

MODELAGEM DA EFICIÊNCIA MÉDIA PONDERADA CUSTOMIZADA À APLICAÇÃO FOTOVOLTAICA

JOÃO M. LENZ, JOSÉ R. PINHEIRO

*Grupo de Eletrônica de Potência e Controle, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria
Av. Roraima, 1000, Camobi, Cidade Universitária, CEP 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil
joaomlenz@gmail.com, jrenes@gepoc.ufsm.br*

Abstract— This paper presents the development of a methodology for obtaining weighted average efficiency for power conditioners in photovoltaic systems, customized according to the application's specific characteristics. By adopting the concept of mission profile, irradiation and ambient temperature curves were obtained for different Brazilian cities and for solar panels in fixed mounting (tilted and horizontal) and with mechanical tracking (1-axis and 2-axis). The impact of each mission profile on the efficiency of power converters was individually evaluated with basis on IEC 61683 criteria. A mathematical model of a photovoltaic cell was used for estimating produced power and its influence by solar radiance and operating temperature. Proposed methodology details are presented along with results for photovoltaic energy generation for each scenario, as an analysis of customized weighted average efficiencies and the impact of this figure of merit on evaluation and design of power converters.

Keywords— Weighted average efficiency, photovoltaic converters, PV system modelling, mission profile, energy performance

Resumo— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para obtenção da eficiência média ponderada de condicionadores de potência em sistemas fotovoltaicos, customizada de acordo as características específicas da aplicação. Utilizando o conceito de perfil da missão, curvas de irradiação e temperatura ambiente foram obtidas para diferentes cidades brasileiras e para painéis com montagem fixa (inclinado e na horizontal) e com rastreo mecânico (em 1-eixo e em 2-eixos). Foi feita uma avaliação individual do impacto de cada perfil de missão na eficiência de conversores de potência com base nos critérios da norma IEC 61683. A influência da radiação incidente e da temperatura de operação do painel solar foi levada em conta para estimar a potência de saída em um modelo matemático de célula fotovoltaica. São apresentados detalhes da metodologia junto com os resultados de geração energética fotovoltaica para cada cenário, análise das eficiências médias ponderadas customizadas e impacto dessa figura de mérito diferenciada no projeto e avaliação de conversores de potência.

Palavras-chave— Eficiência média ponderada, conversores fotovoltaicos, modelagem sistema PV, perfil de missão, desempenho energético

1 Introdução

A produção de energia fotovoltaica (PV) já se encontra em uma taxa de rápido crescimento a nível mundial, e é um dos pilares da rede elétrica do futuro. Apesar de ser uma fonte consolidada de eletricidade, estimativas de geração PV ainda se baseiam em modelos simplistas de irradiação, bancos de dados velhos e/ou tratados por médias horárias, e extrapolações grosseiras de radiação incidente no plano para superfícies inclinadas, como em (Neamt & Chiver 2013; Daut et al. 2011)

Seja em sistemas isolados ou conectados à rede, a potência instantânea entregue por centrais PV são dependentes de diversas variáveis, como a radiação solar incidente, temperatura ambiente, orientação e montagem do painel, características da célula solar, e eficiência dos elementos condicionadores de energia. Portanto, imprecisões na estimativa de tal energia podem se propagar por todos os estágios de projeto de uma central geradora, uma vez que tais valores de operação servem como base para o projeto de conversores/inversores, elementos de proteção, cabeamento, etc.

O conhecimento prévio *in situ* da característica da irradiação solar se torna um aspecto essencial para um projeto de qualidade de um sistema fotovoltaico. Contudo, para se alcançar uma maximização da ener-

gia gerada, é preciso, também, dar atenção ao projeto de sistemas auxiliares de controle e processamento de energia. A norma IEC 61683, comumente chamada de Eficiência Europeia, dita o método a ser seguido para calcular a eficiência média ponderada, η_{WT} , descrita por (1), para condicionadores de potência em sistemas PV, através da avaliação da eficiência energética anual de acordo com o tempo que o equipamento operou em determinadas classes de potência (IEC 1999).

$$\eta_{WT} = \sum_{i=1}^n k_i \cdot \eta_i \quad (1)$$

onde k_i é o coeficiente de ponderação para cada classe de potência, e η_i é a eficiência do condicionador de potência para a classe i . No entanto, essa metodologia foi baseada no trabalho de Rolf Hottop, em 1990, e os coeficientes de ponderação utilizados na norma foram parametrizados com dados da cidade de Trier, Alemanha (Klein et al. 2009; Kalathil & Krishnamurthy 2014).

