

DETERMINAÇÃO DE ÍNDICES DE MÉRITO PARA AVALIAR O DESEMPENHO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE

Arthur Durigon Mello – arthurmello28@gmail.com
Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Engenharia de Energia

Resumo. O estudo do desempenho dos sistemas fotovoltaicos utilizando os índices de mérito como diretriz contribui para o desenvolvimento da tecnologia e da indústria fotovoltaica. Os índices de mérito, ou índices de desempenho, são parâmetros que representam características de materiais ou equipamentos de acordo com a sua performance de conversão de energia. O objetivo deste trabalho é determinar os índices de mérito, como a razão de desempenho (PR), o fator de capacidade (FC), a eficiência global do sistema, a produtividade de referência (YR) e a produtividade do sistema (YF) de quatro sistemas fotovoltaicos, sendo três sistemas localizados no exterior, Holanda, Eslováquia e África do Sul, e o quarto sistema sendo simulado na cidade de Florianópolis, Santa Catarina. Após a determinação dos índices, a avaliação dos sistemas é realizada de acordo com a característica da localidade em que este está inserido. Os fatores como a temperatura ambiente e a disponibilidade do recurso solar são os principais fatores que influenciam o valor dos índices de mérito dos sistemas estudados.

Palavras-chave: Energia Solar, Sistemas Fotovoltaicos, Índices de Mérito.

1. INTRODUÇÃO

O estudo do desempenho dos sistemas fotovoltaicos (FV) auxilia no contínuo desenvolvimento da tecnologia e da indústria fotovoltaica. Os índices de desempenho são referências para diagnosticar a qualidade do sistema FV, identificar necessidades futuras de melhoramento e definir expectativas do retorno financeiro atribuído ao sistema. A padronização dos métodos de avaliação dos sistemas surgiu pelo aumento da utilização dos sistemas FV e pela necessidade de atribuir maior credibilidade para a tecnologia, contribuindo para o desenvolvimento desta. Estes índices são capazes de detectar problemas operacionais ou de projeto, de comparar diferentes design e tecnologia dos sistemas. (FUSANO, 2013).

Os índices de mérito, ou índices de desempenho, são parâmetros que representam características de materiais ou equipamentos de acordo com a sua performance de conversão de energia. (FUSANO, 2013). Os índices de mérito de performance do sistema FV foram propostos inicialmente pela organização *International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programm* (IEA-PVPS). Estes índices possuem como objetivo propor uma prática de monitoramento de sistemas FV. Com este monitoramento, é possível determinar e entender as perdas que não podem ser diagnosticadas por uma avaliação direta do sistema, também é possível determinar e entender o comportamento de novas tecnologias fotovoltaicas em um longo período de operação e aprender a partir destas experiências de sistemas que não obtiveram sucesso em sua operação. A maioria dos métodos de cálculos propostos pela IEA- PVPS são aplicáveis em todas as tecnologias de sistemas fotovoltaicos. (IEA-PVPS, 2014).

Um dos objetivos de monitorar um sistema FV é identificar falhas no sistema. Muitos sistemas utilizam esta análise dos índices para prevenir perdas econômicas por problemas operacionais. Um adequado monitoramento pode rapidamente detectar problemas operacionais, contribuindo para uma produção maior de energia em comparação ao sistema sem monitoramento. (IEA-PVPS, 2014).

Com a aquisição destes índices, é possível comparar a performance de sistemas de várias localidades distribuídas pelo mundo que apresentam diferentes configurações e tecnologias. Os índices também possibilitam a otimização, de tal modo que maximize a eficiência de sistemas FV em aplicações futuras. (FUSANO, R. H.; 2013 e IEA-PVPS,2014).

A comparação com o rendimento do sistema e um rendimento de referência é geralmente o parâmetro de performance para sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Esta relação representa a eficiência do sistema de conversão de energia. Para isso, os dados sobre a energia produzida e a energia recebida em forma de radiação solar são necessários para o monitoramento. (IEA-PVPS,2014). Vários parâmetros relacionados aos dados de energia e performance podem ser calculados a partir de bancos de dados de monitoramento a partir de somas, médias e/ou suas relações em um certo período de tempo, como mês ou ano. (IEA-PVPS, 2000).

O objetivo deste trabalho é determinar os índices de mérito de quatro sistemas fotovoltaicos, um localizado na Holanda, outro na Eslováquia e o terceiro na África do Sul, e comparar estes índices com os índices de mérito do quarto

sistema fotovoltaico. Este quarto sistema é proveniente de uma simulação de um sistema localizado em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

2. ÍNDICES DE MÉRITO

Os índices de mérito técnico de um sistema fotovoltaico conectado à rede representam índices que estão relacionados à energia, eficiência, produtividade, desempenho e as perdas do sistema fotovoltaico. (RAMPINELLI, 2010).

