



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPT/07

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - GPT

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

Produção eficiente de energia elétrica utilizando painéis fotovoltaicos com custo operacional reduzido

Igor Ferreira do Prado (*)
UESC

Taís Mirele F. da Silva
UESC

Marcelo Bento Pisani
UESC

Rodrigo Dórea da Silva
UESC

RESUMO

Foi proposto um dimensionamento eficiente do sistema de geração fotovoltaica, com o intuito de determinar os equipamentos necessários para atendimento de uma unidade residencial padrão. Foi considerado também o projeto de um sistema armazenador de energia capaz de alimentar a mesma carga por um período de um dia sem geração. Atualmente é comum a prática de instalação das placas com inclinação fixa igual ao grau da latitude, foi proposta uma metodologia de alocação variável da angulação ao longo do ano, com o objetivo de maximizar a geração de energia com um custo operacional reduzido.

PALAVRAS-CHAVE

Geração distribuída, Energia solar fotovoltaica, Eficiência energética.

1.0 - INTRODUÇÃO

A procura por fontes de energias alternativas tem crescido em muitos países, buscando-se uma forma eficiente para suprir suas demandas internas. No que tange a captação da energia solar, o Brasil recebe uma irradiação média de 5 kWh/m²/dia. Esta fonte alternativa de energia renovável converte diretamente a luz solar em energia elétrica, e, após a conversão, a mesma é coletada, armazenada e processada por dispositivos eletrônicos. Sabe-se que quanto maior a radiação solar maior será a quantidade de eletricidade produzida, tal irradiância mostra o espetacular potencial de utilização dessa fonte de energia dentro da matriz energética brasileira.

Um desafio existente além da produção da energia é a sua distribuição para os locais de consumo. Nesse aspecto a Geração Distribuída tem fundamental importância, pois é uma fonte de energia ligada diretamente à rede de distribuição ou ao local de medição do cliente, podendo ser instalada próximo aos centros de carga, minimizando as perdas e atendendo, também, as regiões onde o potencial de expansão dos sistemas de transmissão ou distribuição é limitado, além de ter um aumento da eficiência energética global.

Com o desenvolvimento do conceito de *Smart Grid*, cujo objetivo é tornar o sistema elétrico de potência mais interligado e eficiente, surgiu a proposta de se utilizar diversas fontes de energia, sendo que esses sistemas incluem geradores baseados em biomassa, turbinas de combustão, microturbinas, sistemas de concentração de energia solar térmica e fotovoltaica, pequenas centrais hidrelétricas, turbinas eólicas, entre outros e, apresentam características de serem compostos por redes renováveis.

Este trabalho apresenta um estudo voltado para a caracterização de sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica, evidenciando também a importância e a relação otimizada de uso entre fontes renováveis de energia. Além disso, dimensionou-se a quantidade de carga necessária para alimentar uma residência padrão, constatando

(*) UESC – Universidade Estadual de Santa Cruz – sala: Colegiado de Engenharia Elétrica - Pavilhão de Ciências Exatas e Tecnológicas – CEP 45662-900, Ilhéus, Ba, – Brasil Tel: (+55 77) 99119-7043 – Fax: (+55 – Email: igorfprado@yahoo.com.br

a necessidade de um sistema de armazenamento de energia, este composto por 4 baterias, para armazenar a carga a ser consumida pela família.

2.0 - METODOLOGIA

Este trabalho apresenta um estudo voltado para a caracterização de sistemas de geração de energia elétrica fotovoltaica, com o objetivo de analisar os aspectos que influenciam no rendimento global da instalação. Foi proposto um dimensionamento eficiente do sistema de geração fotovoltaica, bem como novas formas de alocação variável da angulação do painel solar ao longo do ano através de cálculos precisos que levam em conta a inclinação do sol no decorrer dos meses. Em seguida, propôs-se a divisão do ano em duas partes, com diferentes angulações, a fim de aumentar a potência máxima gerada. Outro fator avaliado que influencia na capacidade de geração de energia elétrica é o aumento de temperatura.

O trabalho foi desenvolvido em etapas: 1ª etapa - Dimensionamento do sistema de geração e armazenamento de energia; 2ª etapa: Cálculos de posicionamento; 3ª etapa: teste de eficiência.