Os fabricantes de inversores para aplicação fotovoltaica usualmente apresentam dados técnicos em condições padrão de teste, e avaliam e projetam a performance do inversor tomando como base normativas como a IEC 61683. Além da imprecisão intrínseca existente em projetar um inversor desprezando informações e características do local de aplicação, a Eficiência Europeia não leva em considerações fato-

res como a orientação do painel solar ou sua movimentação por sistemas de rastreamento mecânico (Klein et al. 2009).

Trabalho apresentado por (Dupont et al. 2012) estabeleceu uma metodologia para obtenção de equações de eficiência média ponderada para diferentes locais no Brasil, utilizando dados medidos de estações climatológicas. (Dupont et al. 2012) também utilizou um modelo de célula PV para estimar a geração anual de energia em cada local, assim como a energia processada por um condicionador de potência de acordo com os coeficientes de ponderação calculados. Não obstante, no trabalho foram utilizados apenas dados de irradiação global horizontal, e não foi investigado como as diferentes configurações de montagem de painéis fotovoltaicos podem afetar o processamento de energia.

(Kalathil & Krishnamurthy 2014) também questionou o uso universal de coeficientes de ponderação baseados somente na Eficiência Europeia ou na metodologia da Comissão de Energia da Califórnia (CEC, *California Energy Commission*). Uma técnica para estimar a eficiência média ponderada para o clima tropical da Índia é apresentada, e, de modo análogo, (Ongun & Özdemir 2013) fez uma análise de η_{WT} conforme o perfil de radiação da cidade de Izmir, Turquia. Contudo, em ambos trabalhos não são feitas considerações sobre casos reais de painéis com orientação inclinada, e somente dados de irradiação horizontal foram usados.

A performance de dispositivos de eletrônica de potência aplicados a PVs pode ser fortemente melhorada se eles forem projetados de acordo com os níveis reais de operação, ao invés de tradicionalmente preferir altas eficiências nas faixas nominais de potência (Beltrame et al. 2013).

Assim, este artigo objetivou desenvolver uma metodologia mais concisa e precisa para obter as equações de eficiência média ponderada de acordo com a norma IEC 61683. Tal metodologia serve para uma avaliação customizada de desempenho e projeto de condicionadores de potência em aplicações PV, levando em consideração tanto características locais quanto o cenário real de montagem dos painéis.

2 Modelagem de Painéis Fotovoltaicos

Foi utilizado um modelo matemático de uma célula solar para determinar a potência, tensão e corrente de saída de um painel PV para qualquer condição de irradiação e temperatura. O circuito equivalente (Figura 1) de um diodo foi empregado para simular a célula solar, onde a fonte de corrente emula a corrente gerada pelo efeito fotoelétrico e o diodo reproduz as características não-lineares do semiconductor. As perdas são representadas pelas resistências série e parasita, R_S e R_P ; onde a primeira é devido as perdas ôhmicas por condutores metálicos no painel, e a última em razão de correntes de fuga interna no silício.

Análise do circuito da Figura 1 resulta que a corrente de saída da célula PV é obtida por

$$I_{PV} = I_{\lambda} - I_D - I_{RP} \quad (2)$$

onde I_{λ} é a corrente fotogerada, I_{RP} a corrente devido a perdas na resistência parasita e I_D a corrente circulante na junção $p-n$ intrínseca a célula PV.

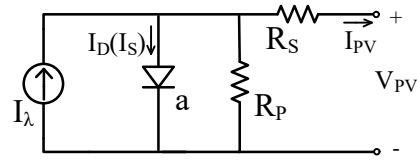


Figura 1: Circuito equivalente da célula fotovoltaica.

