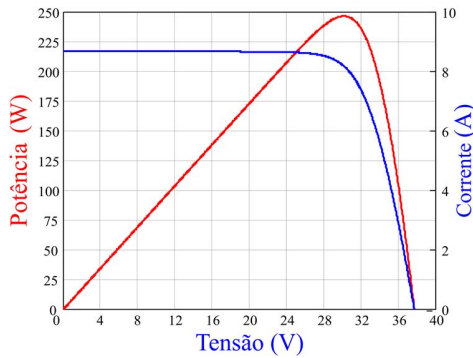


Fig. 6. Curva I-V e P-V para o modelo.

III. PROJETO E CÁLCULO DOS FILTROS

Para obter o máximo aproveitamento de energia gerada pelo painel solar são utilizados conversores de potência e são aplicadas técnicas de controle para rastrear o ponto de máxima potência (MPPT). A referência [9] apresenta uma comparação de diferentes técnicas a fim de obter o MPPT, mas este não é o objetivo principal deste artigo.

Dependendo do filtro projetado para a entrada do conversor ou do elemento utilizado como filtro de saída do painel a ondulação da tensão, ondulação da corrente ou ambas as ondulações não mantêm o sistema no ponto de máxima potência. Portanto, há uma redução na potência total extraída mesmo que o controle MPPT seja usado. Esta redução deve ser encontrada e modelada a fim de projetar corretamente os filtros.

Neste estudo, serão considerados conversores com características de corrente de entrada pulsada (Fig. 7), como conversores Buck, Buck-Boost e Zeta, e corrente de entrada contínua com ondulação (Fig. 8), como os conversores Boost, Cuk e Sepic. Outros conversores podem ser analisados enquadrando-os em uma dessas características de entrada.

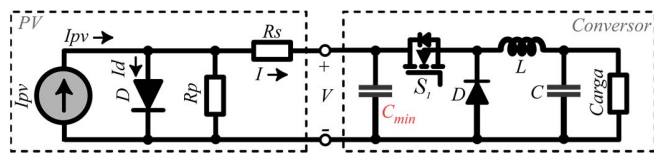


Fig. 7. Conversor com corrente de entrada pulsada - tipo Buck.

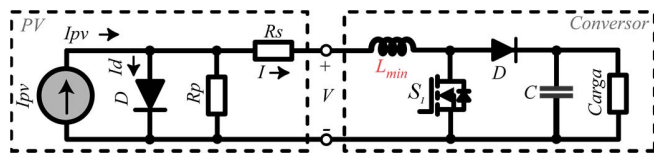


Fig. 8. Conversor com corrente de entrada contínua - tipo Boost.

A. Análise para Filtro Capacitivo

Conversores com corrente de entrada pulsada requerem uma capacitância de entrada para manter o sistema no ponto de

máxima potência. A potência média de entrada em função da ondulação de tensão de entrada é obtida pela equação (9).

$$P_{avg}(\Delta V_{in}) = \frac{1}{\Delta V_{in}} \int_{V_1}^{V_2} P_P(V) \cdot dV \tag{9}$$

Onde $P_P(V)$ é a potência fornecida pelo painel no ponto de operação em função da tensão. Portanto, a expressão obtém a potência média em função da variação de tensão sobre a curva modelada do painel.

Como o controle MPPT reage em uma frequência menor que a frequência de chaveamento, o ponto de máxima potência é obtido de maneira média e a ondulação produzida pelo chaveamento não é eliminada pelo controle.

Na Fig. 9 a redução da potência média de entrada é mostrada considerando uma ondulação da tensão de entrada, calculada por (9). O eixo Ondulação Tensão (%) é estabelecido com um percentual de V_{OC} . A ondulação na tensão é considerada simétrica em relação ao ponto de máxima potência, quando é possível manter o MPPT (região: MPPT).

Se a ondulação de tensão atingir a tensão de circuito aberto V_{OC} e ainda aumentar, o MPPT não funcionará corretamente. A partir deste ponto os valores usados em (9) são limitados a V_{OC} no valor superior V_2 e o ponto inferior V_1 é reduzido gradualmente até zero (região: No_MPPT). Nestas situações não há mais simetria da ondulação em relação ao MPP e o controle não produz a potência máxima exigida.

