



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

TIAGO VENTURINI DA SILVA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE UM SEGUIDOR SOLAR EM SISTEMA
CONECTADO À REDE: VIABILIDADE ECONÔMICA**

SÃO MATEUS – ES

2017

TIAGO VENTURINI DA SILVA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE UM SEGUIDOR SOLAR EM SISTEMA
CONECTADO À REDE: VIABILIDADE ECONÔMICA**

Dissertação apresentado para o Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de mestre em energia.

Orientador: Dr. José Rafael Cápua Proveti

Co-orientador: Dr. Wanderley Cardoso Celeste

São Mateus – ES

2017

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Divisão de Biblioteca Setorial do CEUNES - BC, ES, Brasil)

S586a Silva, Tiago Venturini da, 1985-
Análise de eficiência de um seguidor solar em sistema
conectado à rede : viabilidade econômica / Tiago Venturini da
Silva. – 2017.
117 f. : il.

Orientador: José Rafael Cápua Proveti.
Coorientador: Wanderley Cardoso Celeste.
Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade Federal
do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Energia solar. 2. Automação. 3. Retorno sobre patrimônio
líquido. I. Proveti, José Rafael Cápua. II. Celeste, Wanderley
Cardoso. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Universitário Norte do Espírito Santo. IV. Título.

CDU: 620.9

TIAGO VENTURINI DA SILVA

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE UM SEGUIDOR SOLAR EM SISTEMA
CONECTADO À REDE: VIABILIDADE ECONÔMICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 12 de julho de 2017.

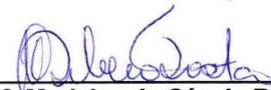
COMISSÃO EXAMINADORA



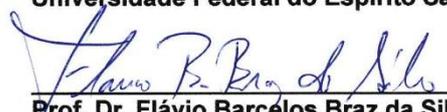
Prof. Dr. José Rafael Cápua Proveti
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador



Prof. Dr. Wanderley Cardoso Celeste
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof.ª Dr.ª Marielce de Cássia Ribeiro
Tosta
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Flávio Barcelos Braz da Silva
Instituto Federal do Espírito Santo

Folha de agradecimento

Agradeço ao nosso Senhor meu Deus por todas as bênçãos e oportunidades.

Aos meus pais pelo apoio e incentivo.

Ao meu orientador e co-orientador que me acompanharam em todo os momentos dessa árdua caminhada.

Aos demais professores do Programa de Mestrado em Energia e do IFES Linhares por todo ensinamento e orientações.

E ao apoio de todos meus amigos que fiz durante o Programa de Mestrado em Energia.

“Não tenha medo de perseguir o bom para perseguir o ótimo”

(John D. Rockefeller)

RESUMO

A maioria dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica possuem a característica de apresentarem estrutura de sustentação fixa. Mas já existem estruturas móveis capazes de aumentar a produção de energia do sistema seguindo o Sol. Se esta estrutura de sustentação sofrer variações periódicas acompanhando o movimento do Sol, de forma que os raios incidentes sobre os módulos fossem perpendiculares a maior parte do dia, haveria maior produção de energia elétrica devido a maximização da incidência solar. Por isso, este trabalho consistiu em construir um protótipo com 2 eixos de movimentação (norte-sul e leste-oeste) para comparar com um sistema fixo e obter o ganho percentual. Esta movimentação do seguidor solar foi possível com auxílio de 2 motores DC 12 V com caixa de redução controlados por um *Arduino Mega 2560* de acordo com a intensidade luminosa recebida pelos sensores LDRs. Os movimentos eram realizados independentemente da interferência humana, e permitiu movimentar-se durante todo dia e posicionar, automaticamente, o módulo de 55 Wp na horizontal por medida de segurança no início da noite. O protótipo construído com o seguidor solar obteve um ganho energético líquido de 31,45% em relação ao sistema fixo. Com esta medida de captação de energia, projetou-se a análise de viabilidade econômica de dois Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), um com seguidor solar e outro fixo, ambos com as mesmas dimensões de 1,56 kWp. Apesar do ganho do sistema móvel, verificou-se que o investimento é inviável se forem considerados os custos de manutenção preventiva no motor e engrenagens, assim como substituição de peças ao longo de 25 anos. O valor presente líquido foi positivo e a taxa interna de retorno maior que a taxa mínima de atratividade, já o tempo de recuperação do investimento para o sistema móvel chega a 24 anos, 8 meses e 11 dias, enquanto que o sistema fixo apresenta o tempo de retorno de 15 anos e 4 meses.

Palavras chaves: Seguidor solar. Automação. Rendimento. Tempo de retorno de investimento.

ABSTRACT

Most photovoltaic systems connected to the grid have the characteristic of having fixed support structure. But there are already mobile structures capable of increasing the energy production of the system following the Sun. If the structure of the module were mobile and suffered variations following the movement of the sun, so that the rays incident on it were perpendicular to most of the day, there would be greater production of electric energy due to the maximization of solar incidence. Therefore, this project work consisted in constructing a prototype with 2 drive axles (north-south and east-west). This movement will be possible with the aid of 2 DC motors 12 V with reduction box that will be controlled by an Arduino Mega 2560 according to the luminosity rate received by the LDRs sensors. The prototype was built with polyvinyl chloride (PVC) pipes to make the project feasible economically. In this way, the structure became light and cooperated in the movement of the two motors that are independent of human interference, allowing to move during the day and return to its original position automatically when there is no light to capture in the beginning of the night. Thus, the prototype built with the solar tracker was 31.45% more efficient than the fixed system. Soon after, the economical feasibility analysis of two grid-connected photovoltaic systems (SFCR), one with solar tracker and another fixed, both with the same dimensions of 1.56 kWp, was projected. Despite the gain of the mobile system, it was verified that the investment is impracticable considering the costs of preventive maintenance in the engine and gears, as well as replacement of parts over 25 years. The net present value is positive and the internal rate of return greater than the minimum rate of attractiveness, since the recovery time of the investment for the mobile system reaches 24 years, 8 months and 11 days, while the fixed system presents the time of return of 15 years and 4 months.

Keywords – Solar tracker. Automation. Efficiency. Payback.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de micro e minigeração de energia solar no Brasil no período 2012-2016	15
Figura 2 – Capacidade total instalada de energia fotovoltaica em MW de 2000 a 2015	15
Figura 3 – Decrescimento do preço da célula fotovoltaica em dólares de 1977 a 2015	16
Figura 4 – Irradiação global em São Paulo na latitude de 24° S de janeiro a novembro de 2004	21
Figura 5 – Saída de tensão do módulo fixo e do módulo móvel em um dia	23
Figura 6 - Comparação entre o sistema com seguidor solar e o módulo fixo inclinado	24
Figura 7 – Produção de energia (W) diária dos sistemas fixo e com seguidor solar	25
Figura 8 - Raios solares recebidos na Terra por unidade de área	28
Figura 9 - Irradiação direta solar média no Brasil (kW/m ²)	30
Figura 10– Representação simplificada de uma célula com carga	31
Figura 11 – Região com junção pn mostrando a barreira de potencial e correntes....	33
Figura 12 - Curva características de Tensão-Corrente de células fotovoltaicas.....	35
Figura 13 - Eficiência de conversão pela radiação solar.	35
Figura 14 - Ângulo de incidência sobre uma célula fotovoltaica.....	36
Figura 15 - Raio solar incidindo sobre a Terra.	37
Figura 16 - Módulo fotovoltaico com raio r_0 incidindo perpendicularmente	38
Figura 17 – Estruturas móveis.....	39
Figura 18 - Sistema fotovoltaico em uma residência conectado à rede elétrica.....	42
Figura 19 - Evolução do sistema isolado e conectado à rede	43
Figura 20 - Módulo fotovoltaico da <i>Yingli</i>	49
Figura 21 - Motores DC 12 V c/ cx. redução	50
Figura 22 - Primeira estrutura desenhada em CAD	51
Figura 23 – Primeira estrutura móvel com cano PVC de 20 mm.....	51
Figura 24 - Imagem esquemática do seguidor solar (lado direito) e a estrutura construída (lado esquerdo).....	52

Figura 25 - Imagens do seguidor solar com módulo	53
Figura 26 - Inversor 12 V CC para 127V CA	54
Figura 27 – Conjunto de mini ventiladores 12 V CC.....	55
Figura 28 - Potência coletada pelo sistema fixo, com 1 eixo e 2 eixos	56
Figura 29 - Arduino BlackBoard	57
Figura 30 - Controlador Arduino Mega 2560	57
Figura 31 – Fluxograma do processo diário de movimentação do seguidor solar.....	59
Figura 32 - Sensor de tensão (A) e sensor de corrente (B).....	60
Figura 33 – Condução de cargas no LDR	61
Figura 34 - Sensores LDRs instalados no módulo	62
Figura 35 - Sensores com anteparo e ângulo a ser corrigido.....	63
Figura 36 - Estrutura fixa montada	65
Figura 37 - Energia total (kJ) produzida por dia pelo módulo do protótipo	69
Figura 38 - Consumo total de energia (kJ) por cada motor	70
Figura 39 - Saldo de energia (kJ) produzida	70
Figura 40 - Tempo de retorno do valor investido do sistema fixo	73
Figura 41 - Tempo de retorno do valor investido na estrutura móvel	74
Figura 42 – tempo de retorno para o novo cenário	78
Figura 43 – Novo fluxo de caixa do seguidor solar com baixa eficiência	79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Divisões de correntes dentro de uma célula fotovoltaica.....	32
Quadro 2 - Especificações técnica do módulo fotovoltaico	48
Quadro 3 - Descrição do investimento e valores do sistema fixo	66
Quadro 4 - Descrição do sistema fixo conectado à rede	66
Quadro 5 - Descrição do investimento e valores para a montagem do seguidor solar	67
Quadro 6 – Produção e consumo total de energia (J) com saldo líquido	72
Quadro 7 - Valores da TIR, VPL e <i>payback</i> descontado de ambos os sistemas	75
Quadro 8 – Novo orçamento do sistema fotovoltaico considerando ICMS no ES.....	76
Quadro 9 – Novo orçamento do sistema fotovoltaico fixo	77
Quadro 10 – Novos valores dos parâmetros de análise de investimento.....	77
Quadro 11 – Novo orçamento do seguidor solar levando em conta manutenção e substituição de peças.....	79
Quadro 12 – Novos valores dos parâmetros de análise de investimento.....	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APAC – *Asia Pacifica*

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CONFAZ – Conselho Nacional de Política Fazendária

DC – *Direct Continuous*

DDP – Diferença De Potencial

EE – Eficiência Energética

EPIA – *European Photovoltaic Industry Association*

FAPES - Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo

GW – Giga *Watts*

ICMS – Imposto Cobrado sobre Mercadoria e Serviços

kgf.cm – kilo grama força por centímetro

LED - *Light Emitting Diode*

LDR – *Light Dependent Resistor*

EMEA – *Europe, the Middle East and Africa*

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

PVC – Policloreto de Vinila

SFCR – Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Atratividade

USA - *United State Of America*

VPL – Valor Presente Líquido

kWp – kilo *Watts* pico

kWh – kilo *Watts* hora

η_{inv} – Eficiência Energética

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	18
1.2 OBJETIVO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
3.1 ENERGIA SOLAR	27
3.2 RADIAÇÃO SOLAR	27
3.3 EFEITO FOTOVOLTAICO	30
3.4 SEGUIDOR SOLAR.....	34
3.5 REGULAMENTAÇÃO E ACESSO À REDE	41
3.5.1 Fundamentos teóricos sobre sistema fotovoltaico conectado à rede	41
3.6 VIABILIDADE ECONÔMICA.....	43
3.6.1 Fluxo de caixa	44
3.6.2 Taxa mínima de atratividade (TMA)	45
3.6.3 Valor presente líquido (VPL)	45
3.6.4 Taxa interna de retorno (TIR).....	46
3.6.5 Prazo de recuperação do investimento ou <i>Payback</i> descontado.....	46
4 MATERIAS E MÉTODOS.....	47
4.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO	47
4.2 MOTOR DC	49
4.3 ESCOLHA DA ESTRUTURA MÓVEL	50
4.4 CARGA DO MÓDULO	53
4.5 ARDUINO	56
4.6 SENSOR DE CORRENTE E TENSÃO.....	60
4.7 SENSOR LDR	61

4.8 INTERFERÊNCIA DO TEMPO	64
4.9 SFCR de 1,56 kW	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
5.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO	69
5.2 SEGUNDO EXPERIMENTO.....	71
5.3 RESULTADO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA.....	73
5.3.1 Análise de novos cenários	75
6 CONCLUSÃO.....	81
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	81
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	83
ANEXOS	89

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE SISTEMA DE GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

O sistema de geração de energia solar fotovoltaica é considerado uma alternativa ambientalmente viável que utiliza a energia emitida pelo Sol para produção de energia elétrica. *“O Sol é uma fonte de energia renovável e o aproveitamento dessa energia, tanto como fonte de calor ou como fonte de luz, é uma das alternativas energéticas mais promissoras para enfrentarmos os desafios do novo milênio”* (DYSON, 2001).

A primeira célula fotovoltaica foi descoberta em 1876 por Adams e Day. Eles perceberam que uma junção de selênio e platina promoveu o efeito fotovoltaico quando exposto à luz solar. Contudo a conversão foi muito baixa, em torno de 0,5% (ADAMS; DAY, 1877). Ainda no século XIX, Albert Einstein escreveu um artigo explicando o efeito fotoelétrico, onde estabeleceu que a luz é um fluxo de unidades localizadas independentes, ou seja, formada por partículas de energia que chamou de *quanta* de luz. Este *quanta* de energia era possível tirar um elétron de um metal quando este mesmo era atingido por uma luz. Isso se deve a respectiva energia que o elétron recebe, sendo que uma parte dessa energia cedida deverá se transformar em energia cinética (EINSTEIN, 1905).

A partir destas descobertas, iniciaram pesquisas para aperfeiçoamento destes fenômenos de conversão com uma melhor junção dos semicondutores tratados em nível industrial. A conversão da energia solar em energia elétrica através de módulos fotovoltaicos está ainda longe das condições de eficiência ideal. Não existe tecnologia disponível para comercialização no mercado capaz de converter toda radiação solar em energia elétrica. Mas isto não impediu o desenvolvimento das células fotovoltaicas que propiciou uma acelerada expansão no mercado mundial com diversas aplicações aeroespaciais, militares, ou até mesmo para geração de energia elétrica em residências ou centrais elétricas (ZILLES *et al*, 2012).

Tanto a implantação de sistema de energia solar fotovoltaico fixa como a aplicação da técnica utilizada para posicionar módulos automaticamente em relação ao Sol tem se

popularizado a nível mundial ao longo dos anos. Isto se deve principalmente ao custo de aquisição do sistema que tem sofrido quedas e a oferta do número de empresas e profissionais, no ramo de energia solar, que tem crescido (TREVELIN, 2014).

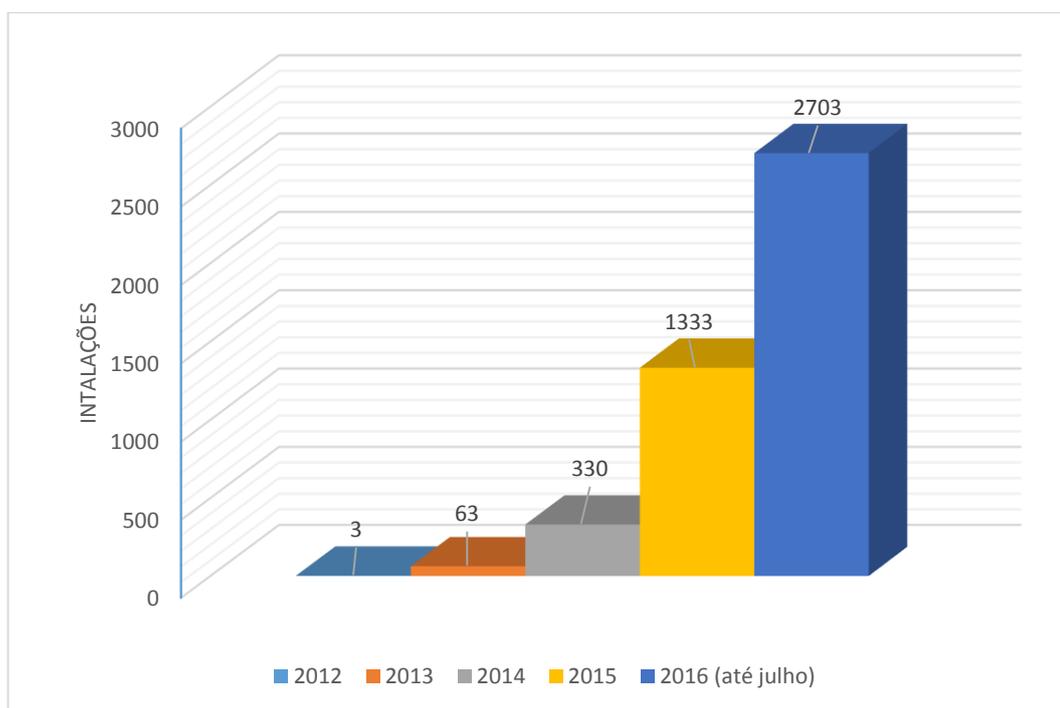
Outro fator muito importante que tem contribuído para a expansão da utilização da energia solar é o alto preço cobrado nas contas de energia elétrica no Brasil. Frequentemente as concessionárias variam as tarifas energéticas para cobrir os custos financeiros e consequente pressão econômica derivada da crise energética de 2013 e 2015, onde distribuidores e geradores tiveram que realizar empréstimos de bancos públicos e privados para suprir a falta de recursos. Consequentemente a conta é repassada ao consumidor final. Por isso, pequenos e grandes consumidores estão adotando outras fontes de energia elétrica distribuída mais acessíveis, com a finalidade de reduzir custos (VIVACQUIA, 2016).

Além disso, com conscientização ambiental da sociedade, o número de fontes energéticas renováveis tem crescido, e dentre essas fontes, a energia solar tem se destacado por apresentar maior flexibilidade de implantação do sistema ao consumidor, possibilidade de reduzir o valor da conta de energia cobrado pela concessionária e ainda poder combater o aquecimento global ocasionado pelos gases de efeito estufa como o CO₂ liberado para a atmosfera (DIESENDORF, 2007).

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), até julho de 2016 o Brasil chegou ao total de 4432 pontos de micro e minigeração de energia solar, sendo que o crescimento disparou de janeiro a julho chegando a 156%. De 2012 até o final de 2015 eram 1729 instalações como pode ser visualizado na Figura 1.

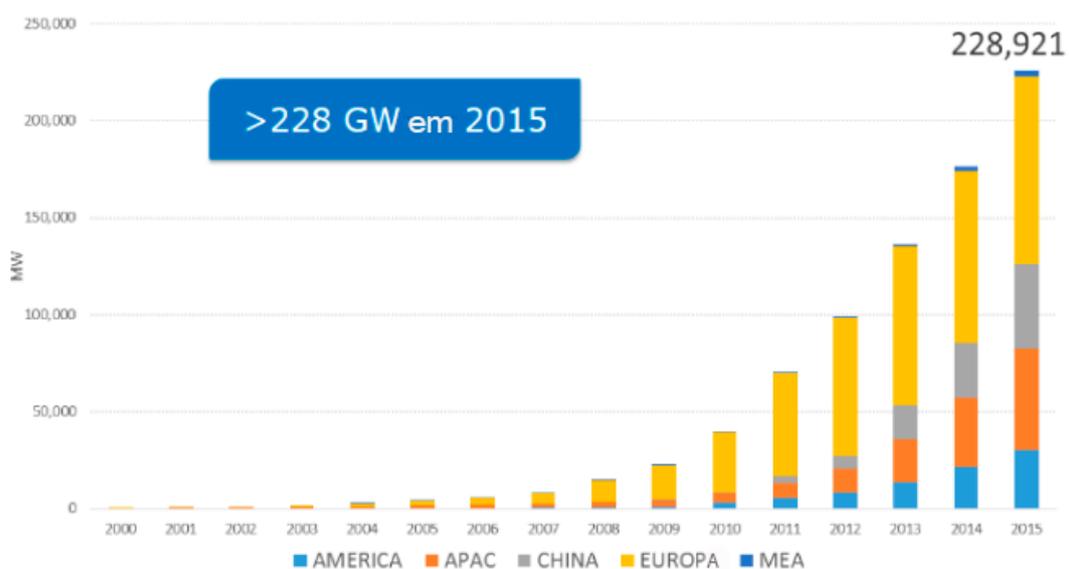
Segundo a *European Photovoltaic Industry Association* (EPIA) (Figura 2), a capacidade instalada de sistema solar fotovoltaico no mundo chegou em 2015 a um total acumulado superior a 228 GW. Houve um crescimento acumulativo na América, Ásia Pacífica (APAC), China, Europa e Oriente Médio de forma praticamente exponencial ano após ano. A China sozinha apresenta maior capacidade instaladas que a América. A Europa é a região com mais instalações, cerca de 97 GW, enquanto que a os países da Ásia Pacífica (APAC) vem em segundo lugar com 96 GW. Já a região com menor número é Oriente Médio e África (MEA) (no topo do gráfico) com somente 3 GW até o final de 2015 (EPIA, 2016).

Figura 1 – Número de micro e minigeração de energia solar no Brasil no período 2012-2016



Fonte: ANEEL, 2016 (adaptado).

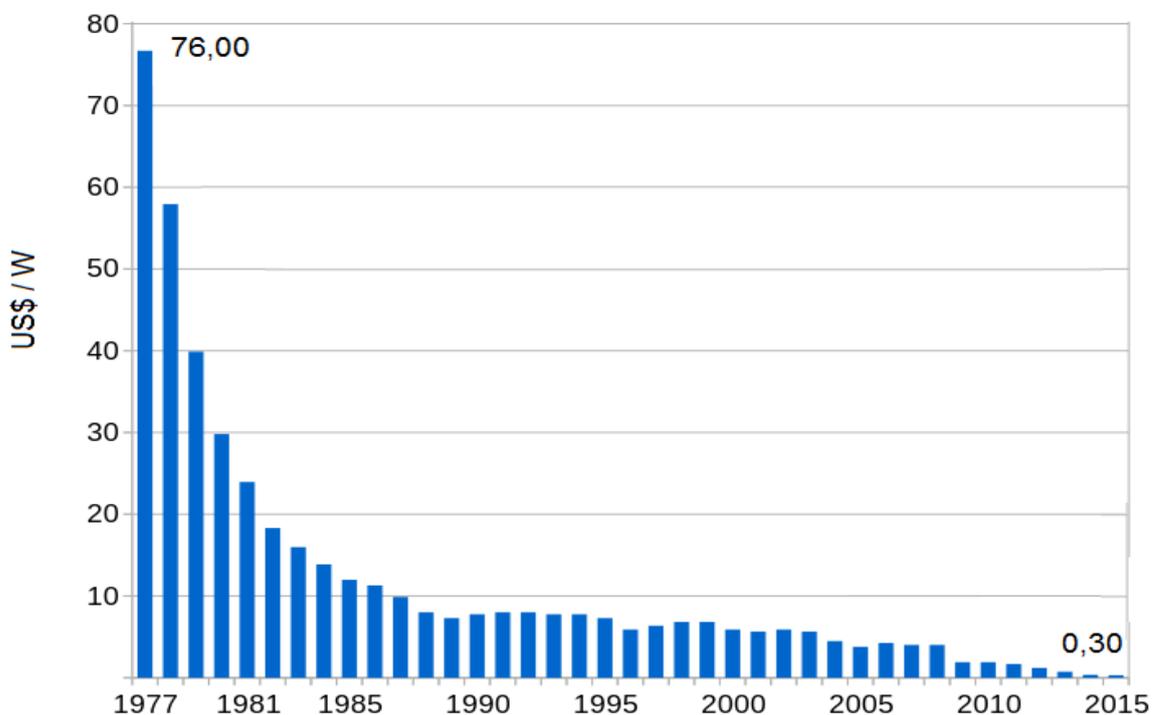
Figura 2 – Capacidade total instalada de energia fotovoltaica em MW de 2000 a 2015



Fonte: EPIA, 2016.

Associado ao aumento da capacidade total instalada, ver-se que o preço da célula fotovoltaica vem reduzindo ao longo do tempo (Figura 3). Em 1977, esta custava US\$ 76,00 por Watts, tendo seu valor diminuído para US\$ 0,30/W em 2015 (JADER-WALDAU, 2016). O crescimento de instalações de sistemas e o grande número de oferta de módulos de diferentes marcas em diferentes nacionalidades colaboraram para a redução do valor preço.

Figura 3 – Decrescimento do preço da célula fotovoltaica em dólares de 1977 a 2015



Fonte: JADER-WALDAU, 2016 (adaptado).

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) analisou 591 marcas de sistema fotovoltaicos comercializados no Brasil (Tabela 1). Contudo, o desenvolvimento da eficiência dos módulos não acompanhou o mesmo ritmo de crescimento das instalações.

A Tabela 1 apresenta os testes de eficiência dos módulos de silício cristalino e filmes finos. Na segunda coluna, a letra A indica o conjunto de módulos mais eficientes, enquanto a letra E significa o módulo testado menos eficiente. Percebe-se que a maioria dos sistemas comercializados no Brasil são módulos produzidos com silício

crystalino e a maior parte destes módulos estão na classe A com Eficiência Energética (EE) de conversão superior a 13,5%.

Tabela 1 – Eficiência energética dos módulos fotovoltaicos testados pelo INMETRO

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	CLASSES	ÍNDICE DE MÓDULO		SILÍCIO CRISTALINO		FILMES FINOS	
		SILÍCIO CRISTALINO	FILMES FINO	TOTAL	%	TOTAL	%
Mais eficiente	A	EE > 13,5	EE > 9,5	491	86,7	14	56,0
	B	13,5 >= >13,0	9,5 >= >7,5	23	4,1	3	12,0
	C	13,0 >= EE >12,0	7,5 >= EE >6,5	27	4,8	1	4,0
	D	12,0 >= EE >11,0	6,5 >= EE >5,5	8	1,4	3	12,0
Menos eficiente	E	EE < 11,0	EE < 5,5	17	3,0	4	16,0
Total				566	100	25	100

Fonte: INMETRO, 2016.

A eficiência de conversão, ou rendimento energético, é definida como o quociente da energia elétrica que chega aos terminais pela energia solar incidente sobre a superfície de uma célula. Os módulos produzidos a nível industrial apresentam, geralmente, eficiência em torno de 15% a 16% (INMETRO, 2017). Já as células produzidas em laboratório, com tecnologia mais complexa, apresentam rendimento que ultrapassam os 20% (BRITO; SILVA, 2006).

Para exemplificar a busca por uma melhor taxa de conversão, pode-se citar o recorde alcançado em 2014 com uma célula solar de silício (c-Si) não comercial que obteve 25,6% (MASUKO, 2014). A execução desta técnica se baseou na heterojunção de silício cristalino adotada em módulos fotovoltaicos que reduziu significativamente as perdas de recombinação.

O recorde mais atual de conversão de luz solar em eletricidade de células fotovoltaicas foi obtido por engenheiros da Universidade de *New South Wales* na Austrália, onde o sistema alcançou 40% de eficiência (GREEN *et al*, 2016). A técnica consistiu em utilizar filtragem de passagem óptica, em uma área de 287 cm², para capturar a

energia que normalmente é desperdiçada pelas células convencionais. Além disso, foi utilizado um seguidor solar que aumentou a radiação diária e melhorou a eficiência do sistema. Esta taxa de conversão foi obtida em laboratório e ainda está longe de ser aplicado em módulos fotovoltaicos em larga escala dentro da realidade brasileira.