A irradiância média diária no plano do arranjo fotovoltaico ($H(\gamma, \beta)$), sendo γ o ângulo do desvio azimutal e β a inclinação do arranjo fotovoltaico em relação ao plano horizontal, é dada pela Eq. (1). (RAMPINELLI, 2010).

$$H(\gamma, \beta) = \frac{1}{\Gamma} \int G(t) \cdot dt \quad (1)$$

Onde G é a irradiância no plano do arranjo fotovoltaico e Γ é o período de operação do sistema.

Para determinar a eficiência global do sistema, deve-se obter a razão entre a energia elétrica em corrente alternada (c.a.) entregue pelo sistema e a energia disponível para o arranjo fotovoltaico efetuar a conversão. A eficiência global do sistema é dada pela Eq. (2). (RAMPINELLI, 2010).

$$\eta_S = \frac{E_{CA}}{E_{FV}} = \frac{\int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) \cdot dt}{A_{FV} \cdot \int_0^{\Gamma} G(t) \cdot dt} \quad (2)$$

Onde η_S é a eficiência global do sistema, E_{CA} é a energia elétrica entregue à rede, E_{FV} é a energia solar disponível para conversão no arranjo fotovoltaico, P_{CA} é a potência elétrica entregue à rede, A_{FV} é a área do arranjo fotovoltaico.

O fator de capacidade (FC) é definido pela razão entre a produção de energia elétrica real e a produção de energia teórica se o sistema operasse 24h do dia em sua potência nominal em condição padrão (1000W/m² e 25°C). (RAMPINELLI, 2010).

$$FC = \frac{E_{CA}}{E_{STD}} = \frac{\int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) \cdot dt}{\int_0^{\Gamma} P_{STD}(t) \cdot dt} \quad (3)$$

Onde FC é o fator de capacidade do sistema, E_{CA} é a energia elétrica entregue à rede, E_{STD} é a energia elétrica que seria entregue à rede se o sistema operasse 24 horas por dia na potência do sistema em condição padrão, P_{CA} é a potência elétrica entregue à rede, P_{STD} é a potência do sistema na condição padrão operando 24 horas.

O índice de produtividade é definido como a energia convertida por kWp instalado do sistema FV em um determinado período. Este índice é dado em horas de sol de condição padrão (1000 W/m², 25°C) no determinado período de estudo. (RAMPINELLI, 2010).

A produtividade do sistema pode ser calculada a partir da Eq. (4).

$$Y_F = \frac{1}{P_{STD}} \cdot \left[\frac{1}{\Gamma} \cdot \int_0^{\Gamma} P_{CA}(t) \cdot dt \right] \quad (4)$$

A produtividade de referência é determinada pela Eq. (5).

$$Y_R = \frac{H(\gamma, \beta)}{G_{STD}} \quad (5)$$

Onde G_{STD} é a irradiância padrão de 1000W/m².

O desempenho global do sistema ou razão de performance (PR) é definido entre a razão da produtividade do sistema e a produtividade de referência (Eq. (6)). Este índice é utilizado para avaliações e comparações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede de diferentes latitudes. (RAMPINELLI, 2010).

$$PR = \frac{Y_F}{Y_R} \quad (6)$$

O monitoramento do índice PR é útil para a identificação de problemas operacionais. A variação significativa do índice PR em intervalos pequeno de tempo (dias) está relacionada a falha de algum componente do SFCR como atuações de disjuntores, falhas em soldas, conexões, de diodos, e/ou no inversor. Já a variação gradual do PR está relacionada ao surgimento de novos sombreamentos, neve, sujeira, e/ou degradação do sistema fotovoltaico. Os valores de PR tendem a ser maiores no inverno do que no verão devido a influência da temperatura. (FUSANO, 2013 e IEA-PVPS,2014).

O valor do desempenho global ou razão de performance PR não deve ser confundido com a capacidade de energia a ser produzida pelo sistema. Um sistema que apresenta um valor PR alto não necessariamente produz uma quantidade de energia maior que outro sistema que apresenta um valor de PR menor. O sistema pode produzir uma quantidade maior de energia elétrica apresentando um PR menor, pois o sistema estará inserido em uma localidade que apresenta um melhor recurso solar. (FUSANO, 2013).

Três destes parâmetros de performance podem ser usados para definir a performance de um sistema fotovoltaico conectado à rede, no que diz respeito ao aproveitamento da radiação solar, produção de energia e efeitos das perdas do sistema. Estes parâmetros são respectivamente: fator de capacidade (CF), produtividade anual (YF ou Final Yield) e desempenho global ou razão de performance (PR ou *Performance Ratio*). (BENEDITO, 2009).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados solarimétricos e de produção de energia utilizados neste trabalho são disponibilizados pela SolarGIS em seu *site*. Os dados são provenientes da plataforma pvSpot do *site*. Nesta plataforma está disponível os dados de monitoramento de três sistemas fotovoltaicos, um localizado na Universidade de Tecnologia em Delft na Holanda, o segundo sistema FV está localizado na Escola Secundária da Engenharia Elétrica em Bratislava na Eslováquia, e o terceiro FV está localizado na Universidade de Stellenbosch em Stellenbosch na África do Sul.