2.1 Dimensionamento do sistema

Este projeto se iniciou com o estudo de assuntos relacionados com o aproveitamento da energia solar, para geração de energia elétrica, bem como nos aspectos gerais do funcionamento de sistemas fotovoltaicos isolados e as características que influenciam o seu rendimento (como o posicionamento do painel fotovoltaico e efeito da temperatura), além do dimensionamento do sistema. Abaixo, ilustra-se um sistema solar fotovoltaico OFF-GRID ou autônomo [9], ver Figura 1.

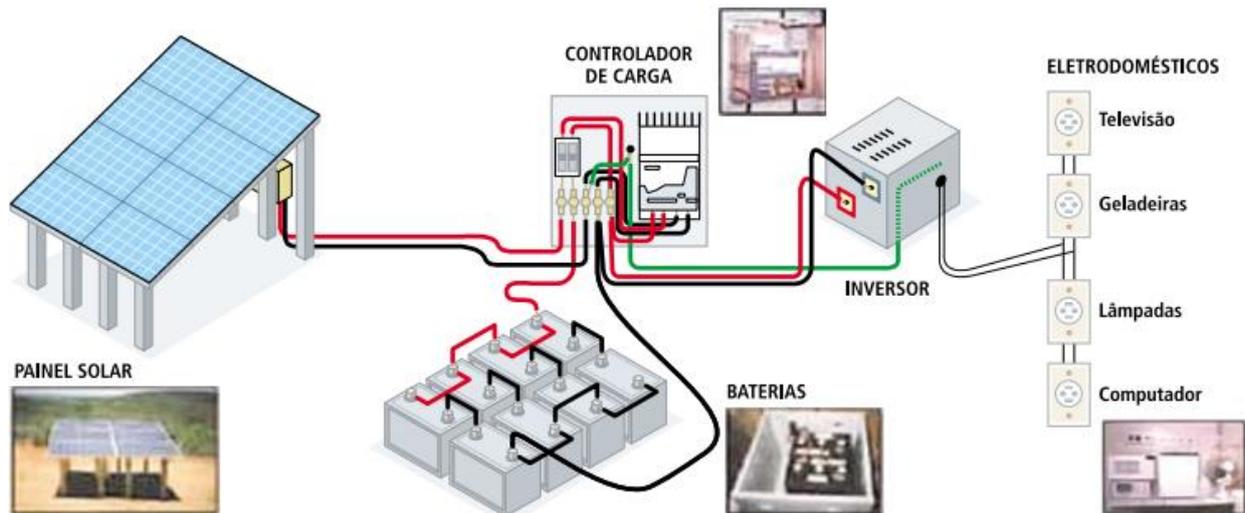


FIGURA 1 – Ilustração de um sistema de geração fotovoltaica OFF-GRID de energia elétrica (fonte: Atlas de energia elétrica ANEEL [9])

Analisou-se o dimensionamento do sistema fotovoltaico, calculando a energia consumida por uma casa com três pessoas, como é apresentado na Tabela 1, podendo, assim, dimensionar a capacidade do banco de baterias para o sistema que será montado, ou seja, a quantidade de baterias necessária para alimentar uma casa (com consumo médio de aproximadamente 2500 Wh diariamente). Há uma dada importância nesses cálculos, pois na queda ou falta de energia (em decorrência do tempo nublado, chuvoso ou sombreamento), o banco de baterias entra em ação, alimentando assim a residência. Para calcular a energia consumida diariamente (E_c) multiplicou-se a quantidade de eletrodomésticos (X) pela potência média de cada um (P) e pelo tempo de uso diário (T), obtendo assim o consumo diário, conforme Eq. 01. Para obter o consumo mensal (E_{cm}) basta multiplicar o consumo diário (E_c) pelos dias de uso mensal (Y), conforme Eq. 02. Ver Tabela 1.

