UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ZOOTECNIA E ENGENHARIA DE ALIMENTOS

GILBERTO DE ANDRADE FREITAS

**Eficiência energética de um painel fotovoltaico com rastreador solar baseado
em sensores LDR comparado a um painel em ângulo fixo**

GILBERTO DE ANDRADE FREITAS

Eficiência energética de um painel fotovoltaico com rastreador solar baseado em sensores LDR comparado a um painel em ângulo fixo

Versão corrigida

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências no Programa de Pós-graduação em Gestão e Inovação na Indústria Animal.

Área de concentração:

Gestão e Inovação na Indústria Animal

Orientadora:

Profa. Dra. Ana Carolina de Sousa Silva

Coorientador:

Prof. Dr. Celso Eduardo Lins de Oliveira

Pirassununga

2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Serviço de Biblioteca e Informação, FZEA/USP,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F866e Freitas, Gilberto de Andrade
Eficiência energética de um painel fotovoltaico com rastreador solar baseado em sensores LDR comparado a um painel em ângulo fixo / Gilberto de Andrade Freitas; orientadora Ana Carolina de Sousa Silva; coorientador Celso Eduardo Lins de Oliveira. -- Pirassununga, SP. 116 f.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Mestrado Profissional Gestão e Inovação na Indústria Animal) -- Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo.

1. Eficiência energética. 2. Rastreamento solar em dois eixos. 3. Energia Elétrica. 4. Energia Solar. 5. Sensores LDR. I. Silva, Ana Carolina de Sousa, orientadora. II Oliveira, Celso Eduardo Lins de coorientador. III Título.

Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte - o autor

GILBERTO DE ANDRADE FREITAS

Eficiência energética de um painel fotovoltaico com rastreador solar baseado em sensores LDR comparado a um painel em ângulo fixo

Dissertação apresentada à Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Ciências no Programa de Pós-graduação em Gestão e Inovação na Indústria Animal.

Data da aprovação: ____/____/____

Banca Examinadora

Profa. Dra. Ana Carolina de Sousa Silva – USP/FZEA

Prof. Dr. Guilherme Augusto Spiegel Gualazzi – AFA – Pirassununga/SP

Prof. Dr. Gustavo Voltaini von Atzingen – IFSP – Piracicaba/SP

Prof^a. Dr^a. Valéria Cristina Rodrigues Sarnighausen – FCA/UNESP – Botucatu/SP

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação, primeiramente, aos meus pais Francisco Belchior de Freitas (in memoriam) e a minha mãe Anice Borges de Andrade Freitas que me apoiaram e incentivaram durante esta jornada.

Ao meu mestre Dr. Daisaku Ikeda, poeta Laureado do Mundo e Presidente da Soka Gakkai Internacional (SGI).

A minha esposa Marinésia Decândio Freitas, ao meu sobrinho MsC Fabrício Roberto Decândio e a minha tia Ageni Diolina de Jesus, que também me apoiaram e incentivaram durante esta jornada.

Ao meu filho Francisco Belchior de Freitas Neto que também me apoiou e incentivou durante esta jornada.

Aos meus sogros Celso Decândio (in memoriam) e a minha sogra Palmira Gonçalves Decândio que me apoiou e incentivou durante esta jornada.

A minha orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Carolina de Sousa Silva e a meu Coorientador Prof. Dr. Celso Eduardo Lins de Oliveira, que também me apoiaram e incentivaram durante esta jornada.

Ao meu amigo e Prof. Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion que me incentivou a ingressar na Universidade de São Paulo (USP) e a cursar a pós-graduação.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Daisaku Ikeda presidente da, Soka Gakkai Internacional (SGI), que veio ao Brasil em 19 de outubro de 1960 para propagar, pela primeira vez, o Budismo Nichiren Daishonin.

A todo corpo docente do Programa Gestão da Inovação na Indústria Animal (GIIA) – Mestrado Profissional, em especial a minha Orientadora Prof^a. Dr^a. Ana Carolina de Sousa Silva e a meu Coorientador Prof. Dr. Celso Eduardo Lins de Oliveira. Ao Prof. Dr. Celso da Costa Carrer, Coordenador do UNICETEX/UNITec, onde se encontra a GeraSol Energia Solar Termo Hidro Elétrica incubada.

Aos meus amigos Prof. Dr. Ernane José Xavier Costa e ao MsC Denis Sato e a toda equipe técnica do Laboratório de Física Computacional (LAFAC) que me apoiaram durante todo este trabalho.

Aos funcionários do *Campus* Fernando Costa, em especial à bibliotecária Vanessa Rodrigues que me apoiou na redação desta dissertação, e aos demais que sempre me apoiaram e incentivaram durante esta jornada.

Aos meus amigos e empresários Eng^o. Artur Granato, sócio proprietário da empresa NORTEC Representações Ltda em São Paulo de São Paulo/SP e Eng^o José Lourenço Flores Cassuci, sócio proprietário da empresa A Atual Aquecedores Solares de Mogi Guaçu/SP, que desenvolveu a Calha Parabólica nas dimensões projetadas pelo Prof. Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion e são parceiros das empresas INOVA Energia Solar e GeraSol Energia Solar Termo Hidro Elétrica.

Ao meu amigo e Prof. Dr. Olonade Kolawole A. da OBAFEMI AWOLOWO UNIVERSITY Ile-Ife Nigéria que me apoiou e incentivou durante os últimos meses desta jornada.

Ao engenheiro italiano Giuseppe Barba Diretor e a Marco Cavichioli, Diretor Comercial da P&G Energy do Brasil Ltda, empresa parceira da Gerasol Energia Solar Termo Hidro Elétrica, que também me apoiaram e incentivaram durante este último ano desta jornada.

Aos meus filhos Patrícia Vieira de Andrade Freitas Darbilly e Gilberto de Andrade Freitas Filho que também me apoiaram e incentivaram durante esta jornada.

Aos meus irmãos Dr. Gilson Andrade Freitas, Cláudio Andrade de Freitas, Francisco Andrade de Freitas e Flávio Roberto de Andrade Freitas, cunhadas e sobrinhos que também me apoiaram e incentivaram.

“Se quer viver uma vida feliz, amarre-se a uma meta, não às pessoas nem às coisas”

Albert Einstein

“A vida é uma peça de teatro que não permite ensaios. Por isto cante, dance, chore e viva intensamente cada momento de sua vida, antes que a cortina se feche e a peça termine sem aplausos.”

Charles Chaplin

“Viva como se fosse morrer amanhã. Aprenda como se fosse viver para sempre”

Mahatma Ghandi

RESUMO

FREITAS, G. A. **Eficiência de um painel fotovoltaico com rastreador solar baseado em sensores LDR comparado a um painel em ângulo fixo.** 2018. 116 f. Dissertação (Mestrado Profissional) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

O sol é a fonte de energia mais importante para todos os seres vivos no planeta Terra. Os sistemas concentrados de energia solar e fotovoltaica apresentaram avanços importantes na eficiência da conversão da irradiação solar em energia elétrica. A redução dos custos do equipamento necessário, combinada com um maior acesso ao conhecimento com a popularização da internet, permitiu que esta tecnologia se encontrasse em vários setores da sociedade. Neste estudo, analisou-se a eficiência energética de um painel solar com sistema de rastreamento de controle em circuito fechado baseado em fotoresistores. Este painel solar foi projetado e montado com tecnologia DIY em comparação com um painel de ângulo fixo. O sistema foi analisado em três condições atmosféricas diferentes: sol, parcialmente nublado e totalmente nublado. Os dados de corrente elétrica produzidos pelos dois sistemas e a carga consumida pelo painel do rastreador foram gravados automaticamente usando um sistema de coleta de dados para cada painel fotovoltaico. O sistema com rastreador mostrou uma produção de energia de 24,52% maior do que o painel fixo no período de maior radiação solar. Observou-se que a produção de energia do painel com sistema de rastreamento é maior durante períodos de ângulo de elevação inferior em relação ao horizonte. No entanto, a análise de eficiência energética do sistema de rastreamento apresentou uma comparação de geração de energia elétrica negativa em relação ao painel de ângulo fixo, e o painel com rastreador apresentou um custo elevado de 216,60% em relação ao painel em ângulo fixo. Portanto, não compensa o uso da tecnologia DIY nas condições testadas.

Palavras-chave: Energia solar. Rastreador solar. Painel fotovoltaico. Painel em ângulo fixo. Arduino, DIY.

ABSTRACT

FREITAS, G. A. **Efficiency of a photovoltaic panel with solar tracker based on LDR sensors compared to a fixed angle panel.** 2018. 116 f. Dissertation (Professional Master's Degree) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo FZEA/USP, Pirassununga, 2018.

The sun is the most important source of energy for all living beings on planet Earth. Concentrated solar and photovoltaic systems have presented important advances in the efficiency of the conversion of solar irradiation to electric energy. The reduction in the costs of the necessary equipment, combined with greater access to knowledge with the popularization of the *internet*, has allowed this technology to be present in several sectors of society. In this study the energy efficiency of a solar panel with closed loop control tracker system based on photoresistors was analyzed. This solar panel was designed and assembled with DIY technology compared to a fixed-angle panel. The system was analyzed in three different atmospheric conditions: sunny, partly cloudy and totally cloudy. The electrical current data produced by the two systems and the load consumed by the tracker panel were automatically recorded using a data collection system for each photovoltaic panel. The system with tracker showed energy production of 24.52% higher than the fixed panel in the period of higher solar radiation. It was observed that the energy production of the panel with tracker system is higher during periods of lower elevation angle with respect to the horizon. However, the energy efficiency analysis of the tracking system presented a compared to of negative electric power generation in relation to the fixed-angle panel, and the panel with tracker presented a high cost of 216,60% in relation to the panel in fixed form. Therefore, it does not compensate for the use of DIY technology in the tested conditions.

Keywords: Solar energy. Solar tracker. Photovoltaic panel. Fixed-angle panel. Arduino, DIY.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa mundial com paralelos (linhas horizontais) e meridianos (linhas verticais).	15
Figura 2 – Diferentes posições do sol de acordo com as estações do ano.....	16
Figura 3 – Fontes utilizadas para a produção de energia elétrica em 2013.	18
Figura 4 - Custo por megawatt de energia elétrica por diferentes tecnologias.....	18
Figura 5 – Radiação solar global horizontal – média anual em kWh/m ² no Brasil.....	19
Figura 6 - Irradiação solar – Brasil (a) / Irradiação solar – Alemanha (b). Média anual da radiação global incidente no plano horizontal.....	20
Figura 7 – Gráfico da capacidade instalada de energia elétrica por todas as fontes entre – 1883 e 2014 em (GW).....	21
Figura 8 – Representação da matriz Elétrica Brasileira 1970 a 2014.....	22
Figura 9 – Crescimento do consumo de energia por fonte.....	22
Figura 10 – Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	23
Figura 11 – Comparativo entre as matrizes elétricas brasileiras de Dez./2016 e Dez./2017.....	24
Figura 12 – Investimento total por fonte de energia em função da potência.....	255
Figura 13 – Média do Custo Unitário em função da tarifa de energia para cada tipo de fonte	25
Figura 14 – Investimento (Milhões R\$) X Potência (kW) Dez./2014, Nov./2017.....	27
Figura 15 – Métodos de utilização da energia solar.	28
Figura 16 – Esquema de uma célula solar de CdS/CdTe	29
Figura 17 – Sistema fotovoltaico híbrido.	31
Figura 18 – Pesquisas em tecnologia fotovoltaica.	32
Figura 19 – Diagrama esquemático representativo dos componentes relativos ao sistema de potência de uma planta solar térmica.	33
Figura 20 – Coletor tipo calha parabólica – rastreamento solar em um eixo.....	34
Figura 21 – Torre central de recepção. Diversos espelhos direcionam o foco dos raios solares ao ponto de coleta.	34
Figura 22 – Refletor linear de Fresnel - Espelhos múltiplos se movem em um.....	35
Figura 23 – Sistema de lentes Fresnel – múltiplas lentes concentram os.....	35

Figura 24 – Concentrador tipo disco parabólico.	36
Figura 25 – Sistema rastreador solar baseado em sensores óticos (close-loop).	39
Figura 26 – Sistema rastreador de malha aberta baseado em algoritmo de posicionamento solar (open-loop).	39
Figura 27 - Fotos do Experimento.....	48
Figura 28 – Painel fotovoltaico com sistema de 2 eixos.	49
Figura 29 - Suporte dos LDR's.	50
Figura 30 - Divisor de tensão com o LDR.	51
Figura 31 – Representação do comparador de tensão para movimentação do servo motores.	52
Figura 32 - Fluxograma da lógica de movimentação azimutal.	52
Figura 33 – Fluxograma da lógica de movimentação de altitude.	52
Figura 34 – Esquema de montagem dos sensores de corrente no painel com rastreador solar.	54
Figura 35 – Gravação dos dados dos sensores de corrente no painel com rastreador solar.	54
Figura 36 – Esquema de gravação de dados do sensor de corrente no painel fixo.	55
Figura 37 - Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 24/10/2017 no período matutino (entre 08:40 e 12:27 horas).	57
Figura 38 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 25/10/2017 período vespertino (entre 12:17 e 16:23 horas).	57
Figura 39 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 24/10/2017 período vespertino (entre 13:27 e 16:03 horas).	59
Figura 40 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 25/10/2017 período matutino (entre 09:19 e 11:16 horas).	59
Figura 41 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 27/10/2017 período vespertino (entre 12:05 e 13:40 horas).	60

Figura 42 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 25/10/2017 período matutino (entre 09:19 e 12:05 horas).....	62
Figura 43 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 27/10/2017 período matutino (entre 09:06 e 11:53 horas).....	61
Figura 44 - Investimento X Potência gerada em kW.....	67
Figura 45 - Potência Instalada (kW) X Renda (Milhões R\$)/Ano.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Algoritmos para rastreadores de controle de circuito aberto <i>Continua</i>	41
Tabela 2 – Médias e desvios-padrão da corrente elétrica em mili-amperes dos painéis fotovoltaicos mensurados no dia 24/10/2017 no período matutino (entre 08:40 e 12:27 horas).	58
Tabela 3 - Médias e desvios-padrão da corrente elétrica em mili-amperes dos painéis fotovoltaicos mensurados no dia 25/10/2017 no período vespertino (entre 12:17 e 16:23 horas).	58
Tabela 4 – Médias de consumo de corrente elétrica e tempo de duração do sistema rastreador.....	62
Tabela 5 – Médias para o consumo energético, corrente produzida no período e comparativo energético.....	63
Tabela 6 – Custos dos componentes para montagem do sistema rastreador	63
Tabela 7 – Custos dos componentes para montagem do painel fixo.....	64

LISTA DE SIGLAS

ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica.

BEN – Balanço Energético Nacional.

CdS – Sulfeto de Cádmio/CdTe – Telureto de Cádmio – Componentes de fotocélulas de pequeno porte. – Dois semicondutores multicristalinos.

CdTe – Telureto de Cádmio. -

CGIS – Disseleneto de Cobre – Índio – Gálio.

CMOS – Complemento de Óxido de Metal Semicondutor.

DIY – Do It Yourself (Faça você mesmo - traduzido).

COPPE - UFRJ – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro

DOE – United States Department of Energy - Departamento de Energia dos Estados Unidos – Traduzido.

ESC – Energia Solar Concentrada

ESF – Energia Solar Fotovoltaica

LDR – Light Dependent Resistor - Resistor Dependente de Luz – Traduzido

IoT – Internet of things (Internet das coisas – traduzido)

MME – Ministério de Minas e Energia

NREL – National Renewable Energy Laboratory - Laboratório Nacional de Energias Renováveis – Traduzido

N3E – Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia.

PCB – Printed Circuit Board - Placa de Circuito Impresso – Traduzido

PCH – Pequenas Centrais Hidroelétricas.

PV – Photovoltaic – Fotovoltaico - Traduzido

RFSS – Rádio Frequency Simulation System – Sistema de simulação de radiofrequência – Traduzido.

SPE – Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético.

Si – Silício – Monocristalino

TCO – Óxido transparente condutivo - Componente de fotocélulas de pequeno porte

UNICETEX – Centro de Inovação, Empreendedorismo e Extensão Universitária.

