

ÁRVORE FOTOVOLTAICA: ANÁLISE, SIMULAÇÃO E MONTAGEM DE UM PROTÓTIPO

Fagner Felipe Domingos Dantas – fagner_felipe13@hotmail.com
Pedro Guilherme Gomes de Carvalho – pedroguilherme.gc@outlook.com
Dennys Lopes Alves – dennys.alves@ifrn.edu.br

Instituto Federal do Rio Grande do Norte – Campus João Câmara – Graduação em Tecnologia de Energias Renováveis

Resumo. *O presente trabalho retrata um sistema de captação de luz solar para obtenção de eletricidade: a árvore solar fotovoltaica. Além disso, aborda algumas das etapas que foram necessárias à realização das simulações, os cálculos correlacionados, explicações acerca do princípio operativo e os elementos necessários à montagem e consecução do primeiro protótipo, uma vez que as atividades de pesquisa ainda estão em desenvolvimento. Quanto aos aspectos metodológicos utilizou-se de pesquisas bibliográficas em trabalhos similares e correlatos à temática, simulações computacionais nos softwares Labcenter Proteus e Powersim Psim, seguidos da aquisição de dados em campo, após a construção do respectivo protótipo. O principal objetivo do protótipo é maximizar a produção de energia solar fazendo uso da sequência de Fibonacci, utilizar uma menor área terrestre para a finalidade anterior e proporcionar uma estrutura que é diretamente ligada à natureza, nos remetendo a sustentabilidade. Todo o trabalho descrito durante o transcorrer deste texto foi desenvolvido dentro das instalações físicas do Instituto Federal de Educação do Rio Grande do Norte - Campus João Câmara entre os meses de junho de 2017 e novembro de 2017. A eletricidade gerada é proveniente da instalação de minimódulos fotovoltaicos posicionados nas pontas dos galhos da versão inicial da árvore desenvolvida. O sistema incorpora uma fonte de tensão, uma fonte de corrente e um circuito de amostragem e apresentação dos valores de tensão e corrente gerados. Os resultados obtidos são satisfatórios, porém conclui-se haver a necessidade de incluir dispositivos de proteção contra sobrecargas e sobrecorrente, além de circuitos de proteção contra inversão de polaridade dos bornes de saída das respectivas fontes.*

Palavras-chave: *Árvore Fotovoltaica, Árvore Solar, Fonte de Corrente Fotovoltaica.*

1. INTRODUÇÃO

A eletricidade é considerada insumo fundamental para o desenvolvimento econômico e social. Apesar disso, cerca de 30% da população mundial não tem acesso à eletricidade (LOPES, 2012). Dessa forma, a energia solar fotovoltaica produzida poderia sanar esse tipo de problema, pois conforme Villalva & Gazoli (2013), os sistemas autônomos, também chamados sistemas isolados, são empregados em locais não atendidos por uma rede elétrica. Tais sistemas podem ser usados para fornecer eletricidade para residências e zonas rurais, na praia, no camping, em ilhas e em qualquer lugar onde a energia elétrica não esteja disponível.

A partir de observações de um jovem chamado Aidan Dwyer, descobriu-se que as árvores poderiam ser uma opção para os problemas de baixa produtividade fotovoltaica. Ele constatou que as árvores obedeciam uma sequência denominada de Fibonacci, e no caso das plantas, o mesmo afirma, e muitos cientistas abraçam a teoria, que elas resultam num ganho de coleta de luz solar em razão da disposição de seus galhos e de seu arranjo estrutural. Tal afirmação obviamente requisita de comprovação científica, entretanto despertou-nos o interesse pela temática e posteriormente ensejou o desejo pela montagem de um sistema análogo. A ideia foi posicionar minimódulos fotovoltaicos nas pontas dos galhos de um protótipo de árvore, emulando as folhas de uma árvore convencional. Com esta invenção, Dwyer ganhou o prêmio de Jovem Naturalista, concedido pelo Museu Americano de História Natural em 2011.

Neste contexto, a árvore fotovoltaica propõe-se a produzir eletricidade por meio de um formato não convencional, de modo a economizar espaço e proporcionar melhor mobilidade, podendo ser transportada facilmente para outros locais. Como melhorias em relação ao trabalho proposto por Aidan Dwyer, a árvore desenvolvida neste trabalho, apresenta os resultados climatológicos de sua circunvizinhança (temperatura e umidade) e de geração (tensão e corrente proveniente dos minimódulos) através de voltímetros e displays eletrônicos interligados a um microcontrolador *Atmega 328p*, embarcado na plataforma de desenvolvimento *Arduino Uno*.

Após à realização de cálculos de dimensionamento e simulações, pode-se atestar a viabilidade e as possibilidades (diferentes formas de interconexão dos módulos) existentes para diferentes níveis de tensão e corrente produzidas por este mecanismo. Estruturalmente a disposição dos módulos fotovoltaicos nos respectivos galhos obedece a sequência de Fibonacci, conforme o estudo de Aidan Dwyer. A integração do sistema-árvore-fotovoltaica a um inversor externo se dará a partir de um circuito elevador de tensão do tipo *boost*, a ser implementado nas etapas posteriores da pesquisa.

