

ARTHUR CAIO VARGAS E PINTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ÁRVORE
FOTOVOLTAICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de
Viçosa - Campus Viçosa

T

P659d Pinto, Arthur Caio Vargas e, 1992-
2018 Desenvolvimento de um protótipo de árvore fotovoltaica / Arthur
Caio Vargas e Pinto. - Viçosa, MG, 2018.
xiii, 73 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Delly Oliveira Filho.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 67-73.

1. Energia solar. 2. Sistemas de energia fotovoltaica. 3. Geração
de energia fotovoltaica. 4. Células solares. 5. Energia - Fontes
alternativas. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 621.47

ARTHUR CAIO VARGAS E PINTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ÁRVORE
FOTOVOLTAICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 16 de julho de 2018.


Olga Moraes Tolêdo
Joyce Correna Carlo

Paulo Marcos de Barros Monteiro
(Coorientador)



Delly Oliveira Filho
(Orientador)

“O valor das coisas não está no tempo que elas duram, mas na intensidade com que acontecem. Por isso, existem momentos inesquecíveis e pessoas incomparáveis.”

À minha amada avó Júlia (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

Deus sempre esteve ao meu lado e tem me dado saúde e força para aproveitar as oportunidades que coloca à minha frente. A Ele eu devo minha gratidão.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, por me proporcionar uma excelente estrutura e um ambiente criativo e amigável para os estudos. Sou grato à cada membro do corpo docente, à direção e a administração dessa instituição de ensino.

À CAPES, pelo financiamento e apoio à pesquisa.

Ao meu orientador Professor Delly Oliveira Filho, pelo suporte, correções e incentivos durante cada etapa da pesquisa.

Aos meus pais, Lécia e Ademar, meus primeiros professores, pela capacidade de acreditar e investir em mim.

Aos meus irmãos Thomás e Matheus, pelo eterno companheirismo.

À minha namorada Lourena, pelo amor e por sempre ter acreditado nas minhas capacidades e por não me deixar desistir.

Ao meu sogro, Antônio, e à minha sogra, Regina, pelo incentivo e apoio constantes.

Aos meus amigos de Ponte Nova e Viçosa, pelos momentos de descontração.

À minha amada avó Júlia. Você se foi, mas seu legado permanece vivo em nossos corações. Descanse em paz!

BIOGRAFIA

Arthur Caio Vargas e Pinto nasceu em Ponte Nova – MG, filho de Ademar Martins Pinto e Lecionira Ferreira Vargas Martins. Completou o ensino fundamental na escola Sistema Educar de Ensino e realizou o ensino médio na Escola Nossa Senhora Auxiliadora.

Em 2011, ingressou no curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação na Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Entre janeiro e dezembro de 2014, realizou um intercâmbio na *University of Glasgow*, na cidade de Glasgow, Reino Unido, pelo programa do governo federal Ciência sem Fronteiras. Após o fim deste período, retornou à UFOP para dar sequência à sua graduação.

Se formou em julho de 2016 e em agosto do mesmo ano ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, em nível de mestrado, pelo Departamento de Engenharia Agrícola, no setor de Energia, submetendo-se à defesa da dissertação em 16 de julho de 2018.

ÍNDICE

LISTA DE QUADROS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiii
1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.1 Introdução geral.....	1
1.1.1 O mercado fotovoltaico mundial	1
1.1.2 Potencial fotovoltaico brasileiro	4
1.1.3 Cenário Atual.....	6
1.2 Objetivos	8
1.3 Estrutura da dissertação	8
1.4 Contribuições da pesquisa	9
1.5 Limitações da Pesquisa	9
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 Geração de energia fotovoltaica.....	10
2.1.1 O efeito fotovoltaico	10
2.1.2 Estrutura da célula solar fotovoltaica	11
2.1.3 Parâmetros da célula solar fotovoltaica	12
2.1.4 Tipos de células fotovoltaicas	17
2.1.5 Formas de associação de células fotovoltaicas.....	18
2.1.6 Posicionamento e orientação de painéis	19
2.1.7 O efeito do sombreamento.....	23
2.2 Formas de otimização de sistemas fotovoltaicos	24
2.2.1 Desenvolvimento da tecnologia.....	24
2.2.2 Uso de concentradores.....	27
2.2.3 Uso de rastreadores.....	29
2.2.4 Disposição dos painéis	31
2.3 Árvores fotovoltaicas	32
2.3.1 Filotaxia	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1 Sistema de monitoramento de geração de energia	39
3.1.1 Arduino.....	40
3.1.2 Visual Studio C#.....	43
3.1.3 Características da célula solar	44

3.1.4	Circuito de carga	45
3.2	Construção das árvores.....	47
3.2.1	Montagem das árvores	47
3.2.2	Montagem do sistema fotovoltaico fixo	51
3.3	Realização do experimento.....	51
3.4	Avaliação de funcionamento no ponto de máxima transferência de potência.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1	Árvores versus sistema tradicional	56
4.2	Comparação entre as árvores	58
5	CONCLUSÕES.....	65
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	66
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Especificações Técnicas do Arduino MEGA..	41
Quadro 2 – Quantidade de células em cada árvore.	49
Quadro 3 – Especificações finais.	50
Quadro 4 – Especificações do sistema horizontal.	51
Quadro 5 – Média de radiação solar para cada período de medição, considerando os cinco dias de experimento.	54
Quadro 6 – Valores de resistência calculados que fazem os sistemas funcionarem em seus respectivos pontos de máxima transferência de potência.	55
Quadro 7 - Comparação entre a área necessária para a construção de um sistema fotovoltaico considerando diferentes disposições.	56
Quadro 8 - Relações entre energia elétrica gerada por unidade de potência instalada.	57
Quadro 9 - Relações entre energia elétrica gerada por unidade de área.	57
Quadro 10 - Energia total gerada no período da manhã (9h às 10h).	58
Quadro 11 - Energia total gerada no período do almoço (12h às 13h).	59
Quadro 12 - Energia total gerada no período da tarde (15h às 16h).	60
Quadro 13 – Custo de instalação dos sistemas fotovoltaicos.	63
Quadro 14 – Custo expresso em R\$/Wh para cada arranjo.	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Capacidade instalada mundial acumulada de sistemas fotovoltaicos	2
Figura 2 - Investimento mundial em energias renováveis - países desenvolvidos versus países em desenvolvimento (em bilhões de dólares)	2
Figura 3 - Faixa de preços de sistemas fotovoltaicos (2008 US\$/kW _p) e queda anual de preços (%).....	3
Figura 4 - Média anual de radiação solar incidente no Brasil (esquerda) e Alemanha (direita) no plano horizontal em kWh/m ²	5
Figura 5 - Matriz de geração de energia elétrica brasileira, 2016.....	6
Figura 6 - Número de unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída conectadas à rede.....	7
Figura 7 - Princípio de funcionamento de uma célula solar.....	12
Figura 8 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica	12
Figura 9 - Curva característica de uma célula fotovoltaica.....	15
Figura 10 - Comportamento da curva característica de uma célula solar de acordo com a variação de temperatura, para 1000W/m ²	17
Figura 11 - Comportamento da curva característica de uma célula solar de acordo com a variação de radiação incidente a 25° C.....	17
Figura 12 - Estruturas de silício geralmente utilizadas em células fotovoltaicas: a) silício monocristalino, b) silício policristalino, c) silício amorfo	18
Figura 13 - Associação de painéis solares em série.	19
Figura 14 - Associação de painéis solares em paralelo.....	19
Figura 15 - Órbita da Terra ao redor do sol, com o eixo inclinado a um ângulo de 23,45°	20
Figura 16 - Componentes da radiação solar	21
Figura 17 - Angulação para um painel instalado à latitude = 51°	22
Figura 18 - Efeito do sombreamento sobre um sistema fotovoltaico	24
Figura 19 - Célula de filme fino	25
Figura 20 - Linha do tempo das principais pesquisas sobre energia solar fotovoltaica no mundo.....	26
Figura 21 - Concentrador solar	27
Figura 22 - Diferentes tipos de concentradores.....	29
Figura 23 - Diferença entre um painel solar fixo e outro com sistema de rastreamento	30

Figura 24 - Protótipo de fachada fotovoltaica em Zurique, latitude: 47°	32
Figura 25 - Árvore fotovoltaica construída na Índia, em Durgapur, latitude: 23°	34
Figura 26 - Árvore fotovoltaica em Londres, latitude: 51°. Fonte: (NOE, 2012).....	35
Figura 27 - Árvore fotovoltaica no Canadá, em London, latitude: 42°	35
Figura 28 - Árvore fotovoltaica na Bósnia e Herzegovina, em Sarajevo, latitude: 43°	36
Figura 29 - Árvore solar inaugurada no campus Itaperi – UECE, em Fortaleza, latitude: -3°	36
Figura 30 - Sequência de Fibonacci em plantas.....	38
Figura 31 - Separação angular de folhas em um tronco de carvalho	38
Figura 32 - Vista superior da disposição de folhas ao redor do tronco de uma planta de fração característica igual a $\frac{5}{13}$	39
Figura 33 - Arduino Mega.....	41
Figura 34 - Fluxograma de código do sistema de aquisição de dados para arduino..	42
Figura 35 - Fluxograma do código para o Visual Studio C#.	44
Figura 36 - Vista frontal (a) e traseira (b) da célula solar.	45
Figura 37 - Circuito elétrico do circuito de carga.	46
Figura 38 - Circuito de cargas para as Árvores 1,2 e 3 e o sistema Comum 1.	47
Figura 39 - Definição dos pontos a serem furados no cano de PVC.	48
Figura 40 - Esquema de ligação da árvore 1.	50
Figura 41 - Árvore 3 ao final do processo de construção.	50
Figura 42 - Influência da radiação no ponto de operação de painéis fotovoltaicos. ..	53
Figura 43 - Comportamento da corrente e tensão sob diferentes valores de radiação solar	53
Figura 44 - radiação solar incidente no período, destacando os horários de 09:00 às 10:00, 12:00 às 13:00 e 15:00 às 16:00.....	54
Figura 45 - Energia total gerada nas 15 horas de experimento.	56
Figura 46 - Geração de energia no período de 9h às 10h.....	58
Figura 47 - Geração de energia no período de 12h às 13h.....	59
Figura 48 - Geração de energia no período de 15h às 16h.....	59
Figura 49 - Energia total estimada a partir de dados experimentais pelos três sistemas fotovoltaicos ao final das 15 horas de experimento.	60

Figura 50 - Diferentes angulações de incidência da radiação solar de acordo com o horário.	61
Figura 51 - Vista lateral mostrando sombreamento na Árvore 3.	62
Figura 52 - Vista superior da Árvore 3.	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

A – Amperes;

ANEEL - Agência Brasileira de Energia Elétrica;

CC – Corrente contínua;

cm² - Centímetro quadrado;

E – Energia;

F_F - *Fill Factor*;

GW_P – Giga-Watt pico;

I – Corrente;

I_{SC} - Corrente de curto circuito;

I_{MAX} - Corrente no ponto de máxima potência;

kW_P – kilo-watt pico;

m² – Metro quadrado;

MW_P – Mega-Watt pico;

P – Potência;

P_{MAX} - Potência máxima;

PVC - Policloreto de vinila;

Si-a - Células de Silício amorfo;

Si-m - Células de Silício monocristalino;

Si-p - Células de Silício policristalinas;

SMTP – Seguidor de Máxima Transferência de Potência;

USB – *Universal Serial Bus*;

V – Tensão;

V_{MAX} - Tensão no ponto de máxima potência;

V_{OC} - Tensão de circuito aberto;

RESUMO

PINTO, Arthur Caio Vargas e, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2018. **Desenvolvimento de árvore fotovoltaica**. Orientador: Delly Oliveira Filho. Coorientadores: Paulo Marcos de Barros Monteiro e Sérgio Yoshimitsu Motoike.

Devido ao crescimento da população mundial, o uso da terra se tornou uma valiosa *commodity*, criando a necessidade de se estudar maneiras de diminuir a ocupação de área para assegurar o desenvolvimento de futuras gerações. Sistemas fotovoltaicos fixos ao solo possuem a desvantagem de ocupar grandes áreas que poderiam ser utilizadas para a agricultura, construção de indústrias, edifícios, etc. Nesse sentido, surge uma forma alternativa de posicionamento de placas na forma de uma árvore fotovoltaica, uma nova e promissora maneira de integrar a energia solar fotovoltaica às construções e ao espaço urbano em geral, otimizando ao máximo o espaço necessário. Uma árvore fotovoltaica é basicamente como uma árvore natural, mas com células solares posicionadas no lugar das folhas. Entretanto, o sombreamento causado pelas “folhas” neste tipo de disposição pode causar uma queda na geração de energia do conjunto. Dessa forma, o objetivo desta dissertação foi realizar a comparação do sistema tradicional de painéis com a árvore fotovoltaica. Para isso, foi projetado um sistema automático de aquisição de dados para se computar a energia gerada por cada conjunto. Além disso, três diferentes arranjos de árvores fotovoltaicas foram comparados: árvore 1, com 16 células; árvore 2, com 20 células; árvore 3, com 30 células, a fim de se encontrar o melhor design de sistema, balanceando o número de células com a geração de energia. O sistema de aquisição de dados construído foi utilizado para a realização do experimento, medindo a geração de energia de cada conjunto. Ao final, a árvore 2 foi o sistema que mais gerou energia, apesar de não possuir o maior número de células. Estima-se então, que para este estudo, a distância ótima de posicionamento dos galhos de uma árvore fotovoltaica equivale a 5% do comprimento total da estrutura central de sustentação. Comparando-se as Árvores 1 e 3, concluiu-se que a construção da Árvore 3 não é vantajosa, uma vez que se pode obter uma geração de energia equivalente (apenas 3% inferior) ao se construir a Árvore 1, que é cerca de 35% mais barata. Pode-se dizer que a Árvore 3 está melhor desenhada para os períodos da manhã e da tarde. Por volta do meio dia, a ocorrência de sombreamento é maior devido à maior altura solar, diminuindo assim a energia gerada pela Árvore 3.

ABSTRACT

PINTO, Arthur Caio Vargas e, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2018. **Development of a solar photovoltaic tree.** Advisor: Delly Oliveira Filho. Co-advisors: Paulo Marcos de Barros Monteiro and Sérgio Yoshimitsu Motoike.

Due to the growth of the world population, land use has become a valuable commodity, creating a need to study ways to reduce area occupation to ensure the development of future generations. Photovoltaic systems fixed to the ground have the disadvantage of occupying large areas that could be used for agriculture, construction of industries, buildings, etc. In this sense, there is an alternative form of panel positioning in the form of a photovoltaic tree, a new and promising way to integrate photovoltaic solar energy into buildings and urban space, optimizing the space used as much as possible. A photovoltaic tree is basically like a natural tree, but with solar cells positioned in the place of the leaves. However, the shading caused by the "leaves" in this type of arrangement can decrease energy generation of the system. Thus, the objective of this work was to compare the traditional panel system with the photovoltaic tree. For that, an automatic data acquisition system was designed to compute the energy generated by each set. In addition, three different arrangements of photovoltaic trees were compared: tree 1, with 16 cells; tree 2, with 20 cells; and tree 3 with 30 cells in order to find the best system design, balancing the number of cells with the generation of energy. The proposed data acquisition system was used to perform the experiment, measuring the energy generation of each set. In the end, tree 2 was the system that generated the most energy, despite not having the largest number of cells. It is estimated that for this study, the optimal positioning distance of the branches in a photovoltaic tree is equivalent to 5% of the total length of the central support structure. Comparing Trees 1 and 3, it was concluded that the construction of Tree 3 is not advantageous, since an equivalent energy generation (only 3% lower) can be obtained by constructing Tree 1, which is about 35% cheaper. It can be said that Tree 3 is best designed for the morning and afternoon periods. Around noon, shade occurrence is higher due to the higher solar height, thus decreasing the generated energy by Tree 3.

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 Introdução geral

1.1.1 *O mercado fotovoltaico mundial*

Nos últimos anos, o uso de fontes renováveis de energia vem se tornando cada vez mais atrativo para diversificar e complementar a matriz energética, em consequência ao crescimento da demanda energética devido ao aumento populacional e econômico (ORDENES et al., 2007). Além disso, o aumento da consciência ambiental e a redução dos custos de implantação tornaram algumas fontes de energia renováveis mais atrativas ao consumidor. A geração de energia utilizando fontes próprias já existe, sendo o uso mais comum de geradores a gás ou a óleo diesel nos horários de ponta (de tarifas elevadas). Nestes casos, entretanto, a energia gerada era utilizada pelo próprio consumidor, não existindo a possibilidade de injeção na rede. Dentre as fontes de energia renováveis existentes, a energia fotovoltaica tem se destacado pelo acelerado crescimento e popularização mundial, tornando-se hoje parte significativa da matriz energética de alguns países (SIOSHANSI, 2016). O uso de fontes renováveis de energia se torna cada vez mais importante para diversificar e complementar a matriz energética, uma vez que há um crescimento da demanda energética devido ao crescimento populacional e econômico.

Nesta última década, a instalação de sistemas fotovoltaicos cresceu fortemente em diversos países do mundo. Entre 2006 e 2011, o setor observou um crescimento anual de 58%, na capacidade mundial instalada (MALAGUETA et al., 2013), sendo que no final de 2014, havia aproximadamente 178 GW_p de capacidade mundial instalada. Dependendo da evolução do setor fotovoltaico nos próximos anos, a capacidade instalada mundial pode chegar a aproximadamente 540 GW_p em 2019, considerando-se um cenário otimista de crescimento para o setor (SOLAR POWER EUROPE, 2014), como mostra a Figura 1.

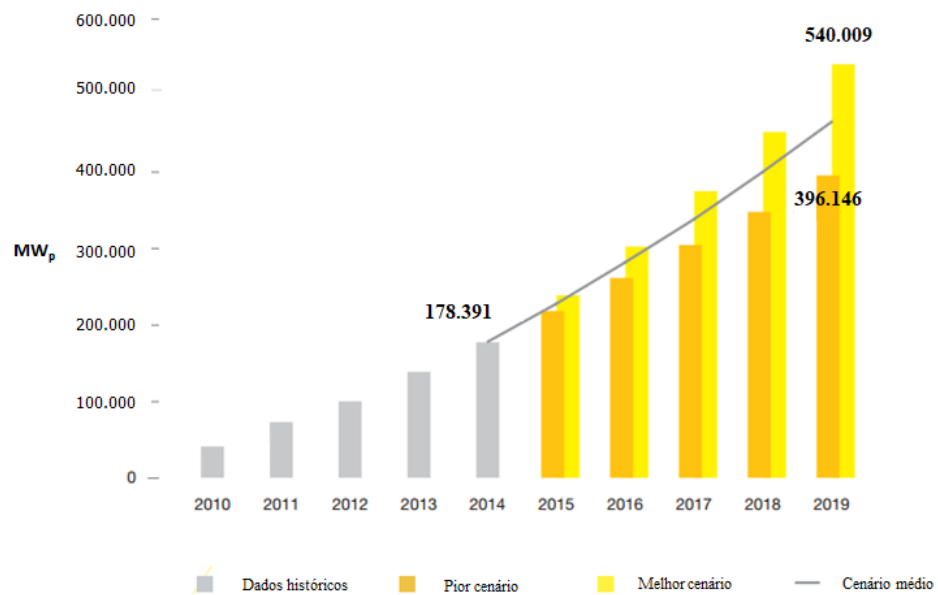


Figura 1 - Capacidade instalada mundial acumulada de sistemas fotovoltaicos.
Fonte: (SOLAR POWER EUROPE, 2014).

Este aumento da capacidade e potência de geração se deve principalmente a incentivos concedidos e investimentos realizados na geração de energia fotovoltaica. Estima-se que em 2015, cerca de 285,9 bilhões de dólares foram investidos em fontes de energia renováveis, sendo que países em desenvolvimento têm investido mais do que países desenvolvidos. Como mostrado na Figura 2, países em desenvolvimento destinaram 156 bilhões de dólares ao desenvolvimento de energias renováveis, em 2015, valor 19% maior que a quantia de 2014, enquanto países desenvolvidos investiram 130 bilhões nessa área (FSFM, 2016).

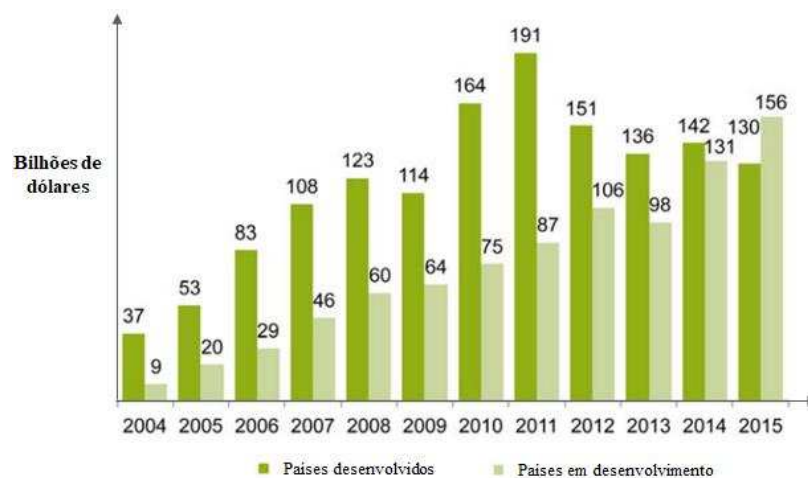


Figura 2 - Investimento mundial em energias renováveis - países desenvolvidos versus países em desenvolvimento (em bilhões de dólares).
Fonte: (FSFM, 2016).

Tais investimentos e crescimento do setor geraram um interesse maior por parte da comunidade acadêmica em pesquisar e estudar melhor a geração de energia por meio do efeito fotovoltaico, buscando por falhas no processo e meios de otimizá-lo. Como resultado dessas pesquisas e estudos, centros de pesquisa ao redor do mundo conseguiram aumentar a eficiência dos módulos fotovoltaicos, produzir componentes mais resistentes e mais baratos e definiram as condições ótimas de trabalho para o sistema. Avanços na tecnologia, especialmente no aumento do rendimento da conversão fotovoltaica, contribuíram para uma expansão ainda maior do uso de sistemas fotovoltaicos.

O preço de células solares e do sistema fotovoltaico completo tem caído consideravelmente nos últimos anos, devido ao maior interesse do mercado e em razão a esforços de pesquisa e desenvolvimento – P&D. As previsões indicam que o preço do kW_p tende a cair cada vez mais à medida que a tecnologia fotovoltaica avança e o seu uso se torna mais difundido, como observa-se na Figura 3. Entre 2009 e 2015, houve uma queda de aproximadamente 57% no preço de painéis fotovoltaicos em US\$/kW_p. Em 2013, o preço da energia proveniente de fontes renováveis em muitos países alcançou paridade tarifária com a da rede, ou seja, se tornou competitivo com o preço da energia proveniente da distribuidora de energia elétrica, se tornando mais um incentivo ao crescimento do uso da energia fotovoltaica (IEA, 2014).