O sistema FV localizado na Holanda (51,99° N, 4,37° L) apresenta 15,41 kWp de potência instalada constituído de módulos de silício cristalino, que são montados de maneira fixa com uma inclinação de 26° e azimute de 180°, ou seja, orientados para o sul geográfico.

O sistema FV localizado na Eslováquia (48,19° N, 17,03° L) apresenta 19, kWp de potência instalada constituído de módulos de silício cristalino, que são montados de maneira fixa com uma inclinação de 30° e azimute de 180°, ou seja, orientados para o sul geográfico.

O sistema FV localizado na África do Sul (33,93° S, 18,86° O) apresenta 1 kWp de potência instalada constituído de módulos de silício cristalino, que são montados de maneira fixa com uma inclinação de 20° e azimute de 0°, ou seja, orientados para o norte geográfico.

Os dados obtidos dos três sistemas para a utilização neste trabalho foram os dados mensais sobre a energia produzida pelo sistema e a irradiação solar global inclinada no plano de inclinação do sistema. Os dados foram adquiridos durante o período de 2010 a 2014 para o sistema localizado na Eslováquia e durante o período de 2011 a 2014 para os outros dois sistemas.

Este trabalho simulou um sistema FV localizado em Florianópolis (27,67° S, 48,55° O), Santa Catarina, Brasil, utilizando o *software System Advisor Model* (SAM) para a obtenção dos dados de produção de energia e irradiação global inclinada para fins de comparação com os outros três sistemas FV disponibilizados pela SolarGIS. O software SAM é desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) do Departamento de Energia dos Estados Unidos. O sistema simulado apresenta 5,092 kWp de potência instalada, constituído de 20 módulos Yingli YL255P-29b de 255W e um inversor SMA America SB5000US de 5 kW. O sistema foi simulado com uma inclinação de 25° e azimute de 0°, ou seja, orientado para o norte geográfico.

Os gráficos apresentados neste trabalho são provenientes do cálculo dos índices de mérito a partir dos dados coletados no *site* da SolarGIS e da simulação do *software* SAM com o auxílio do *software Microsoft Excel* e das equações citadas neste trabalho.

4. RESULTADOS

Os resultados dos cálculos dos índices de mérito são apresentados nas Figuras 1-8. Os índices de desempenho global ou razão de desempenho (PR), de fator de capacidade (FC), e de eficiência global para as médias mensais para cada mês são demonstrados pelas Figuras 1-6. A Fig. 7a apresenta a média anual do fator de capacidade (FC) e da eficiência global dos sistemas e a Fig. 7b apresenta a média anual da produtividade de referência (YR), da produtividade do sistema (YF) e das pedas totais do sistema para o período em que os dados foram coletados.

A Fig. 1 apresenta a razão de desempenho (PR) média mensal para cada mês para as cidades de Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda), ambas localizadas no hemisfério norte. A variação da razão de desempenho através dos meses é perceptível na Fig. 1. Os maiores índices de razão de desempenho estão presentes nos meses que apresentam menores temperaturas nestas cidades, ou seja, nos meses de Novembro a Março. Os menores índices de razão de desempenho estão presentes nos meses com temperaturas mais elevadas, nos meses de Junho, Julho e Agosto. Esta variação da razão de desempenho no decorrer do ano para ambas as cidades possuem relação com a variação de desempenho do sistema com a temperatura ambiente, quanto maior a temperatura, menor o desempenho do sistema fotovoltaico.