O rendimento energético dos sistemas fotovoltaicos é um fator preocupante na hora da tomada de decisão de administradores de recursos que desejam adquirir um sistema com alta produção de energia e baixo custo. A eficiência energética de cada módulo e seu alto custo de aquisição no Brasil são ainda os principais entraves para o crescimento do setor (BERTOI, 2012).

Por este motivo, pesquisas estão sendo desenvolvidas de modo a maximizar o aproveitamento da radiação solar pelo sistema fotovoltaico. Dentre estas, existe a técnica de utilizar uma estrutura móvel para os módulos chamado de seguidor solar, que acompanha o movimento do Sol durante sua produção diária. O seguidor solar necessita, basicamente, de adaptações na estrutura física de sustentação dos módulos fotovoltaicos para torná-los móveis e acompanhar o Sol para que o módulo receba a radiação solar direta e perpendicular (VERA, 2004).

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR) pode utilizar um seguidor solar para aumentar a produção de energia, com isso, maior crédito em kWh poderá ser adquirido e ser descontado na conta de energia no final do mês. Conseqüentemente, poderá ocorrer uma diminuição do tempo de recuperação do valor do investimento financeiro do projeto.

Logo, a tomada de decisão de um administrador do recurso para concretizar o investimento em um sistema de geração de energia solar fotovoltaica móvel necessita também da análise do valor da estrutura móvel, tempo de retorno do dinheiro investido e a taxa mínima de atratividade existente no mercado energético.

A produção de energia elétrica através de um sistema fotovoltaico é algo importante para o proprietário, pois quanto maior a produção de energia, maiores são os

benefícios financeiros e ambientais (DIESENDORF, 2015). Alguns fatores externos podem interferir na produção como mudanças climáticas, temperatura ambiente, umidade, poluição, localização da estrutura no espaço geográfico e o posicionamento da superfície dos módulos em direção ao Sol.

A técnica de seguir o Sol faz com que os raios solares sejam incididos perpendicularmente nos módulos fotovoltaicos aumentando a quantidade de raios por metro quadrado. Através desta, é possível maximizar a produção de energia elétrica de cada módulo e por fim, aumentar a produção de todo sistema (COSTA *et al*, 2016).

Estes movimentos podem ser realizados pela estrutura de um eixo ou dois eixos com auxílio de um ou dois motores, respectivamente. Com isso, pode-se classificar ainda os seguidores solares de acordo com o movimento de sua estrutura.

Como o seguidor solar apresenta maior ganho de rendimento em relação ao sistema fixo, é importante realizar uma análise, levando em conta parâmetros econômicos e tamanho da produção, para verificar se é viável economicamente para implantação em uma usina conectada à rede elétrica, pois a implantação do sistema fotovoltaico móveis conectados à rede apresenta custos de manutenção ao longo dos anos e consumo de energia por parte dos motores que movem a estrutura.

Diante de várias pesquisas realizadas, foi observado a inexistência de uma análise de viabilidade econômica utilizando um seguidor solar em um SFCR dentro do cenário brasileiro. Com a aplicação de um seguidor solar é possível reduzir o tempo de retorno do capital investido a medida que o ganho de rendimento energético se torna superior ao sistema fixo (GROTH, 2013). Deste modo, a capacidade de produção de energia de um sistema fotovoltaico está também relacionada ao tempo de retorno do investimento.

1.3 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo analisar os parâmetros mais comuns de viabilidade econômica para descobrir se é viável investir em um sistema fotovoltaico fixo e/ou em

um sistema fotovoltaico móvel com dois graus de liberdade conectados à rede elétrica, ambos de mesma potência.

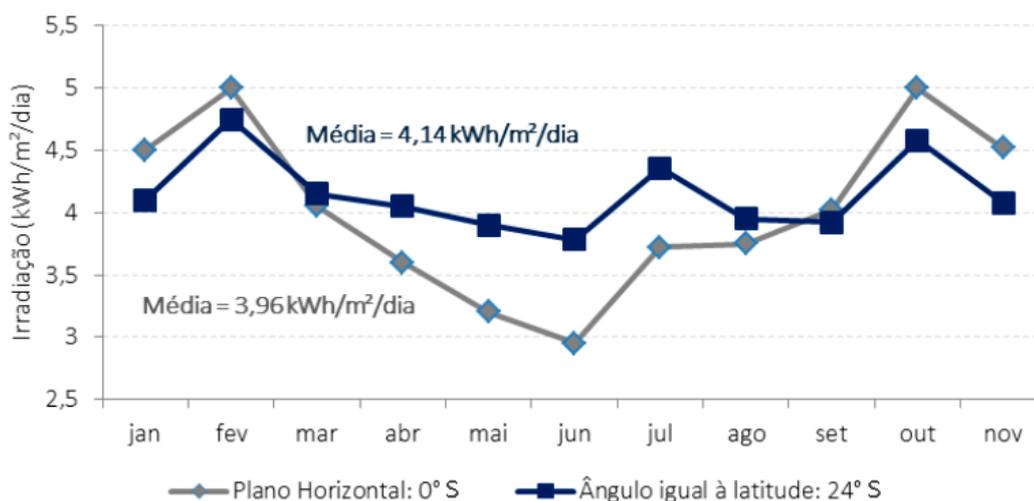
O objetivo específico foi construir um protótipo de seguidor solar com dois graus de liberdade, para aumentar a precisão, e acoplar um módulo de 55 Wp sobre o mesmo para analisar a produção diária de energia e verificar a eficiência. O protótipo do seguidor solar deverá obedecer uma lógica de programação gravada no controlador Arduino e se posicionar automaticamente, durante todo o dia, de forma a captar a maior incidência de raios solares sem nenhuma intervenção humana. Ele possuirá dois motores que permitem até dois graus de liberdade e será possível comparar, através dos dados gravados em uma planilha eletrônica, qual a produção de energia da estrutura fixa. Logo depois, com a estrutura utilizando um eixo e, por final, utilizando dois eixos para movimentação.

Estes dados servirão para verificar a viabilidade econômica da implantação de uma usina fotovoltaica fixa e móvel, através de técnicas de análise de investimento de uma micro usina de baixa tensão de 1,56 kWp conectada à rede elétrica da concessionária, onde será levado em conta o consumo de energia dos motores, os gastos com aquisição dos materiais e com manutenção ao longo dos anos. Além disso, foi analisado outros cenários considerando a adição do ICMS sobre a produção de energia, a doação de módulos e inversores para órgãos públicos e população de baixa renda e a manutenção preventiva do sistema móvel.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo dos anos, especialistas tem procurado a máxima produção de energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos. Uma forma é otimizar mais o aproveitamento da luz solar durante todo dia do ano. Para isto, é necessário observar o posicionamento dos módulos que deve conter o mesmo grau de inclinação relativo ao valor da latitude da Terra, pois a produção de energia através dos módulos é considerada ótima quando o ângulo de inclinação é igual à latitude local. Supondo que um sistema fotovoltaico se encontre na latitude de 24° S, no hemisfério sul da Terra, este módulo deve estar orientado para o norte com inclinação de 24° de forma que os raios solares incidam sobre sua superfície de forma perpendicular na maior parte do tempo em uma média anual, fazendo com que a irradiação ao longo do ano seja máxima, e conseqüentemente, produzindo uma quantidade maior de energia, como pode ser visualizado na Figura 4 (TOLMASQUIM, 2016).

Figura 4 – Irradiação global em São Paulo na latitude de 24° S de janeiro a novembro de 2004



Fonte: Potencial Energético Solar – CRESESB – CEPEL (adaptado).

A Figura 4 representa dois testes comparativos de irradiação global realizados durante o ano de 2004. Esta comparação revela que o aparelho de coleta de irradiação com inclinação de 24° (semelhante a latitude terrestre) apresentou maior irradiação, em média, do que o aparelho sem inclinação. O gráfico registra a média de cada mês e

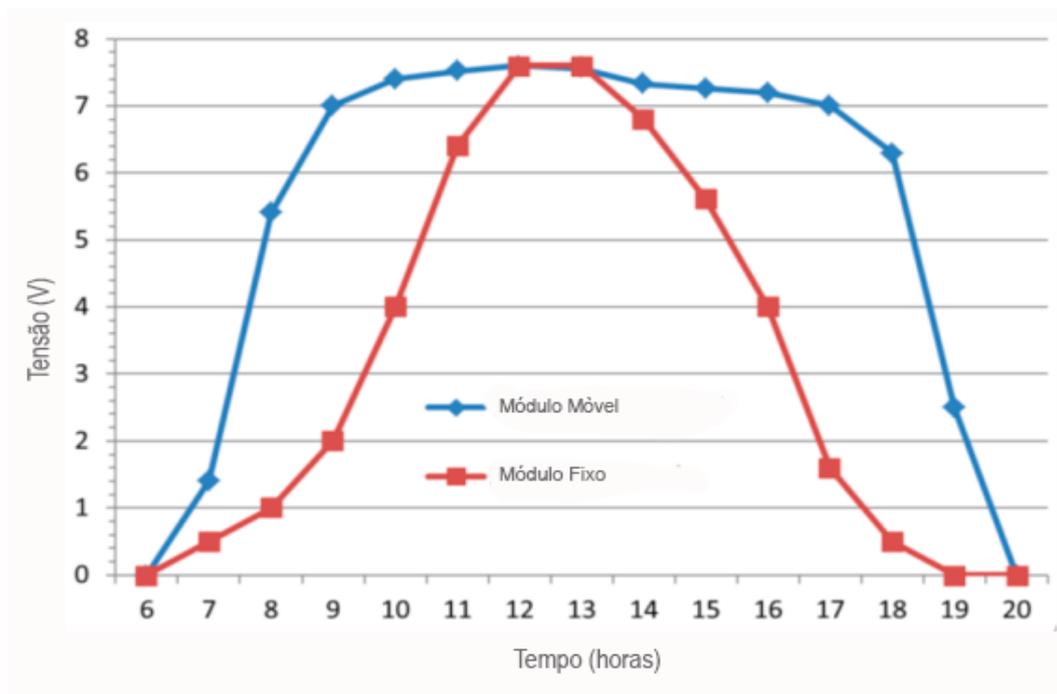
por fim, foi calculado a média anual para os dois planos de mesmas especificações (CRESESB, 2004).

Embora o teste demonstre como deve-se posicionar os módulos fotovoltaicos, esta não é uma regra absoluta, pois em regiões próximas a linha do equador, é importante que se adote a inclinação mínima de 10° para evitar acúmulo de sujeiras sobre os módulos ou acúmulo de água (PINHO; GALDINO, 2014).

Outra forma de maximizar a irradiação solar sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos é a utilização de estruturas que acompanham o movimento do Sol durante o dia através de mecanismo de rastreamento solar. Alguns sistemas podem utilizar um eixo para movimentação leste-oeste ao longo do dia e, conseqüentemente, usam somente um motor. Porém, existem estruturas móveis de dois eixos, leste-oeste e norte-sul, que necessitam de dois motores para obter maior precisão. Estas estruturas (de um ou dois eixos) podem ser independentes da ação humana, isto é, movimentam-se automaticamente durante o dia com o auxílio de sensores de luminosidade. Há ainda os que se movimentam durante o dia, independentemente da situação climática e em tempos programados, sob o comando de um algoritmo matemático que prevê o posicionamento do Sol (VIEIRA, 2014).

Na universidade da Nigéria, localizada no hemisfério norte com aproximadamente 7° de latitude, foi realizado a comparação entre dois sistemas durante o dia no primeiro semestre de 2016, um fixo e outro móvel com dois eixos, onde foi possível obter até 58,4% de melhora no rendimento aplicando a técnica de seguir o movimento do Sol. Okhaifoh e Okene (2016) utilizaram um microcontrolador ATMEGA 328P para armazenar o algoritmo que movia a estrutura automaticamente. O módulo pequeno possuía apenas 4 células fotovoltaicas para produção de energia e foi possível concluir através da coleta de tensão pelo tempo que havia maior produção de energia no início e no final do dia pelo sistema móvel em comparação ao sistema fixo. Já ao meio dia, a produção se igualava, conforme visualizado na Figura 5.

Figura 5 – Saída de tensão do módulo fixo e do módulo móvel em um dia



Fonte: OKHAIFOH; OKENE, 2016 (adaptado).

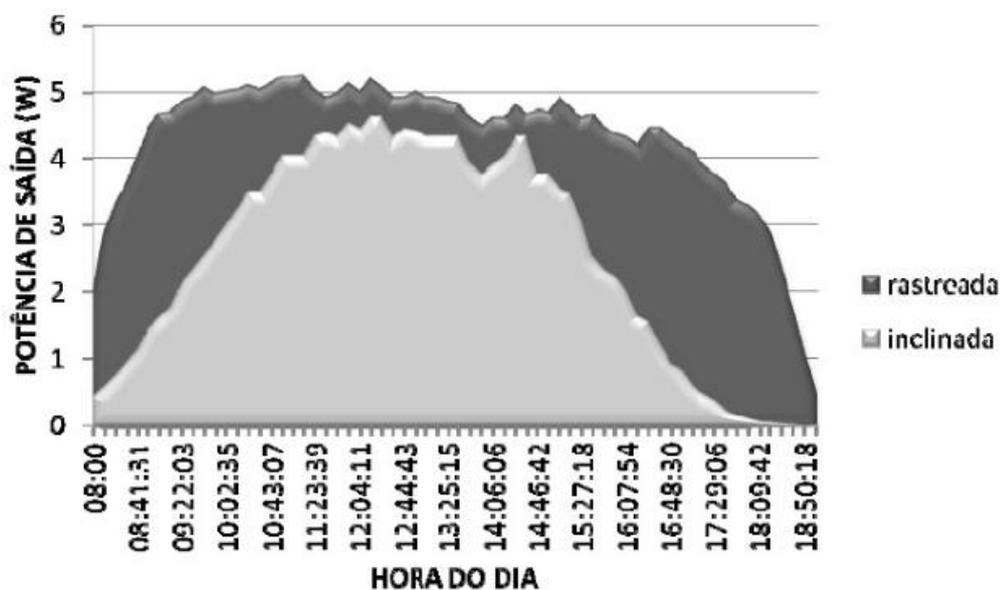
Monteiro (2007) com apenas um eixo de movimento no sentido leste-oeste. A comparação também ocorreu com um sistema fixo e foi possível obter uma média de 36,1% e pico máximo de 42,9% de produção de energia. Com o levantamento destes experimentos com seguidor solar, pode-se perceber uma relevante eficácia da técnica aplicado ao sistema fotovoltaico.

Outro experimento foi realizado por Alves (2008) na cidade de Bauru no estado de São Paulo com localização geográfica 22° de latitude (S) e 49° de longitude (O). Seu sistema foi possível aumentar a eficiência do sistema através de um seguidor solar com um módulo monocristalino de 50 Wp. Como o autor realizou uma comparação entre o sistema fixo e o sistema móvel, pôde-se chegar a um rendimento de 53,10% superior ao sistema fixo.

Experimento semelhante também foi realizado por Carvalho (2011), em Viçosa-MG, com um seguidor de dois eixos utilizando um módulo pequeno de silício policristalino de 5 Wp. O diferencial deste experimento foi um aumento de eficiência de 54,40%, em média, devido ao algoritmo bem elaborado que permitiu alta precisão. Conforme a Figura 6, pode-se perceber que houve alto desempenho do sistema móvel em relação ao fixo. O sistema com rastreamento produziu mais energia que o sistema fixo

no início e no fim do dia, sendo que na faixa horária onde o Sol se encontra a pino, a produção quase que se equipara entre os sistemas.

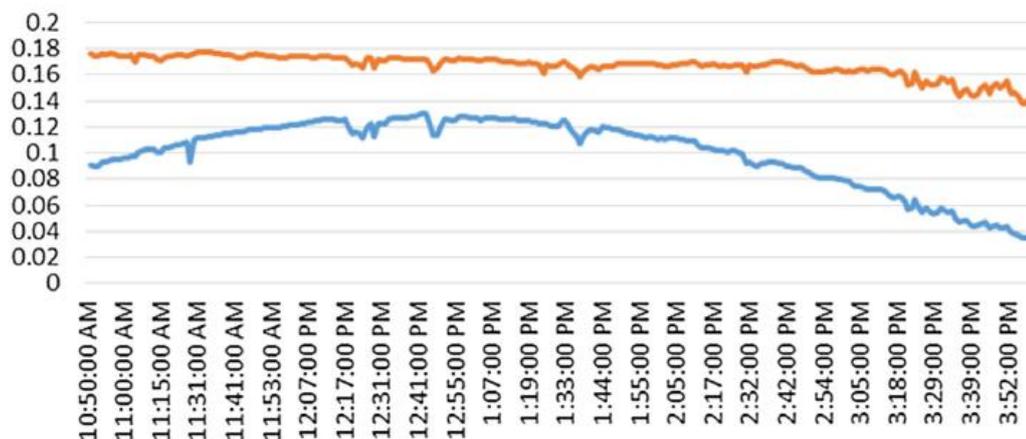
Figura 6 - Comparação entre o sistema com seguidor solar e o módulo fixo inclinado



Fonte: CARVALHO, 2011.

Em 2016, na universidade do Texas (USA), foi realizado a construção de dois sistemas, um fixo e outro móvel com dois eixos, onde se comparou o desempenho energético e obteve-se uma análise econômica levando o custo de implantação pela produção de energia. Asiabanpour e outros (2016) utilizaram dois módulos de 190 W, mas não eram ligados à rede elétrica, somente produziam energia para armazenagem dos dados. Este trabalho identificou que um sistema móvel com um módulo nunca teria um retorno financeiro, mas se fosse utilizado 4 módulos, o retorno seria de 13 anos, e se fosse utilizado 9 módulos, o retorno seria de 6 anos. O mais interessante deste experimento foi o rendimento alcançado com o seguidor solar, em torno de 82%. Contudo, os dados foram coletados em apenas um único dia, no mês de fevereiro (Figura 7), dos dois sistemas ao mesmo tempo e os movimentos do sistema de dois eixos eram realizados manualmente, além não possuir uma carga para alimentar como uma bateria ou algum eletrodoméstico.

Figura 7 – Potência gerada (kW) do sistema fixo (produção menor) e do seguidor solar de 2 eixos (produção maior) em fevereiro de 2016



Fonte: ASIABANPOUR e outros, 2016.

Miranda (2004) realizou a análise de viabilidade econômica de três diferentes dimensionamentos de SFCRs (A, B e C) para um estabelecimento comercial. Ele elaborou um projeto na cidade do Rio de Janeiro - RJ, seguindo os padrões técnicos de instalação de um SFCR segundo a concessionária local, para servir como referência a qualquer outro projeto de baixa tensão. Além de detalhar todas as fases do projeto, foi possível simular o tempo de extinção da dívida financeira investida e a taxa interna de rentabilidade para cada caso.

De forma semelhante, Groth (2013) realizou um levantamento sobre o custo de implantação, operação e taxa de retorno de investimento em uma usina de geração fotovoltaica fixa onde analisou-se as demonstrações de resultados ano a ano. Com o fluxo de caixa descontado, obteve-se a taxa interna de retorno para justificar o investimento financeiro. Foi levado em conta também a produção de energia de cada módulo durante seus 25 anos de vida útil através de fórmulas matemáticas, e também considerou suas perdas. Como a usina analisada precisava ocupar uma área de 1 hectare, estimou-se a produção total de energia dentro desta área, o custo de aquisição dos equipamentos por área (R\$/Wh/m²) e demais componentes, além do preço médio por hectare em território nacional. Com estes dados coletados foi possível utilizar os instrumentos necessários para concluir que os investimentos são viáveis a longo prazo e que a maximização da incidência solar sobre os módulos

diminuiria, consideravelmente, o tempo de retorno do investimento aplicado na implantação da usina.

Outra análise mais recente de viabilidade econômica foi realizada para a instalação do sistema de geração solar fotovoltaica fixa sobre o telhado de um galpão comercial na cidade de Contagem em Minas Gerais, como alternativa de redução de custos. Thomaz (2016) levou em conta os custos de instalação, manutenção e produção de energia durante a vida útil dos materiais. Com os parâmetros definidos, foi elaborado uma planilha eletrônica para auxiliar no cálculo do valor presente líquido positivo, encontrar uma taxa interna de retorno de 14,22% a.a. e o tempo de retorno do investimento aplicado em 8 anos. Através destes cálculos, concluiu-se que estes parâmetros econômicos estavam mais atrativos que outros índices do mercado.

Nos experimentos que abordam seguidor solar em várias regiões do mundo, observa-se que há o objetivo em comum: seguir o Sol durante todo o dia a fim de produzir o máximo de energia elétrica possível. Já outros trabalhos analisados sobre análise de investimento mostram a singularidade quanto as aplicações em sistemas fotovoltaicos fixo que se mostram viáveis a longo prazo, apesar de seu valor de implantação por R\$/kWh ser mais elevado normalmente em relação a outros sistemas de geração de energia (MARQUES, 2014).

3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1 ENERGIA SOLAR

O Sol fornece à superfície da Terra cerca de 94 mil TW, isso é o que efetivamente chega a superfície terrestre se consideramos o que é refletido e absorvido durante o fluxo de energia até a Terra (PINHO; GALDINO, 2014).

Este potencial é bastante significativo quando se analisa o consumo mundial de energia primária verificada em 2011 onde foi gasto cerca de 143 mil TWh, ou seja, no intervalo de duas horas a quantidade de energia solar recebida na superfície terrestre é superior ao consumo energético anual da humanidade (PINHO; GALDINO, 2014). O cálculo seria 2 horas por 94 mil TW que resultaria em 188 mil TWh, uma quantidade de energia bem maior que o consumo energético de 2011.

Além disso, a energia do Sol é uma fonte natural pura e os raios solares incidentes sobre os módulos solares fotovoltaicos realizam a transformação de forma quase que instantânea de energia solar para energia elétrica. Estes raios solares incidentes sobre o módulo fotovoltaico variam de ângulo conforme a movimentação da terra em relação ao Sol e isto interfere diretamente na produção de energia elétrica (ALVES, 2008). Contudo, existem técnicas conjugadas aos módulos que ajudam no acompanhamento da movimentação do Sol, de forma a perpendicularizar os raios durante todo o dia, causando assim, maior ganho potencial que os proporcionados por sistemas fixos.

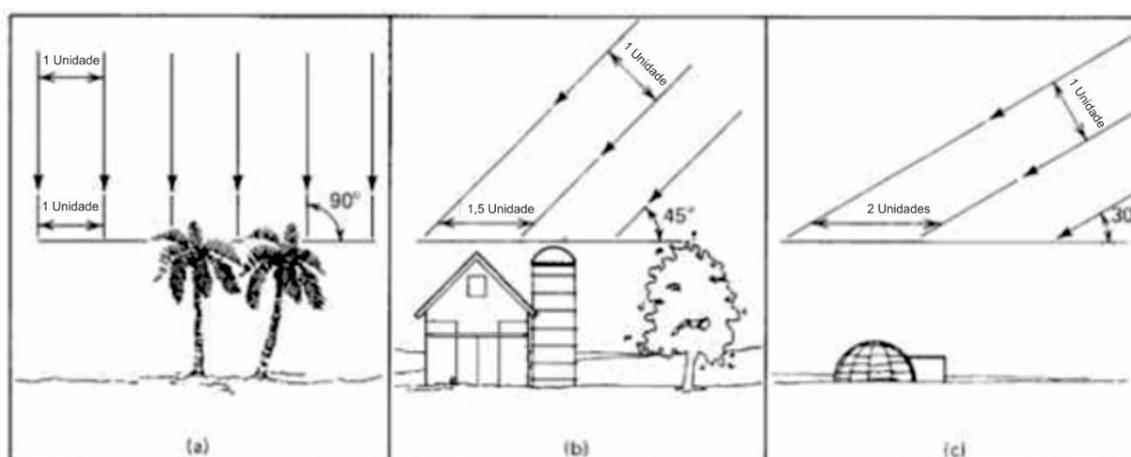
3.2 RADIAÇÃO SOLAR

Para melhor entendimento é importante definir, de forma genérica, que a energia radiante do Sol que chega ao planeta terra é chamada de radiação solar. Esta radiação é a somatória de luzes diretas e difusas onde parte é absorvida pela atmosfera e apenas uma fração atinge a superfície. A luz que chega até a superfície

inclinada dos módulos contém o acréscimo de uma parcela de luz refletida na superfície e nos elementos entorno (TOLMASQUIM, 2016).

Para a produção de energia solar, o fenômeno que mais interessa é a irradiação solar, que é a quantificação da radiação recebida na superfície plana horizontal composta por luz difusa e direta. Ela é medida em *Watt* hora por metro quadrado (Wh/m^2) e pode sofrer variações ao longo do dia e do ano, dependendo da localidade, da geografia terrestre e dos movimentos de rotação e translação. O movimento de translação ao redor do Sol ocorre numa órbita elíptica, já o movimento de rotação é realizado em torno do seu eixo vertical que possui uma inclinação fixa de $23,45^\circ$ em relação ao eixo normal da Terra. Diante disso, pode-se dizer que nem toda superfície da Terra é perpendicular aos raios solares, o que diminui a taxa de insolação num plano horizontal e conseqüentemente a energia solar entregue por área desta superfície, a isso denomina-se irradiância solar que é a potência (*Watt*) por metro quadrado (W/m^2). Portanto, a irradiância solar varia conforme a localidade na Terra e o tamanho da área disponível (Figura 8). A quantidade de raios solares que atingem o plano localizado próximo a linha do equador (a) é maior que a quantidade de raios que incidem sobre o plano em regiões (b) e (c) mais distantes a esta. Logo, a irradiância também é maior se considerado a somatória de todo o ano. Este fenômeno é conhecido como efeito cosseno (CATARIUS; CHRISTINER, 2001).