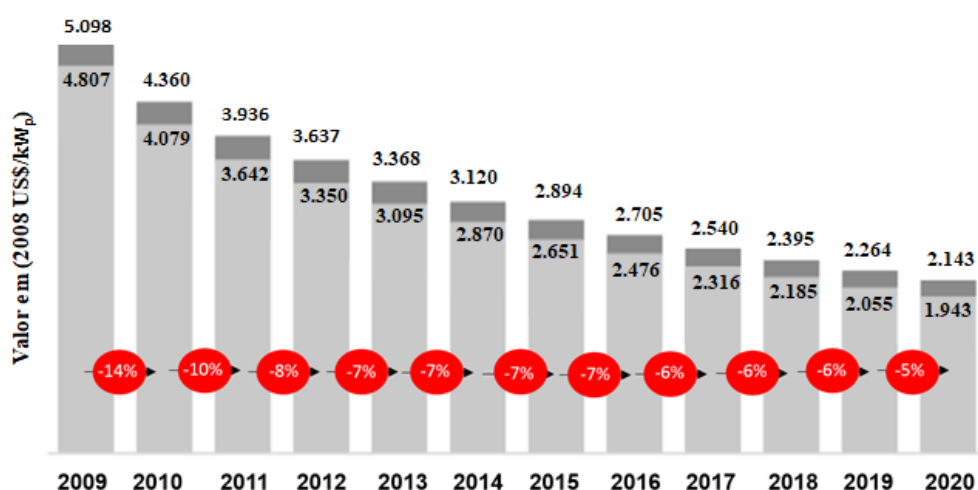


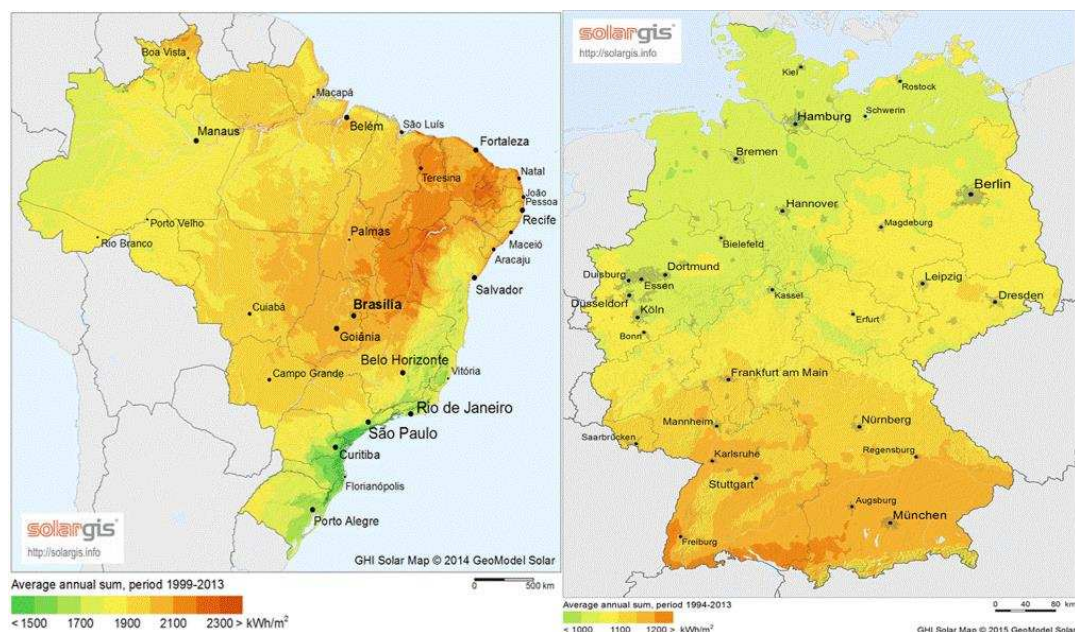
Figura 3 - Faixa de preços de sistemas fotovoltaicos (2008 US\$/kW_p) e queda anual de preços (%).
Fonte: (RÚTHER; ZILLES, 2011).

A queda nos preços alimentou ainda mais o mercado de sistemas fotovoltaicos, trazendo opções de instalações de sistemas de potências mais baixas que favorecem tanto a geração distribuída (pequenas centrais em residências ou comércios) quanto a geração centralizada (usinas fotovoltaicas). Devido à menor complexidade, o modelo de geração distribuída foi ganhando espaço, e com a queda nos custos, a geração de energia elétrica por meio da energia fotovoltaica de forma distribuída passou a ser considerada como uma fonte complementadora das fontes de energia convencionais.

1.1.2 Potencial fotovoltaico brasileiro

O sol é uma fonte abundante e inesgotável de energia que pode ser aproveitada pela sociedade para suprir suas necessidades energéticas. Metade da energia solar que chega à Terra é refletida pela atmosfera. A outra metade atinge a superfície do planeta, sendo convertida e utilizada nos processos biológicos dos seres vivos, totalizando cerca de 885 milhões de TWh/ano, o equivalente a oito mil vezes o consumo mundial de energia no ano de 2013 (TOLMASQUIM, 2016). Esse fato faz da energia proveniente do sol o maior potencial energético de aproveitamento em comparação a outras fontes renováveis.

Por se localizar na região intertropical, o Brasil possui grande potencial para aproveitamento da energia proveniente do sol durante quase o ano todo, pois a proximidade à linha do Equador faz com que os níveis de incidência solar ao longo do ano não variem muito, possibilitando altos índices tanto no verão quanto no inverno, além de possuir uma vasta extensão territorial. No país, a média anual de insolação diária é de cerca de 6 horas e a incidência solar diária varia entre 4.250 Wh/m² a 6.500 Wh/m², valores superiores aos da maioria dos países europeus (PEREIRA et al., 2006). As regiões centro-oeste e nordeste do país são as que apresentam maiores valores de radiação, como mostra a Figura 4.



**Figura 4 - Média anual de radiação solar incidente no Brasil (esquerda) e Alemanha (direita) no plano horizontal em kWh/m².
Fonte: (SOLARGIS, 2018).**

Brasília, localizada no centro do país, recebe cerca de 2300 kWh/m², enquanto que a cidade de Florianópolis, localizada ao sul, apresenta níveis de radiação mais baixos, na faixa de 1500 kWh/m²/dia.

Além de ser alvo de uma alta incidência de radiação solar, o Brasil possui a maior reserva de quartzo de alta qualidade do mundo, matéria-prima para a produção de silício metalúrgico e em grau solar. Além disso, é um dos maiores exportadores de silício metalúrgico do mundo, o que faz com que o Brasil tenha potencial para o desenvolvimento de uma forte indústria de produção de células solares (BRAGA et al., 2008). Para tal, são necessários investimentos e pesquisas para dominar a tecnologia de purificação do silício até a concentração necessária para a produção de células fotovoltaicas.

Apesar das condições favoráveis e do enorme potencial do país, o uso de energia solar para geração de energia elétrica ainda é pouco difundido e adotado nas edificações brasileiras. Para efeito de comparação, a Alemanha, maior economia da Europa, apresenta um vigoroso mercado solar fotovoltaico caracterizado pela qualidade e eficiência. Por meio de mecanismos e incentivos à expansão da energia solar, o país tem obtido aproveitamento superior ao brasileiro, apesar de suas condições climáticas menos favoráveis. Estima-se que a região mais ensolarada da Alemanha, como mostra a Figura 4, em média 1300 kWh/m², receba um índice de

radiação 40% menor que a radiação incidente na região menos ensolarada do Brasil, média de 1642 kWh/m² (CABRAL; TORRES; SENNA, 2013).

1.1.3 Cenário Atual

A demanda energética brasileira vem crescendo a cada ano, e consequentemente, criando a necessidade de se investir em melhorias e criação de infraestrutura para sustentar a rede de distribuição de energia e garantir o abastecimento à toda a população. Neste sentido, o Governo Federal tem feito investimentos em fontes renováveis de energia a fim de diversificar a matriz energética brasileira e assegurar o abastecimento. Até novembro de 2016, existiam 42 usinas fotovoltaicas em operação no país, totalizando uma capacidade instalada de aproximadamente 27 MW_p, contribuindo com uma geração de energia equivalente a 0,01% da matriz energética brasileira, como é possível observar na Figura 5. Existem ainda mais 111 empreendimentos planejados para entrar em operação até 2019, totalizando uma potência instalada de 2.980 MW_p (ANEEL, 2016a).

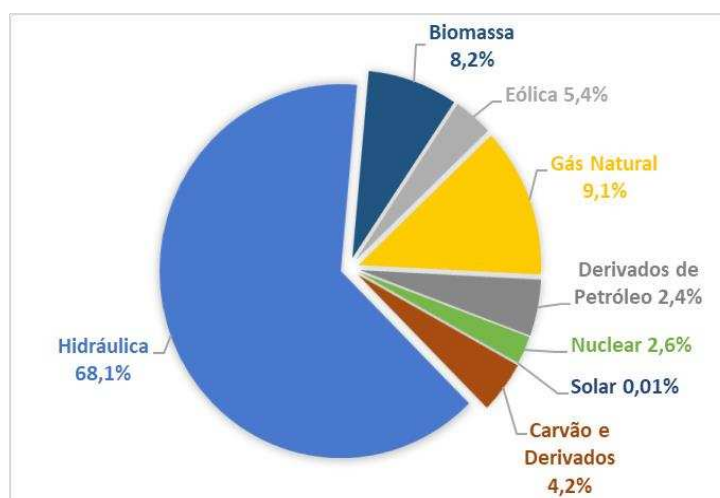


Figura 5 - Matriz de geração de energia elétrica brasileira, 2016.
Fonte: (EPE, 2017).

Da mesma forma, devido a políticas de incentivo e redução dos custos associados, o número de unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída (fotovoltaicas, eólicas, etc.) tem crescido consideravelmente. Microgeração é definida como geração de energia utilizando um sistema com potência instalada de até 75kW_p, enquanto minigeração corresponde a sistemas com potência instalada de até 5 MW_p (o 3 MW_p, para fontes hídricas). De acordo com a Figura 6, a quantidade acumulada de conexões chegou a 8.002 em 2016, o que corresponde aproximadamente a 4,8 vezes o número de conexões de 2015. Também

é possível observar que os números de 2017 são cerca de 2,5 vezes maiores que os de 2016.

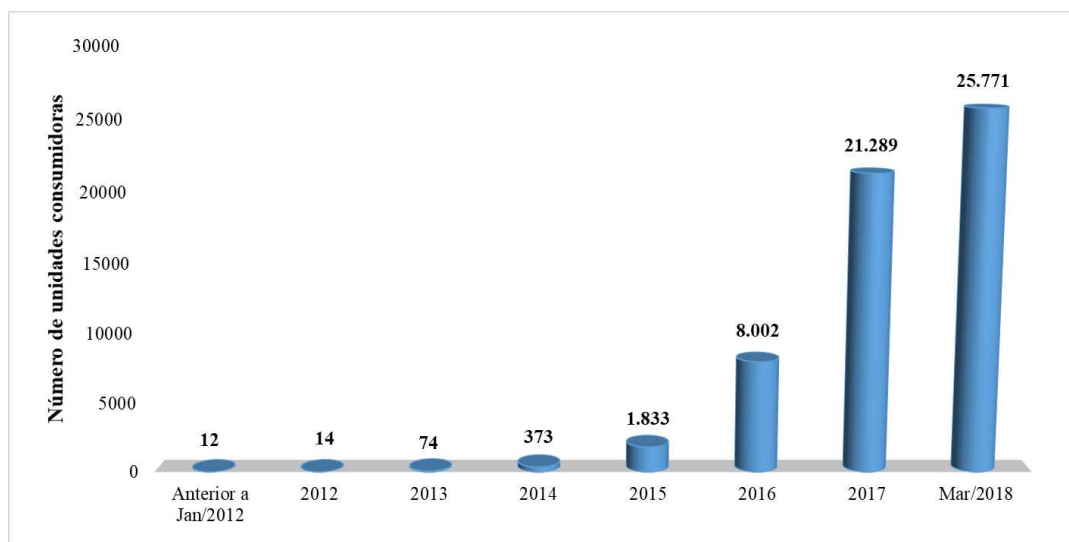


Figura 6 - Número de unidades consumidoras com microgeração ou minigeração distribuída conectadas à rede.

Fonte: (ANEEL, 2016b).

Com relação a centrais fotovoltaicas, até março de 2018, existiam 25.771 sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil, totalizando uma potência instalada de 231.741 MW_p (ANEEL, 2016b), o que representa 75% da capacidade instalada total de geração distribuída, correspondente a todas as fontes de energia renovável.

Embora o impacto ambiental causado pela implantação de sistemas solares seja baixo comparado com o de hidrelétricas, a energia solar exige cuidados para que haja o maior aproveitamento da área utilizada. A instalação das placas solares, apesar de simples, requer, portanto, cautela para que essa perda seja minimizada.

Em propriedades que possuem painéis solares, o mais comum é encontrá-los instalados nos telhados, posicionados para o mínimo uso de espaço possível. Este modo de instalação, entretanto, é ineficiente para casas com telhados pequenos e edifícios com dezenas de moradores. Nestes casos, a área disponível para o posicionamento de painéis fotovoltaicos na maioria das vezes não é suficiente para a instalação de um sistema que seja capaz de suprir as necessidades da propriedade. Devido ao crescimento da população mundial, o uso da terra se tornou uma valiosa commodity, criando a necessidade de se estudar maneiras de diminuir a área ocupada para assegurar o desenvolvimento de futuras gerações.

Sistemas fotovoltaicos fixos ao solo possuem a desvantagem de ocupar grandes áreas de terra que poderiam ser utilizadas para a agricultura, construção de indústrias, prédios, etc. Nesse sentido, surge uma forma alternativa de posicionamento de placas na forma de uma árvore fotovoltaica, uma nova e promissora maneira de integrar a energia solar fotovoltaica às construções, otimizando ao máximo o espaço necessário (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018).

1.2 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo desenvolver três árvores fotovoltaicas, cada uma construída respeitando a filotaxia de uma árvore comum, equipada com células fotovoltaicas (representando as folhas da árvore), com os seguintes objetivos específicos:

- i. Estudar e entender a filotaxia das plantas, que trata da forma como as folhas e troncos de árvores se desenvolvem na natureza;
- ii. Construir e testar três protótipos de árvore em pequena escala utilizando a disposição estudada, variando o espaçamento entre as folhas em cada árvore;
- iii. Desenvolver um sistema de monitoramento de dados de geração de energia elétrica capaz de armazenar as informações a respeito do sistema fotovoltaico, como tensão, corrente, e energia gerada;
- iv. Comparar a geração de energia das árvores fotovoltaicas com a disposição tradicional de painéis, a fim de se determinar qual conjunto de células obteve maior eficiência.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação de mestrado é constituída de 5 capítulos.

O Capítulo 1 introduz, de forma geral e compacta, os temas abordados neste trabalho e sintetiza as limitações e contribuições da presente pesquisa.

No Capítulo 2 é realizada uma pesquisa bibliográfica acerca dos instrumentos e equipamentos que serão utilizados neste trabalho. Além disso, são apresentados os programas de computador usados e outros conhecimentos específicos necessários à conclusão deste projeto.

No capítulo 3 são apresentadas as etapas de construção dos protótipos das árvores fotovoltaicas e elaboração dos programas que compõem o sistema de monitoramento. Há ainda a definição das ligações do sistema, a montagem do circuito de carga e a explicação sobre como o experimento foi realizado.

No capítulo 4, é feita uma análise dos resultados obtidos, comparando a geração de energia dos protótipos e encontrando, por meio de análise estatística, o arranjo de melhor eficiência energética.

No capítulo 5 a conclusão geral deste trabalho é discutida, comentando os testes realizados com os protótipos, bem como os problemas encontrados durante o desenvolvimento do projeto. Além disso, são propostas sugestões de trabalhos futuros relativos ao tema desta pesquisa.

1.4 Contribuições da pesquisa

Este trabalho visa analisar e responder à dúvida se o posicionamento de células ou painéis solares em forma de árvore é energeticamente mais eficiente que o posicionamento horizontal geralmente utilizado para painéis solares hoje em dia. No formato em árvore, apesar da possibilidade de uso de um número maior de células, pode ocorrer o sombreamento de células, prejudicando a geração de energia. Já no formato horizontal, tem-se um número menor de células compondo o sistema, não há sombreamento e a radiação solar incide diretamente sobre as placas.

Dessa forma, considerando as vantagens e desvantagens de cada formato, este trabalho irá concluir se a maior quantidade de placas compensa o efeito do sombreamento que ocorre no formato em árvore, tornando-o mais eficiente em relação à geração de energia elétrica por unidade de área.

1.5 Limitações da Pesquisa

Esta pesquisa analisou a geração de energia elétrica de árvores fotovoltaicas utilizando um único padrão de filotaxia. Como foi visto, existem diversas formas de disposição das células na árvore, cada uma delas podendo ser ou não energeticamente mais eficiente que a outra. Dessa forma, esta pesquisa aborda uma

pequena fração do vasto número de possibilidades que existem de se construir uma árvore fotovoltaica.

Além disso, o tamanho das células (folhas da árvore) também pode variar e este fator influencia diretamente na quantidade de energia gerada pela árvore. Nesta pesquisa foi utilizado apenas um tamanho de célula solar, não se analisando o comportamento das árvores quando equipadas com outros tipos de células.

. A presença de um dispositivo Seguidor de Máxima Transferência de Potência – SMTP poderia produzir dados mais conclusivos sobre a geração de energia elétrica, uma vez que sua função é fazer com que o sistema trabalhe em condições ideais, consequentemente gerando mais energia. Tal dispositivo não foi utilizado neste estudo, devido à alta complexidade em se construir um sistema SMTP para uma faixa de potências tão baixa quanto às envolvidas neste trabalho. Em contrapartida, foi utilizado um modelo de aproximações para que se chegasse a um resultado mais próximo possível do SMTP. Além disso, a influência da temperatura sobre a estimativa do sistema de máxima transferência de potência não foi considerada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Geração de energia fotovoltaica

2.1.1 O efeito fotovoltaico

O elemento fundamental na conversão fotovoltaica é a célula solar. O princípio de funcionamento dessas células é baseado na conversão da energia do sol em energia elétrica, fenômeno chamado de Efeito Fotovoltaico, descoberto em 1839 por Alexandre Edmond Becquerel ao observar que certos materiais eram capazes de produzir corrente elétrica quando expostos à luz. A partir de 1905, Albert Einstein desenvolveu teorias que explicaram de fato este efeito e possibilitaram o avanço de pesquisas e estudos nesta área. Em 1922, Einstein recebeu o prêmio Nobel de física por sua contribuição. No entanto, somente em 1954 foi produzida a primeira célula fotovoltaica com uma eficiência de conversão aceitável, de cerca de 6% (ALONSO; GARCÍA; SILVA, 2013). A partir daí iniciou-se a produção industrial de módulos fotovoltaicos, aliado ao desenvolvimento da eletrônica, sobretudo para aplicações espaciais. Entretanto, a grande mudança ocorreu a partir dos anos 70, motivada pela crise do petróleo, o que impulsionou as pesquisas e estudos sobre energia solar fotovoltaica como uma opção de uso de fontes energéticas inesgotáveis.

A energia solar chega à Terra na forma de energia eletromagnética, de diferentes frequências e comprimentos de onda. É composta por fótons, que formam um vasto espectro de tipos de ondas, que inclui raios gama, ondas de rádio e inclusive a luz visível, que é a parcela do espectro que o ser humano consegue enxergar e justamente a utilizada pelas plantas para a realização de fotossíntese.

Em alguns materiais semicondutores, os fótons da radiação solar são capazes de transmitir sua energia aos elétrons de valência do semicondutor, conseguindo romper suas ligações permitindo que fiquem livres e movimentem-se pelo material. Quando uma ligação se rompe e um elétron se desprende, sua ausência se chama lacuna, que também pode mover-se pelo semicondutor. Dessa forma, as propriedades de condução elétrica de um semicondutor devem-se tanto ao movimento dos elétrons, quanto ao movimento das lacunas, denominando-se ambos, portadores de carga.

Para evitar que a ligação entre elétron e lacuna não seja refeita, um campo elétrico é aplicado obrigando os dois portadores a movimentarem-se em sentidos opostos. Esta movimentação de elétrons e lacunas gera uma corrente elétrica no semicondutor, que poderia ser utilizada por um circuito externo. Dessa forma, uma célula solar é basicamente um semicondutor preparado para que seja possível utilizar a corrente elétrica gerada em um circuito externo. Em seguida será descrita a estrutura convencional da célula solar e as diferentes tecnologias existentes atualmente.

2.1.2 Estrutura da célula solar fotovoltaica

O semicondutor mais utilizado para a construção de células solares é o silício, considerado o segundo elemento químico mais abundante na natureza, perdendo apenas para o oxigênio. O campo elétrico é gerado ao se combinar o silício com outros elementos que apresentam número de elétrons de valência diferente do número de elétrons do silício. Dessa forma, combinando o silício com um elemento contendo átomos em excesso, como o fósforo, cria-se a camada negativa (n) da célula, ou seja, uma camada com maior número de elétrons. Do outro lado, combina-se o silício a um elemento de menor número de elétrons, criando a camada positiva (p) da célula, que apresenta maior número de lacunas. A união entre essas duas camadas é chamada de junção p-n. Adicionando-se contatos metálicos, a corrente

elétrica gerada pode ser extraída para uma carga externa. A Figura 7 ilustra o princípio de funcionamento de uma célula solar.

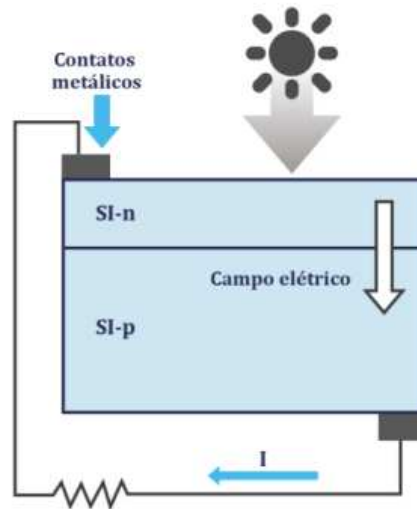


Figura 7 - Princípio de funcionamento de uma célula solar.
Fonte: (ALONSO; GARCÍA; SILVA, 2013).

Quando a célula está conectada a uma carga e radiação solar incide sobre sua superfície, é gerada uma diferença de potencial que induz a circulação de corrente do terminal positivo ao terminal negativo da célula.

2.1.3 Parâmetros da célula solar fotovoltaica

O funcionamento de uma célula quando exposta à radiação solar pode ser representado pelo circuito elétrico exibido na Figura 8.

