

VARIABILIDADE DA IRRADIAÇÃO SOLAR EM ESCALA DE MINUTO NO ESTADO DE ALAGOAS

Chigueru Tiba – tiba@ufpe.br

Robson Dias Ramalho – robsonramalho@hotmail.com

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

José Leonardo de Souza - jls@ccen.ufal.br

Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas

Marcos André de Almeida da Silva - marcos.aasilva@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Resumo. O desenvolvimento desta pesquisa foi realizado a partir dos dados de irradiância solar global coletados em cinco localidades de Alagoas durante os anos de 2008 e 2009. Foram elas: Água Branca, Coruripe, Pão de Açúcar, Palmeiras dos Índios e Santana do Ipanema. Para obtenção dos dados de cada localidade (estação solarimétrica) foi utilizado um sensor de irradiação solar global, o piranômetro preto e branco. Este sensor foi montado sobre uma estrutura metálica de três metros de altura, em um eixo fixo, e posicionado na direção norte-sul, evitando possíveis sombreamentos. Para armazenamento dos dados de irradiância solar global foi utilizado um sistema de aquisição de dados com capacidade de armazenamento para 50 dias. Os dados foram analisados segundo a variabilidade de potência, chamado neste artigo, pelo termo “taxa de rampa”. Os resultados desta taxa de rampa podem ter valores positivos ou negativos. Neste artigo foram analisados os resultados negativos, pois são ocasionados por sombreamentos devido ao movimento de nuvens sobre o sensor. Os resultados negativos das taxas de rampa foram explorados nas escalas de tempo de 1, 5, 10, 15, 30, 60, 120 e 180 minutos. As maiores rampas de potência são observadas nas menores escalas de tempo, 1 e 5 minutos. Para as escalas de tempo acima de 15 minutos as rampas ficam concentradas na faixa entre 0 e 50 W/(m².min). A estação Pão de Açúcar apresenta a menor média anual totalizada de rampas. Assim, pode-se concluir que é a melhor localidade para uma possível instalação de uma usina solar se considerarmos somente este aspecto.

Palavras-chave: Irradiação Solar, Rampas de Potência, Variabilidade de potência

1. INTRODUÇÃO

Módulos fotovoltaicos quando expostos à radiação solar geram energia elétrica em corrente contínua. O desempenho destes módulos depende, entre alguns fatores, do nível de radiação solar. Um modelo elétrico que representa uma célula fotovoltaica é mostrado na Fig. 1. O circuito apresenta uma fonte de corrente I_{ph} , em paralelo com um diodo D . As perdas da célula fotovoltaica são representadas por R_{ph} e R_{sh} . O módulo da fonte de corrente I_{ph} , depende, entre alguns fatores, do nível da radiação solar incidente na célula (SEGUEL, 2009). Portanto, é razoável supor que a potência útil de uma usina solar é diretamente proporcional à radiação solar incidente nos painéis fotovoltaicos (LAVE, 2010).

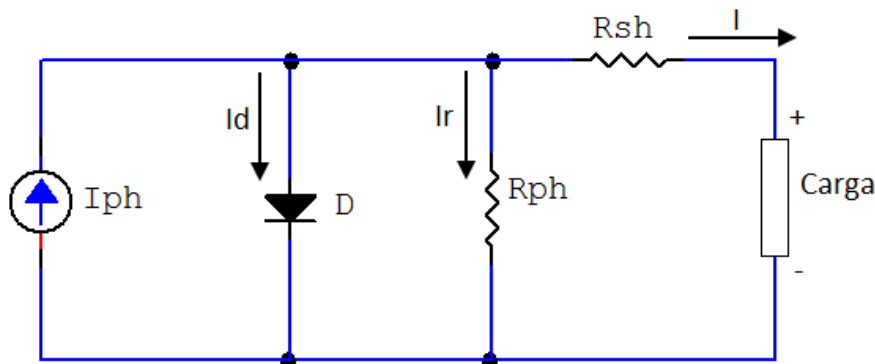


Figura 1 - Modelo de uma célula fotovoltaica de silício.