UNITec – Incubadora de Empresas do Agronegócio de Pirassununga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	O movimento aparente do sol.....	15
2.2	Dados sobre o uso de energia solar	17
2.2.1	Comparativo de custo de gerador de energia elétrica por sistema fotovoltaico dez./2014 e nov./2017.....	26
2.3	ENERGIA SOLAR.....	27
2.3.1	Sistemas de energia solar	27
2.3.1.1	Energia solar fotovoltaica (ESF).....	28
2.3.1.2	Energia solar concentrada (ESC).....	33
2.4	SISTEMAS DE RASTREAMENTO SOLAR.....	36
2.4.1	Classificação dos sistemas de rastreamento solar	37
2.4.2	Pesquisas sobre rastreadores solares	43
2.4.3	Eficiência do rastreador solar	44
2.5	A REVOLUÇÃO DIY - DO IT YOURSELF (“FAÇA VOCÊ MESMO”).....	45
3	OBJETIVOS	48
3.1	Objetivo geral.....	48
3.2	Objetivos específicos.....	47
4	MATERIAIS E MÉTODOS	49
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1	Análise estatística.....	55
5.2	Produção energética.....	56
5.3	Consumo energético do sistema rastreador.....	61
5.4	Eficiência energética.....	63
5.5	Custos de montagem.....	64
5.6	A experiência "faça você mesmo".....	65
6	CONCLUSÃO.....	66
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	67
	REFERÊNCIAS	71
	ANEXOS	77

1 INTRODUÇÃO

A produção de energia elétrica a partir da radiação solar é um dos sistemas de energia limpa que tem obtido maiores índices de desenvolvimento tecnológico em relação à eólica, carvão e gás na última década (SHANKLEMAN; MARTIN, 2017). Os progressos no desenvolvimento de equipamentos para este fim têm derrubado as barreiras de custo e eficiência do sistema.

A energia do sol chega à Terra na forma de energia eletromagnética, também definida como radiação solar. É necessário, para maior eficiência, a utilização de um dispositivo rastreador para que o coletor de energia solar mantenha uma posição sempre perpendicular aos raios solares.

Em usinas de grande produção de energia elétrica com a conversão de energia solar, há a utilização de sistemas de rastreamento complexos e de alto custo, baseados em sensores, sistemas de coordenadas e algoritmos com objetivo de se obter o máximo de produção energética. Apesar de o entendimento da movimentação do sol ser de fácil compreensão, os cálculos matemáticos envolvidos na elaboração de muitos sistemas são complexos e, muitas vezes, de arquitetura proprietária (PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

Com a revolução tecnológica conhecida como “Faça você mesmo” (*DIY – Do it yourself*) em sua terceira onda de desenvolvimento, muitas pessoas têm agora acesso a esquemas de montagem e algoritmos diversos para construir seus próprios sistemas em menor escala. Essa revolução é uma infraestrutura global da sociedade da informação permitindo que serviços avançados, através da interligação de “coisas” (físicas e virtuais) Internet das Coisas (IoT), possam ser desenvolvidos com base na estrutura existente e na evolução das tecnologias de informação e comunicação.

Neste estudo, foi avaliada a eficiência de um sistema de energia solar fotovoltaica com rastreamento solar baseado em fotoresistores (LDR – Light Dependent Resistor - Resistor Dependente de Luz – Traduzido) comparado a um painel em ângulo fixo. Como o projeto se baseou em tecnologias DIY foram utilizados como base projetos disponíveis online

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O movimento aparente do sol

O estudo do movimento aparente do sol é muito importante para o planejamento e desenvolvimento de um sistema de energia solar. Embora seja difundida popularmente a ideia de que o sol “*nasce*” no leste e se “*põe*” no oeste, a trajetória aparente do sol muda conforme a posição geográfica e a época do ano. Primeiramente, diz-se “*movimento aparente do sol*” porque na verdade é a Terra que gira em seu próprio eixo e em torno do sol, o que dá a sensação à um observador na Terra de que o sol se move através da abóboda celeste. Assim, para o desenvolvimento de equipamentos de rastreamento utiliza-se o termo de *trajetória solar* (PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

A trajetória solar é analisada utilizando o *Sistema de Coordenadas Geográficas*, que divide o planeta Terra em diversas linhas imaginárias chamadas de paralelos e meridianos permitindo que cada posição possa ser especificada por um conjunto de números, letras ou símbolos. A invenção deste sistema é creditada ao grego *Erastóstenes* no século III a.C. Os paralelos cortam a Terra horizontalmente e os meridianos verticalmente e suas medidas em graus são chamadas, respectivamente, latitudes e longitudes (MCPHAIL, 2011; OSGB, 2010).

A Figura 1 apresenta um mapa mundial com os paralelos e meridianos.

Figura 1 - Mapa mundial com paralelos (linhas horizontais) e meridianos (linhas verticais)

Fonte: Própria autoria. A Linha do Equador e Meridiano de Greenwich estão na posição 0°.

A posição do Sol muda com o tempo, as estações do ano e o eixo de inclinação da Terra que varia de $23,5^\circ$ a $-23,5^\circ$, devido ao movimento de precessão e translação. Essa movimentação governa as estações do ano, pois os períodos de iluminação solar variam de mais para menos nos *solstícios* de verão e inverno nos hemisférios norte e sul da Terra. Os períodos em que os dois hemisférios recebem a mesma quantidade de luz são chamados *equinócios* de primavera e outono (Figura 2) (STINE; GEYER, 2017).

Figura 2 – Diferentes posições do sol de acordo com as estações do ano

Fonte: GHTC-USP. **O movimento do sol.** Disponível em:
<<http://www.ghtc.usp.br/server/Sites-HF/Paula/sun1.html>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

O conhecimento sobre a movimentação da Terra e os sistemas de coordenadas geográficas permitiu ao campo da astronomia realizar cálculos precisos da posição de diversos astros em qualquer data. Através destes dados matemáticos, é possível criar algoritmos para que sistemas computacionais, combinados à dispositivos mecânicos e eletrônicos, possam rastrear a trajetória do sol com precisão (STINE; GEYER, 2017).

Ao planejar um sistema rastreador solar, deve-se analisar a trajetória do sol de acordo com a posição geográfica. Estes dados podem ser facilmente obtidos através de *softwares* e *websites*¹ ou pelo uso da equação de movimento (eq.(1)).

¹ Há também muitos aplicativos para smartphones, plataformas PC/MAC e sites que podem ser utilizados para o estudo da trajetória do sol. O site <http://www.jgiesen.de/GeoAstro/sundials.html> traz diversas ferramentas com diferentes abordagens. Outras opções interessantes são: Suncalc (<http://suncalc.net/>), SolarBeam (<http://solarbeam.sourceforge.net/>), Sunpath (<http://www.eclim.de/index5.htm>) e Jaloxa (<https://goo.gl/6aiJTp>). O SunEarthTools.com (www.sunearthtools.com) além de apresentar um mapa da trajetória do sol, também possui diversas ferramentas de análise. Para smartphones existem as opções: Suncalc, Solar Sunseeker, Sungraph, Sun Surveyor, Helios Sun Position e outros, disponíveis nas lojas de aplicativos.

$$E = 9,87.\text{sen}(2.B) - 7,53.\text{cos}(B) - 1,5.\text{sen}(B) \quad \text{eq(1)}$$

em que:

n é o número do dia considerado, contado a partir de 1° de janeiro.

E (Equação do Tempo no Brasil) é o tempo baseado no movimento aparente do sol no céu, o que denota a zero hora como o momento no qual o sol cruza o meridiano local. Sendo assim, pode-se definir a equação do tempo como o espaço de tempo que separa duas passagens consecutivas pelo meridiano. A variação do dia solar verdadeiro no Brasil é dada pela equação do tempo:

$$B = \frac{360 \times (n - 81)}{364}$$

2.2 Dados sobre o uso de energia solar

Devido ao crescimento populacional e desenvolvimento industrial nas últimas décadas, a demanda mundial de energia cresce significativamente a cada dia fomentando o risco de uma crise energética. A energia acessível, obtida através de combustíveis fósseis, não é suficiente para atender essa crescente demanda, além de poluir fortemente os ecossistemas causando alterações climáticas que, por sua vez, podem resultar em grandes desastres naturais. Dessa forma, países em desenvolvimento buscam fontes de energia limpa e renovável (KANNAN; VAKEESAN, 2016). Considerando as fontes de energia renováveis (energia eólica, hidrelétrica, geotérmica, solar), a energia da irradiação solar ganha destaque por ser abundante e inesgotável, mas é pouco utilizada (Figura 3).

Figura 3 – Fontes utilizadas para a produção de energia elétrica em 2013 no mundo

Fonte: KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 62, p. 1096, 2016.

Os custos para a produção de energia elétrica têm caído ao longo dos anos, sendo mais barato que o carvão em algumas partes do mundo. Desde 2009 os preços de investimento para a produção caíram 62 % em toda cadeia de equipamentos. Em menos de uma década, é provável que seja a opção de menor custo em quase toda parte (Figura 4) (SHANKLEMAN; MARTIN, 2017).

Figura 4 – Custo por megawatt de energia elétrica por diferentes tecnologias

Fonte: Adaptado pelo autor de Shankleman e Martin (2017). Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-01-03/for-cheapest-power-on-earth-look-skyward-as-coal-falls-to-solar>. Acesso em: 10 dez. 2017.

A distribuição da radiação solar e a sua intensidade são dois fatores-chave que determinam a eficiência de um sistema de energia solar. A Figura 5 apresenta um mapa com a média de irradiação solar anual no Brasil, demonstrando o grande

potencial de produção com grande parte de sua área acima dos 4 kWh/m² de média anual variando de 3,15 a 6,65 kWh/m² no sertão nordestino. Como seu território é de 8.516.000 km² e o sertão nordestino ocupa uma faixa de 1.500.000 km² com uma média de 6 kWh/m², constatou-se o imenso potencial a ser explorado pelas indústrias de painéis fotovoltaicos do Brasil e do mundo (SOUZA, 2005; PEREIRA et al., 2006).

Figura 5 – Radiação solar global horizontal – média anual em kWh/m² no Brasil

Fonte: PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar** São José dos Campos: Graficor, 2006. p. 34.

De acordo com a figura 6, a região menos ensolarada do Brasil apresenta índices solares em torno de 1642 kWh/m², que estão acima dos valores apresentados na área de maior incidência solar da Alemanha, por exemplo, que recebe cerca de 1300 kWh/m² (SALAMONI; RÜTHER, 2007 apud CABRAL; TORRES; SENNA, 2013).

Figura 6 - Irradiação solar – Brasil (a) / Irradiação solar – Alemanha (b). Média anual da radiação global incidente no plano horizontal

Fontes: Salamoni e Rüther (2007) e Geomodel Solar apud Cabral, Torres e Senna (2013).

Segundo o Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia (N3E) da Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético (SPE) do Ministério de Minas e Energia (MME), os registros históricos indicam ter sido Campos, no Estado do Rio de Janeiro, a primeira cidade brasileira a ter serviços de energia elétrica, com a instalação de uma termelétrica de 52 kW, inaugurada em 1883, no governo do Imperador D. Pedro II.

Seis anos mais tarde, a 22 de agosto de 1889, na cidade de Juiz de Fora, no Estado de Minas Gerais, foi inaugurada a 1ª hidrelétrica do Brasil e também da América do Sul, denominada usina Bernardo Mascarenhas, em homenagem ao seu idealizador e instalador. Originalmente, a usina constava de 2 grupos turbina-gerador, num total de 250 kW. O pioneirismo desse brasileiro frutificou amplamente, e já em 1900 o Brasil contava com 5.300 kW hidráulicos e 5.100 kW térmicos.

Somente em 1937 o Brasil ultrapassou a barreira de 1.000 MW de capacidade instalada de geração. O gráfico a seguir mostra que foi a partir de

1960 que a expansão de usinas teve forte ritmo de crescimento, para atender ao desenvolvimento econômico da época. (N3E / SPE / MME).

Figura 7 – Gráfico da capacidade instalada de energia elétrica por todas as fontes entre – 1883 e 2014 em (GW)

Fonte: Própria autoria – Adaptado da Capacidade Instalada de Geração Elétrica Brasil e Mundo Ed. 05/03/2015, p.2 N3E / SPE / MME.

A Figura 8 apresenta dados sobre a matriz energética brasileira, de 1970 a 2014 (N3E / SPE / MME.), onde pode ser observada a grande variedade de fontes energéticas disponíveis no Brasil com predominância na produção de petróleo, sendo uma fonte energética não renovável. A Figura 9 apresenta o crescimento do consumo de energia por fonte a partir da década de 70 a 2014, onde é notável o crescimento do consumo do petróleo e da eletricidade e também perceptível a redução do consumo de lenha.

Figura 8 – Representação da Matriz Elétrica Brasileira 1970 a 2014

Fonte: Própria autoria – Adaptado da Capacidade Instalada de Geração Elétrica Brasil e Mundo Ed. 05/03/2015, p.2 N3E/ SPE / MME.

Figura 9 – Crescimento do consumo de energia por fonte 1970 a 2014

Fonte: Adaptado pelo autor do Boletim Energético Nacional 2015 (BEN, 2015).

Segundo Ben (2010), a oferta interna de energia elétrica no Brasil, em 2009, foi de 506,1 TWh, superior 0,2% em relação ao ano anterior. O consumo final foi de 426,0 TWh, menor em 0,5% em comparação a 2008. O aumento do consumo final de eletricidade no país em 2013 (BEN, 2015), de 3,6%, com destaque para os setores residencial e comercial, foi atendido a partir da expansão da geração

térmica. A Figura 10 apresenta a oferta interna de energia elétrica no Brasil por fonte em fevereiro de 2016.

Figura 10 – Oferta interna de energia elétrica por fonte Fevereiro de 2016

Fonte: Adaptado por Ambientes ST do: Boletim mensal de energia - Fev/2016 (Ministério de Minas e Energia - MME).

O Brasil dispõe de uma matriz elétrica atual de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que respondia por 61,54% da oferta interna em 2016 e, em 2017, passou para 60,87% com um decréscimo de, aproximadamente, 1,10% que foi compensada com o crescimento das outras fontes de geração de energia elétrica por sistemas sustentáveis; a eólica que respondia por 4,54% da oferta em 2016, passou para 7,49% em 2017 com um acréscimo de aproximadamente 65%; biomassa de 8,95% em 2016 para 8,74% em 2017 com um decréscimo de 2,40 %, o fotovoltaico de 0,01% em 2016 para 0,61% em 2017 com um acréscimo de 6100%, e ainda foi interligada ao sistema a primeira usina de ondas com 50 kW de potência do Brasil e da América Latina da Tractebel Energia no estado do Ceará (COPPE-UFRJ) como pode-se observar na Figura 11. As fontes renováveis representavam 80,59% em 2016 e, em 2017, passaram para 82,55% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que resulta da soma dos montantes da produção nacional mais as importações que foram de 5,55% em 2016 e de 4,91%

em 2017 com um decréscimo de 13%, as quais são basicamente de origem renovável. Merece destaque a expansão da potência eólica e dos sistemas fotovoltaicos com acréscimo na oferta das fontes de geração de energia elétrica por renováveis de 1,96 % no total de oferta de energia elétrica.

Figura 11 – Comparativo entre as matrizes elétricas brasileiras de Dez./2016 e Dez./2017

Fonte: Adaptado pelo autor do BEN, EPE, ANEEL e Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Matriz de 2016 e Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL, Matriz 2017.

A figura 12 apresenta o custo de capital para cada tipo de fonte em função da potência (BEM, 2015). Pode-se observar, que quanto menor a potência, menor o investimento total. Além disso, nota-se que a energia com o maior investimento é a fotovoltaica e a mais barata é a energia eólica (RANGEL; BORGES; SANTOS; 2016).

Figura 12 – Investimento total por fonte de energia em função da potência

Fonte: RANGEL, M. S.; BORGES, P. B.; SANTOS, I. F. S. Análise comparativa de custos e tarifas de energias renováveis no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Palotina, v. 5, n. 3, 2016, p. 274.

Com relação ao custo unitário para cada tipo de fonte em função da tarifa de energia, pode-se observar na Figura 14 que, de modo geral, há uma tendência de que, quanto maior o custo unitário (R\$/kW) maior é a tarifa de energia (R\$). Isso é devido ao fato de que quanto maior o investimento (R\$/kW), mais cara precisa ser a tarifa de venda (R\$) de energia elétrica (RANGEL; BORGES; SANTOS, 2016).

Figura 13 – Média do Custo Unitário R\$/kW em função da tarifa de energia para cada tipo de fonte.

Fonte: Adaptado pelo autor de RANGEL, M. S.; BORGES, P. B.; SANTOS, I. F. S. Análise comparativa de custos e tarifas de energias renováveis no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Palotina, v. 5, n. 3, 2016, p. 276.

Vale ressaltar que, apesar de a energia eólica apresentar um menor custo unitário e, conseqüentemente, um menor custo total, sua tarifa é maior do que

hidrelétrica PCH. Isso deve-se ao fato de que o Brasil ainda é altamente dependente da energia hidráulica (RANGEL; BORGES; SANTOS, 2016).

Rangel, Borges e Santos (2016), concluem que é necessário que o país invista mais em outros tipos de energias renováveis, que apresentem um alto potencial de geração como é o caso da energia solar em seus dois tipos de captação fotovoltaica e térmica, mas que ainda não têm um preço competitivo em relação a energia hidráulica e eólica, por exemplo, devido ao baixo investimento do governo.