$$E_c = X * P * T \quad \text{Eq. (01)}$$

$$E_{cm} = E_c * Y \quad \text{Eq. (02)}$$

Eletrrodomésticos:	Quantidade e - X:	Potência média [W] - P:	Dias de uso mensal - Y:	Tempo de uso diário [h] - T:	Consumo diário [Wh] - E _c	Consumo mensal [kWh] - E _{cm} :
Geladeira	1	100	30	8,00*	800,0	24,000
Fogão	1	60	30	0,17	10,2	0,306
Ferro	1	1000	8	0,28	280,0	2,240
Televisão 29"	1	55	30	4,90	269,5	8,085
Ventilador	1	120	28	1,60	192,0	5,376
Liquidificador	1	300	28	0,03	9,0	0,252
Lâmpadas	6	5	30	4,90	147,0	4,410
Carregador de celular	3	1,5	30	2,00	9,00	0,270
Carregador de NOTEBOOK	1	300	30	2,50	750,0	22,500
Aparelho de som pequeno	1	20	25	1,00	20,0	0,500
Total:	17	1961,5	269	25,38	2486,7	67,939

* Considerando que o compressor funciona apenas oito horas diárias.

TABELA 1: Dimensionamento da energia consumida por uma residência padrão

A partir disso, pode-se calcular a energia produzida pelos módulos fotovoltaicos, a potência através do método da insolação, o dimensionamento do banco de baterias, bem como a quantidade de painéis fotovoltaicos a serem usados no sistema.

Na Tabela 2, calculou-se a energia produzida (E_p) pelos módulos fotovoltaicos, adotando o método da insolação, através da potência já estabelecida pelo módulo, com um valor prévio de 205 W, e área de 1,455 m², obtendo assim uma eficiência (η_m) de 14,0893 %, conforme Eq. 03. E utilizando a insolação diária da região do Sul da Bahia, valor obtido com o auxílio do Atlas de energia elétrica do Brasil fornecido pela ANEEL[9], encontrou-se a energia produzida pelo painel (E_p), conforme Eq. 04.

$$\eta_m = \frac{P_{\max}}{A_m \cdot 1000} * 100 \quad \text{Eq. (03)}$$

$$E_p = E_s * A_m * \eta_m \quad \text{Eq. (04)}$$

CÁLCULO DA ENERGIA PRODUZIDA PELOS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS – Método a insolação:			
Potência máx. [W] - P _{máx}	Área do módulo [m ²] - A _m	Eficiência - η _m	
205	1,455	14,089 %	
Insolação diária [Wh/m ² .dia] - E _s	Área da superf. do módulo [m ²] - A _m	Eficiência do módulo - η _m	Energia produzida [Wh] - E _p
5100	1,455	0,141	1046290

TABELA 2: Cálculo da energia produzida pelos módulos fotovoltaicos, através do método da insolação

Na Tabela 3, dimensionou-se o banco de baterias, encontrando o número de baterias em série (valores necessários caso estas sejam utilizadas em série no sistema), conforme Eq. 05, a capacidade do banco de baterias (C_{banco}) através da energia armazenada (E_a) multiplicando pela tensão do banco (V_{banco}), conforme Eq. 06. A energia armazenada foi obtida utilizando o valor encontrado na Tabela 3, 2486,7 Wh, multiplicando pela profundidade de descarga da bateria, correspondente a 50%, conforme a Eq. 07. Assim como se calculou o número de baterias em série, foi calculado o número de baterias para um conjunto em paralelo, dividindo a capacidade de carga do banco de baterias (C_{banco}) pela capacidade do banco de cada bateria (C_{bat}), conforme Eq. 08.

$$N_{bs} = \frac{V_{banco}}{V_{bat}} \quad \text{Eq. (05)}$$

$$C_{banco} = \frac{E_a}{V_{banco}} \quad \text{Eq. (06)}$$

$$E_a = \frac{E_c}{Pd} \quad \text{Eq. (07)}$$

$$N_{bp} = \frac{C_{banco}}{C_{bat}} \quad \text{Eq. (08)}$$

DIMENSIONAMENTO DO BANCO DE BATERIAS:		
V_{banco} [V]	V_{bat} [V]	Número de baterias em série – N_{bs}
12	12	1
Energia armazenada [Wh] – E_a	V_{banco} [V]	Capacidade do banco de baterias [Ah] – C_{banco}
4973,40	12	414,45
Energia consumida [Wh] – E_c	Profundidade de descarga permitida (20%, 50%, 80%, etc) – P_d	Energia armazenada [Wh] – E_a
2486,70	0,5	4973,40
Capacidade de carga do banco de baterias [Ah] – C_{banco}	Capacidade de carga de cada bateria [Ah] – C_{bat}	Número de conjuntos paralelos – N_{bp}
414,45	200	2,072