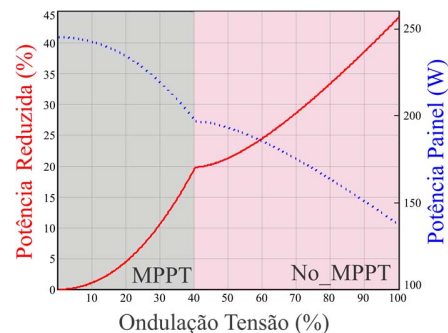


Fig. 9. Redução percentual da potência (%), Potência Painel (W) versus Ondulação de Tensão (V) com 1000 W/m² de irradiância.

A Fig. 9 foi realizada considerando-se 1000 W/m², 25 °C, adotando-se o painel selecionado e modelo apresentado. O ponto de operação mais exigente para filtros capacitivos é onde ocorre a irradiância máxima, pois isso produz correntes mais altas no painel fotovoltaico e no conversor a ele conectado. Neste, o conversor deve operar com a corrente máxima pulsada na entrada. A análise mostra que o controle MPPT é mantido até o ponto onde a Ondulação Tensão (%) é igual a 40 % de V_{OC} , mas quanto maior a variação de tensão maior a perda de potência, mesmo sem a perda de controle.

A fim de encontrar a equação para projetar a capacitância mínima nos sistemas que utilizem conversores de corrente pulsada de entrada (como conversores Buck, Buck-Boost e Zeta) são realizadas aproximações. Uma variação linear na ondulação de tensão e um valor constante na corrente são considerados. Assim, a capacitância mínima é obtida por (10).

$$C_{min} = \frac{I_{mp} \cdot D \cdot 100}{\text{Ondulação Tensão (\%)} \cdot V_{OC} \cdot f_{SW}} \quad (10)$$

Onde I_{mp} é a corrente no ponto de máxima potência, D é a razão cíclica, f_{SW} é a frequência de chaveamento do conversor e Ondulação Tensão (%) é a máxima ondulação de tensão obtida usando a Fig. 9 considerando o percentual de Potência Reduzida (%) tolerada.

Na Fig. 10, os resultados obtidos com esta análise, aplicado a um conversor Buck, são apresentados.

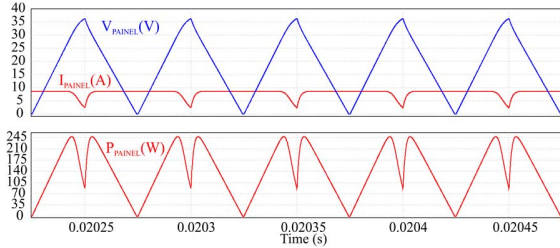


Fig. 10. Resultados de simulação do conversor Buck com $C_{min} = 5.4 \mu\text{F}$ e 1000 W/m^2 .

Os valores utilizados são: $C_{min} = 5.4 \mu\text{F}$, Ondulação Tensão (%) = 100, $f_{SW} = 20 \text{ kHz}$ e $D = 0.5$. Este projeto foi realizado para validar as simplificações usadas em (10). A ondulação de tensão atinge ambos os limites zero e V_{OC} , comprovando que as aproximações utilizadas não alteram de forma significativa os resultados. Nesta situação o conversor não atinge o MPPT e a perda é cerca de 45% da potência máxima.

Neste ponto de operação, a potência média de saída do painel fotovoltaico deve ser de 137.8 W obtida por (9). As simulações informam 137.7 W, mostrando que as aproximações realizadas a fim de obter (10) produzem valores muito próximos aos calculados.

Como sugestão, a Ondulação Tensão (%) deve ser menor que 20 % de V_{OC} para perder menos de 4,6% da potência máxima com irradiação solar máxima (ponto escolhido pelo ábaco da Fig. 9, dentro da região: MPPT).

Considerando irradiações menores, a corrente fornecida pelo painel é menor, portanto, a corrente de entrada pulsada é menor e a capacitância calculada produzirá menores ondulações.