Figura 8 - Raios solares recebidos na Terra por unidade de área



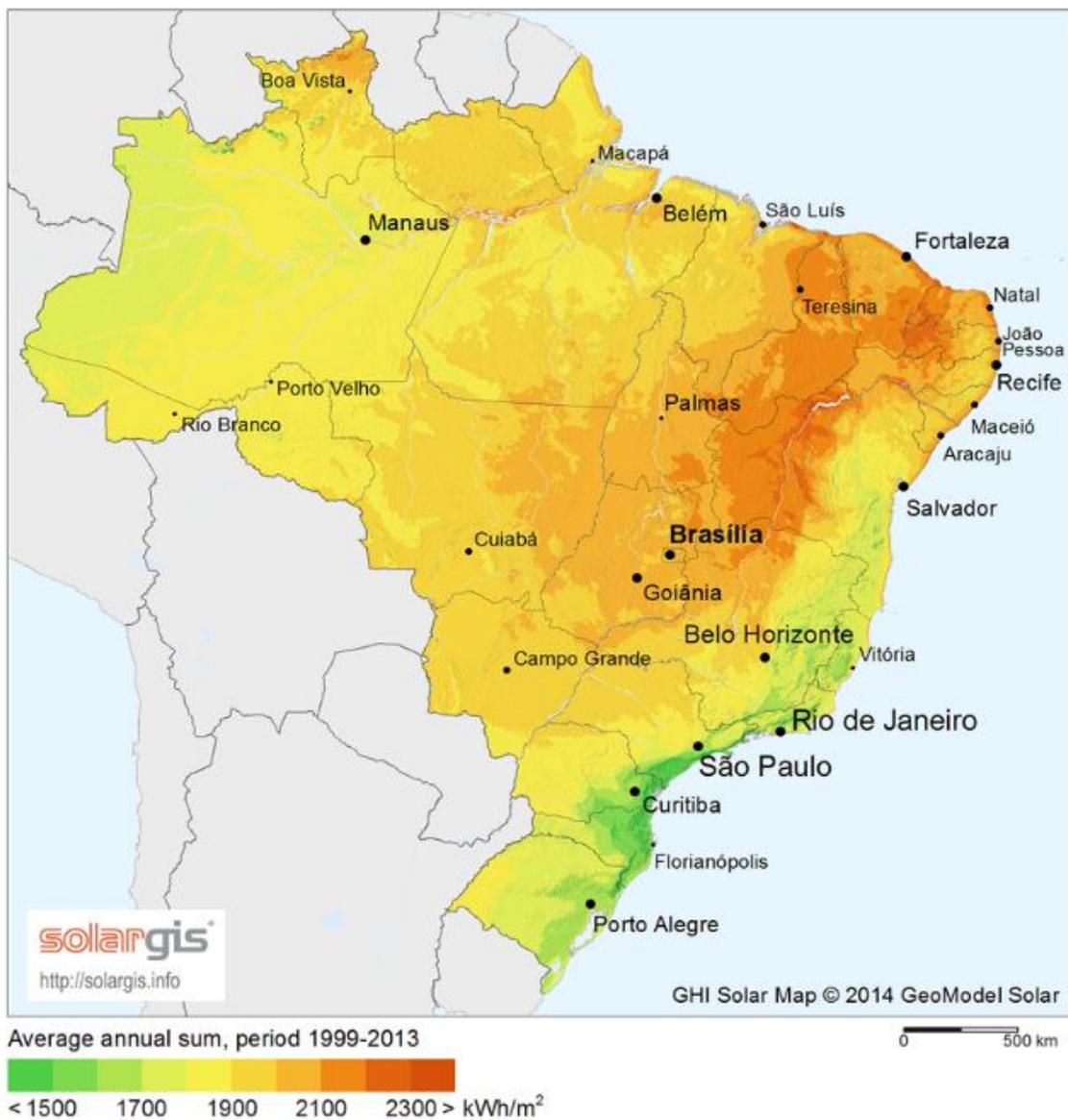
Fonte: GRIMM, 2004.

O Brasil estar próximo à linha do equador e é considerado um país com elevados índices de incidência de radiação solar e oferece grande potencial energético em quase todo seu território nacional em uma escala que vai de 1500 a 2300 kWh/m² (Figura 9).

O Brasil apresenta em sua região de menor potencial que o valor supera a região de maior potencial da Alemanha que é de 1200 kWh/m². A Figura 9 demonstra que as regiões avermelhadas são inicialmente mais propensas a implantação de um sistema fotovoltaico devido a capacidade de se obter maior produção de energia. No entanto, considerando a faixa de variação de irradiação global horizontal do Brasil que vai de 1500 a 2300 kWh/m², pode-se inferir que todo território brasileiro é praticamente satisfatório.

Mesmo com um potencial de irradiação menor que o Brasil, a Alemanha é o país no mundo com maior número de sistemas solares fotovoltaicos instalados atualmente (IEA, 2013). Por isso, há muito a ser explorado em todo território brasileiro e em qualquer época do ano.

Figura 9 - Irradiação direta solar média no Brasil (kW/m²)



Fonte: SOLARGIS, 2015.

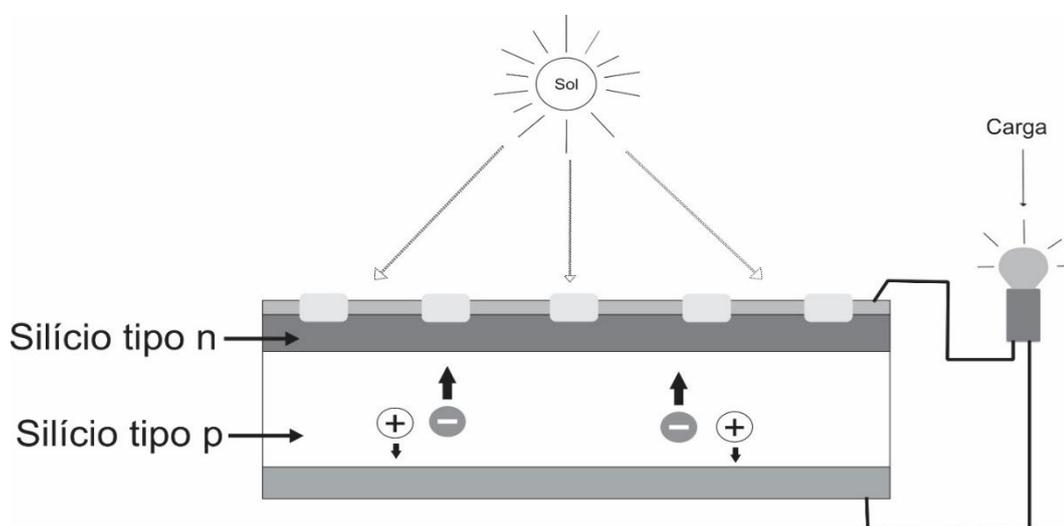
3.3 EFEITO FOTOVOLTAICO

O efeito fotovoltaico é dado pela absorção dos raios luminosos por certos materiais semicondutores que são capazes de transformar esta energia em eletricidade. No caso dos módulos fotovoltaicos, esta transformação ocorre dentro das células fotovoltaicas que sofrem uma perturbação ao ser iluminada pela luz do Sol. Quando a

luz é absorvida ocorre um desalojamento de elétrons dos átomos na célula que se movimentam livremente através das estruturas cristalinas do material (ALVES, 2008).

A luz causa o deslocamento de cargas e é criado um campo elétrico que atrai elétron para a região n e ao mesmo tempo criando uma lacuna na região p, gerando assim, uma diferença de potencial (ddp) e estabelecendo uma corrente elétrica (i) chamada de fotocorrente, conforme a Figura 10. Quanto mais luz incide-se sobre a célula, maior será o fluxo de elétrons, e conseqüentemente, maior será a corrente (ZILLES *et al*, 2012).

Figura 10– Representação simplificada de uma célula com carga



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a ausência de luz solar, a célula para de receber a energia dos fótons e ocorre um equilíbrio que impede o fluxo de novos elétrons. Forma-se uma zona com cargas positivas e negativas, denominada de zona de depleção. A zona de depleção recebe este nome por praticamente não existirem portadores, ou seja, $n \approx 0$ e $p \approx 0$ (PINHO; GALDINO, 2014). Por consequência, a tensão de polarização tende a zero devido a corrente dos portadores ficando num estado de equilíbrio dinâmico. Deste modo, os Níveis de Fermi¹ se igualam. Mas quando a célula é exposta a luz, um campo elétrico é criado entre a junção pn e a energia faz acelerar as cargas através das correntes (OLDENBURG, 1994).

A corrente dentro da célula pode ser dividida em duas partes: deriva (i_D) e difusão (i_d). A corrente i_D é dos portadores que se movem por efeito do campo elétrico das regiões

de menor concentração para as regiões de maior concentração. A i_D ainda pode ser subdividida ainda em duas componentes: a corrente de lacuna que se movem do lado n para o lado p (I_{Dp}) e a corrente de elétrons que se movem do lado p para o lado n (I_{Dn}) (Figura 11). A i_d é resultante da diferença de concentrações de elétrons e lacunas nos dois lados da junção pn. Esta ainda pode ser subdividida em outras duas: corrente de lacunas do lado p para o lado n (i_{dp}) e corrente de elétrons do lado n para o lado p (i_{dn}) (OLDENBURG, 1994). Para melhor representação destas divisões, observa-se o Quadro 1.

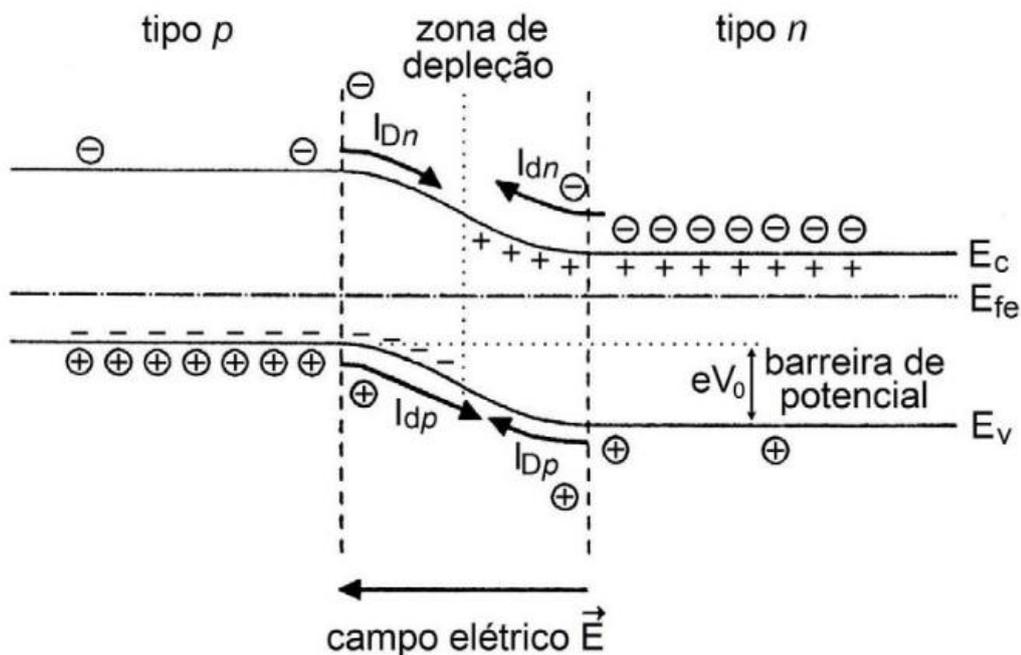
Quadro 1 – Divisões de correntes dentro de uma célula fotovoltaica

Correntes	De lacuna	De elétrons
Deriva (i_D)	$n \rightarrow p$ (I_{Dp})	$p \rightarrow n$ (I_{Dn})
Difusa (i_d)	$p \rightarrow n$ (i_{dp})	$n \rightarrow p$ (i_{dn})

Fonte: Elaborado pelo autor.

¹ Nível de Fermi é denominado como o potencial eletroquímico para elétrons.

Figura 11 – Região com junção pn mostrando a barreira de potencial e correntes



Fonte: OLDENBURG, 1994.

Na Figura 11, E representa o campo elétrico, E_v o nível máximo de energia na banda de valência, E_c o nível inferior de energia da banda de condução e E_{fe} é o Nível de Fermi. A barreira de potencial que surge na junção pn pode ser interpretada como uma energia eV_0 , onde V_0 é a ddp e e é a carga do elétron.

Desda maneira, a ddp da junção pn quando há equilíbrio, em função da temperatura, pode ser calculada pela Equação (1). Onde $V_0(T)$ é a diferença de potencial na junção, n_i é concentração de portadores intrínsecos no material, N_d é a concentração do dopante tipo n, N_a é a concentração do dopante tipo p, q é a carga do elétron ($1,6 \times 10^{-19} \text{C}$), k é a constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$) e T é a temperatura absoluta (K).

$$V_0(T) = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \quad (1)$$

De acordo com o material utilizado para conversão na célula, a transformação pode fornecer maior ganho energético. Normalmente, o silício (Si) é o elemento mais utilizado pelas indústrias para fabricação da célula fotovoltaica monocristalina ou policristalina por ser mais abundante na natureza (SANTOS, 2013).

O silício monocristalino é obtido a partir de barras cilíndricas, através de cortes em forma de pastilhas finas ou *wafers*. Sua eficiência para conversão de energia solar em elétrica pode ultrapassar facilmente 12%. Tal tecnologia de conversão torna a eficiência a célula monocristalina superior à célula policristalina. O Módulo é encontrado no Brasil para comercialização, mas em pequena escala, e possuem maior valor agregado que o módulo policristalino (CASTAÑEDA, 2011).

O silício policristalino é obtido a partir de blocos de silício por fusão de silício puro em moldes especiais. Em sua estrutura final ocorre pequenas separações entre os cristais em sua superfície. O módulo é facilmente encontrado em grande escala comercial e já possui fabricação brasileira, o que o torna mais acessível economicamente (CASTAÑEDA, 2011).

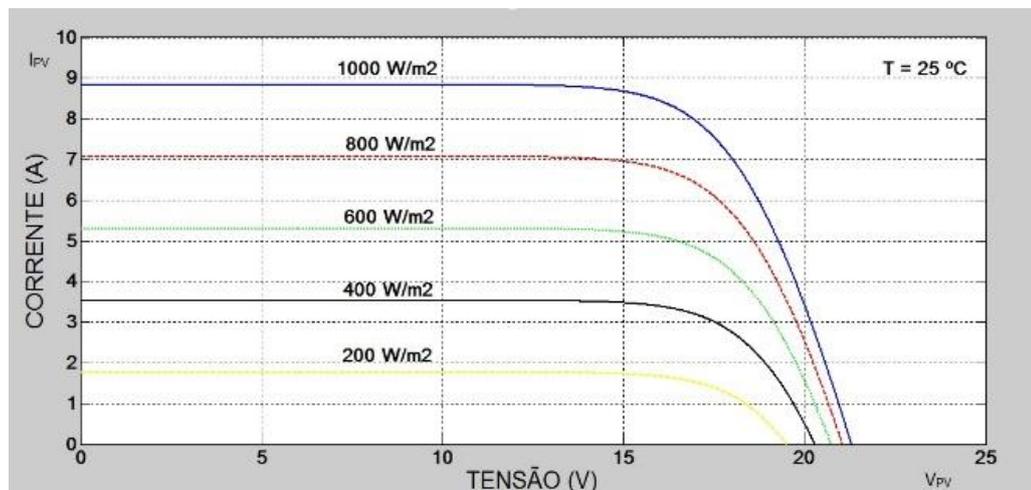
3.4 SEGUIDOR SOLAR

A estrutura de sustentação dos painéis com seguidor solar é projetada para garantir a máxima irradiância solar ao longo do dia e em qualquer época do ano, levando em conta que a produção de energia por uma célula fotovoltaica está diretamente relacionada com a quantidade de raios solares que incide sobre ela por metro quadrado (W/m^2) conforme a Figura 12 (CRESESB, 2004).

Pela Figura 12, no momento que há nuvens que bloqueiam os raios solares, por exemplo, a intensidade da radiação também diminui e a corrente produzida diminuirá na mesma proporção, mas se a irradiância for grande como a de $1000 W/m^2$ (linha no topo do gráfico) tanto a corrente como a tensão do módulo serão máximos.

O rendimento do módulo utilizado neste experimento foi definido nas condições padrão de teste dos módulos para a curva de $1000W/m^2$ para uma radiação recebida na terra em dia claro ao meio dia e com temperatura em torno de $25^\circ C$, conforme a Figura 12. Nestas condições testadas pelo fabricante, o módulo apresenta uma máxima eficiência de conversão, sendo que a eficiência do módulo diminui com o aumento da temperatura.

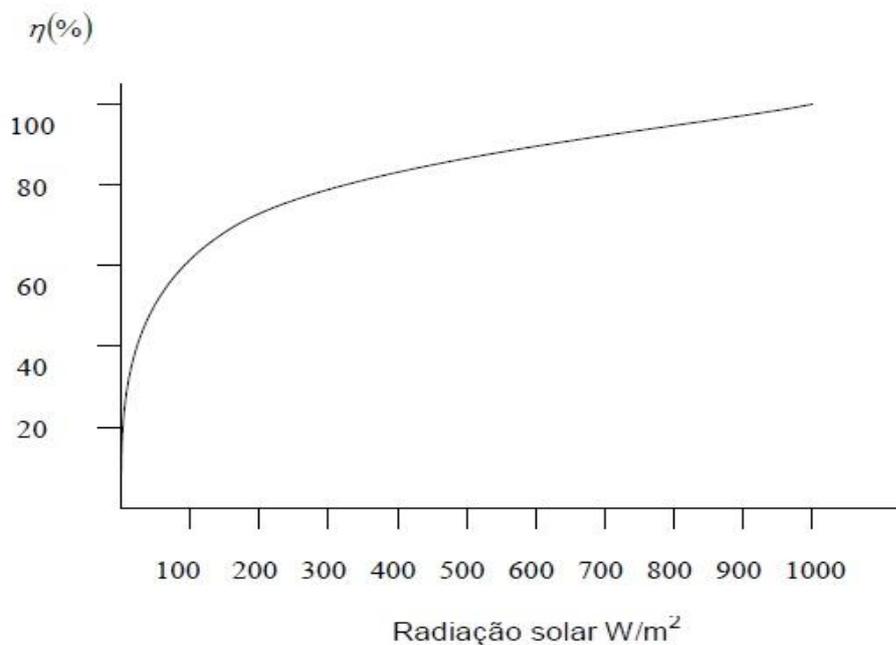
Figura 12 - Curva características de Tensão-Corrente de células fotovoltaicas



Fonte: CARVALHO, 2011.

Existe ainda uma relação entre a eficiência de conversão de energia e a radiação solar, onde, quanto maior a radiação maior será a taxa de eficiência do módulo dentro das condições ideais de operação (Figura 13). Esta eficiência varia, principalmente, ao longo do dia com a movimentação do Sol, onde no hemisfério Sul vai de Leste para Oeste quando o módulo é posicionado de forma adequada para direção norte (FADIGAS, 2004).

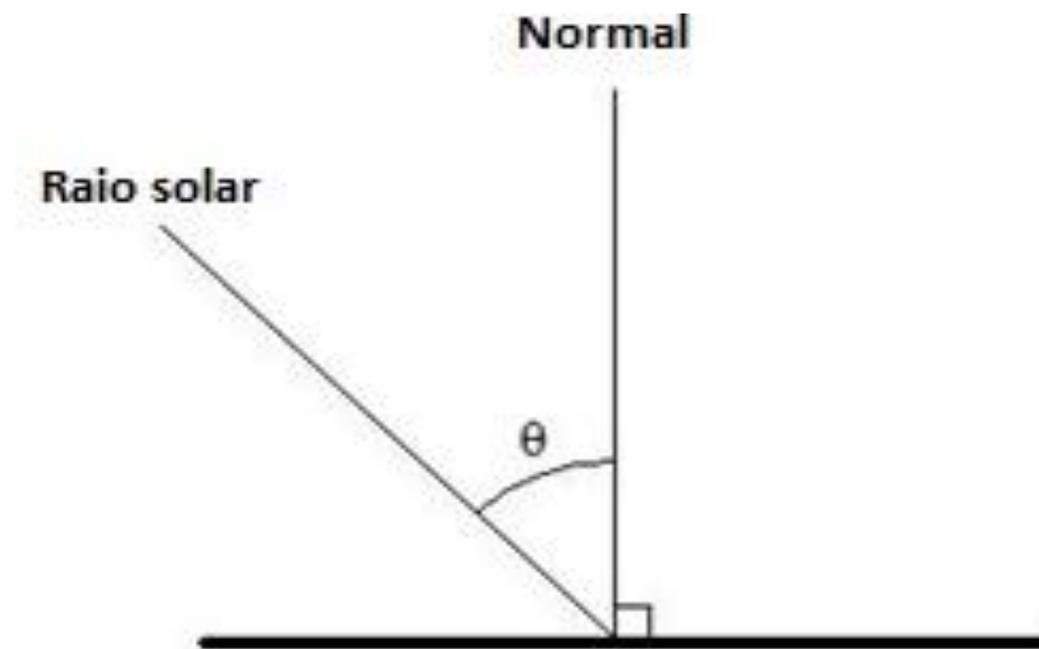
Figura 13 - Eficiência de conversão pela radiação solar.



Fonte: FADIGAS, 2004.

Diante disso, é importante levar em conta a forma como o raio solar incide sobre o módulo conforme a Figura 14, onde se pode verificar a Normal sobre a face plana da célula (ângulo de 90°) e o raio solar formando um ângulo θ de incidência entre a normal.

Figura 14 - Ângulo de incidência sobre uma célula fotovoltaica



Fonte: Elaborado pelo autor.

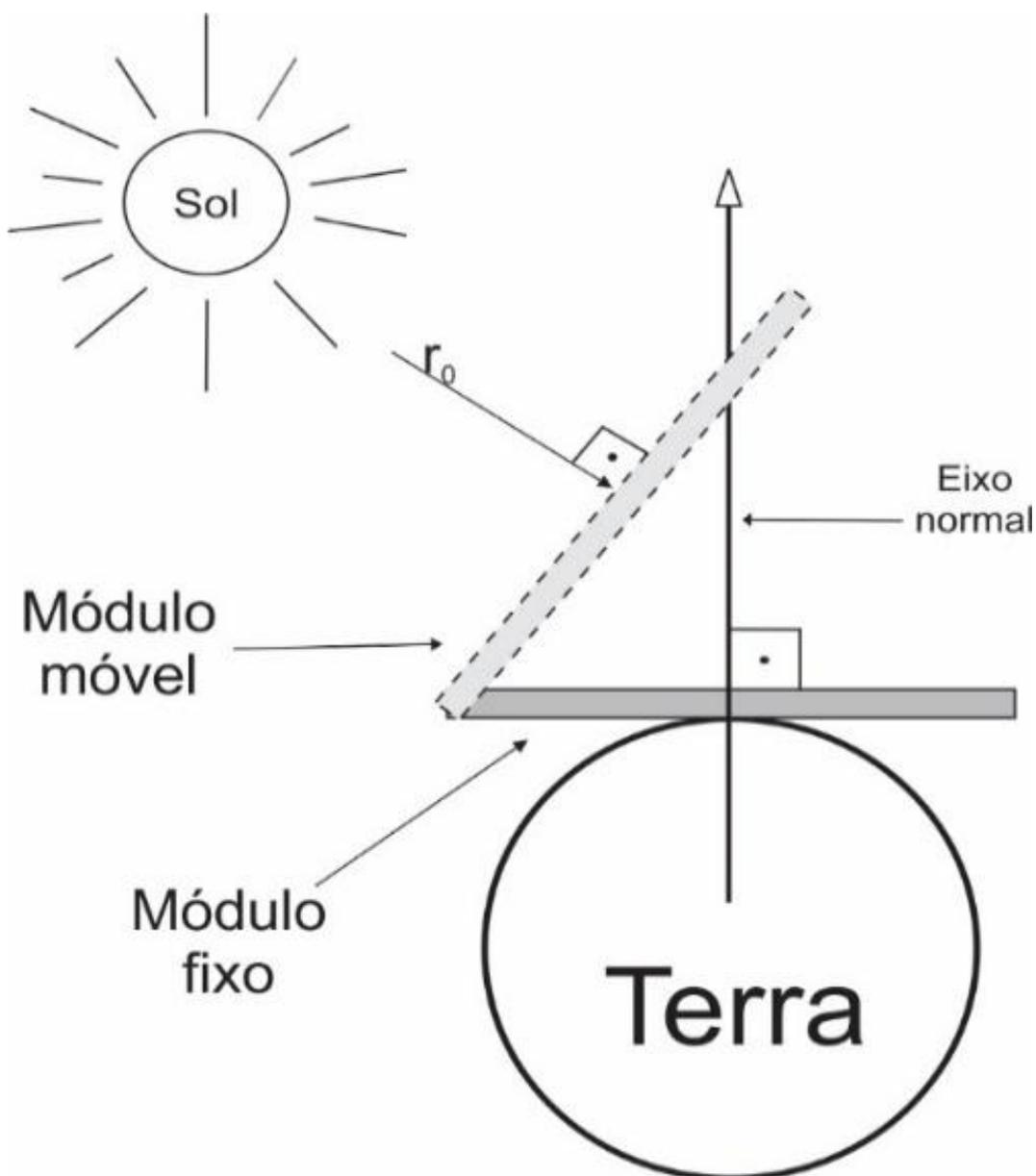
Assumindo que a normal seja representada pela variável G como a irradiância global de um módulo definido como a densidade de potência incidente sobre uma superfície plana perpendicular aos raios solares (W/m^2) (RIBEIRO, 2012). Pode-se definir que a irradiância útil I_u no módulo é dada pela Equação 2:

$$I_u = G \cos\theta \quad (2)$$

A máxima potência vai ser gerada quando o raio solar atingir o módulo de forma paralela a normal ($\theta = 0^\circ$) sendo que uma produção nula ocorrerá quando o raio for perpendicular à normal ($\theta = 90^\circ$). Por isso, que na produção do módulo fixo há perdas significativas de potência durante o dia devido à não perpendicularidade dos raios solares na maior parte do tempo, pois os raios solares incidentes sobre o módulo fotovoltaico variam de ângulo conforme a movimentação da terra em relação ao Sol e isto interfere diretamente na produção de energia elétrica (ALVES, 2008).

Contudo, tal problema pode ser minimizado usando-se um sistema que faça com que $\theta \rightarrow 0$ à medida que o Sol se movimenta (Figura 15). Observando o raio solar (r_0) incidindo sobre a superfície de forma perpendicular (Figura 15), pode-se inferir que haverá maior produção de energia elétrica pelo módulo fotovoltaico móvel que o módulo fixo (CATARIUS; CHRISTINER, 2010).

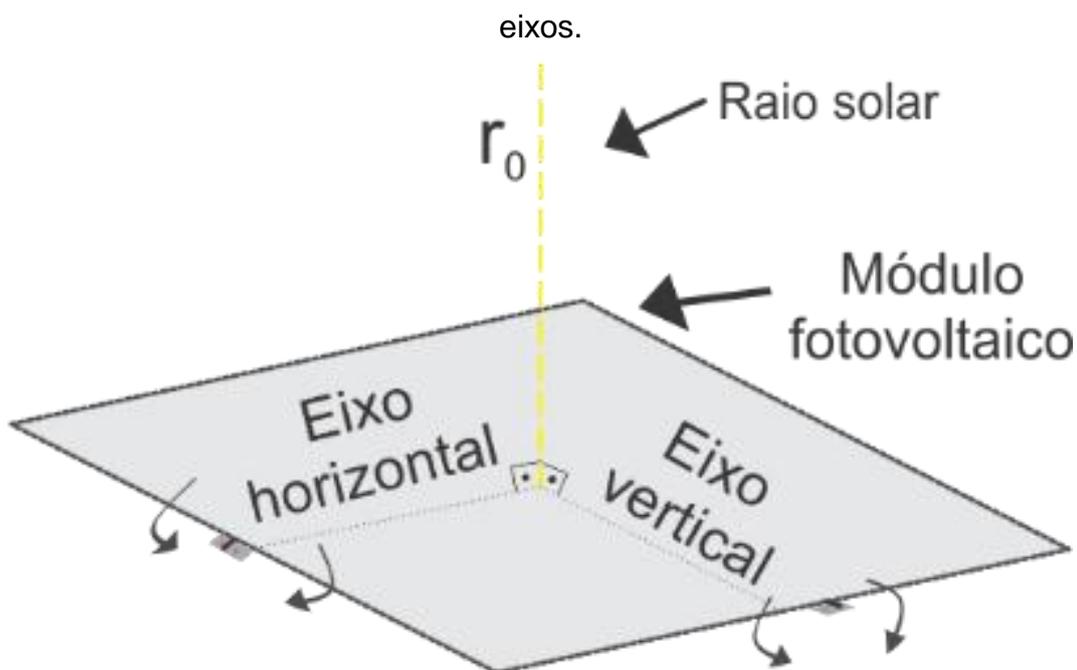
Figura 15 - Raio solar incidindo sobre a Terra.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando, então, uma estrutura de sustentação com dois graus de liberdades que permite a movimentação do módulo no sentido vertical e horizontal, pode-se afirmar que o objetivo é manter o raio r_0 perpendicular ao módulo fotovoltaico (Figura 16).