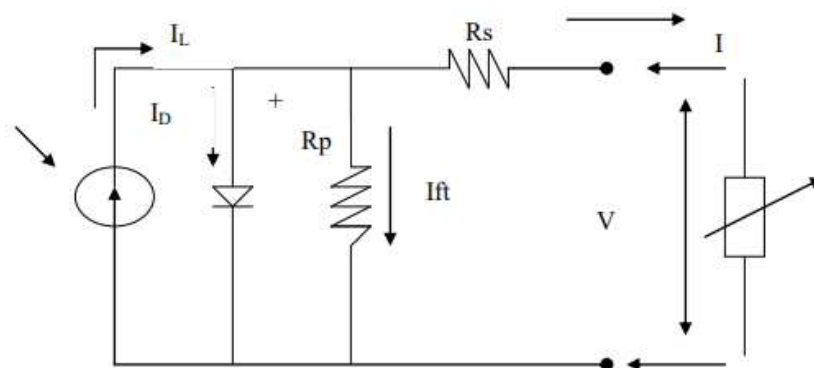


Figura 8 - Circuito elétrico equivalente de uma célula fotovoltaica.
Fonte: (FADIGAS, 2014).

A equação característica deste modelo é dada por (CABRAL, 2006):

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{V - \Delta V}{C_2 V_{oc}} \right) - 1 \right] \right\} + \Delta I \quad (1)$$

sendo que,

$$C_2 = \frac{V_{mp}/V_{oc} - 1}{\ln(1 - I_{mp}/I_{sc})} \quad (2)$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_{mp}}{I_{sc}} \right) \exp \left(- \frac{V_{mp}}{C_2 V_{oc}} \right) \quad (3)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{S_m}{S_{mref}} \right) \Delta T + \left(\frac{S_m}{S_{mref}} - 1 \right) I_{sc} \quad (4)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (5)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (6)$$

$$T = T_a + 0,02 S_m \quad (7)$$

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (8)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (9)$$

em que,

V – tensão de saída do circuito, V;

V_C – tensão de circuito aberto, V;

V_{mp} – tensão de máxima potência, V;

V_{ref} – tensão nas condições de referência, V;

I – corrente nos terminais de saída, A;

I_{sc} – corrente de curto-circuito, A;

I_{mp} – corrente máxima potência, A;

I_{ref} – corrente nas condições de referência, A;

α – coeficiente de temperatura para a corrente de curto-circuito na irradiância solar de referência, A/°C;

β - coeficiente de temperatura para a tensão de circuito aberto na irradiância

solar de referência, $V/^\circ C$;

R_s – Resistência série, Ω ;

S_m – Irradiância solar global no plano do gerador fotovoltaico, W/m^2 ;

S_{mref} - Irradiância solar de referência, $1000 W/m^2$;

T_a – Temperatura ambiente, $^\circ C$;

T – temperatura da célula fotovoltaica, $^\circ C$; e

T_{ref} – temperatura de referência da célula fotovoltaica, $25^\circ C$.

Para determinar-se o valor da resistência série, utilizou-se a Lei de Ohm para a potência, como mostrado na Equação 10:

$$P = V I \quad (10)$$

em que,

P – potência de saída do gerador, W ;

V – tensão de saída do gerador, V ; e

I – corrente de saída do gerador, A .

Por meio do manuseio de equações algébricas, é possível determinar-se o valor da resistência. Substituindo-se I na Equação 10 pela Equação 1, tem-se:

$$R_s = \frac{d S_{mref}}{b S_m (\alpha T - \alpha T_{ref} + I_{SC})} \quad (11)$$

sendo que,

$$d = V_{mp} b + c V_{mp} - b V - b \beta T + b \beta T_{ref} - c V_{oc} \quad (12)$$

$$b = \ln \left(\frac{I_{SC} - I_{mp}}{I_{SC}} \right) \quad (13)$$

$$c = \ln \left(\frac{-P + V I_{SC} + V \alpha I_{SC} - V \alpha I_{mp}}{V (I_{SC} - I_{mp})} \right) \quad (14)$$

$$a = \exp \left(- \frac{V_{mp} \ln \left(\frac{I_{SC} - I_{mp}}{I_{SC}} \right)}{V_{mp} - V_{oc}} \right) \quad (15)$$

em que,

P – Potência máxima, W.

A característica elétrica de uma célula é geralmente representada pela sua curva de corrente versus tensão (I-V). Toda célula possui uma curva característica I-V, que é capaz de descrever o comportamento desta célula em diferentes situações. Durante seu funcionamento e de acordo com a carga ligada ao sistema, a célula tem um ponto de trabalho situado sobre esta curva, dependendo das condições a que está submetida. A Figura 9 mostra um exemplo de curva característica.

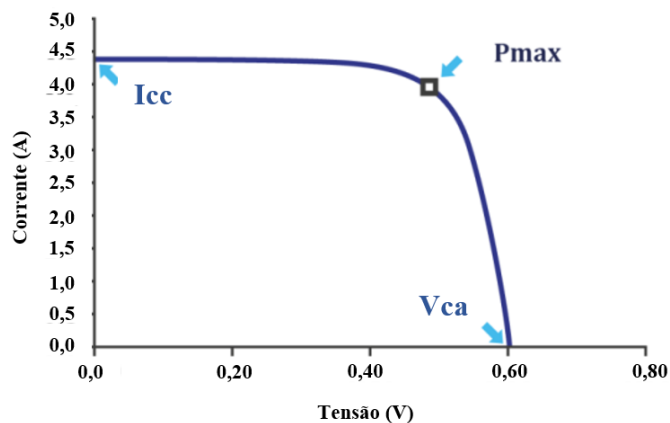


Figura 9 - Curva característica de uma célula fotovoltaica.
Fonte: (ALONSO; GARCÍA; SILVA, 2013).

Com relação à curva característica de células, é importante entender os seguintes conceitos:

- **Corrente de curto circuito (I_{SC}):** Corrente máxima produzida pela célula solar, a uma tensão igual a zero.
- **Tensão de circuito aberto (V_{OC}):** Tensão máxima do dispositivo, a uma corrente igual a zero.
- **Potência máxima (P_{MAX}):** Potência máxima produzida pelo dispositivo, correspondente ao par máximo $I \times V$.

- **Corrente no ponto de máxima potência (I_{MAX}):** É o valor da corrente para P_{MAX} .
- **Tensão no ponto de máxima potência (V_{MAX}):** É o valor de tensão para P_{MAX} .
- **Fill Fator (F_F):** Corresponde ao quociente entre P_{MAX} e o produto I_{SC} x V_{OC} . Geralmente expresso em porcentagem, representa um fator de qualidade do dispositivo, uma vez que uma célula será melhor quanto maior for o seu Fator de Preenchimento da célula.
- **Eficiência η :** É o quociente entre a potência máxima que a célula pode gerar e a potência da radiação solar P_L que incide sobre ela.

Como visto na Figura 9, uma célula solar produz a máxima quantidade de energia quando opera no ponto de máxima potência, ou seja, no joelho da curva I-V. Estando submetidos às variações climáticas ao longo do dia, geradores fotovoltaicos somente obtêm o máximo de energia possível se possuírem algum sistema que modifique dinamicamente a impedância do sistema, a fim de que opere sempre no joelho da curva, gerando a máxima potência possível. Assim, um gerador somente irá gerar a máxima energia possível se for utilizado Seguidor de Máxima Transferência de Potência – SMTP.

Variações na temperatura da célula, radiação incidente ou mesmo alteração da carga fazem com que a carga I-V se altere, alterando também o ponto de operação e consequentemente a geração de energia elétrica. A corrente gerada pela célula é afetada diretamente pela radiação solar incidente, enquanto que variações na temperatura afetam principalmente a tensão na célula.

A tensão na célula é inversamente proporcional à temperatura do dispositivo. O aumento da temperatura da célula solar fotovoltaica ocasiona uma queda na tensão gerada, consequentemente diminuindo a energia elétrica gerada. A Figura 10 ilustra o comportamento da curva característica de acordo com a variação de temperatura, a uma radiação solar constante.

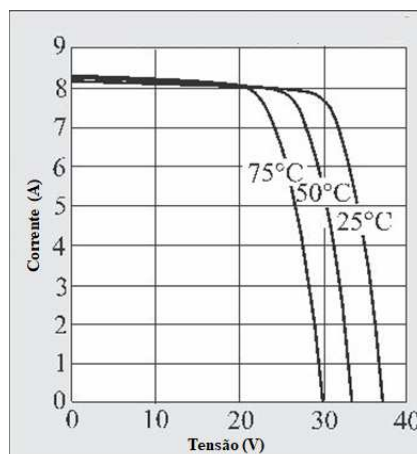


Figura 10 - Comportamento da curva característica de uma célula solar de acordo com a variação de temperatura, para 1000W/m².
Fonte: (COELHO; MARTINS, 2012).

Por outro lado, na Figura 11 observa-se como o aumento da radiação solar incidente ocasiona um aumento na corrente gerada, a uma temperatura constante de 25°, consequentemente aumentando a energia produzida pela célula.

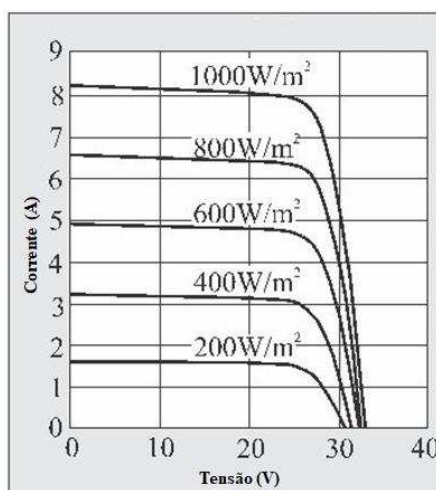


Figura 11 - Comportamento da curva característica de uma célula solar de acordo com a variação de radiação incidente a 25° C.
Fonte: (COELHO; MARTINS, 2012).

2.1.4 Tipos de células fotovoltaicas

De acordo com o material com que são construídas e também de acordo com sua estrutura de construção, as células solares podem ser classificadas em diversos tipos, destacando-se (ALONSO; GARCÍA; SILVA, 2013):

- **Células de Silício monocristalino (Si-m):** As células crescem a partir de um único cristal, de modo que todo o material faz parte de uma mesma rede cristalina.
- **Células de Silício policristalinas (Si-p) e/ou multicristalino.** A estrutura está

formada por vários monocristais, com orientações cristalográficas aleatórias. Em algumas ocasiões se distingue entre células policristalinas e multicristalinas em função do tamanho dos cristais, denominando-se policristalinas aquelas com cristais menores, na gama de $1\mu\text{m}$ e 1mm , e multicristalinas aquelas com tamanhos de cristais maiores (vários milímetros).

- **Células de Silício Amorfo (Si-a).** Aqui as posições, distancias interatômicas e direções das ligações apresentam dispersão com relação à da estrutura cristalina ordenada. O processo de fabricação é mais simples, mas o rendimento do dispositivo é menor. A espessura da célula é menor, de modo que entram dentro da categoria de células de lâmina fina.

- **Células de materiais híbridos.** Denominam-se células de heterounião e consistem em várias camadas de materiais monocristalinos sobre as quais se deposita um segundo material que pode ser de estrutura poli (ou micro) cristalina, ou amorfa.

A Figura 12 traz algumas representações das possíveis estruturas de silício que compõem uma célula solar fotovoltaica.

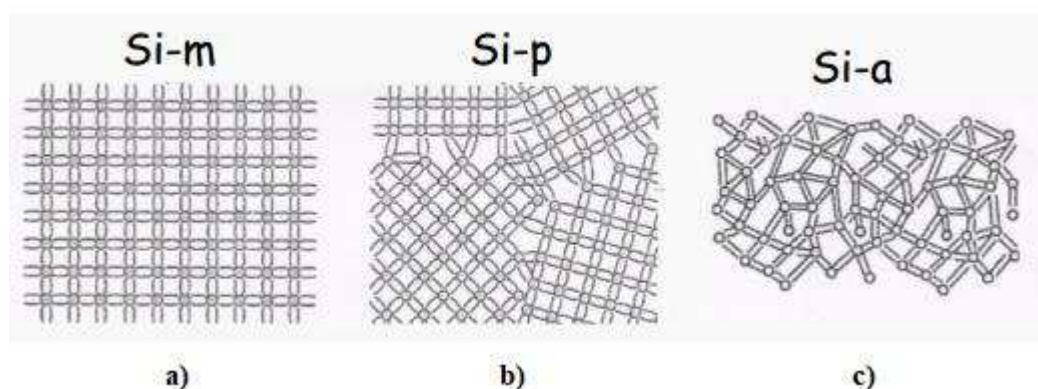


Figura 12 - Estruturas de silício geralmente utilizadas em células fotovoltaicas: a) silício monocristalino, b) silício policristalino, c) silício amorfo.

Fonte: (ALONSO; GARCÍA; SILVA, 2013).

2.1.5 Formas de associação de células fotovoltaicas

Uma única célula fotovoltaica não é capaz de produzir muita energia, porém existem formas de associação de células que aumentam a capacidade de geração de energia do sistema resultante, a fim de atender à demanda energética.

Quando associadas em série, a tensão resultante do novo sistema formado equivale à soma das tensões de cada célula que compõe o conjunto, enquanto que a corrente não se altera, como mostrado na Figura 13.

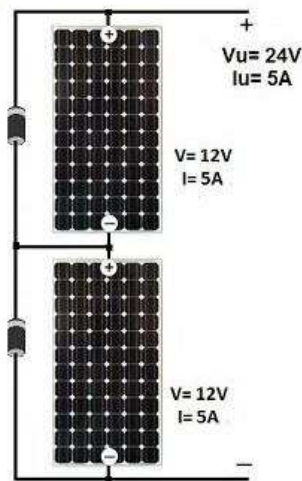


Figura 13 - Associação de painéis solares em série.
Fonte: (MPPTSOLAR, 2017a).

Quando associadas em paralelo, a corrente resultante do novo sistema equivale à soma das correntes de cada célula que compõe o conjunto, enquanto que a tensão não se altera, como exibido na Figura 14.

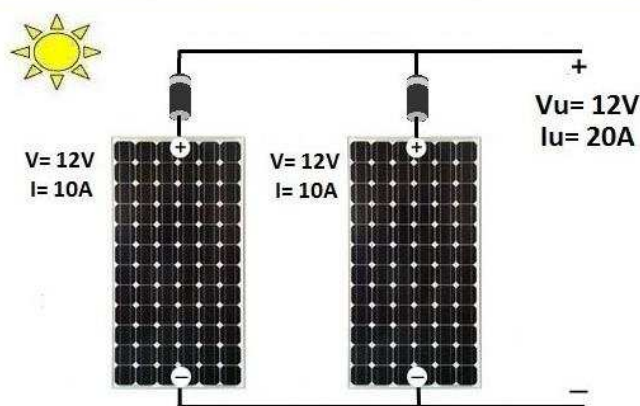


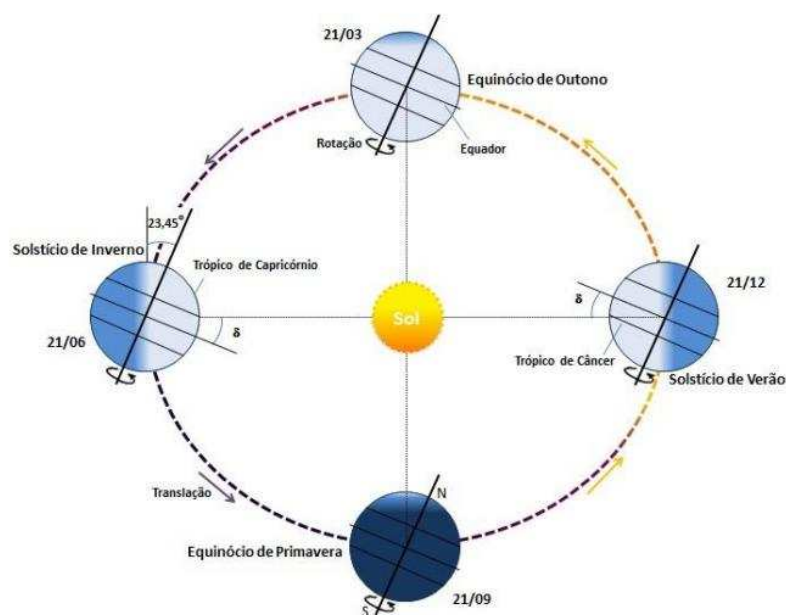
Figura 14 - Associação de painéis solares em paralelo.
Fonte: (MPPTSOLAR, 2017b).

As células podem ser associadas tanto em série quanto em paralelo, a fim de se obter as correntes e tensões desejadas para o tipo de aplicação.

2.1.6 Posicionamento e orientação de painéis

Para se verificar a viabilidade de um sistema fotovoltaico é imprescindível que se faça a verificação dos níveis de intensidade de radiação solar na localidade da instalação assim como sua variação ao longo do ano. O termo radiação solar se trata de uma medida de potência por unidade de área, cuja unidade é dada em Watt por metro quadrado (W/m^2), ou miliWatt por centímetro quadrado (mW/cm^2) (PINHO; GALDINO, 2014).

O planeta terra recebe em média 1367 W/m^2 de radiação solar. Ao chegar à atmosfera, esse valor cai para cerca de 1000 W/m^2 , devido aos efeitos de dispersão da atmosfera (COMISSÃO EUROPEIA, 2004). A variação dos índices de radiação está relacionada com o movimento de rotação e translação da terra ao longo do ano, em que o planeta realiza uma órbita elíptica ao redor do sol. A Figura 15 apresenta a trajetória da terra ao redor do sol:



**Figura 15 - Órbita da Terra ao redor do sol, com o eixo inclinado a um ângulo de $23,45^\circ$.
Fonte: (PINHO; GALDINO, 2014).**

As estações do ano correspondem à divisão do movimento de translação da Terra em quatro períodos, com duração de cerca de 3 meses cada. Devido à diferença de incidência solar em cada estação do ano, estas possuem condições atmosféricas distintas. O início das estações do ano é determinado pelos solstícios e equinócios.

O eixo da Terra se mantém inclinado a um ângulo de $23,4^\circ$ praticamente durante todo o movimento de translação. Isso faz com que a área terrestre iluminada pelo sol varie em cada hemisfério. Como pode ser visto na Figura 15, no solstício de verão os dias são mais longos no hemisfério sul. Já em localidades próximas ao Equador, a duração dos dias sofre poucas variações.

A radiação global que incide sobre a superfície da Terra, depois de atravessar a atmosfera, pode ser decomposta em três componentes: radiação direta, radiação difusa e albedo, como mostra a Figura 16.

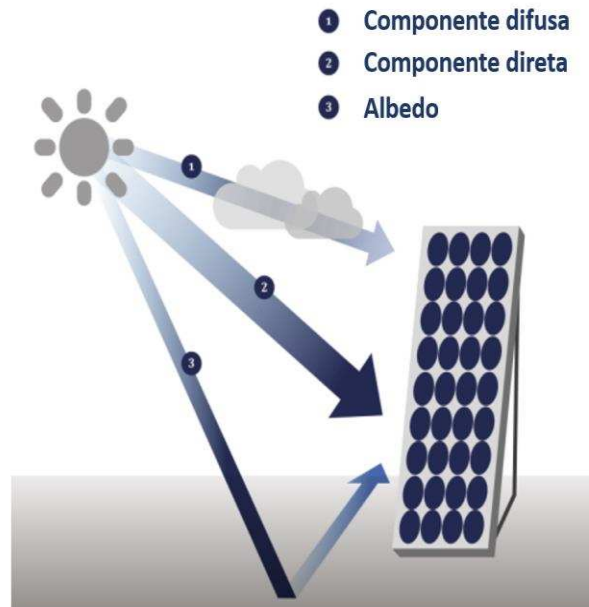


Figura 16 - Componentes da radiação solar.
Fonte: (ALONSO; GARCÍA; SILVA, 2013).

A radiação direta trata-se da porção da radiação solar que não sofre nenhum desvio em sua trajetória ao passar pela atmosfera terrestre. É o tipo de radiação que mais contribui para a geração de energia fotovoltaica em dias ensolarados. A radiação difusa é resultado da dispersão da luz produzida pela reflexão, refração e absorção pela atmosfera. Já o albedo, consiste na radiação refletida pela própria superfície terrestre, que apesar de ser de menor intensidade, também pode influenciar no desempenho de um dispositivo fotovoltaico.

Dentre outros parâmetros, a nebulosidade tem papel fundamental nos valores de radiação solar global na superfície terrestre e influencia diretamente na participação de cada componente na composição global da radiação. Veselinovic et al. (2016) observaram que quanto maior o índice de nebulosidade, menores os valores de radiação solar global. Além disso, Moojen et al. (2012) afirmam que em dias com pouca nebulosidade e céu claro, a radiação global é composta em sua maioria pela componente direta, enquanto que o aumento da nebulosidade até certo ponto, cerca de 70% de cobertura total, faz com que a participação da radiação difusa aumente significativamente. A partir deste ponto, o aumento da nebulosidade ocasiona uma queda na radiação difusa.

A orientação e o posicionamento do sistema fotovoltaico instalado devem seguir algumas regras que garantirão a máxima geração de energia possível. Como

dito anteriormente, a região ao longo do Equador é faixa do planeta que mais recebe radiação solar constante ao longo do ano. Assim, sistemas fotovoltaicos localizados no hemisfério norte devem ser instalados virados para o sul. Da mesma forma, sistemas fotovoltaicos localizados no hemisfério sul devem ser instalados virados para o norte.

Definida a orientação, deve ser definido o ângulo em que os painéis estarão inclinados, com relação ao solo. Como dito, a Terra realiza uma órbita elíptica ao redor do sol, em um plano inclinado de cerca de $23,4^\circ$. Por conta dessa inclinação, a declinação solar varia ao longo do ano, de acordo com o dia, segundo a Equação 16:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{360}{365} (284 + d)\right) \quad (16)$$

em que,

d - Equivale ao número do dia do ano, adimensional.

Como observado na Figura 15, desconsiderando-se o efeito da nebulosidade, durante o verão o sol está posicionado à uma angulação maior ($+23,4^\circ$) do que durante o inverno ($-23,4^\circ$). Já no outono ou na primavera, o sol se localiza numa posição intermediária entre esses dois extremos. A Figura 17 demonstra a configuração para um painel instalado numa localidade de latitude $\phi = 51^\circ$.

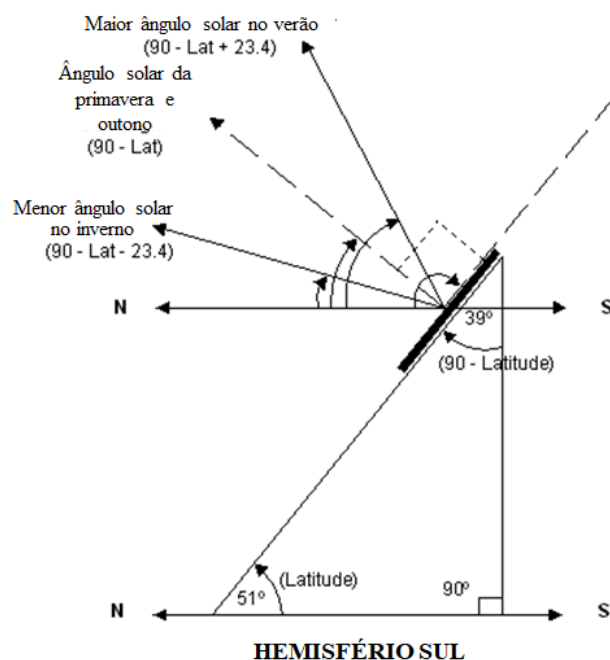


Figura 17 - Angulação para um painel instalado à latitude $= 51^\circ$.
Fonte: (RASC, 2016).