Usando os dados sugeridos (redução menor que 4,6%), a equação (10) produz uma capacitância de entrada $C_{min} = 27.1 \mu\text{F}$. Este projeto é realizado considerando-se uma irradiação de 1000 W/m^2 e produz um resultado simulado de 237.4 W, o que representa uma redução de 3.1% na potência total fornecida pelo painel fotovoltaico. Na Fig. 11 os resultados obtidos em um conversor Buck com filtro de entrada com este valor de capacitância são mostrados.

Para avaliar um ponto de operação diferente, a irradiação foi reduzida para 100 W/m^2 . Isto produz 23.7 W que concorda com a energia máxima fornecida pelo painel neste ponto de operação. A Fig. 12 mostra a tensão e a corrente na saída do painel neste ponto de operação.

B. Análises para Filtro Indutivo

Para conversores com corrente de entrada contínua a indutância de entrada já está presente no conversor (Boost, Cuk

e Sepic). A potência média de entrada é calculada pela equação (11) em função da ondulação de corrente de entrada.

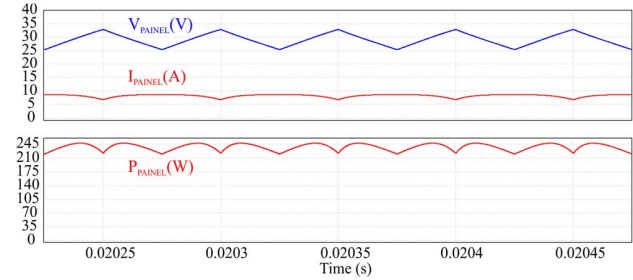


Fig. 11. Resultados de simulação do conversor Buck com $C_{min} = 27.1 \mu\text{F}$ e 1000 W/m^2 .

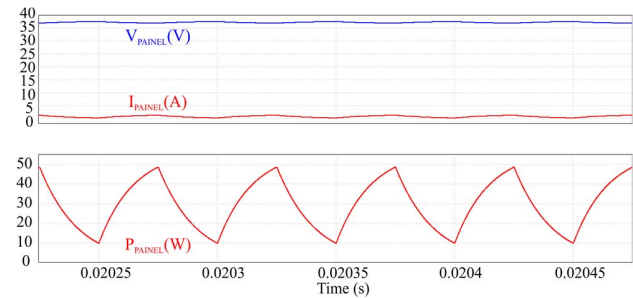


Fig. 12. Resultados de simulação do conversor Buck com $C_{min} = 27.1 \mu\text{F}$ e 100 W/m^2 .

$$P_{avg}(\Delta I_{in}) = \frac{1}{\Delta I_{in}} \int_{I_1}^{I_2} P_p(I) \cdot dI \quad (11)$$

Onde $P_p(I)$ é a potência fornecida pelo painel no ponto de operação em função da corrente. Portanto, a expressão obtém a potência média em função da variação de corrente sobre a curva modelada do painel.

Para filtros indutivos, a maior redução relativa na potência extraída do painel é encontrada na condição de radiação solar mínima onde o sistema deve operar. Neste ponto, a corrente do painel e a corrente I_{sc} são menores. As avaliações foram feitas com 10% da irradiação máxima do painel adotado, ou seja, 100 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$, e modelo exposto. A Ondulação Corrente (%), obtida como um percentual da corrente de curto-circuito para 100 W/m^2 (I_{sc10}), deve ser projetada para seguir o critério de redução da potência nesta situação. A análise mostra que o controle MPPT é mantido até o limite de Ondulação Corrente (%) igual a 39.2% da corrente I_{sc10} .

Na Fig. 13 a curva da redução da potência média de entrada em função da Ondulação Corrente (%) é apresentada. Os valores são obtidos por (11). O eixo Ondulação Corrente (%) é estabelecido com um percentual de I_{sc10} . A ondulação de corrente é considerada simétrica em relação ao ponto de máxima potência quando é possível manter o controle MPPT (região: MPPT).

Se a ondulação máxima de corrente atingir a corrente de curto-circuito I_{sc10} e ainda aumentar, o controle MPPT não funcionará corretamente (região: No_MPPT). Então os valores usados em (11) são limitados a I_{sc10} no valor superior I_2 e o ponto inferior I_1 é reduzido gradualmente até zero. Nestas situações não há mais simetria da ondulação em relação ao MPP

e o controle não produz a potência máxima exigida provocando uma redução mais acentuada na potência extraída do painel.