2.2.1 Comparativo de custo de gerador de energia elétrica por sistema fotovoltaico dez./2014 e nov./2017

As empresas GERASSOL – Energia Solar Termo Hidro Elétrica e P&G Energy do Brasil Ltda apresentaram um orçamento de uma usina de geração de energia elétrica por captação solar fotovoltaica com potência de 1,5 MW (megawatt) à Universidade de São Paulo – Campus Fernando Costa. Conforme proposta comercial no Anexo D, considerando valores monetários de novembro de 2017, o custo de uma usina fotovoltaica para gerar a potência de 1,5 MW é de R\$ 6.300.000,00 (seis milhões e trezentos mil reais) com retorno do investimento em três anos e meio.

Através deste orçamento, comparou-se com o gráfico acima de autoria de Rangel, Borges e Santos (2016) (Figura – 12) e concluiu-se que os valores se aproximam do custo publicado no artigo (SHAKLEMAN; MARTIN, 2017), (Figura 14).

Figura 14 – Investimento (Milhões R\$) X Potência (kW) Dez./2014 e Nov./2017

Fonte: Própria autoria

2.3 Energia solar

O sol emite energia na forma de energia eletromagnética e é referida como *radiação solar*. O termo *irradiação solar* é utilizado para quantificar a radiação eletromagnética por uma unidade de área na superfície terrestre durante um período. A radiação solar que consegue atravessar a atmosfera da Terra atingindo sua superfície é de cerca de 1.367 W/m^2 . Como este valor é determinado por diversos fatores, como posição geográfica, estações do ano, condições climáticas e outros, admite-se o valor de 1 kW/m^2 como uma média (GUNEY, 2016; KANNAN; VAKEESAN, 2016; PRINSLOO; DOBSON, 2015).

2.3.1 Sistemas de energia solar

Basicamente, há dois tipos de sistema de coleta de energia solar, fotovoltaica (ESF) e térmica (concentrada ESC). No sistema de colheita por painéis fotovoltaicos e a energia solar é diretamente convertida para energia elétrica, na Figura 15. Por este motivo, a energia solar é uma fonte de energia limpa, inesgotável e primordial para a sobrevivência dos seres vivos no planeta terra. Nos sistemas de concentração da radiação, é obtida a energia térmica que depois pode ser

transformada em energia elétrica ou mecânica. Uma revisão sobre o assunto pode ser encontrada no trabalho de Guney (2016).

Figura 15 – Métodos de utilização da energia solar

Fonte: Adaptado pelo autor de Guney (2016)

2.3.1.1 Energia solar fotovoltaica (ESF)

Em 1954, três pesquisadores dos laboratórios Bell (EUA) desenvolveram a primeira bateria solar, uma célula fotovoltaica que convertia 6% da radiação solar em eletricidade. Desde então, avanços nas pesquisas com ESF permitiram o desenvolvimento de painéis fotovoltaicos (PV) com eficiência atual de 43,5% (STOFFEL, 2013). Inicialmente, o sistema teve grande valor para aplicações espaciais, com capacidade de produção medida em watts. A indústria global de energia fotovoltaica agora fornece uma capacidade instalada de mais de 40% e cresce cerca de 25% ao ano (RENOVÁVEIS, 2012).

O sistema de energia solar fotovoltaica converte a luz do sol diretamente em eletricidade através do efeito fotoelétrico em nível atômico. O material utilizado absorve fótons da luz solar liberando elétrons que podem ser capturados e usados como eletricidade. Os painéis são constituídos de filmes de silício, mono ou multicristalinos, como telureto de cádmio (CdTe) e disseleneto de cobre-indio-gálio (CGIS), sendo que os painéis com material multicristalino possuem maiores níveis de conversão energética (KANNAN; VAKEESAN, 2016; STOFFEL, 2013). O sistema

fotovoltaico pode ser isolado (também chamado de Off-Grid) ou ligado à rede elétrica (também chamado de On-Grid).

Segundo Falcão (2005) as fotocélulas de pequeno porte, utilizadas em iluminação pública, são constituídas de sulfeto de cádmio (CdS) / telureto de cádmio (CdTe) formando uma estrutura chamada de heterojunção (junção p-n de semicondutores diferentes). A Figura 16 apresenta um esquema de composição de uma célula fotovoltaica de pequeno porte.

Figura 16 – Esquema de uma célula solar de CdS/CdTe

Fonte: (SEMICONDUCTORS AND ELECTROCERAMICS, UNIVERSITY OF DURHAM, 2003 apud FALCÃO, 2005).

Para uma máxima conversão em eletricidade, é ideal que os painéis estejam sempre direcionados ao sol. Entretanto, mesmo em condições de céu nublado, o sistema ainda continua a produzir energia com a presença de radiação difusa (ondas curtas), em maior ou menor grau, dependendo do índice de luminosidade do dia (ENSLIN, 1992; PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

As atuais pesquisas em painéis fotovoltaicos se concentram na melhoria da eficiência das células fotovoltaicas ao mesmo tempo em que menos atenção é dedicada à sua vida útil. Painéis compostos por cerâmica (CALVET et al., 2015), perovskita (titanato de cálcio) (HAN et al., 2017; SHI et al., 2017), material orgânico (GAO et al., 2016; HONG et al., 2015; KA; HWANG; KIM, 2017) e diferentes técnicas de manufatura (KIM et al., 2017; LI et al., 2012; XU; WANG, 2011) têm sido desenvolvidos com o objetivo de melhorar a eficiência energética.

O sistema fotovoltaico converte em eletricidade as regiões ultravioleta e luz visível do espectro solar. Como também há o espectro infravermelho, o calor produzido não é convertido em eletricidade pelo painel fotovoltaico e, a cada aumento de 1° C, é causada uma redução da eficiência de 0,5%. Para solucionar tal questão, pesquisas têm avaliado a eficiência de sistemas refrigeradores e/ou sistemas híbridos de energia – fotovoltaica/resfriado (HUEN; DAOUD, 2017; SIECKER; KUSAKANA; NUMBI, 2017).

Um dispositivo de resfriamento não só aumenta a eficiência de conversão de energia, mas também minimiza o aumento da temperatura e o aquecimento da célula. Em consequência, o período de vida da célula solar pode ser prolongado ao ser combinado com um dispositivo resfriador (ALZAABI et al., 2014; HUEN; DAOUD, 2017; LI et al., 2012; SIECKER; KUSAKANA; NUMBI, 2017; XU; WANG, 2011).

Utilizando um sistema híbrido, onde água foi utilizada para resfriar um painel fotovoltaico, Alzaabi et al. (2014) obtiveram aumento de 20% na produção energética e redução de 20% na temperatura (Figura 17). A Figura 18 apresenta um gráfico das melhores tecnologias de painéis fotovoltaicos em relação à eficiência segundo o Laboratório Nacional de Energias Renováveis NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) do Departamento de Energia dos Estados Unidos DOE (*United States Department of Energy*).

Figura 17 – Sistema fotovoltaico híbrido

Fonte: Adaptado de: ALZAABI, A. A.; BADAWIYEH, N. K.; HANTOUSH, H. O.; HAMID, A. K. Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Sharjah, UAE. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, Rowland Heights, p. 286, 2014.

Figura 18 – Gráfico das melhores tecnologias de painéis fotovoltaicos segundo NREL do DOE dos EUA

Fonte: NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Best Research-Cell Efficiencies.** UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>>. Acesso em: 10 maio 2017.

2.3.1.2 Energia solar concentrada (ESC)

A tecnologia de concentração da energia solar utiliza uma combinação de espelhos ou lentes para convergir os raios solares em um ponto de foco de modo a produzir energia térmica. *Arquimedes* descreveu a ideia de painéis espelhados para concentrar a energia do sol em torno de 200 a.C.. Na mesma época, o matemático grego *Diocles* descreveu as propriedades ópticas de uma calha parabólica. O desenvolvimento de projetos com o uso de heliostatos foi concebido por *Comte de Buffon* em 1746. *Augustin Mouchot* demonstrou um sistema de motor a vapor a partir de um concentrador parabólico em 1878 na França. Um marco histórico contemporâneo foi o sistema desenvolvido por Frank Schuman no Egito, em 1913, para fins de bombeamento de água (LOVEGROVE; CSIRO, 2012).

O primeiro sistema ESC em grande escala foi desenvolvido na Califórnia (EUA), na década de 1980, onde nove calhas parabólicas com turbinas a vapor foram instaladas com capacidade de produção de 354 MW (LOVEGROVE; CSIRO, 2012). A Figura 19 apresenta um diagrama de funcionamento de um sistema concentrador da energia solar.

Figura 19 – Diagrama esquemático representativo dos componentes relativos ao sistema de potência de uma planta solar térmica

Fonte: Adaptado de: LOVEGROVE, K.; PYE, J. Fundamental principles of concentrating solar power (CSP) systems. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. (Ed.). **Concentrating Solar Power Technology**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 17.

De acordo com Lodi (2011), Pereira et al. (2006) e Souza (2005) tem-se no Brasil, um imenso potencial de ESC a ser explorado nas regiões Nordeste e Centro Oeste. Na região Nordeste, especificamente, o potencial de irradiação solar média anual varia de 5 a 6 kWh/m² numa área de 1.500.000 km², tornando-o ainda mais atrativo.

Exemplos de sistemas de energia solar concentrada atualmente disponíveis tais como calhas parabólicas, torre central de recepção, refletor linear de Fresnel, lentes de Fresnel e disco parabólico são apresentados nas Figuras 20 a 24 respectivamente.

Figura 20 – Coletor tipo calha parabólica – rastreamento solar em um eixo

Fonte: LOVEGROVE, K.; CSIRO, W. S. Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. (Ed.). **Concentrating solar power technology**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 7.

Figura 21 – Torre central de recepção. Diversos espelhos direcionam o foco dos raios solares ao ponto de coleta

Fonte: LOVEGROVE, K.; CSIRO, W. S. Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. (Ed.). **Concentrating solar power technology**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 8.

Figura 22 – Refletor linear de Fresnel - Espelhos múltiplos se movem em um eixo para focar o sol em um receptor linear fixo

Fonte: LOVEGROVE, K.; CSIRO, W. S. Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. (Ed.). **Concentrating solar power technology**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 9.

Figura 23 – Sistema de lentes Fresnel – múltiplas lentes concentram os raios solares em um ponto atrás do painel

Fonte: LOVEGROVE, K.; CSIRO, W. S. Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. (Ed.). **Concentrating solar power technology**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 10.

Figura 24 – Concentrador tipo disco parabólico

Fonte: LOVEGROVE, K.; CSIRO, W. S. Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. (Ed.). **Concentrating solar power technology**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p. 11.

2.4 Sistemas de rastreamento solar

Um rastreador solar é um dispositivo utilizado para aumentar a eficiência energética de Geradores Elétricos a partir da captação fotovoltaica (ESF) e tem como base um sistema de controle e motores para orientar refletores, lentes, painéis fotovoltaicos ou outras configurações óticas para o sol. Diversas tecnologias estão disponíveis, variando no nível de complexidade e efetividade do sistema (PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

Um dos primeiros dispositivos de rastreamento solar com propósito de melhorar a eficiência da coleta (ESF), foi apresentado em 1975 com um algoritmo desenvolvido para computar a energia total aproveitada e determinar a posição solar com uma margem de erro no sistema mecânico de 0,5 a 1° (PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

Um sistema de rastreamento solar é essencial para o desenvolvimento de usinas de geração de energia elétrica baseadas em captações solares (ESF) principalmente no hemisfério norte onde o sol permanece mais tempo nos horizontes de *nascimento e poente* e (ESC), especialmente nos sistemas ESC, onde um rastreamento de alta precisão é necessário para manter o maior nível de potência na produção energética (PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

Atualmente existem várias universidades e empresas, no Brasil e no mundo, que trabalham com pesquisa e desenvolvimento (P&D) de rastreamento solar, dentre as quais destaca-se USP, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), Instituto Federal do Paraná (IFPR), sendo que, foi objeto de estudo na UFPB um heliostato para torres solares inclusive com rastreamento em dois eixos com sistema de controle em malha aberta (Open-loop), (SILVESTRE, 2016).

Quanto a empresas podemos citar Prinsloo e Dobson consultoria na África do Sul, Siemens na Alemanha, P&G Energy na Itália, OMEXON na França, SMART FLOWER na Austrália, OMEXON no Brasil, WEG, KALATEC, P&G do Brasil, Siemens do Brasil, além da Globo Brasil que fabrica painéis fotovoltaicos em Valinhos – SP no Brasil.

2.4.1 Classificação dos sistemas de rastreamento solar

Os sistemas rastreadores, em relação à movimentação, podem ser de um ou dois eixos. Também incluem, normalmente, os seguintes elementos e componentes:

- Sistema de acionamento mecânico – atuadores lineares, engrenagens helicoidais, acionamentos lineares, de giro e/ou planetários;
- Motores elétricos – motores de corrente contínua ou alternada conectados em controladores de ângulo e velocidade;
- Sistema de armazenamento – baterias para armazenamento da carga obtida;
- Sensores de movimento – sensores de eixo linear ou rotativo, sensores de inclinação, fotodiodos, resistências fotossensíveis, etc;
- Algoritmo de posicionamento solar – algoritmo que calcula o vetor solar com dados de azimuth e altitude ou controle baseado em sensores óticos;
- Unidade de controle – placa micro controladora eletrônica (Arduino) que executa as funções de comunicação entre o algoritmo e atuadores;
- Limitadores - dispositivos para definir limites para a movimentação mecânica com a finalidade de prevenir danos no equipamento ou cabos;

- Sensores ambientais ou atmosféricos: sensor de intensidade luminosa, termômetro, piranômetro, anemômetro/sensor de vento, sensor de temperatura ambiente, sensor de umidade e sensores de pressão atmosférica para detectar riscos ambientais ou de emergência;
- Dispositivo de coleta – painel fotovoltaico, espelhos ou calhas concentradoras.

Lee et al. (2009) classificaram os sistemas rastreadores quanto ao controle em sistemas de malha fechada (*closed-loop*), sistemas de malha aberta (*open-loop*) e sistemas de malha híbrida (*hybrid-loop*).

Os sistemas de controle de malha fechada (Closed-loop) são baseados na leitura de sensores óticos. Após a leitura dos sensores óticos, a placa micro controladora Arduino envia os comandos (I2) para os circuitos drivers que acionam os motores responsáveis pelo posicionamento do painel solar. Os sensores utilizados podem ser fotodiodos, foto-transistores, fotoresistores (LDR), fotocélulas de pequeno porte CdS/CdTe, sensor de pixel CMOS, câmeras de vídeo por processamento digital de imagens, entre outros (PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

Os sistemas de controle de malha aberta (Open-loop) se utilizam de algoritmos alimentados com a *equação do tempo* do país em que se encontra ou irá ser construída a usina de geração elétrica com sistema (ESF) ou (ESC) e com as *coordenadas geográficas locais* e baseiam-se em estudos astronômicos para o acompanhamento da trajetória do sol. Apesar dos sistemas de controle de malha aberta não utilizarem sensores óticos para a detecção da posição do sol, muitas vezes possuem sensores como acelerômetros, magnetômetros e giroscópios para orientar os painéis solares (PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

Considerando a utilização de sensores óticos, a Figura 25 apresenta um esquema de funcionamento de rastreador de malha fechada (*closed-loop*) baseado em sensores óticos.

Figura 25 – Sistema rastreador solar baseado em sensores óticos (close-loop)

Fonte: Própria autoria.

A Figura 26 apresenta o funcionamento de um sistema de malha aberta (Open-loop) baseado em algoritmo de posicionamento solar.

Figura 26 – Sistema rastreador de malha aberta baseado em algoritmo de posicionamento solar (Open-loop)

Fonte: Própria autoria.

Há uma grande quantidade de algoritmos de código aberto disponíveis na internet para uso em sistemas rastreadores de malha aberta (Open-loop). A Tabela 1 apresenta uma lista de alguns algoritmos e suas características.

Tabela 1 – Algoritmos para rastreadores de controle de circuito aberto

Continua...

Algoritmo			Licença	Características	Fonte
NREL's Solar Position Algorithm (SPA)			Código aberto	Vetor solar: latitude, longitude, declinação, azimuth, altitude, zênite, data e hora.	https://midcdmz.nrel.gov/spa/
SunCalc			Código aberto	Vetor solar: azimuth, altitude. Projeto SunCalc.net.	https://github.com/mourner/suncalc
Matlab SPA			Código aberto	Vetor solar, processamento digital de imagem	(FANG, 2014)
Helios Analytics®			Proprietária	Hardware proprietário	http://www.solar-motors.com/gb/monitoring-programs-d489.shtml
NREL's SOLPOS 2.0			Código aberto	Posição e intensidade	http://rredc.nrel.gov/solar/codesandalgorithms/solpos/
Sun Position in C#			Código aberto	Azimuth e altitude	http://guideving.blogspot.com.br/2010/08/sun-position-in-c.html

Tabela 1 – Algoritmos para rastreadores de controle de circuito aberto

conclusão

Algoritmo	Licença	Características	Fonte
Python SPA	Código aberto	Diversas ferramentas de análise.	https://github.com/sunpy/sunpy http://sunpy.org/
Fortran Michalsky	Código aberto	(MICHALSKY, 1988)	https://github.com/jpjustiniano/Subroutines
NASA HORIZONS Web-Interface	Limitado	On-line	https://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi
Siemens SPA Solar Position®	Proprietária	Conecta à plataforma Siemens Simatic S7-1214C PLC TIA	http://www.bytex.it/Article/eng/Complete-Solar-Tracking-example-code-with-Siemens-S7-1200-Tia-Portal.html
Beckhoff TwinCAT Solar Position®	Proprietária	Diversas ferramentas de análise	http://www.beckhoff.co.za/english.asp?twincat/twincat_solar_position_algorithm.htm

Fonte: Própria autoria.