1.1 Irradiação solar

O valor do somatório da média anual da irradiação solar global se configura com um dado relevante para o dimensionamento de sistemas solares fotovoltaicos. Durante o ano, a irradiação solar global sofre variações ao longo do dia, sendo esta variação muito influenciada pela radiação direta. Além da irradiação solar global, o número de horas de luz (insolação) é também frequentemente utilizado para o dimensionamento de projetos de sistemas solares (LEÇA, 2014). Dados de irradiação podem ser obtidos, dentre outras formas, a partir de consultas a atlas solarimétricos, como por exemplo, o apresentado na Fig. 1a, ou mediante consulta em bases de dados disponíveis na internet.

Em consonância com Queiroz (2005), pode-se afirmar que os países tropicais, como consequência de seu posicionamento geográfico, possuem grande capacidade energética, por conseguinte são bastante favoráveis a exploração do potencial energético proveniente dos equipamentos solares. O Brasil, ainda de acordo com Queiroz (2005), possui significativo potencial solar com disponibilidade equivalente a $1,13 \times 10^{10}$ GWh, em quase todo o ano, como acontece, por exemplo, no Nordeste brasileiro.

De acordo com o Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica de Sergio de S. Brito – CRESESEB, a cidade de Natal/RN ($-05^{\circ} 47' 42''$ e $-35^{\circ} 12' 34''$), possui uma irradiação solar média anual de aproximadamente $5,66 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$, enquanto a cidade de Ceará Mirim/RN ($-05^{\circ} 38' 04''$ e $-35^{\circ} 25' 32''$), possui cerca de $5,5 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$. Como a cidade de interesse é a de João Câmara/RN ($-05^{\circ} 32' 15''$ e $-35^{\circ} 49' 11''$), localizada nas proximidades das duas cidades anteriores, e o CRESESEB não oferece dados referentes especificamente a cidade de João Câmara/RN, adota-se que a mesma tem por volta de $5,5 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{dia}$, uma vez que esta última está mais próxima de Ceará Mirim/RN. Tal valor explicita o potencial fotovoltaico da cidade de interesse, em razão do índice de irradiação bastante promissor a produção de eletricidade fotovoltaica.