A irradiação solar em uma escala de minutos é caracterizada por flutuações provocadas por passagens de nuvens. Uma análise dessas flutuações estocásticas é importante porque permite estudar as flutuações de potências de um sistema fotovoltaico. Estas flutuações é referida em algumas literaturas, como por exemplo por Becker (2001), pelo termo “taxas de rampa”. Este termo mensura a súbita e não controlável alteração da irradiância solar ao nível da

superfície terrestre devido principalmente a passagem de nuvens. É representada pela relação entre a unidade de potência e um intervalo de tempo sendo dado por $\text{W/m}^2 \cdot \text{min}$. Pode assumir valores positivos ou negativos para as rampas ascendentes e descendentes, respectivamente. Este artigo apresenta um estudo das rampas descendentes.

O avanço de uma nuvem sobre uma instalação solar pode resultar em um decaimento da produção de energia de um ponto máximo a valores ínfimos. Por exemplo, na Fig. 2 pode-se observar uma redução da irradiação solar de 1142 para 238 W/m^2 o que representa uma perda de potência aproximada de 80%.

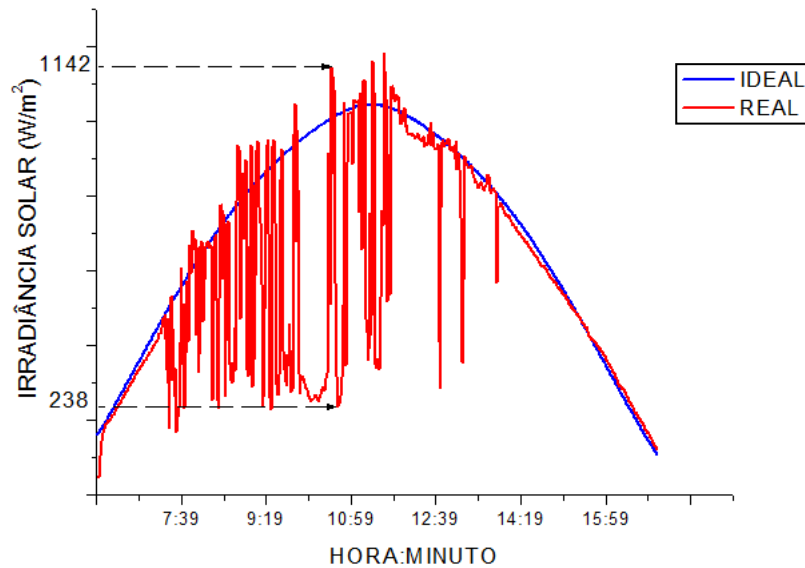


Figura 2 - Irradiância solar medida na localidade de Coruripe, Alagoas – Brasil, no dia 01 de janeiro de 2009.

Assim, antecipar e prever o impacto das nuvens sobre a potência de saída de um sistema fotovoltaico ou qualquer sistema de captação de energia solar possibilita o desenvolvimento de alternativas que possam mitigar estas perturbações. Os operadores de sistemas de energia elétrica (técnicos que fazem o despacho da energia elétrica) normalmente minimizam os efeitos da variabilidade de potência por meio de sistemas de reserva. Estas reservas são definidas como a capacidade de potência que pode ser utilizada em determinado prazo a fim de auxiliar na geração, balanceamentos de carga e no controle de frequência. É chamada de “reserva de regulação”, para um intervalo de variabilidade entre segundos a minutos, sendo usada para manter a frequência do sistema durante os períodos de flutuações. Uma compreensão melhor sobre a variabilidade da irradiação solar local permitirá tomar a decisão mais adequada sobre os níveis ideais de reserva para o sistema.