2.1 Parâmetros do painel PV

Um módulo da fabricante Kyocera foi usado nesse trabalho como fonte para análise de produção de energia, o modelo KD210GH-2PU foi escolhido devido a disponibilidade para ensaios experimentais e por possuir um *datasheet* com quantidade adequada de informações. Os principais dados do painel escolhido estão expostos na Tabela 1, para condições padrão de teste (*STC*, do inglês *Standard Test Conditions*) de irradiação 1000 W/m^2 e temperatura de operação da célula de 25°C .

Tabela 1: Dados técnicos fornecidos pelo fabricante do módulo KD210GH-2PU.

Parâmetro	Valor	Descrição
S^{STC}	1000 W/m^2	Radiação incidente
T^{STC}	25°C	Temperatura de operação
I_{SC}^{STC}	8.58 A	Corrente de curto circuito
I_{PV}^{MPP}	7.90 A	Corrente no ponto de máxima potência
V_{OC}^{STC}	33.2 V	Tensão de circuito aberto
V_{PV}^{MPP}	26.6 V	Tensão no ponto de máxima potência
P_{MPP}^{STC}	210 W	Potência máxima

A metodologia proposta por (Villalva et al. 2009) foi utilizada para a determinação de I_S , R_P e R_S , através dos valores da Tabela 1. Com uma estimativa mínima da resistência parasita, um processo iterativo de R_P , R_S e (2) foi conduzido até que o ponto de máxima potência (*MPP*, do inglês *Maximum Power Point*) em *STC* fosse calculado com erro menor que 0.5%. Segundo (Villalva et al. 2009), o fator de idealidade pode ser ajustado parametricamente, portanto a foi estimado como o inverso do fator de preenchimento (*FF*) da curva $I \times V$ nas mesmas condições de teste, de acordo com (3).

$$a = FF^{-1} = \left(\frac{V_{MPP}^{stc} I_{MPP}^{stc}}{V_{OC}^{stc} I_{SC}^{stc}} \right)^{-1} \quad (3)$$

A Tabela 2 resume os parâmetros calculados para o modelo do painel, enquanto a Figura 2 traz resultados das curvas $I \times V$ e $P \times V$ modeladas para as condições *STC* e *NOTC* (*Normal Operation Test Condition*), validadas com os valores fornecidos pelo fabricante.

Tabela 2: Parâmetros modelados para o módulo PV utilizado.

Param.	Valor	Descrição
R_P	138.51 Ω	Resistência parasita
R_S	0.21 Ω	Resistência série
I_{s0}	4.9833×10^{-8} A	Corrente de saturação (STC)
a	1.2623	Fator de idealidade do diodo

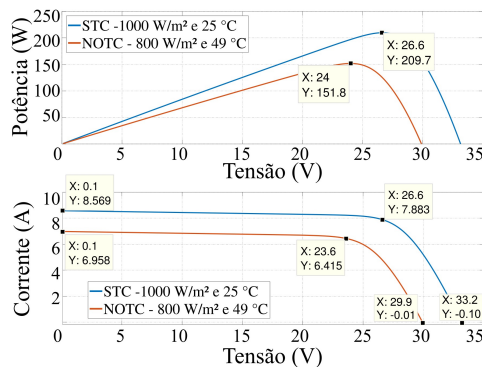


Figura 2: Resultados do modelo do painel Kyocera KD210-GH nas condições STC e NOCT, validada conforme valores de *datasheet*.

3 Estimação de Geração de Energia Fotovoltaica

3.1 Dados de Irradiação – INPE/SONDA

Foram utilizados dados da temperatura ambiente e da irradiação solar provenientes de três estações meteorológicas automáticas no Brasil, de um banco de dados em um período total de 10 anos. Essas estações são mantidas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pertencem ao projeto SONDA (Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais).