TABELA 3: Dimensionamento do banco de baterias

Na Tabela 4, obteve-se a quantidade de módulos fotovoltaicos que serão necessários para o sistema. Para encontrar o número de painéis empregados dividiu-se a energia diária consumida no sistema (E_c), valor encontrado na Tabela 3, pela energia diária produzida por cada módulo (E_p), valor encontrado na Tabela 4, conforme Eq. 09.

$$N = \frac{E_c}{E_p} \quad \text{Eq. (09)}$$

QUANTIDADE DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS:			
Energia diária consumida no sistema [Wh] – E_c	Energia diária produzida por cada módulo [Wh] – E_p	Números de módulos empregados no sistema - N	
2486,70	1046,29	Calculado	Utilizado
		2,38	3

TABELA 4: Quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para o sistema

Partindo do pressuposto que existe um consumo de 2486,7 Wh diariamente, dois módulos não seriam suficientes para gerar energia para a residência, logo, serão utilizados três módulos, havendo uma sobra de energia referente a 652,17 Wh. Tendo em vista os constantes avanços tecnológicos, essa sobra de energia pode ser utilizada, e se faz necessária, quando houver a compra de novos eletrodomésticos.

Ao longo do desenvolvimento do projeto procurou-se analisar aspectos necessários para ter um maior aproveitamento do sistema de geração de energia, dentre esses aspectos pode-se citar o posicionamento e o ângulo de inclinação da placa.

2.2 Cálculos de posicionamento

Na análise do ângulo de inclinação da placa houve, primeiramente, uma análise local/regional do posicionamento do sol e das taxas de radiação solar incidente para localização adequada das placas, com o intuito de maximizar a produção de energia elétrica e melhorar a eficiência da placa solar.

Atualmente o posicionamento de placas fotovoltaicas é realizado de modo prático, através de tabelas que relacionam a posição geográfica (latitude/longitude), para se obter uma angulação média de inclinação da placa fotovoltaica, para tal situação a placa é instalada de forma fixa ao longo do ano, para região sul da Bahia utiliza-se uma inclinação fixa igual a 14°, referente a latitude local. Com isso a melhor maneira de instalar um módulo solar fixo é orientá-lo com sua face voltada para o norte geográfico, que corresponde ao ângulo azimutal, este é o ângulo de orientação dos raios solares em relação ao norte geográfico.

Com a motivação de se melhorar a eficiência global do sistema o projeto deu seu prosseguimento com a análise dos ângulos de inclinação da placa solar. Como o ângulo de altura do sol possui grande variação ao longo das estações do ano, sendo a altura do Sol no céu maior nos dias de verão, determinaram-se dois ângulos para a inclinação do painel, observando sua variação no período de verão-primavera e outono-inverno, e obtendo os ângulos para o horário de maior incidência de luz solar. Estes fatores são importantes e imprescindíveis para uma melhor eficiência das placas solares. O ângulo alfa calculado (ângulo de inclinação), é responsável por fazerem os raios solares incidirem perpendicularmente à superfície do módulo, maximizando a captação da radiação solar direta.

Através do site Solar Topo [10], obteve-se o ângulo zenital correspondente à altura solar para todos os meses do ano em um dia fixo, e em horários em que os picos de incidência de luz são maiores, por volta de meio dia, e a latitude local. Devido a grande variação do ângulo de inclinação nos meses, calculou-se uma média para o ano, como é apresentado na Tabela 5: Latitude e inclinação para épocas específicas do ano para a Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). Além da média anual, calculou-se a inclinação dividindo o ano em duas partes: verão-primavera e outono-inverno, obtendo, assim, a inclinação para os meses de abril a setembro, correspondente ao período do outono-inverno, e de outubro a março, ao período do verão-primavera, ver Tabela 5.