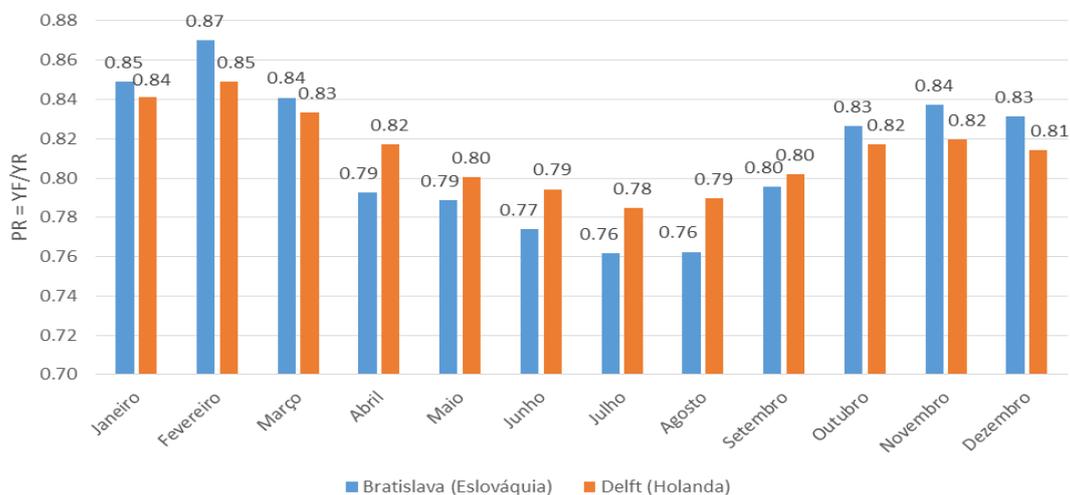


Figura 1 – Média mensal da razão de desempenho ou desempenho global (PR – *Performance Ratio*) para Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda).

A Fig. 2 apresenta a razão de desempenho (PR) média mensal para cada mês para as cidades de Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil), ambas localizadas no hemisfério sul. A variação da razão de desempenho através dos meses é perceptível na figura. Os maiores índices de razão de desempenho estão presentes nos meses que apresentam menores temperaturas e os menores índices de razão de desempenho estão presentes nos meses com temperaturas elevadas, o mesmo que aconteceu com as cidades localizadas no hemisfério norte. Os meses de inverno, Junho, Julho e Agosto, apresentaram os índices de razão de desempenho maior para ambas as cidades. Os meses de verão, Dezembro, Janeiro e Fevereiro apresentaram os menores índices de razão de desempenho. Esta variação da razão de desempenho no decorrer do ano para ambas as cidades, como para as cidades do hemisfério norte, possui relação com a variação de desempenho do sistema fotovoltaico devido a variação da temperatura ambiente.

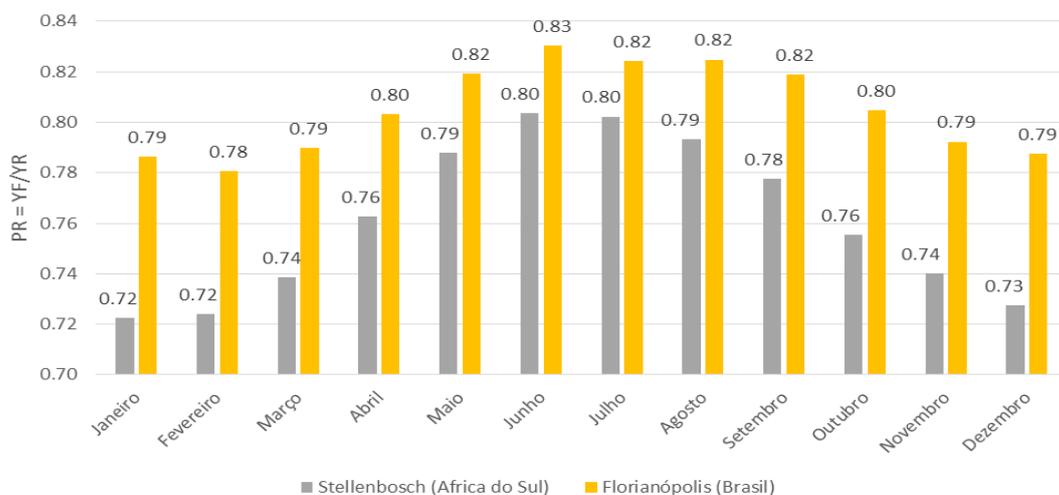


Figura 2 – Média mensal da razão de desempenho ou desempenho global (PR – *Performance Ratio*) para Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil).

A Fig. 3 apresenta o fator de capacidade (FC) médio mensal para cada mês para as cidades de Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda), ambas localizadas no hemisfério norte. A variação do fator de capacidade através dos meses é explícita na Fig. 3. Os maiores índices de razão de desempenho estão presentes nos meses que apresentam uma maior disponibilidade de irradiação, e conseqüentemente, uma produção maior de energia. Estes meses são os meses de Maio a Agosto para ambas as cidades. Os menores índices de fator de capacidade estão presentes nos meses com menor disponibilidade de radiação solar, e conseqüentemente, menor produção de energia elétrica, como nos meses de Dezembro e Janeiro. Esta variação do fator de capacidade no decorrer do ano para ambas as cidades possui relação com a quantidade de energia média mensal gerada pelo sistema fotovoltaico.