2.4.2 Pesquisas sobre rastreadores solares

Apesar de haver pesquisas sobre o ângulo ótimo de inclinação dos painéis solares para maximizar a produção (CHANG, 2009a; GUNERHAN; HEPBASLI, 2007; TANG; WU, 2004), os sistemas rastreadores de malha aberta (*open-loop*) e de malha fechada (*closed-loop*) possibilitam maior eficiência na produção energética comparados a painéis em ângulo fixo.

Grena (2008) propôs um algoritmo com acurácia de $0,0027^\circ$. Reda e Andreas (2004) apresentaram um passo-a-passo de implementação e um algoritmo capaz de calcular os ângulos de azimute e altitude entre os anos 2.000 a.C a 6.000 d.C com precisão de $\pm 0,0003^\circ$. Garrido e Díaz (2016) apresentaram um sistema rastreador baseado em sensores óticos e controle de malha fechada (Closed-loop) com erro angular máximo de $0,014^\circ$. Em um estudo comparativo entre dois sistemas de rastreamento, um baseado em sensores malha fechada (Closed-loop) e outro em algoritmo de coordenadas malha aberta (Open-loop), foi observado que, apesar de mais dispendioso, o sistema de sensores óticos, malha fechada (Closed-loop) obteve melhor eficiência energética porque, mesmo em condições de céu nublado, direciona os painéis para a região de maior luminosidade no céu e, conseqüentemente, maior irradiação solar difusa (FATHABADI, 2016). Entretanto, outro estudo demonstrou que ambas as estratégias são viáveis para o rastreamento solar e deve-se considerar o custo-benefício de cada sistema (YAO et al., 2014).

Chang (2009a) observou aumento de 17,5% na produção energética utilizando um sistema de rastreamento baseado em um eixo comparado a um painel em ângulo fixo. Abdallah e Nijmeh (2004) obtiveram um aumento de 41,34% na colheita de energia utilizando um sistema rastreador de duplo eixo comparado a um painel em ângulo fixo. Yao et al. (2014) relataram eficiência 23,6% maior de um painel com sistema rastreador de duplo eixo comparado a um painel em ângulo fixo. Sidek et al. (2017) obtiveram 26,9% a mais eficiência energética com um sistema rastreador de duplo eixo malha aberta (Open-loop) baseado em coordenadas geográficas e equação do tempo comparado a um painel em ângulo fixo. Zlatanov e Weinrebe (2013) apresentaram uma ferramenta para o planejamento de um sistema rastreador com base em otimização linear com o objetivo de diminuir o peso do equipamento.

Apresenta-se assim os benefícios e a importância dos sistemas rastreadores que têm sido alvo de diversos estudos nos sistemas de energia solar concentrada, fotovoltaicos e híbridos (AWAY; IKHSAN, 2017; BARKER; NEBER; LEE, 2013; CHIN; BABU; MCBRIDE, 2011; HUANG; DING; HUANG, 2011; SALLABERRY et al., 2015; SKOURI et al., 2016; WANG; LU, 2013).

2.4.3 Eficiência do rastreador solar

Avaliar a precisão dos sistemas de rastreamento solar em tempo real no campo pode ser um desafio, mas é importante para obter informações sobre todas as variáveis que podem influenciar o desempenho do sistema. É melhor analisar os dados detalhados de todos os equipamentos envolvidos, pois isso pode fornecer informações valiosas sobre o desempenho e a eficiência do sistema de rastreamento solar dentro do contexto do ambiente operacional. Assim, a precisão do rastreamento solar envolve avaliar a correlação entre geração de energia e gasto energético com o mecanismo do rastreador, distúrbios climáticos, potencial energético e viabilidade econômica do sistema de colheita da energia solar (PRINSLOO; DOBSON, 2015a).

É ideal que se utilize um sistema de gravação de dados (*data logger*) que possa obter dados de vários sensores como: sensor UV (ultra-violeta), Heliômetro (radiação infravermelha), giroscópios (para mensurar a movimentação do painel), câmeras, anemômetro (velocidade do vento), sensor de temperatura, sensor pluviométrico e outros. Também podem ser utilizados os dados de estações meteorológicas para a análise. A utilização de uma maior quantidade de dados possibilita a modelagem de sistemas de geração de energia solar prevendo problemas e custos (DAVIS; WILLIAMS, 2008).

Outro método utilizado para a avaliação do rastreador é calcular o erro angular. Alguns estudos descontam a posição do sol nos horizontes ($>10^\circ$) pois isso penalizaria a avaliação geral do sistema visto que, apesar de ainda haver luz, a produção energética depende da qualidade da atmosfera no momento da medição. Outra medida alternativa é utilizar a regra de 95% de exatidão. Esta regra simplesmente relata a melhor precisão de apontar para o rastreador em mais de 95% das horas do dia. Esta é outra maneira de remover outliers de um conjunto de

dados de erro de rastreamento, mas tem a vantagem de ser bastante simples de calcular e explicar. A medida é algo arbitrária e também não necessariamente melhor acoplada a produção de energia (DAVIS; WILLIAMS, 2008; PRINSLOO; DOBSON, 2015b).

A escolha de um método de avaliação de um sistema rastreador depende do tamanho do sistema instalado ou planejado. Para análise de sistemas operando em centrais de colheita de larga escala, podem ser utilizados sistemas de calibração dos dispositivos óticos e softwares que computam dados de vários sensores instalados, dados meteorológicos e dados aeroespaciais (COIMBRA; KLEISSL; MARQUEZ, 2013; PRINSLOO; DOBSON, 2015b).

2.5 A revolução diy - do it yourself (“faça você mesmo”)

Longe do mundo acadêmico e das indústrias produtoras de tecnologia, um termo passou a provocar o interesse dos consumidores, o DIY – *Do-It-Yourself* (*Faça você mesmo*). Este conceito é considerado como uma revolução tecnológica importante no desenvolvimento de novas ideias e produtos.

Nesta revolução, o consumidor passou a ser chamado de “*prossumidor*” – produtor + consumidor (*prosumer*), neologismo criado por Alvin Toffler nos anos 80 para descrever o novo comportamento dos consumidores na sociedade moderna. O consumidor passou a ter acesso à ferramentas que tornaram a produção e distribuição de conteúdo mais acessível. Assim, qualquer indivíduo na sociedade em rede pode assumir os papéis de emissor e receptor de produtos e ideias, o que lhe confere então a simultaneidade entre produção e consumo (ANDERSON, 2012; TOFFLER, 1984).

Há três ondas de desenvolvimento no DIY: de subsistência, industrial e nova DIY. A primeira onda do DIY refere-se ao período em que as pessoas realizam construções básicas para o próprio uso e resolução de problemas básicos, como a construção da própria casa. A segunda onda de desenvolvimento DIY foi a disponibilização de kits comerciais vendidos com manuais de instrução padronizados para a montagem de equipamentos, brinquedos, mobília e outros. A terceira onda de desenvolvimento DIY baseia-se na confluência com a *IoT - Internet of Things* (*Internet das Coisas*) e ferramentas de design/manufatura – como impressoras 3D, RFSS – Rádio Frequency Simulation System – Sistema de

Simulação de Radiofrequência – Traduzido, plataformas de prototipagem eletrônica (Arduino, Raspberry pi, etc) – que permitiram às pessoas “*não técnicas*” criarem produtos e/ou ideias, e então comercializá-los (CASE, 2017; ROGNOLI et al., 2015; TOFFLER, 1984).

Rognoli et al. (2015) apresentaram 27 exemplos de novos materiais desenvolvidos na área de DIY destacando sua importância no desenvolvimento de materiais emergentes. Fox (2014) demonstrou a importância da DIY em várias áreas e concluiu que oferece democratização das tecnologias de manufatura e oportunidades para experimentar processos de produção avançados, apesar de ainda popular apenas em países desenvolvidos, contribuindo para inovação e empreendedorismo. Jeacle (2016) fez uma avaliação matemática da popularização da DIY descrevendo que a importância dessa revolução tecnológica já faz parte da cultura de muitos países, sobretudo do Reino Unido.

Ainda pode-se salientar o perfil educacional que tal tecnologia tem apresentado pois em diversos sites como: OpenMaterials, Instructables, Make Magazine, Laboratório de Garagem e outros; estão disponíveis projetos, materiais de estudo e links para aulas em diversas áreas de tecnologia. Plataformas de prototipagem como *Arduino*, *Beagleboard* e *Raspberry Pi* oferecem a possibilidade de automação e design de produtos de baixo custo. Sites como *Adafruit*, *DIY Drones*, *Sparkfun* e muitos outros oferecem suporte online e venda de componentes para o desenvolvimento DIY. Uma simples pesquisa sobre produtos DIY no Google retorna mais de 81 milhões de resultados nas mais diversas áreas.

Plataformas de prototipagem, como Arduino e Raspberry Pi, têm sido utilizadas para pesquisa em diversas áreas com baixo custo de implementação da prototipagem durante o desenvolvimento (AKINDELE; GOTTARDI, 2017; ALI et al., 2016; BARBON et al., 2016; CASE et al., 2015; FATEHNIA et al., 2016; LAHFAOUI et al., 2017; ROSA; BETIM; FERREIRA, 2017).

Pode-se ainda salientar o caráter de sustentabilidade que o DIY oferece visto que contribui para o desenvolvimento de soluções relativamente simples. Isso pode ser confirmado pela grande quantidade de estudos publicados que utilizam componentes do DIY para criar soluções com perfil sustentável, como sistemas de automação de baixo custo para práticas sustentáveis em países com baixo desenvolvimento (MATHEW; JOHN, 2016), equipamento de baixo custo para estimulação e análise de cultivo de células (TOUME; GEFEN; WEIHS, 2016),

desenvolvimento de sensores sensíveis ao toque (KANAPARTHI; BADHULIKA, 2017), um sistema de baixo custo para monitoramento do tráfego e qualidade do ar das cidades (ZALDEI et al., 2017), sistema para monitoramento da eficiência energética em edifícios públicos (POCERO et al., 2017); equipamentos laboratoriais (CHIU; URBAN, 2014). Enfim, estudantes, professores universitários, artistas, cientistas e consumidores comuns podem transformar ideias em projetos finalizados de forma mais acessível.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Aferir a eficiência energética de um sistema de energia fotovoltaica com rastreador solar baseado em sensores LDR comparado à um painel em ângulo fixo.

3.2 Objetivos específicos

- Elaborar um sistema de movimentação tendo como base o modelo DIY descrito em <http://www.instructables.com/id/Simple-Dual-Axis-Solar-Tracker/>;
- Medir a corrente elétrica produzida por um painel fotovoltaico de 5W em ângulo fixo durante 3 dias com condições atmosféricas diferentes (divididos os tempos por períodos matutino e vespertino);
- Medir a corrente elétrica produzida por um painel fotovoltaico de 5W com rastreador solar durante 3 dias com condições atmosféricas diferentes (divididos os tempos por períodos matutino e vespertino) e
- Analisar a viabilidade do sistema rastreador considerando os custos de montagem e instalação comparativamente ao sistema em ângulo fixo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este projeto faz parte do estudo e desenvolvimento de sistemas de geração de energia solar concentrada da empresa Gerassol Energia Solar Termo-hidro-elétrica, incubada no Centro de Inovação, Empreendedorismo e Extensão Universitária / Incubadora do Agronegócio de Pirassununga (UNICETEX/UNITEC). O experimento foi realizado no Laboratório de Física Aplicada e Computacional – (LAFAC), localizado no Campus Fernando Costa da Universidade de São Paulo/Pirassununga/Brasil entre os dias 24 e 27 de outubro de 2017, durante o horário de verão.

Com base na metodologia DIY, foi avaliado o desempenho energético de um rastreador para painéis fotovoltaicos baseado em sensores óticos e controle de malha fechada (closed-loop) utilizando placa micro controladora Arduino.

Foram utilizados dois painéis fotovoltaicos modelo SSB5W-12 (Starsolar® - China) com as seguintes características:

- Potência máxima: 5 W;
- Tensão nominal: 12 V;
- Tensão sem carga: 18 V;
- Corrente nominal: 0,28 A e
- Dimensão: 220 X 250 X 18 mm.

Abaixo fotos dos equipamentos no local onde foram feitas as coletas dos dados:

Figura 27 – Fotos dos painéis de 5W com rastreador e fixo

Fonte: Própria autoria

Um dos painéis foi montado em um sistema mecânico de movimentação por 2 eixos: azimute e altitude (Figura 28). Os componentes mecânicos do sistema

foram desenvolvidos no Laboratório de Física Aplicada e Computacional – LAFAC (USP/FZEA). Foi utilizado um tubo PVC de 40 mm de diâmetro externo como suporte para o mecanismo de rotação. Os componentes do mecanismo de rotação e o suporte para os fotoresistores foram impressos em material ABS utilizando uma impressora 3D do LAFAC (Anexos F a O).

Figura 28 – Painel fotovoltaico com sistema de 2 eixos

Fonte: Própria autoria.

Neste sistema rastreador foram utilizados 4 fotoresistores, também conhecidos pela sigla em inglês LDR (Resistor dependente de luz - traduzido). A resistência de um fotoresistor (LDR) diminui com o aumento da luminosidade incidente sobre sua superfície fotossensível. Os 4 fotoresistores (LDR's) foram montados em um suporte (Figura 29) desenhado de forma que a luminosidade nos quatro sensores (LDR's) tenha a mesma intensidade apenas quando estiverem alinhados perpendicularmente aos raios solares semelhante ao modelo utilizado por Wang e Lu (2013).

Figura 29 - Suporte dos LDR's

Fonte: Própria autoria.

Para a elaboração do sistema de movimentação foi utilizado como base o modelo DIY descrito no site da Instructables. Os sensores LDR's foram configurados em um circuito divisor de tensão (Figura 30), em série com um resistor de 10 K Ω (quilo-ohms) e a junção foi conectada nas portas analógicas (A₀ a A₃) de um Arduino Uno® que, através de um algoritmo (Anexo A), aciona dois servomotores (MG 995 TowerPro® - Tailândia) de forma a manter o painel solar em posição perpendicular aos raios solares. Quanto menos luz incidir sobre os LDR's, maior serão suas resistências e, por conseguinte os valores das tensões em A₀, A₁, A₂ e A₃ serão menores e quanto mais luz incidir sobre os LDR's, menores serão suas resistências e, por conseguinte, os valores das tensões em A₀, A₁, A₂ e A₃ serão maiores.

Figura 30 - Divisor de tensão com o LDR

Fonte: Própria autoria.

A leitura da entrada analógica é feita com a função *analogRead*, que recebe como parâmetro o pino analógico a ser lido e retorna o valor digital que representa a tensão no pino. Como o conversor analógico-digital do Arduino possui uma resolução de 10 bits, o intervalo de tensão de referência de 5 V, é dividido em 1024 unidades (2^{10}) e o valor retornado pela função (entre 0 e 1023) é o valor discreto mais próximo da tensão no pino. Dessa forma, as tensões em A_0 , A_1 , A_2 e A_3 podem ser calculadas pela fórmula:

$$V_{out} = \frac{R_2 * V_{in}}{R_1 + R_2} \quad \text{eq (2)}$$

Na equação acima, V_{out} é a tensão na porta analógica do Arduino, R_2 é a resistência dos LDR's, V_{in} é a tensão de referência do Arduino (5 V) e R_1 é o resistor de 10 K Ω (ohms).

O algoritmo calcula as diferenças entre as médias dos valores das tensões lidas nos pinos analógicos A_0 , A_1 , A_2 e A_3 que variam conforme a luminosidade nos LDR's, considerando a posição de instalação (superior, inferior, esquerda e direita). Essas diferenças são convertidas em um valor entre 0 e 1023 e comparadas com o valor de referência determinado previamente no algoritmo pela variável *tol* (*tolerância*) que neste caso é igual a 50, sendo definido um valor positivo e um negativo para a comparação (Figura 31).

Figura 31 – Representação do comparador de tensão para movimentação dos servos motores

Fonte: Própria autoria.

Exemplo: para o valor de $tol = 50$, os valores de comparativos de tensões são aproximadamente $V = V_{in}/1023 * tol = 5/1023 * 50 = -0,25$ e $0,25$ V

As Figuras 32 e 33 apresentam os fluxogramas de controle para a movimentação de azimuth e altitude.