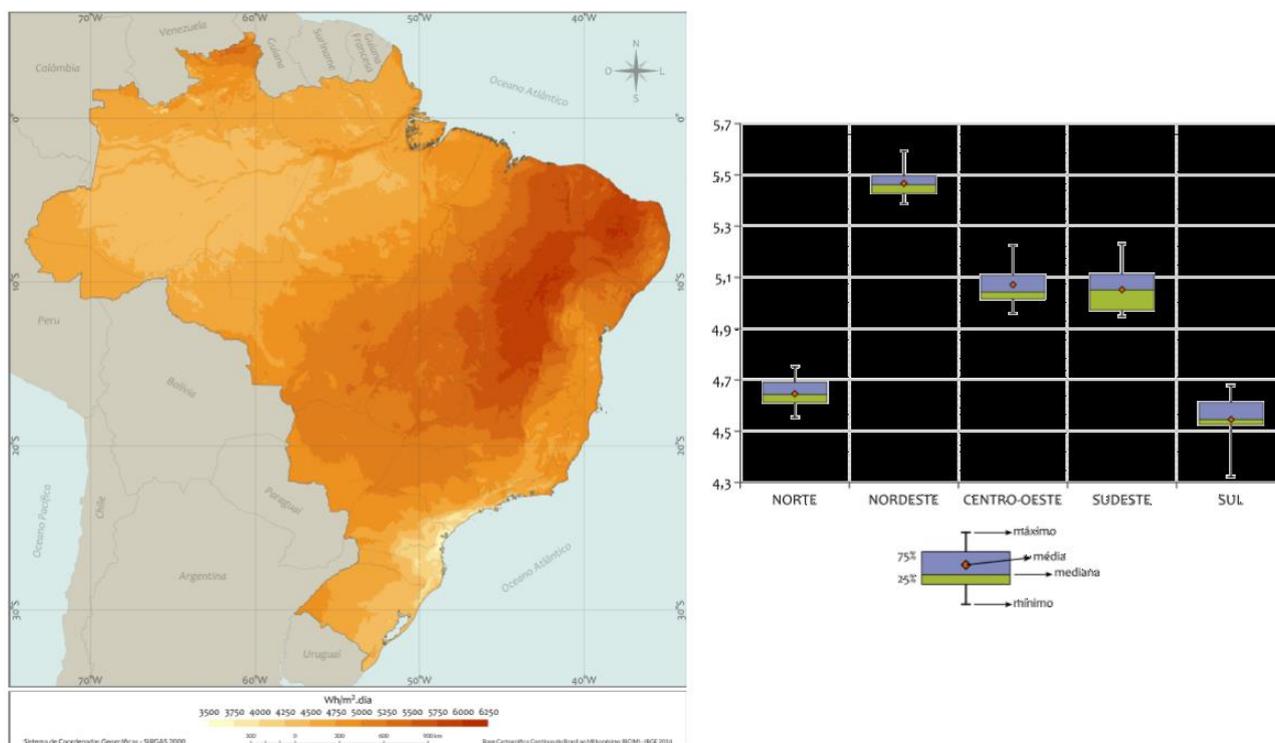


Figura 1 – Total diário da irradiação global horizontal (a) e Variabilidade das médias anuais dos totais diários de irradiação global horizontal de 2005 a 2015 para cada uma das regiões do Brasil (b). Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar (PEREIRA, et al, 2017).

Uma grandeza empregada para quantificar a radiação solar é a irradiância, expressa na unidade de W/m^2 . Outra grandeza de interesse ao entendimento do presente texto, já citada neste tópico, é a irradiação, sendo esta última também conhecida como insolação (VILLALVA & GAZOLI, 2012). Entretanto, alguns autores adotam que a irradiância é, em outras palavras, a potência entregue pelo sol, dado em W/m^2 , enquanto que a irradiação é o somatório da potência (irradiância em um intervalo de tempo), ou seja, a irradiação é energia (kWh/m^2 , Wh/m^2 , etc.). A Fig. 2 apresenta algumas das formas de incidência radiação em uma superfície plana inclinada.

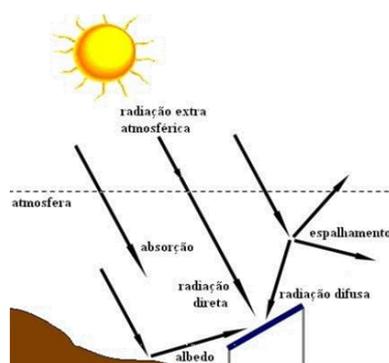


Figura 2 – Tipos de radiação. Disponível em: < <http://hccengenharia.com.br/a-irradiancia-solar-no-rio-grande-do-sul-e-suficiente-para-gerar-energia-solar/> >. Acesso em: 15/10/17.

Segundo Pereira et al. (2006), o albedo de superfície é função da refletância da camada de cobertura do solo e de seu respectivo uso. Essa refletância varia no transcorrer do ano, a depender de aspectos tais quais: grau de crescimento da vegetação, estação do ano e variações interanuais das condições do clima no sítio em análise.

A radiação global é a soma da radiação direta e da radiação difusa. A radiação direta corresponde aos raios solares que chegam diretamente do sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal com uma inclinação que depende do ângulo zenital do Sol (VILLALVA & GAZOLI, 2012). A radiação total contempla as parcelas direta, difusa e devido ao albedo.

1.3 Influência da temperatura e umidade

A temperatura ambiente é um dos fatores externos mais estudados na literatura que versa acerca da energia fotovoltaica, já que se trata de um fator de grande correlação e influência no desempenho dos módulos. Com a flutuação dos valores de temperatura, a variável que se modifica de forma mais drástica é a tensão de saída, em contra partida a respectiva corrente apresenta uma variação mínima (CANTOR, 2017). Segundo Rüter (2004), vários parâmetros podem afetar o rendimento do conjunto de módulos solares fotovoltaicos, também denominado gerador fotovoltaico. O principal deles é o parâmetro radiação solar, que depende fundamentalmente da localização geográfica da instalação, bem como da inclinação e orientação da superfície de captação do módulo.

Conforme explicado por Beltrão (2008), a condição padrão associada a construção das curvas características é definida pela norma E-1036 *Standard Methods os Testing Electrical Performance of Nonconcentrator Terrestrial Photovoltaic Modules and Arrays Using Reference Cells*, tal condição equivale a uma temperatura de 25 °C na célula, irradiância de 1000 W/m² e distribuição espectral AM 1,5. Alguns fabricantes, a fim de complementar as informações dos módulos em *Standard Test Conditions* (STC) disponibilizam ainda a *Nominal Operation Cell Temperature* (NOCT), sendo esta última definida como a temperatura que as células atingem quando submetidas às condições reais de operação (mais próximas da realidade).

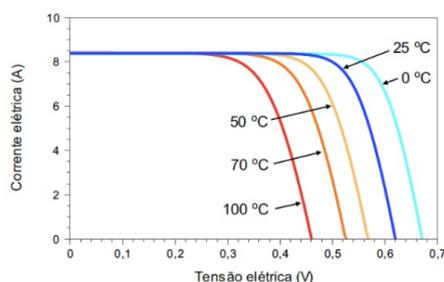


Figura 3 – Efeito provocado pela temperatura da célula na curva característica I versus V (considerando 1000 W/m²) no módulo solar fotovoltaico. Fonte: ROCHA, 2014.