2. BASE DE DADOS

Neste estudo foram utilizados dados de irradiação solar global de cinco locais do Nordeste brasileiro, Alagoas, durante os anos de 2008 e 2009. Os locais de Alagoas analisados foram: Água Branca, Coruripe, Pão de Açúcar, Palmeiras dos Índios e Santana do Ipanema. Estas localidades são mostradas na Fig. 3.



Figura 3 - Localização das estações solarimétricas no estado de Alagoas segundo Google mapas.

3. METODOLOGIA

Cada estação solarimétrica foi constituída por um sensor de medição de irradiância global, modelo 8-48 B&W da Eppley. O sensor foi montado em um eixo fixo à torre e posicionado na direção norte-sul. Para aquisição dos dados de irradiância das estações foi utilizado o datalogger CR-1000 da Campbell.

Para a definição de rampa foi necessária uma estimativa para a irradiância de céu claro para cada local. Existem vários modelos disponíveis, porém, segundo Christelle et al. (2000) o modelo ESRA é o melhor no que concerne a robustez e precisão. Este modelo utiliza equações matemáticas que permitem estimar a irradiância solar direta e difusa e, por consequência, a global.

Um dos parâmetros de entrada do modelo ESRA é o fator de turbidez de Linke. O fator de turbidez de Linke foi determinado a partir do dia do mês de maior incidência solar nos anos de 2008 e 2009. O índice de turbidez de Linke foi ajustado e obtido de modo que a energia do modelo de céu de claro fosse igual ao dia com maior irradiação solar do mês em foco. Um fluxograma deste procedimento é mostrado na Fig. 4.

Os valores da taxa de rampa foram definidos e quantificados segundo Eq. 1 proposta por Lave e Kleissl (2010).

$$R_p = \left[\frac{I_{GLOBAL(t)} - SKC_{(t)} - I_{GLOBAL(t-Bt)} + SKC_{(t-Bt)}}{Bt} \right] \quad (1)$$

Onde:

R_p é a taxa de rampa ($W/m^2 \cdot min.$); $I_{GLOBAL(t)}$ é a irradiância solar global (W/m^2); Bt é a base de tempo analisada (minutos); $I_{GLOBAL(t-Bt)}$ é a irradiância solar global em função da diferença entre hora do dia e a base de tempo analisada (W/m^2); $SKC_{(t)}$ é a irradiância solar de céu claro no tempo a ser analisado (W/m^2); $SKC_{(t-Bt)}$ é a irradiância solar de céu claro em função da diferença entre hora do dia e a base de tempo analisada (W/m^2).

Para mensurar a relação do tempo e a amplitude das rampas de potência foram observados o número de ocorrência de rampas de potência em alguns intervalos: $|0 W/m^2 \cdot min.$; $50 W/m^2 \cdot min.$, $|50 W/m^2 \cdot min.$; $100 W/m^2 \cdot min.$, $|100 W/m^2 \cdot min.$; $200 W/m^2 \cdot min.$ e acima de $200 W/m^2 \cdot min.$ Desta forma é possível verificar a faixa de concentração das rampas em relação a cada uma das bases do tempo.

Para verificar a localidade de maior variabilidade foi realizado o somatório mensal das rampas de potência de cada estação ao longo do ano de 2009.

Os intervalos de tempo considerados foram de: 1,5,10,15,30,60,120 e 180 minutos. Para mensurar a relação do período considerado e a amplitude das rampas de potência, foram observados o número de ocorrência de rampas de potência em alguns intervalos: $|0 W/m^2$; $50 W/m^2$, $|50 W/m^2$; $100 W/m^2$, $|100 W/m^2$; $200 W/m^2$ e acima de $200 W/m^2$. Desta forma foi possível verificar a faixa de concentração das rampas em relação a cada uma das escalas de tempo investigadas.

Para verificar a localidade de maior ou menor variabilidade foi realizada a somatória mensal das rampas de potência de cada estação ao longo do ano de 2009.