Média anual (jan – dez)	Média – OUTONO- INVERNO (abr – set)	Média – VERÃO- PRIMAVERA (out – mar)	Latitude
18,715833°	30,303333°	7,128333°	14°

TABELA 5: Latitude e inclinação para duas épocas específicas do ano para a UESC

Em seguida, utilizou-se quatro ângulos, que foram parametrizados para simulação em bancada de laboratório, sendo zero grau referente à média anual calculada de 18,72°, cinco graus foi o ângulo aproximado referente à diferença entre a média anual e o ângulo de inclinação da latitude local (UESC: 14°), os setes graus, aproximadamente, foram referentes à diferença entre o ângulo de inclinação calculado para o ano e a média verão-primavera e o ângulo aproximado de dezesseis graus foi referente à média outono-inverno.

3.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os estudos teóricos bem como a execução do projeto, geraram alguns resultados para análise e comprovação do que foi estudado. Abaixo seguem os gráficos plotados a partir dos resultados obtidos no experimento.

Após a execução das medidas de tensão, corrente e temperatura, plotou-se os gráficos a fim de analisar as curvas de corrente X tensão ($I \times V$) e potência X tensão ($P \times V$), e observar qual das angulações trouxe uma melhor eficiência para a placa solar e quais os parâmetros físicos que impossibilitaram determinadas angulações de obterem uma melhor eficiência.

O melhor aproveitamento da energia solar ocorre quando os raios incidem perpendicularmente ao módulo [7], ou seja, com um ângulo de inclinação igual a zero grau. Tendo em vista essa característica do módulo, utilizou-se as medidas com inclinação de zero grau para analisar-se os efeitos de temperatura e irradiância sobre a placa solar.

No Gráfico 1 a seguir, tem-se todas as curvas de posicionamento (ângulos: 0°, 5°, 7° e 16°) para $I \times V$, a uma temperatura monitorada entre 25° e 30°C.

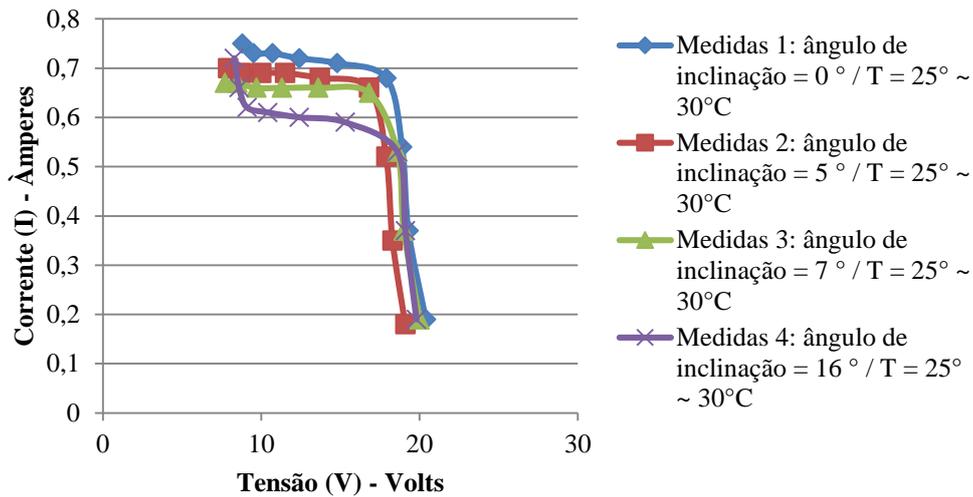


GRÁFICO 1: Curva de I x V para os diferentes ângulos calculados

Este gráfico apresenta a curva de corrente X tensão para os diferentes ângulos de inclinação, e pode-se notar que a curva que apresenta um melhor rendimento se refere à inclinação de zero grau, ou seja, quando o sol se posiciona perpendicularmente a placa solar. No experimento foi utilizado a placa composta por quinze lâmpadas incandescentes para simular o efeito de radiação solar.

O Gráfico 2 a seguir, apresenta a curva P x V para os diferentes ângulos calculados.