A análise da Fig. 3 permite verificar que a elevação da temperatura de uma célula fotovoltaica provoca nesta uma redução de sua tensão de saída, por conseguinte a mesma tende a perder rendimento. A disponibilidade de radiação solar, apesar da extrema relevância, não é o único fator a ser considerado para a produção de eletricidade por meio da energia fotovoltaica, uma vez que a radiação solar acompanha-se frequentemente da temperatura, influenciando consideravelmente na produção de energia.

Na troca de calor entre os módulos fotovoltaicos e o ambiente que lhe rodeia, devem ser considerados dois tipos principais de convecção que interatuam nos sistemas fotovoltaicos, quais sejam: a convecção natural e a convecção

forçada, esta última, fortemente relacionada com a velocidade do vento na vizinhança dos módulos. Quanto maior a altura dos painéis, maior será a velocidade do vento transpassando os módulos. Quando a velocidade do vento é pouca ou nula, a convecção é classificada como natural ou livre, como consequência da diferença permanente de temperatura entre o módulo e o ar (CANTOR, 2017). Dessa forma, com a utilização da árvore solar aumentaríamos a dissipação de calor do módulo, melhorando seu rendimento. Quanto à influência da umidade no desempenho fotovoltaico, Cantor (2017) explica que quando a luz atinge uma gota de água no ar, podem ser consideradas três condições: refração, reflexão ou difração. Em qualquer desses casos, a quantidade de radiação direta que incide nos módulos será menor do que aquela que não sofre influência das partículas de água no ar. A umidade altera a irradiância de forma não linear e a própria irradiância provoca pequenas variações no V_{OC} também de forma não linear, além de variações consideráveis no I_{SC} . O detalhamento destas influências foge ao escopo deste trabalho.

1.4 Árvore solar fotovoltaica

Com a prática atual, segundo Palz (2002), estima-se que quase 10% da energia produzida se perde na rede de distribuição e nas instalações de redução de tensão. Com o advento da geração distribuída, dentre outras formas, através de energia solar fotovoltaica, possibilitou-se a produção de eletricidade no local de consumo, por exemplo, reduzindo as perdas nas linhas de transmissão. O jovem Aidan Dwyer ganhou a patente provisória dos Estados Unidos por suas inovações envolvendo matrizes de painéis solares e foi convidado a falar na *World Future Energy Summit* em Abu Dhabi. Na ocasião, várias empresas demonstraram interesse no projeto de Aidan, não demorando muito tempo para que sua inovação se propagasse em diversos países.

Os pequenos módulos solares, dispostos na árvore de acordo com um princípio matemático denominado como sequência de Fibonacci, maximizaram a produção de energia, quando comparados a módulos análogos montados em arranjos planos. A Fig. 4-a apresenta o módulo produzido pelo jovem pesquisador.



Figura 4 – Aidan Dwyer e sua árvore solar fotovoltaica (a) e árvore solar indiana (b). Disponível em: < <https://patch.com/new-york/northport/teen-innovator-goes-global> >. Acesso em: 06/11/2017.

Outro exemplo de utilização das árvores fotovoltaicas pode ser encontrado na Índia. Cientistas e engenheiros indianos projetaram uma árvore solar com a finalidade precípua de ajudar a superar um dos principais desafios que o país enfrenta que é justamente a geração de energia. Constituída por painéis fotovoltaicos posicionados em diferentes níveis de ramos feitos de aço, a árvore solar reduziu a quantidade de espaço necessário para o desenvolvimento de um eventual parque e/ou usina solar. Na Fig. 4-b pode-se visualizar o invento indiano. Já existem árvores solares fotovoltaicas no Brasil, como podemos visualizar através da Fig. 5-a e 5-b.



Figura 5 – Árvore solar na Universidade Estadual do Ceará (a) e Árvore solar fotovoltaico em forma de palmeira (b). Disponível em: < <http://g1.globo.com/ceara/noticia/2017/02/uece-inaugura-arvore-solar-que-carrega-ate-10-bicicletas-eletricas.html> >. Acesso em: 06/11/2017. Acesso em: 06/11/2017.

Segundo o *website* da Universidade Estadual do Ceará inaugurou-se em 21 de fevereiro de 2017 uma árvore solar constituída por módulos fotovoltaicos capazes de carregar até dez bicicletas elétricas. O equipamento é formado por dez painéis fotovoltaicos postos sobre as palmas de uma palmeira metálica. Uma árvore desenvolvida pela empresa mineira Sunew, foi apresentada no IV Encontro dos Municípios com o Desenvolvimento Sustentável (EMDS) no início do ano de 2017. A árvore estava presente em 2017, em um outro grande evento, o Rock In Rio. Além de produzir uma energia com baixo impacto ambiental, essa árvore desempenha funcionalidades adicionais como, por exemplo, um objeto paisagístico. Existem muitas outras árvores solares no mundo, cada uma possuindo características próprias. Áustria, Estados Unidos, Inglaterra, Itália e Israel são exemplos de países que aderiram às árvores solares fotovoltaicas.