Figura 32 - Fluxograma da lógica de movimentação azimuthal

Fonte: Própria autoria. avl = média dos LDR's esquerdos; avr = média dos LDR's direitos; tol = valor de tolerância.

Figura 33 – Fluxograma da lógica de movimentação de altitude

Fonte: Própria autoria. avt = média dos LDR's superiores; avd = média dos LDR's inferiores; tol = valor de tolerância.

O outro painel foi instalado em um ângulo de inclinação fixo de 22° que corresponde a latitude local, em relação ao plano horizontal e com a face coletora

voltada para o polo norte magnético. Cada painel foi conectado a um controlador de carga MS-SCC-EPIP-C20 (Mi-SOL® - China) e a uma bateria com tensão de 12 V / 7 Ah (Unicoba® - Brasil). O controlador de carga regula a corrente e a tensão proveniente do painel solar de forma a não sobrecarregar a bateria. Adicionalmente, o controlador de carga direciona a corrente necessária para alimentar o sistema rastreador com o suporte da bateria.

Para o monitoramento da corrente produzida pelos painéis fotovoltaicos e da carga consumida pelo sistema rastreador, foram utilizados dois sistemas Arduino datalogger utilizando sensores de corrente INA219 (Texas Instruments – EUA). As duas placas Arduino datalogger foram alimentadas por uma outra bateria de 12V/7Ah durante todo o período de medição. Os dados de corrente elétrica foram monitorados nos dias 24, 25 e 27 de outubro de 2017 (divididos os tempos por períodos matutino e vespertino). Os dispositivos datalogger possibilitaram a coleta de 9 dados por segundo de cada um dos parâmetros mensurados: corrente elétrica produzida pelo painel com rastreador, corrente elétrica consumida pelo sistema rastreador e corrente elétrica produzida pelo painel fixo.

No painel com sistema rastreador, o Arduino datalogger foi configurado para registrar a corrente elétrica produzida pelo painel solar e a carga consumida pelo sistema rastreador (Arduino e servos motores). O algoritmo utilizado nos sistemas dataloggers (Anexos B e C) foi desenvolvido pelo LAFAC – Laboratório de Física Aplicada e Computacional (USP/FZEA) e foi configurado para gravar os dados de corrente elétrica com informações de data e hora, com a utilização de um relógio de tempo real - RTC (*Real Time Clock* modelo DS3231 Maxim Integrated® - EUA), em um cartão microSD (módulo Catalex® TF v1.0 - China). A Figura 35 apresenta o esquema de ligação dos dispositivos.

Figura 34 – Esquema de montagem dos sensores de corrente no painel com rastreador solar

Fonte: Própria autoria.

A Figura 35 apresenta o esquema de gravação dos dados de corrente elétrica no painel solar com rastreador.

Figura 35 – Gravação dos dados dos sensores de corrente no painel com rastreador solar

Gravação dos dados dos sensores de corrente no painel com rastreador solar
Datalogger Arduino.

Fonte: Própria autoria.

No painel instalado em ângulo fixo, os dados de corrente elétrica produzida foram registrados com a utilização de um sensor de corrente de mesmo modelo do painel com sistema rastreador (Figura 36).

Figura 36 – Esquema de gravação de dados do sensor de corrente no painel fixo.

Fonte: Própria autoria.

Para garantir a qualidade da conexão entre os módulos RTC, microSD, sensores de corrente e LDRs, foram desenvolvidos no LAFAC placas de conexão específicas (Shields) para cada sistema datalogger Arduino e para o sistema rastreador (Anexo F). No Anexo G estão o diagrama elétrico do rastreador de malha fechada com base em sensores LDR's para ser utilizado com tecnologia DIY e PCB do rastreador.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise Estatística

A proposta inicial era utilizar análise de variância para o conjunto de dados, mas como eles não seguem uma distribuição normal descartou-se esta hipótese. Os dados são constantemente afetados pelas alterações atmosféricas, ou seja, se uma nuvem permanece sobre os painéis por 1 minuto, são 360 amostras que se apresentam com outliers e tudo isso interfere nas médias.

Como foram registradas 9 medidas por segundo para cada um dos parâmetros mensurados, primeiramente foi realizado um cálculo das médias por segundo da corrente produzida pelos dois painéis. Os dados foram então submetidos à análise estatística descritiva utilizando a ferramenta de dados do Excel (Microsoft Office® - EUA). Os dados obtidos foram analisados por período, matutino e vespertino, de forma a realizar uma análise comparativa da produção energética do painel fotovoltaico com sistema rastreador em relação ao painel em ângulo fixo através de gráficos de dispersão.

Para análise dos dados de corrente elétrica consumida (carga) pelo sistema rastreador (servo motores e placa de controle), os dados registrados foram divididos em dois momentos, carga consumida com o painel parado e carga consumida com o painel em movimento, visto que a corrente consumida durante a movimentação dos servos motores é muito maior do que a corrente consumida com o painel parado.

5.2 Produção energética

A corrente produzida pelo painel fotovoltaico com sistema rastreador apresentou ganho de produção energética em relação ao painel em ângulo fixo nos horários no início da manhã e final da tarde, em períodos ensolarados, como pode ser observado nas Figuras 37 e 38.

Figura 37 - Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 24/10/2017 no período matutino (entre 08:40 e 13:07 horas)

Fonte: Própria autoria.

Como pode-se observar no gráfico acima, no horário entre as 11:32 e 12:28, a produção energética dos dois painéis com movimento e ângulo fixo são aproximadamente iguais devido a perpendicularidade dos raios solares nos mesmos, ou seja, os dois painéis se encontram em ângulo ótimo para a produção de energia elétrica por captação fotovoltaica.

Figura 38 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 25/10/2017 período vespertino (entre 12:17 e 17:17 horas)

Fonte: Própria autoria.

Através dos gráficos comparativos da corrente produzida (painel rastreador X painel fixo) para os dados coletados no período matutino do dia 24/10/2017 e no período vespertino do dia 25/10/2017, observa-se que o painel com rastreador apresenta uma menor variação na produção energética em relação ao painel em ângulo fixo (alinhando o tempo exatamente dos dois painéis - Tabelas 2 e 3).

Tabela 2 – Médias e desvios-padrão da corrente elétrica em mili-amperes dos painéis fotovoltaicos mensurados no dia 24/10/2017 no período matutino (entre 08:40 e 12:27 horas)

Painel	<i>n = Nº de Coletas</i>	Médias corrente (mA)
Rastreador	13624	321,57 ± 13,12
Fixo	13624	258,25 ± 56,40

Fonte: Própria autoria.

Tabela 3 - Médias e desvios-padrão da corrente elétrica em mili-amperes dos painéis fotovoltaicos mensurados no dia 25/10/2017 no período vespertino (entre 12:17 e 16:23 horas).

Painel	<i>n</i>	Médias corrente (mA)
Rastreador	15380	292,42 ± 45,99
Fixo	15380	282,89 ± 48,43

Fonte: Própria autoria.

Apesar de ter sido observado um ganho não significativo de produção energética do painel rastreador no período vespertino do dia 25/10/2017, comparativamente ao período matutino do dia 24/10/2017, observa-se um comportamento semelhante. Ou seja, quanto mais o sol se aproxima do horizonte, o painel com sistema rastreador consegue manter a produção energética em um nível mais elevado visto seu posicionamento perpendicular aos raios solares. Estes resultados assemelham-se ao comportamento observado por Wang & Lu (2013) que verificaram melhor desempenho do painel com rastreador solar, sobretudo após as 15:00 hs.

Durante as medições nos períodos com constantes alterações atmosféricas (parcialmente nublado e nublado), observou-se grande variação (muito sensível mais ou menos 200 mil medições pôr período) da produção energética, com maior variação para o painel com sistema rastreador como pode ser observado nas Figuras 39, 40, 41 e 42.

Figura 39 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 24/10/2017 período vespertino (entre 13:27 e 16:51 horas)

Fonte: Própria autoria.

Figura 40 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 25/10/2017 período matutino (entre 09:19 e 12:05 horas)

Fonte: Própria autoria.

Figura 41 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 27/10/2017 período vespertino (entre 12:05 e 14:29 horas)

Fonte: Própria autoria.

Figura 42 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 25/10/2017 período matutino (entre 09:19 e 12:05 horas)

Fonte: Própria autoria

Figura 43 – Gráfico comparativo da produção energética entre o painel com sistema rastreador e painel em ângulo fixo no dia 27/10/2017 período matutino (entre 09:06 e 11:53 horas)

Fonte: Própria autoria.

Observou-se que quanto maior a movimentação das nuvens sobre os painéis, maior foi a variação da produção energética. Entretanto, apesar da alta variação, o painel com sistema rastreador teve uma produção energética superior ao painel em ângulo fixo nos dias 25 e 27, no período matutino, respectivamente.

5.3 Consumo energético do sistema rastreador

Para análise do consumo de corrente elétrica do sistema rastreador, os dados registrados foram divididos em dois momentos: painel em movimento e painel estático. Visto que o datalogger registrou 9 medidas por segundo, cada medida da corrente consumida equivale a 111,11 milésimos de segundo aproximadamente. Dessa forma, multiplicando o número de medições por este valor, é possível obter os tempos em que o sistema permaneceu estático e em movimento. A Tabela 4 apresenta as médias de consumo de corrente elétrica e a duração em horas de cada estado do sistema rastreador.

Tabela 4 – Médias de consumo de corrente elétrica e tempo de duração do sistema rastreador

Data	Período	Carga sem movimentação ($\bar{x}$)		Carga em movimento ($\bar{x}$)	
		mA	T (horas)	mA	T (horas)
24/10/2017	Matutino	56.46 $\pm$ 2.26	4.17	357.40 $\pm$ 81.99	0.64
24/10/2017	Vespertino	56.77 $\pm$ 2.47	2.89	368.67 $\pm$ 72.54	0.68
25/10/2017	Matutino	56.76 $\pm$ 2.27	2.50	359.96 $\pm$ 80.48	0.42
25/10/2017	Vespertino	57.31 $\pm$ 2.36	4.35	358.79 $\pm$ 77.97	0.92
27/10/2017	Matutino	56.52 $\pm$ 2.09	2.63	358.30 $\pm$ 80.92	0.35
27/10/2017	Vespertino	56.88 $\pm$ 2.04	2.20	355.95 $\pm$ 82.82	0.33

Fonte: Própria autoria.

A partir dos dados da Tabela 5, pode-se observar que os motores permaneceram em movimento uma média de 14,83% do tempo total de avaliação. Os valores apresentados foram utilizados para estimar consumo em um cenário de cinco horas diárias de produção (1 h em movimento e 4 h parado). Considerando um consumo do sistema rastreador de 360 mA/h em movimento e 57 mA/h parado, obtêm-se um consumo diário total de 588 mA (média de 117,6 mA/h). Neste caso, uma bateria de 7 Ah conseguiria manter o sistema ativo por cerca de 41 horas de uso contínuo.

Neste projeto, o gasto energético do sistema com os servos motores atuando para o deslocamento do painel fotovoltaico de 5 W é de aproximadamente 360 mA, cerca de 631,58% em relação à corrente que os servos motores necessitam para manter o painel em posição fixa que é de aproximadamente 57 mA.

A fim de reduzir o consumo energético fixo demandado pelos servos motores, o projeto pode ser modificado e incluir um conjunto de engrenagens que possibilite manter os motores desenergizados e que o painel tenha liberdade de movimento apenas sob o comando do sistema de controle. Paralelamente, os projetos elétrico, eletrônico e o firmware de controle devem ser modificados a fim de que os motores possam ser desligados com a utilização de um transistor.

5.4 Eficiência energética

Para analisar a eficiência da produção energética do painel fotovoltaico com sistema rastreador em relação ao sistema em ângulo fixo, foram utilizados os dados dos dias 24/10/2017 período matutino e 25/10/2017 período vespertino, visto representar a melhor condição de produção (ensolarado). Apesar do ganho de produção energética com a utilização do sistema rastreador, ao se avaliar a produção efetiva do painel, isto é, subtraindo-se a corrente consumida pelo sistema de controle e movimentação, durante o período aqui considerado, percebe-se que o painel em ângulo fixo. A Tabela 6 apresenta as médias de corrente produzida pelos dois sistemas, a média de consumo pelo sistema rastreador e o balanço energético no período.

Tabela 5 – Médias para o consumo energético, corrente produzida no período e comparativo energético

Data	Período	Média de consumo do rastreador no período (mA)	Média Corrente Produzida Rastreador (mA)	Média Corrente Produzida Fixo (mA)	Comparativo Energético (mA)
24/10/2017	Matutino	117.6	321.57 ± 13,12	258.25 ± 56,40	-33.18
25/10/2017	Vespertino	117.6	292.42 ± 45,99	282.89 ± 48,43	-110.93

Fonte: Própria autoria.

O comparativo energético é calculado considerando-se o saldo de energia do painel com rastreador (corrente produzida menos corrente de carga) e a energia produzida pelo painel em ângulo fixo. O ideal para contornar esta situação seria alterar o projeto para reduzir o consumo quando o motor estivesse parado e também fazer alterações no software para evitar movimentação excessiva do painel. No entanto a proposta deste trabalho era utilizar projetos disponíveis online e que não demandassem maior capacidade técnica para execução, efetuar essas alterações fugiria do escopo do projeto.

Deve-se também considerar realizar uma calibração prévia dos valores de referência utilizados no algoritmo para determinar a melhor configuração que possa diminuir as variações observadas nos períodos em que houveram maiores alterações atmosféricas. Outro importante fator a ser considerado reside nos horários em que foram realizadas as medições, de forma que não abrangessem os

períodos de menor elevação do sol em relação ao horizonte, sobretudo no final da tarde.

O painel solar utilizado neste estudo é de baixa potência (5 Watts) com peso aproximado de 1 quilograma, podendo ser utilizado apenas para iluminação de baixa potência, alimentação de dispositivos roteadores, carregamento de baterias, aplicações didáticas, projetos e trabalhos científicos de caráter educacional.

5.5 Custos de montagem

A Tabela 6 apresenta o custo médio para montagem do sistema rastreador utilizado neste estudo e a Tabela 7 o custo médio para a montagem do painel em ângulo fixo..

Tabela 6 – Custos dos componentes para montagem do sistema rastreador

Componentes	Custo unitário	Qtde utilizada	Custo total
Painel Solar 5W	R\$55.00	1	R\$55.00
Servo motor MG 995	R\$35.00	2	R\$70.00
Arduino Uno	R\$35.00	1	R\$35.00
Sensor LDR	R\$3.00	4	R\$12.00
Tubo PVC (custo por metro)	R\$2.00	0,4 m	R\$0.80
Componentes de rotação impressos em ABS (custo por cm ³) ²	R\$0.20	300	R\$60.00
Fios e conectores			R\$16.00
Materiais diversos			R\$20.00
Bateria 7 Ah 12 V			R\$ 66,00
Parafusos de aço inoxidável			R\$ 30,00
Controlador de Carga Chinês			R\$ 127,50
Frete para todos equipamentos			R\$ 165,00
Total			R\$ 657,30

Fonte: Própria autoria.

Tabela 7 – Custos dos componentes para montagem do painel em ângulo fixo

Componentes	Custo unitário	Qtde utilizada	Custo total
Painel Solar 5W	R\$55.00	1	R\$55.00
Bateria 7 Ah 12 V			R\$ 66,00
Controlador de Carga Chinês			R\$ 127,50
Frete para todos equipamentos			R\$ 110,00
Total			303,50

Fonte: Própria autoria.

5.6 A experiência “faça você mesmo”

Neste projeto, a experiência de construir um sistema rastreador para um painel solar fotovoltaico baseado em modelos “*Faça você mesmo*” (do inglês – Do it Yourself) foi avaliada. Este conceito tem sido chamado de a terceira onda de revolução tecnológica que permite que qualquer pessoa possa se tornar um desenvolvedor de novas tecnologias e produtos, além de se elevar a capacidade de inovação para o empreendedorismo. (FOX, 2014; JEACLE, 2016; ROGNOLI et al., 2015).

Apesar disso, durante a elaboração deste projeto, observou-se que o conhecimento e estrutura física necessária para tornar realidade um projeto desta natureza não está disponível para pessoas com nível de escolaridade e renda abaixo das Classes A, B e C no Brasil e demais países em desenvolvimento. Durante o processo de design, houve grande dificuldade em encontrar variedades de componentes, como motores de melhor qualidade e elementos de movimentação que pudessem dar maior liberdade de criação sem elevar os custos.

Em contrapartida, já existem diversos sites brasileiros que compartilham informações sobre projetos de tecnologia DIY, como o laboratório de garagem, laboratório de eletrônica e filipe flop.

Será disponibilizado no site da empresa Gerasol o projeto aqui desenvolvido e o conhecimento adquirido será utilizado para o desenvolvimento de sistemas de rastreamento solar de equipamentos de grande porte.

