



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
TOCANTINS

CAMPUS PALMAS

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

LEANDRO PIVA DE SANTANA

LUILIO DA SILVA MOTA

**ESTUDO COMPARATIVO DE PAINEL FOTOVOLTAICO COM RASTREADOR
SOLAR DE UM EIXO**

Palmas, TO

2015

LEANDRO PIVA DE SANTANA
LUILIO DA SILVA MOTA

**ESTUDO COMPARATIVO DE PAINEL FOTOVOLTAICO COM RASTREADOR
SOLAR DE UM EIXO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial para
obtenção do Título de Tecnólogo do Curso
Superior de Tecnologia em Sistemas
Elétricos, do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Tocantins.

Orientador Prof. Esp. Felipe Tozzi Bittencourt
Co-orientador Prof. Dr. Maxwell Moura Costa

Palmas, TO
2015

LEANDRO PIVA DE SANTANA

LUILIO DA SILVA MOTA

**ESTUDO COMPARATIVO DE PAINEL FOTOVOLTAICO COM RASTREADOR
SOLAR DE UM EIXO**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado e aprovado como cumprimento às exigências legais do currículo do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas Elétricos pela Coordenação da Área Indústria do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Tocantins, Campus Palmas.

Palmas, 16 de dezembro de 2015.

Prof. Esp. Felipe Tozzi Bittencourt
Supervisor do Trabalho de Conclusão de Curso

Prof. Dr. Valci Ferreira Victor
Coordenador do CST em Sistemas Elétricos

Banca Examinadora:

Prof. Esp. Felipe Tozzi Bittencourt
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Maxwell Moura Costa
Co-Orientador

Prof. Dr. Fábio Lima de Albuquerque
Membro de Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcus André Pereira Oliveira
Membro de Banca Examinadora

RESUMO

Este trabalho mostra um estudo teórico e prático realizado a fim de comparar um painel fotovoltaico automatizado de forma a aumentar a energia fornecida em relação ao sistema convencional onde o painel solar fica imóvel em um ângulo fixo. A metodologia utilizada no experimento foi adaptada de estudos realizados por acadêmicos, mestrandos e doutorandos e foram encontrados em variadas fontes e meios de comunicação. O painel foi instalado no telhado de uma residência e todos os testes e estudos práticos foram realizados na mesma. Os resultados obtidos foram um aumento no rendimento energético de em média 26% no período de medição, com um sistema de rastreamento utilizando apenas R\$ 170,00 em materiais para sua montagem, destacando o contraste das vantagens que este sistema móvel tem em relação ao convencional.

Palavras-chave:

Rastreador Solar, Eficiência Energética, Energia Fotovoltaica, Energias Renováveis.

ABSTRACT

This work shows the beginning, development and conclusion of a theoretical study and practical performed to show the efficiency of a photovoltaic system of automated solar energy in order to increase the efficiency of the power supplied to the conventional system where the solar array is still in a fixed location. The experiment was developed based on other studies by scholars, masters and doctoral students, but with its own identity, that is, all the material and work have been developed by scholars of this defense. The results were satisfactory, showing the advantages that a mobile system has over conventional facing a scenario where renewable energy is increasingly exploited for use in distributed generation, as well as emphasizing the need for investment in technologies that improve the processes in electrical power generation systems, continually increasing energy efficiency.

Keywords:

Tracker Solar, Energy Efficiency, Solar Energy, Renewable Energy.

SUMÁRIO

RESUMO.....	3
ABSTRACT.....	4
1 INTRODUÇÃO	9
1.1. Contextualização do projeto.....	9
1.2. Justificativa	10
1.3. Objetivos	11
1.3.1. Objetivo geral	11
1.3.2. Objetivos Específicos.....	11
1.4. Estrutura do trabalho.....	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
2.1. Definição e origem da energia solar.....	13
2.2. Radiação solar direta e radiação difusa	13
2.3. Distribuição da radiação solar	14
2.4. Conversão fotovoltaica.....	15
2.5. Vantagens e desvantagens da energia solar fotovoltaica	16
2.6. Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição	17
2.6.1. Resolução normativa 482/2012 da ANEEL	19
2.7. Movimentos da Terra	21
3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO E MATERIAIS	25
3.1. Sistema de rastreamento solar	25
3.2. Sistema fixo (convencional)	30
3.3. Sistema de medição.....	30
3.3.1. Descrição dos componentes do sistema.....	31
3.3.1.1. Arduíno	31
3.3.1.2. Medidor de tensão	32
3.3.1.3. Medição de corrente	33
3.3.2. Montagem do hardware	35
4. TESTES E RESULTADOS	36
4.1. Teste do protótipo	36
4.2. Teste de hardware de medição.....	38
4.3. Teste de software.....	39
4.4. Resultado final	41
4.4.1. Medição diária.....	41

4.4.1.1. Análise	43
4.4.2. Medições periódicas	46
4.4.3. Sistema conectado à rede elétrica	47
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	48
5.1. Conclusão	48
5.2. Proposta para futuros projetos	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50
Apêndice A - Algoritmo de programação do arduíno para medição de tensão, corrente e potência.	54

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Radiação solar direta e difusa	14
Figura 2 – Radiação solar diária no Brasil – Média anual típica (Wh/m ² dia)	15
Figura 3 – Estrutura de uma célula de silício convencional.....	16
Figura 4 – Duração dos movimentos de rotação e translação da Terra.	22
Figura 5 – Estações do ano para o hemisfério sul.	22
Figura 6 – Ângulos que definem a posição do sol.....	23
Figura 7 – Trajetória do movimento aparente do sol (variação da altura solar).....	23
Figura 8 – Módulo solar com dois graus de liberdade de rastreamento.....	24
Figura 9 – Rastreador Solar- Inclinação	25
Figura 10 - Circuito de controle do sensor de alinhamento para o rastreo do sol nos dois sentidos	26
Figura 11 - Circuito de acionamento do motor.....	27
Figura 12 – Sistema de Controle do Motor de Corrente Contínua.....	28
Figura 13 – Fonte de Alimentação CC	29
Figura 14 – Fluxograma de funcionamento do rastreador solar	29
Figura 15 – Paine Solar Fotovoltaico Fixo (Convencional)	30
Figura 16 – Diagrama de blocos – Sistema de medição	31
Figura 17 – Arduino ATmega328.....	32
Figura 18 – Circuito divisor de tensão	32
Figura 19 – Sensor de corrente ACS712.....	33
Figura 20 – Diagrama estrutural do ACS712.....	34
Figura 21 – Diagrama elétrico do sistema de medição	35
Figura 22 – Bancada de medição.....	36
Figura 23 – Posição painel (manhã/meio dia/tarde)	37
Figura 24 – Hardware de medição de tensão e corrente	38
Figura 25 – Comparação de medição de corrente	39
Figura 26 – Programação e resposta de medição arduino.....	40
 Gráfico 1 – Potência acumulada em instalações fotovoltaicas no mundo – sistemas não conectados e sistemas conectados à rede.....	 18
Gráfico 2 – Preços de módulo de silício cristalino, mercado spot na Alemanha	19
Gráfico 3 – Produção anual de células e módulos fotovoltaicos	19

Gráfico 4 – Número de conexões por UF	20
Gráfico 5 – Número de conexões por fonte	21
Gráfico 6 – Leitura do painel solar fotovoltaico com rastreador solar durante carregamento de capacitor	40
Gráfico 7 – Leitura do painel solar fotovoltaico sem rastreador solar durante carregamento de capacitor	41
Gráfico 8 – Medição de potência máxima dia 14/11/2015 de 6:00 hs a 15:00 hs	42
Gráfico 9 – Medição de potência máxima dia 14/11/2015 de 16:00 hs a 18:00 hs ..	43
Gráfico 10 – Curva de energia total gerada no dia 08 de dezembro de 2015 com o céu aberto	44
Gráfico 11 – Curva de energia total gerada no dia 07 de dezembro de 2015 com um período de chuva	45
Gráfico 12 – Medição de energia elétrica dos dias 07 e 08 de dezembro de 2015 ..	45
Gráfico 13 – Medição periódica de energia elétrica	46

1 INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do projeto

Os combustíveis fósseis foram sempre os principais componentes da matriz energética mundial. O aumento da demanda mundial por energia e os impactos causados por estas fontes fizeram com que os países começassem a buscar fontes alternativas de geração de energia elétrica para substituir as fontes fósseis.

Ao longo do tempo, a energia solar tem sido cada vez mais visada pelos pesquisadores por ser uma fonte de energia inesgotável e limpa. O homem, criando novas tecnologias, conseguiu captá-la e armazená-la.

Os raios solares não emitem apenas calor para sistemas térmicos, contêm também vários comprimentos de ondas dos quais se pode obter a energia elétrica. O sistema de conversão de energia solar em elétrica, a partir de painéis fotovoltaicos, é uma forma instantânea de adquirir energia elétrica por meio do sol.

O BIG, Banco de Informações de Geração da ANEEL, atualizado no dia 26 de novembro de 2015, contém dados quantitativos de geração de energia elétrica no Brasil. Segundo BIG, a soma de todas as formas de geração hidrelétrica fiscalizada é de 65,21%, a eólica 4,8%, termelétrica 28,54%, a usina termonuclear 1,43% e a solar 0,02%. Essas porcentagens referem-se à potência fiscalizada que é igual à considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora (BIG – Capacidade de Geração no Brasil, 2015). A geração de energia fotovoltaica no Brasil ainda é muito pouco explorada, comparado com as demais fontes geradoras, sendo que tem um grande potencial pela sua localização geográfica no planeta.

A geração fotovoltaica é uma tecnologia ainda cara dependendo da aplicação, portanto, mesmo em sistemas relativamente pequenos, na maioria das vezes há vantagem econômica na utilização de rastreadores. A vantagem se torna ainda maior se o rastreador for associado com o uso de concentradores solares fixos. (Bione et al., 2004).

No Brasil, já são realidade os sistemas de geração conectados à rede de distribuição elétrica, graças à Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012, onde é possível que o consumidor seja também produtor. Nesse sistema o consumidor

pode gerar energia elétrica na sua residência e transmitir para distribuidora, abatendo em sua conta de energia consumida. Por meio de um medidor bidirecional, sabe-se quanto de energia foi injetada na rede e o quanto foi consumida. Na concessionária de energia elétrica do estado do Tocantins, a CELTINS (grupo Energisa), há normas que regulamentam esse tipo de serviço, a NTD 18 para sistemas de até 75 KW e a NTD 19 para sistemas acima de 75 KW (CELTINS, 2015).

1.2. Justificativa

A cultura brasileira já não é mais aquela de outrora em que o consumo excessivo de energia não era visto como um problema. Após o impacto da crise energética, programas de conscientização e de incentivo aos consumidores têm mudado esta cultura para a busca da eficiência energética. Os brasileiros estão cada vez mais preocupados em cortar gastos. Com isso, economizam energia utilizando alguns mecanismos como aquecedor solar, ar-condicionado com tecnologia “inverter”, lâmpadas fluorescentes, equipamentos eletrodomésticos classe “A”, lâmpadas de LED, entre outros.