2. METODOLOGIA

Neste tópico apresenta-se o conjunto de procedimentos associados à consecução das simulações e de suas respectivas montagens. O trabalho em análise tem caráter eminentemente prático, todavia pode ser classificado como uma pesquisa de natureza exploratória, uma vez que (...) “tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torna-lo mais explícito ou construir hipóteses.” (BERTUCCI, 2008).

Utilizou-se o programa *Powersim Psim* em sua versão 9.1.1 objetivando simular os arranjos de minimódulos, a fim de vislumbrar os diferentes cenários de interconexão existentes (série, paralelo e misto), e assim, obter quais valores de tensão e corrente poderiam ser produzidos para o quantitativo de minimódulos existente, 7 no total. Na plataforma de simulação supracitada utilizou-se o modelo funcional (*functional model*) para simulação dos módulos, em detrimento do modelo físico (*physical model*), em função da não disponibilidade detalhada das especificações dos módulos utilizados.

Em razão de sua biblioteca com maior disponibilidade de dispositivos eletroeletrônicos comerciais, além da possibilidade de simular os microcontroladores da família *Atmega*, no presente caso o *Atmega 328p* (biblioteca *simulino*), fez-se uso ainda do simulador *Proteus Design Suite*, versão 7.8, da empresa *Labcenter Electronics* para a simulação da instrumentação eletrônica do voltímetro/ampérmetro e das fontes de tensão e de corrente, além do circuito de amostragem de temperatura e umidade. Utilizam-se resistores comerciais formando um divisor de tensão destinado a compatibilizar as tensões dos módulos com os valores limites das entradas do Arduino, que são de até 5 V.

O *display* destina-se a utilização como interface gráfica com os usuários do protótipo, apresentando os valores de tensão, corrente, temperatura e umidade. Inicialmente, os cálculos referentes às diferentes topologias foram realizados na forma manuscrita através de conceitos básicos da eletricidade (ligação série, paralela, mista de geradores) e posteriormente foi desenvolvida uma planilha eletrônica para automatizar tal tarefa. Quando deseja-se obter tensões mais elevadas, faz-se interligações dos módulos fotovoltaicos em série, e no momento que anseia-se correntes maiores, interliga-se em paralelo. Esses conhecimentos foram essenciais para à realização dos cálculos mencionados.

A Fig. 6-a refere-se ao circuito de amostragem da tensão, sendo tal tarefa implementada através da biblioteca *Simulino* destinada a emular o comportamento da plataforma de desenvolvimento *Arduino Uno*. A Fig. 6-b apresenta a fonte de alimentação da porta USB simples. O circuito integrado *LM7805* é um regulador de tensão fixo de três terminais cuja tensão de saída não pode ser ajustada mediante circuito externo, sendo capaz de receber até 30 V (*input voltage range*), não regulados, em seus terminais de entrada para convertê-los em 5 V (*fixed output voltage*) disponíveis na saída do dispositivo. Valores superiores a 30 V, podem danificar o integrado, embora este possua internamente um circuito limitador de corrente para auto desligamento em caso de sobrecarga térmica ou de potência, sempre que a temperatura interna atingir o limite de projeto (MARKUS, 2000).

O integrado *LM7805* suporta uma corrente máxima de saída de até 1 A ($I_{OMÁX}$). Os capacitores têm a finalidade precípua de minimizar os efeitos de eventuais flutuações de tensão. Segundo recomendação do *datasheet*, o valor de 100 nF é um valor de referência para circuitos com esta funcionalidade. Esse regulador é bastante versátil, permitindo na saída a interligação a uma porta *USB* que será utilizada no protótipo para alimentação de dispositivos que adotam este tipo de interconexão elétrica.

As Fig. 7 refere-se as fontes de tensão e corrente utilizando o circuito integrado regulador de tensão ajustável *LM317*. A opção pela utilização de circuitos integrados em detrimento das topologias centradas em componentes discretos, tais quais diodo *Zener* e *TJB's* ocorreu em função dos primeiros proporcionarem maior segurança e simplicidade nas atividades de montagem e manutenção. O dimensionamento da fonte obedece aos requisitos de tensão diferencial entre a entrada e a saída, em consonância com o *datasheet* do *LM317*: $V_{IN}-V_{OUT} > 3,0$ V e faixa de tensão de entrada de 1,2 V a 37 V. A expressão matemática destinada a relacionar a tensão de saída em função da malha de resistores externos é apresentada na Eq. (1). O Termo $I_{ADJ} \times R_2$, na presente montagem, foi suprimido uma vez que o R_2 foi substituído por um potenciômetro, destinado a definir o range de tensões de saída disponibilizado pela fonte (MARKUS, 2000). As alíneas (a) a (d) informam as designações e respectivas unidades.

$$V_{OUT} = V_{REF} \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{ADJ} \times R_2; V_{REF} = 1,25 \text{ V} \quad (1)$$

- a) V_{OUT} : Tensão de saída do regulador (Volts – V);
- b) V_{REF} : Tensão de referência estabelecida pelo fabricante do dispositivo (Volts –V);
- c) I_{ADJ} : Corrente de ajuste que flui pelo pino central do LM317 (Amperes – A);
- d) R_1, R_2 : Resistores da malha externa de ajuste (Ohms – Ω).