3.1.1 Considerações sobre as estações escolhidas

As estações escolhidas, localizadas nas cidades de São Martinho da Serra (SMS), Brasília (BRB) e Petrolina (PTR), possuem equipamentos para medir radiação direta e difusa, além da global horizontal e temperatura ambiente. As posições geográficas de cada estação são descritas na Tabela 3, junto com o número de meses com disponibilidade de dados entre 2005 e 2014.

Tabela 3: Resumo de informações das estações consideradas.

Estação	Latitude	Longitude	Altura relativa ao mar	Nº meses com dados
SMS	29°26' S	53°49' O	489 m	119
BRB	15°36' S	47°42' O	1023 m	117
PTB	09°04' S	40°19' O	387 m	119

3.1.2 Médias e tratamento dos dados

As amostras coletadas das componentes da radiação solar e da temperatura ambiente foram medidas em intervalos de 1 minuto, e todas foram submetidas a um processo de validação de acordo com as regras de controle de qualidade da *Baseline Surface Radiation Network* (BSRN) (Long & Dutton 2004). Essa validação ocorre por um algoritmo de quatro etapas, onde uma amostra só é checada na segunda etapa, se obter sucesso no primeiro algoritmo, e assim por diante. O processo de validação pode ser brevemente explicado como segue:

- Verifica e sinaliza se uma amostra está fora dos limites **fisicamente possíveis**;
- Verifica e sinaliza se uma amostra é fisicamente possível, porém **extremamente rara**;
- Verifica e sinaliza se uma amostra é **inconsistente** com medidas de outras variáveis; ou se a evolução temporal da amostra é **inconsistente** com o esperado;
- Verifica e sinaliza se uma amostra é **inconsistente** quando comparada com estimativas de modelos computacionais;

Ao todo, um grande conjunto de dados de múltiplas variáveis foi obtido em uma série histórica de 10 anos, para cada estação mencionada. Com esse *dataset* foi construído um ano médio típico (AMT) de irradiação solar e temperatura ambiente. Para cada variável de interesse, as amostras do mesmo minuto de cada ano foram agrupadas, e então calculada a média dos dados com qualidade aprovada.

3.2 Radiação incidente em um painel PV em orientação arbitrária

A avaliação da irradiação em um painel fotovoltaico para diferentes orientações de montagem foi feita através de um algoritmo com múltiplos passos, desenvolvido para **1)** calcular a posição angular do Sol em qualquer dia ou horário, tomando como referência um sistema de coordenadas em três dimensões centrado no painel PV, nos eixos Norte-Sul, Leste-Oeste, e Zênite; **2)** determinar a posição angular do painel, no mesmo sistema de referência, para diferentes cenários de montagem: módulo fixo com ângulo de inclinação otimizado, rastreamento mecânico em 1-eixo, seguindo o azimute solar, e rastreamento mecânico em 2-eixos, seguindo tanto o azimute quanto a elevação solar; **3)** para cada intervalo de um minuto ao longo de um ano, calcular o ângulo de incidência entre o Sol e o módulo PV, e, com o uso dos dados radiométricos já descritos, estimar a radiação solar incidente na superfície do painel.

A geometria para o cálculo do ângulo de incidência é resumida pela Figura 3, onde é necessário conhecer os vetores de posição do sol e da normal à superfície do painel. Os ângulos de inclinação entre o módulo e o solo, β , e o ângulo de azimute, γ , podem ser fixo ou variável, de acordo com a configuração escolhida para montagem.

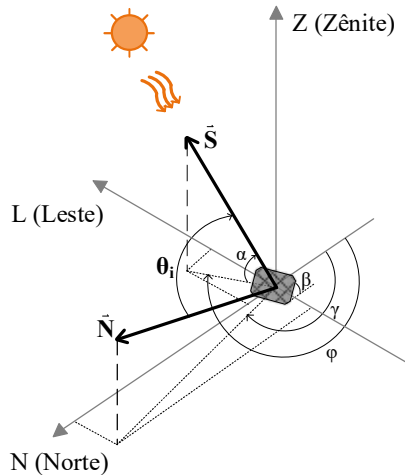


Figura 3: Geometria para cálculo do ângulo de incidência da radiação solar em uma superfície inclinada.