Melhorar a eficiência energética faz diminuir o consumo de energia primária necessária para produzir um determinado serviço de energia, independente em que ponto da cadeia ocorreu a redução de energia. É importante distinguir a diferença entre eficiência energética e racionamento de energia, o segundo termo significa reduzir o serviço energético, enquanto que o primeiro termo é uma redução da energia para um mesmo serviço (PANESI, 2006).

A instalação de sistemas fotovoltaicos em residências ainda enfrenta resistências no mercado, devido o alto preço das células fotovoltaicas em relação ao seu rendimento. Muitas adaptações aos sistemas convencionais são propostas para aumentar este rendimento e assim melhorar a eficiência da energia gerada, tornando viável a instalação fotovoltaica (PANESI, 2006).

O uso de programas de eficiência energética traz diversos benefícios, destacando-se (PANESI, 2006):

- ✓ Geração de empregos;
- ✓ Aumento da produtividade e competitividade das empresas;
- ✓ Impacto positivo na economia e macroeconomia;

- ✓ Diminui emissões e impacto ao meio ambiente;
- ✓ Aumenta a consciência contra o desperdício;
- ✓ Melhoria em processos e equipamentos;
- ✓ Diminui a carga na ponta do sistema de distribuição.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo geral

Normalmente os elementos fotovoltaicos têm pouca eficiência na transformação de energia solar em elétrica. Com isso, para conseguir gerar mais energia elétrica, propõe-se adequar de maneira diferente os elementos de captação solar, de forma que o ângulo entre a incidência dos raios solares e a superfície da placa fotovoltaica seja o mais próximo de 90° , que é o ângulo necessário para o maior aproveitamento na captação desta energia.

Para que o ângulo entre a superfície do painel solar fotovoltaico e a incidência dos raios solares permaneça sempre o mais próximo de 90° , utiliza-se um sistema eletrônico que faz um ajuste automático dos painéis em função do movimento de rotação da Terra, rastreando o sol. O ajuste de correção devido o movimento de translação da Terra não será automático, mais o painel será instalado de forma que fique com uma inclinação de 10° ao Norte, que é o ângulo de latitude da região.

1.3.2. Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- ✓ Conhecer as aplicações do sistema fotovoltaico para obter um melhor aproveitamento em sua geração de energia.
- ✓ Desenvolver um sistema eletrônico de rastreamento solar.
- ✓ Analisar o desempenho de um painel fotovoltaico montado sobre um mecanismo que mova automaticamente esse painel em função do movimento de rotação da Terra, de forma a mantê-lo em uma posição que permite o maior aproveitamento na captação de energia.

- ✓ Identificar o rendimento de dois modelos de painel fotovoltaico, um fixo (convencional) e outro móvel (com rastreador solar).
- ✓ Conhecer as leis e normatizações para aplicar o sistema fotovoltaico à rede elétrica de distribuição.

1.4. Estrutura do trabalho

O trabalho se divide em capítulos:

- No capítulo 2 são apresentados os princípios físicos tratados no projeto;
- O capítulo 3 apresenta os materiais utilizados e os métodos de desenvolvimento do modelo proposto, a descrição dos materiais utilizados e construção do protótipo;
- O capítulo 4 apresenta os testes e resultados;
- No capítulo 5 são apresentadas as conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem como objetivo o embasamento teórico necessário para a resolução do problema apresentado no capítulo 1. Nele serão apresentados os principais conceitos sobre energia solar, sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição e os principais fenômenos físicos relacionados à proposta de desenvolvimento de um protótipo com rastreador solar eletrônico.

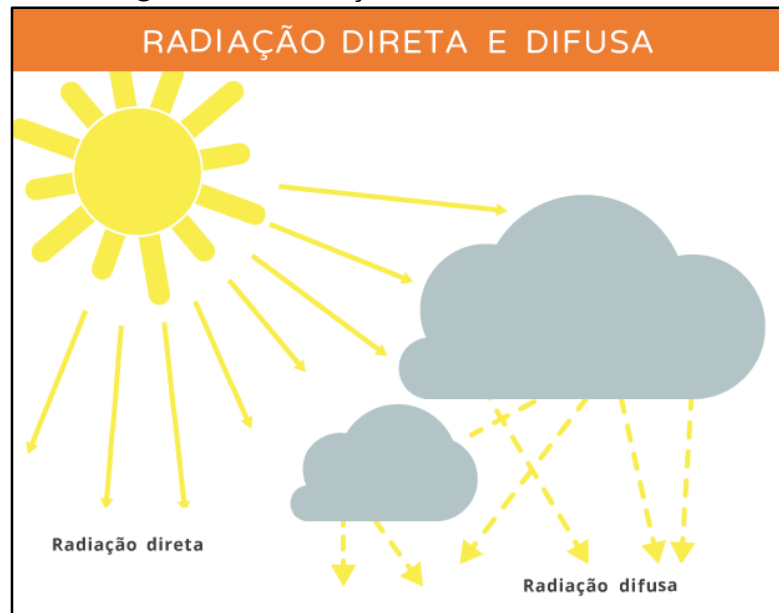
2.1. Definição e origem da energia solar

A maior parte das formas de vida conhecidas no planeta é mantida pela radiação solar direta ou indireta, atenuada pela atmosfera e pela água dos oceanos e mares. A energia solar é também a fonte primária de energia que sustenta a maior parte das outras fontes conhecidas, como os ventos, as ondas, a maré, os rios e, de forma menos direta a biomassa, etc. (Pituaçu solar, 2013).

O sol fornece energia na forma de radiação e de calor. Ambas podem ser convertidas em energia elétrica, a primeira por meio do Sistema Fotovoltaico e a segunda por meio do Sistema Solar-Térmico. O grande atrativo no uso da energia solar é o fato dela ser inesgotável, abundante, confiável, contínua e não poluente (Pituaçu solar, 2013).

2.2. Radiação solar direta e radiação difusa

A luz solar que atinge a superfície terrestre é composta por uma parte direta, uma parte indireta (difusa), conforme a Figura 1 (um). A radiação direta vem segundo a direção do sol, produzindo sombras bem definidas em qualquer objeto. Já a radiação difusa corresponde à parte da radiação que sofreu durante seu percurso diversos processos de difusão e reflexão por moléculas suspensas na atmosfera. Esta radiação prevalece em tempos nublados (BARROS, 2011). Além destes, ainda há o efeito albedo, que é a razão entre a quantidade de radiação refletida e a quantidade de radiação recebida.

Figura 1 – Radiação solar direta e difusa

Fonte: Energia heliotérmica (2015).

2.3. Distribuição da radiação solar

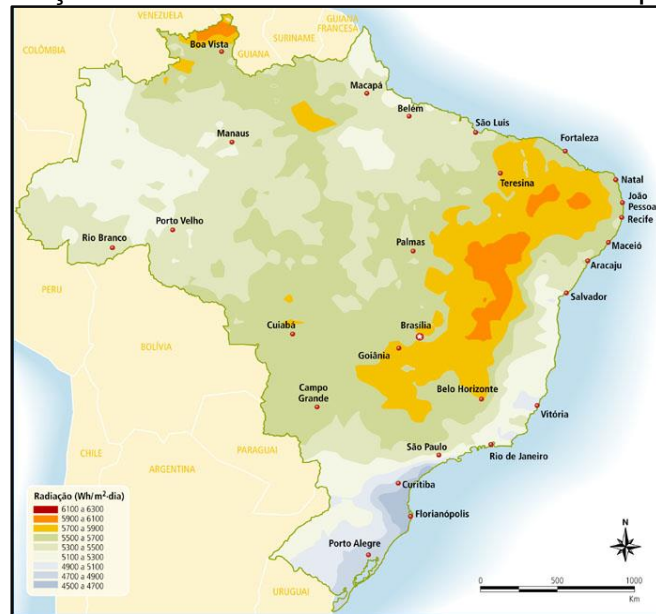
A radiação solar que a terra recebe equivale a uma quantidade de energia de 1×10^{18} kWh/ano, o que seria equivalente a aproximadamente centenas de milhões de vezes a geração de energia elétrica da usina de Itaipu, que é atualmente a 2ª maior usina hidrelétrica do mundo em geração de energia elétrica e que gera em média 9×10^{10} kWh/ano. A quantidade de energia solar que atinge a superfície da terra corresponde, aproximadamente, a dez mil vezes a demanda global de energia. Logo, usaríamos apenas 0,01% desta energia para suprir a demanda total da humanidade (BARROS, 2011).

A intensidade da radiação solar fora da atmosfera depende da distância entre o sol e a Terra. Durante o decorrer do ano, essa distância pode variar entre $1,47 \times 10^8$ km e $1,52 \times 10^8$ km. Devido a este fato, a intensidade de radiação varia entre 1325 W/m^2 e 1412 W/m^2 . O valor médio estabelecido da intensidade de radiação é de 1367 W/m^2 (BARROS, 2011).

A energia incidente acumulada em um ano, por unidade de área em algumas regiões situadas próximo da Linha do Equador, excede 2300 kWh/m^2 , enquanto que no sul da Europa não excede os 1900 kWh/m^2 (BARROS, 2011).

Na Figura 2 pode-se ver a média anual típica de radiação solar diária no Brasil em Wh/m^2 .

Figura 2 – Radiação solar diária no Brasil – Média anual típica (Wh/m²/dia)



Fonte: ANEEL: ATLAS de Irradiação Solar no Brasil (1998)(Adaptado).

2.4. Conversão fotovoltaica

Existem na natureza materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução totalmente “vazia” em baixas temperaturas (BARROS, 2011).

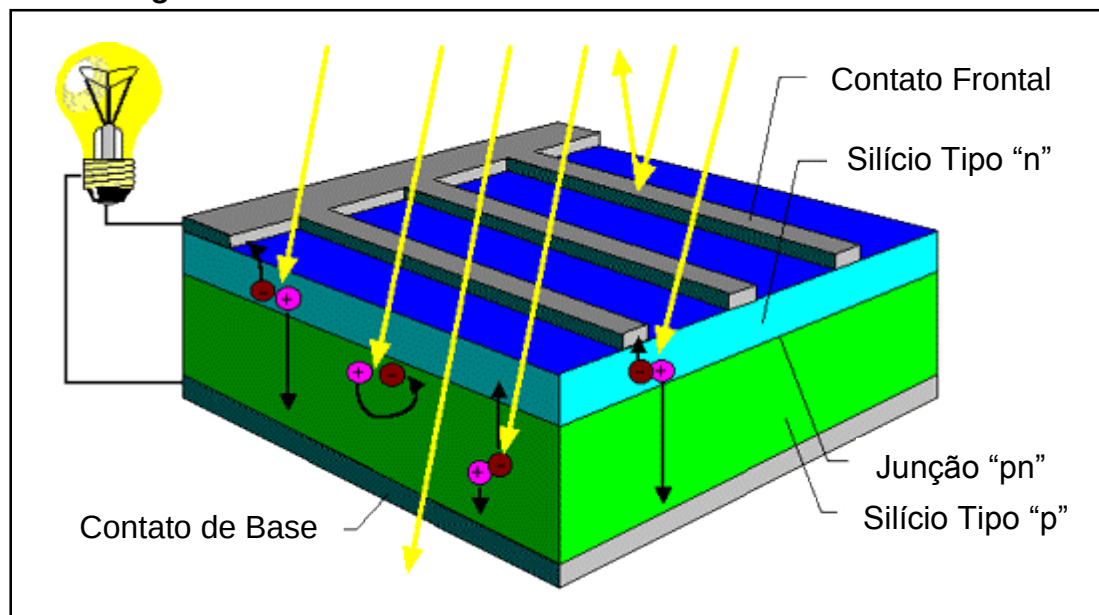
O semicondutor mais utilizado para realizar esta conversão é o silício cristalino. O silício cristalino apropriadamente processado, quando exposto à luz gera eletricidade. Em uma placa várias células solares feitas sobre lâminas delgadas de silício cristalino são interconectadas apropriadamente para se obter a tensão e corrente desejadas. Ao ser exposta à luz, a placa irá produzir eletricidade em corrente contínua que pode ser usada diretamente ou armazenada em baterias para uso posterior. A quantidade de energia elétrica produzida será proporcional ao tamanho da placa e à luminosidade existente.