Para sistemas fotovoltaicos fixos, sua instalação visando o aproveitamento na primavera e outono favorecem o rendimento do sistema ao longo de todo o ano, uma vez que se fosse escolhido algum dos extremos (inverno ou verão), o sistema iria funcionar muito abaixo da capacidade fora do período de projeto. Dessa forma, por meio das relações trigonométricas exibidas na Figura 17, para definir-se a angulação dos painéis com o plano horizontal, tem-se a seguinte fórmula:

$$\alpha = \varphi \quad (17)$$

em que,

α – ângulo de inclinação, graus; e

φ – Latitude local, graus.

De acordo com a Equação 17, os painéis devem ser instalados a uma inclinação equivalente à latitude local, para um maior aproveitamento ao longo do ano.

2.1.7 O efeito do sombreamento

Para alcançar o máximo desempenho, é imprescindível que os painéis recebam a radiação solar diretamente, sem a presença de obstáculos que possam atrapalhar o processo. Quando existem agentes (construídos ou naturais) que impedem que um sistema fotovoltaico, ou parte dele, receba radiação solar, ocorre o sombreamento das células, que acaba por prejudicar a geração de energia.

O efeito do sombreamento ocorre quando um sistema fotovoltaico não recebe radiação solar de maneira uniforme, devido a diferentes possíveis obstáculos. Nesses casos, as células que recebem uma quantidade menor de radiação podem passar a atuar como cargas no sistema, consumindo a energia produzida pelas outras células, ao invés de gerá-la (VEERAPEN e WEN, 2016). Ao consumir energia, a célula sombreada dissipa potência útil, que se for de um valor elevado, aumenta consideravelmente a temperatura do módulo, diminuindo sua eficiência e podendo até destruí-lo. A Figura 18 compara o comportamento normal da curva I-V de um sistema fotovoltaico a quando este é sombreado.

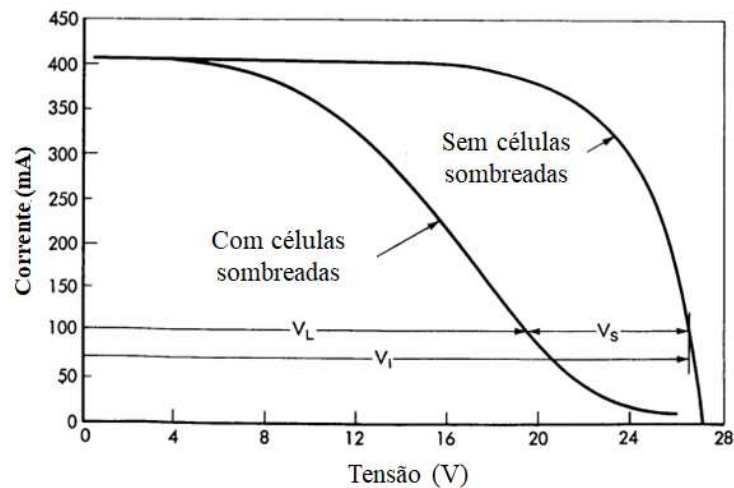


Figura 18 - Efeito do sombreamento sobre um sistema fotovoltaico.
Fonte: (SULLIVAN, 1965).

Em casos de pouco sombreamento, como a tensão de uma célula está relacionada à sua temperatura, o efeito do sombreamento sobre a tensão gerada não é tão intenso. De fato, dependendo do nível de sombreamento, uma célula sombreada ainda é capaz de receber a componente difusa da radiação solar e assim fornecer uma tensão satisfatória que atenda à aplicação. Nestes casos, a presença de um dispositivo Seguidor de Máxima Transferência de Potência (SMTP) é altamente aconselhada para que o sistema fotovoltaico maximize o seu rendimento.

Veerapen e Wen (2016) abordam o problema do sombreamento em placas fotovoltaicas e sugerem um sistema que poderia minimizar as perdas de energia por conta da queda na eficiência do sistema, baseado em um algoritmo SMTP e na utilização de diodos no circuito. Sullivan (1965) vai além e realiza uma análise completa sobre o efeito do sombreamento em células fotovoltaicas, destacando a importância da adição de diodos de bloqueio e de passo ao circuito do sistema, a fim de se evitar que as células sombreadas dissipem a energia gerada pelas outras células.

2.2 Formas de otimização de sistemas fotovoltaicos

2.2.1 Desenvolvimento da tecnologia

Desde a descoberta do efeito fotoelétrico em 1839 e da criação da primeira célula solar fotovoltaica em 1954, o uso da tecnologia fotovoltaica para geração de energia elétrica se mostrou promissor, como uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis. Apesar disso, mesmo após avanços e descobertas, a produção de energia fotovoltaica continua cara, principalmente devido à baixa eficiência das células

solares (HUANG et al., 2013). A partir da década de 1960, o silício se firmou como o semiconductor dominante na produção comercial de células solares, chegando a corresponder a mais de 80% do mercado mundial de células fotovoltaicas (GREEN, 2009). Entretanto, o material é frágil e o processo de fabricação é complexo, tornando-o assim, caro (STRÜMPEL et al., 2007).

Em uma tentativa de baratear os custos de produção de células, os estudos se voltaram para a fabricação de células de filme fino, que são mais resistentes e menos vulneráveis ao dano durante o processo (JOVANOVIĆ et al., 2017). Entretanto, células de filme fino possuem eficiência significativamente inferior (HAN et al., 2017). Células como a exibida na Figura 19 são flexíveis e de fácil instalação, o que facilita seu uso tanto em residências quanto em objetos mais leves, como mochilas e tecidos.

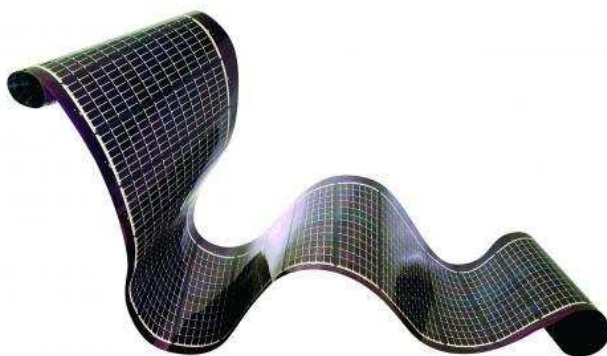


Figura 19 - Célula de filme fino.
Fonte: (KAMTEX SOLAR, 2018).

Estudos também apontaram a utilização de nanotecnologia como uma forma de baratear os custos envolvendo a fabricação de células fotovoltaicas e consequentemente, popularizar o seu uso. Novos materiais semicondutores, frutos de misturas de nano-cristais e polímeros podem vir a alcançar altas taxas de eficiência, tornando a energia fotovoltaica cada vez mais acessível. Atualmente, além do silício, existem outros materiais sendo estudados como a base de construção de células fotovoltaicas, como o perovskites (LEE et al., 2012) e o gálio (LEE et al., 2014).

A Figura 20 apresenta os principais avanços nas pesquisas de eficiência energética de células fotovoltaicas, em diversos institutos de pesquisa no mundo.

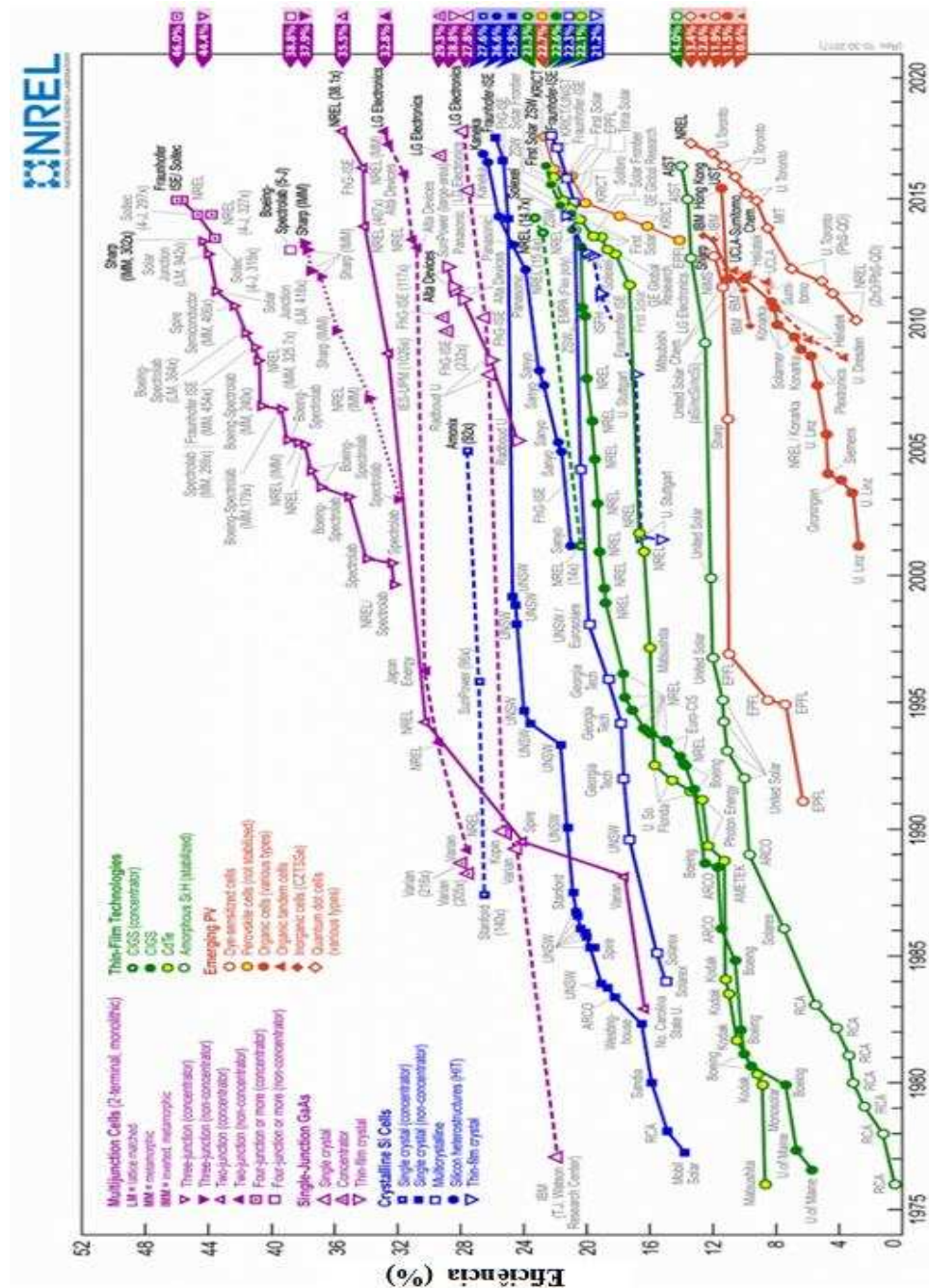


Figura 20 - Linha do tempo das principais pesquisas sobre energia solar fotovoltaica no mundo.
Fonte: (NREL, 2017).

Pode-se observar que as células de multi-junção apresentam índices mais altos de eficiência. Entretanto, existem tecnologias emergentes que apresentaram rápido crescimento nos últimos anos, a exemplo do perovskites, material semiconductor de grande potencial para utilização em aplicações envolvendo energia fotovoltaica. O recorde atual pertence ao Instituto Fraunhofer, na Alemanha, que desenvolveu uma célula, composta por 4 junções e concentração, com eficiência de 46% (FRAUNHOFER, 2014). Cabe ressaltar que esta eficiência foi alcançada em

laboratório, sendo que os módulos comerciais atuais possuem eficiência por volta de 20%.

2.2.2 *Uso de concentradores*

O uso de sistemas de concentração é mais uma maneira de se otimizar o funcionamento de um sistema fotovoltaico, aumentando seu rendimento. Este sistema consiste em um instrumento ótico responsável por concentrar a quantidade de radiação solar incidente em uma célula ou um conjunto delas, ocasionando uma geração de energia elétrica superior à que seria obtida sem uso do concentrador. O uso destes sistemas ainda permite que se consiga uma mesma eficiência ao se usar um número menor de células (MOMENI e NI, 2018). Isso significa que enquanto um sistema sem concentração composto por 10 células seria capaz de produzir X kWh, outro sistema com concentração iria gerar os mesmos X kWh sendo composto por 6 células, por exemplo. A Figura 21 ilustra este fenômeno:

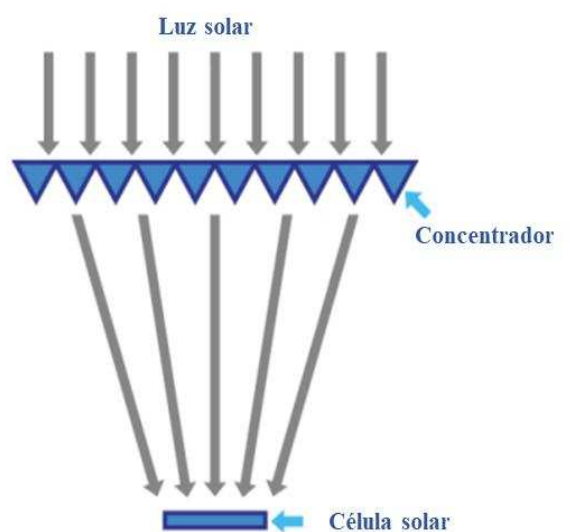


Figura 21 - Concentrador solar.
Fonte: (ALONSO; GARCÍA; SILVA, 2013).

As pesquisas sobre concentradores para uso em sistemas fotovoltaicos fizeram com que o custo de instalação destes equipamentos diminuísse e também ocasionaram um aumento na eficiência energética obtida. Momeni e Ni (2018) introduzem o conceito de um concentrador solar inteligente, construído com uma impressora 4D e capaz de aumentar a eficiência ótica do sistema em até 25%. Por sua vez, Karathanassis et al. (2017) estudam o comportamento de um concentrador parabólico tanto em sistemas fotovoltaicos, mas também sistemas solares para

aquecimento de água. Meng et al. (2016) também abordam este tópico ao estudar concentradores solares em sistemas híbridos, formados por um sistema fotovoltaico funcionando em conjunto com um sistema solar térmico.

Os sistemas fotovoltaicos que possuem concentradores também podem ser equipados com rastreadores e são compostos por células de alta eficiência, visando o máximo aproveitamento da radiação concentrada. Em geral, sistemas fotovoltaicos com concentradores são compostos por:

- Células fotovoltaicas: Células de alta eficiência energética, para receber a radiação concentrada;
- Instrumentos óticos: Elementos de concentração que podem ser refrativos, reflexivos ou uma combinação dos dois (SUTHERLAND, 2018);
- Rastreador: Os sistemas de concentração somente operam de forma satisfatória quando a radiação incide a um determinado ângulo, definido durante o processo de fabricação. Assim, os sistemas de rastreamento favorecem a incidência da máxima radiação solar sobre o aparato ao longo dia (APOSTOLERIS; STEFANCICH; CHIESA, 2016);
- Sistema de arrefecimento: Sistema responsável por dissipar o calor em excesso gerado pela concentração da radiação.

Os concentradores podem ser feitos de variadas formas. Os concentradores refrativos se baseiam no uso de lentes refrativas, como as lentes de Fresnel, para a concentração da radiação incidente (HOPWOOD, 2007). Por sua vez, os concentradores reflexivos utilizam materiais reflexivos para concentrar a radiação, geralmente posicionados em lados opostos envolvendo a célula fotovoltaica (MA; ZHENG; CHEN, 2017). Vidro, alumínio e plástico estão entre os materiais mais utilizados. Por fim, existem os concentradores híbridos, que possuem elementos refrativos e reflexivos, aumentando a eficiência da concentração da radiação. A Figura 22 exhibe estes três tipos de concentradores:



Figura 22 - Diferentes tipos de concentradores.
Fonte: (ALONSO; GARCÍA; SILVA, 2013).

Ao mesmo tempo em que o uso de concentradores aumenta a geração de energia de células fotovoltaicas, a incidência concentrada de radiação ocasiona um aumento na temperatura dos módulos, e conseqüentemente uma diminuição na tensão gerada pelo painel. Além disso, a exposição prolongada diminui a vida útil da célula (COVENTRY, 2005). Como uma forma de combater esse efeito negativo do uso de concentradores, aconselha-se o uso de sistemas de arrefecimento para que o calor excessivo seja dissipado, diminuindo a temperatura da célula e assegurando um bom desempenho na geração de energia. Outra alternativa existente é a utilização de instrumentos óticos secundários, responsáveis por dividir a radiação incidente sobre o coletor principal, homogeneizando a radiação solar sobre a superfície da célula e evitando a criação de um foco pontual (KATZ et al., 2006), diminuindo assim o aquecimento da célula.

2.2.3 Uso de rastreadores

Diversas maneiras têm sido criadas para se maximizar a geração de energia de sistemas solares fotovoltaicos. Uma delas, são os rastreadores solares. Um rastreador solar acompanha o movimento do sol ao longo do dia, mantendo o sistema fotovoltaico a um ângulo ótimo para geração de energia elétrica (AL-ROUSAN; ISA; DESA, 2018).

Dependendo da aplicação, o movimento pode ser realizado considerando-se um ou dois eixos (SUMATHI et al., 2017), e a geração de energia pode aumentar até 45% se comparada com estruturas fotovoltaicas fixas. Entretanto, os gastos com instalação de manutenção são maiores (ANTONANZAS et al., 2018). A Figura 23 mostra a diferença entre um painel solar fixo e outro com sistema de rastreamento.

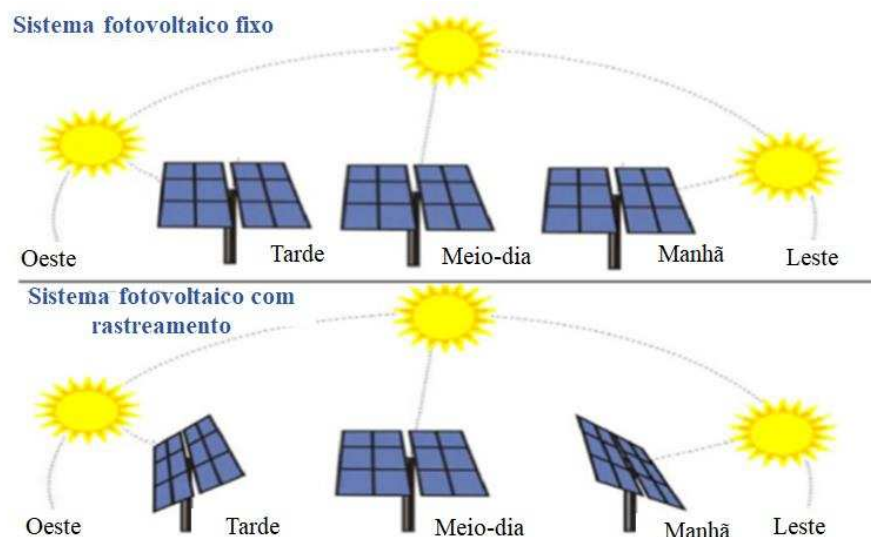


Figura 23 - Diferença entre um painel solar fixo e outro com sistema de rastreamento.
Fonte: (AL-ROUSAN; ISA; DESA, 2018).

Rastreadores podem ser classificados como passivos e ativos. O funcionamento de rastreadores passivos se baseia no uso do calor da radiação solar para causar a expansão de determinado gás, causando o movimento por meio do deslocamento de líquidos ou do próprio gás. Sistemas passivos apresentam menor grau de complexidade, mas ao mesmo tempo não possuem alta eficiência e se podem ser tornar pouco efetivos em baixas temperaturas. Sua maior desvantagem é a grande dependência das condições ambientais. Poulek (1994), por exemplo, desenvolveu um rastreador passivo de um eixo de baixo custo, que se deformava com facilidade e apresentava bom desempenho mesmo em baixas temperaturas. Clifford e Eastwood (2004) também apresentaram seu próprio sistema de rastreamento passivo composto por uma liga de alumínio e um amortecedor viscoso, aumentando em 23,3% a eficiência do sistema. Por sua vez, Obara et al. (2017) constroem um rastreador passivo utilizando um atuador baseado na expansão de hidreto metálico quando aquecido. Além disso, analisam a influência do vento no processo de rastreamento.

Rastreadores ativos, por sua vez, são sistemas que usam motores, engrenagens e outros controladores para realizar o movimento e fazer o sistema fotovoltaico acompanhar o movimento do sol no céu. Estes motores são controlados por um circuito que determina a direção e sentido do movimento a ser realizado, com base na informação recebida de sensores. Rastreadores ativos são mais precisos, mas precisam ser energizados para funcionarem, por isso um estudo criterioso sobre o

balanço energético do sistema deve ser realizado para se definir a real efetividade que o rastreador trará para o conjunto (SUMATHI et al., 2017).

Pode-se dizer que rastreadores ativos são divididos em três categorias: rastreamento de eixo único; rastreamento de eixo duplo e; rastreamento cronológico. O rastreador de eixo único é o mais simples e barato, porém apresenta baixa eficiência pois o sistema fotovoltaico pode ser movimentado apenas horizontalmente ou verticalmente. Já no rastreador de eixo duplo, o sistema pode ser movimentado tanto horizontalmente quanto verticalmente. No rastreamento cronológico, o sistema se movimenta na mesma velocidade e sentido de movimento do sol. Assim, um mecanismo de rotação simples permite que o sistema se movimente ao longo do dia, de maneira programada, mas sem saber ao certo se está voltado para o sol corretamente. O rastreador cronológico gira 15 graus por hora, e apesar de simples, apresenta resultados precisos (AL-ROUSAN; ISA; DESA, 2018)

Tharamuttam et al. (2017) desenvolveram um sistema totalmente automatizado de rastreamento, utilizando um algoritmo híbrido que combina tanto o uso de sensores quanto de modelos matemáticos para determinar a posição do sol. Barker et al. (2013) focaram na redução de custos de instalação e manutenção, ao desenvolver um rastreador de eixo duplo com materiais mais baratos e utilizando uma nova geometria. Por fim, Zhang et al. (2013) construíram um rastreador solar que utiliza tanto sensores de luminosidade quanto o movimento cronológico. As condições meteorológicas são estimadas utilizando quatro sensores fotoelétricos. Em dias ensolarados, o sistema de rastreamento funcionava com base nos dados dos sensores. Já em dias nublados, funcionava com base no movimento cronológico do sol.