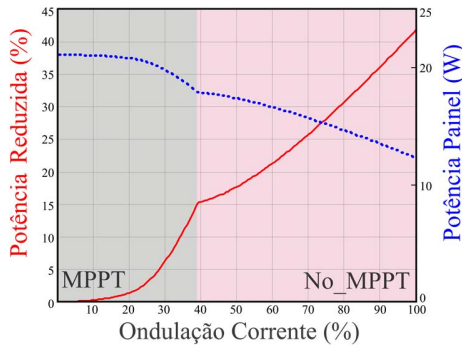


Fig. 13. Redução percentual da potência (%), Potência média Painel (W) versus Ondulação Corrente (V) com 100 W/m² de irradiação.

A fim de obter a equação para projetar a indutância mínima quando os conversores de corrente de entrada contínua (como conversores Boost, Cuk e Sepic) são utilizados realizam-se algumas aproximações. Consideram-se que a variação de corrente é linear e que a tensão do painel é constante. Assim, a equação da indutância mínima necessária é apresentada em (12).

$$L_{min} = \frac{V_{mp} \cdot D \cdot 100}{Ondulação\ Corrente\ (\%) \cdot I_{sc10} \cdot f_{sw}} \quad (12)$$

Onde V_{mp} é a tensão no ponto de máxima potência, D é a razão cíclica, f_{sw} é a frequência de chaveamento do conversor, I_{sc10} é a corrente de curto-circuito para 100 W/m² e Ondulação Corrente (%) é a máxima ondulação de corrente obtida usando a Fig.13, considerando o percentual de Potência Reduzida (%) tolerado.

Na Fig. 14, os resultados obtidos a partir de um projeto de um conversor Boost são mostrados. Os valores utilizados são: $L_{min} = 87 \mu H$, Ondulação Corrente (%) = 100, $f_{sw} = 20$ kHz, $D = 0.5$ e $I_{sc10} = I_{sc}/10$. Este projeto foi realizado a fim de validar as simplificações usadas em (12). A ondulação atual atinge ambos os limites zero e I_{sc} . Portanto, não mantém o MPPT e perde cerca de 45% da potência máxima.

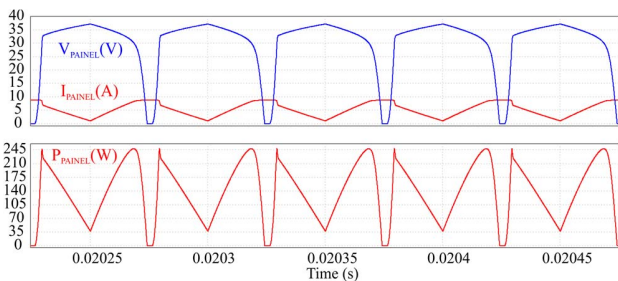


Fig. 14. Resultados de simulação do conversor Boost com $L_{min}=87 \mu H$ e 1000 W/m².

Neste ponto de operação, a potência média de saída do painel fotovoltaico deve ser de 137.8 W obtida por (11) e as simulações informam 139.5 W, mostrando concordância entre simulações, modelo e valores calculados.

A fim de obter um projeto com menor redução na potência

máxima e manter o controle MPPT, sugere-se que a Ondulação Corrente (%) deva ser menor do que 27.78 % de I_{sc10} para perder menos de 4.6% com 10% da irradiação solar máxima (ponto escolhido pelo ábaco da Fig. 13, dentro da região: MPPT).

Para valores maiores do que 10% de irradiação solar a corrente de saída do painel é maior no MPP, assim a indutância calculada produzirá menor ondulação em relação a corrente de curto-circuito deste ponto de operação, ou seja, a menor ondulação relativa fará com que o projeto, operando em irradiações maiores, apresente menor redução na potência obtida do painel.

Usando o projeto sugerido (redução aproximada de 4.6%), o cálculo produz uma indutância $L_{min} = 3.123$ mH. Este projeto considera uma irradiação de 100 W/m² e produz 23.2 W, o que representa uma redução de 5.3% na potência total fornecida pelo painel fotovoltaico. Na Fig. 15 são mostrados os resultados para um conversor Boost usando este valor de indutância.