A célula solar fotovoltaica convencional, ilustrada na Figura 3, é obtida por meio da união de duas regiões **p** e **n** de um cristal semicondutor, com condutividades distintas. Quando a luz do sol incide sobre esses materiais semicondutores, os fótons, ao energizar os elétrons da camada **n**, fazem com que estes e as lacunas criadas (as quais são caracterizadas como cargas positivas) se movimentem em direções opostas gerando um campo elétrico e consequentemente

uma corrente elétrica no semicondutor capaz de circular pelo circuito externo, e liberar a energia cedida pelos fótons ao criar-se os pares elétron-lacunas.

Assim, ao iluminar uma célula solar fotovoltaica que se encontra conectada em uma carga externa, será produzida uma diferença de potencial na carga acarretando uma circulação de corrente que sai para o circuito externo pelo terminal positivo e volta para a célula pelo terminal negativo. As células fotovoltaicas produzem baixas correntes e tensões e, por isso, são usualmente montadas em painéis contendo muitas unidades. Os painéis são geralmente agrupados em conjuntos, formando as centrais, usadas para gerar eletricidade para domicílios, fazendas, hospitais, edifícios, etc. (FONSECA, 2008).

Figura 3 – Estrutura de uma célula de silício convencional



Fonte: Princípio de Funcionamento Da Célula Fotovoltaica (2013).

2.5. Vantagens e desvantagens da energia solar fotovoltaica

A energia solar apresenta inúmeras vantagens, principalmente em países como o Brasil, onde o sol está presente o dia todo na maioria das regiões (FONSECA, 2008):

- ✓ É uma energia limpa, pois não gera nenhum tipo de poluição;
- ✓ Instalação muito simples;
- ✓ Vida útil dos módulos comprovadamente superiores há 25 anos, necessitando de mínima manutenção;

- ✓ Não consome combustível;
- ✓ Permite sua autossuficiência energética;
- ✓ Sem conta de luz, o sol é grátis.

Apesar de mais prós do que contras, a energia solar fotovoltaica também tem algumas desvantagens:

- ✓ Existe variação nas quantidades produzidas de acordo com a situação do clima (chuvas, neve);
- ✓ Locais com frequente cobertura de nuvens tendem a ter variações diárias de produção de acordo com o grau de nebulosidade;
- ✓ Devido não haver geração de energia durante a noite é necessário um sistema de armazenamento de energia;
- ✓ As formas de armazenamento da energia solar são pouco eficientes quando comparadas, por exemplo, aos combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás), e a energia hidroelétrica (água).

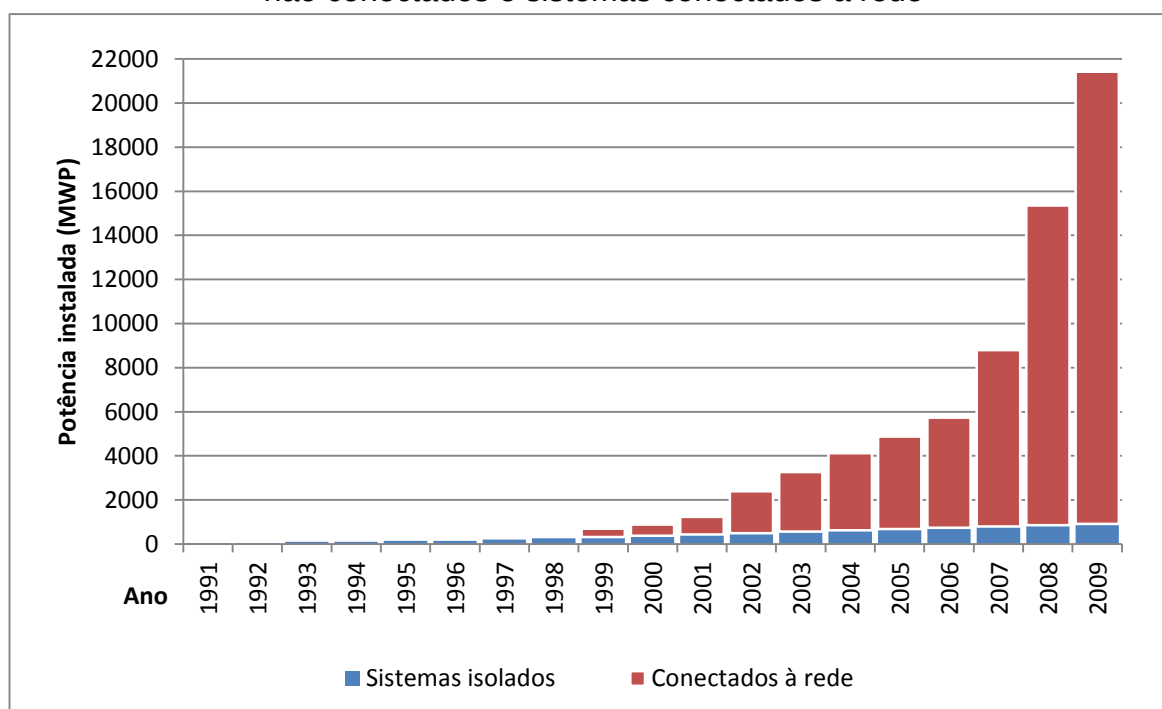
2.6. Sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição

As primeiras aplicações terrestres da tecnologia fotovoltaica ocorreram principalmente com sistemas isolados, capazes de abastecer cargas distantes da rede convencional de distribuição de eletricidade. A partir do final da década de 1990, porém, a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede passa a ocupar lugar cada vez mais expressivo entre as aplicações da tecnologia fotovoltaica (ZILLES; MACÊDO; GALHARDO; OLIVEIRA, 2012).

A aplicação da tecnologia fotovoltaica em sistemas isolados não é tão vantajosa quanto conectada à rede de distribuição, tendo em vista que para o primeiro caso, além de outros fatores, o armazenamento de energia é limitado. Portanto, quando este está totalmente carregado, o sistema de geração de energia é desligado, desperdiçando assim a fonte provinda da irradiação solar que por sinal não está disponível sempre que é necessária. Já no sistema conectado à rede de distribuição, a geração de energia é conectada ao que pode ser considerado armazenamento infinito, possibilitando o total aproveitamento da fonte fornecida, além de poder ser utilizada diretamente nas cargas e como abatedora do consumo pago à concessionária.

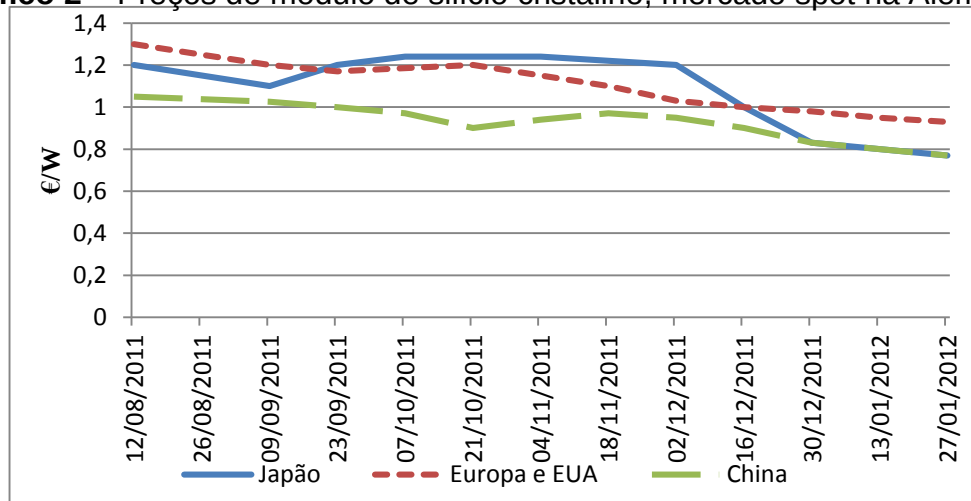
Existe uma demanda cada vez mais crescente na utilização da geração distribuída e isto se deve ao incentivo governamental aos investimentos em fontes renováveis, sendo regulamentada pela resolução normativa da ANEEL nº 482/2012. O aumento de sistemas que utilizam fontes renováveis se estende a uma escala global. O gráfico 1 mostra como a aplicação do sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica cresceu em todo o mundo durante o período de 1991 a 2009.

Gráfico 1 – Potência acumulada em instalações fotovoltaicas no mundo – sistemas não conectados e sistemas conectados à rede

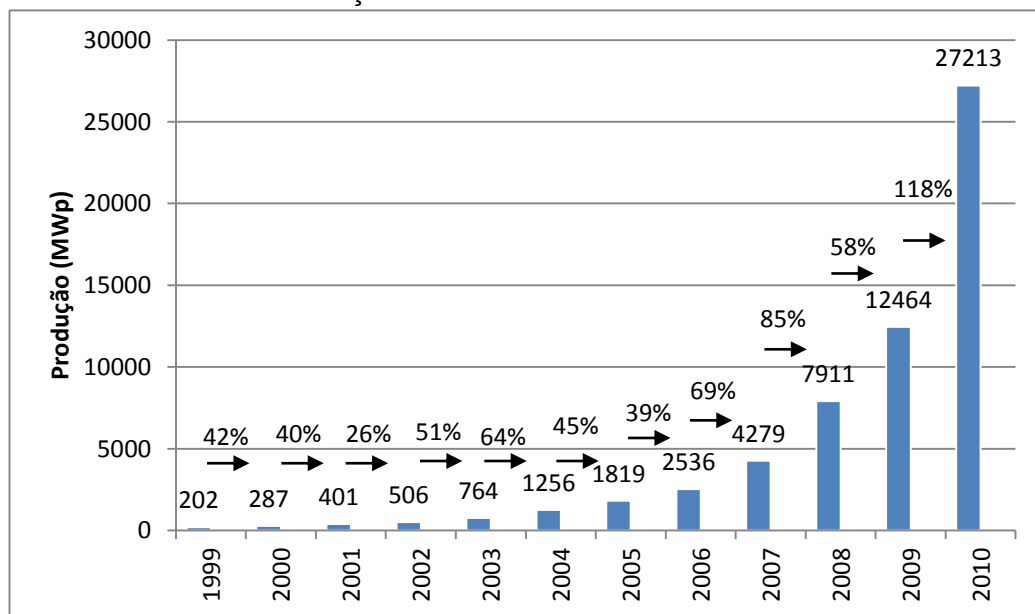


Fonte: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (2012) (adaptado).