2.2.4 Disposição dos painéis

O modo como o sistema fotovoltaico é instalado pode influenciar significativamente na geração de energia elétrica. Localização, área, formato e angulação são variáveis que devem ser estudadas e levadas em consideração antes de se instalar um sistema fotovoltaico, visando assim a máxima geração possível.

Ribeiro et al. (2016) ressaltam a importância de um estudo aprofundamento sobre as condições ideais de instalação antes de realizá-la, comparando vários tipos

de sistemas e concluindo que diferenças na instalação e disposição de sistemas semelhantes podem ocasionar uma diferença de até 200% na geração de energia.

Ghazali et al. (2017), por exemplo, aborda o conceito de fachada fotovoltaica, em que a fachada de prédios e casas é coberta por películas capazes de gerar energia elétrica. Além disso, os autores realizam uma análise econômica e de desempenho dos modelos de películas já existentes. Nagy et al. (2016) detalham todas as etapas do desenvolvimento de uma fachada fotovoltaica, desde a criação do conceito até a criação de protótipos. Na Figura 24 é exibida a fachada fotovoltaica deste trabalho:



Figura 24 - Protótipo de fachada fotovoltaica em Zurique, latitude: 47°.
Fonte: (NAGY et al., 2016).

Hui et al. (2017) analisam as vantagens e desvantagens da instalação de painéis solares flutuantes sobre mares e lagos. Sobre a água, os painéis ficam mais resfriados e contribuem para diminuir as taxas de evaporação, entretanto sofrem pela corrosão e perturbações das marés. Dey et al. (2018) vão além e propõem a construção de uma árvore fotovoltaica, nas cidades de São Francisco e Paris, obtendo uma eficiência superior à que seria obtida com uma disposição tradicional de painéis ocupando uma área equivalente.

2.3 Árvores fotovoltaicas

Uma árvore fotovoltaica é basicamente como uma árvore natural, mas com células solares posicionadas no lugar das folhas. Nesse contexto, TREE (árvore, em português), passa a significar (GUPTA; GUPTA, 2015):

T - Tree generating

R - Renewable

E - Energy and

E – Electricity

Que em português pode ser traduzido como: “Árvore gerando energia renovável e eletricidade”.

Uma árvore consiste em uma estrutura de sustentação, com ramificações contendo painéis fotovoltaicos que geram energia elétrica para a carga de celulares, computadores, e outros dispositivos eletrônicos, ocupando uma pequena área. Também podem ser utilizadas para iluminação pública (VERMA; MAZUMDER, 2014). Dependendo da construção, uma árvore solar pode chegar a ocupar 1% da área ocupada por um sistema fotovoltaico plano de mesma potência instalada (MAITY, 2013). Neste contexto, a disposição de células e painéis fotovoltaicos em forma de árvore se mostra como uma boa alternativa à disposição tradicional plana de painéis, sobretudo para locais com pequena área disponível para instalação (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018).

De uma forma geral, a árvore solar fotovoltaica pode trazer como benefícios:

- Aumento da conscientização a respeito das questões ambientais e da importância das fontes de energia renováveis;
- Aumento da eficiência de geração de energia de sistemas fotovoltaicos, consequentemente diminuindo custos associados;
- Redução da área ocupada por sistemas fotovoltaicos, sendo o uso da terra hoje considerado uma das *commodities* mais valiosas;
- Possibilidade de também se tornar uma árvore eólica, gerando energia por meio do vento.

O conceito de árvore fotovoltaica nos últimos anos tem sido estudado por diversos pesquisadores ao redor do mundo. Srinivas (2016) abordaram esta temática propondo uma estrutura em forma de árvore contendo painéis fotovoltaicos, capaz de gerar energia. O autor enfatiza a economia de área útil proporcionada por seu modelo de árvore solar, permitindo que a área não utilizada tenha outras aplicações. Patil e

Madiwal (2016) verificaram que uma árvore solar seria capaz de atender à demanda energética média de uma família indiana, de cerca de 52,5 kWh por mês. Vibhute e Shukla (2015) fizeram uma análise sobre a disposição de folhas e galhos na natureza e a sua possível aplicação na construção de árvores fotovoltaicas. Dimitrokali et al. (2015) investigaram diferentes métodos e modelos para a construção de árvores fotovoltaicas e a opinião do público após uma exibição dos modelos. Constataram que as pessoas são favoráveis às árvores fotovoltaicas e aprovam a nova disposição de painéis, principalmente quando estas além de gerar energia, também fornecem abrigo ou iluminação, ou seja, são multifuncionais. Uma árvore solar composta por células orgânicas foi estudada por Cao et al. (2014), que usaram um polímero para fabricar 12 células de formato semelhante ao de folhas de palmeira e depois mediram a energia gerada por esse conjunto. Bhuvaneswari et al. (2013) introduziram a ideia de se usar células de nanofio na construção de árvores fotovoltaicas. Células de nanofio apresentam tamanho reduzido e taxas de eficiência de conversão superiores, mas também possuem custo elevado.

Outros estudos produziram de fato um protótipo e analisaram o funcionamento de árvores fotovoltaicas em escala real, como é o caso de Maity (2013) que projetou uma árvore fotovoltaica de 2 kW_p ocupando uma área de apenas 0,28 m², como mostra a Figura 25. De acordo com o autor, seria necessária uma área de 50 m² para gerar 2,2 kWh de energia utilizando a disposição tradicional de painéis, enquanto que uma árvore que ocuparia 0,5 m² seria capaz de gerar a mesma quantidade de energia.



Figura 25 - Árvore fotovoltaica construída na Índia, em Durgapur, latitude: 23°.
Fonte: (MAITY, 2013).

Em Londres, foi construída a árvore solar mostrada na Figura 26, em celebração aos jogos olímpicos de 2012. Composta por 10 módulos fotovoltaicos e um sistema de baterias, a árvore gera energia durante o dia e ilumina o ambiente à noite (NOE, 2012).



Figura 26 - Árvore fotovoltaica em Londres, latitude: 51°.
Fonte: (NOE, 2012).

Outro exemplar é a árvore fotovoltaica construída na cidade de London, Canadá (Figura 27). Com sete metros de altura, esta árvore de 8,6 kW_p de potência instalada é equipada com 27 painéis fotovoltaicos e é conectada à rede da distribuidora de energia elétrica.



Figura 27 - Árvore fotovoltaica no Canadá, em London, latitude: 42°.
Fonte: (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018).

Estudantes da Universidade de Sarajevo, na Bósnia e Herzegovina, desenvolveram uma árvore fotovoltaica de 4,5 m de altura equipada com 10 painéis fotovoltaicos, utilizada para carregar celulares e computadores de estudantes da instituição. A árvore é exibida na Figura 28:



Figura 28 - Árvore fotovoltaica na Bósnia e Herzegovina, em Sarajevo, latitude: 43°.
Fonte: (SARAJEVO TIMES, 2016).

Além destas existe um exemplo brasileiro de árvore fotovoltaica construída em Fortaleza, Ceará, na Universidade Estadual do Ceará – UECE, como mostra a Figura 29. Composta por 10 painéis fotovoltaicos, é responsável por carregar as baterias das bicicletas elétricas utilizadas por seguranças do campus da universidade



Figura 29 - Árvore solar inaugurada no campus Itaperi – UECE, em Fortaleza, latitude: -3°.
Fonte: (MEC, 2017).

De uma forma geral, a construção de uma árvore fotovoltaica não ocorre de forma arbitrária. As posições dos galhos, inclinação das folhas e altura do tronco são todas definidas com base em modelos matemáticos e nas condições geográficas locais. Em resumo, no desenvolvimento de uma árvore solar, a disposição dos galhos é feita à semelhança de como isso ocorre na natureza, respeitando regras definidas pela filotaxia e latitude.

2.3.1 Filotaxia

Filotaxia trata basicamente do estudo da disposição das folhas no caule das plantas. Existem algumas categorias básicas de distribuição das folhas: fasciculada, alterna, oposta e verticilada (PENNYBACKER; SHIPMAN; NEWELL, 2015). Seja qual for a categoria em que determinada planta se encaixa, sabe-se que a organização de seus galhos/folhas de forma espiral segue o padrão da sequência de Fibonacci, padrão numérico descrito pela primeira vez no século 12 pelo italiano Leonardo Fibonacci, em que cada termo é a soma dos dois números anteriores (KUHLEMEIER, 2007), sendo:

$$F_0 = 0, F_1 = 1$$

$$F_k = F_{k-1} + F_{k-2}, \text{ para } k = 2, 3, 4, 5, 6 \dots \infty$$

Assim, a sequência de Fibonacci é formada pelos números 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, etc.

Em se tratando do crescimento de folhas e galhos, pode-se identificar o período 'p' como o número de voltas necessárias até nascer uma nova folha se sobrepondo à primeira e 'm' indicará o número de folhas por período. Numerosas experiências com plantas mostraram que 'p' e 'm' assumem mais frequentemente valores como 1, 2, 3, 5, 8, 13, ..., que são os números da sequência de Fibonacci. Existem também exceções, mas os números de Fibonacci ocorrem tão frequentemente que não podem ser explicados como casuais (PUGNAIRE; VALLADARES, 2007). Dessa forma, é clara a forte relação matemática presente na natureza.

Cada árvore na natureza tem um padrão próprio, onde são contadas as folhas para dar um número de voltas completas ao redor do seu caule, configurando um ciclo (PUGNAIRE; VALLADARES, 2007). Como exemplo, na Figura 30, tem-se

uma planta em que $p = 5$ e $m = 8$, configurando uma fração característica de $\frac{5}{8}$, que significa que são necessárias 8 folhas para se completar 5 voltas ao redor do caule.

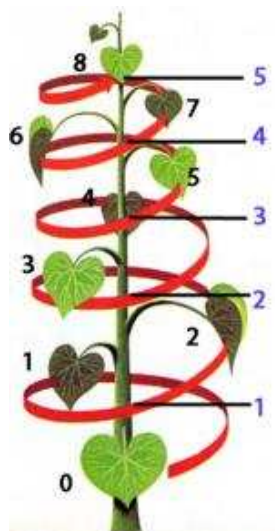


Figura 30 - Sequência de Fibonacci em plantas.
Fonte: (MATH FORUM, 2012).

Considerando que uma rotação de 360° ao redor do caule corresponde a uma volta, a fração característica também define a separação angular entre uma folha e outra. Ainda no exemplo da Figura 30, em uma planta com fração característica de $\frac{5}{8}$, cada folha está separada por $\frac{5}{8} * 360^\circ = 225^\circ$. Já para o carvalho, cuja fração característica mais comum é $\frac{2}{5}$, tem-se que a separação angular entre folhas equivale a $\frac{2}{5} * 360^\circ = 144^\circ$, como mostra a Figura 31:

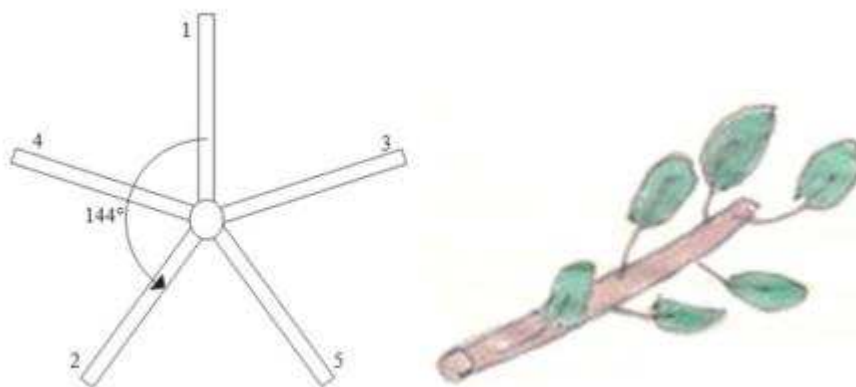


Figura 31 - Separação angular de folhas em um tronco de carvalho.
Fonte: (HYDER; SUDHAKAR; MAMAT, 2018).

Este padrão de disposição de folhas e galhos em plantas, que ocorre naturalmente, se provou como uma forma eficiente das plantas realizarem a absorção de luz solar incidente disponível, uma vez que seguindo este modelo, ocorre a mínima sobreposição de folhas (MANN; CURRY; SHARPE, 1979). Na Figura 32, pode-se observar como as folhas se dispõem de forma otimizada ao redor do caule de uma planta com fração característica igual a $\frac{5}{13}$. Todas as 13 folhas ocupam um espaço vago no tronco, permitindo assim que os raios solares atinjam a todas, de acordo com o tamanho das folhas.

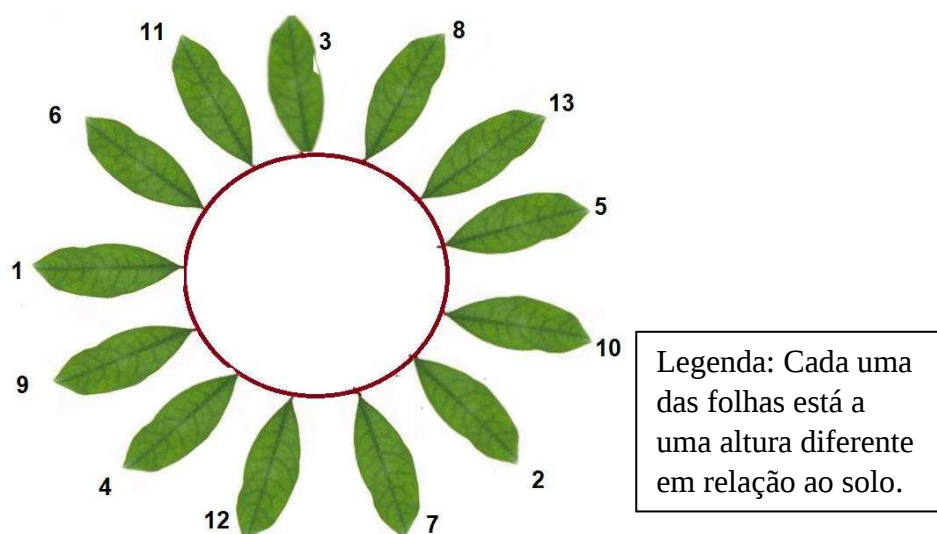


Figura 32 – Vista superior da disposição de folhas ao redor do tronco de uma planta de fração característica igual a $\frac{5}{13}$.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Sistema de monitoramento de geração de energia

Foi desenvolvido um sistema de coleta de dados para que a informação sobre a energia produzida por cada arranjo de painéis seja armazenada. Esta coleta de dados permite a organização e posterior análise da geração de energia elétrica por parte dos sistemas fotovoltaicos produzidos, tanto das árvores quanto do arranjo tradicional.

Tal sistema foi construído utilizando-se uma placa Arduino MEGA, responsável pela coleta dos dados. Utilizando comunicação serial, estes dados são enviados a um computador, que os exibirá em forma de supervisório e os armazenará para análise posterior, utilizando o software Visual Studio. Além do Arduino, outros dispositivos eletrônicos foram usados para a composição final do circuito de coleta

de dados, como por exemplo: resistores, sensores de corrente e de tensão, jumpers, etc.

3.1.1 *Arduino*

O Arduino é uma placa projetada na Itália que surgiu para ser utilizada como forma de prototipagem eletrônica, com o objetivo de tornar a robótica mais acessível à população em geral. Criado por Massimo Banzi e David Cuartielles em 2005, a placa surgiu como uma forma mais barata de estudar eletrônica e programação, além de ser uma excelente ferramenta introdutória ao mundo das linguagens de programação, tornando o aprendizado de engenharia e robótica muito menos maçante e difícil. Desde sua criação, cada versão lançada do Arduino tem se mostrado mais simples, mais barata e mais fácil de ser usada.

O projeto serve como uma boa forma de se iniciar os estudos na área de eletrônica, uma vez que não é necessário ter conhecimentos prévios nem em eletrônica ou em linguagens de programação para se utilizar a plataforma Arduino, sendo esta indicada tanto para profissionais quanto amadores. O Arduino permite a criação de projetos de diferentes tamanhos e dificuldades, desde simples programas que acendem LEDs a sistemas de captação de dados provenientes de uma infinidade de sensores que possuem compatibilidade com o Arduino.

Outra característica essencial do Arduino é que todo o material, incluindo bibliotecas, *hardware* e o próprio *software*, é *open-source*, ou seja, pode ser reproduzido e usado por qualquer pessoa sem a necessidade do pagamento de royalties ou direitos autorais a seus criadores.

Como explica Soares (2013), cada placa Arduino é constituída por um “controlador [...], pinos digitais e analógicos de entrada e saída, entrada USB – o que permite conexão com computadores – ou serial e possui código aberto”. A potencialidade de aplicações do Arduino ainda pode ser aumentada usando-se extensões de *hardware* chamadas *shields*, cada um com uma finalidade e função diferente.

O microcontrolador utilizado neste trabalho é o Arduino MEGA (Figura 33). Este equipamento é o responsável por realizar a leitura das variáveis e enviar os dados ao computador.

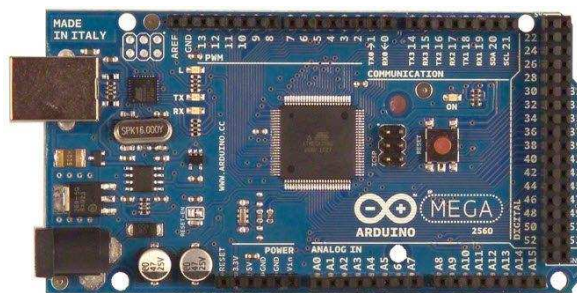


Figura 33 - Arduino Mega.
Fonte: (THE ENGINEERING PROJECTS, 2018).

As placas Arduino atualmente são produzidas utilizando-se diferentes microcontroladores, algumas compostas por microcontroladores da linha Atmel, e outras por microcontroladores da linha ARM ou até mesmo fabricados pela Intel. No caso do MEGA, o microcontrolador é um ATmega2560. A placa possui 54 pinos digitais de entrada e saída, sendo que quinze destes podem ser usados como saídas PWM. Possui também dezesseis entradas analógicas, conexão USB e um conector de alimentação, podendo então ser alimentado via USB, baterias ou adaptadores DC ou AC. As especificações técnicas do Arduino MEGA podem ser observadas no Quadro 1 (EMBARCADOS, 2014).

Quadro 1 - Especificações Técnicas do Arduino MEGA.
Fonte: (EMBARCADOS, 2014).

Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de Operação	5V
Tensão de Entrada	7 a 12V
Portas Digitais	54 (15 podem ser usadas como PWM)
Portas Analógicas	16
Corrente Pinos I/O	40mA
Corrente Pinos 3,3V	50mA
Memória Flash	256KB
Velocidade do clock	16MHz

A alimentação externa da placa é possível graças a um conector *jack* presente no Arduino MEGA. Como visto no Quadro 1, a tensão de entrada recomendada para a placa é de 7 a 12 volts, com limites de tensão inferiores e superiores de 6 e 20 volts respectivamente.

O Arduino possui dispositivos que permitem a comunicação da placa com um computador, outra placa Arduino ou mesmo outros microcontroladores. O microcontrolador Atmega2560 presente no Arduino MEGA permite comunicação

serial, que está disponível nos pinos digitais 0 (RX) e 1 (TX). Outro microcontrolador, Atmega16U2, é responsável pela comunicação com o computador, possibilitando o *upload* do código binário pelo programador e a entrada automática no modo *bootloader* quando o botão de upload é pressionado na IDE.

O Arduino MEGA pode ser programado utilizando-se a interface específica para Arduino, sendo possível escolher a placa que se está utilizando, além de contar com diversas bibliotecas e exemplos de utilização para programadores iniciantes. A programação é feita por meio da comunicação serial, uma vez que existe um *bootloader* no microcontrolador Atmega16U2. Assim, não é necessária a utilização de um kit de gravação para efetuar a gravação do código binário na placa.

O arduino MEGA foi utilizado para coleta dos dados de geração de energia elétrica dos 4 conjuntos fotovoltaicos. A medição foi feita de forma simultânea e utilizando-se apenas uma placa arduino. Cada conjunto fotovoltaico ocupa uma entrada analógica no arduino, necessitando assim de 4 portas para a realização desse estudo.

O algoritmo criado seguia o fluxograma mostrado na Figura 34:

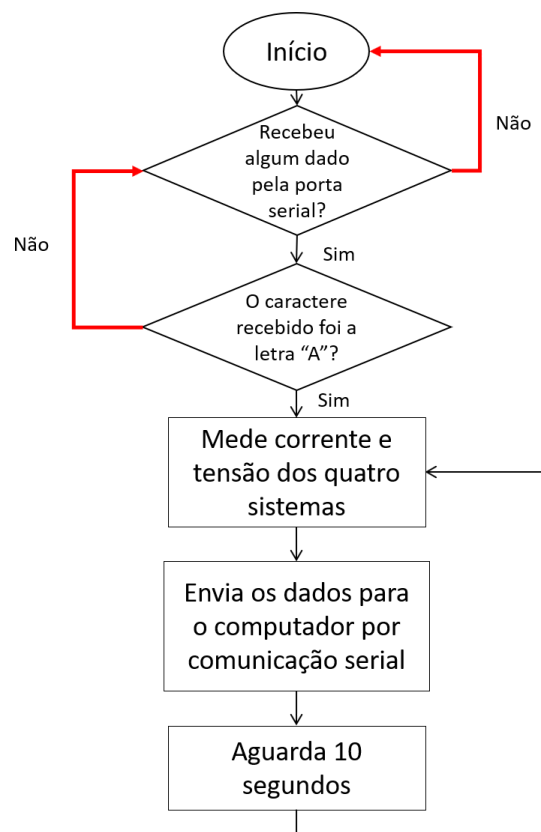


Figura 34 - Fluxograma de código do sistema de aquisição de dados para arduino.

3.1.2 *Visual Studio C#*

Microsoft Visual Studio é um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) da Microsoft para desenvolvimento de software especialmente dedicado ao .NET *Framework* e às linguagens *Visual Basic* (VB), C, C++, C# (C Sharp) e J# (J Sharp). Também é um produto de desenvolvimento na área *web*, usando a plataforma do ASP.NET, como *websites*, aplicativos *web*, serviços *web* e aplicativos móveis.

Lançada em 1997, a plataforma tem recebido atualizações constantes, o que aumenta sua gama de funcionalidade e consequentemente, sua popularidade. Também permite a interface com dispositivos externos, por meio de comunicação serial, por exemplo, que é o caso deste trabalho.