Figura 16 - Módulo fotovoltaico com raio r_0 incidindo perpendicularmente



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 representa a superfície do módulo fotovoltaico (cor cinza) posicionado para o Sol e recebendo o raio r_0 que forma um ângulo de 90° com o eixo horizontal e 90° com o eixo vertical, de forma a obter o máximo de produção de energia elétrica. Após esta análise de movimentação da estrutura, será verificado também o consumo dos dois motores no sistema móvel durante o dia.

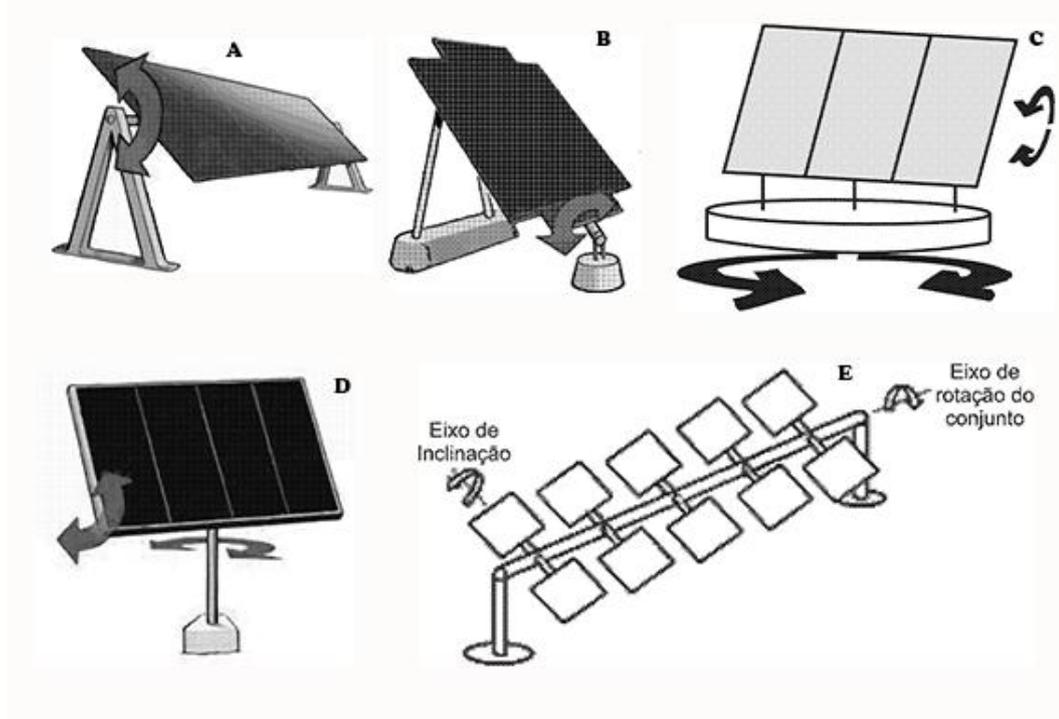
3.4.1.1 Arquitetura das estruturas móveis

Os rastreadores ou seguidores solares que utilizam a estrutura de um único eixo são os que consomem menos energia, geralmente, pelo fato de usarem apenas um motor (Figura 17). Porém, apresentam menor eficiência pelo fato de seguir uma orientação. Seu movimento pode ser horizontal, vertical ou inclinado e sua orientação pode seguir

o eixo norte-sul ou o eixo leste-oeste, sendo que os mais comuns são os de eixo leste-oeste por onde o Sol se movimenta durante o dia (TREVELIN, 2014).

As estruturas que apresentam dois eixos de movimentação podem acompanhar o Sol com maior precisão ao longo do dia. Possuem a capacidade de se orientarem leste-oeste que altera o ângulo azimutal e também podem alterar o ângulo de altitude no sentido norte-sul. Estas estruturas podem ser classificadas em plataforma giratória, pedestal e *roll-tilt*, (Figura 17). Estruturas de dois eixos costumam ser mais complexas devido ao tipo de técnica adotada de seguir o Sol, por exigir maior gasto de energia para acionamento dos motores e maior precisão na programação por parte do controlador (TREVELIN, 2014). Mas o deslocamento da estrutura também pode ser realizado manualmente em alguns casos de estruturas menores.

Figura 17 – Estruturas móveis



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 17 representa as estruturas móveis existentes no mercado onde o rastreador solar de eixo horizontal (A) - Seguidor solar de eixo vertical ou polar (B) - Estrutura do tipo plataforma giratória (C) - Estrutura do tipo pedestal (D) - Estrutura do tipo *roll-tilt* (E).

O rastreador solar de eixo horizontal é indicado para usinas com grande quantidade de módulos e possui boa eficiência quando próximo a linha do equador. Possui a característica de se movimentar de leste-oeste como na Figura 17-A (LIRA, 2014).

O rastreador solar com eixo vertical ou polar é uma estrutura móvel de apenas um eixo, também chamada de Azimutal e apresenta uma inclinação fixa e um eixo vertical em relação a superfície terrestre conforme visto na Figura 17-B. Seu movimento consiste de leste para oeste durante o dia, e é melhor aplicado em regiões de altas latitudes (MORAES, 2012).

A estrutura do tipo Pedestal possui uma base fixa e um mastro giratório do sentido leste-oeste. Também possui outro motor que realiza o movimento na horizontal, norte-sul, ilustrado na Figura 17-D.

Estruturas do tipo plataforma giratória possuem grande base circular para suportar o peso da estrutura e dos módulos, e para realizar os movimentos horizontais, conforme visto na Figura 17-C. Este tipo, é ideal para grandes estruturas no formato parabólico e costuma ser utilizado também com concentradores.

Existem ainda estruturas moveis que permitem a adição de vários módulos fotovoltaicos, como na Figura 17-E, semelhante as antenas de televisão doméstica chamadas espinha de peixe ou *roll-tilt*. Esta estrutura permite uma fundação menor que a pedestal, porém maior complexidade devido ao acrescido de partes mecânicas que necessitam rotacionar.

Na estrutura espinha de peixe, observa-se que existe um motor ligado ao eixo central maior que rotaciona nos dois sentidos, esquerda e direita. E há ainda outros eixos secundários menores onde são instalados os módulos fotovoltaicos, um de cada lado. Estes eixos secundários também se movem nos dois sentidos com auxílio de outro motor.

3.5 REGULAMENTAÇÃO E ACESSO À REDE

Ao longo dos anos a ANEEL criou normas e regulamentação sobre a implementação da geração distribuída de energia, dentre elas pode-se destacar a que concede isenção de Imposto Cobrado sobre Mercadoria e Serviços (ICMS) sobre a circulação de energia sujeitas ao faturamento para gerações sob regime de compensação, o convênio ICMS 16/2015 do Conselho Nacional de Política Fazendária (CONFAZ). Tal convênio ainda não foi adotado por todos os estados brasileiros, pois a adoção do convênio é optativa (VIVACQUA, 2016). Mas quando um estado brasileiro decide adotar este convênio, todas as instalações do SFCR não terão o ICMS cobrado sobre a produção de energia mensalmente. O valor cobrado chega a taxa de 25% sobre a produção de energia. Isso significa que o cliente de uma concessionária pode ser tributado duas vezes, tanto pelo consumo energético como por sua própria produção que é injetada na rede local. Este tipo de tributação ainda é presente em 6 estados brasileiros (VIVACQUA, 2016)

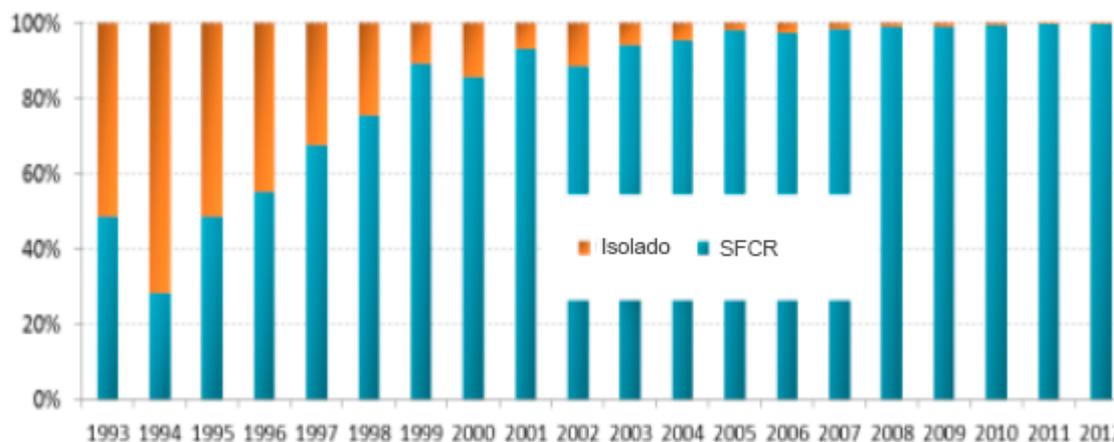
O SFCR não apresenta uma regra a nível nacional que padronize sua implementação, mas cada distribuidora possui suas próprias regras para realizar a ligação do sistema à rede elétrica. Basicamente, é necessário observar os requisitos para conexão regidos pelo PRODIST que representa o instrumento regulatório de normatização e padronização das atividades relacionadas ao funcionamento do sistema distribuído.

A principal regulamentação é o módulo 3 que está relacionada aos sistemas de geração distribuída e define critérios técnicos e operacionais para ter acesso ao sistema da concessionária e injetar energia dentro do regime de compensação.

3.5.1 Fundamentos teóricos sobre sistema fotovoltaico conectado à rede

Além da classificação entre sistemas móveis e fixos, os sistemas de geração fotovoltaicos também podem ser classificados como isolados (*off grid*) ou conectados à rede elétrica (*grid tie*).

Figura 19 - Evolução do sistema isolado e conectado à rede



Fonte: IEA, 2013 (adaptada).

O SFCR já utilizado no Brasil e toda energia produzida e consumida pela edificação é contabilizada por um medidor bidirecional de kWh, de forma que haja uma livre negociação entre o produtor e a empresa concessionária local sobre a geração de energia. Segundo a Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL, a concessionária não é obrigada a pagar um valor monetário pela energia produzida, mas ela deve observar o que foi produzido em kWh para ser abatido na conta de energia do consumidor/gerador nos próximos meses.

3.6 VIABILIDADE ECONÔMICA

Sabe-se que o retorno do investimento financeiro para aquisição de um sistema solar fotovoltaico normalmente é de longo prazo e, por isso, existe a necessidade de um estudo para avaliar a viabilidade da aplicação do capital, utilizando parâmetros econômicos, afim de auxiliar nas tomadas de decisões de investimentos. O processo de tomada de decisões financeiras ocorre segundo critérios racionais e envolve mensuração do fluxo de caixa com o custo do dinheiro no tempo, além da observação de outras taxas de rentabilidade do mercado. Assim, uma proposta se torna atraente quando seu retorno apresenta uma taxa mais interessante que outros investimentos no mesmo espaço de tempo (NETO, 2009).

Ao tomar uma decisão sobre o investimento de um capital, o administrador do recurso deve observar outras alternativas de diferentes rentabilidades e com riscos semelhantes. Quando o administrador não observa outras alternativas, pode impedir o investimento de obter maior ganho por não escolher uma oportunidade em detrimento de outra, isto pode gerar um custo de oportunidade. Dessa forma, o administrador do recurso deve avaliar a atratividade dos investimentos e comparar o retorno esperado em ambos utilizando parâmetros econômicos (NETO, 2009). De acordo com Lemes Jr., Rigo e Cherobim (2010, p. 7), o investimento é “toda a aplicação de capital em algum ativo, tangível ou não, para obter determinado retorno futuro. Um investimento pode ser a criação de uma nova empresa ou implantação de um projeto em uma já existente, por exemplo”.

Portanto, é importante realizar a verificação de todas as variáveis econômicas envolvidas em um investimento antes da tomada de decisão, pois Braga (1995, p. 34) menciona que o “investimento em novos ativos pode trazer muitos efeitos sobre a vida do administrador e uma decisão inadequada poderá comprometer irremediavelmente o seu futuro”.

A seguir, são apresentados os principais modelos quantitativos como o fluxo de caixa, taxa mínima de atratividade, valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e *payback* descontado para auxiliar no processo de tomada de decisão.

3.6.1 Fluxo de caixa

Todas as entradas e saída de recurso devem ser observadas pelo investidor. A análise do dinheiro destas movimentações ao longo do tempo faz-se através do método chamado fluxo de caixa. Santos (2001, p. 57) conceitua que, “fluxo de caixa é um instrumento de planejamento financeiro que tem por objetivo fornecer estimativas da situação do caixa em determinado período de tempo à frente”. Portanto, o fluxo de caixa é fundamental para o investidor visualizar as entradas e saídas de recurso ao longo do tempo e acompanhar o desempenho do projeto. Este método garante maior controle financeiro e credibilidade às informações (STRACHOSKI, 2001).

3.6.2 Taxa mínima de atratividade (TMA)

Segundo Hochheim (2003) a taxa de desconto ou taxa mínima de atratividade é a menor taxa de rentabilidade de um investimento por um determinado espaço de tempo. Portanto, qualquer taxa acima da TMA, que é tomada como referência para tomada de decisão, pode ser interessante por gerar ganhos financeiros que compensam o tempo e os riscos do investimento. Quando analise-se a viabilidade econômica da implantação de um SFCR que apresenta uma taxa maior que a TMA, pode-se inferir que o investimento é aplicável.

3.6.3 Valor presente líquido (VPL)

O valor presente líquido é a soma algébrica de todos os fluxos de caixa descontados levados para o instante atual do investimento utilizando uma taxa de juros que geralmente é o mesmo valor da TMA (MOTTA, 2013). Para avaliar se o valor do VPL é desejável, Souza e Clemente (2001, p. 69) argumentam que “em princípio, nenhum número é bom ou ruim, a menos que possa ser comparado com uma referência”. Portanto, a análise seguirá as seguintes regras:

- A) $VPL > 0$ – a implantação do SFCR pode ser aplicado;
- B) $VPL = 0$ – a implantação é indiferente;
- C) $VPL < 0$ – a implantação não deverá acontecer.

A expressão para o cálculo do VPL é representada pela Equação (3).

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_{Ct}}{(1+r)^t} \quad (3)$$

Onde I_0 indica o valor inicial investido, t o tempo em anos, n a quantidade de anos do fluxo de caixa, F_{Ct} é o fluxo de caixa relativo ao valor investido no sistema e r é a taxa de retorno ou de desconto. Caso o valor do VPL seja maior que zero, o investimento pode ser aplicado na implantação do SFCR. Caso não seja, será rejeitado devido as desvantagens econômicas.

3.6.4 Taxa interna de retorno (TIR)

A taxa interna de retorno observa a rentabilidade do valor investido e os valores que entram e que saem do caixa num único momento, é a taxa que produz um VPL igual a zero (KASSAI *et al*, 2000). Considerando que o fluxo de caixa da análise possui períodos constantes, a TIR servirá para analisar o valor do dinheiro no tempo e qual a rentabilidade do projeto expressa em termos de taxa de juros compostos (NETO, 2009).

É um dos parâmetros mais desejáveis de ser obtido, pois determina se o investimento financeiro deve ser aplicado ou não, dependendo se for maior ou não que outras taxas do mercado.

A TIR costuma ser comparada à Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Logo, se a TIR encontrada no investimento for maior que a TMA, o investimento torna-se mais atraente para aplicação de recurso financeiro por ser lucrativo. Porém, se a TIR apresentar valor menor que a TMA, a implantação do SFCR não é viável.

3.6.5 Prazo de recuperação do investimento ou *Payback* descontado

Prazo de recuperação do investimento é o tempo que o investimento leva para ser recuperado de acordo com o fluxo de caixa descontado. Onde, leva-se em consideração a taxa de desconto antes de se proceder à soma dos fluxos de caixa e também deve-se levar em conta o período máximo aceitável pelo investidor para recuperar seu capital (GITMAN, 2004).

O *payback* descontado costuma não ser uma ferramenta determinante para tomada de decisão, mas é uma técnica de apoio que ajuda na avaliação do investimento diante de seu fluxo de caixa no tempo, pois quanto mais breve for o período de *payback*, mais atraente será o investimento (GITMAN, 2004).

4 MATERIAS E MÉTODOS

A pesquisa realizada neste trabalho pode ser dividida em duas etapas, que inclui pesquisa de matérias a ser utilizado, montagem do experimento, coleta de dados e análise. Na primeira etapa, foi construído um protótipo de seguidor solar com 1 módulo de 55 Wp com dois eixos para encontrar a taxa de ganho de energia em relação ao sistema fixo. Já na segunda etapa, de posse da taxa de ganho obtida pelo protótipo, utilizou-se como referência um SFCR fixo de tamanho comercial de 1,56 kWp, em funcionamento na cidade de São Mateus – ES, para estimar os ganhos alcançados caso o mesmo sistema fosse instalado com um seguidor solar. O sistema móvel de mesma dimensões do SFCR não foi implantado por falta de recursos, mas foi simulado sua operação neste trabalho. Logo depois, realizou-se a comparação entre dois SFCR de 1,56 kWp, um fixo já instalado e em funcionamento, e com outro móvel com as mesmas características técnica, simulou-se seu funcionamento utilizando a mesma produção do sistema fixo acrescentando o ganho percentual do protótipo.

Para realização de todo experimento e análises, pesquisou-se qual a estrutura mais adequada para obter maior rendimento, qual tipo de motor adequado e como coletar os dados da produção de energia durante o dia.

4.1 MÓDULO FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO

Primeiramente, pensou-se em qual módulo fotovoltaico adquirir para realizar os experimentos de forma que fosse semelhante aos usados comercialmente e possuísse um peso suficiente para que os motores suportassem. Por isso, adquiriu-se o módulo fotovoltaico de fabricação chinesa da marca *Yingli* e que possui as seguintes especificações técnicas apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Especificações técnicas do módulo fotovoltaico

Descrição	Valores
Máxima potência (Wp):	55,00
Tensão em máxima potência (V):	17,83
Corrente de máxima potência (A):	3,08
Eficiência do painel (%):	13,20
Dimensões (mm):	660 x 630 x 25
Massa do módulo (kg):	4,79
Número de células	36
Tipo de célula	Silício policristalino

Fonte: Elaborado pelo autor.

O módulo fotovoltaico foi posicionado, primeiramente, sobre uma superfície plana com inclinação de 19° com o auxílio de um inclinômetro (aparelho que mede o ângulo de inclinação da superfície). Este valor do ângulo de inclinação foi adotado devido a latitude geográfica da localidade do experimento (19°23'06.5"S).

Logo em seguida, foi direcionado para o norte com auxílio de uma bússola e posicionado com inclinação de 19° com auxílio de um inclinômetro digital, de forma que houvesse a captação dos raios solares durante todo o dia sem qualquer interrupção, conforme visualizado na Figura 20. Esta produção de energia diária foi coletada de 7h às 17h, num total de 10 horas por dia.

Nos primeiros experimentos, o módulo foi posicionado sobre uma superfície, onde coletou-se a produção de energia no segundo semestre de 2015 sem qualquer sombreamento.

Figura 20 - Módulo fotovoltaico da Yingli



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 MOTOR DC

Logo após, pesquisou-se sobre qual tipo de motor utilizar, se seria o motor de passo ou *Direct Continuous* (DC). Observou-se que o motor de passo seria adequado para utilização devido a capacidade de seu eixo realizar pequenos movimentos, contudo, é um motor de alto custo, que necessitaria da aquisição também de uma placa que gerasse um sinal *Pulse Width Modulation* (PWM) dedicada para seu acionamento. Em vista do alto custo para aquisição de todo conjunto de material do motor de passo, o motor DC com caixa de redução por possuir a mesma finalidade, além de possuir um baixo custo e por fornecer pequenos movimentos lentos com alto torque. O motor DC também necessita de uma placa dedicada para acionamento como o motor de passo com custo menor.

Foram utilizados 2 pequenos motores DC 12 V com caixa de redução da *Akiyama Motors* (Figura 21) para fornecer baixa velocidade, cerca de 3 rpm (rotações por minuto), e também um elevado torque que corresponde a 15 kgf.cm. Um motor é responsável por realizar o movimento da estrutura no eixo vertical (leste-oeste) e outro motor é responsável por realizar o movimento no eixo horizontal (norte-sul), tornando assim a estrutura com dois eixos bidirecionais.

Figura 21 - Motores DC 12 V c/ cx. redução



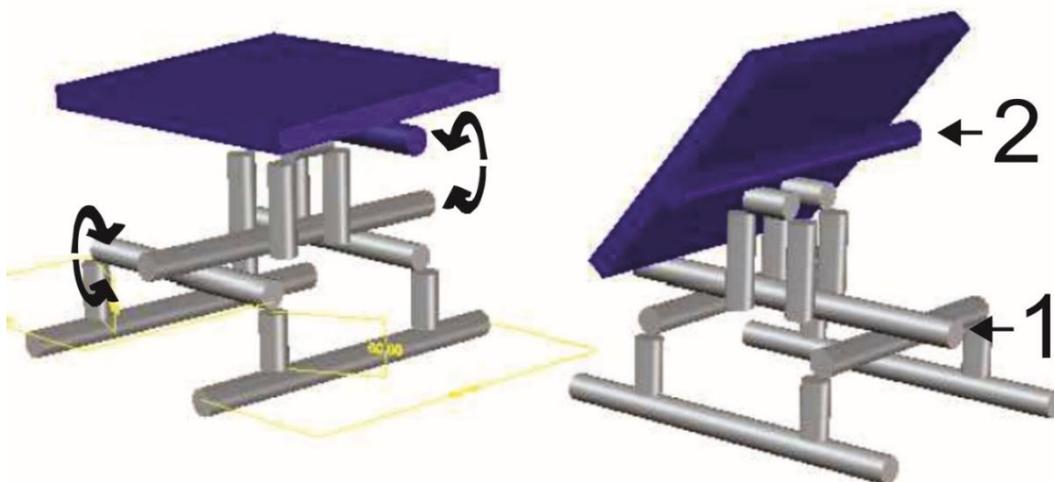
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 ESCOLHA DA ESTRUTURA MÓVEL

Pesquisou-se qual melhor tipo de estrutura que captasse mais raios solares, por isso optou-se por uma estrutura de dois eixos e que tivesse baixo custo para montagem. Antes de ser construída, a estrutura foi elaborada com auxílio de um *software Computer Aided Design (CAD)* para melhor visualização de como seria os movimentos, dimensionar tamanho e levantar os materiais necessários. O protótipo apresenta dois eixos horizontais, 1 e 2, indicados que possibilita o movimento bidirecional (Figura 22).

Para a construção, utilizou-se canos Policloreto de Vinila (PVC) de 20 mm para água fria, normalmente utilizados em residências e chegou-se à estrutura observada na Figura 23.

Figura 22 - Primeira estrutura desenhada em CAD



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23 – Primeira estrutura móvel com cano PVC de 20 mm

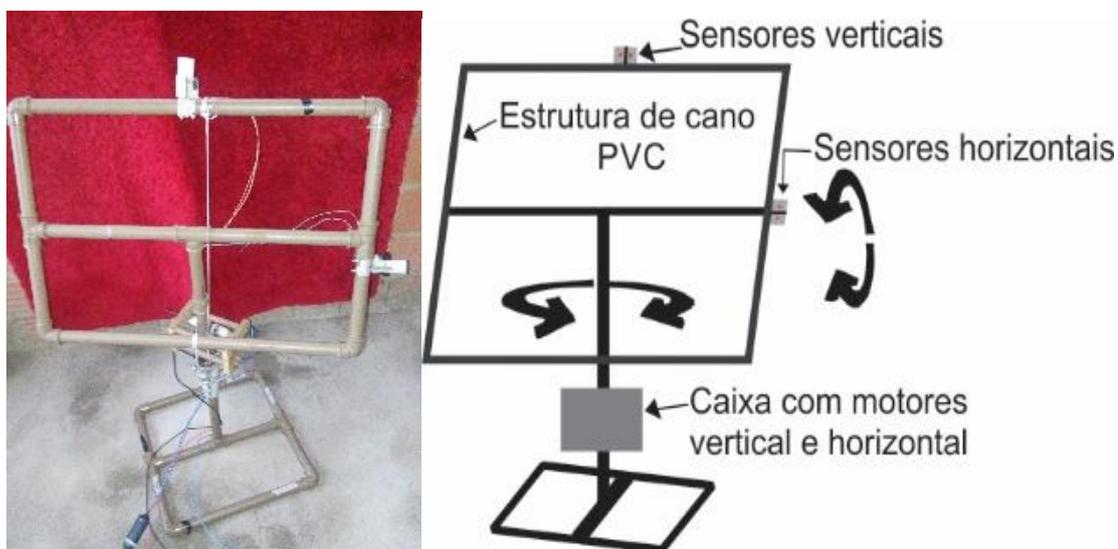


Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, tanto o motor DC como a estrutura não suportaram o peso do módulo e por isso foi necessário realizar modificações para que o motor pudesse movimentar o módulo. Deste modo, adotou-se a estrutura do tipo Pedestal e construiu-se com canos

PVC de 32 mm conforme visualizado na Figura 24. A estrutura do tipo Pedestal foi escolhida pelo fato de não forçar tanto os eixos dos motores como a estrutura anterior.

Figura 24 - Imagem esquemática do seguidor solar (lado direito) e a estrutura construída (lado esquerdo)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A base quadrada foi fixada sobre um telhado onde não havia interferências nas medições por sombreamento. Como a estrutura está apontada para o norte, o Sol nasce do lado direito da estrutura e se põe no lado esquerdo. A Figura 25, apresenta duas imagens do aparato experimental, onde a imagem do lado esquerdo apresenta a estrutura utilizando apenas um eixo e aponta para o sentido leste, já a imagem do lado direito possui uma estrutura com dois eixos e apontando para o oeste já no final do dia.

Após a construção do protótipo, notou-se que o motor DC do eixo vertical exercia baixa velocidade e constante, por isso, utilizou como estratégia reduzir o tempo de movimentação para diminuir o espaço percorrido e melhorar o ajuste de calibração da estrutura. Esta técnica foi utilizada por não haver nenhuma peça redutora de velocidade entre o eixo do motor e o eixo vertical da estrutura como uma engrenagem intermediária.

Figura 25 - Imagens do seguidor solar com módulo



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 CARGA DO MÓDULO

Para adicionar uma carga de consumo da energia gerada pelo módulo fotovoltaico, foi utilizado um inversor de 200 W de entrada 12 V em Corrente Contínua (CC) e saída 127 V em Corrente Alternada (CA) (Figura 26). Este mesmo inversor aciona uma lâmpada de *Light Emitting Diode* (LED) 4 W conectada na saída 127 V. Durante o experimento, tanto o aparelho inversor ligado ao módulo fotovoltaico como a lâmpada oscilavam variadas vezes durante o dia não mantendo uma frequência de funcionamento constante e uniforme.

Figura 26 - Inversor 12 V CC para 127V CA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Contudo, a escolha de um micro inversor foi uma má escolha para análise dos dados, pois havia muita oscilação nos dados devido ao funcionamento do micro inversor que também era prejudicado pela produção de energia instável do módulo durante o dia. Por este motivo, optou-se por utilizar um conjunto de 13 pequenos ventiladores semi novos de diferentes marcas em paralelo. Cada um possuía 12 volts e exigiam 2,68 A de corrente contínua no total. Estes ventiladores são normalmente utilizados em computadores de mesa (Figura 27).