Os preços de módulo de silício cristalino têm sido cada vez menores a cada ano nos países de maior produção, de acordo com o gráfico 2. Consequentemente a produção mundial de módulos e células fotovoltaicas vem apresentando taxas de crescimento superiores a 40% nos últimos dez anos. Destaca-se o incremento de 118%, ilustrado no gráfico 3, registrado em 2010 em comparação ao ano anterior. Esse crescimento tem proporcionado redução de custos de fabricação e, consequentemente, do preço de Watt comercializado. Atualmente na Alemanha, uma instalação fotovoltaica conectada à rede, dependendo da potência, custa entre 2.500 € a 3.200 €/kW instalado (ZILLES; MACÊDO; GALHARDO; OLIVEIRA, 2012).

Gráfico 2 – Preços de módulo de silício cristalino, mercado spot na Alemanha

Fonte: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (2012) (adaptado).

Gráfico 3 – Produção anual de células e módulos fotovoltaicos

Fonte: Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (2012) (adaptado).

2.6.1. Resolução normativa 482/2012 da ANEEL

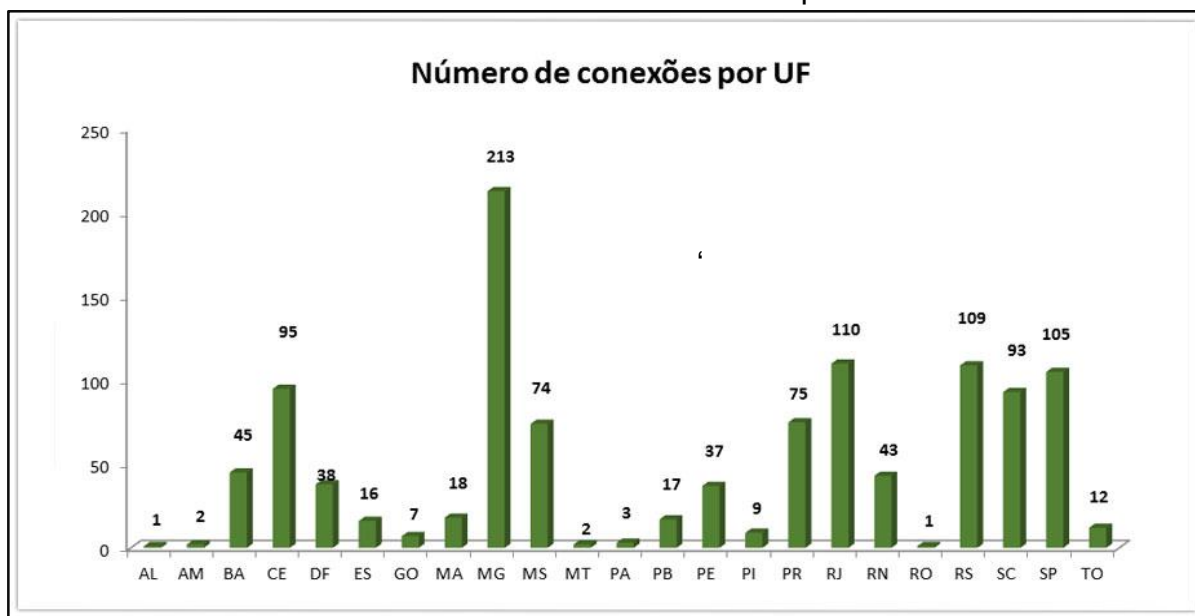
A regra que estabelece as condições gerais de acesso aos sistemas de distribuição e cria o sistema de compensação é a resolução normativa nº 482/2012 da ANEEL. Pela regra, as unidades geradoras poderão se utilizar da energia gerada e o que for excesso será injetado no sistema da distribuidora, gerando créditos de energia com validade de 36 meses que poderão ser utilizados para diminuir o valor

da conta de energia e também ser abatido no consumo dos meses subsequentes (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

Mesmo que a geração seja maior que o consumo, a unidade consumidora não fica isenta de pagamento à fatura da concessionária. Para clientes do grupo B (baixa tensão), deve ser o feito o pagamento referente ao custo de disponibilidade, que é o valor em reais equivalente a 30 kWh para sistemas monofásicos, 50 kWh para bifásicos e 100 kWh para trifásico. Para clientes do grupo A (alta tensão), a parcela de energia da fatura fica zerada, enquanto a parcela referente à demanda contratada é faturada normalmente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2015).

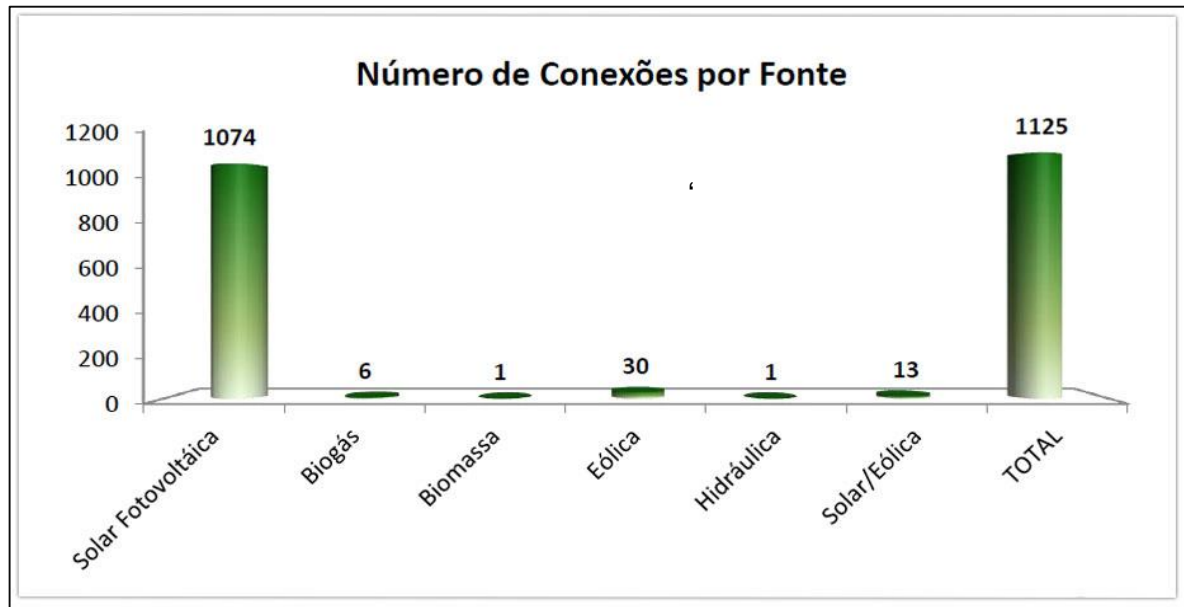
A geração distribuída no Brasil já supera 1000 conexões em 2015, no gráfico 4 pode-se ver o número de conexões por unidade federativa:

Gráfico 4 – Número de conexões por UF



Fonte: Geração distribuída supera 1000 conexões no Brasil (2015).

O sistema solar fotovoltaico ganha destaque como a fonte de energia mais utilizada nos sistemas conectados à rede de distribuição no Brasil, conforme no gráfico 5:

Gráfico 5 – Número de conexões por fonte

Fonte: Geração distribuída supera 1000 conexões no Brasil (2015).

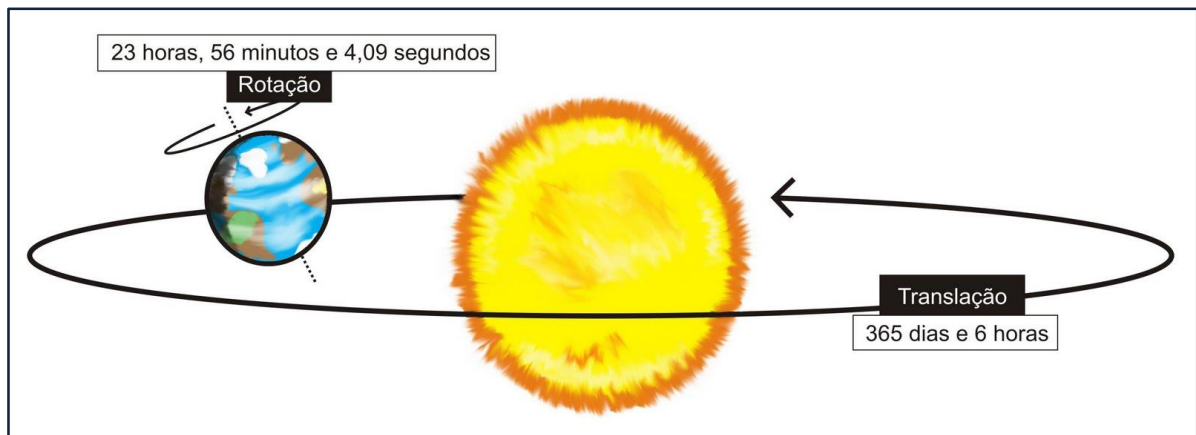
2.7. Movimentos da Terra

A Terra descreve uma trajetória elíptica em seu movimento de translação em torno do sol. Um trajeto completo tem a duração de aproximadamente 365 dias e seis horas. A cada quatro anos tem-se um ano bissexto, que possui um dia a mais devido à diferença de seis horas entre o ano do calendário e o ano real.

Ao mesmo tempo em que gira em torno do sol, a Terra gira em torno do seu próprio eixo, movimento chamado de rotação, de acordo com a Figura 4.

O eixo de rotação da Terra é levemente inclinado num ângulo de aproximadamente $23,5^\circ$ em relação ao eixo de translação. Esta inclinação faz com que os hemisférios norte e sul do planeta fiquem mais próximos ou distantes do sol em cada dia do ano, dependendo da posição do planeta em sua trajetória de translação, dando origem às estações. A variação no ângulo de posição do sol a partir do ponto de vista de um observador que esteja na Terra em cada estação do ano é chamada de declinação solar.

Figura 4 – Duração dos movimentos de rotação e translação da Terra.