O programa Visual Basic C# foi usado para a criação do sistema supervisor responsável por exibir as leituras na tela e armazená-las em um arquivo Excel para análise posterior. O software utilizado foi adaptado de um programa similar chamado SOLARVIEW, criado por Arthur Caio Vargas e Pinto, Larissa Carolina Corraide da Silva, Patrícia Nogueira Vaz, João Victor Pereira Oliveira, José Vitor Nicácio e Delly Oliveira Filho, sob registro no INPI de número BR5120170011940. A Figura 35 exibe o fluxograma de funcionamento do algoritmo criado para desempenhar esta tarefa:

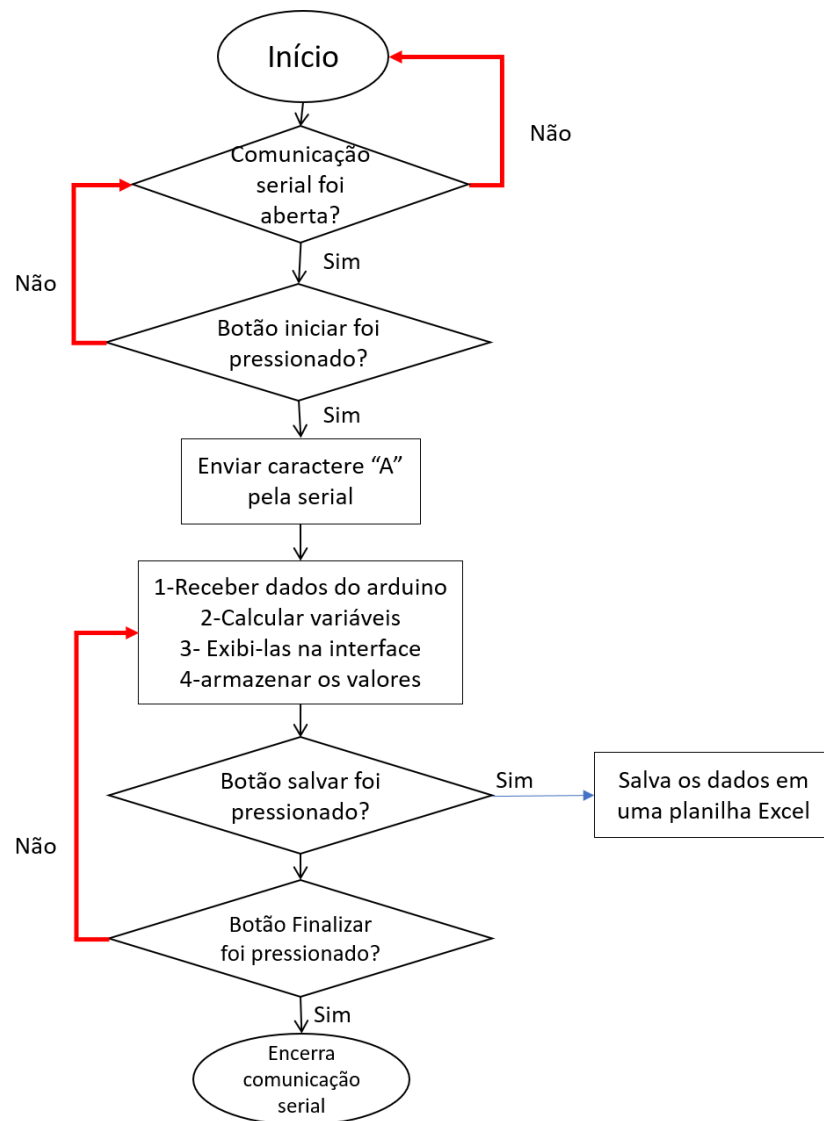


Figura 35 - Fluxograma do código para o Visual Studio C#.

3.1.3 Características da célula solar

A célula solar fotovoltaica utilizada neste trabalho é constituída de:

- Capa antirreflexo: Invólucro de proteção que visa também reduzir as perdas por reflexão;
- Rede de metalização: Circuito para coleta da corrente elétrica produzida pela junção p-n, quando a célula é submetida à radiação;
- Camadas positiva e negativa do semicondutor.

Além disso, possui as seguintes especificações:

- Tamanho: 53 mm * 18,0mm * 2,50mm;

- Potência: 0,05 W;
- Tensão máxima: 0,5 V;
- Corrente máxima: 0,1 A;
- Material: Resina epóxi;
- Durabilidade: 6 anos.

A Figura 36 exibe a célula fotovoltaica utilizada neste trabalho.

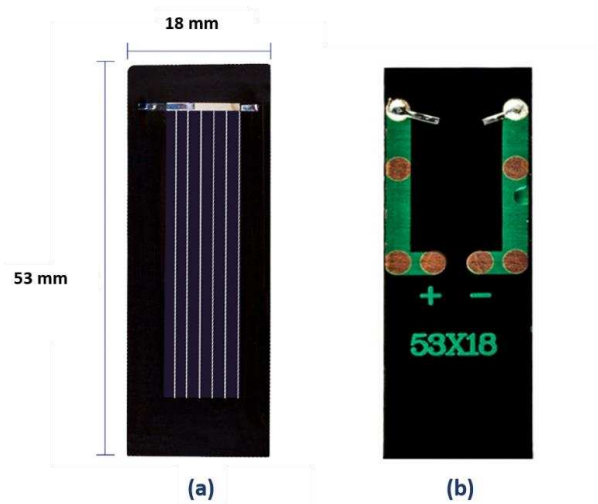


Figura 36 - Vista frontal (a) e traseira (b) da célula solar.
Fonte: (ALIEXPRESS, 2018).

3.1.4 Circuito de carga

Medir a energia gerada por cada sistema de células fotovoltaicas é fundamental para entender o funcionamento e comparar seu desempenho. Com isso em mente, para se medir os sinais de tensão e corrente gerados por cada árvore foi elaborado um circuito simples e de baixo custo. A carga escolhida foi um resistor de $100\ \Omega$, que demanda uma corrente adequada ao sistema de medição. Uma carga menor de $50\ \Omega$ foi considerada para o circuito, todavia a corrente gerada poderia exceder a potência máxima do resistor, aumentando o risco de danificá-lo. Uma vez que a tensão máxima permitida nas portas analógicas do Arduino MEGA é de 5,0V, fez-se necessário o uso de circuitos divisores de tensão para as árvores 2 e 3, cujas tensões poderiam exceder o limite de 5,0V.

Além disso, o circuito referente à disposição horizontal de células fotovoltaicas foi desenvolvido com uma mesma carga ($100\ \Omega$). Todos os 4 circuitos foram projetados para uma placa de circuito impresso, na qual todos os componentes foram soldados a fim de se obter um sistema mais robusto de medição. Dessa forma,

com os componentes na placa, basta apenas realizar a conexão de cada árvore às suas respectivas entradas nos *bournes* de entrada para que seus sinais de tensão possam ser medidos pelos *bournes* de saída, os quais são ligados diretamente ao Arduino para a realização da medição de tensão e corrente e cálculos de potência e energia geradas para fins de monitoramento da geração fotovoltaica.

A Figura 37 exibe o circuito elétrico do circuito de carga.

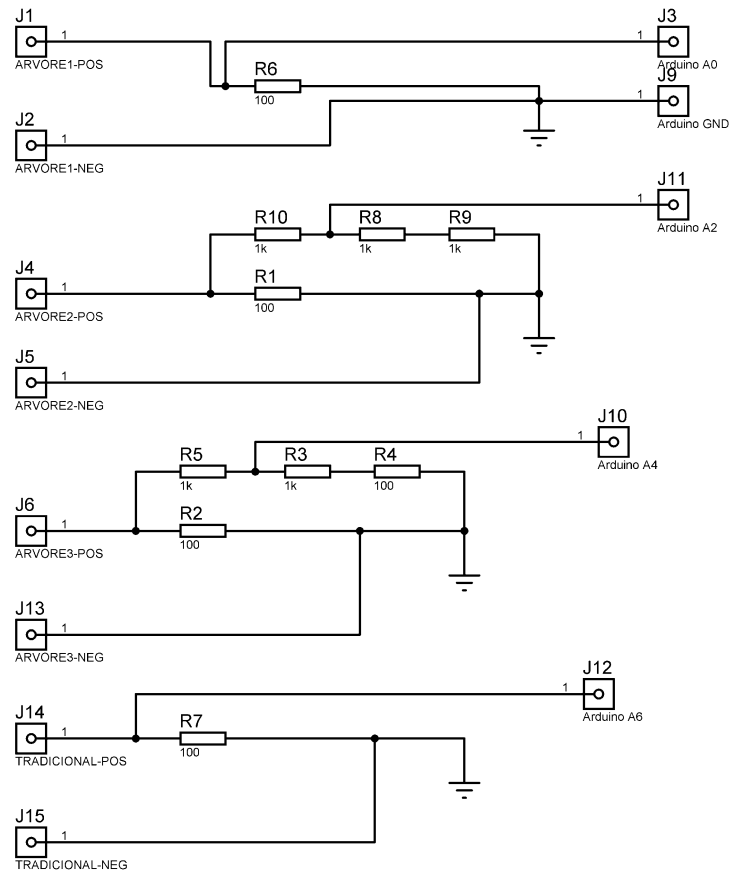


Figura 37 - Circuito elétrico do circuito de carga dos protótipos.

A Figura 38 apresenta o *layout* da placa do circuito de carga. Uma observação é que o divisor de tensão da árvore 2 encontra-se na parte inferior da placa, por isso não pode ser visualizado.

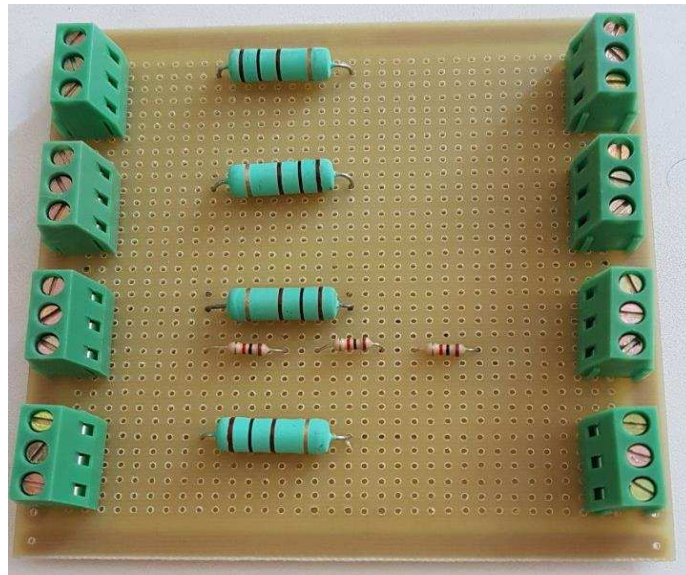


Figura 38 - Circuito de cargas elétricas, resistências para as Árvores 1,2 e 3 e o sistema tradicional 1.

3.2 Construção das árvores

3.2.1 Montagem das árvores

A palmeira, em sua variedade de espécies, é uma planta adaptada ao clima tropical brasileiro, e foi escolhida como modelo para a construção das árvores fotovoltaicas. Rees (1964) discute que palmeiras possuem variados padrões de filotaxia, variando de $\frac{3}{8}$ a $\frac{8}{21}$. Por sua vez, Hilgeman (1951) estabelece que o padrão mais comum em palmeiras é o de $\frac{5}{13}$. Assim, as árvores foram construídas observando uma fração de filotaxia de $\frac{5}{13}$.

Cada árvore foi construída utilizando um cano de PVC de $\frac{1}{2}$ polegada, de 65 centímetros de comprimento, sendo 5 centímetros destinados à base e os outros 60 centímetros referentes à árvore em si. Utilizando o padrão $\frac{5}{13}$ (13 folhas para realizar 5 voltas ao redor do tronco), os canos de PVC foram marcados para que se definisse as posições em que as células seriam posicionadas.

Primeiramente, na árvore em que $D = 4$ cm, foi marcado um ponto arbitrário na base da árvore. Então, um novo ponto foi marcado levando-se em conta um incremento na altura de 4 centímetros e um giro de 138 graus no tronco da árvore. Entretanto, o uso de um transferidor para a medição dos 138 graus mostrou-se bastante difícil por se tratar de um cano de PVC de 65 centímetros de comprimento.

Assim, foi usada uma regra matemática que estabelece a relação entre um ângulo e o comprimento de arco de uma circunferência, explicitada na Equação 18:

$$l = \frac{\alpha \pi R}{180^\circ} \quad (18)$$

em que:

α – ângulo de rotação, graus;

l – Comprimento do arco, cm; e

R – Raio da circunferência, cm.

Por se tratar de um cano PVC de $\frac{1}{2}$ polegada, seu diâmetro externo é de 20 milímetros, ou seja, possui raio igual a 10 milímetros. De posse deste dado e utilizando a Equação 18, o comprimento de arco equivalente a um ângulo de 138 graus é de $l = 24$ milímetros. Então, um novo ponto foi marcado levando-se em conta um incremento na altura de 4 centímetros e uma rotação de 24 milímetros no tronco da árvore, como mostra a Figura 39. Sucessivamente, todos os pontos foram marcados em toda a extensão do cano de PVC.

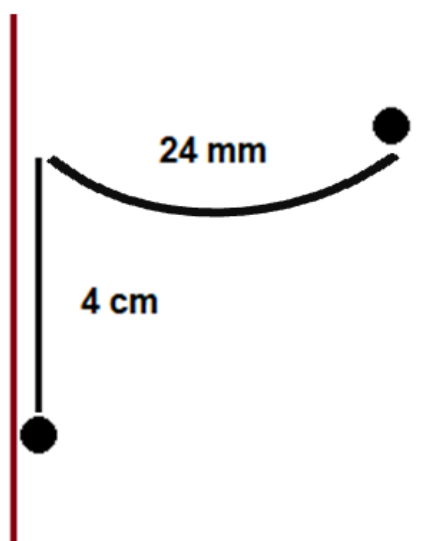


Figura 39 - Definição dos pontos a serem furados no cano de PVC.

As árvores em que a distância $D = 3$ cm e $D = 2$ cm são marcadas de forma semelhante. Como o diâmetro do cano de PVC é o mesmo para as três árvores, a distância de rotação entre os pontos é a mesma, variando apenas a altura entre eles.

Por fim, devido à diferença de distância entre galhos, cada árvore foi equipada com uma quantidade diferente de células fotovoltaicas, mostradas no Quadro 2:

Quadro 2 – Quantidade de células em cada árvore.

Arranjo	Distância entre células (cm)	Quantidade de células
Árvore 1	4	16
Árvore 2	3	20
Árvore 3	2	30

Para a confecção dos galhos das árvores, vários produtos foram testados: isopor, palito de picolé, arame, entre outros. Por fim, decidiu-se por usar palitos de churrasco por terem boa resistência e permitirem a fixação com o cano de PVC e serem capazes de suportar uma célula solar. Uma vez que as três árvores estavam marcadas, elas foram furadas utilizando uma broca de 1/8", espessura correspondente à de um palito de churrasco. O próximo passo foi pintar os canos PVC e os palitos de churrasco, para melhorar a estética geral dos protótipos. Os canos PVC foram pintados de marrom, simulando um tronco de árvore, e os palitos de verde, simulando os galhos.

Cada galho foi equipado com uma célula fotovoltaica, portanto, utilizando cola de silicone, as células foram presas aos galhos, orientadas no azimute solar e atentando-se aos seguintes fatores:

- a) Face voltada para o norte;
- b) Ângulo de 20° com a horizontal.

Sabe-se que as placas (ou células, neste caso) de um sistema fotovoltaico devem ser posicionadas voltadas para o norte e a uma angulação igual à latitude do local. Dessa forma, sendo a latitude da cidade de Viçosa igual a 20° 45' 14" S, o posicionamento das células a uma angulação de cerca de 20° favorece a captação de luz solar e consequentemente aumenta a geração de energia.

Finalizada a estrutura das árvores, as células foram associadas formando um sistema em que há dois segmentos de células em série, em paralelo. Essa forma de associação foi escolhida como uma tentativa de se minimizar as perdas por sombreamento nas árvores, pois como explicam Mochizuki e Yachi (2017), a geração de energia diminui aproximadamente à mesma proporção em que o número de conexões em série aumenta.

A Figura 40 ilustra as ligações da árvore 1:

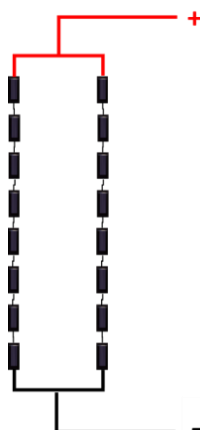


Figura 40 - Esquema de ligação da árvore 1.

Como cada célula possui especificações de: $V = 0,5V$ e $I = 0,1A$, ao final tem-se os seguintes conjuntos de células (Quadro 3):

Quadro 3 – Especificações finais.

Arranjo	Quantidade de células	Tensão Total (V)	Corrente Total (A)	Potência Instalada (W)
Árvore 1	16	4	0,2	0,8
Árvore 2	20	5	0,2	1
Árvore 3	30	7,5	0,2	1,5

Na Figura 41 é possível ver a Árvore 3 ao final do processo de construção.



Figura 41 - Árvore 3 ao final do processo de construção.

3.2.2 Montagem do sistema fotovoltaico fixo

As árvores foram comparadas à disposição horizontal de células, que foi construída de acordo com a área ocupada pelas árvores. Maity (2013) realiza uma comparação semelhante, e utiliza a área efetiva de uso do solo das árvores construídas como parâmetro para definir o tamanho do sistema horizontal. O espaço abaixo dos painéis da árvore não é considerado área efetiva de uso pois ainda pode ser utilizado para outras funções. Hyder et al. (2018) também adotam esta metodologia em suas simulações, analisando diferentes tipos de árvores e comparando-as com sistemas horizontais. Assim, esta mesma metodologia foi utilizada neste estudo.

A área efetiva de solo ocupada por uma única árvore pode ser considerada como a área ocupada pela estrutura central de sustentação do sistema (MAITY, 2013). Sendo assim, o sistema horizontal a ser comparado terá uma área equivalente à área da base do cano de PVC, de cerca de 314 mm². Cada célula possui área equivalente a 954 mm², superior à área estabelecida pelo cano de PVC. Então, mesmo possuindo área maior do que a indicada, será utilizada uma célula fotovoltaica compondo o sistema horizontal, para efeitos de comparação. Dessa forma, obtém-se o arranjo C5 possuindo as seguintes características mostradas no Quadro 4:

Quadro 4 – Especificações do sistema horizontal.

Arranjo	Quantidade de células	Tensão máxima (V)	Corrente máxima (A)	Potência Instalada (W)
C5	1	0,5	0,1	0,05

3.3 Realização do experimento

O experimento foi conduzido pelo método do delineamento em blocos ao acaso, composto por 3 disposições e cinco repetições, sendo que, neste caso cada dia de avaliação equivale a um bloco diferente. Os dados de geração de energia elétrica foram coletados durante cinco dias: 24/04/18, 25/04/18, 26/04/18, 01/05/18 e 02/05/18, nos horários de 09:00 às 10:00; 12:00 às 13:00; e 15:00 às 16:00, totalizando 15 horas de medição. Dessa forma, os experimentos poderiam refletir melhor o comportamento dos conjuntos fotovoltaicos ao longo de todo o dia. O local escolhido foi o Departamento de Engenharia Agrícola - DEA, localizado no campus

principal da Universidade Federal de Viçosa – UFV, em Viçosa, Minas Gerais, localizada na Zona da Mata Mineira, com altitude entre 690 e 800 metros e localizada entre as coordenadas UTM 700.000 a 740.000 de longitude oeste e 7.720.000 a 7.690.000 de latitude sul.

As medições em cada árvore foram realizadas simultaneamente, para garantir a confiabilidade dos resultados devido à rápida variação climática que poderia ocorrer de um momento para o outro, especialmente a radiação solar e a temperatura local, que afetam diretamente no desempenho dos sistemas. Além disso, os dados foram analisados por meio da análise descritiva.

3.4 Avaliação de funcionamento no ponto de máxima transferência de potência

Para permitir uma correta comparação entre os diferentes arranjos fotovoltaicos construídos neste trabalho, foi necessário que todos estivessem operando no mesmo ponto de suas respectivas curvas I-V, no ponto de máxima transferência de potência, assegurando que a máxima energia fosse gerada em cada instante, como discutido na seção 2.1.3. Em sistemas fotovoltaicos, a operação no ponto de máxima transferência de potência é alcançada por meio de um sistema SMTP, capaz de definir a impedância correta do circuito de carga para cada momento de geração.

Devido à dificuldade de se implementar um sistema SMTP para a faixa de potência analisada neste estudo (assunto abordado na seção 1.5 – Limitações da Pesquisa), decidiu-se por desenvolver um algoritmo para então calcular-se os valores de geração de energia equivalentes ao ponto de máxima transferência de potência de cada conjunto fotovoltaico, em função da radiação solar incidente.

Como pode ser observado na Figura 42, a radiação solar influencia consideravelmente na corrente gerada pelo sistema fotovoltaico, enquanto que a tensão gerada apresenta apenas uma pequena variação de acordo com a variação da radiação solar. Assim, o ponto de máxima transferência de potência também é deslocado. Então foi considerado que a variação de tensão foi desprezível, e que a variação de corrente no ponto de máxima transferência de potência foi diretamente proporcional à radiação solar média observada. Além disso, não foi considerada a influência da variação de temperatura na avaliação do ponto de máxima transferência de potência.

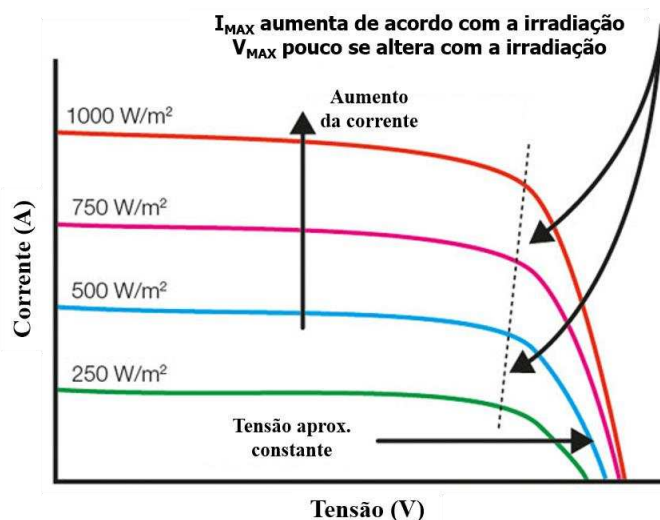


Figura 42 - Influência da radiação no ponto de operação de painéis fotovoltaicos.
Fonte: (SEAWARD, 2018).

Dessa forma, por aproximação, é possível estabelecer uma relação entre radiação e corrente, ao observar-se, por exemplo, os valores de corrente obtidos para radiações de 1200 e 600 W/m² na Figura 43, que são aproximadamente 10 e 5A, respectivamente. O ponto de máxima transferência de potência também é deslocado para cima à medida que a radiação solar também aumenta.