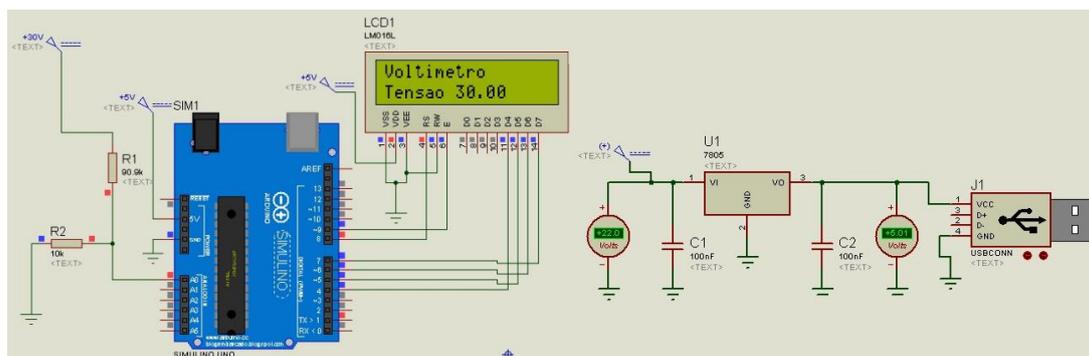


Figura 6 – Circuito do voltímetro digital (a) e fonte de tensão fixa com LM7805 para alimentação da porta USB (b).

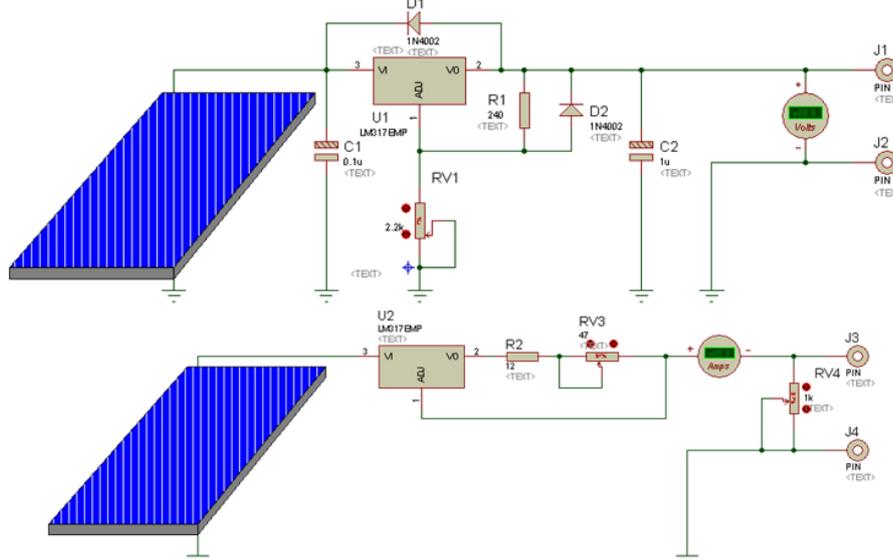


Figura 7 – Fonte de tensão com LM317 (a) e fonte de corrente com LM317 (b).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico versaremos acerca dos principais resultados obtidos até o estágio no qual a pesquisa encontra-se. Alguns dos resultados correspondentes aos múltiplos cenários de arranjo calculados estão listados na Tab. 1. As soluções apresentadas na mesma consideram as especificidades elétricas nominais dos minimódulos, quais sejam: 12 V, 0,125 A e 1,5 W por módulo. A Tab. 2 apresenta um comparativo entre os valores medidos com a árvore exposta à iluminação artificial, dentro do laboratório, e exposta à iluminação proveniente diretamente do sol.

Tabela 1: Diferentes cenários da associação de células fotovoltaicas e respectivos valores de tensão e corrente.

Nº de módulos em série	Nº de módulos em paralelo	Nº de arranjos em série	Nº de módulos por String	Nº de arranjos em paralelo	Interligação final	V _{TOTAL} [V]	I _{TOTAL} [A]	P _{TOTAL} [W _P]
6	0	1	6	0	Série	72	0,125	9
0	6	0	0	1	Paralelo	12	0,75	9
3	3	1	1	1	Série	48	0,25	9
3	3	1	1	1	Paralelo	24	0,5	9
2	4	1	1	1	Série	36	0,125	9
2	4	1	1	1	Paralelo	12	0,625	9
1	5	1	1	1	Série	24	0,125	9
1	5	1	1	1	Paralelo	12	0,75	9
4	2	1	2	1	Série	60	0,125	9
4	2	1	2	1	Paralelo	36	0,375	9
5	1	1	3-2	1	Serie	72	0,125	9
5	1	1	3-2	1	Paralelo	48	0,125	9
4	2	2	2	1	Série	60	0,125	9
6	0	3	2	0	Paralelo	24	0,375	9

4	2	2	2	1	Série	60	0,125	9
4	2	2	2	1	Paralelo	12	0,5	9
2	4	1	1	2	Série	48	0,125	9
2	4	1	1	2	Paralelo	12	0,625	9

Tabela 2: Comparativo entre os valores de tensão medidos.