Fonte: Principais movimentos da Terra (2014)

Próximo à linha do equador, a inclinação de rotação da Terra tem pouca influência sobre as estações conforme a Figura 5. Dependendo da localização geográfica, a variação na duração de dias e as diferentes massas de ar são os principais fatores que afetam as diferentes quantidades de energia solar recebida em cada região do planeta (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

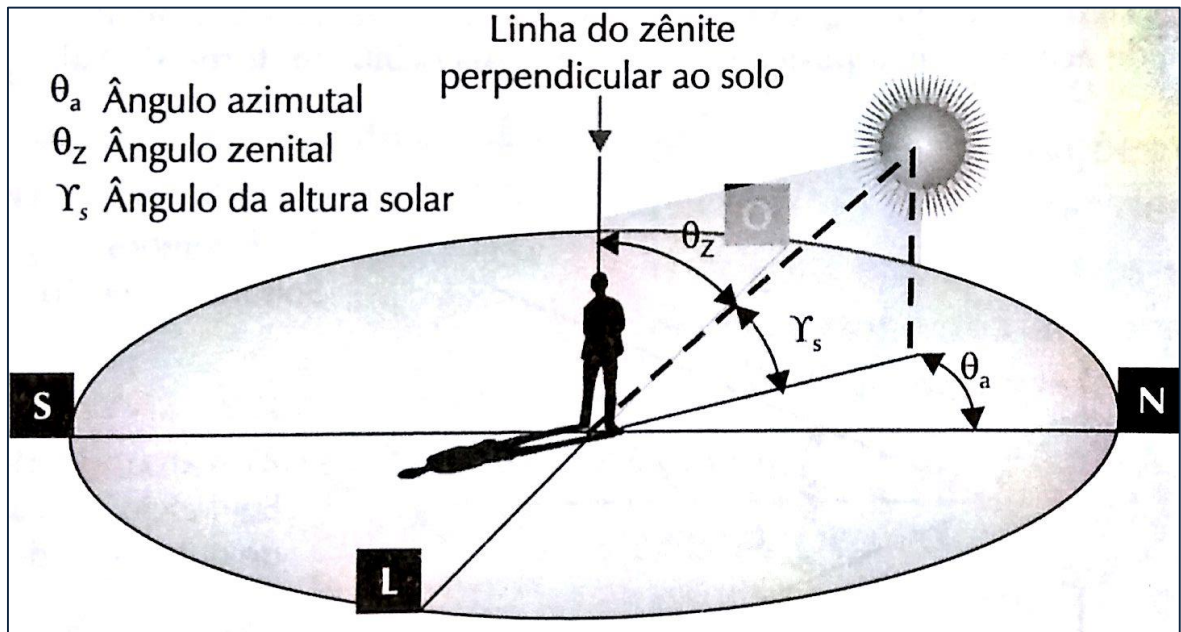
Figura 5 – Estações do ano para o hemisfério sul.



Fonte: Os planetas (2014).

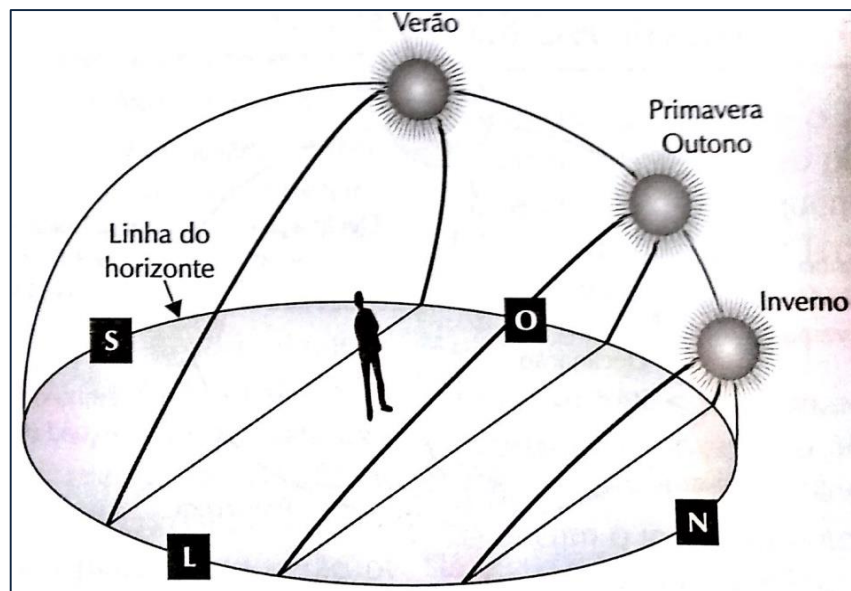
O modo como os raios solares incidem sobre a superfície terrestre depende da posição do sol no céu, que é determinada pelos ângulos azimuthal e zenital mostrado na Figura 6 e pela altura solar ilustrado na Figura 7.

Figura 6 – Ângulos que definem a posição do sol



Fonte: VILLALVA, GAZOLI (2012).

Figura 7 – Trajetória do movimento aparente do sol (variação da altura solar)

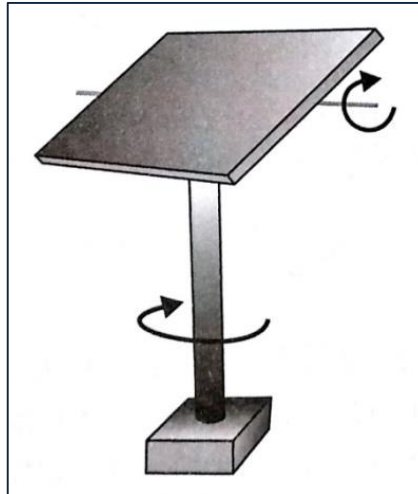


Fonte: VILLALVA, GAZOLI (2012).

O melhor aproveitamento da energia solar é obtido quando o painel solar está posicionado com um ângulo de 90° entre sua superfície e a incidência dos raios solares. Com isso, torna-se necessário que o painel seja ajustado a cada época do ano devido à variação da altura solar.

Módulos solares com rastreamento automático da posição do sol aperfeiçoam o ângulo de incidência dos raios solares automaticamente ao longo do dia e ao longo dos meses do ano. O sistema pode ter um ou dois graus de liberdade, como ilustra a Figura 8 (VILLALVA; GAZOLI, 2012).

Figura 8 – Módulo solar com dois graus de liberdade de rastreamento.



Fonte: VILLALVA, GAZOLI (2012).

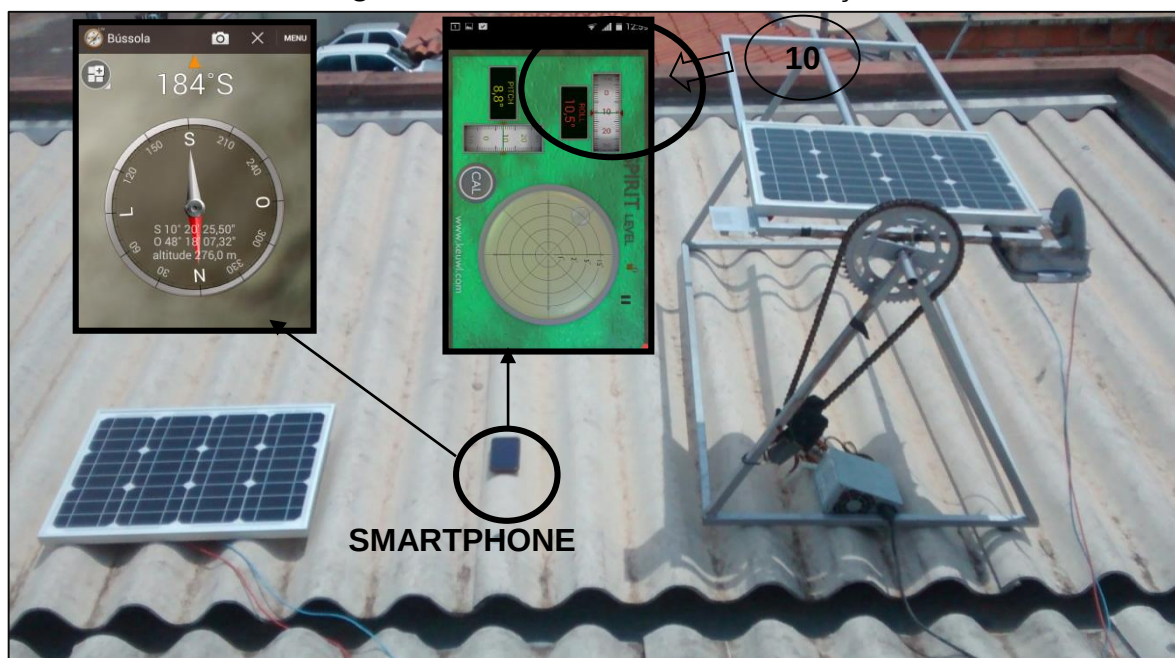
O modelo utilizado neste estudo possui apenas um grau de liberdade, que permite ajustar somente o ângulo de inclinação do módulo com o solo (ângulo azimutal) necessitando de ajuste manual para o ângulo zenital.

3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO E MATERIAIS

Os estudos foram realizados utilizando um protótipo para rastreamento solar e uma placa convencional instalados no telhado de uma residência, mostrado na Figura 9, e uma bancada montada com o objetivo de registrar as medições de tensão, corrente e consequentemente a potência durante o carregamento de um capacitor, por meio de sensores e uma placa ARDUINO UNO.

Sabendo que o ângulo de inclinação zenital do painel para o melhor aproveitamento da energia solar seja a latitude da região, sua instalação foi feita no telhado de uma residência na cidade de Palmas, estado do Tocantins, cuja inclinação é exatamente a latitude do local, ou seja, 10° ao Norte, que foram encontrados por meio de aplicativo de smartphone, conforme ilustrado na Figura 9, não havendo assim, necessidade de adequação.

Figura 9 – Rastreador Solar- Inclinação



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

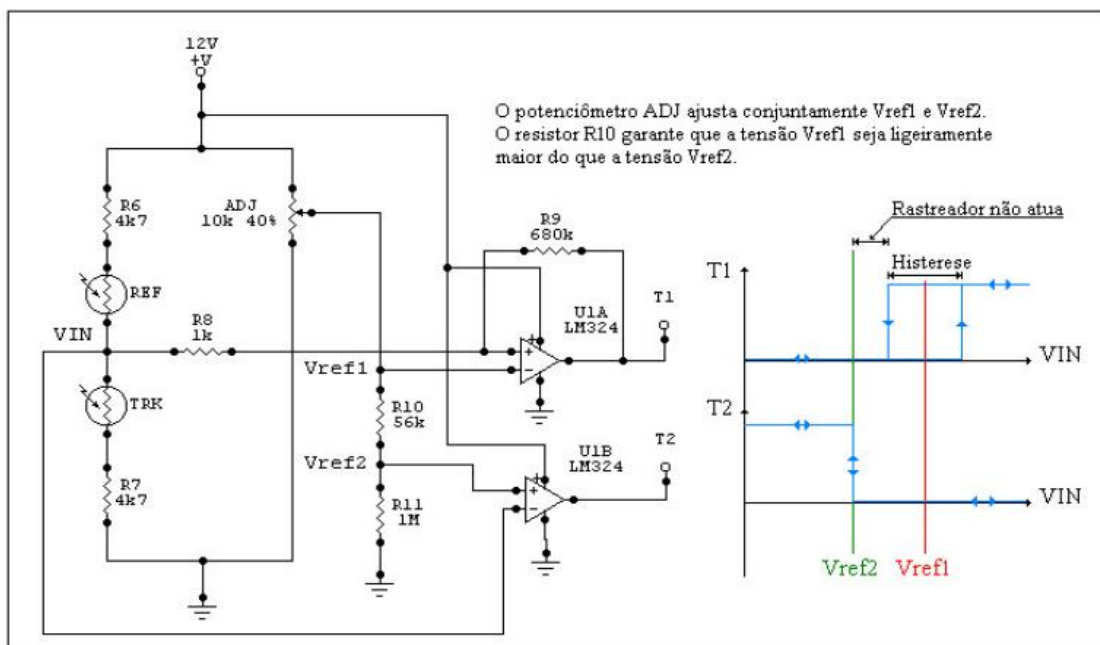
3.1. Sistema de rastreamento solar

O sistema de controle e o de acionamento do motor do rastreador solar ilustrado na Figura 9 foram baseados no trabalho de pós-graduação de Flávio Áureo Moura Monteiro no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e

Nucleares (PROTEN). O maior interesse foi porque é um projeto de baixo custo e de bom rendimento. Segundo Monteiro, o custo do seu sistema é um terço mais barato do que os importados, e garantiu também que o sistema promova o rastreamento do sol com boa precisão (erro máximo de 3 graus para céu claro) e possibilita um ganho significativo (até 42,9%) na energia solar coletada em comparação a sistemas FV fixos.