6 CONCLUSÃO

Neste projeto, avaliou-se a experiência de construir um sistema baseado em DIY e chegou-se a conclusão que está disponível para pessoas com maior nível de escolaridade e renda para investir na tecnologia DIY tanto no Brasil quanto nos demais países em desenvolvimento.

Neste projeto, avaliou-se a eficiência energética de um painel fotovoltaico com sistema rastreador solar de controle de malha fechada comparativamente a um painel em ângulo fixo. Após as medições em três condições atmosféricas diferentes conclui-se que:

O sistema fotovoltaico com rastreador solar não é viável nas condições testadas em comparação com o painel fixo pois, praticamente todo o ganho que se teve foi gasto para se manter os servos motores em movimento e parados;

O sistema fotovoltaico com rastreador apresenta maior nível de produção nos horários de menor grau de elevação do sol em relação ao horizonte, ou seja, no início da manhã e final da tarde;

O comparativo energético foi negativo nas condições testadas durante 2 períodos, matutino do dia 24/10/2017 e vespertino do dia 25/10/2017 com condições atmosféricas ideais, e continuará negativo devido ao consumo dos servos motores do rastreador que ficam energizados durante todo período. Mas chegou-se à conclusão de que, se instalarmos um jogo de engrenagens para que os servos motores fiquem parados e desenergizados enquanto não houver comando por parte da placa controladora Arduino ou dois motores de passo e duas caixas redutoras para que os mesmos fiquem desenergizados enquanto estiverem parados para não consumirem corrente produzida pelo sistema com rastreador o comparativo continuará negativo devido ao consumo dos mesmos; e

Na comparação de custo entre o painel com movimentação e o fixo, a diferença foi de 216,60%.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a conclusão da não viabilidade econômica do rastreador com tecnologia DIY deste estudo em comparação com o painel fixo, fez-se um orçamento para uma usina de geração de energia elétrica de 1,5 MW para o Campus Fernando Costa da Universidade de São Paulo com rastreamento solar e comparou-se com a usina orçada em novembro de 2017 sem rastreamento solar e com o estudo feito pelas empresas GERASSOL – Energia Solar Termo Hidro Elétrica e P&G Energy do Brasil Ltda para comparar o custo da geração de energia elétrica por sistema fotovoltaico sem rastreamento solar com o orçamento (Anexo E) e estudo feito pelas mesmas empresas em fevereiro de 2018 com rastreamento solar. Concluiu-se que usinas de geração de energia elétrica por sistema fotovoltaico com rastreamento solar também são inviáveis economicamente no Brasil onde seu custo é superior superior à usinas de geração de energia elétrica sem rastreamento em 30,95% para produzir a mesma potência ou, seja, 1,5 MW conforme gráfico comparativo da (Figura – 46).

Figura 44 - Investimento X Potência gerada em kW

Fonte: Própria autoria.

Nos países do hemisfério norte, onde a utilização da tecnologia do rastreamento solar é comumente utilizada, tem-se um custo total de 50% acima das

usinas de geração de energia elétrica por sistema fotovoltaico sem rastreamento (P&G Energy do Brasil Ltda).

As empresas GERASSOL – Energia Solar Termo Hidro Elétrica e P&G Energy do Brasil Ltda baseadas neste estudo fizeram um planejamento para os próximos 32 anos de 2018 a 2050 conforme o gráfico da Figura 48 - Potência Instalada (kW) X Renda (Milhões R\$)/Ano. Levou-se em consideração as inflações estimadas para os anos de 2018 de 4,3%, 2019 de 4,2% e 2020 de 4,1% conforme link www.valor.com.br/brasil/5128112/bc-reduz-previsao-de-inflacao-para-este-ano-e-2018 e, a partir de 2021, considerou-se uma inflação de 5% ao ano. Este planejamento deverá ser revisto todo triênio.

Figura 45 - Potência Instalada (kW) X Renda (Milhões R\$)/Ano

Fonte: Própria autoria.

Um novo projeto com tecnologia DIY será desenvolvido a partir de abril de 2018 no âmbito de um convênio entre a empresa GERASSOL – Energia Solar Termo Hidro Elétrica, a Universidade de São Paulo através do Laboratório de Física Computacional (LAFAC) e da Agência USP de Inovação (AUSPIN). Por este motivo, a tecnologia DIY não será publicada neste momento.

Este novo projeto corrigirá todos os erros detectados neste experimento e será comercializado e divulgado através do site da empresa GERASSOL – Energia Solar Termo Hidro Elétrica incubada no UNICETEX/UNITec - Centro de Inovação,

Empreendedorismo e Extensão Universitária / Incubadora de Empresas do Agronegócio de Pirassununga dentro de aproximadamente seis (6) meses e contemplará as seguintes modificações:

- Modificação no projeto mecânico com a inclusão de um conjunto de engrenagens para manter os motores desenergizados para que o painel tenha liberdade de movimento apenas sob o comando do sistema de controle e
- Modificações nos projetos elétrico, eletrônico e o firmware a fim de que os motores possam ser desligados com a utilização de um transistor.

REFERÊNCIAS

- ABDALLAH, S.; NIJMEH, S. Two axes sun tracking system with PLC control. **Energy Conversion and Management**, London, v. 45, n. 11-12, p. 1931-1939, 2004.
- ADAFRUIT. Disponível em: <<https://www.adafruit.com/>>. Acesso em: 15 jul. 2017.
- AKINDELE, O. O.; GOTTARDI, M. Arduino-controlled HP memristor emulator for reference. **Integration: the VLSI Journal**, Amsterdam, v. 58, p. 438-445, 2017.
- ALI, A. S. et al. Open source building science sensors (OSBSS): a low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. **Building and Environment**, Kidlington, v. 100, p. 114-126, 2016.
- ALZAABI, A. A. et al. Electrical/thermal performance of hybrid PV/T system in Sharjah, UAE. **International Journal of Smart Grid and Clean Energy**, Rowland Heights, p. 385-389, 2014.
- ANDERSON, C. **Makers: the new industrial revolution**. New York: Crown Business, 2012.
- ARDUINO. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/>>. Acesso em: 15 mar. 2017.
- AWAY, Y.; IKHSAN, M. Dual-axis sun tracker sensor based on tetrahedron geometry. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 73, p. 175-183, 2017.
- BARBON, G. et al. Taking arduino to the internet of things: the ASIP programming model. **Computer Communications**, Amsterdam, v. 89-90, p. 128-140, 2016.
- BARKER, L.; NEBER, M.; LEE, H. Design of a low-profile two-axis solar tracker. **Solar Energy**, Oxford, v. 97, p. 569–576, 2013.
- BEAGLEBOARD. Disponível em: <<https://beagleboard.org/>>. Acesso em: 18 jun. 2017.
- CALVET, I. et al. Development of photovoltaic ceramic tile based on CZTSSe absorber. **Materials Letters**, Amsterdam, v. 161, p. 636-639, 2015.
- CABRAL, I. S. ; TORRES, A. C. ; SENNA, P. R. Energia solar: análise comparativa entre Brasil e Alemanha. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 4. , 2013, Salvador. **Anais eletrônicos...** Bauru: IBEAS, 2013. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/anais.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2017.
- CASE, L. et al. A low-cost open source hardware in control education. Case study: Arduino-feedback MS-150. **IFAC - Papersonline**, Kidlington, v. 48, n. 29, p. 117-122, 2015.
- CASE, S. **The third wave - an entrepreneur's vision of the future**. New York: Simon & Schuster, 2017.

CHANG, T. P. The Sun's apparent position and the optimal tilt angle of a solar collector in the northern hemisphere. **Solar Energy**, Oxford, v. 83, n. 8, p. 1274-1284, 2009a.

CHANG, T. P. Output energy of a photovoltaic module mounted on a single-axis tracking system. **Applied Energy**, Kidlington, v. 86, n. 10, p. 2071-2078, 2009b.

CHIN, C. S.; BABU, A.; MCBRIDE, W. Design, modeling and testing of a standalone single axis active solar tracker using MATLAB/Simulink. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 36, n. 11, p. 3075–3090, 2011.

CHIU, S. H.; URBAN, P. L. Robotics-assisted mass spectrometry assay platform enabled by open-source electronics. **Biosensors and Bioelectronics**, Amsterdam, v. 64, p. 260–268, 2014.

COIMBRA, C. F. M.; KLEISSL, J.; MARQUEZ, R. Overview of solar-forecasting methods and a metric for accuracy evaluation bT - solar energy forecasting and resource assessment. In: KLEISSL, J. **Solar energy forecasting and resource assessment**. Boston: Academic Press, 2013. chapter. 8, p. 171–194.

DAVIS, M.; WILLIAMS, T. Understanding tracker accuracy and its effects on CPV: accuracy specs & reporting real-world data. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOLAR CONCENTRATORS, 5., 2008, Palm Desert, CA. **Proceedings...** Palm Desert, CA, 2008. p. 1–29.

DIY Drones. Disponível em: <<http://diydrones.com/>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco energético nacional. Ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco energético nacional. Ano base 2009**. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

ENSLIN, J. H. R. Maximum power point tracking: A cost saving necessity in solar energy systems. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 2, n. 6, p. 543–549, 1992.

FALCÃO, V. D. **Fabricação de células solares de CdS/CdTe**. 2005. 120 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FANG, W. **Introduction of Matlab program for solar engineering fundamentals**. 2014. Disponível em: <<http://www.ecaa.ntu.edu.tw/weifang/Taisugar/gh-dss/pdf/solar0menu.pdf>>. Acesso em: 08 jun. 2017.

FATEHNIA, M. et al. Automating double ring in fi ltrometer with an Arduino microcontroller. **Geoderma**, Amsterdam, v. 262, p. 133–139, 2016.

FATHABADI, H. Comparative study between two novel sensorless and sensor based dual-axis solar trackers. **Solar Energy**, Oxford, v. 138, p. 67-76, 2016.

FOX, S. Third Wave Do-It-Yourself (DIY): potential for prosumption, innovation, and entrepreneurship by local populations in regions without industrial manufacturing infrastructure. **Technology in Society**, Kidlington, v. 39, p. 18-30, 2014.

GAO, Y. et al. Highly efficient organic tandem solar cell with a SubPc interlayer based on TAPC:C70 bulk heterojunction. **Scientific Reports**, London, v. 6, p. 23916, Nov. 2016.

GARRIDO, R.; DÍAZ, A. Cascade closed-loop control of solar trackers applied to HCPV systems. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 97, p. 689–696, 2016.

GEO Astro Disponível em: <<http://www.jgiesen.de/GeoAstro/sundials.html>>. Acesso em: 10 maio 2017.

GHTC -USP. **O movimento do sol**. Disponível em: <<http://www.ghc.usp.br/server/Sites-HF/Paula/sun1.html>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

GRENA, R. An algorithm for the computation of the solar position. **Solar Energy**, Oxford, v. 82, n. 5, p. 462–470, 2008.

GUNERHAN, H.; HEPBASLI, A. Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. **Building and Environment**, Kidlington, v. 42, n. 2, p. 779–783, 2007.

GUNEY, M. S. Solar power and application methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 57, p. 776–785, 2016.

HAN, F. et al. Dissolution-recrystallization method for high efficiency perovskite solar cells. **Applied Surface Science**, Amsterdam, v. 408, p. 34–37, 2017.

HONG, Z. et al. Tandem solar cell-concept and practice in organic solar cells. In: YANG, Y.; LI, G. (Eds.). **Progress in high-efficient solution process organic photovoltaic devices: fundamentals, materials, devices and fabrication**. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015. p. 315–346.

HUANG, B. J.; DING, W. L.; HUANG, Y. C. Long-term field test of solar PV power generation using one-axis 3-position sun tracker. **Solar Energy**, Oxford, v. 85, n. 9, p. 1935–1944, 2011.

HUEN, P.; DAOUD, W. A. Advances in hybrid solar photovoltaic and thermoelectric generators. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 72, p. 1295–1302, Sept. 2017.

INSTRUCTABLES. Disponível em: <<http://www.instructables.com/>>. Acesso em: 23 abr. 2017.

JALOXIA. Disponível em: <<https://goo.gl/6aiJTp>>. Acesso em: 10 maio. 2017.

JEACLE, I. The popular pursuit of DIY: exploring the role of calculative technologies in an actor network. **Management Accounting Research**, London, p. 1–11, 2016.

KA, Y.; HWANG, H.; KIM, C. Hybrid organic tandem solar cell comprising small-molecule bottom and polymer:fullerene top subcells fabricated by thin-film transfer. **Scientific Reports**, Amsterdam, v. 7, n. 1, p. 1942, 2017.

KANAPARTHI, S.; BADHULIKA, S. Low cost, flexible and biodegradable touch sensor fabricated by solvent-free processing of graphite on cellulose paper. **Sensors and Actuators, B: Chemical**, Amsterdam, v. 242, p. 857–864, 2017.

KANNAN, N.; VAKEESAN, D. Solar energy for future world: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 62, p. 1092–1105, 2016.

KIM, Y. J. et al. Improving the solar cell performance of electrodeposited $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ by varying the $\text{Cu}/(\text{Zn}+\text{Sn})$ ratio. **Solar Energy**, Oxford, v. 145, p. 13–19, 2017.

LABORATÓRIO de garagem. Disponível em: <<http://labdegaragem.com/>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

LAHFAOUI, B. et al. Real time study of P & O MPPT control for small wind PMSG turbine systems using Arduino microcontroller. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 111, p. 1000–1009, Sept. 2017.

LEE, C. Y. et al. Sun tracking systems: a review. **Sensors**, Basel, v. 9, n. 5, p. 3875–3890, 2009.

LI, L. et al. Nanostructured solar cells harvesting multi-type energies. **Energy & Environmental Science**, Cambridge, v. 5, n. 3, p. 6040, 2012

LOVEGROVE, K.; CSIRO, W. S. Introduction to concentrating solar power (CSP) technology. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. (Ed.). **Concentrating solar power technology**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. Chap. 1, p. 3–15.

LOVEGROVE, K.; PYE, J. Fundamental principles of concentrating solar power (CSP) systems. In: LOVEGROVE, K.; STEIN, W. (Ed.). **Concentrating solar power technology**. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. chap. 2, p. 16–67.

MAKE Magazine. Disponível em: <<http://makezine.com/>>. Acesso em: 21 abr. 2017.

MATHEW, L. R.; JOHN, D. Frugal automation of sustainable practices in Kerala. **Procedia Technology**, Amsterdam, v. 24, p. 1211–1218, 2016.

MATRIZ elétrica brasileira Dez./2016. Disponível em:
<https://www.google.com.br/search?q=matriz+el%C3%A9trica+brasileira+2017&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=3EWqis3P8WhLaM%253A%252C8JeQgEnsHlg0cM%252C_&usg=__ldhQDK7RtvzcOJMQ1Cdo3LDyXBw%3D&sa=X&ved=0ahUKEwj6o9z>

dmbDZAhXGIJAKHVN4AVkQ9QEINzAB#imgrc=nDOQtILUZ6_o_M:>. Acesso em: 15 fev. 2018.

MATRIZ elétrica brasileira Dez./2017. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

MCPHAIL, C. **Reconstructing a Eratosthenes' map of the world: a study in source analysis**. 2011. 380 p.

NÚCLEO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS DE ENERGIA - SPE/ MME. **Capacidade instalada de geração elétrica Brasil e mundo**. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/177708/20+-+Pot%C3%A2ncia+Instalada+de+Gera%C3%A7%C3%A3o+El%C3%A9trica+-+Brasil+e+Mundo/76e55d24-202a-4403-8b6c-1e804de6d803?version=1.0>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

NREL. **Best Research-cell efficiencies**. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/pv/assets/images/efficiency-chart.png>>. Acesso em: 10 maio 2017.

OFERTA interna de energia elétrica por fonte. Disponível em: <<http://ambientesst.com.br/economizar-energia-ajuda-o-meio-ambiente/>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

OPENMaterials. Disponível em: <<http://openmaterials.org/>>. Acesso em: 10 abr. 2017.

OSGB. A guide to coordinate systems in Great Britain. **Ordnance Survey Southampton**, v. v2.0, n. v1.9, p. 43, 2010.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, Graficor, 2006. 60 p.

POCERO, L. et al. Open source iot meter devices for smart and energy-efficient school buildings. **HardwareX**, Oxford, v. 1, p. 54-67, 2017.

PRINSLOO, G.; DOBSON, R. **Solar Tracking - sun position, sun tracking, sun following**. Stellenbosch, África do Sul: SolarBooks, 2015a.

PRINSLOO, G.; DOBSON, R. Tracker performance evaluation principles. In: **Solar Tracking - sun position, sun tracking, sun following**. Stellenbosch, África do Sul: SolarBooks, 2015b. p. 261–272.

RANGEL, M. S.; BORGES, P. B.; SANTOS, I. F. S. Análise comparativa de custos e tarifas de energias renováveis no Brasil. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Palotina, v. 5, n. 3, p. 267-277, 2016.

REDA, I.; ANDREAS, A. Solar position algorithm for solar radiation applications. **Solar Energy**, Oxford, v. 76, n. 5, p. 577-589, 2004.