CÉLULA	TENSÃO NO LABORATÓRIO (V)	TENSÃO EM CAMPO (V)
1	7,4	11,6
2	6,8	11,2
3	6,7	11
4	7,1	11,6
5	6,2	11
6	5,9	10,8
7	5,9	11,1

Enumerou-se cada célula com algarismos 1 a 7, no sentido de cima para baixo. Em laboratório pode-se notar que quanto maior a numeração de identificação do módulo menor é a tensão produzida, uma vez que estas estão posicionadas mais abaixo e, por conseguinte recebem menos luz, porém nas medições de campo a diferença passa a ser muito pequena. Direcionamos as superfícies coletoras para o norte geográfico na medição das tensões em campo, com as mesmas inclinações nos galhos do protótipo quando medidos em laboratório. Os valores listados na Tab. 2 correspondem a média aritmética simples de 3 medições efetuadas com um espaçamento de tempo de 30 segundos entre cada medição. Cada minimódulo tem dimensões de 8,5 cm por 11,5 cm, ou seja, a área receptora equivale a 0,00977 m². O cálculo do rendimento da célula é dado a partir da aplicação da Eq. (2):

$$\eta = \frac{P_{MAX}}{(A_p \times 1000)} \quad (2)$$

O cálculo da energia produzida por uma célula se dá a partir da utilização da Eq. (3):

$$E_p = E_s \times A \times \eta \quad (3)$$

As alíneas (a) a (d) informam as designações e respectivas unidades correspondentes a Eq. (2) e Eq. (3).

- η: Eficiência do módulo (Adimensional);
- P_{MAX}: Potência máxima ou de pico do módulo (Watts – W);
- A_p: Área do módulo (metros quadrados – m²);
- E_p: Energia produzida pelo módulo (Watts-horas – Wh);
- E_s: Insolação diária (Watts-horas por metro quadrado por dia – Wh/ m²/dia).

A aplicação dos valores numéricos correspondentes aos minimódulos utilizados conduz a um rendimento de 15,35 % e a uma produção aproximada de 47,24 Wh. Considerando cada uma das placas produzindo 12 V, interligando-as em série, obtém-se de 72 V como valor esperado. Em campo, obtivemos 67,2 V com o tempo parcialmente nublado, provavelmente em uma condição de radiação mais favorável, o valor medido seria mais próximo do esperado. A Fig. 8 ilustra algumas das etapas correlacionadas a montagem e teste da primeira versão do protótipo.



Figura 8 – Montagem e teste da primeira versão do protótipo.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após uma série de ajustes, adaptações e readequações inerentes à realização de montagens eletrônicas, obteve-se valores muito próximos daqueles previamente calculados, atestando a eficácia da primeira versão do protótipo. Julga-se ter logrado êxito no trabalho aqui descrito, uma vez que os resultados obtidos guardam estreita relação com os objetivos iniciais aos quais o mesmo se propunha. Neste cenário, o comportamento no simulador eletrônico se assemelhou bastante dos valores experimentais coletados durante a montagem física real.

Sob o ponto de vista acadêmico-científico as atividades descritas neste texto foram relevantes por aproximar-nos da complexidade característica das montagens eletrônicas, encurtando o afastamento existente entre as atividades teóricas do curso e as situações encontradas na realidade das oficinas e laboratórios eletrônicos.

Buscando estreitar os conceitos teóricos dos aspectos práticos da área de eletroeletrônica e energia solar fotovoltaica, as ações correlacionadas a esta montagem nos permitiram compreender aspectos de natureza concreta, ampliando nosso entendimento e sobretudo despertando nosso desejo por aprofundar-se nas temáticas estudadas.