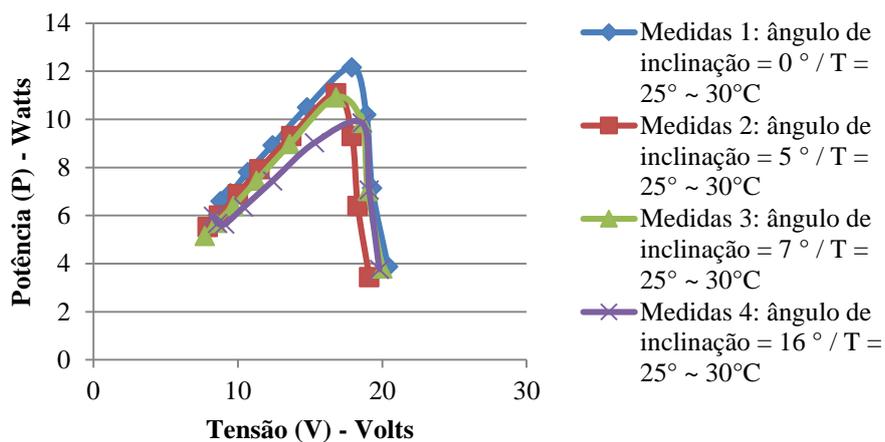


GRÁFICO 2: Curva de P x V para os diferentes ângulos calculados

O Gráfico 2 apresenta a curva potência X tensão para esses mesmos ângulos, e nota-se que a curva que apresenta um melhor desempenho é a curva referente à inclinação de zero grau.

No Gráfico 3 a seguir, apresenta-se a curva de I x V para o ângulo de zero grau, no entanto, com temperaturas de monitoramento diferentes, sendo uma curva a 25° ~ 30°C e outra a 65°C. Objetivando analisar o efeito da temperatura sobre a placa solar.

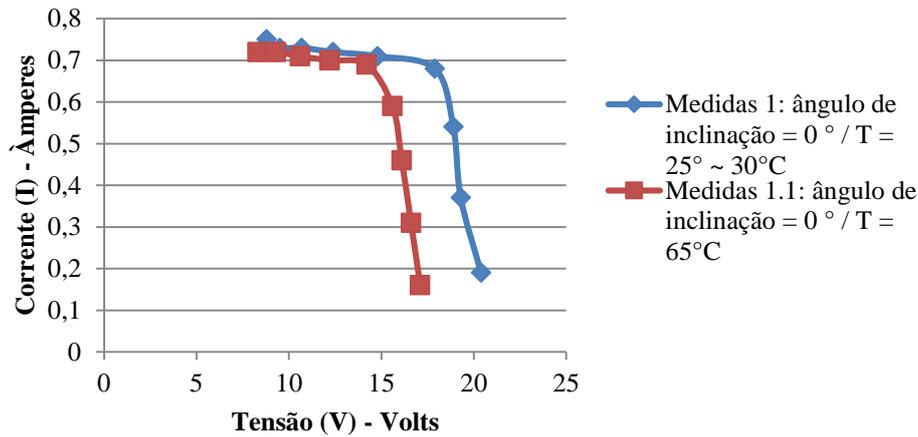


GRÁFICO 3: Curva de I x V para as diferentes temperaturas

O gráfico 3 mostra as curvas de IxV para o ângulo de inclinação a zero grau, entretanto, com as temperaturas do módulo solar diferentes. A temperatura tem influência na tensão que o módulo fornece em seus terminais e conseqüentemente na potência fornecida.

O gráfico 4 a seguir, apresenta a curva P xV para as diferentes temperaturas a uma mesma angulação