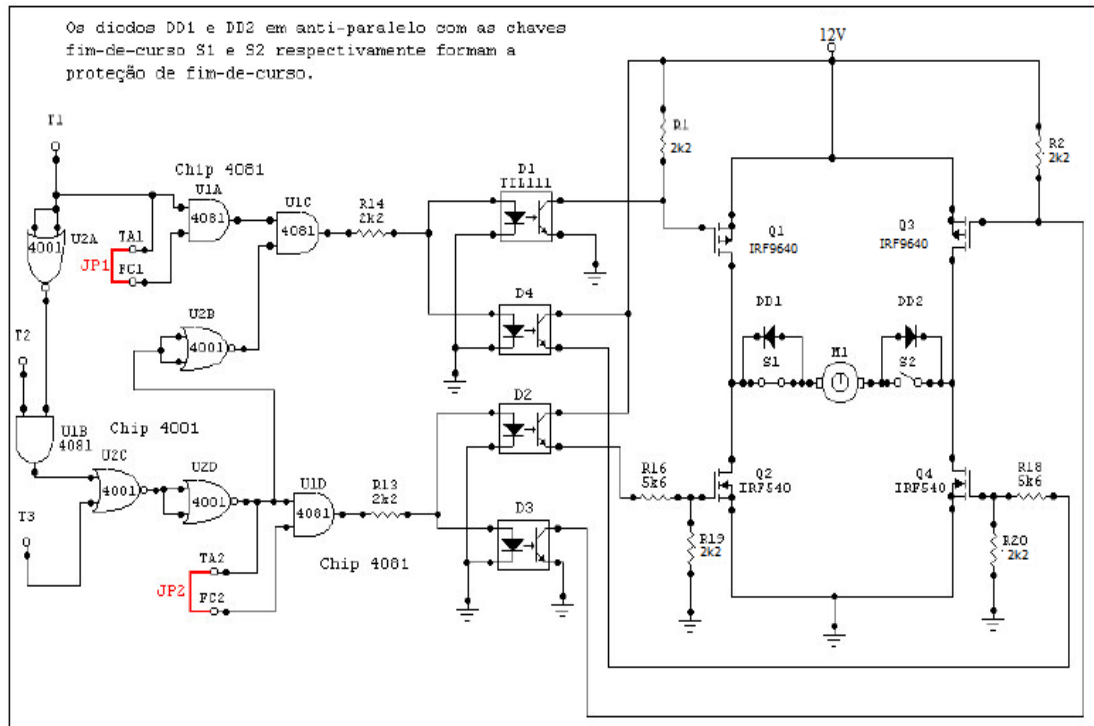
No projeto de Flávio Monteiro, são utilizados resistores dependentes de luz cuja resistência varia de acordo com a luminosidade captada, LDR's, junto com o comparador amplificador operacional, LM324, a fim de localizar a direção do sol. Para movimentar o painel, um motor de corrente contínua com tensão de 24 Vcc e circuito para carregar banco de baterias. O circuito de controle do sensor de alinhamento do painel está ilustrado na Figura 10 e o circuito de acionamento do motor na figura 11.

Figura 10 - Circuito de controle do sensor de alinhamento para o rastreamento do sol nos dois sentidos



Fonte: MONTEIRO (2007).

Figura 11 - Circuito de acionamento do motor



Fonte: MONTEIRO (2007).

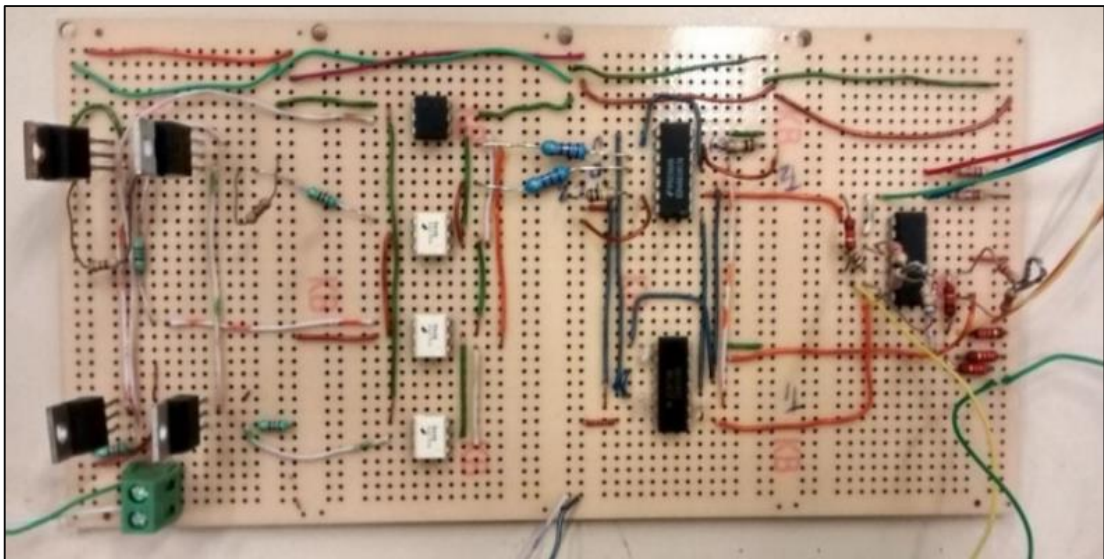
Neste trabalho foi substituído o motor de 24 Vcc por um de 12 Vcc, por ter sido mais fácil de encontrar no mercado e por ser necessário apenas uma fonte, já que o circuito é alimentado pela mesma tensão. Com isso, foi modificado o circuito de acionamento do motor, foram alterados os resistores e os MOSFET's da ponte "H" e foi retirado a bateria e o circuito para carregar a mesma, já que é um experimento conectado na rede de distribuição.

Conforme ilustrado na Figura 9, a montagem do sistema é feita com os seguintes itens:

- Um suporte flexível (fabricação própria) com liberdade de deslocamento de 360°, feito com estrutura metálica onde foi instalado o painel solar fotovoltaico, os sensores de luminosidade (LDR), o motor de corrente contínua e dois sensores fim de curso, um para o sentido horário e outro para o sentido anti-horário;
- Um painel solar fotovoltaico de fabricação chinesa, da marca SUN HOME Energia Solar, modelo ST-M30, com potência de 30 watts e tensão máxima 20 volts conectado ao sistema de medição por fios elétricos com seção de 2,5 mm²;

- Um motor de corrente contínua da marca Mabuchi, modelo para vidro elétrico de carro, com tensão de 12 volts e corrente nominal de 1,3 Ampères;
- Um conjunto com catraca, coroa e corrente comum de motocicleta;
- Uma placa eletrônica com um sistema de controle do rastreador solar e um sistema de acionamento do motor, montados e adaptados a este estudo com base no trabalho de dissertação (mestrado) de Flávio Áureo Moura Monteiro da Universidade Federal de Pernambuco em 2007, com o título: Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar. Na Figura 12 têm-se a placa eletrônica montada.

Figura 12 – Sistema de Controle do Motor de Corrente Contínua



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

- Uma fonte de alimentação bivolt com saída CC da marca GOLDSHIP ilustrado na Figura 13, modelo para computadores, potência de 500 watts e tensão de saída de $\pm 3,3$ volts, ± 5 volts e ± 12 volts:

Figura 13 – Fonte de Alimentação CC



3.2. Sistema fixo (convencional)

Para efeitos de comparação, foi instalado em local fixo outro painel solar fotovoltaico, conforme a Figura 15, idêntico ao utilizado no sistema móvel, conectado por fios de seção 2,5 mm² ao mesmo sistema de medição.

O que difere este sistema do outro é apenas o fato de não haver os equipamentos de automação para o movimento de rastreamento solar.

Figura 15 – Painel Solar Fotovoltaico Fixo (Convencional)



3.3. Sistema de medição

O sistema de medição de potência proposto tem maior linearidade e velocidade que os medidores convencionais. É um sistema de fácil instalação junto ao painel fotovoltaico. Com ele será medido a potência durante o carregamento de um capacitor de 25 V e 2200 μ F com um total de 350 amostras por medição, mostrando a potência máxima. Será utilizado um resistor de 1 Ω para a descarga do mesmo. Quando o capacitor é carregado, ele se comporta como um curto-circuito. O curto-circuito força o painel fotovoltaico a gerar o máximo de energia possível. Por isso na medição de potência o painel fotovoltaico é ligado diretamente com o capacitor por meio de um relé controlado pela programação do arduino que tem a função de fechar os contatos de carga e descarga do capacitor. A Figura 16 ilustra o diagrama de blocos do sistema.

Figura 16 – Diagrama de blocos – Sistema de medição

Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

3.3.1. Descrição dos componentes do sistema

Foi montado um sistema de medição arquitetado e programado de forma a medir a energia gerada tanto pela placa com rastreador solar quanto pela placa fixa. Para cada medição, realizada automaticamente a cada 2,5 minutos, existe um intervalo de 500 milissegundos entre a medição da placa fixa e a medição da placa móvel. Este sistema é composto pelos seguintes itens:

3.3.1.1. Arduíno

Um microcontrolador Arduino UNO é uma placa eletrônica baseada no microcontrolador ATmega328P. Ele possui 16 pinos de entradas/saídas digitais, 6 entradas analógicas, um oscilador de cristal de 16 MHz, uma conexão USB, uma entrada de alimentação e um botão de reset.

O microcontrolador Arduino é utilizado para receber os dados analógicos de corrente e tensão e fazer todo o processamento necessário para a obtenção da potência máxima e várias amostras de potência durante o carregamento do capacitor. E também mostrar os dados no computador através da porta serial. Utilizando o Arduino é possível fazer aplicações interagindo com o ambiente através da criação de programas que manipulem suas entradas e saídas, convertendo medidas do mundo real em sinais elétricos. Utilizando as entradas e saídas do Arduino é possível conectar sensores como o sensor de temperatura, luminosidade, umidade, pressão, distância e outros dispositivos como o displays, LED, interruptores, motores e placas extensíveis como GSM, 3G, Ethernet, bluetooth, relés e etc (PAULA, 2013).

Na Figura 17 é ilustrado o Arduino ATmega328.