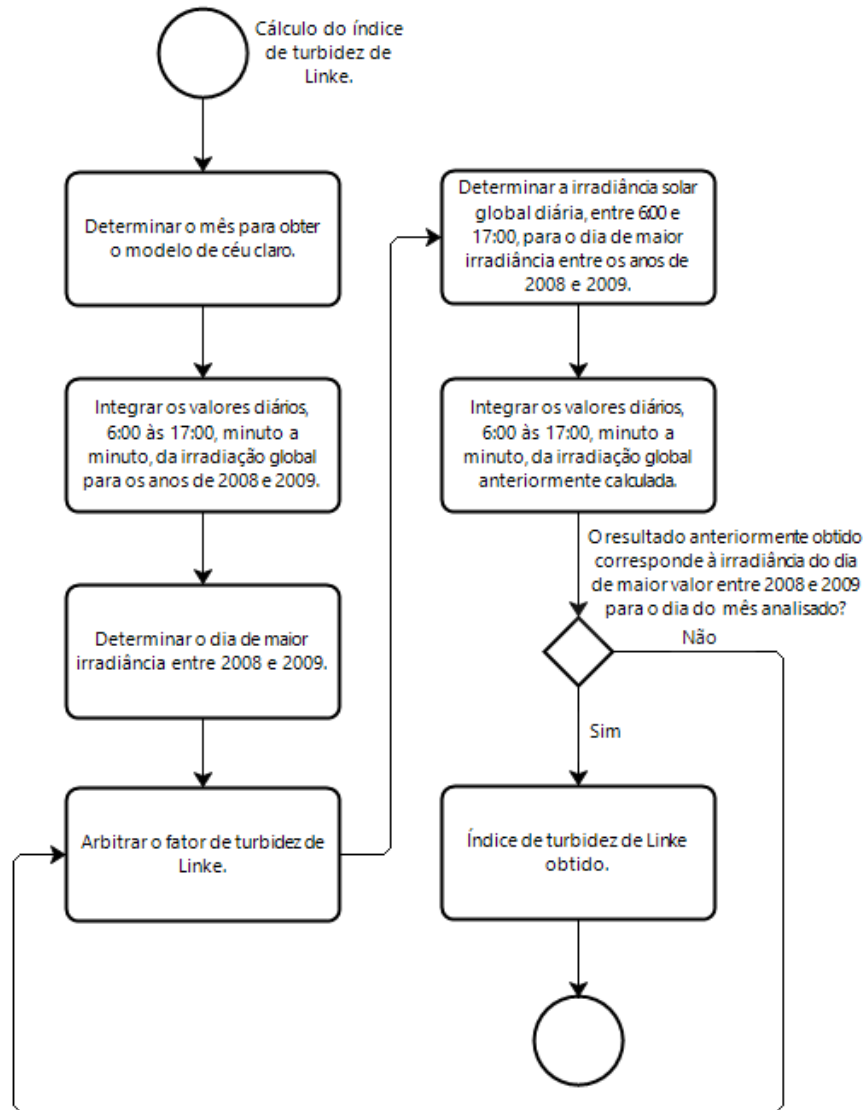


Figura 4 - Fluxograma para obtenção do fator de turbidez de Linke.

4. RESULTADOS DO MODELO DE CÉU CLARO E DAS RAMPAS DE POTÊNCIA

Os valores do índice de turbidez de Linke ao longo do ano podem ser vistos na Fig. 5. O máximo valor ocorre no verão (dez - mar) em Coruripe e pode ser explicado devido a maior proximidade da estação em relação a costa. No verão há um maior aquecimento do oceano, o que permite uma maior evaporação de partículas de água para atmosfera tornando-a mais úmida. O valor de turbidez de Linke igual a 4 caracteriza, segundo Scharmer (1994), uma atmosfera úmida.