A determinação do vetor de posição solar, $\vec{S}$, em relação ao observador já foi amplamente discutida na literatura, e diferentes metodologias podem ser usadas de acordo com a necessidade de precisão da aplicação. Neste trabalho, as equações apresentadas por (Reda & NREL 2008) foram usadas como referência para desenvolver um algoritmo de cálculo dos ângulos de elevação e azimute solar (α e φ , respectivamente), em intervalos de um minuto ao longo de um ano.

3.2 Ângulo de inclinação para maximização do aproveitamento energético

A definição do ângulo em que o painel vai ser posicionado, em relação ao solo, pode ter um impacto significativo no processamento anual de energia. As técnicas mais comumente utilizadas por empresas instaladoras de sistemas fotovoltaicos se baseiam em equações antigas e tradicionais, como as apresentadas por (Reindl et al. 1990) ou (Lewis 1987), onde o ângulo de inclinação ótimo (β_{opt}) é adotado como um fator constante relacionado à latitude local.

Tais métodos possuem inúmeras limitações, uma vez que apenas modelos simplificados de irradiação foram utilizados, sem considerações sobre nebulosidade ou uso de dados reais de radiação solar (Yang & Lu 2007).

Os dados reais radiométricos utilizados neste trabalho permitiram o desenvolvimento de uma análise precisa do ângulo de inclinação que resultou na máxima geração fotovoltaica. Essa metodologia se baseou na modelagem do painel PV descrita na Seção 2 e no modelo para determinação da radiação no plano inclinado (Figura 3).

Usando uma resolução de um minuto, a potência de saída do módulo fotovoltaico foi simulada usando os dados do ano médio típico, para cada estação da Tabela 3. O ângulo de inclinação β foi variado de 1° a 90° , em degraus de 1° . Essa avaliação foi feita tanto para montagens fixas quando para condição de rastreamento mecânico em 1-eixo, de modo a analisar qual o ângulo ótimo de inclinação para cada local e para cada configuração de montagem.

4 Projeto de Central Fotovoltaica com Foco no Perfil da Missão

O detalhamento do real perfil da missão da central PV se torna essencial para avaliar corretamente fatores como a produção energética, o custo nivelado de energia (LCOE, *Levelized Cost of Energy*), tempo para *payback*, e outras características técnicas e financeiras. Esse perfil é dependente não somente de particularidades do local, mas, também, de aspectos relacionados ao *layout* da planta, e.g. a orientação dos módulos PV.

Usando o ano médio típico (AMT) formado por dados meteorológicos, e combinando com as metodologias apresentadas de modelagem de painel PV e incidência em superfície inclinada, foram traçados diferentes perfis de missão para cada localidade. Estes cenários serviram como ponto de partida para a determinação das equações de eficiência média ponderada.

A Figura 4 apresenta as curvas da energia solar irradiada ponderada por faixas de radiação, para os três locais de estudo e para as condições de montagem fixa e com rastreamento. O ângulo de inclinação, para cada sítio, foi escolhido de acordo com a metodologia descrita na Seção 3.2. A Figura 5 exhibe a energia solar disponível em um ano em função do ângulo de inclinação, e a Tabela 4 resume os valores de β_{opt} e da energia gerada para cada local e condição.

Tabela 4. Ângulo de inclinação e energia total processada no ano típico médio, para cada local.

	São Martinho da Serra			Brasília			Petrolina		
	β	Energia processada no AMT (kWh)	Ganho	β	Energia processada no AMT (kWh)	Ganho	β	Energia processada no AMT (kWh)	Ganho
Horizontal	0°	405.94	-	0°	447.99	-	0°	456.57	-
Fixo	17°	417.37	2.82%	17°	461.94	3.11%	6°	458.28	0.37%
Rastreamento em 1-eixo	38°	479.60	18.15%	37°	531.07	18.55%	32°	526.52	15.32%
Rastreamento em 2-eixos	-	493.62	21.60%	-	551.26	23.05%	-	527.61	15.56%