Figura 17 – Arduino ATmega328



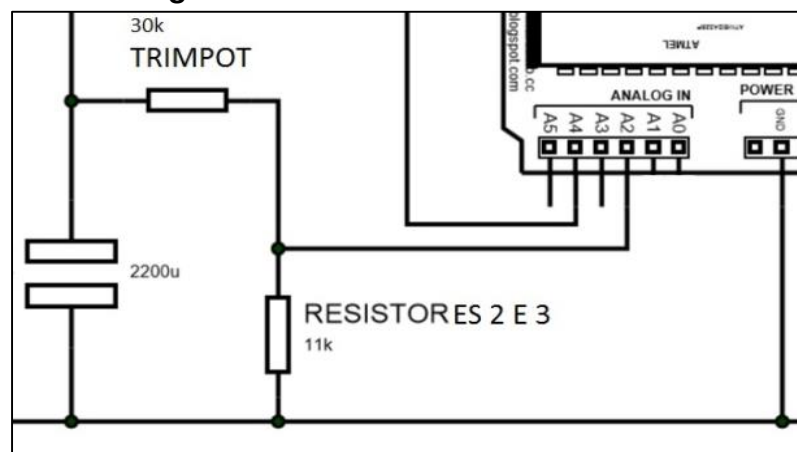
Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

3.3.1.2. Medidor de tensão

Nas entradas analógicas do Arduino é utilizada tensão máxima de 5V. Por isso é necessário um divisor de tensão, pois na saída do painel fotovoltaico terá tensão máxima de 19,5V.

A Figura 18 mostra o circuito divisor de tensão conectado ao arduino.

Figura 18 – Circuito divisor de tensão



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

Nesse circuito são utilizados dois resistores em série somando 11 K Ω e suas extremidades conectadas à entrada analógica do Arduino e um potenciômetro

(TRIMPOT) de 48 K Ω ajustado em 30 K Ω em paralelo. Com os resistores dessa forma e o potenciômetro para fazer o ajuste fino, é possível reduzir a tensão do painel na proporção em que o Arduino possa ler os dados.

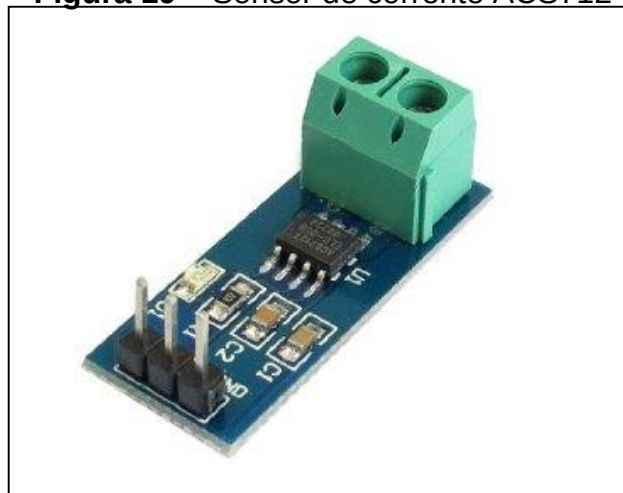
O Arduino lê a tensão reduzida e calcula a proporção inversa. Dessa forma é feita a medição de tensão do painel no momento do carregamento do capacitor.

3.3.1.3. Medição de corrente

É utilizado um sensor de efeito hall ACS712 de 5 ampères, ilustrado na Figura 19, fabricado pela Allegro Micro Systems, por apresentar boa linearidade, um bom isolamento entre a parte de potência e a parte de tratamento de dados, e um tamanho reduzido em um encapsulamento SOIC8. (ALLEGRO MICROSYSTEMS, INC., 2010). Abaixo, alguns dos benefícios e características desse CI listadas em seu datasheet (Datasheet dos sensores de efeito Hall, 2015):

- Baixa interferência;
- Erro de 1,5% a temperatura de 25°C;
- Tamanho reduzido;
- 1,2m Ω de resistência interna do condutor;
- 2,1 kVRMS de isolamento de tensão entre os pinos 1-4 para os pinos 5-8;
- Sensibilidade da saída de 66 a 185 mV/A.

Figura 19 – Sensor de corrente ACS712

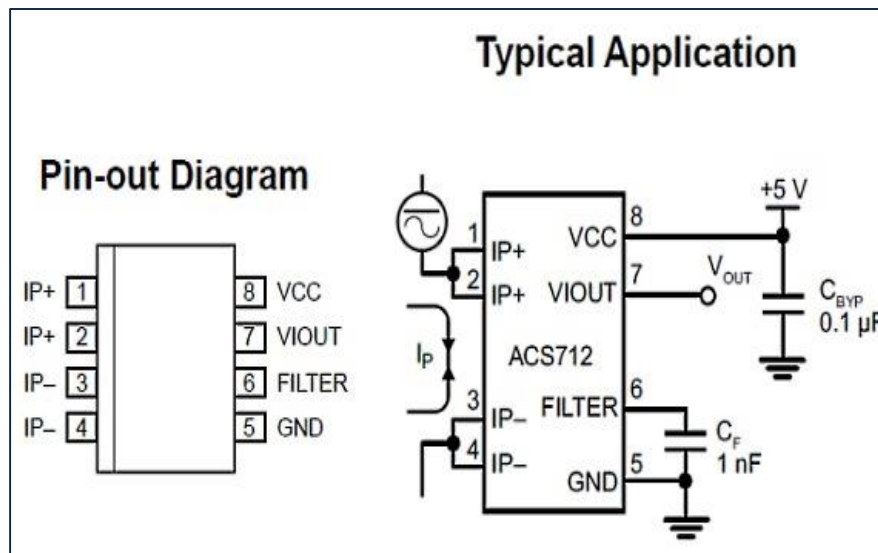


Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

O efeito Hall se baseia no surgimento de uma diferença de potencial entre as laterais de um condutor elétrico na presença de um campo magnético perpendicular a direção da corrente elétrica. Este efeito ocorre devido a cargas elétricas tenderem a se desviar de sua trajetória por causa da força de Lorentz criada no interior do condutor. Desta forma, cria-se um acúmulo de cargas nas superfícies laterais do condutor produzindo uma diferença de potencial (Medição efeito hall, 2015).

A grande vantagem da utilização de sensores de efeito Hall como elemento de medida do campo magnético é a capacidade de mensurar tanto campos contínuos como alternados em um único instrumento. (HALLIDAY,D.; RESNICK, R.; WALKER, J., 2007).

Figura 20 – Diagrama estrutural do ACS712



Fonte: A brief overview of allegro acs712 current sensor (part 1) (2015).

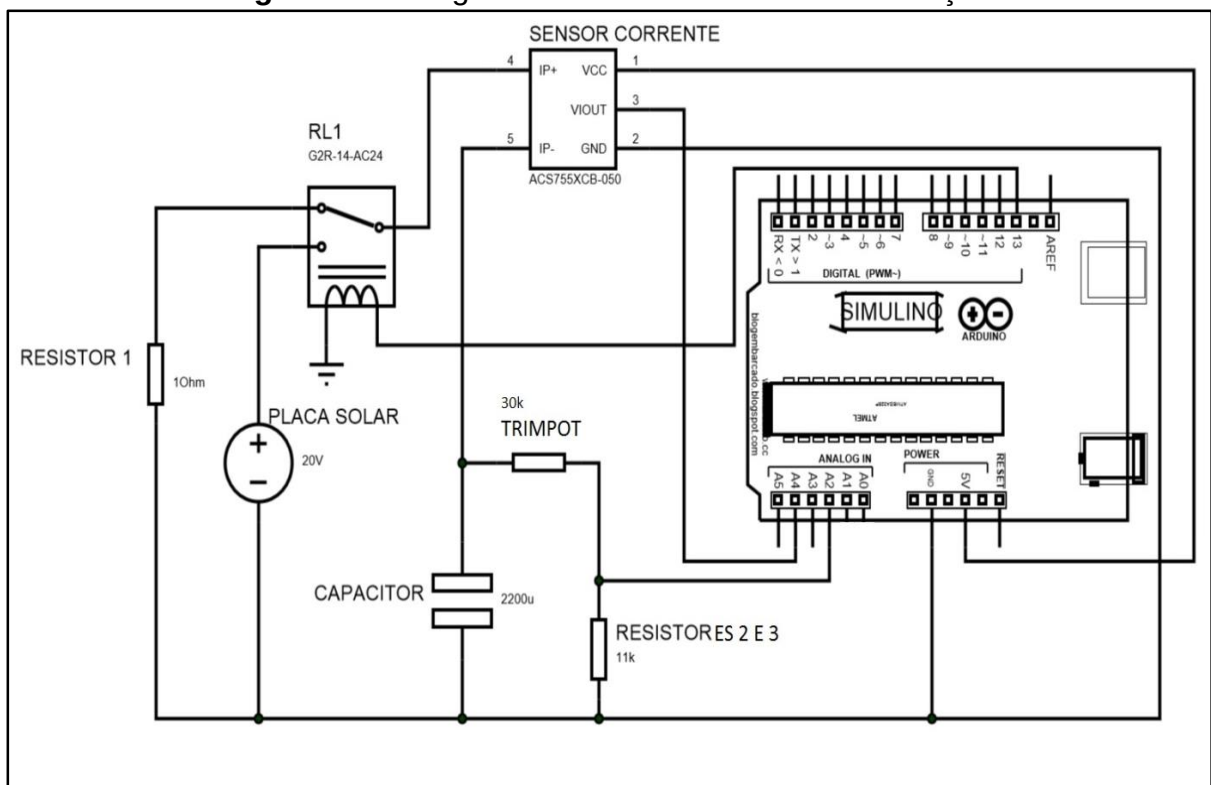
A Figura 20 mostra o diagrama estrutural do ACS712. Pelo efeito hall, quando circula corrente entre os pinos 1, 2, 3 e 4 de -5 a +5 amperes, há uma diferença de potencial entre os pinos 7 e 5 de 0 a 5 volts proporcionalmente. Essa tensão é enviada à porta analógica do Arduíno que deve ser convertida através da programação em valor de corrente elétrica.

3.3.2. Montagem do hardware

Para a montagem do hardware foi utilizado um protoboard da marca Toyo, modelo MSB-4000 com 2200 pinos e 4 bornes de entrada e saída de fontes externas para montagem dos circuitos.

Na Figura 21 tem-se um diagrama desenvolvido em software de simulação de circuito da ligação elétrica do sistema de medição.