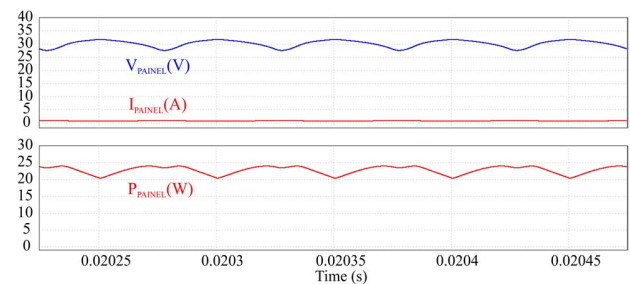


Fig. 15. Resultados de simulação do conversor Boost com $L_{min}=3.123$ mH e 100 W/m².

Para avaliar um ponto de operação diferente, a irradiação aumentada para 1000 W/m². Isto produz 244.1 W que concorda com a potência fornecida pelo painel no MPP (245W). Além disso, mostra que para valores maiores de irradiação a corrente do painel é maior e a ondulação relativa da corrente é menor, provocando um melhor aproveitamento da potência fornecida pelo painel. A Fig. 16 mostra a tensão e a corrente na saída do painel para esta nova situação.

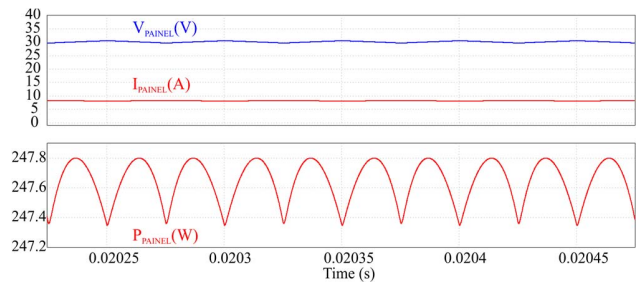


Fig. 16. Resultados de simulação para o conversor Boost com $L_{min} = 3.123$ mH e 1000 W/m².

As pequenas diferenças ocorrem porque as equações de capacitância e indutância mínima consideram aproximações conforme exposto anteriormente.

C. Análise Considerando Inversores como Carga

Frequentemente sistemas fotovoltaicos conectam inversores aos painéis a fim de atender as demandas da carga ou como

forma de armazenamento de energia, entregando a energia gerada à rede elétrica comercial. Nestas situações, uma corrente alternada de baixa frequência é exigida do painel e, similar ao exposto anteriormente para altas frequências, as variações de corrente e tensão devem ser minimizadas a fim de manter o sistema operando no ponto de máxima potência (MPP).

Os diagramas em blocos, apresentados na Fig. 17, mostram duas situações comuns destas implementações. Na estrutura “a” da Fig. 17, o inversor é conectado diretamente ao painel solar e na estrutura “b” um conversor intermediário é adicionado.

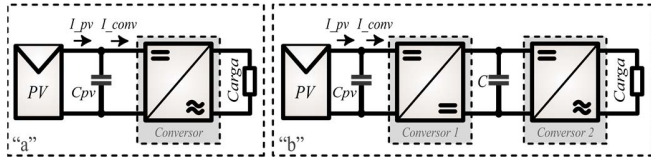


Fig. 17. Interligação de inversores a painéis fotovoltaicos [2].

A fim de minimizar o impacto da corrente de baixa frequência demandada pelos inversores, o capacitor de filtro C_{PV} , na estrutura “a”, deve ser adequadamente projetado. Já na estrutura “b” esta função pode ser atribuída ao capacitor C existente no barramento CC entre conversor intermediário e inversor. Neste caso, os valores atribuídos na equação (13) devem considerar as alterações na tensão, na variação de tensão e na corrente produzidas pelo conversor intermediário, mas mantida a potência máxima fornecida pelo painel.