Com a determinação do fator de turbidez de Linke o modelo de céu claro pode ser gerado. Na Fig. 6 são mostrados para os meses de janeiro e julho, para a estação Coruripe. Como esperado, os resultados dos níveis de irradiação no mês de janeiro são mais acentuados em relação ao mês de julho devido ao verão.

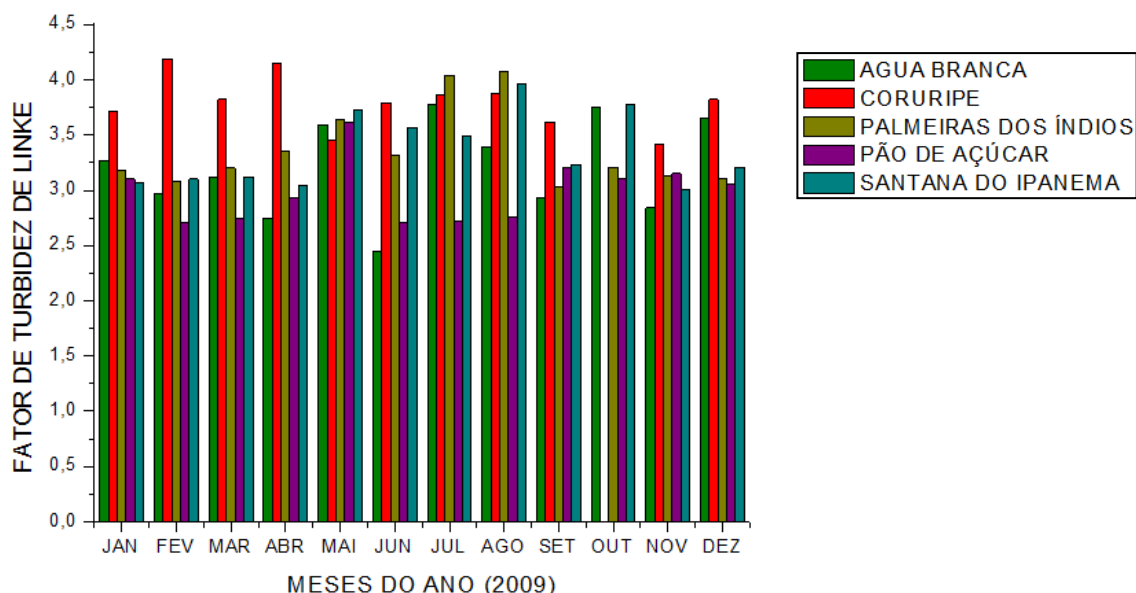


Figura 5 - Resultados do fator de turbidez de Linke para os meses de janeiro a dezembro do ano de 2009 nas estações em estudo.