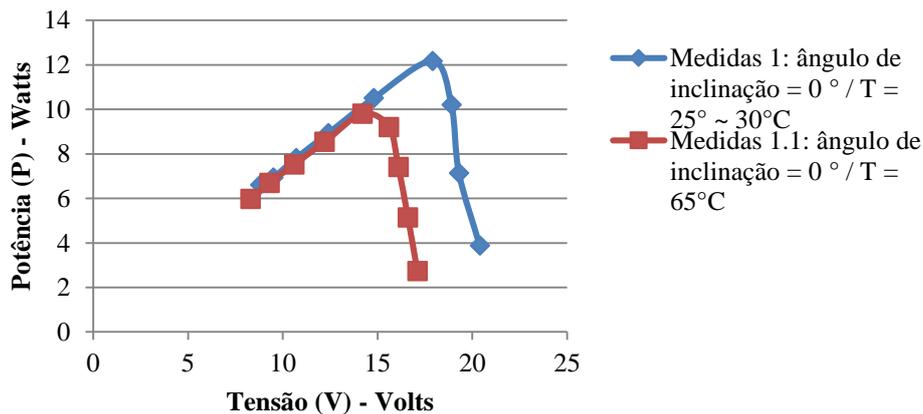


GRÁFICO 4: Curva de P x V para diferentes temperaturas

As tensões são maiores para temperaturas mais baixas e em temperaturas mais altas as tensões são menores e a corrente fornecida pelo módulo não se altera com a temperatura. É o que pode ser observado no gráfico 4, haja vista que a potência é o produto da tensão e da corrente do módulo, pois quando a temperatura aumenta, a potência fornecida pelo módulo diminui [7].

Os resultados deste trabalho indicam que o posicionamento do módulo solar apresenta forte influência nos resultados do rendimento e eficiência que ele pode apresentar. As análises feitas anteriormente possibilitaram chegar a essa conclusão, pois os fatores ambientais que influenciaram significativamente na eficiência do módulo foram a temperatura e as variações angulares.

4.0 CONCLUSÃO

A relevância deste trabalho evidenciou-se através dos estudos feitos a fim de obter um melhor rendimento para o painel solar e, conseqüentemente, aperfeiçoar os estudos voltados para a implantação do sistema solar fotovoltaico OFF-GRID mais eficiente. Tal constatação se dá em razão da análise das curvas de eficiência para diferentes ângulos, avaliando assim o posicionamento do módulo solar.

Conclui-se que os resultados obtidos foram satisfatórios, visto que esta apresentava uma melhor eficiência da placa para o posicionamento perpendicular ao sol, isto é, com ângulo de inclinação igual a zero grau, e isso pode ser constatado através dos gráficos X e Y.

Portanto foi validado em laboratório que o método de alocação de placas fotovoltaicas proposto, se mostrou eficiente, visto que apresentou uma maior quantidade de energia gerada quando comparado com a técnica convencional de posicionamento utilizando apenas a latitude do local, proporcionando uma maior geração de energia aliado a um baixo custo operacional de posicionamento do sistema de geração.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS [REVER SE TODAS AS REFERÊNCIAS FORAM CITADAS]

- (1) PACHECO, Fabiana. Economia em Destaque. Energias Renováveis: breves conceitos.
- (2) PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU S. L.; RUTHER R. Atlas Brasileiro de Energia Solar. – São José dos Campos: INPE, 2006.
- (3) Ministério de Minas e Energia. Disponível em: http://www.mme.gov.br/web/guest/paginainicial/outrasnoticias//asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030. Acesso em 01 de agosto de 2016.
- (4) Solarterra – Soluções em Energias Alternativas. Energia Solar Fotovoltaica. Guia Prático. São Paulo – SP.
- (5) GEOSOLARES. Energias Renováveis. Disponível em: <http://www.geosolares.com.br/energia-solar/>. Acesso em 02 de agosto de 2016.
- (6) COELHO, Daniel. Escola da Energia: Como funciona a Energia Solar Fotovoltaica.
- (7) Villalva, M. G.; J. R. Gazoli. “Energia Solar Fotovoltaica: conceitos e aplicações”. Editora: Érica. 2012. São Paulo.
- (8) Empresa de Pesquisa Energética (EPE). “Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira.” Rio de Janeiro, maio/2012 (Nota Técnica).
- (9) Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 2. Ed. – Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.: il.
- (10) SOLAR TOPO. Dom calculadora posição – Azimute e Zenith. Disponível em: <http://www.solartopo.com/posicao-do-sol.htm>. Acesso em 04 de novembro de 2015.

6.0 DADOS BIOGRÁFICOS

6.1 Igor Ferreira do Prado



Nascido no ano de 1988, natural de Vitória da Conquista na Bahia, possui graduação em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal da Bahia - Campus de Vitória da Conquista (2011) e mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do ABC (2013). Atualmente é professor assistente da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: técnicas de otimização aplicadas a sistemas de energia elétrica, alocação de perdas em sistemas de potência, otimização e metaheurísticas aplicadas a problemas de energia elétrica, geração distribuída e fontes de energias renováveis.