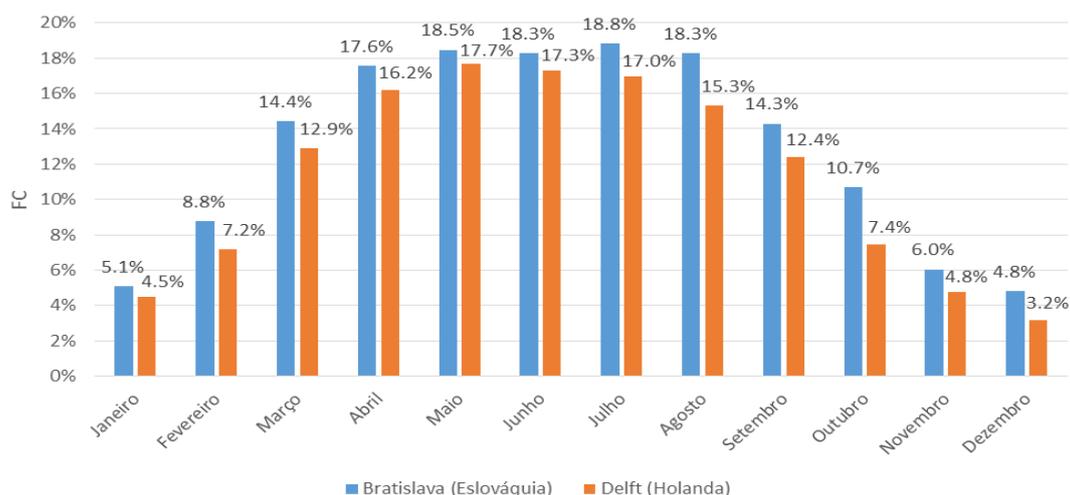


Figura 3 – Média mensal do fator de capacidade (FC) para Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda).

A Fig. 4 apresenta o fator de capacidade (FC) médio mensal para cada mês para as cidades de Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil), ambas localizadas no hemisfério sul. A variação do fator de capacidade através dos meses é explícita na Fig. 4. Os maiores índices de razão de desempenho estão presentes nos meses que apresentam uma maior disponibilidade de irradiação, e conseqüentemente, uma produção maior de energia. Estes meses são os meses de Dezembro e Janeiro para ambas as cidades. Os menores de fator de capacidade estão presentes nos meses com menor produção de energia elétrica, como nos meses de Junho e Julho. Esta variação do fator de capacidade no decorrer do ano para ambas as cidades possui relação com a quantidade de energia média mensal gerada pelo sistema fotovoltaico.

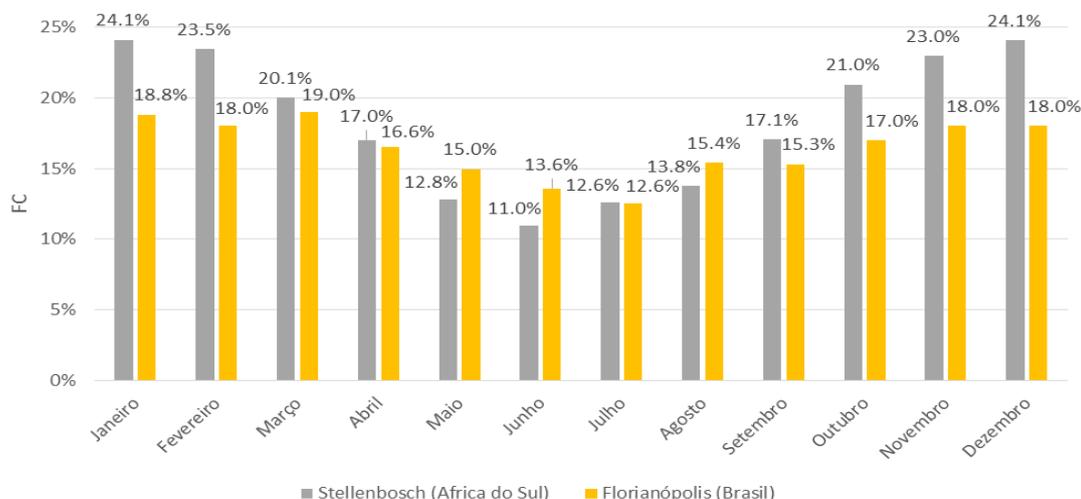


Figura 4 – Média mensal do fator de capacidade (FC) para Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil).

A Fig. 5 apresenta a eficiência global média mensal para cada mês para as cidades de Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda), ambas localizadas no hemisfério norte. A variação da eficiência global através dos meses é explícita na Fig. 5. Os maiores índices de eficiência global estão presentes nos meses que apresentam menores temperaturas, como a razão de desempenho apresentado pela Fig. 1. Os meses que apresentam os maiores índices de eficiência global são os meses de Janeiro e Fevereiro para ambas as cidades. Os menores índices de eficiência global estão presentes nos meses de Julho e Agosto. Como para a variação de razão de desempenho, a variação da eficiência global no decorrer do ano para ambas as cidades possui relação com a variação de desempenho do sistema com a temperatura do ambiente, quanto maior a temperatura, menor o desempenho do sistema fotovoltaico.