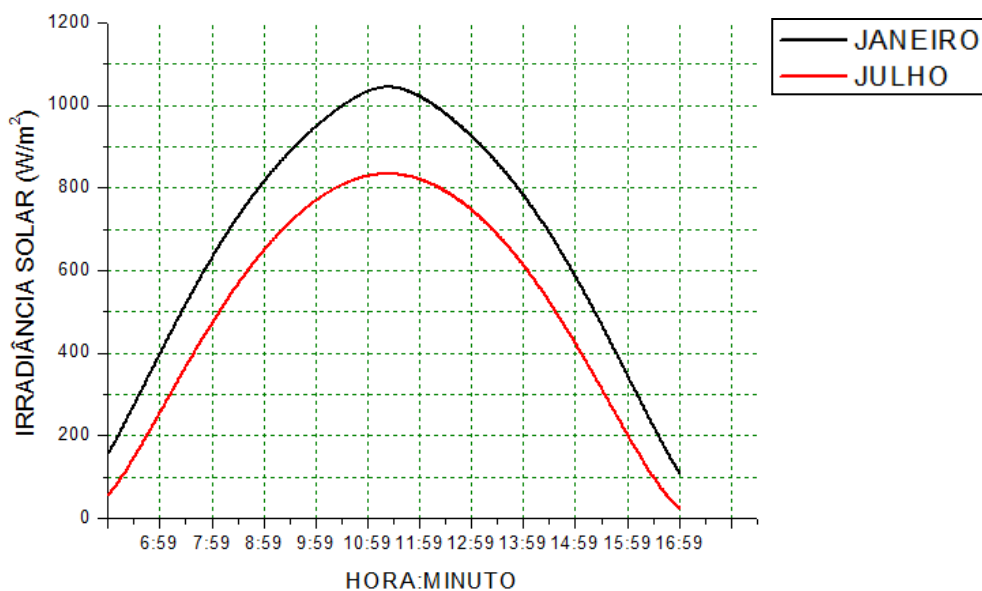


Figura 6 - Modelo de céu claro para a estação Coruripe nos meses de janeiro e julho de 2009.

A Fig. 7 mostra o comportamento dos máximos valores de rampa observados na estação Água Branca nos dias do mês de dezembro de 2009 nos intervalos em estudo. Segundo a Fig. 7, os valores máximos de rampas diminuem à medida que o intervalo de tempo aumenta.

A Tab. 1 mostra o comportamento do número diário de rampas de potência na estação Água Branca no mês de dezembro de 2009. De acordo com a Tab. 1 percebe-se a ocorrência de rampas em todas as faixas de intervalo de tempo de 1 minuto. Para o intervalo de 5 minutos há eventos nos três menores intervalos, sendo o maior, em número de rampas, em $[50;100 \text{ W/m}^2 \cdot \text{min}]$, se comparado com outras escalas de tempo. Rampas neste intervalo apresentam-se em maior número em diversos meses do ano, sendo mais comum na estação do verão. O comportamento das rampas nos intervalos $[100;200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{min}]$ concentram-se na base de tempo de 1 e 5 minutos. Para rampas acima de $200 \text{ W/m}^2 \cdot \text{min}$ a base de tempo posiciona-se apenas no intervalo de 1 minuto. Desta forma, para um tempo de 1 minuto é necessário sistemas de armazenamento de energia mais robustos. Para as escalas acima de 15 min as rampas de potência concentram-se na menor faixa.