Para continuidade do projeto, tem-se como próximo desafio, conferir ao protótipo feições mais próximas dos equipamentos comerciais, garantindo sua utilização também como objeto paisagístico. Os primeiros resultados obtidos são satisfatórios, entretanto vislumbrou-se necessidade de incluir dispositivos de proteção (varistores, fusíveis e mini-disjuntores) contra sobrecargas e sobrecorrente, além de circuitos de proteção contra inversão de polaridade dos bornes de saída das respectivas fontes, sendo a implantação de tais melhorias incluídas nas próximas etapas da pesquisa, além da implementação do conversor elevador *boost* citado anteriormente no corpo do artigo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beltrão, Ricardo Esberard de Albuquerque. **Efeito da Temperatura de Geração de Energia de Módulos Fotovoltaicos a Condições Climáticas Distintas. Estudo de Caso Para as Localidades de Recife e Araripina.** 2008. 171 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.
- Bertucci, Janete Lara de Oliveira. **Metodologia Básica para Elaboração de Trabalhos de Conclusão de Curso: Ênfase na Elaboração de TCC de Pós Graduação Lato Sensu.** São Paulo: Atlas, 2008. (116).
- Câmara, Carlos Fernando. **SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA.** 2011. 68 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pósgraduação Lato Sensu em Formas Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- Cantor, Guillermo Andrés Rodríguez. **INFLUÊNCIA DOS FATORES CLIMÁTICOS NO DESEMPENHO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM REGIÕES DE CLIMA TROPICAL.** 2017. 177 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2017.
- Cerne, Centro de estratégias em recursos naturais e energia. **Brasil poderá ter uma matriz 100% em 2050, aponta relatório.** Disponível em: <http://cerne.org.br/brasil-podera-ter-uma-matriz-100-limpa-em-2050-aponta-relatorio/>. Acesso em: 15 jun.2017.
- Epe. **Nota Técnica EPE. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Energética Brasileira.** Maio de 2012. Disponível em: Acesso em: 31 out. 2017.
- Leça, Marco Menezes. **Potencial Solar dos Edifícios Públicos da Região Autónoma da Madeira.** 2014. 157 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Telecomunicações e Redes de Energia, Universidade da Madeira, Funchal, 2014.
- Lopez, Ricardo Aldabó. **Energia Solar Para Produção de Eletricidade.** São Paulo: Artliber, 2012. 229 p.
- MARKUS, Otávio. **Sistemas Analógicos - Circuitos Com Diodos e Transistores: Teoria e Exercícios.** 5. ed. São Paulo: Érica, 2000. 374 p. (Ensino Modular).
- Oliveira, Paulo Henrique Breyner Saldanha de. **Avaliação do Potencial de Transformação do NIPE em uma Edificação de Energia Zero.** 2017. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- Palz, Wolfgang. **Energia Solar: e Fontes Alternativas.** Curitiba: Hemus, 2002. 358 p.
- Pereira, Enio Bueno et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar.** São José dos Campos: Inpe, 2017. 80 p. Disponível em: <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/Atlas_Brasileiro_Energia_Solar_2a_Edicao.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.
- Pinho, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de Engenharia Para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho de Energia Solar - Gtes. Cepel - Dte - Cresesb, 2014. 530 p. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 30 out. 2017.
- Queiroz, W. F. **Construção de um Fogão Solar à Concentração Para Cozimento Direto e Indireto.** Dissertação de Mestrado – PPGEM/UFRN, 2005.

- Rüther, Ricardo. **Edifícios Solares Fotovoltaicos**. Florianópolis: Labsolar, 2004. 118 p.
- Santos, Durvalina Maria Mathias dos. **Fotossíntese**. Jaboticabal: Disciplina de Fisiologia Vegetal, Unesp, 2005. 10 p.
Disponível em: <http://ftp.fcav.unesp.br/departamentos/biologia/docentes/mat_didatico_durvalina.htm>. Acesso em: 30 out. 2017.
- Villalva, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica, Conceitos e Aplicações: Sistemas Isolados e Conectados à Rede**. São Paulo: Érica, 2012. 224 p.

PHOTOVOLTAIC TREE: ANALYSIS, SIMULATION AND ASSEMBLY OF A PROTOTYPE

Abstract. *The present work shows a system of capture of sunlight to obtain electricity: the solar photovoltaic tree. In addition, it addresses some of the steps that required simulations, correlated calculations, explanations about the operating principle, and the elements needed to assemble and achieve the first prototype, since research activities are still under development. As for the methodological aspects, we used bibliographical research in similar works and related thematic, computational simulations in the software Labcenter Proteus and Powersim Psim, followed by the acquisition of data in the field, after the construction of the respective prototype. All the work described during the course of this text was developed within the physical facilities of the Federal Institute of Education of Rio Grande do Norte - Campus João Câmara between June 2017 and November 2017. The electricity generated comes from the installation of mini photovoltaic modules positioned at the tips of the branches of the initial version of the developed tree. The system incorporates a voltage source, a current source and a sampling circuit, and displays the generated voltage and current values. External connections (plugs and terminals) allow the connection to an inverter, USB ports, various equipment supply and battery charging, these components are inserted in a connection box. Another connection box is responsible for conditioning the devices to present the results of the measurements, which are: voltage and current values produced, besides the temperature and humidity around the tree. The above-mentioned devices are an electronic voltmeter / ammeter for visualizing the voltage and current produced by the system and a 16 x 2 LCD display to display temperature and humidity values in the vicinity of the prototype, using the Arduino Uno simulation platform (Atmega 328p).*

Key words: *Photovoltaic Tree, Solar Tree, Photovoltaic Current Source.*