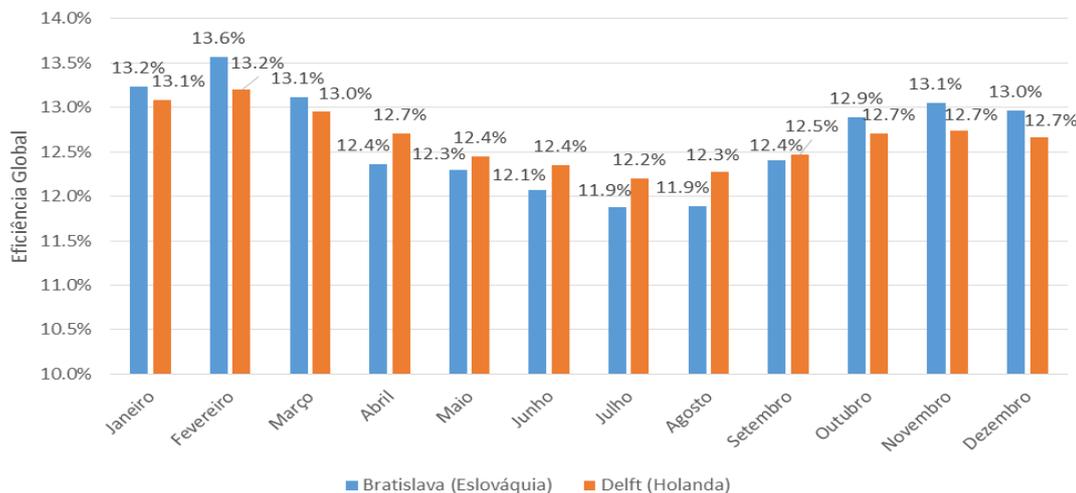


Figura 5 – Média mensal da eficiência global do sistema fotovoltaico para Bratislava (Eslováquia) e Delft (Holanda).

A Fig. 6 apresenta a eficiência global média mensal para cada mês para as cidades de Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil), ambas localizadas no hemisfério sul. A variação da eficiência global através dos meses é explícita na Fig. 6. Os maiores índices de eficiência global estão presentes nos meses que apresentam menores temperaturas, como a razão de desempenho apresentado pela Fig. 2. Os meses que apresentam os maiores índices de eficiência global são os meses de Junho, Julho e Agosto para ambas as cidades. Os menores índices de eficiência global estão presentes nos meses de Dezembro, Janeiro e Fevereiro. Como para a variação de razão de desempenho, a variação da eficiência global no decorrer do ano para ambas as cidades possui relação com a variação de desempenho do sistema com a temperatura do ambiente, quanto maior a temperatura, menor o desempenho do sistema fotovoltaico.

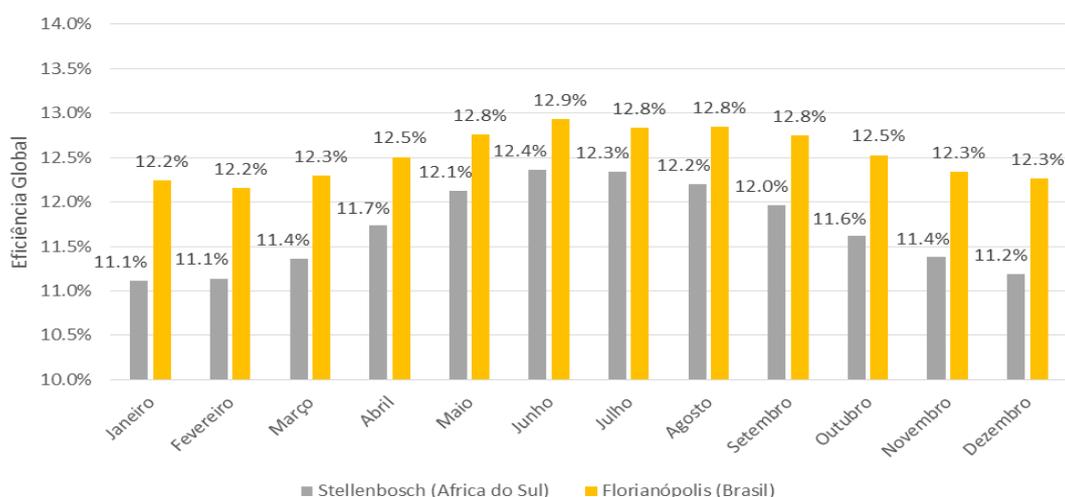


Figura 6 – Média mensal da eficiência global do sistema fotovoltaico para Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil).