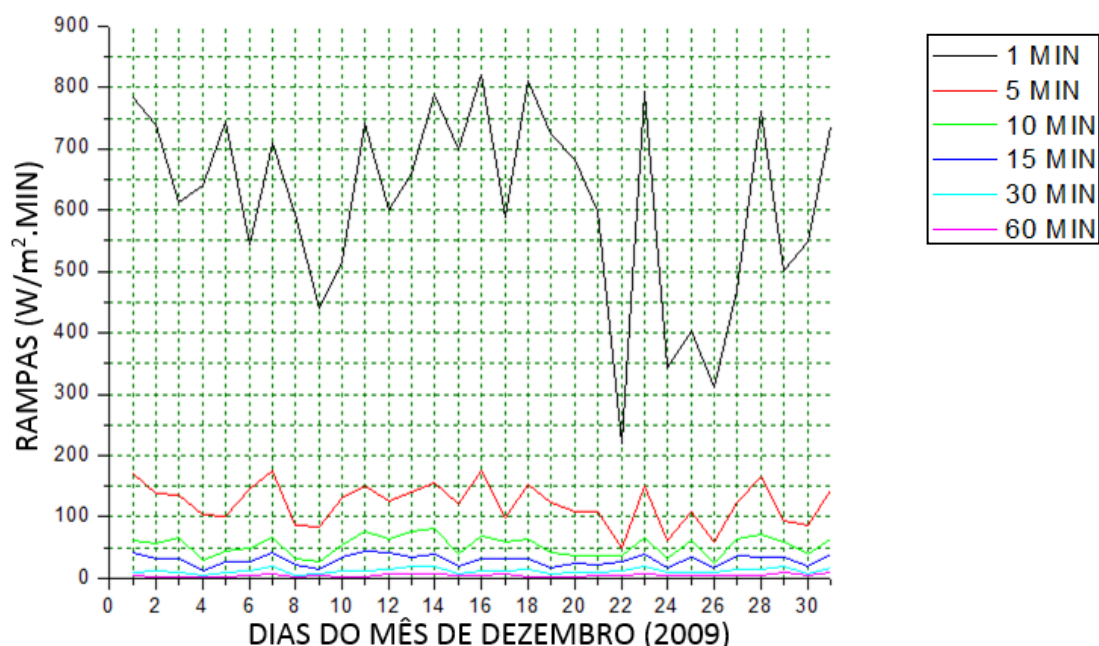


Figura 7 - Máximos valores das rampas, em $W/m^2 \cdot min$, observados no mês de dezembro na localidade de Água Branca.

Tabela 1 - Número das rampas em dezembro de 2009 na estação Água Branca.

Tempo (minutos)	0 ;50 $W/m^2 \cdot min.$	50;100 $W/m^2 \cdot min.$	100;200 $W/m^2 \cdot min.$	>200 $W/m^2 \cdot min.$
1	7285	813	666	891
5	8506	926	206	0
10	9233	131	0	0
15	9118	0	0	0
30	8741	0	0	0
60	7613	0	0	0
120	4974	0	0	0
180	3258	0	0	0

Para determinar a localidade de maior variabilidade foi realizado o somatório das rampas de potência mensal no ano de 2009. A Fig. 8 mostra os resultados obtidos. De acordo com os resultados verifica-se que a estação Coruripe apresenta os maiores resultados na estação do Verão, nos demais meses os resultados posicionaram-se de forma intermediária, assim apresenta-se como a estação com maior variabilidade entre todas as estações. A estação Pão de Açúcar aparece como a estação de menor variabilidade em vários meses do ano. Assim, pode-se dizer que é a melhor localidade para uma possível instalação de uma usina solar tomando como principal fator as rampas de potência. A média anual para as estações Água Branca, Coruripe, Palmeiras dos Índios, Pão de Açúcar e Santana do Ipanema foram 552,74 , 601,47 , 521,30 , 410,46 , 534,53 $kW/m^2 \cdot min$, respectivamente.