RENOVÁVEIS 2012: relatório da situação global: principais conclusões 2012. Paris: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, 2012. 20 p.

RASPBERRY Pi. Disponível em: <<https://www.raspberrypi.org/>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

ROGNOLI, V. et al. DIY materials. **Materials and Design**, London, v. 86, p. 692-702, 2015.

ROSA, T. R.; BETIM, F. S.; FERREIRA, R. D. Q. Development and application of a labmade apparatus using open-source “ arduino ” hardware for the electrochemical pretreatment of boron-doped diamond electrodes. **Electrochimica Acta**, Kidlington, v. 231, p. 185-189, 2017.

SALLABERRY, F. et al. Direct tracking error characterization on a single-axis solar tracker. **Energy Conversion and Management**, London, v. 105, p. 1281-1290, 2015.

SHANKLEMAN, J.; MARTIN, C. **Solar could beat coal to become the cheapest power on earth**. Disponível em: <<https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-01-03/for-cheapest-power-on-earth-look-skyward-as-coal-falls-to-solar>>. Acesso em: 10 dez. 2017.

SHI, B. et al. Enhanced light absorption of thin perovskite solar cells using textured substrates. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdam, v. 168, p. 214–220, May. 2017.

SIDEK, M. H. M. et al. Automated positioning dual-axis solar tracking system with precision elevation and azimuth angle control. **Energy**, London, v. 124, p. 160-170, 2017.

SIECKER, J.; KUSAKANA, K.; NUMBI, B. P. A review of solar photovoltaic systems cooling technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 79, p. 192–203, nov. 2017.

SILVESTRE, A. D. **Desenvolvimento de um heliostato para geração heliotermica em torres solares**. 2016. 84 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, 2016.

SKOURI, S. et al. Design and construction of sun tracking systems for solar parabolic concentrator displacement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Kidlington, v. 60, p. 1419-1429, 2016.

SOLARBeam. Disponível em: <<http://solarbeam.sourceforge.net/>>. Acesso em: 10 maio 2017.

SOUZA, J. L.; NICÁCIO, R. M.; MOURA, M. A. L. Global radiation measurement in Maceio, Brazil. **Renewable Energy**, Kidlington, v. 30, p. 1203-1220, 2005.

SPARKFUN. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

STINE, W. B.; GEYER, M. **Power from the sun**. Disponível em: <<http://www.powerfromthesun.net/book.html>>. Acesso em: 10 maio. 2017.

STOFFEL, T. Terms and definitions. In: KLEISSL, J. **Solar energy forecasting and resource assessment**. Boston: Academic Press, 2013. chap. 1, p. 1–19.

SUNCALC. Disponível em: <<http://suncalc.net/>>. Acesso em: 10 maio. 2017.

SUNEARTH Tools.Com. Disponível em: <www.suneartool.com>. Acesso em: 10 maio. 2017.

SUNPATH. Disponível em: <<http://www.eclim.de/index5.htm>>. Acesso em: 10 maio 2017.

TANG, R.; WU, T. Optimal tilt-angles for solar collectors used in China. **Applied Energy**, Kidlington, v. 79, n. 3, p. 239-248, 2004.

TOFFLER, A. **The third wave**. New York: Bartam Books, 1984.

TOUME, S.; GEFEN, A.; WEIHS, D. Printable low-cost, sustained and dynamic cell stretching apparatus. **Journal of Biomechanics**, Kidlington, v. 49, n. 8, p. 1336-1339, 2016.

USINA de ondas. Disponível em: <<http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/a-coppe/coppe-produtos/usina-de-ondas>>. Acesso em: 15 fev. 2018.

WANG, J. M.; LU, C. L. Design and implementation of a sun tracker with a dual-axis single motor for an optical sensor-based photovoltaic system. **Sensors**, Basel, v. 13, n. 3, p. 3157–3168, 2013.

XU, C.; WANG, Z. L. Compact hybrid cell based on a convoluted nanowire structure for harvesting solar and mechanical energy. **Advanced Materials**, Weinheim, v. 23, n. 7, p. 873–877, 2011.

YAO, Y. et al. A multipurpose dual-axis solar tracker with two tracking strategies. **Renewable Energy**, Kidlington v. 72, p. 88–98, 2014.

ZALDEI, A. et al. An integrated low-cost road traffic and air pollution monitoring platform for next citizen observatories. **Transportation Research Procedia**, Amsterdam, v. 24, n. 2016, p. 531–538, 2017.

ZLATANOV, H.; WEINREBE, G. CSP and PV solar tracker optimization tool. **Energy Procedia**, Amsterdam, v. 49, p. 1603–1611, 2013.

ANEXOS

ANEXO A – Algoritmo de controle do sistema rastreador

```
#include <Servo.h> // incluir biblioteca servo

// definir servo horizontal e posição inicial
Servo horizontal; // horizontal servo
int servo h = 180; // 90

//limite máximo servoh
int servohLimitHigh = 180
int servohLimitLow = 65; //limite mínimo servoh

// definir servo vertical e posição inicial
Servo vertical; // servo vertical
// variável que recebe posição do servo vertical
int servov = 45; // 90;

//limite máximo servov
int servoLimitHight = 80
int servoLimitLow = 15; //limite mínimo servov

//variáveis dos LDRs
// name = analogpin
#define Idrlt 0 //LDR superior esquerdo
#define Idrlt 1 //LDR superior direito
#define Idrlt 2 //LDR inferior esquerdo
#define Idrlt 3 //LDR inferior direito

// int dtime = analogRead(4)/20; // podem ser utilizados potenciômetros para set
// int tol = analogRead(5)/4;
```



```

int dtime = 10
int tol = 50

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  // conexões dos servos motores
  // name.attach(pin)
  horizontal.attach(9);
  vertical.attach(10);
  horizontal.write(180);
  vertical.write(45);
  delay(3000);
}
//definindo variáveis
void loop()
{
  int lt = analogRead(ldrLt); // superior esquerdo
  int rt = analogRead(ldrRt); // superior direito
  int ld = analogRead(ldrLd); // inferior esquerdo
  int rd = analogRead(ldrRd); // inferior direito

  float avt = (lt + rt) / 2; // média ldr superiores
  float avd = (ld + rd) / 2; // média ldr inferiores
  float avl = (lt + ld) / 2; // média ldr esquerda
  float avd = (rt + rd) / 2; // média ldr direita

  int dvert = avt - avd; // diferença entre médias superiores e inferiores
  int dhoriz = avl - avr; // diferença entre médias esquerda e direita

  if (-1*tol > dvert || dvert > tol) // se valor de tolerância for maior ou menor que média
  dvert mov vertical
  {

```

```

if(avt > avd)
{
    servov++;
    if (servov > servovLimitHigh)
    {
        servov = servovLimitHigh;
    }
}
else if (avt < avd)
{
    servov = servov--;
    if (servov < servovLimitLow)
    {
        servov = servovLimitLow
    }
}
vertical.write(servov);
}
if (-1*tol > dhoriz || dhoriz > tol) // se valor de tolerância for maior ou menor que
média dhoriz mov horizontal
{
    If (avl > avr)
    {
        servoh = servoh--;
        if (servoh < servohLimitLow)
        {
            Servoh = servohLimitLow;
        }
    }
    else if (avl < avr)
    {
        servoh = servoh++;
        if (servoh > servohLimitHigh;
        }
    }
}

```

```
}  
else if (avl == avr)  
{  
    // nothing  
}  
horizontal.write(servoh);  
}  
delay(dtime);  
  
}
```

ANEXO B – Algoritmo arduino datalogger para leitura da corrente no painel fixo

```
#include <DS3231.h>
DS3231 rtc(DAS, SCL);
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>
Adafruit_INA219 ina219A;
const int chipSelect = 4;
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
File Coleta

int LEITURA = 7; //pino para frequência de amostragem
boolean ESTADO = 1;

void setup()
{
  AnalogReference(DEFAULT);
  Delay(1000);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Inicializando SD card...");

  if (!SD.begin(4))
  Serial.println("Inicialização falhou");
  return;
}

// As próximas linhas são apenas para definir hora e datas do RTC
// (ATENÇÃO)-> Após a configuração deve-se recarregar o código sem essas linhas!
//rtc.setDOW(WEDNESDAY); // Set Day-of-Week to SUNDAY
//rtc.setTimes(12, 0, 0); // Set the time to 12:00:00 (24hr format)
//rtc.setDate(1, 1, 2014); // Set the date to January 1st, 2014
```

```

pinModel(LEITURA, OUTPUT);
Serial.println("Inicializando RTC");
rtc.begin();//inicia o RTC
ina219A.begin();
ina219A.setCalibration_16V_400mA();
Serial.println("Sensor de corrente iniciado");
}

void loop()
{
  Serial.println("Iniciando LOOP")
  Serial.println(rtc.getDateStr());
  float current_mA = 0;

  ESTADO=1;
  digitalWrite(LEITURA, ESTADO);

  current_mA = ina219A.getCurrent_mA();

  Serial.println("Inicialização pronta.");
  float X=112233;

  Coleta = SD.open("Coleta.txt", FILE_WRITE);

  if (Coleta)
  {
    Serial.println("Gravando em Coleta.txt...");
    Coleta.print(rtc.getDateStr());
    Coleta.print(",");
    Coleta.print(rtc.getTimeStr());
    Coleta.print(",");
    Coleta.print(current_Ma);
    Coleta.close();
    Serial.println("Fim da gravação.");
  }
}

```

```
}  
else  
{  
int averageAnalogRead(int pin ToRead)  
{  
byte numberOfReadings = 10;  
unsigned int running Value = 0;  
  
for(int x = 0 ; x < numberOfReadings ; x++)  
runningValue += analogRead(pinToRead);  
runningValue /= numberOfReadings  
  
return(runningValue);  
}  
float.mapfloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)  
{  
return ((x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min);  
  
}
```

ANEXO C – Algoritmo arduino datalogger para leitura da corrente no painel com sistema rastreador

```
#include <DS3231.h>
DS3231 rtc(DAS, SCL);
```

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_INA219.h>
Adafruit_INA219 ina219A;
Adafruit_INA219 ina219B(0x41)
```

```
const int chipSelect = 4;
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
File Coleta
```

```
int LEITURA = 7; //pino para frequência de amostragem
boolean ESTADO = 1;
```

```
void setup()
{
  AnalogReference(DEFAULT);
  Delay(1000);

  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Inicializando SD card...");
```

```
if (!SD.begin(4))
  Serial.println("Inicialização falhou");
return;
}
```

```
// As próximas linhas são apenas para definir hora e datas do RTC
```

```
// (ATENÇÃO)-> Após a configuração deve-se recarregar o código sem essas linhas!
```

```
//rtc.setDOW(WEDNESDAY); // Set Day-of-Week to SUNDAY
```

```
//rtc.setTimes(12, 0, 0); // Set the time to 12:00:00 (24hr format)
//rtc.setDate(1, 1, 2014); // Set the date to January 1st, 2014
```

```
pinModel(LEITURA, OUTPUT);
Serial.printin("Inicializando RTC");
rtc.begin();//inicia o RTC
```

```
ina219A.begin();
ina219A.setCalibration_16V_400mA();
ina219B.begin();
ina219B.setCalibration_16V_400mA();
```

```
Serial.printin("Sensor de corrente iniciado");
```

```
}
```

```
void loop()
```

```
{
Serial.printin("Iniciando LOOP")
Serial.printin(rtc.getDateStr());
float current_mA = 0;
```

```
float current_mAB = 0;
```

```
ESTADO=1;
digitalWrite(LEITURA, ESTADO);
```

```
current_mA = ina219A.getCurrent_mA();
```

```
current_mA = ina219A.getCurrent_mAB();
```

```
Serial.printin("Inicialização pronta.");
float X=112233;
```



```
Coleta = SD.open("Coleta.txt", FILE_WRITE);
```

```
if (Coleta)
```

```
{
```

```
Serial.println("Gravando em Coleta.txt...");
```

```
Coleta.print(rtc.getDateStr());
```

```
Coleta.print(",");
```

```
Coleta.print(rtc.getTimeStr());
```

```
Coleta.print(",");
```

```
Coleta.print(current_mA);
```

```
Coleta.print(",");
```

```
Coleta.print(current_mAB);
```

```
Coleta.print(",");
```

```
Coleta.close();
```

```
Serial.println("Fim da gravação.");
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
// if the file didn't open, print an error:
```