Figura 27 – Conjunto de mini ventiladores 12 V e 2,68 A de CC total



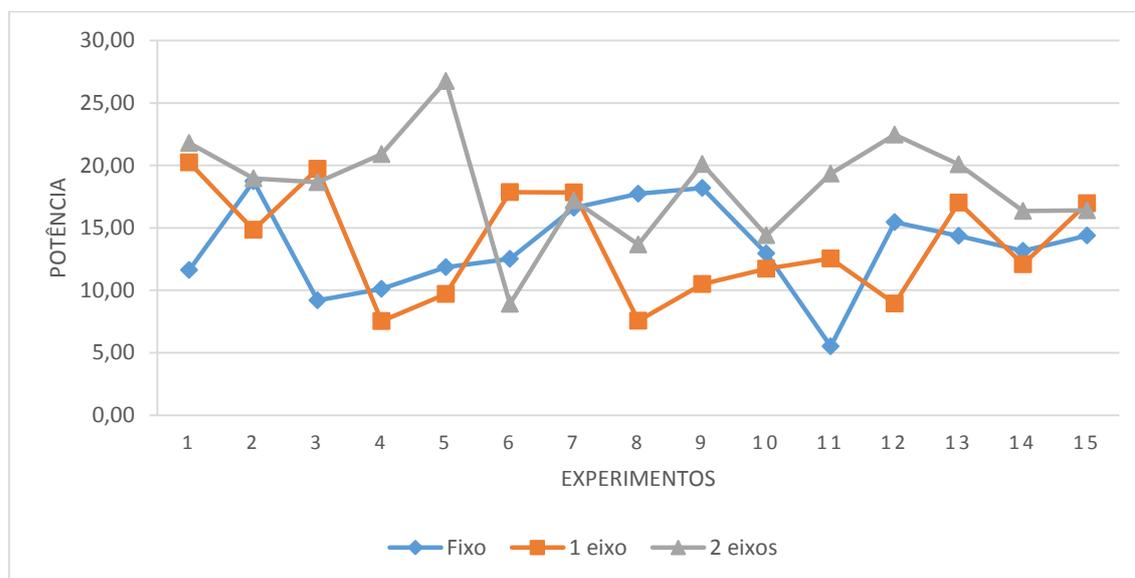
Fonte: Elaborado pelo autor.

Este banco de pequenos ventiladores mostrou-se uma excelente carga devido a estabilidade e permitiu obter dados uniformes que revelou a forma como o módulo trabalha durante o dia, estando fixo ou se movendo. Todos os dados correspondentes à geração de energia foram coletados automaticamente de 1 em 1 minuto em uma planilha eletrônica, totalizando 600 medidas no período de 10 horas. Com isso, no final do dia, foi possível obter toda produção de energia de ambos os sistemas e também o consumo dos dois motores no sistema móvel a cada movimento.

Com estes dados de consumo dos motores, foi possível obter a energia líquida produzida pelo sistema móvel, ou seja, a diferença entre a energia produzida pelo módulo menos a energia consumida pelos motores.

Através destes dados gravados nas planilhas, foi possível obter a média diária de produção de energia e encontrar o ganho de rendimento que o sistema móvel obteve em relação ao sistema fixo conforme a Figura 28.

Figura 28 – Potência (W) coletada pelo sistema fixo, com 1 eixo e 2 eixos



Fonte: Elaborado pelo autor.

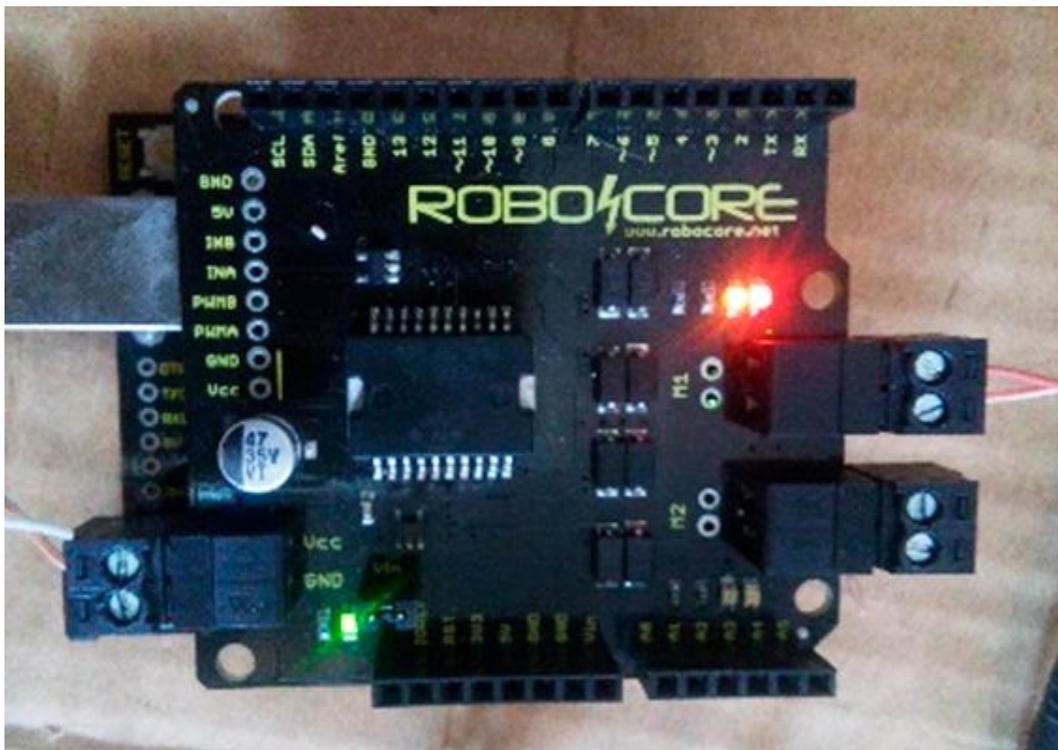
4.5 ARDUINO

O próximo passo foi a busca por um microcontrolador adequado para armazenar o código e controlar todo o processo de forma ininterrupta e ainda poder fornecer todos os dados de produção do módulo e de consumo dos motores.

Escolheu-se, no primeiro instante, a placa controladora arduino *BlackBoard*, onde armazena-se toda a lógica de programação do experimento, observado na Figura 29. A placa controladora é responsável por interpretar os dados enviados pelos sensores LDRs e enviar comandos para os motores CC a fim de seguir o Sol durante o dia.

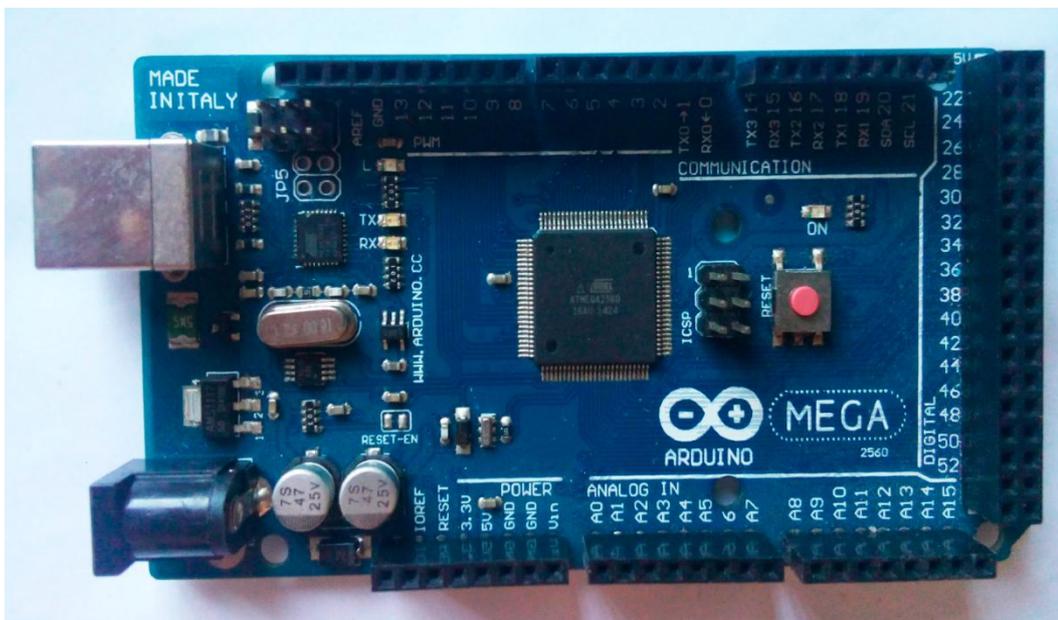
Esta placa controladora funcionou por alguns meses, contudo, ela apresentava limitação quanto ao número de entradas analógicas, o que era essencial para coleta de dados do consumo dos motores. Com isso, adotou-se o Arduino *Mega 2560* para controle e coleta de todos os dados do experimento, conforme a Figura 30.

Figura 29 - Arduino BlackBoard



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 30 - Controlador Arduino Mega 2560

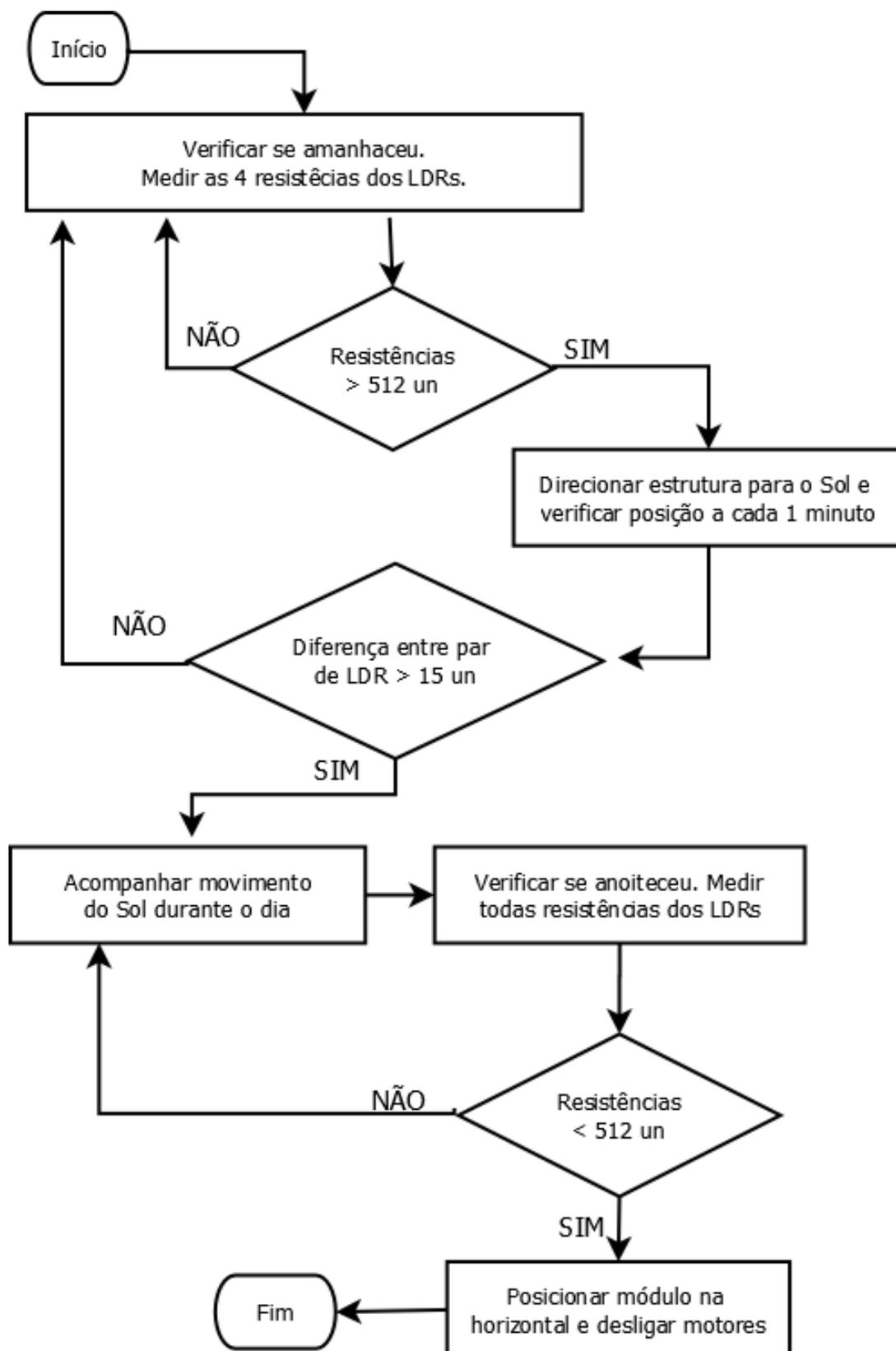


Fonte: Elaborado pelo autor.

O controle da estrutura e a coleta de dados foi possível após a construção de uma complexa programação elaborada na linguagem C que é suportada pelo Arduino.

Todo código utilizado durante o experimento foi construído integralmente pelo próprio autor e disponibilizado no Anexo 1. O fluxograma do processo de movimentação do seguidor solar durante o dia em dependência a resistências dos 4 LDRs pode ser verificada na Figura 31 de forma simplificada.

Figura 31 – Fluxograma do processo diário de movimentação do seguidor solar

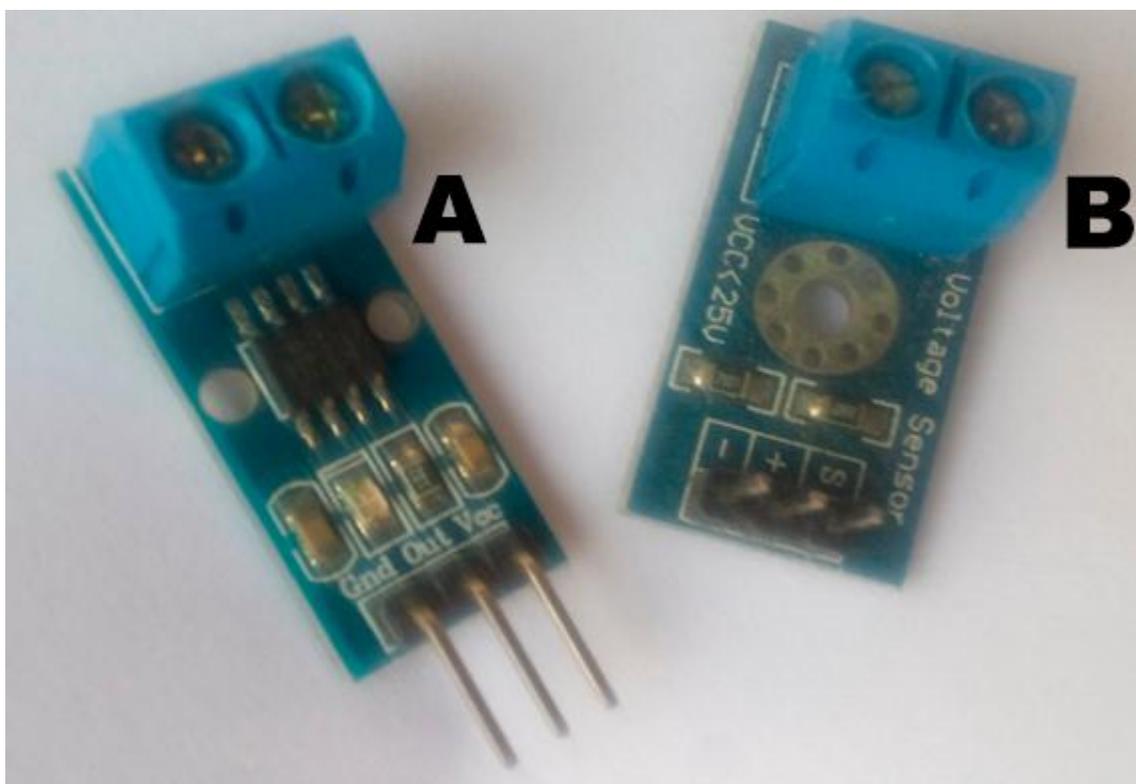


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.6 SENSOR DE CORRENTE E TENSÃO

Para coleta dos valores de produção de energia do módulo fotovoltaico e consumo dos motores que moviam a estrutura, foi necessário utilizar sensores de corrente e de tensão que eram ligados ao Arduino (Figura 32). Essas informações obtidas eram armazenadas em uma planilha eletrônica que contabilizava a corrente e a tensão produzida no módulo minuto a minuto, a corrente e a tensão fornecida para os motores e o número de vezes que os motores se moviam diariamente.

Figura 32 - Sensor de tensão (A) e sensor de corrente (B)



Fonte: Elaborado pelo autor.

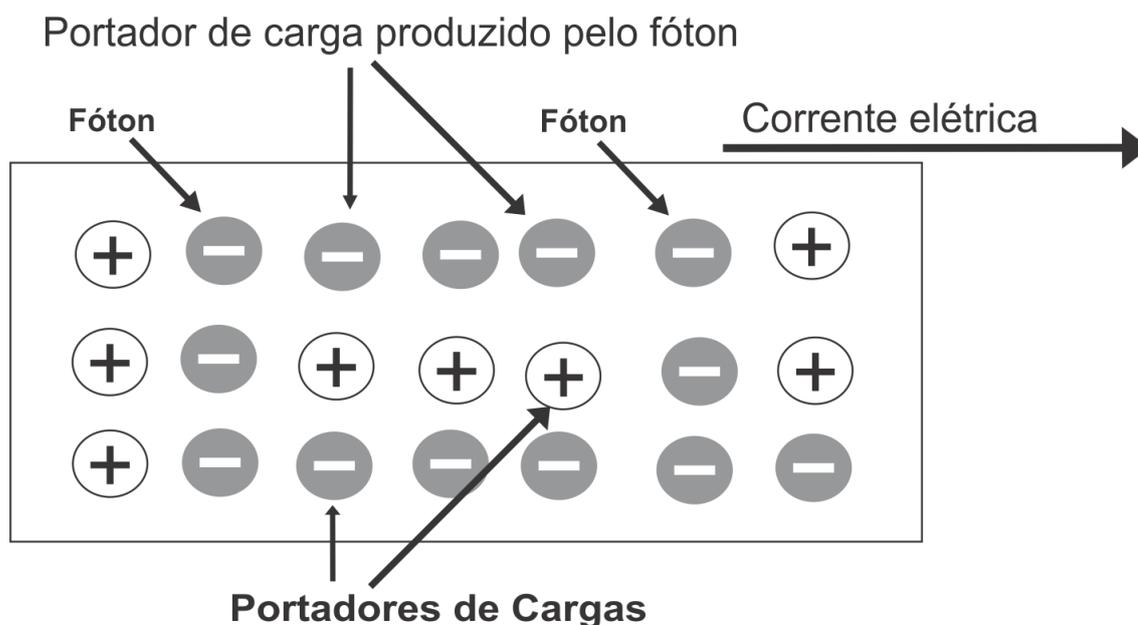
Antes de iniciar a coleta de dados houve a calibração estática dos sensores, onde se utilizou instrumento de medição, voltímetro e amperímetro, que testou o desempenho e ausência de erros sistemáticos. Além disso, levou-se em conta a precisão, resolução e leitura dos sensores para atender a NBR e regras de metrologia.

4.7 SENSOR LDR

Sensor é um instrumento utilizado para medir alguma forma de energia do ambiente, seja sonora, térmica ou luminosa. Normalmente, esta fonte de energia emite um sinal que é captado pelo sensor (entrada) interpretado de alguma forma dependendo do sistema de controle (saída). Na natureza, todas as grandezas físicas como temperatura, vazão ou velocidade são variáveis mensuradas, primordialmente, por meio analógico, pois podem assumir uma infinidade de valores ao longo do tempo dentro de uma faixa de operação (THOMAZINI, 2011).

No caso do experimento deste trabalho, foram utilizados 4 sensores LDR para ajudar no posicionamento solar. O LDR tem sua resistência alterada dependendo da quantidade de luz recebida. Com isso, se a intensidade luminosa sobre o sensor for grande, pode ocorrer a liberação de cargas negativas que ajudam na condução de corrente elétrica, conforme mostra-se na Figura 33. Caso a intensidade luminosa diminua, a resistência aumenta impedindo a passagem de corrente elétrica (THOMAZINI, 2011).

Figura 33 – Condução de cargas no LDR



Fonte: THOMAZINI, 2011 (adaptado).

Como os LDRs estão ligadas na entrada analógica do microcontrolador, eles trabalham numa faixa de 0-1023 un que equivale a 0-5 V. Assim, quando há escuridão total, o valor é 0 un e quando a luminosidade for intensa, pode chegar à 1023 un.

Para melhor posicionamento da estrutura nos dois eixos, utilizaram-se 2 sensores responsáveis pelo movimento do motor CC horizontal e 2 sensores responsáveis pelo movimento do motor CC vertical, cada par com um anteparo metálico no meio de 2,00 cm, conforme a Figura 34.

Figura 34 - Sensores LDRs instalados no módulo

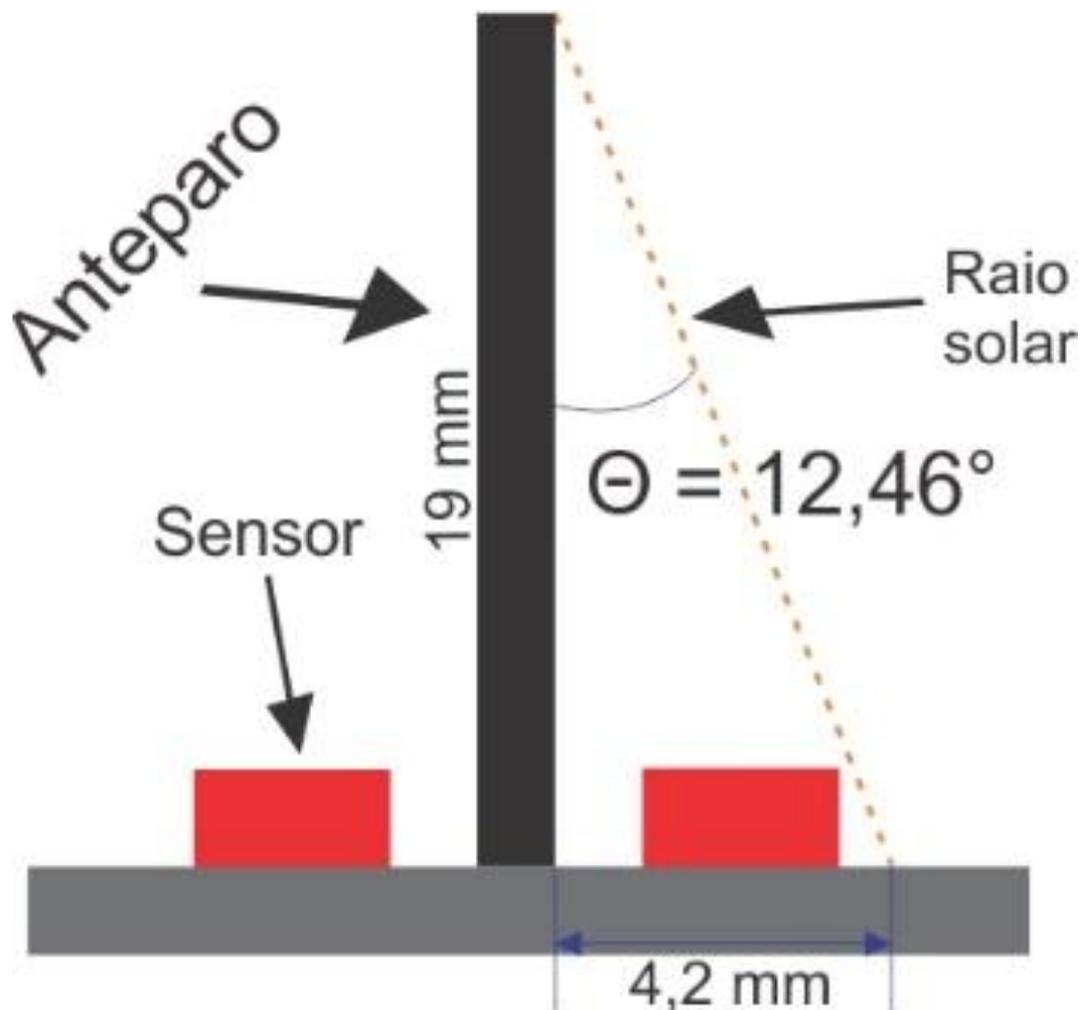


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 34 representa 3 fotografias dos mesmos pares de sensores LDR, onde A é a foto do perfil esquerdo, B é uma foto superior com o anteparo no meio e a C é a foto de perfil do lado direito.

O sistema está programado para corrigir a diferença de luminosidade maior que 15un entre o par de sensores. Este valor de 15 un foi adotado com base em testes empíricos. Primeiro, iniciou-se o teste com 30 un, mas percebeu-se que o sistema permanecia muito tempo estagnado, aproximadamente 24 minutos, e formava um grande ângulo de aproximadamente 60° em relação a normal para ser corrigido. Por fim, testou-se 15 un que formava um $\theta = 12,46^\circ$ aproximadamente, permitindo o seguidor se mover em tempos menores para otimizar a produção de energia, conforme pode ser visualizado na Figura 35.

Figura 35 - Sensores com anteparo e ângulo a ser corrigido



Fonte: Elaborado pelo autor.

Enquanto houver luz, o sistema irá se mover devido aos pulsos elétricos emitidos pelos sensores e se houver diferença de 15 un entre cada par. Contudo, quando não houver mais raios solares no final do dia, o sistema automaticamente voltará a sua posição inicial afim de captar os primeiros raios solares no início do dia.

Após a montagem do sensor LDR no seguidor, observou-se a forma como o sistema se movimentava: a velocidade, a quantidade de movimentos por dia em cada eixo e o consumo de energia por motor. Com esta análise e configuração dos sensores LDR, foi possível coletar as variáveis que precisam ser monitoradas para tornar o sistema mais eficiente.

Os sensores LDR são muito sensíveis a ação do tempo e sua resistência pode ser afetada com o desgaste do material devido a oxidação. Com os testes diários

realizados, percebeu-se que cada sensor deveria ser trocado por um novo a cada 1 mês, aproximadamente, a fim de evitar excesso de movimentação por parte dos motores e manter a uniformidade dos dados. Isto colaborou para que diversas vezes ocorresse uma nova calibração do seguidor.

4.8 INTERFERÊNCIA DO TEMPO

Durante todo o ano, tentou-se realizar a captação de dados do módulo de 3 formas: uma fixa, uma com o seguidor funcionando com 1 eixo e a outra forma funcionando com 2 eixos. Sendo que este experimento era realizado um de cada vez e necessitava que os 3 dias consecutivos fossem uniformes para não criar discrepâncias e realizar uma boa comparação entre os sistemas.

Porém, sabe-se que durante o ano ocorre dias nublados e chuvosos. Estes fenômenos colaboraram para que o experimento fosse interrompido diversas vezes ou reiniciado. Isso se deve principalmente aos sensores LDRs que não conseguiam interpretar a localização exata do Sol. Com isso, o seguidor realizava diversos movimentos desnecessários na tentativa de encontrar um ponto de máxima irradiação solar. Quando isto ocorria, era necessário desconsiderar os dados diários obtidos e recomeçar o experimento no dia seguinte.