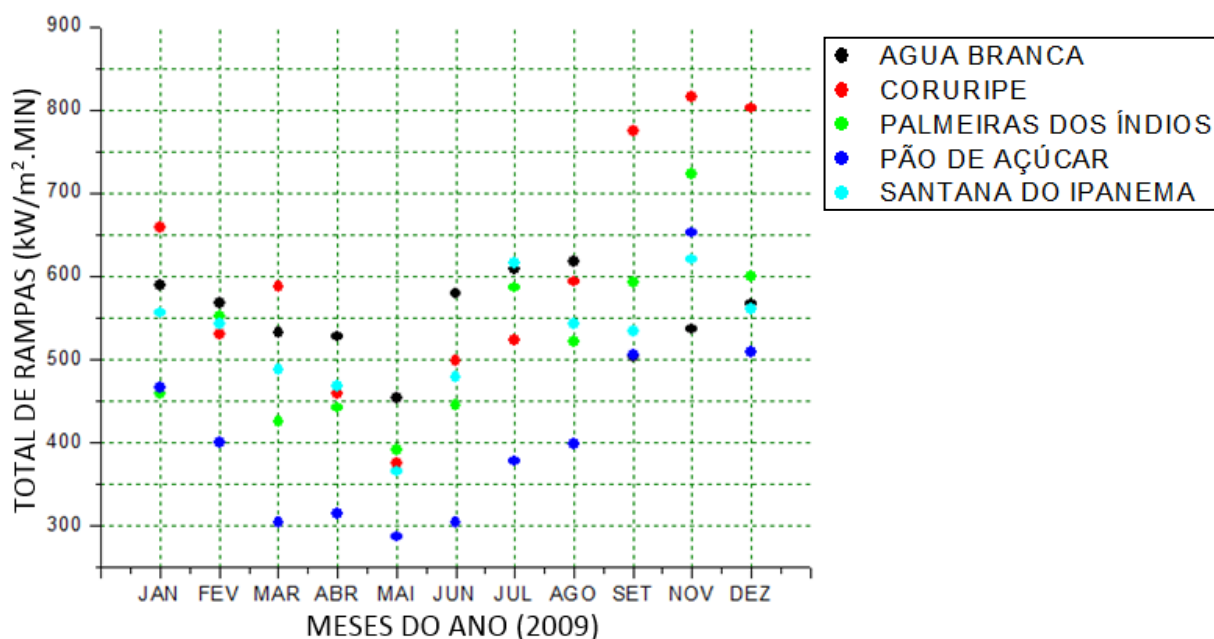


Figura 8 - Total de rampas, kW/m².min., entre os meses de janeiro e dezembro de 2009 nas estações de Água Branca, Coruripe, Palmeiras dos Índios, Pão de Açúcar e Santana do Ipanema.

5. CONCLUSÕES

O fator de turbidez de Linke decresce do litoral para o interior sendo maior em Coruripe devido a sua maior proximidade com o mar. As maiores rampas de potência são observadas nas menores escalas de tempo, 1 e 5 minutos. Para as escalas de tempo acima de 15 minutos as rampas ficam concentradas na faixa entre 0 e 50 W/(m².min). A estação Pão de Açúcar apresenta a menor média anual de rampas. Assim, sob o ponto de vista da média anual de rampas esta estação é a melhor localidade para instalação de uma usina solar.

REFERÊNCIAS

- Becker, S. 2001. Calculation of direct solar and diffuse radiation in Israel. *International Journal of Climatology*, v.21, p. 1561-76.
- Christelle, R., Olivier, B., Lucien, W. 2000. On the clear sky modelo f the ESRA – European Solar Radiation Atlas Whith Respect to the Heliostat Method. *Solar Energy*, v. 68, p. 33-48.
- Lave, M., Kleissl, J. 2010. Solar variability of four sites across the state of Colorado. *Renewable Energy*, v. 35, p. 2867 – 2873.
- Scharmer, K. 1994. Esra Handbook. *International Journal of Solar Energy*, v. 3, p. 81-87.
- Seguel, J. I. L. Projeto de um sistema fotovoltaico autônomo de suprimento de energia usando a técnica MPPT e controle digital. 2009. 206 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais.

VARIABILITY OF SOLAR IRRADIATION ON A SCALE OF MINUTES IN THE STATE OF ALAGOAS

Abstract. The development of this research was performed from the collected data of global solar irradiation in five localities of Alagoas during the years of 2008 and 2009. They are: "Água Branca", Coruripe, "Pão de Açúcar", "Palmeira dos Índios" e "Santana do Ipanema". To obtain the data of each locality (solarimetric station) it was used a global solar irradiation sensor, the black and white pyranometer. This sensor was mounted on a metal structure of three meters high on a fixed axis and positioned in north-south direction, avoiding possible shading. The storage of the global solar irradiance data was performed using a data acquisition system with storage capacity of about 50 days. Data were analyzed according to the power variability, called in this paper by the term "ramp rate". The results of this "ramp rate" can have positive or negative values. In this paper the negative results were analyzed, as are caused by shading due to clouds moving over the sensor. The negative results of ramp rates were operated on time scales 1,5,10,15,30,60,120 and 180 minutes. The higher power ramps are observed in smaller time scales, 1 to 5 minutes. For the time scales above 15 minutes, the ramps are concentrated in the range of 0 to 50 W/(m².min). The locality of Pão de Açúcar presents the smallest totalized annual average of ramps. Therefore, it can be concluded that it is the best locality for a possible installation of a solar plant if this is the only aspect considered.

Key words: Solar Irradiation, Power Ramp, Power Variability