A Fig. 7a apresenta a média anual do fator de capacidade (FC) e a média anual da eficiência global. A Fig. 7b apresenta a produtividade de referência (YR), a produtividade do sistema (YF) e as perdas totais do sistema, ambas as figuras apresentam os índices para as quatro cidades, Bratislava (Eslováquia), Delft (Holanda), Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil). Stellenbosch (África do Sul) apresenta a maior disponibilidade de radiação por apresentar o maior índice de produtividade de referência (YR) de 2132,2 horas de sol, e apresenta o maior índice de fator de capacidade (18,3%) e produtividade do sistema (1605,3 horas de sol) e perdas totais (527 horas de sol), ambos índices são influenciados pela maior disponibilidade de radiação solar. Já a eficiência global apresentada em Stellenbosch é a menor entre as cidades, devido a ocorrência de temperaturas mais elevadas que nas outras cidades. No outro lado, Delft (Holanda) apresenta o menor índice de fator de capacidade (11,3%), de produtividade do sistema (993,7 horas de sol), de perdas totais (242,1 horas de sol), justificado pela menor disponibilidade de radiação solar, pois apresenta o menor índice de produtividade de referência, 1235,8 horas de sol. Em decorrência de menores temperaturas, Delft (Holanda) e Bratislava (Eslováquia) apresentam a maior eficiência global entre as cidades, 12,6%.

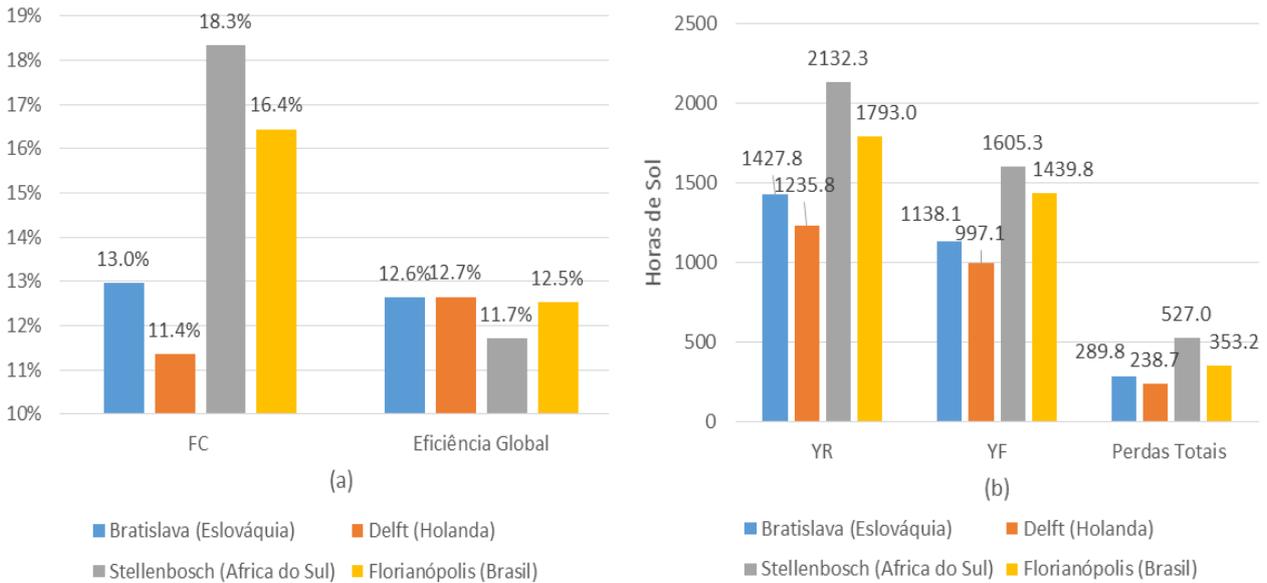


Figura 7 – (a) Fator de Capacidade (FC) e Eficiência Global do Sistema Anuais ; (b) Produtividade de Referência (YR), Produtividade do Sistema (YF) e Perdas totais anuais.

A Fig. 8 apresenta a dispersão dos dados mensais da produtividade mensal (YF) e do fator de capacidade (FC) para as quatro cidades em estudo. A dispersão de Florianópolis apresenta uma pequena variação devido ao baixo número de dados coletados a partir da simulação realizada utilizando o *software SAM*.