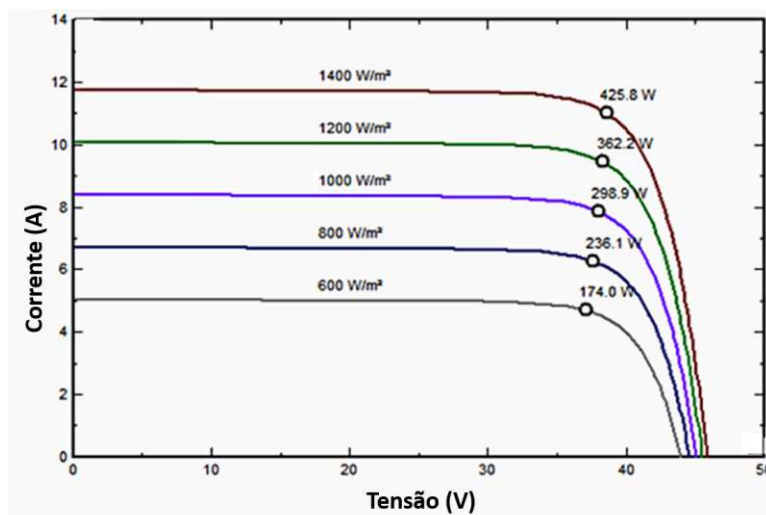


Figura 43 - Comportamento da corrente e tensão sob diferentes valores de radiação solar.
Fonte: (INTELLIGENTPV, 2018).

Considerando-se então esta relação, é possível utilizar os valores de radiação solar durante o experimento para se estimar a potência máxima gerada pelos conjuntos fotovoltaicos, operando no ponto de máxima transferência de potência.

Os sistemas foram levados à cobertura do prédio do DEA e os testes foram realizados nos horários estipulados pela seção 3.3 deste trabalho. Ao longo dos experimentos, a intensidade da radiação solar variou consideravelmente, oscilando entre períodos bastante ensolarados e outros com céu encoberto. Os dados referentes à radiação solar incidente na região foram obtidos por meio do monitoramento das condições atmosféricas realizado por estações e aquisição de dados automáticas do Instituto Nacional de Meteorologia, que faz o acompanhamento de diversas condições atmosféricas, inclusive a radiação solar (INMET, 2018). Assim, para o período analisado, a radiação solar apresentou o comportamento exibido na Figura 44, com destaque para os horários de medição (em vermelho).

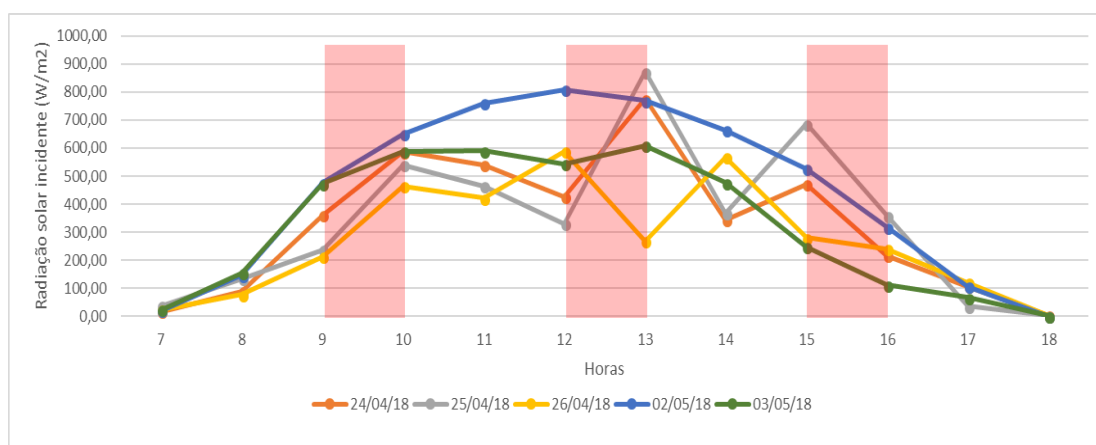


Figura 44 - radiação solar incidente no período, destacando os horários de 09:00 às 10:00, 12:00 às 13:00 e 15:00 às 16:00.
Fonte: (INMET, 2018).

O Quadro 5 apresenta os valores médios de radiação solar para cada período do experimento.

Quadro 5 – Média de radiação solar para cada período de medição, considerando os cinco dias de experimento.

Horário	Radiação solar média (W/m ²)
9	350
12	540
15	500

Assim, com estes valores de radiação, os valores de resistência que garantem a operação no ponto máximo foram calculados (Quadro 6).

Quadro 6 – Valores de resistência calculados que fazem os sistemas funcionarem em seus respectivos pontos de máxima transferência de potência.

Arranjo	Resistência usada (Ω)	Resistência calculada para operação no ponto de máxima transferência de potência a 1000 W/m² (Ω)	Resistência calculada para operação no ponto de máxima transferência de potência a 350 W/m² (Ω)	Resistência calculada para operação no ponto de máxima transferência de potência a 500 W/m² (Ω)	Resistência calculada para operação no ponto de máxima transferência de potência a 540 W/m² (Ω)
Árvore 1	100	22,8	65,14	45,6	42,2
Árvore 2	100	28,5	81,43	57	52,78
Árvore 3	100	42,75	122,14	85,5	79,17
Disposição normal	100	5,7	16,29	11,4	10,56

Dessa forma, utilizando-se os valores de tensão medidos e os valores de resistência calculados, foi possível estimar a geração de energia de cada arranjo operando no ponto de máxima transferência de potência e então compará-los efetivamente, uma vez que todos estariam assim aproximadamente no mesmo ponto de operação (P_{MAX}). Assim, os valores das cargas, representadas pelas resistências elétricas, devem mudar para que se opere no ponto de máxima transferência de potência.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Árvores versus sistema tradicional

Nota-se que todas as três árvores foram capazes de gerar uma quantidade de energia bastante superior ao sistema tradicional de painéis. Ao final dos cinco dias de experimentos, o sistema tradicional gerou apenas 0,367 Wh de energia, o que corresponde a 11,85% da energia gerada pela árvore 1, árvore com menor geração entre as árvores analisadas (Figura 45).

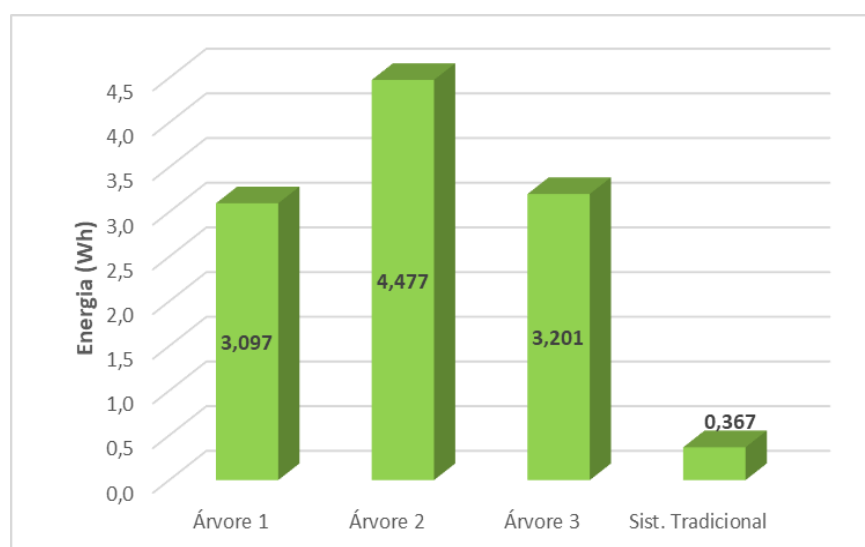


Figura 45 - Energia total gerada nas 15 horas de experimento.

Esse resultado já era esperado dada a diferença entre as potências instaladas dos sistemas em árvore e tradicional. O que cabe ressaltar é a constatação de que ocupando uma pequena área, a árvore fotovoltaica é capaz de gerar uma grande quantidade de energia, deixando espaço para outras aplicações. Observando o Quadro 7, pode-se observar que se considerando a árvore 3, para a construção de um sistema fotovoltaico de mesma potência na disposição comum seria necessária uma área ocupada cerca de 90 vezes maior do que a área ocupada por esse mesmo sistema de mesma potência instalada, em forma de árvore.

Quadro 7 - Comparação entre a área necessária para a construção de um sistema fotovoltaico considerando diferentes disposições.

Arranjo	Potência instalada (W)	Área ocupada pelo tronco da árvore (cm ²)	Área que seria ocupada na disposição tradicional (cm ²)
Árvore 1	0,8	3,14	152,64
Árvore 2	1,0	3,14	190,80
Árvore 3	1,5	3,14	286,20

Levando-se em consideração a diferença de potência instalada entre os quatro conjuntos fotovoltaicos, uma comparação entre eles resulta nos valores exibidos no Quadro 8. Nota-se que a disposição tradicional apresenta o maior valor para este índice, indicando que este conjunto possui o melhor aproveitamento de sua potência instalada dentre os quatro arranjos analisados.

Quadro 8 - Relações entre energia elétrica gerada por unidade de potência instalada.

Arranjo	Potência instalada (W)	Geração total (Wh)	Energia gerada por W_P instalado (Wh/W_P)
Árvore 1	0,80	3,097	3,87
Árvore 2	1,00	4,477	4,48
Árvore 3	1,50	3,201	2,13
Disposição tradicional	0,05	0,367	7,35

Este resultado ocorre devido ao sombreamento a que as células que compõem as árvores estão submetidas, fazendo com que a geração de energia elétrica seja prejudicada. Na disposição tradicional não há sombreamento, assim toda a energia gerada pelo sistema depende da intensidade da radiação solar instantânea, fazendo com que os resultados de energia gerada sejam melhores que os das árvores.

Também é possível realizar a comparação entre as árvores e o sistema tradicional considerando-se agora toda a área projetada das árvores, ao invés de analisar somente a área ocupada pela estrutura central de sustentação, equivalente a área ocupada pelo “tronco” da árvore fotovoltaica. Para os três conjuntos, o espaço ocupado foi de 283,50 cm², enquanto que para o sistema tradicional, a área foi de 9,54 cm² (área da célula). As relações da energia elétrica gerada por unidade de área são exibidas no Quadro 9.

Quadro 9 - Relações entre energia elétrica gerada por unidade de área.

Arranjo	Geração total (Wh)	Energia gerada por unidade de área (Wh/cm^2)
Árvore 1	3,097	0,0109
Árvore 2	4,477	0,0157
Árvore 3	3,201	0,0113
Disposição tradicional	0,367	0,0385

Pela análise do Quadro 9, a disposição tradicional apresenta um maior aproveitamento da área utilizada, justamente porque na disposição tradicional de painéis a área de uso é equivalente à área de captação de radiação solar. Já no caso das árvores fotovoltaicas, existem espaços vazios entre células que não geram energia elétrica e acabam por aumentar a área projetada, mas sem contribuir com a geração de energia. No entanto, acredita-se que uma árvore fotovoltaica com a otimização do número de folhas, sua disposição e altura que a geração de energia por unidade de área será maior do que a da disposição tradicional, isto é uma superfície plana inclinada. Pode-se então afirmar, que provavelmente os protótipos analisados de árvore fotovoltaica não estão otimizados.

4.2 Comparação entre as árvores

A Figura 46 exibe a geração de energia elétrica de cada árvore em cada dia do experimento, no período da manhã, entre 9h e 10h:

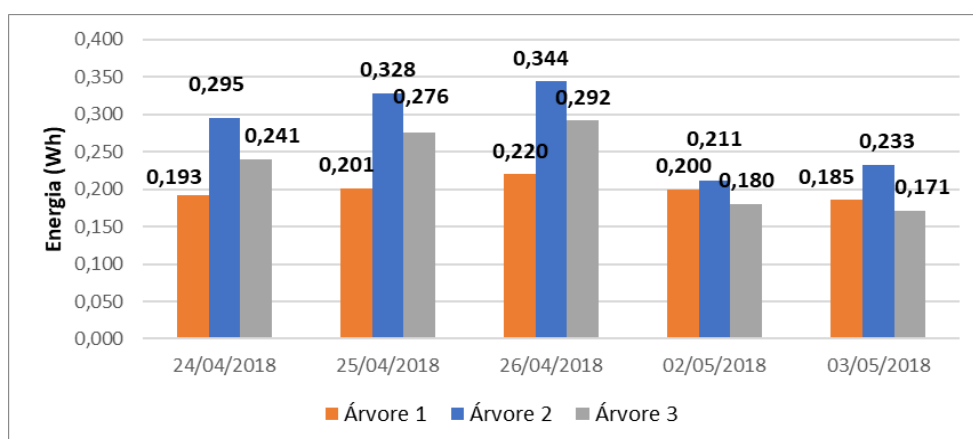


Figura 46 - Geração de energia no período de 9h às 10h.

Durante este período, a árvore 2 foi a que mais gerou energia elétrica, como mostra o Quadro 10:

Quadro 10 - Energia total gerada no período da manhã (9h às 10h).

Conjunto	Energia total gerada (Wh)
Árvore 1	0,998
Árvore 2	1,412
Árvore 3	1,159

Entre 12h e 13h, os resultados foram os exibidos na Figura 47:

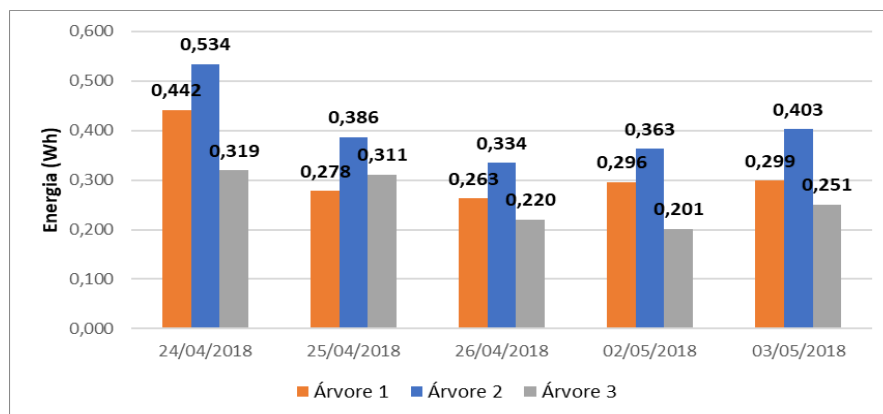


Figura 47 - Geração de energia no período de 12h às 13h.

Neste horário, a radiação solar incidente atinge os valores máximos do dia. Neste período, a árvore 2 se manteve absoluta em primeiro lugar na geração de energia durante os cinco dias do experimento. A partir do dia 25 de abril, a geração de energia da árvore 1 manteve-se relativamente estável, enquanto a geração da árvore 3 oscilou mais ao longo dos dias.

Ao final, a árvore 2 foi a que mais gerou energia no período do almoço, como mostra o Quadro 11.

Quadro 11 - Energia total gerada no período do almoço (12h às 13h).

Arranjo	Energia total gerada (Wh)
Árvore 1	1,577
Árvore 2	2,019
Árvore 3	1,303

Por fim, a Figura 48 exibe os resultados para o horário da tarde, entre 15h e 16h:

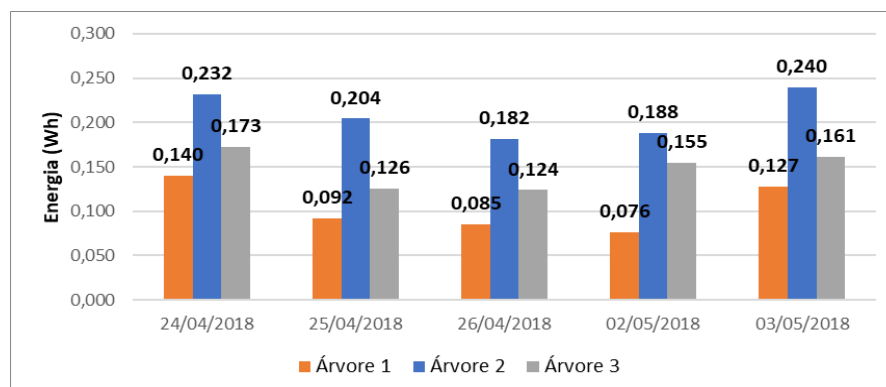


Figura 48 - Geração de energia no período de 15h às 16h.

Durante este período, com uma intensidade de radiação solar já reduzida, a geração de energia das árvores 1 e 3 manteve-se inferior à da árvore 2 em todos os dias do experimento, e seguindo a tendência dos outros períodos, a árvore 2 foi o sistema que mais produziu energia durante o período entre 15h e 16h, como mostra o Quadro 12.

Quadro 12 - Energia total gerada no período da tarde (15h às 16h).

Arranjo	Energia total gerada (Wh)
Árvore 1	0,521
Árvore 2	1,045
Árvore 3	0,739

Considerando-se os cinco dias de experimento e somando-se a energia gerada em cada período de cada dia, tem-se os valores apresentados na Figura 49:

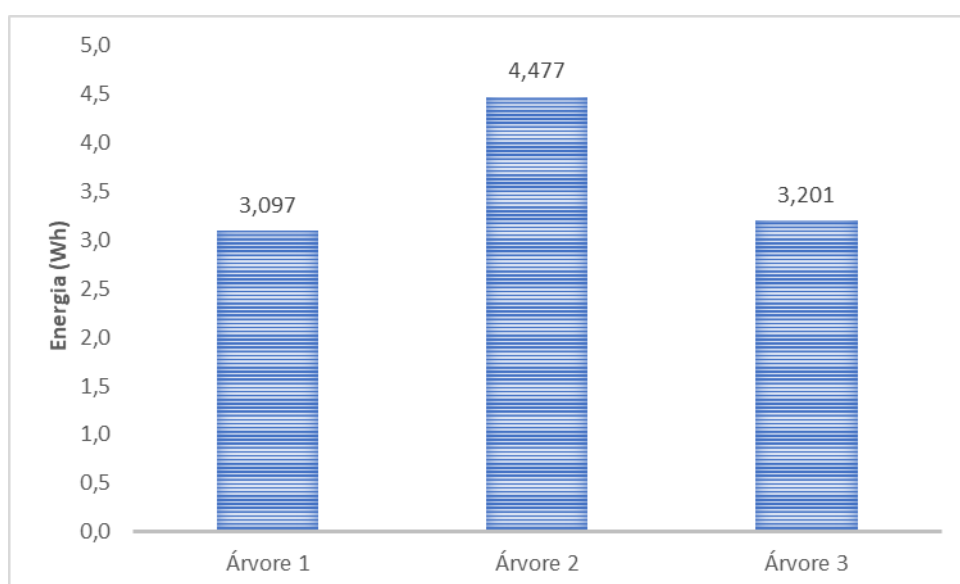


Figura 49 - Energia total estimada a partir de dados experimentais pelos três sistemas fotovoltaicos ao final das 15 horas de experimento.

Com base na análise das Figuras 46, 47, 48 e 49 e dos Quadros 10, 11 e 12, conclui-se que a Árvore 2 foi o arranjo que mais gerou energia elétrica nos testes realizados e que apresentou melhor desempenho independente do período do dia. Este fato mostra que se tratando de árvores fotovoltaicas, a relação entre número de painéis e geração de energia não é sempre proporcional. Como exemplo tem-se a árvore 3 com trinta células, mas ainda assim capacidade de geração inferior à árvore 2, com 20 células. Uma explicação para essa relação está no fato de que quanto mais células compondo o sistema, maior a chance de as células serem atingidas por

sombras originadas por outras células, diminuindo a geração total do conjunto. Em testes realizados, observou-se que uma célula sombreada gerava uma tensão instantânea de apenas 0,074 V, o que corresponde a cerca de apenas 13% de sua V_{MAX} . Ao final de 1 hora, a célula sombreada gerou apenas 1,95% da energia que gerou a célula não sombreada, evidenciando que o sombreamento prejudica significativamente a geração de energia.

Analisando a geração de energia das Árvores 1 e 3 e observando os Quadros 8, 9 e 10, é possível observar que a Árvore 3 possui melhor aproveitamento nos períodos da manhã e da tarde, gerando mais energia que Árvore 1. No período do almoço (12h às 13h) no entanto, a Árvore 1 gerou mais energia que a Árvore 3 (1,577 Wh e 1,303 Wh, respectivamente). A ocorrência de sombreamento pode ser um fator que justifique este comportamento.

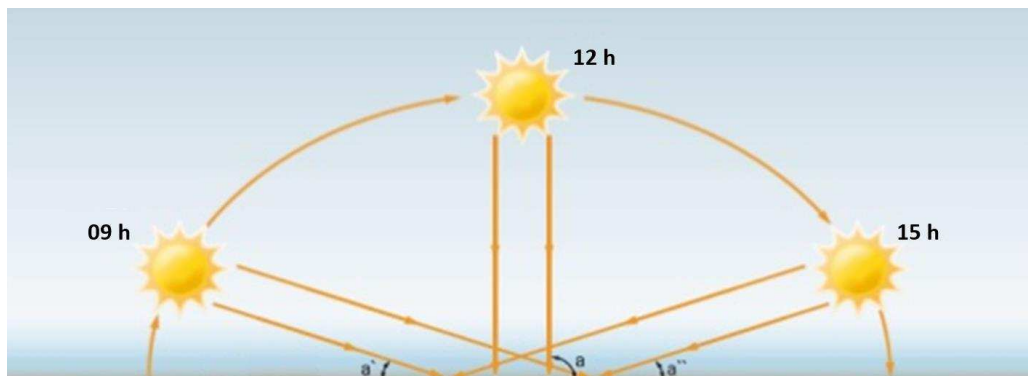


Figura 50 - Diferentes angulações de incidência da radiação solar de acordo com o horário.

Como pode ser visto na Figura 50, de manhã e à tarde, o ângulo de incidência da radiação solar é menor, fazendo com que mais células das árvores sejam atingidas e menos sombreamento ocorra. Já de 12h às 13h, o sol encontra-se a uma angulação elevada, aumentando a ocorrência de sombreamento e consequentemente diminuindo a geração de energia da Árvore 3, que possui mais células. A Figura 51 mostra a ocorrência de sombreamento na Árvore 3 durante o experimento.



Figura 51 - Vista lateral mostrando sombreamento na Árvore 3.

Na Figura 52, uma foto com *flash* da Árvore 3 foi tirada a uma angulação aproximada de 90° com a horizontal, simulando a posição do sol ao meio-dia, no solstício de verão.



Figura 52 - Vista superior da Árvore 3.

Observa-se na Figura 52, que das 30 células que compõem o arranjo, apenas dez estão claramente visíveis, enquanto há quatro outras parcialmente visíveis. Ou seja, nesse cenário menos de metade das células receberiam alguma porção de radiação solar. Este comportamento pôde ser confirmado por meio do uso de um equipamento de simulação da posição solar chamado Heliodon, pertencente ao Departamento de Arquitetura e Urbanismo – DAU, da Universidade Federal de Viçosa. Utilizando este equipamento, foi possível simular a posição do sol para a localidade de Viçosa durante os dois solstícios e equinócios que ocorrem anualmente, e consequentemente, foi possível analisar o comportamento das árvores nestas datas. Nas quatro datas, pôde-se observar intenso auto-sombreamento na Árvore 3 principalmente por volta do meio-dia, enquanto que nos horários da manhã e da tarde, a grande maioria das células recebia luz. Esse resultado serve de comprovação de que, em geral, por volta do meio-dia, o sombreamento na Árvore 3 é maior que no horário da manhã e da tarde.