```
Serial.println("Erro ao tentar abrir Coleta.txt");
```

```
}
```

```
//delay(1000);
```

```
int averageAnalogRead(int pin ToRead)
```

```
{
```

```
byte numberOfReadings = 10;
```

```
unsigned int running Value = 0;
```

```
for(int x = 0 ; x < numberOfReadings ; x++)
```

```
runningValue += analogRead(pinToRead);
```

```
runningValue /= numberOfReadings
```

```
return(runningValue);
```

```
}  
float.mapfloat(float x, float in_min, float in_max, float out_min, float out_max)  
{  
    return ((x - in_min) * (out_max - out_min) / (in_max - in_min) + out_min);  
}
```

ANEXO D – Orçamento de usina fotovoltaica para a Universidade de São Paulo – *Campus* Fernando Costa sem rastreamento

P&G Energy – Especialista em eficiência Energética

Tempus Brasil – Representante Comercial

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SOLICITAÇÃO=> 20171101_USP PIRASSUNUNGA_V01

P&G Energy – Especialista em eficiência Energética

Tempus Brasil – Representante Comercial

1. NOSSA EMPRESA:

A empresa **P&G Energy** faz parte do **Grupo PEIMAR** que é uma realidade empresarial na Itália, especializada no desenvolvimento de projetos e produção de sistemas fotovoltaicos e eólicos com alto desempenho e de avançada aplicação de iluminação LED.

Fundada em 2007 por dois empresários italianos já detectando as potencialidades dos mercados emergentes internacionais, como justamente o Brasil. Ao longo deste tempo, após uma rápida presença no mercado nacional italiano, a empresa através de uma ampla rede de representações expandiu as vendas das suas soluções no exterior.

A empresa matriz está localizada na área industrial de ROMA e com 2 filiais nos EUA, para gerir o rico mercado norte-americano e uma filial de representação na Holanda que viabiliza o acesso ao mercado Norte-Europeu.

Em 2015, em vista as infinitas condições climáticas existentes em nosso país, favoráveis ao desenvolvimento de sistemas híbridos solares e eólicos a **P&G Energy** resolveu abrir sua filial brasileira em São Paulo (SP), para desenvolver o mercado da América do Sul.

Devido ao grande conhecimento na área da inovação tecnológica do setor, a **P&G ENERGY** é capaz de fornecer aos seus clientes sistemas híbridos, de "Alta Performance", com garantia MADE IN ITALY, que neste tipo de aplicações, faz uma enorme diferença quando comparada com os outros produtos de origem de outros países, apresentados no mercado.

2. NOSSO OBJETIVO:

A presente proposta tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um projeto que visa a implantação de um sistema de captação de Energia Solar, que irá disponibilizar a quantidade de KW/hora acordado no nosso contrato.

Para a realização do nosso projeto, seguimos integralmente nas normas técnicas da ANEEL, que é a Agência Nacional de Energia Elétrica.

P&G Energy – Especialista em eficiência Energética

Tempus Brasil – Representante Comercial

3. DETALHAMENTO DO PROJETO:

✓ **Prazo de Instalação:**

- O prazo estimado para a realização do projeto são de 3 a 4 meses, após assinatura de contrato.

✓ **Garantia:**

- Os materiais utilizados para a realização do projeto, em boa parte da sua totalidade são de origem Italiana, dentre eles destacamos abaixo alguns deles e seus respectivos tempos de garantia, são eles:

Projeto Total
5 anos

Placas Solares
30 anos

· **Importante:** Para que a garantia seja assegurada os mesmos não poderão ter passado por vandalismo ou ter sofrido Mal uso.

✓ **Relação dos Materiais:**

- Segue abaixo a relação de alguns dos materiais que serão utilizados:

- ✓ Placa Solar 260 Watts – com vidro prismático (auto-limpante), com diodo de proteção
- ✓ Inversos ABB – com capacidade de produção de 98% de eficiência;
- ✓ Placa para controle digital;
- ✓ Display de controle de produção direto;
- ✓ Quadro de proteção para proteção das placas, contra descarga elétricas, anti-choque e quedas de raios;
- ✓ Cabo solar com duplo isolamento (plástico e silicone);
- ✓ Quadro de comando (p/ parede).

P&G Energy – Especialista em eficiência Energética

Tempus Brasil – Representante Comercial

4. SITUAÇÃO ATUAL:

CONSUMO DOS ÚLTIMOS 12 MESES				
MÊS-ANO	CONSUMO	VALOR	Vlr. KW's	
nov-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
out-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
set-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
ago-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
jul-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
jun-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
mai-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
abr-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
mar-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
fev-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
jan-17	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
dez-16	225.000,00	R\$ 117.000,00	R\$ 0,52	
TOTAIS =>	2.700.000,00	R\$ 1.404.000,00

Diante dos números acima, quando comparamos
no valor do Kw's de **0%**

nov-17

com

nov-17

percebemos que houve um aumento

Sabemos dos atuais problemas que o país atravessa para a geração de energia elétrica, diante deste cenário a **P&G Energy (Made in Italy)**, propõe uma solução de energia renovável e limpa, passando a energia elétrica a não ser mais um problema.

P&G Energy – Especialista em eficiência Energética

Tempus Brasil – Representante Comercial

5. COMPORTAMENTO DO INVESTIMENTO:

Demonstrativo dos KW/h					
Consumo de Energia Elétrica (Anual) em KW/h =		2.700.000,00		Consumo de Energia Elétrica(Média Mês) em KW/h = 225.000,00	
Demonstrativo dos Valores em R\$					
Valor Atual KW/h =		R\$ 0,52		Aumento Anual (estimado) = 15,00%	
				Vlr KW/h do Primeiro Ano = R\$ 0,598	
				Valor da Conta de Energia Elétrica (Estimada para o próximo ano) = R\$ 135.000,00	
				Taxa de Manutenção(Anual) = R\$ 1.500,00	

PROJETO PRINCIPAL

Qtde de KW/h que será Gerado = 1.500

Valor Total do Investimento = R\$ 6.300.000,00

Fluxo do Retorno do Investimento no Tempo						
Economia gerada com base na Energia Consumida = 100,0%			Qtde de kw/h que será gerado = 1.500			
Economia gerada com base na Energia Contratada = 100%			Valor Total do Investimento = R\$ 6.300.000,00			
M2 necessário para a instalação = 10.615						
	1 Ano	2 Anos	3 Anos	4 Meses		
Valor da Conta Elétrica (Atual) =	R\$ 135.000,00	R\$ 155.250,00	R\$ 178.537,50	R\$ 205.318,13		
Economia (Mensal) =	R\$ 135.000,00	R\$ 155.250,00	R\$ 178.537,50	R\$ 205.318,13		
Economia (Anual) =	R\$ 1.620.000,00	R\$ 1.863.000,00	R\$ 2.142.450,00	R\$ 821.272,50		
Consolidado =	R\$ 1.620.000,00	R\$ 3.483.000,00	R\$ 5.625.450,00	R\$ 6.446.722,50		

Após a implantação do nosso sistema, o cliente terá um gasto mensal que irá variar entre 7% e 15% do gasto atual, relativo ao pagamento à concessionária de energia, dos encargos, taxas e impostos.

P&G Energy – Especialista em eficiência Energética

Tempus Brasil – Representante Comercial

A P&G Energy oferece uma opção, onde poderemos instalar o **PROJETO PILOTO** e os senhores como cliente poderão avaliar a qualidade do nosso trabalho para que na sequência possamos instalar o restante do projeto, passando aos senhores total segurança.

PROJETO PILOTO

Qtde de KW/h que será Gerado = 150

Valor Total do Investimento = R\$ 787.500,00

Fluxo do Retorno do Investimento no Tempo

Economia gerada com base na Energia Consumida = 10,00%		Qtde de kw/h que será gerado = 150				
Economia gerada com base na Energia Contratada = 10%		Valor Total do Investimento = R\$ 787.500,00				
M2 necessário para a instalação = 1.062						
	1 Ano	2 Anos	3 Anos	11 Meses		
Valor da Conta Elétrica (Atual) =	R\$ 135.000,00	R\$ 155.250,00	R\$ 178.537,50	R\$ 205.318,13		
Economia (Mensal) =	R\$ 13.500,00	R\$ 15.525,00	R\$ 17.853,75	R\$ 20.531,81		
Economia (Anual) =	R\$ 162.000,00	R\$ 186.300,00	R\$ 214.245,00	R\$ 225.849,94		
Consolidado =	R\$ 162.000,00	R\$ 348.300,00	R\$ 562.545,00	R\$ 788.394,94

P&G Energy – Especialista em eficiência Energética

Tempus Brasil – Representante Comercial

DESCRIÇÃO	PROJETOS		OBSERVAÇÕES
	PRINCIPAL	PILOTO	
O máximo de Energia Elétrica que poderemos gerar em uma hora pelas Normas da ANEEL é =	1.500	150	KW/h
Com a geração desta energia, estará sendo possível economizar da Energia consumida =	100%	10,00%	
Tempo estimado do Retorno do Investimento =	1 ANOS E 04 MESES	1 ANOS E 11 MESES	

ESTÁ INCLUSO NESTA PROPOSTA, OS SEGUINTE ITENS:

Avaliação Personalizada;
 Projeto de Engenharia;
 Documentação para a Concessionária;
 Ativação do Sistema;
 Monitoramento em Tempo Real (on-line);
 Manutenção Especializada;
 Assistência Técnica Nacional.

O BNDES possui uma linha de crédito especial para projetos na área de Energia Renovável, com as seguintes condições:

- * Taxa de Juros = 0,53% ao mês;
- * Prazo de Carência = até 24 meses;
- * Valor Financiável = 90% do Valor Total do Projeto.

As simulações dos cálculos poderão ser efetuadas diretamente do site "www.desenvolvesp.com.br".

Outras Instituições Financeiras (Bancos):

Possuem linhas de crédito para projetos de SUSTENTABILIDADE, consulte a seu banco.

P&G Energy – Especialista em eficiência Energética

Tempus Brasil – Representante Comercial

6. Forma de Pagamento:

A "Forma de Pagamento" será a combinar, pois existe a possibilidade de parcelamento sem juros, direto com a P&G Energy.

7. Considerações Gerais:

Nos valores apresentados, já está incluso todas as taxas de impostos.

O prazo de validade desta proposta é de 15 dias corridos, contados a partir da data de envio desta proposta.

São Paulo, 01 de Novembro de 2017.

De acordo, ____/____/____

Assinatura de Aceite dos Responsáveis:

USP CAMPUS PIRASSUNUNGA

Eng. Giuseppe Barba
P&g Energy

ANEXO E – Orçamento de usina fotovoltaica para a Universidade de São Paulo – Campus Fernando Costa com rastreamento

P&G Energy – Uma empresa especialista em Eficiência Energética

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

SOLICITAÇÃO=> 201800207_USP_V01

Geração de Energia Elétrica Solar - 1.500 Kw/h pico

Este projeto contempla o Rastreamento Solar, com o objetivo de uma melhor captação da luminosidade solar

Página 01

P&G Energy – Uma empresa especialista em Eficiência Energética

1. NOSSA EMPRESA:

A empresa **P&G Energy** faz parte do Grupo **PEIMAR** que é uma realidade empresarial na Itália, especializada no desenvolvimento de projetos e produção de sistemas fotovoltaicos e edícos com alto desempenho e de avançada aplicação de iluminação LED.

Fundada em 2007 por dois empresários italianos já detectando as potencialidades dos mercados emergentes internacionais, como justamente o Brasil. Ao longo deste tempo, após uma rápida presença no mercado nacional italiano, a empresa através de uma ampla rede de representações expandiu as vendas das suas soluções no exterior.

A empresa matriz está localizada na área industrial de ROMA e com 2 filiais nos EUA, para gerir o rico mercado norte-americano e uma filial de representação na Holanda que viabiliza o acesso ao mercado Norte-Europeu.

Em 2015, em vista as infinitas condições climáticas existentes em nosso país, favoráveis ao desenvolvimento de sistemas híbridos solares e edícos a **P&G Energy** resolveu abrir sua filial brasileira em São Paulo (SP), para desenvolver o mercado da América do Sul.

Devido ao grande conhecimento na área de inovação tecnológica do setor, a **P&G ENERGY** é capaz de fornecer aos seus clientes sistemas híbridos, de "Alta Performance", com garantia MADE IN ITALY, que neste tipo de aplicações, faz uma enorme diferença quando comparada com os outros produtos de origem de outros países, apresentados no mercado.

2. NOSSO OBJETIVO:

A presente proposta tem como objetivo apresentar o desenvolvimento de um projeto que visa a implantação de um sistema de captação de Energia Solar, que irá disponibilizar a quantidade de KW/hora acordado no nosso contrato.

Para a realização do nosso projeto, seguimos integralmente nas normas técnicas da ANEEL, que é a Agência Nacional de Energia Elétrica.

P&G Energy – Especialista na Geração de Energia Elétrica

3. DETALHAMENTO DO PROJETO:

✓ Prazo de Instalação:

- O prazo estimado para a realização do projeto são de 2 a 3 meses, após assinatura de contrato.

✓ Garantia:

- Os materiais utilizados para a realização do projeto, em boa parte da sua totalidade são de origem italiana, dentre eles destacamos abaixo alguns deles e seus respectivos tempos de garantia, são eles:

Projeto Total
5 anos

Placas Solares
30 anos

Importante: Para que a garantia seja assegurada os mesmos não poderão ter passado por vandalismo ou ter sofrido mau uso.

✓ Relação dos Materiais:

- Segue abaixo a relação de alguns dos materiais que serão utilizados:

- ✓ Peça Solar 260 Watts – com vidro prismático (auto-limpante), com diodo de proteção;
- ✓ Inversos ABB – com capacidade de produção de 98% de eficiência;
- ✓ Peça para controle digital;
- ✓ Display de controle de produção direto;
- ✓ Quadro de proteção para proteção das placas, contra descarga elétricas, anti-choque e quedas de raios;
- ✓ Cabo solar com duplo isolamento (plástico e silicone);
- ✓ Quadro de comando (p/ parede).

P&G Energy – Especialista na Geração de Energia Elétrica

4. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DA PLACA SOLAR:

POLY 60 CÉLULAS 260 WP – DUPLA CLASSE AA+

De alto rendimento e da tolerância na potência de saída de 0 / + 5 W.
Testado para resistir a uma carga de neve de 5400 Pa e em cargas de vento de 2400 Pa.

Estrutura resistente, fácil de instalar.

Vidro temperado com alta transparência: 3,2 mm, com superfície de vidro resistente.

Excelente desempenho, mesmo em condições de pouca luz.

Qualidade e segurança com certificações internacionais.

Características SG 250P

Potência de Pico (P_{max}): 260W

Tolerância de potência: 0 / +5w

Tensão no P_{max} (V_{mp}): 30,6V

Corrente no P_{max} (I_{mp}): 8,50a

Tensão de circuito aberto (V_{oc}): 36,8V

Corrente de curto-circuito (I_{sc}): 9,52A

Tensão máxima do sistema: 1000 V

Eficiência célula: 18,81 %

Eficiência do módulo: 15,98%

P&G Energy – Especialista na Geração de Energia Elétrica

5. SITUAÇÃO ATUAL:

CONSUMO DOS ÚLTIMOS 12 MESES				
MÊS-ANO	CONSUMO	VALOR	Vlr. KW's	
jan-18	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
jun-16	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
abr-16	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
mar-16	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
fev-16	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
jan-16	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
dez-15	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
nov-15	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
out-15	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
set-15	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
ago-15	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
jul-15	225.000,00	R\$ 112.500,00	R\$ 0,50	
TOTAIS =>	2.700.000,00	R\$ 1.350.000,00

Diante dos números acima, quando comparamos jan-18 com jan-18 percebemos que houve um aumento no valor do Kw's de 0%.

Sabemos dos atuais problemas que o país atravessa para a geração de energia elétrica, diante deste cenário a P&G Energy (Made in Italy), propõe uma solução de energia renovável e limpa, passando a energia elétrica a não ser mais um problema.

P&G Energy – Especialista na Geração de Energia Elétrica

6. COMPORTAMENTO DO INVESTIMENTO:

Demonstrativo dos KW/h					
Consumo de Energia Elétrica (Anual) em KW/h =		2.700.000,00		Consumo de Energia Elétrica(Média Mês) em KW/h = 225.000,00	
Demonstrativo dos Valores em R\$					
Valor Atual KW/h =		R\$ 0,50	Aumento Anual (estimado) =		10,00%
			Vir KW/h do Primeiro Ano =		R\$ 0,550
Valor da Conta de Energia Elétrica (Estimada para o próximo ano) =					R\$ 123.750,00
Taxa de Manutenção(Anual) =					R\$ 1.600,00

PROJETO PRINCIPAL

Qtde de KW/h que será Gerado = 1.500 Valor Total do Investimento = R\$ 8.250.000,00

Fluxo do Retorno do Investimento no Tempo						
Economia gerada com base na Energia Consumida =	100,0%	Qtde de kw/h que será gerado = 1.500				
Economia gerada com base na Energia Contratada =	100%	Valor Total do Investimento = R\$ 8.250.000,00				
M2 necessário para a instalação =	10.615					
	1 Ano	2 Anos	3 Anos	4 Anos	8 Meses	
Valor da Conta Elétrica (Atual) =	R\$ 123.750,00	R\$ 136.125,00	R\$ 149.737,50	R\$ 164.711,25	R\$ 181.182,38	
Economia (Mensal) =	R\$ 123.750,00	R\$ 136.125,00	R\$ 149.737,50	R\$ 164.711,25	R\$ 181.182,38	
Economia (Anual) =	R\$ 1.485.000,00	R\$ 1.633.500,00	R\$ 1.796.850,00	R\$ 1.976.535,00	R\$ 1.449.459,00	
Consolidado =	R\$ 1.485.000,00	R\$ 3.118.500,00	R\$ 4.915.350,00	R\$ 6.891.885,00	R\$ 8.341.344,00

P&G Energy – Especialista na Geração de Energia Elétrica

7. CÁLCULO DO CO₂:

CÁLCULO DO CO₂

A redução de emissão de CO₂, auxilia o planeta na diminuição do efeito estufa, além de ser um fator de suma importância no Relatório de Sustentabilidade que serve de modelo de gerenciamento de ações, para que as empresas possam garantir e prestar contas de suas responsabilidades e impactos.

1.453,613 Toneladas/Ano

Página 07

P&G Energy – Especialista na Geração de Energia Elétrica

8. VISÃO MACRO DO PROJETO:

Desenvolvimento de Projeto Fotovoltaico

9. VISÃO DAS ETAPAS DO PROJETO:

P&G Energy – Especialista na Geração de Energia Elétrica

10. FORMA DE PAGAMENTO:

A "Forma de Pagamento" será a combinar.

11. CONSIDERAÇÕES GERAIS:

Nos valores apresentados, já está incluso todas as taxas de impostos.

O prazo de validade desta proposta é de 15 dias corridos, contados a partir da data de envio desta proposta.

São Paulo, 07 de Fevereiro de 2018.

De acordo, ____/____/____

Assinatura de Aceite dos Responsáveis:

USP

Paulo Lourenço
Dir. Comercial

ANEXO F – Dados técnicos painel fotovoltaico SSB5W-12 (STARSOLAR® - CHINA)

ITEM N °	SSB5W-12
MONO ou POLI	POLI
potência máxima (Wp)	5 w
tensão máxima de alimentação (V)	17.3 V
potência máxima de corrente (A)	0.29A
tensão em circuito aberto (V)	21.6 v
corrente de curto circuito (A)	0.32A
número de células (Pcs)	36
tamanho do módulo (mm)	280X140X17mm
tensão máxima do sistema (V)	/
coeficientes de temperatura de Isc (%)	0.065 +/-0.015%/° C
coeficientes de temperatura de Voc (%)	-(2.23 +/-0.1)/C
coeficientes de temperatura de Pm (%)	-(0.5 +/-0.05)/C
coeficientes de temperatura de Im (%)	+ 0.1/C
coeficientes de temperatura de Vm (%)	-0.38/C
Faixa de temperatura	-40+ 85 C
tolerância Potência (por exemplo +/-5%)	+/-5%
superfície Capacidade de Carga Máxima	60 m/s (200 kg/sq. m)
Carga permissível Da Saraiva	esfera de aço cair a partir de 1 m de altura
peso por peça (kg)	0.6KGS
Tipo De Caixa de junção	16
comprimento dos Cabos (mm)	nenhum
Eficiência da pilha (%)	16.93%
módulo de Eficiência (%)	> 12.79%
tolerância da saída (%)	+/-5%
Frame (Material, Cantos, etc)	alumínio
Condições de Teste padrão	AM1.5 100 mw/cm2 25 C
garantia	5 anos de garantia do produto e 20 anos 80% do poder
FF (%)	75%

**ANEXO G – Shields para dataloggers com placas micro controladoras arduino
duo com e sem rastreador.**

ANEXO H – Diagrama elétrico do rastreador de malha fechada com base em sensores LDR para ser utilizado com tecnologia DIY e PCB do rastreador e do painel fixo.

ANEXO I – Suporte de fixação dos fotoresistores.

ANEXO J – Suporte direito servo vertical

ANEXO K – Suporte esquerdo servo vertical

ANEXO L – Suporte base painel solar.

ANEXO M – Suporte inferior servo horizontal

ANEXO N – Suporte superior servo horizontal.

ANEXO O – Suporte eixo vertical

ANEXO P – Visão explodida do sistema rastreador.