Se todo os dias do ano o tempo fosse estável haveria uma captação melhor dos dados e conseqüentemente, melhor comparação. Mas tempos instáveis fazem parte da produção de energia de sistema fotovoltaico durante o ano.

4.9 SFCR DE 1,56 KWP

Após a comparação de geração de energia entre os sistemas móvel e fixo através do protótipo construído, partiu-se para a análise de investimento de duas estruturas de mesmas características, porém uma fixa e outra móvel. Para isso, foi utilizado como referência uma micro usina de 1,56 kWp de potência com 6 módulos de 260W que se

encontra instalada com estrutura fixa como visto na Figura 36. Tal micro usina foi adquirida pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) através da verba fornecida pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (FAPES) pelo processo n° 67651259/14, e encontra-se instalada no campus de São Mateus – UFES.

Figura 36 - Estrutura fixa montada



Fonte: Elaborado pelo autor.

A usina em operação, tanto equipamentos como materiais, cumpri algumas normas técnicas e legislação vigentes:

- ABNT NBR 5410:2014 - Instalações elétricas de baixa tensão;
- ABNT NBR IEC 62116:2012 - Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica;
- ABNT NBR 16149:2013 – Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição.

Para instalação completa da micro usina fixa de 1,56 kWp, foi necessário realizar o seguinte orçamento visualizado no Quadro 2. O valor referente à estrutura metálica descreve somente a compra do metal tipo cantoneira e sua pintura.

Quadro 3 - Descrição do investimento e valores do sistema fixo

Descrição	Valores
Aquisição dos módulos e inversor com frete	R\$ 10.260,66
Estrutura metálica de sustentação e peças de fixação	R\$ 576,00
Montagem e instalação do sistema solar fotovoltaico	R\$ 3.403,94
Total do Investimento	R\$ 14.240,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta micro usina está conectada à rede elétrica e apresenta valores de geração de energia total mensal de 198 kWh e anual de 2376 kWh (Quadro 4). Levando-se em conta a taxa atual de 0,7410 R\$/kWh, aproximadamente, aplicada pela concessionária para redução na conta de energia, essa usina fornece um retorno de mensal de R\$ 146,73 e anual de R\$ 1.760,79.

Quadro 4 - Descrição do sistema fixo conectado à rede

Descrição	Valores
Potência instalada em CC (kWp):	1,56
Número de inversores:	1
Quant. de módulos (260 W):	6
Geração por mês (kWh):	198,00
Geração por ano (kWh):	2376,00
Taxa (Valor/kWh):	0,74107403545
Valor da economia mês:	R\$ 146,73
Valor da economia ano:	R\$ 1.760,79
Valor Investido:	R\$ 14.240,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para montagem de um seguidor solar de mesma potência, seria necessária utilizar outras peças metálicas como tubos, engrenagem e cantoneiras de diferentes espessuras. O valor do orçamento para toda estrutura de sustentação do sistema

móvel foi estimado em R\$ 1.850,00 (Quadro 5). O custo de montagem estimado foi mantido em R\$ 3.403,94.

E por último, fez-se um levantamento dos motores, necessários para mover toda a estrutura montada no sentido vertical e horizontal. Chegou-se na escolha de dois motores de mesma marca, com baixa rotação, de iguais tamanhos e potência necessária para levantar até 180 kg. Deste modo, elaborou-se o Quadro 5, com os devidos valores para o sistema móvel dimensionado. Tal orçamento pode ser visto no anexo 2.

Quadro 5 - Descrição do investimento e valores para a montagem do seguidor solar

Descrição	Valores
Aquisição dos módulos e inversor com frete	R\$ 10.260,66
Estrutura metálica de sustentação e peças de fixação	R\$ 1.850,00
Motores + engrenagem	R\$ 850,00
Placa com microcontrolador + Driver	R\$ 210,00
Montagem e instalação do sistema solar fotovoltaico	R\$ 3.403,94
Total	R\$ 16.574,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar do orçamento realizado, somente a micro usina fixa foi construída, já a usina com seguidor solar teve sua produção simulada utilizando o ganho do protótipo construído neste trabalho. Percebe-se que o valor atribuído para montagem do seguidor ficou R\$ 2.333,34 maior que o sistema com estrutura fixa, o que corresponde a um investimento 16,38% maior que a estrutura fixa.

Com todos os dados de geração de energia da micro usina e custos disponibilizados, foi possível, através das técnicas de análise de investimento, determinar o tempo de retorno financeiro, a taxa interna de retorno e se o valor presente líquido. Além disso, com a aplicação financeira em um SFCR com seguidor solar e com estrutura fixa possuem praticamente os mesmos riscos econômicos atribuídos como variação da tarifa de energia e da TMA, pode-se aplicar o conceito de custo de oportunidade na análise do investimento.

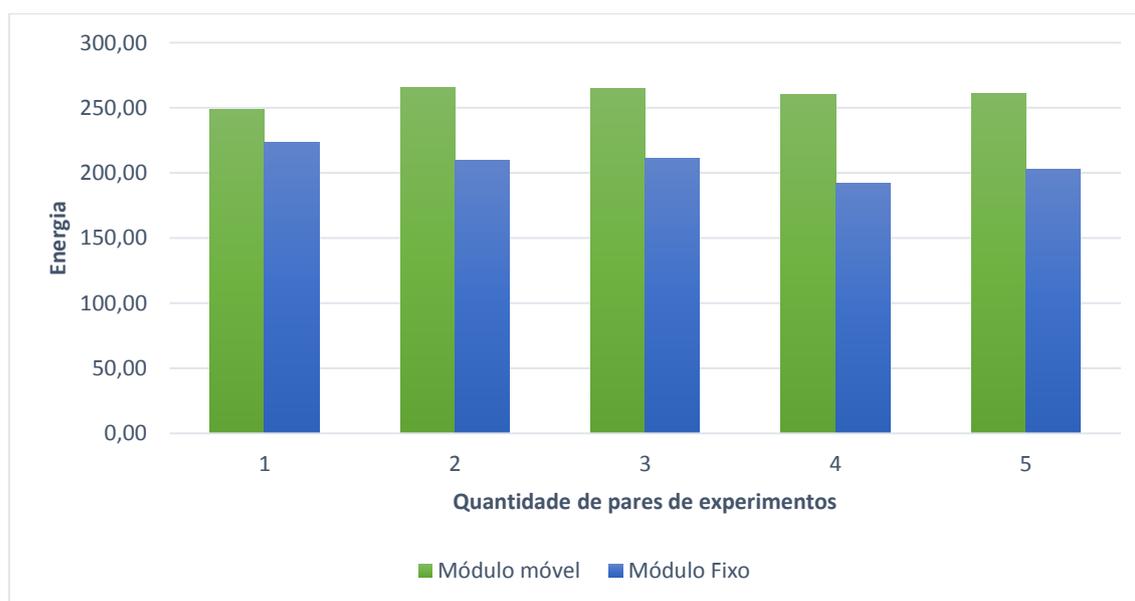
A taxa de atratividade de investimento no setor de energia segundo a ANEEL é de 8,50% a.a. (ABDIB, 2016). Com isso, adotou-se a taxa da ANEEL para ser a TMA como referência para se calcular o valor presente líquido. A obtenção dos fluxos de caixa descontado para os sistemas fixo e móvel foram elaborados utilizando-se o valor inicial a ser investido em cada sistema juntamente com a TMA.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 PRIMEIRO EXPERIMENTO

Com os primeiros experimentos utilizando, como carga o inversor e a lâmpada LED, realizou-se a comparação do protótipo entre a energia produzida (Joules) pelo sistema com seguidor solar e o sistema fixo no segundo semestre de 2015. Todos os experimentos foram realizados na estrutura do tipo Pedestal e com o módulo acoplado, um dia com o sistema fixo e outro com o sistema móvel de 2 eixos. Para melhor representar os dados, foi-se necessário converter as potências médias geradas por cada sistema em energia total no período de 10 horas e obteve-se a Figura 37.

Figura 37 - Energia total (kJ) produzida por dia pelo módulo do protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 37, observa-se 5 conjuntos de pares de dados (eixo horizontal) analisados por 5 dias com o sistema fixo (barras azuis) e outros 5 dias com o sistema móvel (barras verdes), somando um total de 10 dias de coleta de dados.

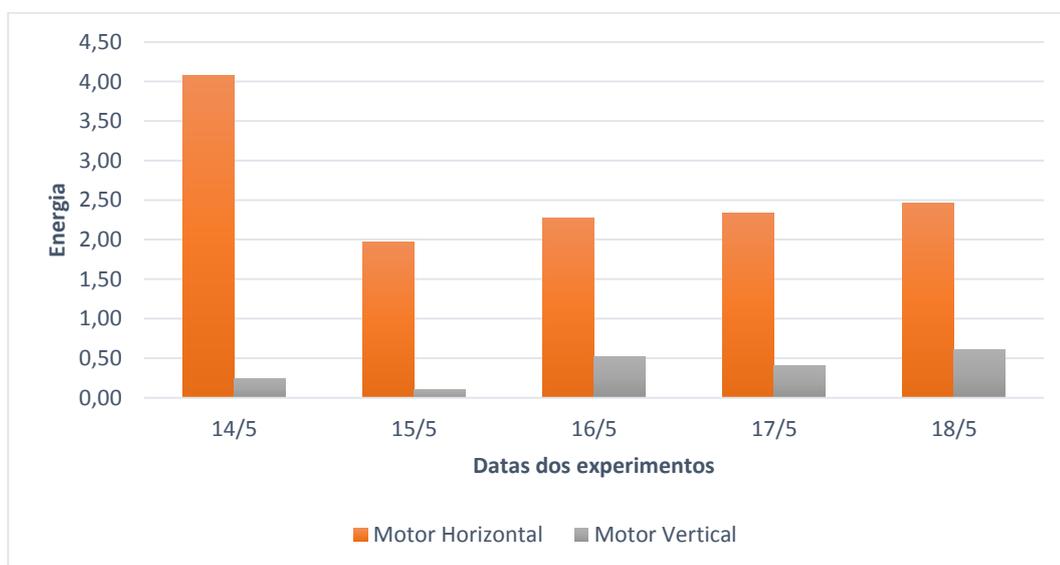
Para encontrar a energia total consumida pelos motores, considerou-se os diversos movimentos durante o dia, onde coletaram-se a corrente e a tensão de cada operação do motor, considerando os dois sentidos de movimento, para esquerda e direita. Para

se chegar ao valor exato de energia enviada para os motores, obteve-se a potência média (Pot_m) e multiplicou-se por cada tempo de acionado. No caso do motor horizontal, o tempo (t) foi de 0,5 segundos e o motor vertical foi 0,2 segundos. Após isso, multiplicou-se pela quantidade de vezes (n) que o motor foi acionado durante o dia e chegou-se ao total de energia consumida por cada motor, conforme a Equação (4) (SADIKU, 2014).

$$\text{Energia total} = Pot_m \times t \times n \quad (4)$$

Utilizando a Equação (4), obteve-se um novo gráfico de consumo de ambos os motores na Figura 38.

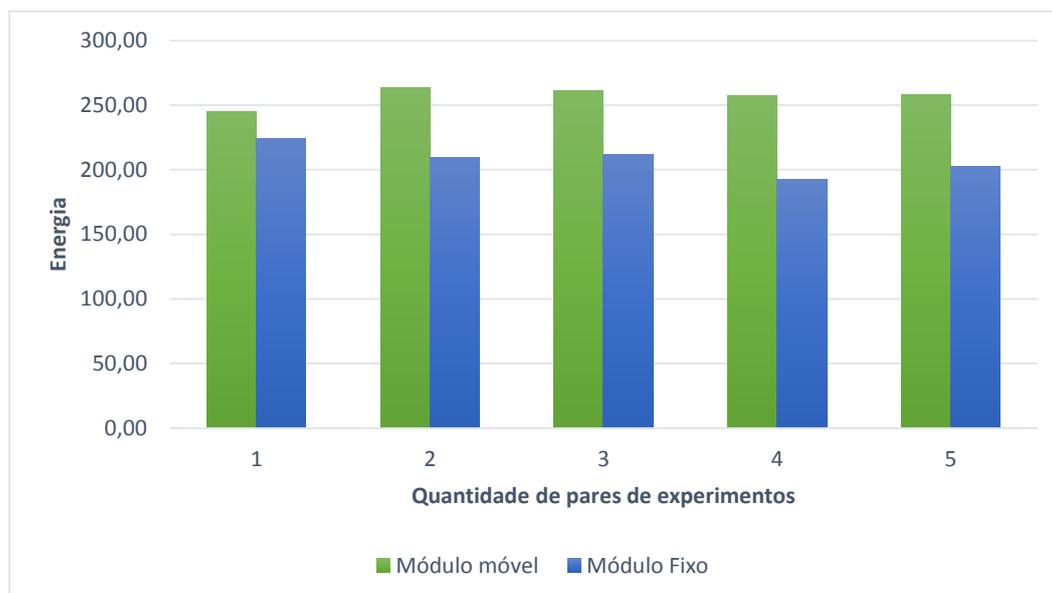
Figura 38 - Consumo total de energia (kJ) por cada motor



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pela Figura 38, observa-se que o motor horizontal apresenta maior consumo em relação ao vertical durante o dia, porém, realizando a diferença da energia produzida menos a consumida pelos motores, observa-se que o saldo de energia do sistema móvel permanece maior que o fixo, conforme visualizado pela Figura 39.

Figura 39 - Saldo de energia (kJ) produzida



Fonte: Elaborado pelo autor.

No final do primeiro experimento, obteve-se um aumento da eficiência real do sistema móvel em relação ao fixo de 24,01%. Apesar deste significativo ganho percentual obtido com a utilização de um seguidor solar, foi necessário realizar mais experimentos no primeiro semestre de 2016 utilizando outra carga para só depois utilizar o novo ganho e aplicar na micro usina móvel simulada de 1,56 kWp. Desde modo, o ganho obtido no primeiro experimento não irá ser utilizado para análise de viabilidade econômica, somente o ganho percentual obtido no segundo experimento.

5.2 SEGUNDO EXPERIMENTO

Na segunda série de experimentos, foi utilizado como carga o conjunto de mini ventiladores, pode-se obter no total 45 amostras, uma em cada dia, sendo 15 com o sistema fixo, 15 com o sistema de 1 eixo e 15 com o sistema de 2 eixos (Anexo 3).

O ganho total obtido no segundo experimento foi de 36,42% em relação ao sistema fixo, este valor não considera ainda o consumo dos motores.

O Quadro 6 revela, resumidamente, toda energia produzida e a ganho líquido de energia após o consumo do motor ser considerado. A taxa de ganho obtida com o sistema utilizando apenas um eixo é muito pequena e isso mostra que uma estrutura

do tipo Pedestal não possui tanta eficiência quando utilizado em apenas um eixo. Já o sistema de dois eixos se mostrou 31,45% mais vantajoso que um sistema fotovoltaico fixo com perdas de energia nos motores de 4,97% sobre a energia obtida. No anexo 4 é possível visualizar, detalhadamente, a produção e o consumo de energia diária.

Quadro 6 – Produção total de energia (J) com ganho líquido e perda nos motores

	Saldo de energia 1 eixo	Saldo de energia 2 eixos
Energia total produzida:	7.330.323,53	9.577.484,18
Taxa de ganho líquido:	0,61%	31,45%
Taxa de perda nos motores:	0,73%	4,97%

Fonte: Elaborado pelo autor.

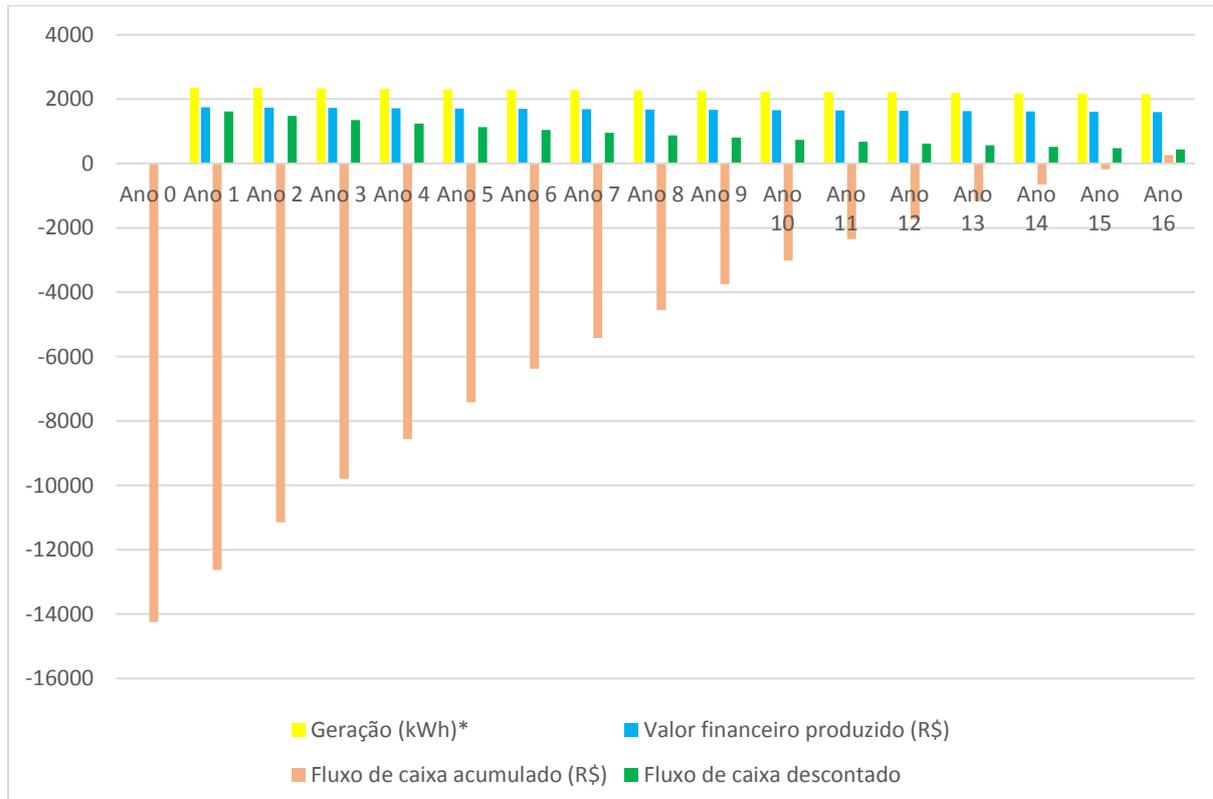
Com este ganho líquido obtido, tentou-se verificar a veracidade do resultado comparando-o com outro experimento que utiliza-se algum seguidor com módulo policristalino, de um ou dois eixos no Brasil. Foi encontrado o experimento elaborado por Monteiro (2007) em Recife – PE com um aumento energético médio de 36,1% em relação a estrutura fixa. A estrutura montada foi de um eixo vertical do tipo polar. Tal experimento realizado pelo autor não considerou o consumo do motor em todo seu movimento durante as coletas de dados. Por isso, não foi informado o saldo líquido de produção de energia, como demonstrado neste experimento. Contudo, este foi o experimento mais próximo do Espírito Santo que utilizou o mesmo tipo de módulo e obteve rendimento bruto semelhante.

5.3 RESULTADO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA SISTEMA CONECTADO À REDE ELÉTRICA

Com os resultados do sistema fotovoltaico móvel obtido, verificou-se a viabilidade econômica de uma micro usina de 1,56 kWp conectada à rede e outra análise utilizando o mesmo ganho de rendimento do protótipo para dimensionar uma estrutura de mesmas características implementada na estrutura fixa, porém a estrutura móvel foi simulada semelhantemente ao protótipo. Para isso, primeiro traçou-se o fluxo de caixa de aquisição do sistema fotovoltaico fixo em funcionamento (Anexo 5).

Através do Anexo 5, é possível observar que o tempo necessário para recuperação do investimento é de 15 anos e 4 meses, para melhor entendimento, foi traçado uma linha do tempo como pode ser visualizado na Figura 40.

Figura 40 - Tempo de retorno do valor investido do sistema fixo



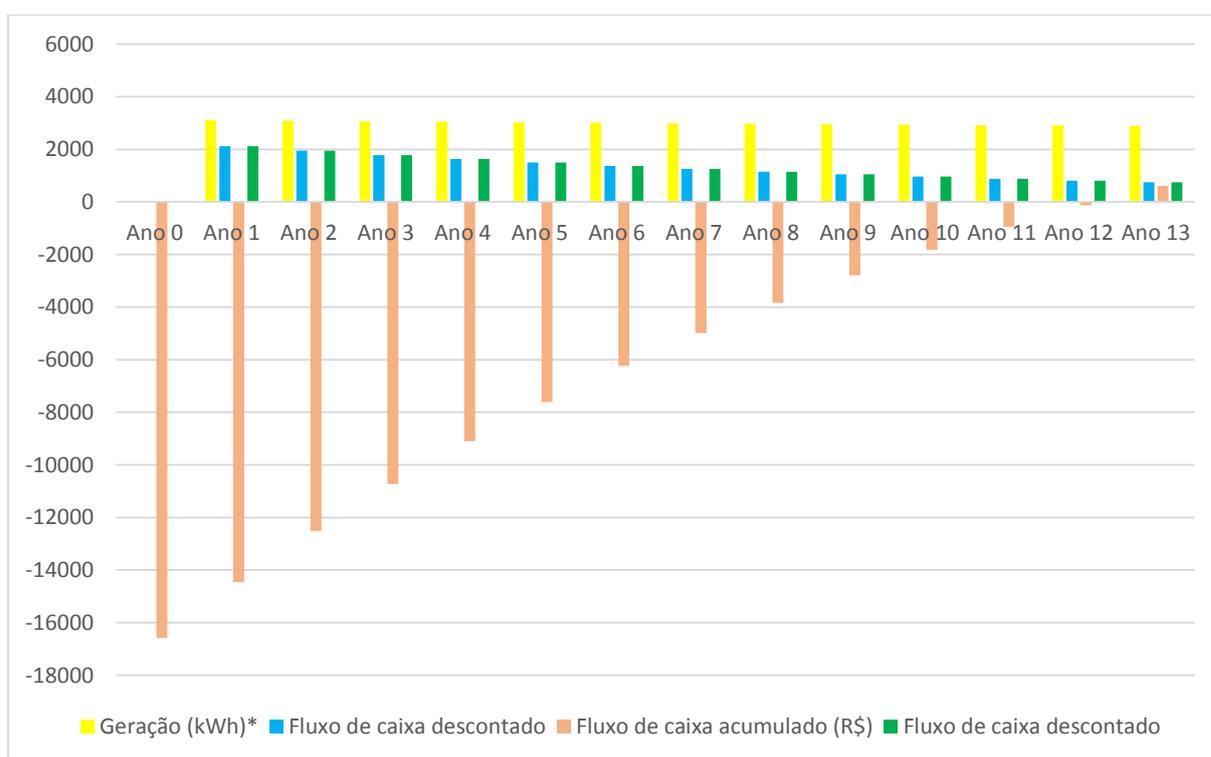
Fonte: Elaborado pelo autor.

O fluxo de caixa para o sistema móvel simulado é apresentado no Anexo 5 e demonstra como ficariam os valores de geração pelo capital investido ao longo dos anos.

Observa-se na coluna de fluxo de caixa acumulado (Anexos 5 e 6) que o valor total obtido no final dos 25 anos no sistema móvel se mostra maior que o total obtido com o sistema fixo para igual período, isso se deve ao ganho de 31,45% atribuído a geração do sistema móvel.

Com o fluxo de caixa traçado para o sistema móvel (anexo 6) foi possível identificar o *payback* do investimento, obtendo-se um prazo de 12 anos e 2 meses, como pode ser visto também na Figura 41.

Figura 41 - Tempo de retorno do valor investido na estrutura móvel



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 40 e 41 apresentam o mesmo intervalo de tempo com o propósito de comparar o *payback* descontado ao longo da produção de energia dos módulos fotovoltaicos levando em conta também a queda de eficiência de 0,6% ao ano de acordo com o fabricante.

Utilizando o ganho líquido do Quadro 6 e o fluxo de caixa ao longo dos 25 anos de operação do sistema representado no anexo 5, obteve-se a VPL, TIR e o *payback* descontado de ambos os sistemas observado no Quadro 7.

Quadro 7 - Valores da TIR, VPL e *payback* descontado de ambos os sistemas

Parâmetros	Fixo	Móvel
TIR	10,89%	12,68%
VPL	R\$ 2.840,04	R\$ 5.877,90
<i>Payback</i> Descontado	15 anos, 4 meses e 26 dias	12 anos, 2 meses e 3 dias

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo Quadro 7, pode-se concluir que os sistemas podem ser considerados como viáveis, pois a TIR é maior que a TMA de 8,5% a.a., os valores da VPL encontrados são maiores que zero e os *paybacks* descontados são menores que os 25 anos considerados.

5.3.1 Análise de novos cenários

A análise de viabilidade econômica realizada até momento não abordou aspectos quanto a tributação do Imposto Cobrado sobre Mercadoria e Serviço (ICMS), quanto a doação do módulo e inversor por parte do governo ou concessionária, quanto o aumento da eficiência do seguidor solar para maior geração de energia e quanto aos custos de manutenção com seguidor ao longo dos anos.

Com isso, foram traçados novos fluxos de caixa com VPL e TIR de acordo com cada análise. Partiu-se por realizar novas suposições a fim de encontrar novos projetos com outros orçamentos e possivelmente mudar a estratégia empresarial (ROSS, 2009).

O estudo de cenários visa observar o mercado de energia solar fotovoltaico com outras possibilidades de investimentos ou riscos.

5.3.1.1 Produção de energia fotovoltaica com dedução do ICMS

A cobrança do ICMS torna os projetos de geração distribuída muitas vezes inviáveis, como o novo cálculo considerando o ICMS do estado do Espírito Santo (ES), visualizado no Quadro 8.

Quadro 8 – Novo orçamento do sistema fotovoltaico considerando ICMS no ES

Parâmetros	Fixo	Móvel
TIR	7,23%	8,70%
VPL	-R\$ 1.430,12	R\$ 264,77
<i>Payback Descontado</i>	-	23 anos e 8 meses

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pelo Quadro 8, pode-se notar que o investimento em sistema fotovoltaico fixo, dentro deste regime tributário, torna inviável com TIR menor que 8,50% e a VPL negativa. Sendo que na análise anterior, do sistema fotovoltaico fixo sem a consideração da tributação do ICMS, mostrava o investimento viável.

Já a estrutura móvel até pode ser aplicada devido ao VPL e a TIR, contudo, devido o tempo de retorno do investimento ser muito longo e próximo do tempo de vida útil do módulo fotovoltaico especificado pelo fabricante, a implantação passa a ser indesejada pelo administrador do recurso. Estes novos valores dos parâmetros encontrados ocorreram devido ao imposto que foi incidido sobre a própria produção de energia elétrica que foi injetada na rede da concessionária local. Ou seja, nesta situação, o usuário estaria pagando o imposto duas vezes, tanto pelo consumo como pela produção.

5.3.1.2 Inversor e módulos doados pelo governo e concessionária

Outro cenário interessante e bastante favorável seria a doação dos equipamentos que mais geram custo no sistema total, o módulo e o inversor, dentro do âmbito social.

Esta ação ainda não é praticada pelo governo e nem concessionárias no Brasil, mas seria uma possibilidade para beneficiar a população mais carente, diminuir gastos públicos com conta de energia, como em escolas e hospitais, ou auxiliar regiões com iluminação elétrica precária. Além disso, a produção de energia distribuída diminui a pressão sobre a produção de energia centralizada, evitando que ocorram surtos de energia ou danos em equipamentos por sobre carga (ASPE, 2013).