Pela análise da Figura 49, pode-se ainda perceber que a Árvore 1, com 16 células, gerou 3,097 Wh de energia elétrica, enquanto a Árvore 3, com 30 células, gerou 3,201 Wh. A geração da Árvore 1 foi apenas 3,25% inferior à da Árvore 3, mesmo tendo apenas cerca de 53% de seu número de células.

Considerando um custo fixo de instalação da estrutura de sustentação de R\$ 10,00 e um custo por célula de R\$ 1,00, o Quadro 11 exhibe os custos para instalação de cada arranjo.

Quadro 13 – Custo de instalação dos sistemas fotovoltaicos.

Arranjo	Custo fixo de instalação da estrutura de sustentação (R\$)	Custo por célula (R\$)	Número de células	Custo de instalação (R\$)
Árvore 1	10	1	16	26
Árvore 2	10	1	20	30
Árvore 3	10	1	30	40

Considerando o total de energia gerado por cada arranjo, é possível obter o custo por Wh de cada sistema, exibido no Quadro 12.

Quadro 14 – Custo expresso em R\$/Wh para cada arranjo.

Arranjo	Energia gerada (Wh)	Custo de instalação (R\$)
Árvore 1	3,097	26
Árvore 2	4,477	30
Árvore 3	3,201	40

Pode-se observar que a Árvore 1 gerou 3,097 Wh de energia elétrica, enquanto a Árvore 3 gerou 3,201 Wh. Assim, conclui-se que a construção da árvore 3 não é vantajosa, uma vez que se pode construir a Árvore 1 por um custo reduzido, cerca de 65% do custo da Árvore 3, e mesmo assim obter uma quantidade de energia parecida (apenas 3,25% inferior à geração de energia da Árvore 3).

Dessa forma, das três configurações analisadas (Árvores 1, 2 e 3), a árvore 2 foi a que demonstrou maior equilíbrio entre o número de células e a geração de energia. Nesta, também ocorreu sombreamento de células, mas a um nível que não prejudicou seu desempenho de forma expressiva. Assim, sendo a distância entre as células na Árvore 2 igual a 3 cm, e considerando que o “tronco” da árvore tinha 60 cm, estima-se que para este estudo, a distância ótima de posicionamento dos galhos de uma árvore fotovoltaica equivale a 5% do comprimento total da estrutura central de sustentação.

5 CONCLUSÕES

A busca por meios de se otimizar a geração de energia fotovoltaica fez surgir o conceito de árvore fotovoltaica, em que os painéis são dispostos em uma estrutura em forma de árvore, capaz de comportar um grande número de painéis ocupando uma pequena quantidade de área, atributo cada vez mais importante e disputado nos dias de hoje. Dessa forma, a árvore fotovoltaica se torna ideal para locais com pouca disponibilidade de espaço, que não possibilitariam a instalação de painéis na disposição tradicional. Assim, este estudo buscou comparar a geração de energia de uma árvore fotovoltaica, construída respeitando a filotaxia de uma palmeira, com a geração de energia de um sistema tradicional de painéis.

Por meio dos resultados obtidos foi possível confirmar que a disposição de painéis em formato de árvore é capaz de produzir uma quantidade muito maior de energia do que um sistema na disposição tradicional ocupando a mesma área. Dessa forma, a árvore fotovoltaica é altamente indicada para locais em que o espaço disponível para a instalação de painéis seja limitado, como é o caso de prédios, possibilitando a geração de uma energia que não seria possível caso a disposição tradicional fosse utilizada.

Analizou-se ainda três formatos de árvores fotovoltaicas: o primeiro, composto por 16 células; o segundo, composto por 20 células, e o terceiro, composto por 30 células. Após a análise dos resultados para o período, é possível concluir que a árvore 2, com 20 células, foi o conjunto que mais gerou energia elétrica e que está melhor desenhado para as diferentes condições atmosféricas da localidade. Estima-se então, que para este estudo, a distância ótima de posicionamento dos galhos de uma árvore fotovoltaica equivale a 5% do comprimento total da estrutura central de sustentação.

Comparando-se as Árvores 1 e 3, conclui-se que a construção da Árvore 3 não é vantajosa, uma vez que se pode obter uma geração de energia equivalente ao se construir a Árvore 1, que é cerca de 35% mais barata. Analisando-se a energia gerada nos três períodos do dia, pode-se dizer que a Árvore 3 está melhor desenhada para os períodos da manhã e da tarde. No período do almoço, a ocorrência de sombreamento é maior devido à maior altura solar, diminuindo assim a energia gerada.

Ainda assim, também é possível concluir que a geração de energia de uma árvore fotovoltaica é bastante dependente da disposição das células e da forma de associação entre elas. Assim, para a instalação de uma árvore solar, é necessária uma criteriosa análise e projeto, a fim de se obter o melhor modelo possível.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

1. Validar o algoritmo desenvolvido de estimativa do ponto de máxima transferência de potência, por meio de testes experimentais, incluindo a avaliação para diferentes temperaturas e radiação solar.
2. Testar os protótipos desenvolvidos para períodos maiores e para diferentes latitudes.
3. Testar novas topologias de árvores fotovoltaicas, variando o espaçamento entre galhos, angulação das células, tamanho das células, diâmetro da estrutura central de sustentação, altura da árvore, entre outros fatores.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-ROUSAN, N.; ISA, N. A. M.; DESA, M. K. M. Advances in solar photovoltaic tracking systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 2548–2569, fev. 2018.

ALIEXPRESS. **Tonlen solar panels.** Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/TONLEN-20-PCS-0-5-V-100mA-Painel-Solar-C-lula-Solar-DIY-Carregador-de-Bateria/32837693429.html?spm=a2g0s.9042311.0.0.PIWtkh>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

ALONSO, M. C.; GARCÍA, F. S.; SILVA, J. P. Apostila do Programa de Capacitação em Energias Renováveis: Energia Solar Fotovoltaica. Organização das Nações Unidas. 2013.

ANEEL. **Expansão da oferta de energia elétrica - Acompanhamento das Centrais Geradoras Fotovoltaicas.** Brasília, Brazil. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016a. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/UFV_Cronograma_Eventos_fevereiro_2016.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2018.

ANEEL. **Geração Distribuída.** Brasília, Brazil. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016b. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em: 18 abr. 2018.

ANTONANZAS, J.; URRACA, R.; MARTINEZ-DE-PISON, F. J.; ANTONANZAS, F. Optimal solar tracking strategy to increase irradiance in the plane of array under cloudy conditions: A study across Europe. **Solar Energy**, v. 163, p. 122–130, mar. 2018.

APOSTOLERIS, H.; STEFANCICH, M.; CHIESA, M. Tracking-integrated systems for concentrating photovoltaics. **Nature Energy**, v. 1, n. 4, p. 16018, 7 mar. 2016.

BARKER, L.; NEBER, M.; LEE, H. Design of a low-profile two-axis solar tracker. **Solar Energy**, v. 97, p. 569–576, nov. 2013.

BHUVANESWARI, C.; RAJESWARI, R.; KALAIARASAN, C.; MUTHUKUMARARAJAGURU, K.M.S. **Idea to design a solar tree using nanowire solar cells.** International Journal of Scientific and Research Publications. 2013.

BRAGA, A. F. B.; MOREIRA, S. P.; ZAMPIERI, P. R.; BACCHIN, J. M G.; MEI, P. R. New processes for the production of solar-grade polycrystalline silicon: A review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 92, n. 4, p. 418–424, 2008.

CABRAL, C. V. T. **Análise de dimensionamento estocástico e determinístico de sistemas fotovoltaicos isolados.** Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. p. 22. 2006.

CABRAL, I. S.; TORRES, A. C.; SENNA, P. R. **Energia Solar – análise comparativa entre Brasil e Alemanha.** Salvador, Brazil: ConGeA - Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2013

CAO, W.; LI, Z.; YANG, Y.; ZHENG, Y.; YU, W.; AFZAL, R.; XUE, J. “Solar

tree”: Exploring new form factors of organic solar cells. **Renewable Energy**, v. 72, p. 134–139, dez. 2014.

CLIFFORD, M. J.; EASTWOOD, D. Design of a novel passive solar tracker. **Solar Energy**, v. 77, n. 3, p. 269–280, set. 2004.

COELHO, R. F.; MARTINS, D. C. An optimized maximum power point tracking method based on pv surface temperature measurement. In: **Sustainable Energy - Recent Studies**. [s.l.] InTech, 2012. p. 89–114.

COMISSÃO EUROPEIA. **Energia Fotovoltaica: manual sobre tecnologias, projecto e instalação**, 2004. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/guia-tecnico-manual-energia-fotovoltaica.pdf>>

COVENTRY, J. S. Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector. **Solar Energy**, v. 78, n. 2, p. 211–222, fev. 2005.

DEY, S.; LAKSHMANAN, M. K.; PESALA, B. Optimal solar tree design for increased flexibility in seasonal energy extraction. **Renewable Energy**, fev. 2018.

DIMITROKALI, E.; MACKRILL, J.; JONES, G.; RAMACHERS, Y.; CAIN, R. Moving away from flat solar panels to pvtrees: exploring ideas and people's perceptions. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 1208–1216, 2015.

EMBARCADOS, 2014. **ARDUINO MEGA 2560**. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-mega-2560/>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

EPE. **Brazilian Energy Balance - Year 2016**. Empresa de Pesquisa Energética, 2017. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>

FADIGAS, E. A. F. A. **Energia solar fotovoltaica : fundamentos, conversão e viabilidade técnico-econômica** GEPEA – Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo São Paulo, Brazil, 2014. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/56337/mod_resource/content/2/Apostila_solar.pdf>

FSFM. Global trends in renewable energy investment 2016. Frankfurt School of Finance & Management. 2016, p. 84.

FRAUNHOFER. **New world record for solar cell efficiency at 46% – French-German cooperation confirms competitive advantage of European photovoltaic industry**. Fraunhofer Institute For Solar Energy Systems Ise. Disponível em: <<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2014/new-world-record-for-solar-cell-efficiency-at-46-percent.html>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

GHAZALI, A.; SALLEH, E.; HAW, L. C.; MAT, S.; SOPIAN, K. Performance and financial evaluation of various photovoltaic vertical facades on high-rise building in Malaysia. **Energy and Buildings**, v. 134, p. 306–318, jan. 2017.

GREEN, M. A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution. **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, v. 17, n. 3, p. 183–189, 2009.

GUPTA, S.; GUPTA, M. **The benefits and applications of solar tree with natural beauty of trees**. SSRG International Journal of Electrical and Electronics

Engineering. 2015.

HAN, G.; ZHANG, S.; BOIX, P.; WONG, L. H.; SUN, L.; LIEN, S. Towards high efficiency thin film solar cells. **Progress in Materials Science**, v. 87, p. 246–291, jun. 2017.

HILGEMAN, R. H. **The differentiation, growth and anatomy of the axis, leaf, axillary bud, inflorescences and offshoot in Phoenix dactylifera**. [s.l.] University of California, 1951.

HOPWOOD, D. PV: where are we now? **Renewable Energy Focus**, v. 8, n. 4, p. 54–59, jul. 2007.

HUANG, X.; HAN, S.; HUANG, W.; LIU, X. Enhancing solar cell efficiency: the search for luminescent materials as spectral converters. **Chemical Society Reviews**, v. 42, n. 1, p. 173–201, 2013.

HUI, S. F.; HO, H. F.; CHAN, W. W.; CHAN, K. W.; LO, W. C.; CHENG, K. W. E. **Floating solar cell power generation, power flow design and its connection and distribution**. 2017. 7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications - Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8277783/>>

HYDER, F.; SUDHAKAR, K.; MAMAT, R. Solar PV tree design: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1079–1096, fev. 2018.

IEA. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. International Energy Agency. 2014, p. 1–60.

INMET. **Estações Automáticas**. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>>. Acesso em: 9 abr. 2018.

INTELLIGENTPV, 2018. **What is the Standard Test Condition STC**. Disponível em: <<https://www.intelligentpv.ie/services/faq/what-is-the-stc/>>. Acesso em: 09 jun. 2018.

JOVANOVIĆ, V.; MOULIN, E.; HAUG, F.; TAMANG, A.; BALI, SARDAR I. H.; BALLIF, C.; KNIPP, D. From randomly self-textured substrates to highly efficient thin film solar cells: Influence of geometric interface engineering on light trapping, plasmonic losses and charge extraction. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 160, p. 141–148, fev. 2017.

KAMTEX SOLAR, 2018. **Types of commercial solar panels and their structures**. Disponível em: <<http://www.solar.kamtexindustries.com/Articles/types-of-commercial-solar-panels-and-their-structures/Thin-film-glass-laminated-Solar-panel.html>>. Acesso em: 19 mar. 2018.

KARATHANASSIS, I. K.; PAPANICOLAOU, E.; BELESSIOTIS, V.; BERGELES, G. C. Design and experimental evaluation of a parabolic-trough concentrating photovoltaic/thermal (CPVT) system with high-efficiency cooling. **Renewable Energy**, v. 101, p. 467–483, fev. 2017.

KATZ, E. A.; GORDON, J. M.; TASSEW, W.; FEUERMAN, D. Photovoltaic

characterization of concentrator solar cells by localized irradiation. **Journal of Applied Physics**, v. 100, n. 4, p. 44514, 15 ago. 2006.

KUHLEMEIER, C. Phyllotaxis. **Trends in Plant Science**, v. 12, n. 4, p. 143–150, 2007.

LEE, M. M.; TEUSCHER, J.; MIYASAKA, T.; MURAKAMI, T. N.; SNAITH, H. J. Efficient hybrid solar cells based on meso-superstructured organometal halide perovskites. **Science**, v. 338, n. 6107, p. 643–647, 2 nov. 2012.

LEE, Y. S.; CHUA, D.; BRANDT, R. E.; SIAH, S. C.; LI, JIAN V. et al. Atomic layer deposited gallium oxide buffer layer enables 1.2 V open-circuit voltage in cuprous oxide solar cells. **Advanced Materials**, v. 26, n. 27, p. 4704–4710, jul. 2014.

MA, X.; ZHENG, H.; CHEN, Z. An investigation on a compound cylindrical solar concentrator (CCSC). **Applied Thermal Engineering**, v. 120, p. 719–727, jun. 2017.

MAITY, S. N. Development of solar power tree an innovation that uses up very less land and yet generates much more energy from the sun rays by spv method. **Journal of Environmental Nanotechnology**, v. 2, p. 59–69, fev. 2013.

MALAGUETA, D.; SZKLO, A.; BORBA, B. S.; SORIA, R.; ARAGÃO, R. et al. Assessing incentive policies for integrating centralized solar power generation in the Brazilian electric power system. **Energy Policy**, v. 59, p. 198–212, 2013.

MANN, J. E.; CURRY, G. L.; SHARPE, P. J. H. Light interception by isolated plants. **Agricultural Meteorology**, v. 20, n. 3, p. 205–214, jun. 1979.

MATH FORUM. **Fibonacci Numbers**. Disponível em: <http://mathforum.org/mathimages/index.php/Fibonacci_Numbers>. Acesso em: 30 mar. 2018.

MENG, X.; XIA, X.; SUN, C.; LI, Y.; LI, X. A novel free-form Cassegrain concentrator for PV/T combining utilization. **Solar Energy**, v. 135, p. 864–873, out. 2016.

MEC. **Árvore solar produz energia em campus de universidade cearense**. Ministério Da Educação. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/component/content/index.php?option=com_content&view=article&id=46081:arvore-solar-produz-energia-em-campus-de-universidade-cearense&catid=212&Itemid=86>. Acesso em: 22 mar. 2018.

MOCHIZUKI, Y.; YACHI, T. **Relationship between power generated and series/parallel solar panel configurations for 3D Fibonacci PV modules**. 2017. IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8191073/>.

MOMENI, F.; NI, J. Nature-inspired smart solar concentrators by 4D printing. **Renewable Energy**, v. 122, p. 35–44, jul. 2018.

MOOJEN, T. M. B.; CAVALCANTE, R. B. L.; MENDES, C. A. B. Avaliação da radiação solar com base em dados de nebulosidade. **Geografia (Londrina)**, v. 21, n. 3, p. 41–55, 2012.

MPPTSOLAR. **Ligação em série de painéis solares.** Disponível em: <<http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-serie.html>>. Acesso em: 15 mar. 2018a.

MPPTSOLAR. **Painéis solares: ligação em paralelo.** Disponível em: <<http://www.mpptsolar.com/pt/paineis-solares-em-paralelo.html>>. Acesso em: 15 mar. 2018b.

NAGY, Z.; SVETOZAREVIC, B.; JAYATHISSA, P.; BEGLE, M.; HOFER, J.; LYDON, G.; WILLMANN, A.; SCHLUETER, A. The adaptive solar facade: from concept to prototypes. **Frontiers of Architectural Research**, v. 5, n. 2, p. 143–156, jun. 2016.

NOE, R. **Solar tree scheduled to sprout in london for clerkenwell.** Disponível em: <<http://www.core77.com/posts/22190/Solar-Tree-Scheduled-to-Sprout-in-London-for-Clerkenwell>>. Acesso em: 20 mar. 2018.

NREL. **Efficiency Chart.** Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

OBARA, S.; MATSUMURA, K.; AIZAWA, S.; KOBAYASHI, H.; HAMADA, Y.; SUDA, T. Development of a solar tracking system of a nonelectric power source by using a metal hydride actuator. **Solar Energy**, v. 158, p. 1016–1025, dez. 2017.

ORDENES, M.; MARINOSKI, D. L.; BRAUN, P.; RÜTHER, R. The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. **Energy and Buildings**, v. 39, n. 6, p. 629–642, 2007.

PATIL, D. M.; MADIWAL, S. R. **Design and development of solar tree for domestic applications.** International Journal of Engineering Sciences & Research Technology. 2016.

PENNYBACKER, M. F.; SHIPMAN, P. D.; NEWELL, A. C. Phyllotaxis: Some progress, but a story far from over. **Physica D: Nonlinear Phenomena**, v. 306, p. 48–81, 2015.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L.; RÜTHER, R. **Brazilian Atlas of Solar Energy.** São José dos Campos, Brazil: Brazilian Institute for Space Research, 2006.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos** Centro de Referência para Energia Solar e Eólica - CRESESB, 2014. Disponível em: <<https://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>

POULEK, V. **Testing the new solar tracker with shape memory alloy actors.** Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion - WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/520161/>>

PUGNAIRE, F. I.; VALLADARES, F. **Functional Plant Ecology.** 2 ed ed. [s.l.] CRC Press, 2007.

RASC. **Solar Panel Angles.** The Royal Astronomical Society of Canada. Disponível em: <<http://calgary.rasc.ca/solarpanels.htm>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

- REES, A. R. The apical organization and phyllotaxis of the oil palm. **Annals of Botany**, v. 28, n. 1, p. 57–69, jan. 1964.
- RIBEIRO, A. E. D.; AROUCA, M. C.; COELHO, D. M. Electric energy generation from small-scale solar and wind power in Brazil: The influence of location, area and shape. **Renewable Energy**, v. 85, p. 554–563, jan. 2016.
- RÜTHER, R.; ZILLES, R. Making the case for grid-connected photovoltaics in Brazil. **Energy Policy**, v. 39, n. 3, p. 1027–1030, 2011.
- SARAJEVO TIMES. **Solar tree for charging cell phones and laptops placed within the campus**. Disponível em: <<http://www.sarajevotimes.com/solar-tree-for-charging-cell-phones-and-laptops-placed-within-the-campus/>>. Acesso em: 25 mar. 2018.
- SEAWARD, 2018. **Curve tracing FAQs**. Disponível em: <<http://www.seaward-groupusa.com/userfiles/curve-tracing.php>>. Acesso em: 09 jun. 2018.
- SIOHANSI, R. Retail electricity tariff and mechanism design to incentivize distributed renewable generation. **Energy Policy**, v. 95, p. 498–508, 2016.
- SOARES, K; **O que é um Arduino e o que pode ser feito com ele?** 2013. Disponível em: <<http://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2013/10/o-que-e-um-arduino-e-o-quepode-ser-feito-com-ele.html>>. Acesso em: 11 abr. 2018.
- SOLAR POWER EUROPE. Global Market Outlook For Solar Power 2015-2019. 2014, p. 32.
- SOLARGIS. **Investigate your region with Solargis solar resource maps**. Disponível em: <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/>>. Acesso em: 27 abr. 2018.
- SRINIVAS, A. P. R. **Design and development of a solar tree**. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2016.
- STRÜMPPEL, C. MCCANN, M.; BEAUCARNE, G.; ARKHIPOV, V.; SLAOUI, A.; ŠVRČEK, V.; CAÑIZO, C.; TOBIAS, I. Modifying the solar spectrum to enhance silicon solar cell efficiency—An overview of available materials. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 91, n. 4, p. 238–249, fev. 2007.
- SULLIVAN, R. M. Shadow effects on a series-parallel array of solar cells. Goddard Space Flight Center. 1965.
- SUMATHI, V.; JAYAPRAGASH, R.; BAKSHI, A.; KUMAR A. P. Solar tracking methods to maximize PV system output – A review of the methods adopted in recent decade. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 130–138, jul. 2017.
- SUTHERLAND, B. R. Cost competitive luminescent solar concentrators. **Joule**, v. 2, n. 2, p. 203–204, fev. 2018.
- THARAMUTTAM, J. K.; NG, A. K. Design and development of an automatic solar tracker. **Energy Procedia**, v. 143, p. 629–634, dez. 2017.
- THE ENGINEERING PROJECTS. **Arduino Mega2560 in Pakistan**. Disponível em: <<https://www.theengineeringprojects.com/product/arduino-mega-2560-in-pakistan>>. Acesso em: 19 abr. 2018.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro, Brazil: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.

VEERAPEN, S.; WEN, H. **Shadowing effect on the power output of a photovoltaic panel**. 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7512858/>>.

VERMA, N. N.; MAZUMDER, S. **An investigation of solar trees for effective sunlight capture using monte carlo simulations of solar radiation transport**. 2014. Volume 8A: Heat Transfer and Thermal Engineering. Disponível em: <<http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?doi=10.1115/I-MECE2014-36085>>.

VESELINOVIC, A.; MIKULOVIC, J.; DURISIC, Z. **Impact of cloudiness on direct and diffuse components of horizontal solar irradiation**. 2016 4th International Symposium on Environmental Friendly Energies and Applications (EFEA). Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/7748796/>>.

VIBHUTE, K.; SHUKLA, R. **Economic electrification using solar tree**. International Journal of Science, Engineering and Technology Research. 2015.

ZHANG, P.; ZHOU, G.; ZHU, Z.; LI, W.; CAI, Z. Numerical study on the properties of an active sun tracker for solar streetlight. **Mechatronics**, v. 23, n. 8, p. 1215–1222, dez. 2013.