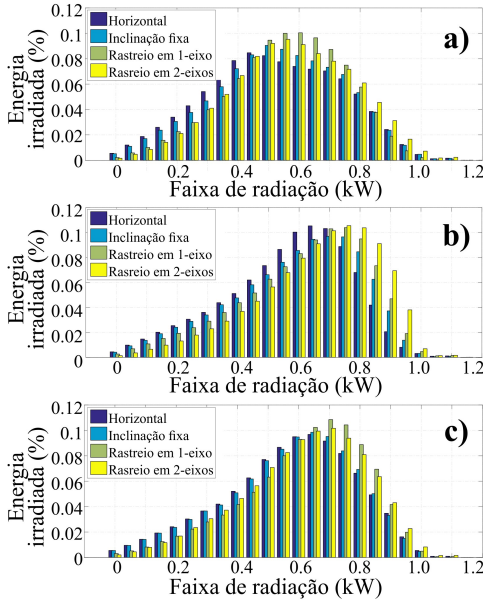


Figura 4: Energia solar irradiada ponderada nos diferentes cenários de orientação de superfície, para a) São Martinho da Serra, b) Brasília e c) Petrolina.

5 Equações de Eficiência Média Ponderada Customizadas à Aplicação

A eficiência média ponderada é uma figura de mérito para avaliar a performance de um condicionador de potência em diferentes pontos de operação, ponderando de acordo com o tempo em que o mesmo opera em cada ponto. A norma 61683 da IEC estabelece o conceito e os coeficientes para η_{WT} , que é calculada através de (1), onde k_i é obtido por meio das potências de entrada e saída (P_{in} e P_{out}), e o tempo de operação dispendido em cada classe (t),

$$k_i = \frac{P_{out,i} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n P_{in,i} \cdot t_i} \quad (4)$$

Ainda, (IEC 1999) dita que as eficiências de cada classe i devem ser testadas nas condições de 5%, 10%, 25%, 50%, 75%, 100% e 120% da potência nominal do conversor ou inversor. Os mesmos critérios foram adotados na análise deste trabalho, de modo que com as curvas de irradiação para cada local e o modelo do painel, a energia fotovoltaica processada foi estimada e ponderada de acordo com as classes estabelecidas. A Figura 6 apresenta os resultados da energia ponderada para todos os cenários analisados.

Com os coeficientes de ponderação para cada configuração de montagem e para cada localidade, expostos na Figura 6, as equações para cálculo da eficiência média ponderada customizadas são descritas como segue, para São Martinho da Serra (5-7), Brasília (8-10) e Petrolina (11-13).

$$\eta_{SMS_fixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.01\eta_{10\%} + 0.06\eta_{25\%} + 0.25\eta_{50\%} + 0.44\eta_{75\%} + 0.24\eta_{100\%} + 0.00\eta_{120\%}$$

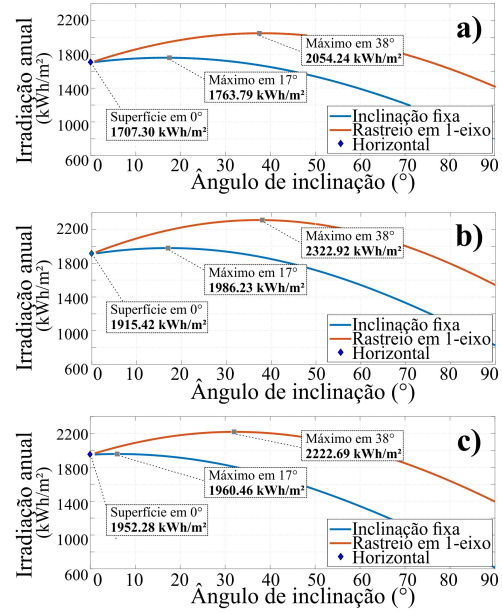


Figura 5: Energia solar disponível no AMT em função do ângulo de inclinação do painel em a) São Martinho da Serra, b) Brasília e c) Petrolina.