Por este motivo, foi-se analisado o valor do sistema fotovoltaico fixo que poderia ser adquirido com tal incentivo (Quadro 9). A análise para o sistema móvel não foi realizado por possuir características específicas de implantação como a não instalação em telhados devido aos ventos e peso do material.

Quadro 9 – Novo orçamento do sistema fotovoltaico fixo

Descrição	Valores
Aquisição dos módulos e inversor com frete	R\$ 0
Estrutura metálica de sustentação e peças de fixação	R\$ 576,00
Montagem e instalação do sistema solar fotovoltaico	R\$ 3.403,94
Total:	R\$ 3.979,94

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 9, os valores da estrutura metálica de sustentação e montagem são conservados, pois o trabalho de montagem e instalação, assim como as peças utilizadas são as mesmas. Apenas foi alterado o valor de aquisição dos módulos com inversor já que seria uma doação.

Com o novo orçamento, o VPL torna-se positivo e com uma TIR > TMA, conforme o Quadro 10, é necessário que o valor dos equipamentos sofra uma redução de 47,05%.

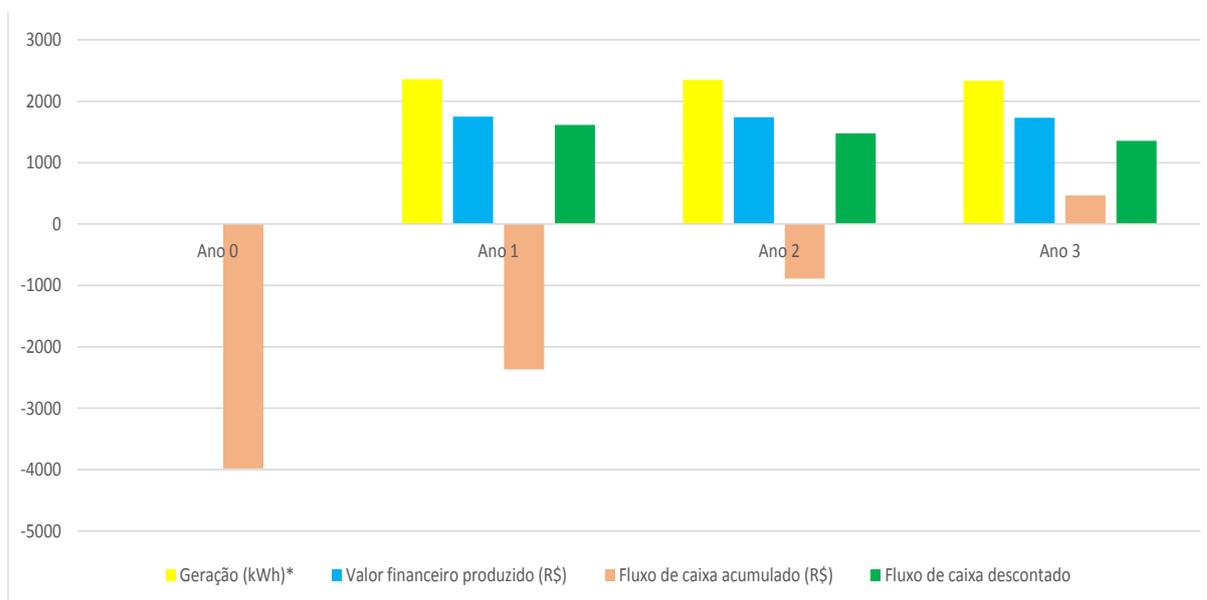
Quadro 10 – Novos valores dos parâmetros de análise de investimento

Parâmetros	Fixo
TIR	43,37%
VPL	R\$ 13.100,70
<i>Payback Descontado</i>	2 anos, 7 meses e 26 dias

Fonte: Elaborado pelo autor.

Desta forma, o tempo de retorno do investimento seria mais interessante com 2 anos e 7 meses, como pode ser visto na Figura 42.

Figura 42 – tempo de retorno para o novo cenário



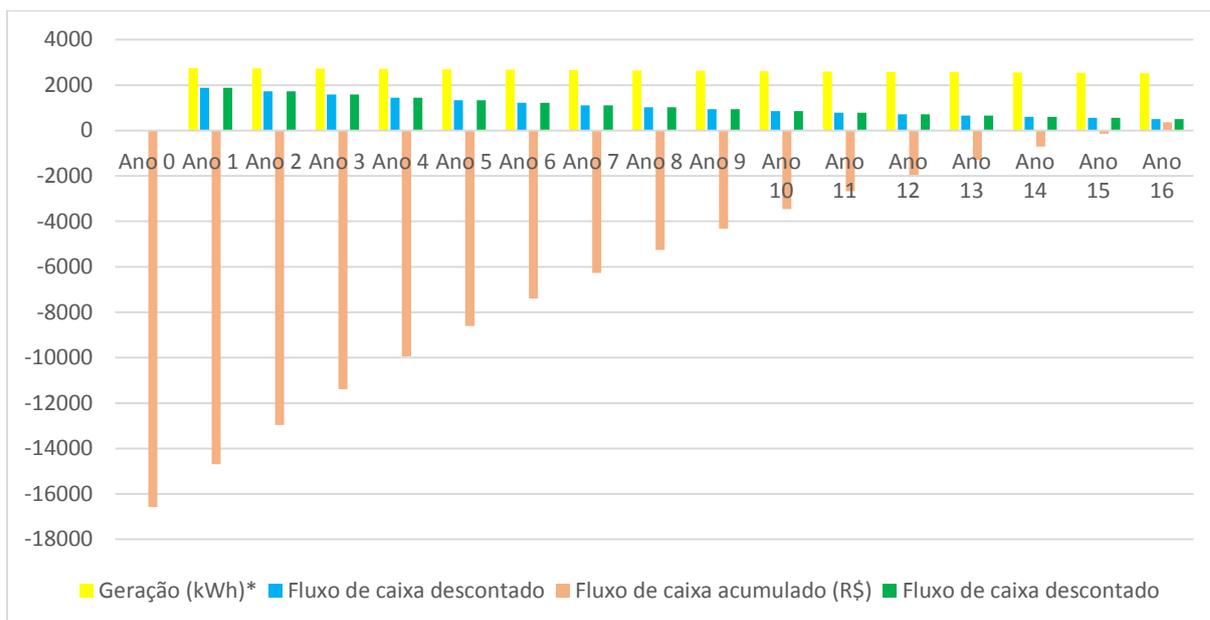
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1.3 Interferência da eficiência e do valor da manutenção do seguidor solar

Neste experimento, a eficiência líquida de 31,45% do seguidor solar encontrado possui forte relação com o valor da estrutura, pois com esta taxa aplicada, verificou-se que o sistema móvel é mais viável que o sistema fixo. Porém, como a estrutura móvel necessitou de um investimento maior que a estrutura fixa de 16,38%, traça-se outro cenário modificando a eficiência para verificar até que ponto a taxa de eficiência do sistema móvel é mais viável que o sistema fixo se a eficiência diminuir.

Neste caso hipotético, se a eficiência do seguidor solar sofresse uma redução de até 16,81%, o valor do *payback* de ambos os sistemas se mostraram equiparados, como observado na Figura 43 onde demonstra o fluxo de caixa do sistema móvel. Desta forma, se o seguidor solar apresentar eficiência menor que 16,81%, sua implantação se tornará inviável.

Figura 43 – Novo fluxo de caixa do seguidor solar com baixa eficiência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Outro cenário importante analisado, onde foi levado em conta todo o custo da manutenção preventiva realizada anualmente na estrutura móvel ao longo dos seus 25 anos, juntamente com a substituição ou a simples manutenção de peças que inclui: motores, engrenagens e placa do microcontrolador. Os valores foram baseados na vida útil recomendado por cada fornecedor das peças. O valor inicial do investimento permanece o mesmo e sofrerá acréscimos ao longo dos anos. O valor final previsto chegará ao montante de R\$ 22.370,60 (Quadro 11) que corresponde a um aumento de 57,12 % em relação ao investimento aplicado no sistema fixo.

Quadro 11 – Novo orçamento do seguidor solar levando em conta manutenção e substituição de peças

Descrição	Valores
Aquisição dos módulos e inversor com frete	R\$ 10.260,66
Estrutura metálica de sustentação e peças de fixação	R\$ 1.850,00
Motores + engrenagem	R\$ 850,00
Descrição	Valores
Placa com microcontrolador + Driver	R\$ 210,00

(Conclusão)

Manutenção preventiva + troca de peças ao longo dos anos	R\$ 5.800,00
Montagem e instalação do sistema solar fotovoltaico	R\$ 3.403,94
Total	R\$ 22.374,60

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, fluxo de caixa sofrerá alterações ano após ano e, conseqüentemente, os parâmetros também como visto no Quadro 12.

Quadro 12 – Novos valores dos parâmetros de análise de investimento

Parâmetros	Móvel
TIR	8,54%
VPL	R\$ 77,90
Payback Descontado	24 anos, 8 meses e 11 dias

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto no Quadro 12, o VPL é positivo e a TIR é levemente maior que 8,5%, portanto, o projeto é viável de ser aplicado. Contudo, o tempo longo de retorno do investimento é muito próximo ao tempo de vida útil do módulo e isto pode afetar a tomada de decisão do produtor de energia. Isto demonstra que apesar do VPL e a TIR serem favoráveis, não devem ser parâmetros únicos a serem observados. Por isso, levando em conta o *payback* descontado, pode-se inferir que tal investimento em estrutura móvel é economicamente inviável de ser aplicado.

6 CONCLUSÃO

A técnica de construir um seguidor solar foi explorada neste trabalho na região norte do ES. Onde levou-se em conta as condições climáticas que afetam toda rotina do experimento e as taxas da concessionária.

Com o protótipo construído, conseguiu-se provar que o sistema de seguir o Sol é eficiente mesmo levando em conta o consumo dos motores. Porém, quando se leva em consideração a mesma estrutura aplicada no protótipo em uma estrutura móvel real, deve-se levar em conta a queda de eficiência dos módulos e também as devidas manutenções preventivas e substituições de peças ao longo dos anos.

Por isso, no ponto vista da análise de investimento, o sistema fixo de 1,56 kWp de potência se mostrou viável mesmo que seu *payback* se demonstrou longo, mas a estrutura móvel de mesma potência pode ser considerada inviável devido ao longo tempo de retorno do investimento.

Do ponto de vista prático e observando o tempo de retorno em todas as análises. O sistema fotovoltaico apresenta ser um investimento de longo prazo e indesejável de acordo com a realidade brasileira.

Isso leva a conclusão que o sistema de energia solar fotovoltaica necessita de uma melhor política pública que conceda incentivos fiscais, tanto para setores públicos como privados, além de apoiar a isenção do ICMS sobre produção de energia limpa, para que o *payback* sofra significativa redução. Ou ainda aumentar a produção de módulos e inversores em larga escala no Brasil para reduzir todos os custos embutidos de importação.

6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Todo trabalho realizado neste experimento sofreu um forte entrave quanto a questão financeira que não permitiu realizar a construção de uma estrutura móvel real conectado à rede para também avaliar a viabilidade econômica.

Por isso, uma sugestão é realizar a comparação entre duas grandes usinas de mesmas potências com localização próxima, sendo uma fixa e outra móvel, para observar a produção de energia e o retorno financeiro anual. Além disso, deve-se realizar a captação da produção de energia todos os dias do ano para obter um ciclo anual completo.

Contudo, antes de iniciar este experimento, é importante posicionar bem os sensores na estrutura, ajustar sua calibragem e testar quanto tempo funciona em plena atividade. Com isso, o funcionamento dos sensores não deverão afetar o desempenho do seguidor solar.

Além de realizar testes com os sensores LDRs, uma alternativa seria verificar a eficiência dos métodos através de comparações entres estruturas móveis que utilizasse técnicas diferentes de posicionamento como o movimento baseado em cálculos matemáticos que detecta a posição do Sol durante o dia e ao longo do ano. Além de comparar com outra estrutura que apresenta somente um eixo e se move de leste ao oeste.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ADAMS, W. Grylls; DAY, R. Evans. ***The action of light on selenium***, in Proceedings of the Royal Society, volume 25, p.113, 1877.

ALVES, Alceu Ferreira. **Desenvolvimento de um sistema de posicionamento automático para painéis fotovoltaico**. 2008. 168p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual Paulista – Campus de Botucatu. São Paulo, 2008.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição Rev 6**. Brasília, 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo3_Revisao_6%20-%20LIMPO.pdf>. Acesso em: 10 de abril de 2017.

ANEEL. **Resolução N°482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e mini geração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providencias. ANEEL, 2012b**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 13 abril de 2017.

ASIABANPOUR, Bahram *et al.* ***Fixed versus sun tracking solar panels: a economic analysis***. Ingram School of Engineering, Texas State University. San Marcos, Texas, 2016.

ASPE, Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE). **Energia Solar no Espírito Santo - Tecnologias, Aplicações e Oportunidades / Agência de Serviços Públicos de Energia do Estado do Espírito Santo (ASPE)**. Vitória, ES, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5410:2014. Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR IEC 62116:2012. Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16149:2013. **Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição**. Rio de Janeiro, 2013.

BERTOI, Elton Fagundes. **Análise dos incentivos à microgeração distribuída sob a perspectiva da viabilidade econômica dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Monografia - Curso de especialização em Gestão de Energia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, 2012.

JAGER-WALDAU, Arnulf. **PV Status report 2016**. European Commission. Publications office of the European Union, Luxembourg, 2016.

BRAGA, Roberto. **Fundamentos e Técnicas de Administração Financeira**. São Paulo: Atlas, 1995.

BRITO, Miguel C.; SILVA, José A. **Energia Fotovoltaica: conversão de energia solar em eletricidade**. Artigo. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Lisboa – Pt, 2006.

CARVALHO, Daniel Rizzo. **Desenvolvimento de Um Rastreador Solar Biaxial**. Dissertação – pós-graduação em engenharia agrícola. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, 2011.

CATARIUS, Adrian; CHRISTINER, Mario. **Azimuth-Altitude Dual Axis Solar Tracker**. *Worcester polytechnic institute*. Worcester, 2010.

CRESESB, Centro de Referência para Energia Solar e Eólica. Sérgio de Salvo Brito **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2004.

CONFAZ. **Convênio ICMS 157, de 18 de dezembro de 2015. Brasília: Conselho Nacional de Política Fazendária, 2015**. Disponível em: <<https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2015/convenio-icms-157-15>>. Acesso em: 10 de abril de 2017.

COSTA, Diego Luiz Monteiro; FREITAS, Luiz Carlos Gomes; LIMA, Gustavo Brito; RODRIGUES, Danillo Borges. **Desenvolvimento de um sistema automático para**

posicionamento de painéis fotovoltaicos. Artigo. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Elétrica. Uberlândia - MG, 2016.

DIESENDORF, Mark. **Greenhouse Solutions with Sustainable Energy / Garnaut Climate Change Review.** University of New South Wales. Sydney, 2007.

GREEN, Martin *et al.* **40% efficient sunlight to electricity conversion / Progress in Photovoltaic,** Australia, p. 685–691, junho 2015, volume 23.

EINSTEIN, Albert. **On the electrodynamics of moving bodies,** anuário de física, Alemanha, p. 891-921, setembro de 1905, volume 322.

EPIA, Solar Power Europe (European Photovoltaic Industry Association). **Global Market Outlook: what can we expect from the future?** Disponível em: <https://www.intersolarglobal.com/fileadmin/Intersolar-Global/Intersolar_Summit_Turkey/Proceedings_2016/1015_Kemal_Bayraktar_Solar_Power_Europe.pdf>. Acesso em: 26 de setembro de 2016.

FADIGAS, Eliane Aparecida Faria Amaral. **Energia Solar Fotovoltaica: Fundamentos, Conversão e Viabilidade técnica-econômica.** Apostila. GEPEA, Grupo de Energia Escola Politécnica Universidade de São Paulo – USP. São Paulo – SP, 2004.

GRIMM, Alice Marlene. **Meteorologia Básica – Notas de Aulas.** Universidade Federal do Paraná. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/cap2/cap2-1.html>>. Acesso em: 10 de abril de 2017.

GROTH, Júlio Augusto. **Usina de Geração Fotovoltaica.** Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

HOCHHEIN, Norberto. **Apostila de aula: Planejamento econômico e financeiro.** Florianópolis: Ufsc, 2003.

IEA, International Energy Agency. **Trends 2013 in photovoltaic applications: survey report of selected IEA countries between 1992 and 2012.** Photovoltaic Power Systems Programme (PVSP). Report IEA-PVPS T1-23, 2013.

INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Programa Brasileiro de Etiquetagem – Tabela de Eficiência Energética – Sistema de Energia Fotovoltaica – Módulos**. Edição 2017.

KASSAI, José Roberto; KASSAI, Sílvia; SANTOS, Ariovaldo dos; ASSAF NETO, Alexandre. **Retorno de Investimento: Abordagem Matemática e Contábil do Lucro Empresarial**. São Paulo: Atlas 2000.

LEMES JUNIOR, Antônio Barbosa; RIGO, Cláudio Miessa; CHEROBIM, Ana Paula Mussi Szabo. **Administração Financeira: Princípios, Fundamentos e Práticas Brasileiras**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MARQUES, Fernando Rodrigues. **Perspectivas para a energia solar no Brasil**. Revista Business School São Paulo, 2014.

MASUKO, Keiichiro, , M. Shigematsu, T. Hashiguchi, D. Fujishima, M. Kai, N. Yoshimura, T. Yamaguchi, Y. Ichihashi, T. Mishima, N. Matsubara, T. Yamanishi, T. Takahama, M. Taguchi, E. Maruyama, and S. Okamoto, IEEE J. Photovoltaics 4. **Achievement of More Than 25% Conversion Efficiency With Crystalline Silicon Heterojunction Solar Cell**. IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAIC, 2014.

MIRANDA, Arthur Biagio Canedo Montesano. **Análise de viabilidade econômica de um sistema fotovoltaico conectado à rede**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro/ Escola Politécnica. Rio de Janeiro, 2014.

MONTEIRO, Flávio Áureo Moura (2007). **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar**. Dissertação - pós-graduação em tecnologia energéticas e nucleares. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, PE, 2007.

MOTTA, Regis da Rocha. **Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais / Regis da Rocha Motta / Guilherme Calôba**. São Paulo: Atlas, 2013.

OLDENBURG. **Photovoltaics Lectures**. Carl Von Ossietzky Universität Oldenburg. Eldorado Summer School, 1994.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESE. Rio de Janeiro, 2014.

RIBEIRO, Sandro Carneiro; Prado, Pedro Paulo Leite; Gonçalves, João Bosco. **Projeto e desenvolvimento de um rastreador solar para painéis fotovoltaicos**. Simpósio de excelência em gestão e tecnologia, 2012.

RÜTHER, Ricardo. **Edifícios solares fotovoltaicos: o potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil**. Florianópolis: UFSC / LABSOLAR, 2004.

ROSS, Stephen A. **Administração financeira** / Stephen Ross, Randolph W. Westerfield, Jeffrey F. Jaff; tradução Antonio Zoratto Sanvicente. – 2 ed. – 9. Reimpr. – São Paulo: Atlas, 2009.

SADIKU, Matthew N. O. **Análise de circuitos elétricos com aplicações** / Matthew N. O. Sadiku, Sarhan M. Musa, Charles K. Alexander; tradução: Luiz Carlos do Nascimento, Warley de Sousa Sales; revisão técnica: Antonio Pertence Júnior. – Porto Alegre: AMGH. ISBN 978-85-8055-302-4, 2014.

SANTOS, Amanda Moraes. **Tecnologia Fotovoltaica**. Monografia. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio Janeiro/Escola Politécnica, 2013.

SANTOS, Edno Oliveira de. **Administração Financeira da Pequena e Média Empresa**. São Paulo: Atlas, 2001.

STRACHOSKI, Patrícia. **Análise de viabilidade econômica de um projeto de investimento em uma indústria de artefatos de cimentos**. Monografia. Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Criciúma, 2001.

SOLARGIS. **Solar resource maps for Brazil. 2013**. Disponível em: <<http://solargis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/brazil>>. Acesso em: 07 de junho de 2017.

THOMAZINI, Daniel; ALBURQUERQUE, Pedro Urbano Braga. **Sensores Industriais: fundamentos e aplicações**. – 8. ed. rev. e atual. – São Paulo: Érica, 2011.

THOMAZ, Pedro Eduardo Vieirales João. **Análise técnico-econômica de uma minigeração fotovoltaica em um galpão logístico em contagem – MG**. Monografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro/Escolar Politécnica. Rio de Janeiro, 2016.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica** / Mauricio Tiomno Tolmasquim (coord.) – EPE: Rio de Janeiro, 2016.

TREVELIN, Felipe Camargo. **Estudo comparativo entre métodos de rastreamento solar aplicados a sistemas fotovoltaicos**. Monografia. USP, São Carlos, 2014.

VERA, Luis Horacio. **Programa computacional para dimensionamento e simulação de sistemas fotovoltaicos autônomos**. Dissertação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de pós-graduação em engenharia mecânica. Porto Alegre, junho de 2004.

VIEIRA, Romênia Gurgel (2014). **Análise Comparativa do Desempenho entre um Painel Solar Estático e com Rastreamento no Município de Mossoró-RN**. 2014. Dissertação. 86f. Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Mossoró – RN.

VIVACQUA, Daniel Nascimento. **Considerações sobre a fabricação nacional de módulos fotovoltaicos**. Dissertação – USP, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2016

ZILLES, R.; GARLHADO, M. A. B.; MACÊDO, W. N.; OLIVEIRA, S. H, F. **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. São Paulo-SP: Oficina de Textos, 2012. ISBN 978-85-7975-052-6.

ANEXOS

Anexo 1 – Programação grava no *Arduino Mega 2560*

```

/*****
* Universidade Federal do Espirito Santo *
* Mestrado em Energia - 2017 *
* Por Tiago Venturini *
* ANÁLISE DE MÁXIMA EFICIÊNCIA DO MÓDULO FOTOVOLTAICO *
* POLICRISTALINO COM SEGUIDOR SOLAR *
* *
*****

*/

//===== Variáveis dos motores=====

const int motorHorizontal = 5; //velocidade motor X - de 0 a 255
const int motorVertical = 6; //velocidade motor Y - de 0 a 255
const int dirHorizontal = 7; //direcao do motor X - HIGH ou LOW
const int dirVertical = 8; //direcao do motor Y - HIGH ou LOW

//===== LEDs =====

const int led1 = 2; // acendo o led 1
const int led2 = 3; // acendo o led 2
const int led3 = 12; // acendo o led 3
const int led4 = 13; // acendo o led 3

//===== Sensores de luminosidade =====

const int LDR1 = 11; // sensor 1 - cabo Azul/Azul claro
const int LDR2 = 1; // sensor 2 - cabo Verde/Verde claro
const int LDR3 = 2; // sensor 3 - cabo branco/amarelo
const int LDR4 = 3; // sensor 4 - cabo Marrom/Marron claro

```

```

//===== Variaveis para a corrente e tensão =====
int sensorCCM = 4; // sensor no pino 4 - corrente do Módulo fotovoltaica
int sensorT = 5; // sensor no pino 5 - corrente do motor horizontal
int sensorCCV = 10; // sensor no pino 5 - corrente do motor horizontal
int sensorCCH = 9; // sensor no pino 5 para medir a tensão;

double sensorCorrente = 0;
double currentValue = 0;
float sensorCorrente_aux = 0;
double correnteHD = 0;
double correnteHE = 0;
double correnteVD = 0;
double correnteVE = 0;
double potencia = 0;
double voltsporUnidade = 0.004887586;// 5%1023

//===== Recebe Valor lido pelo LDR =====
int valorlido1;
int valorlido2;
int valorlido3;
int valorlido4;

//===== Outras Variáveis =====
int Ajuste = 15;
int linha = 0; // variavel que se refere as linhas do excel
int repet = 0; // não deixa o sistema ficar travado em um unico comando
int repetLOW; // não aceita que ocorra muito movimentos somente em um sentido
int repetHIGH; // não aceita que ocorra muito movimentos somente em um sentido
int repetHIGHH;
int repetLOWH;

```

```

int LABEL = 1;

int retorno;

double corrente1;

double tensao;

//===== contadores de acionamento dos motores =====

int ContadorMotorH = 0; // Conta as vezes de acionamento dos motores
int ContadorMotorV = 0; // Conta as vezes de acionamento dos motores

//===== Setup =====

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  pinMode(motorVertical, OUTPUT);
  pinMode(motorHorizontal, OUTPUT);
  pinMode(dirVertical, OUTPUT);
  pinMode(dirHorizontal, OUTPUT);
  pinMode(led1, OUTPUT);
  pinMode(led2, OUTPUT);
  pinMode(led3, OUTPUT);
  pinMode(led4, OUTPUT);
  pinMode(sensorCCM, INPUT);
  pinMode(sensorCCV, INPUT);
  pinMode(sensorCCH, INPUT);

  Serial.println("CLEARDATA");      // Reset da comunicação serial

  Serial.println("LABEL,Hora, CorrenteHE, CorrenteHD, CorrenteVD, CorrenteVE,
MotorH, MotorV, CorrenteM, Tensao(V), Potencia(W), LDR1, LDR2, LDR3, LDR4");
  // Nomeia as colunas
}

void loop() {

```

```
//=====
//===== Desligar os motores caso esteja funcionando=====
    analogWrite(motorVertical,0);
    analogWrite(motorHorizontal,0);
//=====
//===== Realiza a primeira leitura dos sensores LDRs =====
    Serial.println("ANALISE INICIAL");
    valorlido1 = analogRead(LDR1);
    valorlido2 = analogRead(LDR2);
    valorlido3 = analogRead(LDR3);
    valorlido4 = analogRead(LDR4);
    Serial.print("LDR 1 de ajuste horizontal = ");
    Serial.println(valorlido1);
    Serial.print("LDR 2 de ajuste horizontal = ");
    Serial.println(valorlido2);
    Serial.print("LDR 3 de ajuste vertical = ");
    Serial.println(valorlido3);
    Serial.print("LDR 4 de ajuste vertical = ");
    Serial.println(valorlido4);
//=====
//Seção 0
    //Verificando se é o momento de retornar a posição inicial
    if (((valorlido2 - abs(valorlido1)) < 50) && ((valorlido3 + valorlido4) < 1050) ) {
        digitalWrite(led1, LOW);
        digitalWrite(led2, LOW);
        digitalWrite(led3, LOW);
        digitalWrite(led4, LOW);
    }
}
```

```

if (retorno < 1){
// Retorno para posição inicial apenas uma vez no dia
digitalWrite(dirVertical, LOW); // mover para direita LOW
analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical
delay(6500); //tempo suficiente para dar uma volta de 180graus
analogWrite(motorVertical, 0);
// Descolar módulo para posição horizontal no final do dia
digitalWrite(dirHorizontal, LOW); // Movimentação de acordo com o LDR3
analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE Horizontal
delay(50000);
analogWrite(motorHorizontal, 0);
retorno++; //conta quantas vezes deverá dar o retorno que é uma vez apenas
analogWrite(motorVertical,0);
analogWrite(motorHorizontal,0);
}

}

else {
digitalWrite(led1, HIGH);
digitalWrite(led2, HIGH);
digitalWrite(led3, HIGH);
digitalWrite(led4, HIGH);
// Deslocar módulo para iniciar os trabalhos do dia
if (retorno != 0 && (valorlido1 > 945 || valorlido2 > 945 || valorlido3 > 945 ||
valorlido4 > 945)){
digitalWrite(dirHorizontal, HIGH); // Movimentação do módulo para esquerda
analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE Horizontal