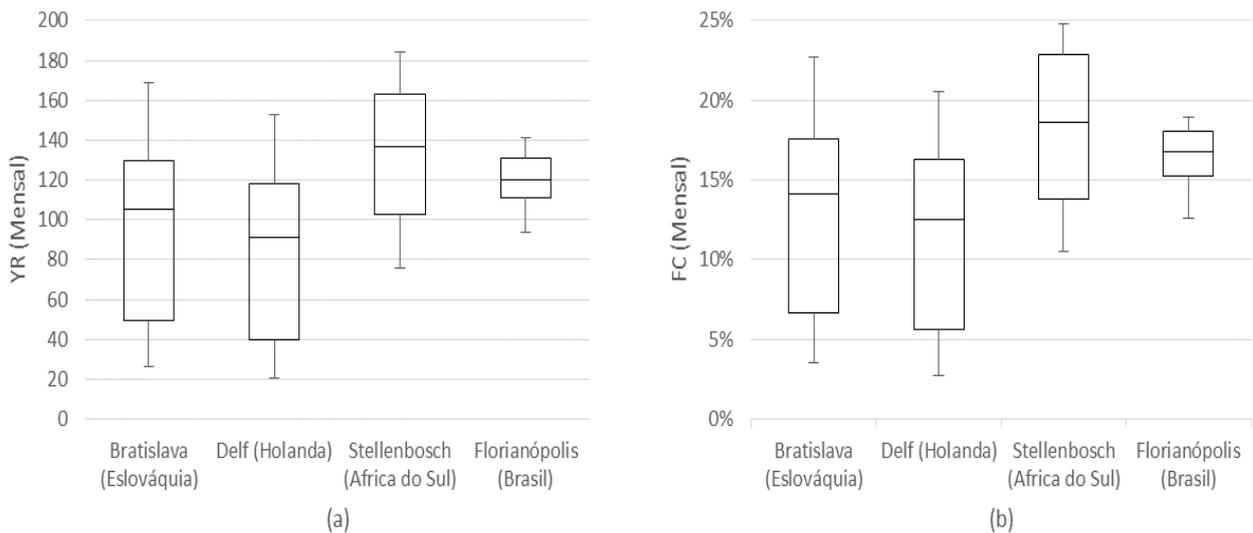


Figura 8 – (a) Distribuição da Produtividade do Sistema (YF) Mensal ; (b) Distribuição do Fator de Capacidade (FC) Mensal.

5. CONCLUSÃO

Os resultados deste trabalho apresentam os índices de mérito relacionados aos sistemas fotovoltaicos localizados em quatro cidades, Bratislava (Eslováquia), Delft (Holanda), Stellenbosch (África do Sul) e Florianópolis (Brasil). Os índices apresentados foram as médias mensais para a razão de desempenho (PR), o fator de capacidade (FC), a eficiência global do sistema, para cada mês e para as quatro cidades, as médias anuais do fator de capacidade (FC), eficiência global, produtividade de referência (YR), produtividade do sistema (YF) e perdas totais para os sistemas localizados nas quatro cidades. Também é apresentado a dispersão dos dados mensais de produtividade do sistema e de fator de capacidade para as quatro cidades.

Constatou-se a variação dos índices de acordo com a variação da temperatura e da disponibilidade de radiação solar. Para todas as cidades, o fator de capacidade (FC) é diretamente proporcional com a disponibilidade de radiação e a eficiência global e a razão de desempenho (PR) é inversamente proporcional a variação de temperatura média ambiente.

REFERÊNCIAS

- Benedito, Ricardo da Silva. Caracterização Da Geração Distribuída De Eletricidade Por Meio De Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede, No Brasil, Sob Os Aspectos Técnicos, Econômico E Regulatório. 2009. 110 f. Dissertação - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- Fusano, Renato Hideo. Análise Dos Índices De Mérito Do Sistema Fotovoltaico Conectado À Rede Do Escritório Verde Da UTFPR. 2013. 94 f. TCC - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- IEA-PVPS. Analysis Of Photovoltaic Systems. St. Ursen: Report Iea-pvps T2-01: 2000, 2000. 233 p.
- IEA-PVPS. Analytical Monitoring of Grid-connected Photovoltaic Systems. St. Ursen: Report Iea-pvps T13-03:2014, 2014. 90 p.
- Macêdo, Wilson Negrão. Análise Do Fator De Dimensionamento Do Inversor Aplicando A Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede. 2006. 201 f. Tese – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- Rampinelli, Giuliano Arns. Estudo De Características Elétricas E Térmicas De Inversores Para Sistemas Fotovoltaicos Conectados À Rede. 2010. 285 f. Tese – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

DETERMINATION OF THE PARAMETERS TO ASSESS THE PERFORMANCE OF THE GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS

Abstract. *The study of the performance of photovoltaic systems using the performance parameters as a guideline contributes to the development of technology and photovoltaic industry. The performance parameter, are parameters which represent characteristics of materials or equipment according to their energy conversion performance. The objective of this study is to determine the performance parameters, such as the performance ratio (PR), the capacity factor (CF), the overall efficiency of the system, reference yield (YR) and the final yield (YF) of four photovoltaic systems, of three systems located abroad, the Netherlands, Slovakia and South Africa, and the fourth system being a simulated system located in Florianópolis, Santa Catarina. After the determination of performance parameters, the evaluation system is performed according to characteristic of the location in which it is inserted. Factors such as ambient temperature and the availability of solar resources are the main factors that influence the value of the performance parameters of the studied systems.*

Key words: *Solar Energy, Photovoltaic Systems, Performance Parameter.*