$$\eta_{SMS_fixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.01\eta_{10\%} + 0.06\eta_{25\%} + 0.25\eta_{50\%} + 0.44\eta_{75\%} + 0.24\eta_{100\%} + 0.00\eta_{120\%} \quad (5)$$

$$\eta_{SMS_1eixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.01\eta_{10\%} + 0.03\eta_{25\%} + 0.21\eta_{50\%} + 0.50\eta_{75\%} + 0.25\eta_{100\%} + 0.00\eta_{120\%} \quad (6)$$

$$\eta_{SMS_2eixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.01\eta_{10\%} + 0.03\eta_{25\%} + 0.21\eta_{50\%} + 0.47\eta_{75\%} + 0.27\eta_{100\%} + 0.01\eta_{120\%} \quad (7)$$

$$\eta_{BRB_fixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.01\eta_{10\%} + 0.05\eta_{25\%} + 0.18\eta_{50\%} + 0.40\eta_{75\%} + 0.36\eta_{100\%} + 0.00\eta_{120\%} \quad (8)$$

$$\eta_{BRB_1eixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.00\eta_{10\%} + 0.03\eta_{25\%} + 0.14\eta_{50\%} + 0.40\eta_{75\%} + 0.43\eta_{100\%} + 0.00\eta_{120\%} \quad (9)$$

$$\eta_{BRB_2eixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.01\eta_{10\%} + 0.02\eta_{25\%} + 0.12\eta_{50\%} + 0.37\eta_{75\%} + 0.47\eta_{100\%} + 0.01\eta_{120\%} \quad (10)$$

$$\eta_{PTR_fixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.01\eta_{10\%} + 0.05\eta_{25\%} + 0.19\eta_{50\%} + 0.44\eta_{75\%} + 0.31\eta_{100\%} + 0.00\eta_{120\%} \quad (11)$$

$$\eta_{PTR_1eixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.00\eta_{10\%} + 0.03\eta_{25\%} + 0.15\eta_{50\%} + 0.42\eta_{75\%} + 0.40\eta_{100\%} + 0.00\eta_{120\%} \quad (12)$$

$$\eta_{PTR_2eixo} = 0.00\eta_{5\%} + 0.00\eta_{10\%} + 0.03\eta_{25\%} + 0.16\eta_{50\%} + 0.43\eta_{75\%} + 0.37\eta_{100\%} + 0.01\eta_{120\%} \quad (13)$$

6 Conclusões

Foi apresentada uma metodologia completa para modelagem da eficiência média ponderada de condicionadores de potência, aplicados a sistemas fotovoltaicos, customizada de acordo com as características do local e forma de posicionamento dos painéis. Uma discussão foi feita a respeito da norma IEC 61683 e

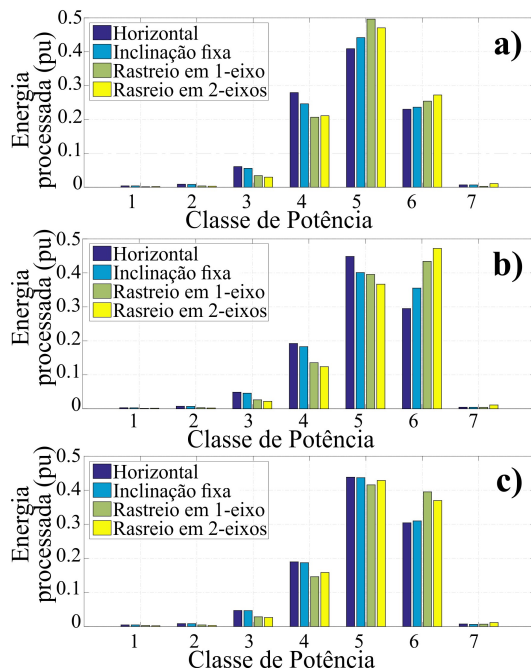


Figura 6: Energia total processada no AMT ponderada pelas classes de potência da IEC 61683, em a) São Martinho da Serra, b) Brasília e c) Petrolina

seus critérios para avaliação de performance de condicionadores de potência PV, e sua imprecisão por utilizar coeficientes de ponderação universais, acarretando em cenários de comparação imprecisos.