A equação (13) pode ser utilizada para encontrar o valor da capacitância necessária, considerando a redução de potência tolerada.

$$C_{PV} = \frac{I_{mp} \cdot 100}{\text{Ondulação Tensão (\%)} \cdot V_{OC} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{Rede}} \quad (13)$$

As diferenças observadas entre as duas equações (10) e (13) são a substituição da razão cíclica D pelo fator $1/(2 \cdot \pi)$ e a troca da frequência de chaveamento pela frequência da rede. A razão para a alteração de frequência são as variações de tensão e a redução de potência em função da exigência de corrente que ocorrem nesta frequência. Já a substituição da razão cíclica por um fator é justificada pela alteração na forma de onda de corrente, anteriormente uma onda quadrada e, neste caso, uma senóide.

A forma de obter essa equação é considerar que o inversor exige uma corrente média igual a I_{mp} somada a uma senóide cujo valor de pico é I_{mp} . O painel fotovoltaico fornece a corrente média exigida pelo inversor e toda a corrente senoidal produz a variação de tensão no capacitor. A equação (13) é obtida observando que as variações de tensão e de corrente considerando valores pico-a-pico. Esse fator que duplica a corrente é cancelado pelo fator que duplica a frequência da rede. A equação então é obtida isolando-se a capacitância de uma reatância capacitiva que produz as relações entre tensão e corrente de pico-a-pico.

Portanto, a equação (10) pode ser utilizada para outros sinais com formas e frequências diferentes desde que se observem as diferenças entre estes sinais e a modelagem realizada onde foi

considerada uma onda quadrada.

A equação (14) é frequentemente encontrada em algumas referências [1-2]. Estas referências não apresentam a curva de redução na potência e o projetista deverá estabelecer, com base em outros critérios, a ondulação máxima de tensão permitida nos terminais do painel ou sistema fotovoltaico desconhecendo seu impacto na potência extraída. Além disso, a dedução desta equação apresenta vários coeficientes, envolvendo vários outros termos e aproximações por Série de Taylor truncada no segundo termo que mostra um caminho árduo para finalizar o trabalho.

$$C_{PV} = \frac{P_{mp}}{2 \cdot \Delta V \cdot \omega_{Rede} \cdot V_{mp}} \quad (14)$$

Observando-se as duas equações (13) e (14) percebe-se que os fatores são equivalentes, pois $P_{mp}/V_{mp} = I_{mp}$, $\omega_{Rede} = 2 \cdot \pi \cdot f_{Rede}$ e Ondulação Tensão (%) $\cdot V_{OC}/100 = 2 \cdot \Delta V$.

A recomendação Europeia de $14 \mu F/W$, conforme [1], produz no painel utilizado uma capacitância de valor $C_{PV}=3.4mF$ que, com base no presente estudo, produz uma Ondulação Tensão (%) = 20 e uma redução na potência máxima de 4.6 %.

Os referidos trabalhos também apontam como adequada uma redução menor do que 2% na potência extraída, portanto Ondulação Tensão (%) = 13.5 obtido a partir da Fig. 9. Assim, a equação (13) produz uma capacitância de entrada $C_{PV}= 5.1 mF$. Os resultados de simulação são apresentados na Fig. 18.

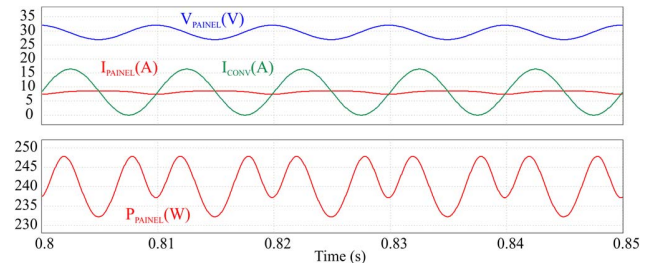


Fig. 18. Resultados de simulação com inversor ligado ao painel.

A partir dos resultados observa-se uma redução na potência fornecida pelo painel de 1.9%, confirmando a modelagem e equações apresentadas.

Para o cálculo do capacitor C da estrutura “b” apresentada na Fig.17, a equação (13) pode ser utilizada, considerando as mudanças de amplitude na tensão e na corrente neste ponto de conexão em relação aos valores de saída do painel fotovoltaico. O capacitor C_{PV} desta estrutura deverá ser calculado pela equação (10) apresentada anteriormente.