```

```

delay(36000);

analogWrite(motorHorizontal, 0);

returno = 0; //conta quantas vezes deverá dar o retorno que é uma vez apenas
}
}

//=====================================================
// Motor DC se movimenta no eixo VERTICAL de acordo com o LDR1 e LDR2
// Seção 1 - MOTOR VERTICAL - Verificando a iluminosidade no LDR1 e LDR2

sensorCorrente_aux=0;

sensorCorrente=0;

repet = 0;

if (((valorlido1 - valorlido2) > 15) && (valorlido3 > 750 || valorlido4 > 750) &&
(valorlido1 > 690 && valorlido2 > 400) && (returno == 0)){

    digitalWrite(led1, LOW); // rotaciona para esquerda

    Serial.println("*** Ajuste horizontal para esquerda!");

    while ((valorlido1 - valorlido2) > 1){

        digitalWrite(dirHorizontal, HIGH);

        analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE horizontal

        //===== Calculo de corrente pelo sensor para direita =====

        for(int i=10; i>0; i--){

            sensorCorrente_aux = (float) (analogRead(sensorCCH)-(1023/2)); // le o
            sensor na pino analogico A0 e ajusta o valor lido ja que a saída do sensor é
            (1023)vcc/2 para corrente =0

            sensorCorrente += pow(sensorCorrente_aux,2); // somam os quadrados das
            leituras.

        }

        sensorCorrente = (sqrt(sensorCorrente/10)) * voltsporUnidade; // finaliza o
        calculo da méida quadratica e ajusta o valor lido para volts

```

```

    correnteHE = (sensorCorrente/0.105877089); // calcula a corrente
    considerando a sensibilidade do sernsor (185 mV por amper)

```

```

    //=====

    delay(200);

    valorlido1 = analogRead(LDR1);
    valorlido2 = analogRead(LDR2);

    repet++;

    if (repet > 19){
        valorlido1 = 0;
        valorlido2 = 0;
        repetLOWH++;
        if (repetLOWH > 2){
            analogWrite(motorHorizontal,0);
            delay(40);
            digitalWrite(dirHorizontal, LOW);
            analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE vertical
            delay(12500);
            repetLOWH = 0;
            repetHIGHH = 0;
        }
    }

    analogWrite(motorHorizontal,0);

    ContadorMotorH++;
}

analogWrite(motorHorizontal,0);

```

```

//=====
=====

// Motor DC se movimenta no eixo horizontal de acordo com o LDR2 e LDR1

// Seção 2 - MOTOR HORIZONTAL - Verificando a iluminosidade no LDR2 e LDR1

sensorCorrente_aux=0;

sensorCorrente=0;

repet = 0;

if (((valorlido2 - valorlido1) > 15) && (valorlido3 > 750 || valorlido4 > 750) &&
(valorlido1 > 690 && valorlido2 > 400) && (retorno == 0)){

    digitalWrite(led2, LOW); // rotaciona para direita

    Serial.println("*** Ajuste horizontal para direita!");

    while ((valorlido2 - valorlido1) > 1){

        digitalWrite(dirHorizontal, LOW);

        analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE vertical

//===== Calculo de corrente pelo sensor para direita =====

        for(int i=10; i>0; i--){

            sensorCorrente_aux = (float) (analogRead(sensorCCH)-(1023/2)); // le o
sensor na pino analogico A0 e ajusta o valor lido ja que a saída do sensor é
(1023)vcc/2 para corrente =0

            sensorCorrente += pow(sensorCorrente_aux,2); // somam os quadrados das
leituras.

        }

        sensorCorrente = (sqrt(sensorCorrente/10)) * voltsporUnidade; // finaliza o
calculo da méida quadratica e ajusta o valor lido para volts

        correnteHD = (sensorCorrente/0.105877089); // calcula a corrente
considerando a sensibilidade do sernsor (185 mV por amper)

//=====

delay(200);

valorlido1 = analogRead(LDR1);

```

```

    valorlido2 = analogRead(LDR2);
    repet++;

    if (repet > 19){
        valorlido1 = 0;
        valorlido2 = 0;
        repetHIGHH++;
        if (repetHIGHH > 2){
            analogWrite(motorHorizontal,0);
            delay(40);
            digitalWrite(dirHorizontal, HIGH);
            analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE vertical
            delay(12500);
            repetLOWH = 0;
            repetHIGHH = 0;
        }
    }
    }
    analogWrite(motorHorizontal,0);
    ContadorMotorH++;
}

analogWrite(motorHorizontal,0);
valorlido1 = analogRead(LDR1);
valorlido2 = analogRead(LDR2);

//=====
// Motor DC se movimenta no eixo VERTICAL de acordo com o LDR3 e LDR4
// Seção 3 - MOTOR VERTICAL - Verificando a iluminosidade no LDR3 e LDR4

```

```

sensorCorrente_aux=0;

sensorCorrente=0;

repet = 0;

if (((valorlido4 - valorlido3) > 15) && (valorlido3 > 750 || valorlido4 > 750) &&
(valorlido1 > 690 && valorlido2 > 400) && (retorno == 0)){

    digitalWrite(led3, LOW); // rotaciona para esquerda

    Serial.println("*** Ajuste vertical para direita!");

    while ((valorlido4 - valorlido3) > 1){

        digitalWrite(dirVertical, LOW);

        analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical

        //===== Calculo de corrente pelo sensor para direita =====

        for(int i=10; i>0; i--){

            sensorCorrente_aux = (float) (analogRead(sensorCCH)-(1023/2)); // le o
sensor na pino analogico A0 e ajusta o valor lido ja que a saída do sensor é
(1023)vcc/2 para corrente =0

            sensorCorrente += pow(sensorCorrente_aux,2); // somam os quadrados das
leituras.

        }

        sensorCorrente = (sqrt(sensorCorrente/10)) * voltsporUnidade; // finaliza o
calculo da méida quadratica e ajusta o valor lido para volts

        correnteVD = (sensorCorrente/0.105877089); // calcula a corrente
considerando a sensibilidade do sernsor (185 mV por amper)

        //=====

        delay(10);

        valorlido3 = analogRead(LDR3);

        valorlido4 = analogRead(LDR4);

        repet++;

        if (repet > 39){

            valorlido3 = 0;

```

```

    valorlido4 = 0;
    repetLOW++;
    if (repetLOW > 2){
        analogWrite(motorVertical,0);
        delay(40);
        digitalWrite(dirVertical, HIGH);
        analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical
        delay(1500);
        repetLOW = 0;
        repetHIGH = 0;
    }
}
}

analogWrite(motorVertical,0);
ContadorMotorV++;
}

analogWrite(motorVertical,0);

//=====================================================
// Motor DC se movimenta no eixo VERTICAL de acordo com o LDR4 e LDR3
// Seção 4 - MOTOR VERTICAL - Verificando a iluminosidade no LDR4 e LDR3
sensorCorrente_aux=0;
sensorCorrente=0;
repet = 0;

if (((valorlido3 - valorlido4) > 15) && (valorlido3 > 750 || valorlido4 > 750) &&
(valorlido1 > 690 && valorlido2 > 400) && (retorno == 0)){

    digitalWrite(led4, LOW); //rotaciona para direita

    Serial.println("*** Ajuste vertical para esquerda!");

```

```

while ((valorlido3 - valorlido4) > 1){
digitalWrite(dirVertical, HIGH); // move-se para direita
analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical

//===== Calculo de corrente pelo sensor para direita =====

    for(int i=10; i>0; i--){

        sensorCorrente_aux = (float) (analogRead(sensorCCH)-(1023/2)); // le o
sensor na pino analogico A0 e ajusta o valor lido ja que a saída do sensor é
(1023)vcc/2 para corrente =0

        sensorCorrente += pow(sensorCorrente_aux,2); // somam os quadrados das
leituras.

    }

    sensorCorrente = (sqrt(sensorCorrente/10)) * voltsporUnidade; // finaliza o
calculo da méida quadratica e ajusta o valor lido para volts

    correnteVE = (sensorCorrente/0.105877089); // calcula a corrente
considerando a sensibilidade do sernsor (185 mV por amper)

//=====

    delay(10);

    valorlido3 = analogRead(LDR3);

    valorlido4 = analogRead(LDR4);

    repet++;

analogWrite(motorVertical,0);

    if (repet > 39){

        valorlido3 = 0;

        valorlido4 = 0;

        repetHIGH++;

        if (repetHIGH > 2){

            analogWrite(motorVertical,0);

            delay(40);

            digitalWrite(dirVertical, LOW);

```

```

        analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical
        delay(1500);
        repetLOW = 0;
        repetHIGH = 0;
    }
}
}
    analogWrite(motorVertical,0);
    ContadorMotorV++;
}

    analogWrite(motorVertical,0);
    delay(1000);

//=====
//= Última leitura dos sensores de luminosidade para finalizar a rotina =====
    valorlido1 = analogRead(LDR1);
    valorlido2 = analogRead(LDR2);
    valorlido3 = analogRead(LDR3);
    valorlido4 = analogRead(LDR4);
    Serial.println("ANALISE FINAL");
    Serial.print("LDR 1 de ajuste horizontal = ");
    Serial.println(valorlido1);
    Serial.print("LDR 2 de ajuste horizontal = ");
    Serial.println(valorlido2);
    Serial.print("LDR 3 de ajuste vertical = ");
    Serial.println(valorlido3);
    Serial.print("LDR 4 de ajuste vertical = ");
    Serial.println(valorlido4);

```

```

//===== Análise de produção de potência da placa FV =====
//aqui a leitura é mostrada entre 1 e 1024

sensorCorrente = 0;

sensorCorrente_aux = 0;

if ((valorlido4 > 340) && (valorlido2 > 350)) {

for(int i=100; i>0; i--){

    sensorCorrente_aux = (float) (analogRead(sensorCCM)-(1023/2)); // le o sensor
na pino analogico A0 e ajusta o valor lido ja que a saída do sensor é (1023)vcc/2 para
corrente =0

    sensorCorrente += pow(sensorCorrente_aux,2); // somam os quadrados das
leituras.

}

    sensorCorrente = (sqrt(sensorCorrente/ 100)) * voltsporUnidade; // finaliza o
calculo da méida quadratica e ajusta o valor lido para volts

    currentValue = (sensorCorrente/0.141540950557895); // calcula a corrente
considerando a sensibilidade do sernsor (185 mV por amper)

// Sensor de tensão

float ValorTensao = analogRead(sensorT);

tensao=((ValorTensao*0.00489)*5);

potencia = tensao*currentValue;

//Sensor de corrente

Serial.print("DATA,TIME,"); //inicia a impressão de dados, sempre iniciando

Serial.print(correnteHE, 10);

Serial.print(",");

Serial.print(correnteHD, 10);

Serial.print(",");

Serial.print(correnteVD, 10);

Serial.print(",");

Serial.print(correnteVE, 10);

```

```
Serial.print(",");
Serial.print(ContadorMotorH);
Serial.print(",");
Serial.print(ContadorMotorV);
Serial.print(",");
Serial.print(currentValue,10);
Serial.print(",");
Serial.print(tensao,10);
Serial.print(",");
Serial.print(potencia,10);
Serial.print(",");
Serial.print(valorlido1);
Serial.print(",");
Serial.print(valorlido2);
Serial.print(",");
Serial.print(valorlido3);
Serial.print(",");
Serial.print(valorlido4);
Serial.println(",");
linha++; // incrementa a linha do excel para que a leitura pule de linha em linha
sensorCorrente=0;
correnteHD = 0;
correnteHE = 0;
correnteVD = 0;
correnteVE = 0;
delay(1);
}
```

```

movimento();
}

//=====
//===== Comando para movimentar uma estrutura =====

void movimento(){
//inicializa uma variavel do tipo char chamada tecla
char tecla;
tecla = Serial.read();
switch (tecla){
case 'a':
    digitalWrite(dirHorizontal, HIGH); // movimento no eixo Horizontal de acordo com
o LDR1 e LDR2
    analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE Máxima
    delay(5000);

    break;
case 'A':
    while ((valorlido1 - valorlido2) > 1){
        digitalWrite(dirHorizontal, HIGH); // movimento no eixo Horizontal de acordo com
o LDR1 e LDR2
        analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE Máxima
        valorlido1 = analogRead(LDR1);
        valorlido2 = analogRead(LDR2);
    }
    analogWrite(motorHorizontal, 0);

    break;
case 'b':
    digitalWrite(dirHorizontal, LOW); // Direita

```

```
    analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE Máxima
    delay(5000);
break;
case 'B':
    while ((valorlido2 - valorlido1) > 1){
        digitalWrite(dirHorizontal, LOW); // movimento no eixo Horizontal de acordo com
o LDR1 e LDR2
        analogWrite(motorHorizontal, 255); //VELOCIDADE Máxima
        valorlido1 = analogRead(LDR1);
        valorlido2 = analogRead(LDR2);
    }
    analogWrite(motorHorizontal, 0);
break;
case 'c':
    digitalWrite(dirVertical, HIGH); // Move-se para esquerda
    analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical
    delay(300);
break;
case 'C':
    while ((valorlido4 - valorlido3) > 1){
        digitalWrite(dirVertical, HIGH);
        analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical
        valorlido3 = analogRead(LDR3);
        valorlido4 = analogRead(LDR4);
    }
    analogWrite(motorVertical, 0);
break;
```

```
case 'd':  
    digitalWrite(dirVertical, LOW); // Move-se para direita  
    analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical  
    delay(300);  
    break;  
case 'D':  
    while ((valorlido3 - valorlido4) > 1){  
        digitalWrite(dirVertical, LOW);  
        analogWrite(motorVertical, 255); //VELOCIDADE vertical  
        valorlido3 = analogRead(LDR3);  
        valorlido4 = analogRead(LDR4);  
    }  
    analogWrite(motorVertical, 0);  
    break;  
case 's':  
    analogWrite(motorVertical, 0); //VELOCIDADE ZERO  
    analogWrite(motorHorizontal, 0); //VELOCIDADE ZERO  
    delay(2);  
    break;  
default:  
    delay(59000);  
    }  
}
```

Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo 2 – Orçamento para aquisição e instalação do sistema fotovoltaico móvel

Orçamento: nº 0044

06/07/2016

**Energia Solar Espirito Santo**

Levando a energia do Sol até você

ORÇAMENTO PARA INSTALAÇÃO DO SISTEMA FOTOVOLTAICO**SISTEMA MÓVEL DIMENSIONADO:**

Quantidade de módulos	6
Potência instalada (em corrente contínua) - KWp	1,56
Área necessária (m²)	12
Investimento Total* ---> R\$ 16.574,60	
1 Inversor com Módulos de 260 Wp + Frete	R\$ 10.260,66
Placa com microcontrolador + Driver	R\$ 210,00
Estrutura metálica de sustentação e peças de fixação	R\$ 1.850,00
Motores + engrenagem	R\$ 850,00
Engenharia, projeto, montagem e instalação	R\$ 3.403,94

*Obs.: o valor informado está considerando o pagamento à vista.

LISTA DE MATERIAIS INCLUSO:

Cabo solar preto com proteção UV 4,0mm²	M	10,00
Cabo solar vermelho com proteção UV 4,0mm²	M	10,00
Cabo solar vd/am com proteção UV 4,0mm²	M	10,00
Conector (par) mc4 4mm solar	PC	2,00
Stb01-600v/01, string box cc+ca (1string cc 600v+20a dj. Ca)	CJ	1,00
Phb1500-ss, inversor fotovoltaico	CJ	1,00
Modulo fotovoltaico 255wp; (cs6p-255p) canadian solar	PC	6,00

EXEMPLO DE KIT GERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO

INVERSOR + MÓDULOS + ESTRUTURA DE SUSTENTAÇÃO + KIT ATERRAMENTO, CABOS, CONECTORES, E STRING BOX

Orçamento: nº 0044

06/07/2016

VALIDADE DA PROPOSTA

30 dias – a contar da data de envio desta proposta.

CONDIÇÕES GERAIS DE GARANTIA

- Os inversores têm garantia de 5 anos (defeito de fabricação), posto em fábrica;
- Módulos FV com garantia de 15 anos na geração de energia (80% de eficiência) fornecidos pelo fabricante dos módulos;
- String Box e Estrutura com 12 meses de garantia contra defeitos de fabricação, posto em fábrica e assistência técnica permanente;
- As demais instalações aplicadas têm garantia de 1 ano. Ficam excluídos desta garantia os desgastes normais de equipamentos, danos causados por imperícia do operador, falta de condições ambientais e acidentes.

PRAZO DE ENTREGA

O prazo de entrega para este produto pela transportadora em até 15 a 30 dias após a emissão do pedido. A Energia Solar Espírito Santo se exime de qualquer penalidade por atraso caso ocorram alterações de especificações após a emissão do pedido.

DADOS DA EMPRESA

CNPJ: 23.645.444/0001-80

Nome Empresarial: Tiago Venturini da Silva 10770241778

Endereço: Av. Guerino Gilbert, 623 – Conceição

Linhares – ES

CEP: 29900 - 537



Anexo 3 – Dias de coleta da potência (W) produzida do módulo fixo, com 1 e 2 eixos

Dias	Fixo	1 eixo vertical	2 eixos
04/jun			21,80
08/jun			18,97
14/jun			18,66
15/jun			20,91
16/jun			26,77
19/jun	11,61		
22/jun		20,23	
23/jun	18,72		
24/jun		14,83	
25/jun	9,20		
26/jun		19,73	
27/jun			8,92
28/jun	10,12		
29/jun		7,54	
05/jul		9,71	
06/jul			17,19
07/jul	11,84		
08/jul			13,67
09/jul	12,52		
10/jul			20,11
11/jul		17,87	
12/jul	16,62		
13/jul		17,83	
14/jul			14,42
15/jul	17,73		
16/jul	18,20		
17/jul	12,95		
20/jul		7,56	

(Conclusão)

Dias	Fixo	1 eixo vertical	2 eixos
21/jul		10,51	
22/jul		11,73	
23/jul		12,55	
24/jul		8,93	
25/jul			19,35
26/jul			22,46
27/jul			20,09
28/jul			16,36
29/jul			16,41
30/jul	5,52		
31/jul	15,45		
01/ago	14,37		
02/ago		17,03	
03/ago		12,09	
04/ago	13,16		
05/ago	14,39		
06/ago		16,96	
Média:	13,49	13,67	18,41
Energia total	7285909,98	7383515,13	9939499,79
Taxa de ganho:	0,0000%	1,34%	36,42%
Total de coletas:	15	15	15

Fonte: Elaborada pelo autor.

Anexo 4 – Produção e consumo total de energia durante todo segundo experimento

Dias	Energia total produzida (J)	Energia média consumida horizontal (J)	Energia média consumida vertical (J)	Consumo total horizontal (J)	Consumo total vertical (J)	Saldo de energia 1 eixo (J)	Saldo de energia 2 eixos (J)
04/jun	784914,10	0,30	0,27	16,53	3,83	0,00	784893,73
08/jun	682925,53	0,59	0,57	54,77	20,33	0,00	682850,42
14/jun	671775,31	0,38	0,32	15,59	7,86	0,00	671751,86
15/jun	752630,55	0,78	0,33	29,97	7,75	0,00	752592,82
16/jun	963618,62	0,30	0,12	9,30	2,61	0,00	963606,71
19/jun	417955,43	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22/jun	728228,70	0,00	0,12	0,00	1,63	728227,08	0,00
23/jun	673871,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24/jun	534018,15	0,00	0,13	0,00	5,65	534012,49	0,00
25/jun	331054,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26/jun	710297,91	0,00	0,11	0,00	1,70	710296,22	0,00
27/jun	321271,19	0,18	0,13	2,38	7,35	0,00	321261,46
28/jun	364252,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29/jun	271474,23	0,00	0,18	0,00	6,34	271467,89	0,00
05/jul	349484,61	0,00	0,14	0,00	4,00	349480,62	0,00
06/jul	618850,32	0,23	0,14	7,44	2,15	0,00	618840,73
07/jul	426397,58	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
08/jul	492206,56	0,20	0,11	7,34	1,88	0,00	492197,34
09/jul	450640,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10/jul	723980,08	0,23	0,16	10,25	1,92	0,00	723967,91
11/jul	643287,48	0,00	0,24	0,00	2,20	643285,28	0,00
12/jul	598317,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13/jul	641982,59	0,00	0,23	0,00	1,88	641980,71	0,00
14/jul	518951,00	0,23	0,15	10,67	2,65	0,00	0,00
15/jul	638449,62	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16/jul	655234,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	655234,94
17/jul	466041,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20/jul	272227,42	0,00	0,11	0,00	0,71	272226,72	0,00
21/jul	378213,11	0,00	0,13	0,00	2,49	378210,62	0,00
22/jul	422157,91	0,00	0,22	0,00	2,20	422155,71	0,00
23/jul	451841,90	0,00	0,37	0,00	1,93	451839,97	0,00
24/jul	321537,01	0,00	0,24	0,00	1,13	321535,88	0,00
25/jul	696679,00	0,26	0,21	5,11	4,91	696668,98	0,00

Anexo 5 - Fluxo de caixa para geração da estrutura fixa

Anos	Geração (kWh)*	Valor financeiro produzido (R\$)	Fluxo de caixa descontado	Fluxo de caixa acumulado (R\$)
Ano 0	0	0	0	-R\$ 14.240,60
Ano 1	2.361,74	R\$ 1.750,23	R\$ 1.613,11	-R\$ 12.627,49
Ano 2	2.347,57	R\$ 1.739,73	R\$ 1.477,82	-R\$ 11.149,67
Ano 3	2.333,49	R\$ 1.729,29	R\$ 1.353,87	-R\$ 9.795,79
Ano 4	2.319,49	R\$ 1.718,91	R\$ 1.240,32	-R\$ 8.555,47
Ano 5	2.305,57	R\$ 1.708,60	R\$ 1.136,30	-R\$ 7.419,18
Ano 6	2.291,74	R\$ 1.698,35	R\$ 1.040,99	-R\$ 6.378,18
Ano 7	2.277,99	R\$ 1.688,16	R\$ 953,68	-R\$ 5.424,50
Ano 8	2.264,32	R\$ 1.678,03	R\$ 873,70	-R\$ 4.550,80
Ano 9	2.250,73	R\$ 1.667,96	R\$ 800,42	-R\$ 3.750,38
Ano 10	2.237,23	R\$ 1.657,95	R\$ 733,29	-R\$ 3.017,09
Ano 11	2.223,80	R\$ 1.648,00	R\$ 671,79	-R\$ 2.345,31
Ano 12	2.210,46	R\$ 1.638,12	R\$ 615,44	-R\$ 1.729,87
Ano 13	2.197,20	R\$ 1.628,29	R\$ 563,83	-R\$ 1.166,04
Ano 14	2.184,02	R\$ 1.618,52	R\$ 516,54	-R\$ 649,50
Ano 15	2.170,91	R\$ 1.608,81	R\$ 473,21	-R\$ 176,29
Ano 16	2.157,89	R\$ 1.599,15	R\$ 433,53	R\$ 257,24
Ano 17	2.144,94	R\$ 1.589,56	R\$ 397,17	R\$ 654,40
Ano 18	2.132,07	R\$ 1.580,02	R\$ 363,85	R\$ 1.018,26
Ano 19	2.119,28	R\$ 1.570,54	R\$ 333,34	R\$ 1.351,59
Ano 20	2.106,56	R\$ 1.561,12	R\$ 305,38	R\$ 1.656,97
Ano 21	2.093,92	R\$ 1.551,75	R\$ 279,77	R\$ 1.936,74
Ano 22	2.081,36	R\$ 1.542,44	R\$ 256,30	R\$ 2.193,04
Ano 23	2.068,87	R\$ 1.533,19	R\$ 234,81	R\$ 2.427,85
Ano 24	2.056,46	R\$ 1.523,99	R\$ 215,11	R\$ 2.642,96
Ano 25	2.044,12	R\$ 1.514,84	R\$ 197,07	R\$ 2.840,04
		Total:	R\$ 40.745,52	

* A geração já conta com perda de eficiência de 0,6% ao ano dos módulos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Anexo 6 - Fluxo de caixa da geração do sistema móvel pelo valor investido

Anos	Geração (kWh)*	Valor financeiro produzido (R\$)	Fluxo de caixa descontado	Fluxo de caixa acumulado (R\$)
Ano 0	0	0	0	-R\$ 16.574,60
Ano 1	3.104,51	R\$ 2.300,67	R\$ 2.120,44	-R\$ 14.454,16
Ano 2	3.085,89	R\$ 2.286,87	R\$ 1.942,59	-R\$ 12.511,57
Ano 3	3.067,37	R\$ 2.273,15	R\$ 1.779,67	-R\$ 10.731,90
Ano 4	3.048,97	R\$ 2.259,51	R\$ 1.630,40	-R\$ 9.101,50
Ano 5	3.030,67	R\$ 2.245,95	R\$ 1.493,66	-R\$ 7.607,84
Ano 6	3.012,49	R\$ 2.232,48	R\$ 1.368,39	-R\$ 6.239,45
Ano 7	2.994,41	R\$ 2.219,08	R\$ 1.253,62	-R\$ 4.985,84
Ano 8	2.976,45	R\$ 2.205,77	R\$ 1.148,48	-R\$ 3.837,36
Ano 9	2.958,59	R\$ 2.192,53	R\$ 1.052,15	-R\$ 2.785,21
Ano 10	2.940,84	R\$ 2.179,38	R\$ 963,91	-R\$ 1.821,30
Ano 11	2.923,19	R\$ 2.166,30	R\$ 883,06	-R\$ 938,24
Ano 12	2.905,65	R\$ 2.153,30	R\$ 809,00	-R\$ 129,24
Ano 13	2.888,22	R\$ 2.140,38	R\$ 741,15	R\$ 611,91
Ano 14	2.870,89	R\$ 2.127,54	R\$ 678,99	R\$ 1.290,90
Ano 15	2.853,66	R\$ 2.114,78	R\$ 622,04	R\$ 1.912,94
Ano 16	2.836,54	R\$ 2.102,09	R\$ 569,87	R\$ 2.482,81
Ano 17	2.819,52	R\$ 2.089,47	R\$ 522,07	R\$ 3.004,88
Ano 18	2.802,61	R\$ 2.076,94	R\$ 478,29	R\$ 3.483,17
Ano 19	2.785,79	R\$ 2.064,48	R\$ 438,17	R\$ 3.921,34
Ano 20	2.769,07	R\$ 2.052,09	R\$ 401,42	R\$ 4.322,76
Ano 21	2.752,46	R\$ 2.039,78	R\$ 367,75	R\$ 4.690,51
Ano 22	2.735,95	R\$ 2.027,54	R\$ 336,91	R\$ 5.027,43
Ano 23	2.719,53	R\$ 2.015,37	R\$ 308,65	R\$ 5.336,08
Ano 24	2.703,21	R\$ 2.003,28	R\$ 282,77	R\$ 5.618,85
Ano 25	2.686,99	R\$ 1.991,26	R\$ 259,05	R\$ 5.877,90
		Total:	R\$ 53.559,99	

* A geração já conta com perda de eficiência de 0,6% ao ano dos módulos.

Fonte: Elaborado pelo autor.