A energia gerada por centrais PV é intimamente ligada a condições de tempo instantâneas e ao layout de orientação dos painéis. Abordagem simplistas para modelar tais centrais falham, portanto, em estimar com precisão a energia produzida. Em contraste, foi proposto um método para estimar a energia fotovoltaica produzida através de um ano típico médio, formado por médias de dados do projeto SONDA/INPE de radiação global, direta e difusa, e temperatura ambiente em três cidades brasileiras, usando medições em um período de 10 anos.

Uma modelagem da produção energética de sistemas PV foi desenvolvida de modo a estimar a potência a ser processada nesse AMT, para cada local e analisando diferentes tipos de montagens de painéis. Com isso, curvas da energia processada ponderada em função das classes de potência da IEC 61683 foram apresentadas, e, por elas, as equações customizadas da eficiência média ponderada foram obtidas.

A metodologia apresentada permite delinear as curvas energéticas de um sistema fotovoltaico, assim como definir as regiões de operação na qual os conversores PV irão operar. Através das equações customizadas de eficiência média ponderada, é possível otimizar o projeto de conversores para maximizar a eficiência nas faixas mais significativas de irradiação solar. Com isso, a análise customizada à aplicação fornece as ferramentas para maximizar o processamento energético do sistema PV.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior pelo financiamento que permitiu a execução deste trabalho. Também agradecemos ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da UFSM pelo apoio e disponibilidade de infraestrutura.

Referências Bibliográficas

- Beltrame, F. et al., 2013. Efficiency optimization of DC/DC boost converter applied to the photovoltaic system. *IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference)*, pp.706–711.
- Daut, I. et al., 2011. Clear sky global solar irradiance on tilt angles of photovoltaic module in Perlis, Northern Malaysia. *In ECCE 2011 - International Conference on Electrical, Control and Computer Engineering*, pp.445–450.
- Dupont, F.H., Rech, C. & Pinheiro, J.R., 2012. A methodology to obtain the equations for the calculation of the weighted average efficiency applied to photovoltaic systems. *2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON 2012*.
- IEC, 1999. IEC 61683: Photovoltaic systems - Power conditioners - Procedure for measuring efficiency. , 1999, p.26.
- Kalathil, A. & Krishnamurthy, H., 2014. Quantification of Solar Inverter Efficiency for Indian Tropical Climatic Conditions. In *IEEE Region 10 Humanitarian Technology Conference*. pp. 14–18.
- Klein, G. et al., 2009. Are we Benchmarking Inverters on the Basis of Outdated Definitions of the European and CEC Efficiency? *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, (September)*, pp.3638–3643.
- Lewis, G., 1987. No Title. *Solar and Wind Technology*, 4, pp.407–410.
- Long, C.N. & Dutton, E.G., 2004. BSRN Global Network recommended QC tests, V2.0. , pp.1–3. Available at: <http://bsrn.awi.de/data/quality-checks.html> [Accessed May 23, 2016].
- Neamt, L. & Chiver, O., 2013. A simple method for photovoltaic energy estimation. *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on*, (4), pp.513–516.
- Ongun, İ.L. & Özdemir, E., 2013. Weighted efficiency measurement of PV inverters: introducing nizmır. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS*, 15(5), pp.550–554.
- Pereira, E.B. et al., 2006. *Brazilian Atlas of Solar Energy*, Available at: http://sonda.ccst.inpe.br/publicacoes/atlas_solar.html.
- Reda, I. & Nrel, A.A., 2008. Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications (Revised). *NREL/Tp-560-34302*, (January), pp.1–56.
- Reindl, D.T., Beckman, W.A. & Duffie, J.A., 1990. Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, 45(1), pp.9–17.
- Tiba, C., 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de Dados Terrestres. *Atlas Solarimétrico do Brasil*, 1, p.111. Available at: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes>.
- Villalva, M.G., Gazoli, J.R. & Filho, E.R., 2009. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5), pp.1198–1208.
- Yang, H. & Lu, L., 2007. The Optimum Tilt Angles and Orientations of PV Claddings for Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Applications. *Journal of Solar Energy Engineering*, 129(2), p.253.