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho utiliza o modelo de um diodo e apresenta o método para a modelagem matemática de arranjos fotovoltaicos a fim de obter a curva $I-V$ e a curva $P-V$ usando as informações apresentadas na folha de dados dos fabricantes. A partir de uma curva similar àquela observada no arranjo real, é realizado um estudo sobre a redução da potência máxima causada pela ondulação na corrente e na tensão de entrada. Tal

ondulação causa redução de energia extraída do painel e pode levar à perda do MPPT. As equações e gráficos apresentados são utilizados para projetar filtros indutivos e capacitivos com base na redução de potência extraída do painel fotovoltaico, estabelecendo um critério técnico relevante para situações onde a meta é estabelecer a máxima extração de potência.

A redução de potência é evidenciada em gráficos que podem ser usados para o projeto da capacitância ou indutância de entrada de acordo com a característica do conversor. Alguns projetos foram realizados, apresentados e comparados com outras referências. Neles os resultados foram confrontados com os valores calculados, comprovando que as equações apresentadas são fidedignas.

No caso de conversores com corrente de entrada contínua é importante observar a redução de potência extraída dos painéis principalmente em irradiações mais baixas, onde ocorre redução mais expressiva. Para conversores com corrente de entrada pulsada, a capacitância é necessária não apenas pela redução da potência extraída, mas porque a ausência deste capacitor torna o controle de máxima potência MPPT inviável.

A dedução da equação da capacitância mínima necessária quando inversores são conectados ao sistema fotovoltaico foi realizada e confrontada com outros trabalhos.

A análise apresentada aqui pode ser usada para outros modelos ou tipos de painéis ou arranjos fotovoltaicos porque as formas das curvas $P - V$ e $I - V$ são similares e, com os ajustes apresentados, o modelo final reproduz fielmente o painel real.

Finalmente, para os autores, a melhor opção é combinar ambos os filtros, capacitância e indutância, para reduzir drasticamente as ondulações de corrente e tensão tanto com baixos quanto com altos níveis de irradiação solar.

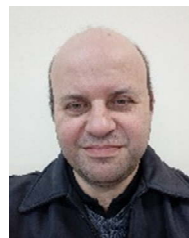
AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/PROEX) - Código Financeiro 001. Os autores agradecem as contribuições PPGEE-PROEX/CAPES (0594/2017) e o projeto INCT-GD e os órgãos de fomento (processo CNPq 465640/2014-1, processo CAPES n° 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17 / 2551- 0000517-1).

REFERÊNCIAS

- [1] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "Power inverter topologies for photovoltaic modules-a review," *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No.02CH37344)*, Pittsburgh, PA, USA, 2002, pp. 782-788 vol.2. doi: 10.1109/IAS.2002.1042648.
- [2] S. B. Kjaer, J. K. Pedersen and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1292-1306, Sept./Oct. 2005. doi: 10.1109/TIA.2005.853371.
- [3] R.A. Messenger, and J. Venter, *Photovoltaic Systems* [Engineering, 2ndEd., CRC Press, New York, 2004.
- [4] J. A. Gow and C. D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power-electronics simulation studies," in *IEEE Proceedings - Electric Power Applications*, vol. 146, no. 2, pp. 193-200, March 1999. DOI: 10.1049/ip-epa:19990116.
- [5] Y. Seo, J. Park and S. Choi, "A rapid I-V curve generation for PV model-based solar array simulators," *2016 IEEE Energy Conversion Congress*

- and Exposition (ECCE), Milwaukee, WI, 2016, pp. 1-5.
- [6] Rekioua and E.Matagne, "Optimization of Photovoltaic Power Systems," *Springer-Verlag London Limited*, London, 2012.
- [7] M. K. Dave, "Modeling of PV arrays based on datasheet," *2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES)*, Delhi, 2016, pp. 1-4.
- [8] J. M. Lenz, H. C. Sartori and J. R. Pinheiro, "Defining Photovoltaic Mission Profile for the Pre-Design of Static Converters," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 5, pp. 1402-1409, May 2018. doi: 10.1109/TLA.2018.8408434.
- [9] R. Faranda, S. Leva and V. Maugeri, "MPPT techniques for PV Systems: Energetic and cost comparison," *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, pp. 1-6, 2008.
- [10] R.F.Coelho, F.M. Concer, and D.C. Martins, "A simplified analysis of dc-dc converters applied as maximum power point tracker in photovoltaic systems," *2nd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*, pp.29-34, June 2010. DOI: 10.1109/PEDG.2010.5545753.
- [11] O. E. Ochoa Robles, J. A. Beristain Jimenez and J. Perez Ramirez, "Reactive Power Compensation in a Photovoltaic Grid Tie System, Using a Single-Phase Bidirectional High Frequency link Converter," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 4, pp. 1816-1821, April 2016. doi:10.1109/TLA.2016.7483520.
- [12] G. A. Rampinelli, M. A. d. A. Teyra, A. Krenzinger and C. W. M. Prieb, "Artificial Intelligence Technics Applied to Analysis of Photovoltaic Energy Systems," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 8, no. 5, pp. 512-518, Sept. 2010. doi: 10.1109/TLA.2010.5623503.
- [13] M. Santamaria, N. M. Correa, J. E. Moreno and Y. E. Moreno, "Proposal Design of an Open Source Automated System for Photovoltaic Panels Characterization by Electronic Charge Method," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, no. 6, pp. 1644-1649, June 2018. doi: 10.1109/TLA.2018.8444161.
- [14] Weidong Xiao, W. G. Dunford and A. Capel, "A novel modeling method for photovoltaic cells," *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, Aachen, Germany, 2004, pp. 1950-1956 Vol.3. DOI: 10.1109/PESC.2004.1355416.
- [15] M. G. Villalva, J. R. Gazoli and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009. DOI: 10.1109/TPEL.2009.2013862.
- [16] Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," *2007, IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, Vigo, 2007, pp. 2392-2396. DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374981.
- [17] W. De Soto, S. A. Klein, and W. A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance," *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78-88, Jan. 2006.
- [18] N.Yildiran and E.Tacer, "Identification of photovoltaic cell single diode discrete model parameters based on datasheet values," *Solar Energy*, Elsevier, April 2016.



Dalton Luiz Rech Vidor Possui graduação em Engenharia Elétrica pela PUC-RS (1991), Mestrado em Engenharia Elétrica pela UFSC (1993), Especialista em Telecomunicações pela PUC-RS (1999) e Doutorado em conclusão pela UFSM (2019). Atualmente é Diretor da empresa Ideial e professor do ensino superior na ULBRA-RS e Uniritter-RS.

Possui mais de trinta anos de experiência em projetos de equipamentos eletrônicos, equipamentos de teste e calibração, telecomunicações e experiência em software. Seus interesses são o estudo e projeto de conversores de alta potência com excelente performance na resposta dinâmica e qualidade do sinal gerado.



Nataniel Marcos Rigo Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Luterana do Brasil – ULBRA-RS (2015). Mestrado em conclusão pela UFSM (2019), na linha de Eletrônica de Potência, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Membro do Grupo de Eletrônica de Potência e Controle (GEPOC), realiza pesquisas com ênfase

em conversores multi níveis paralelos, conversores híbridos chaveado-linear. Tem mais de quinze anos de experiência na área industrial, projetos e automação de sistemas. Seus interesses são o estudo e projeto de conversores de alta potência com excelente performance na resposta dinâmica e qualidade do sinal gerado.



José Renes Pinheiro recebeu o grau de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Univerisdade Federal de Santa Maria, e de Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina, respectivamente em 1981,1984 e 1994. Foi Chair do Programa Técnico e Chair Geral do Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência de 1999 e 2013 e do

Seminário de Eletrônica e Controle de Potência de 2000 e 2005. De 2001 a 2002, trabalhou no Center for Power Electronics Systems, Virginia Polytechnic Institute and State University (Virginia Tech), Blacksburg, como Pesquisador de Pós-Doutorado. Ele é autor de mais de 300 artigos técnicos publicados em conferências e revistas. Seus interesses atuais de pesquisa incluem conversão de alta frequência e alta potência, fontes de alimentação, conversores multiníveis, modelagem e controle de conversores e projeto otimizado de conversores.