Figura 21 – Diagrama elétrico do sistema de medição



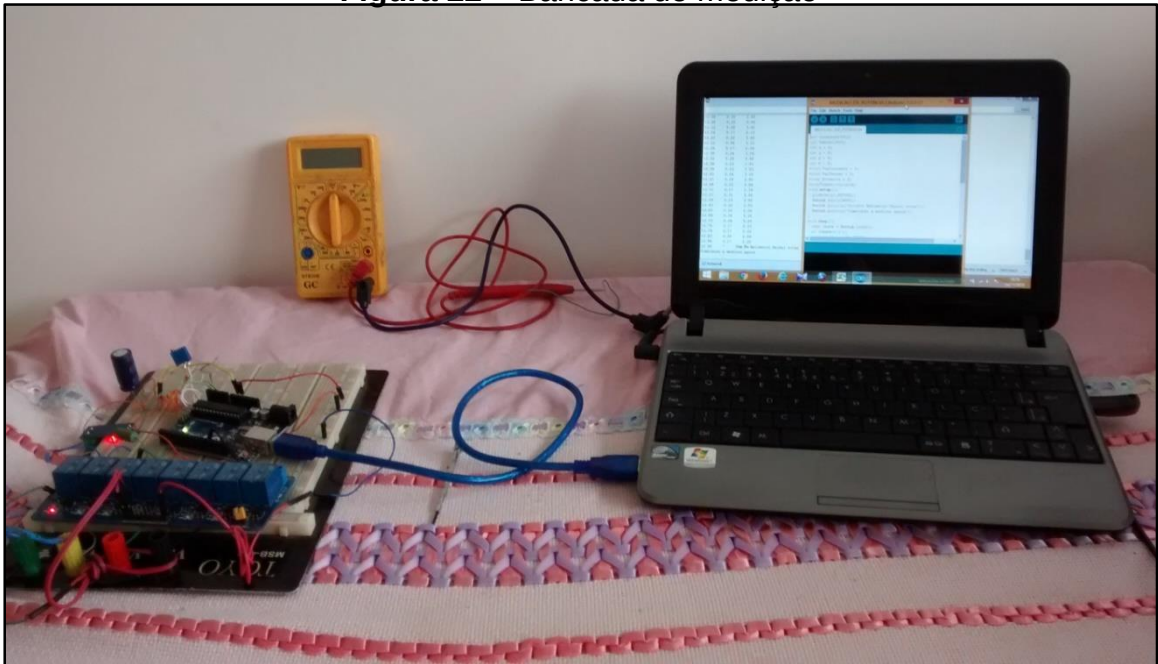
Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

4. TESTES E RESULTADOS

Neste capítulo os apresentados os testes realizados com os sistemas instalados bem como os resultados e dificuldades encontrados durante todo o processo.

As medições foram realizadas em dias intercalados, no período das 6:00 hs às 18:00 hs a cada 2,5 minutos. A coleta de dados foi feita por meio do ARDUINO UNO conectado ao notebook, ilustrado na Figura 22.

Figura 22 – Bancada de medição



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

4.1. Teste do protótipo

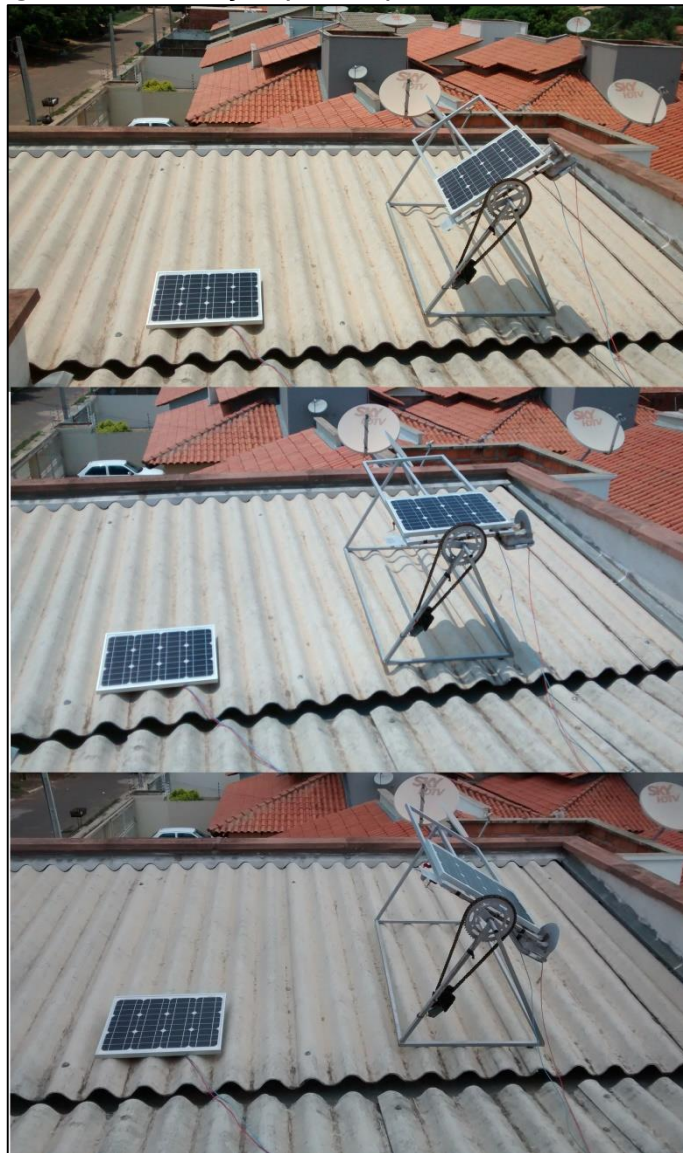
Para teste do protótipo a placa controladora foi alimentada com a fonte de 12 Vcc e foi feito um acompanhamento durante o dia para verificar a performance do mesmo. A Figura 23 mostra a posição do painel em três períodos do dia, devido ao deslocamento em função da posição do sol.

O deslocamento é possível devido a diferença do valor de referência de tensão entre dois LDRs por causa de sua resistência variável quando há sombra em um deles, fazendo com que o motor seja ligado e gire no sentido correspondente à variação que é ajustada por meio de um potenciômetro de 10 k Ω . O movimento do

motor é interrompido assim que já não há mais sombra no LDR, desta forma a placa fica sempre com a superfície na direção dos raios solares.

Quando o céu está nublado, a pouca radiação limita a tensão de alimentação do motor, diminuindo assim o torque necessário para deslocamento do painel solar, e dependendo do ângulo em que os LDRs estejam em relação à incidência solar, o sistema pode não conseguir encontrar o ponto de equilíbrio e o painel não vai girar.

Figura 23 – Posição painel (manhã/meio dia/tarde)



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

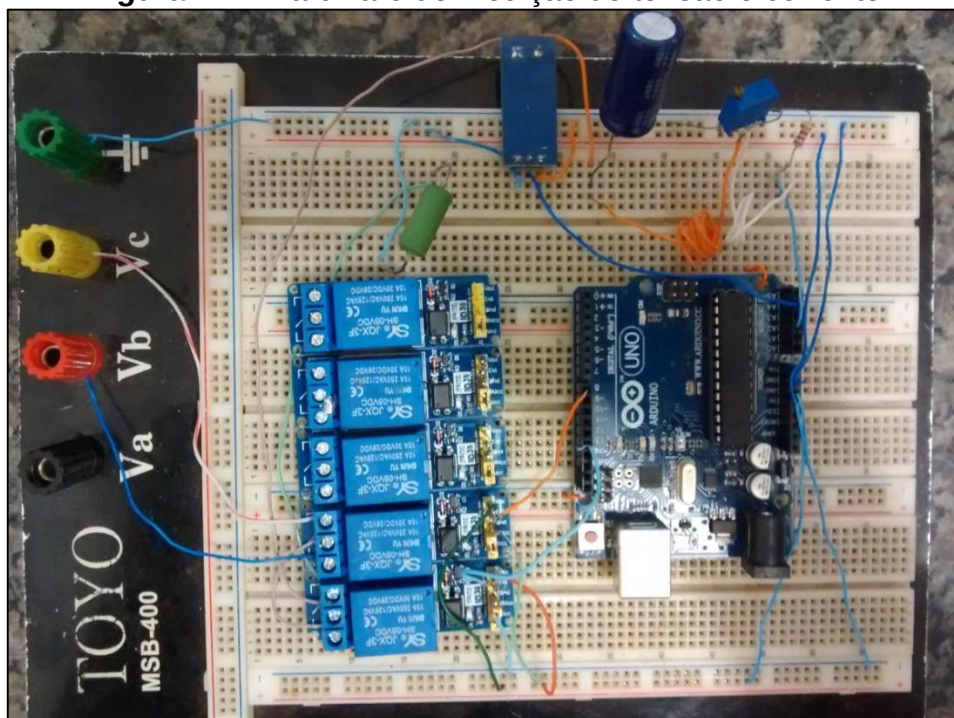
Por causa da estrutura fabricada, o sensor de fim de curso foi instalado de forma que o rastreador fique limitado a iniciar o movimento de rastreamento às 08:30

hs e finalizar às 16:30 hs. Nos gráficos apresentados no subitem 4.4, nota-se que estas limitações não causam efeitos relevantes devido a pouca energia fornecida pelo sol fora deste intervalo. Um outro sensor de luminosidade também foi instalado junto ao acionamento do motor para distinguir entre o dia e a noite, acionando o motor no sentido inverso quando chega a noite, a fim de retornar a placa à posição inicial do dia, deixando-a novamente na direção do nascer do sol.

4.2. Teste de hardware de medição

Ao final de algumas medições feitas como teste por meio de dois sistemas distintos, um pra cada placa, foi decidido montar apenas um sistema de medição com capacidade de medir durante o mesmo período a potência gerada pelos dois sistemas de geração, o painel fixo e o painel com rastreador solar. Desta forma, a potência foi medida utilizando os mesmos hardwares para ambos, permitindo uma maior confiabilidade nas comparações entre os mesmos. Nos testes do hardware de medição, ilustrado na Figura 24, foi utilizado um multímetro para comparação dos níveis de tensão e corrente e consequentemente os ajustes necessários.

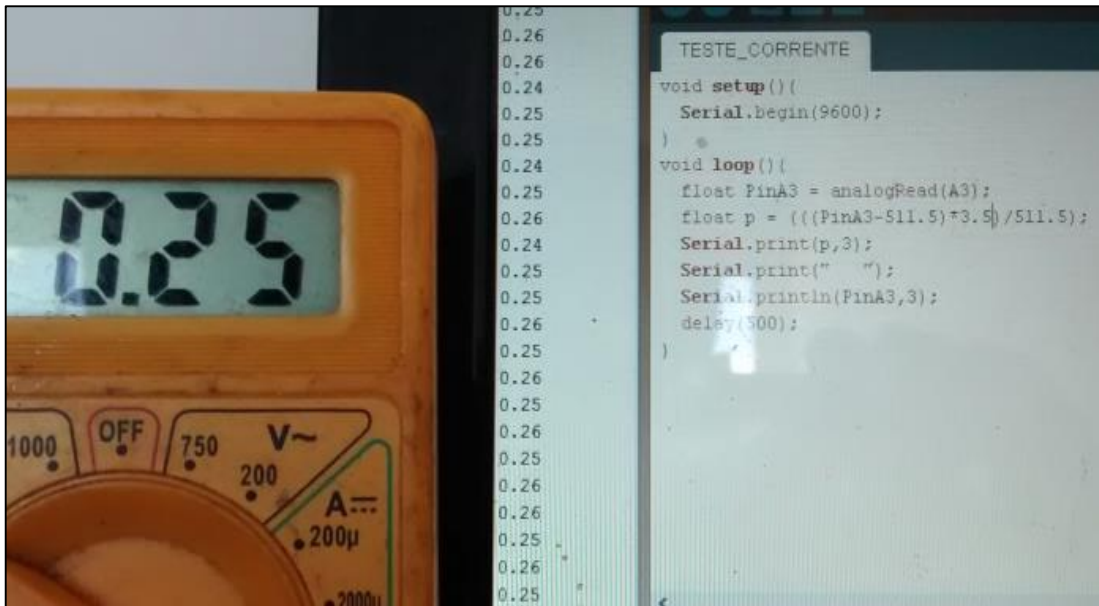
Figura 24 – Hardware de medição de tensão e corrente



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

A Figura 25 apresenta os valores de corrente medidos no multímetro e no ambiente de interface do arduíno, demonstrando a confiabilidade do sistema.

Figura 25 – Comparação de medição de corrente



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

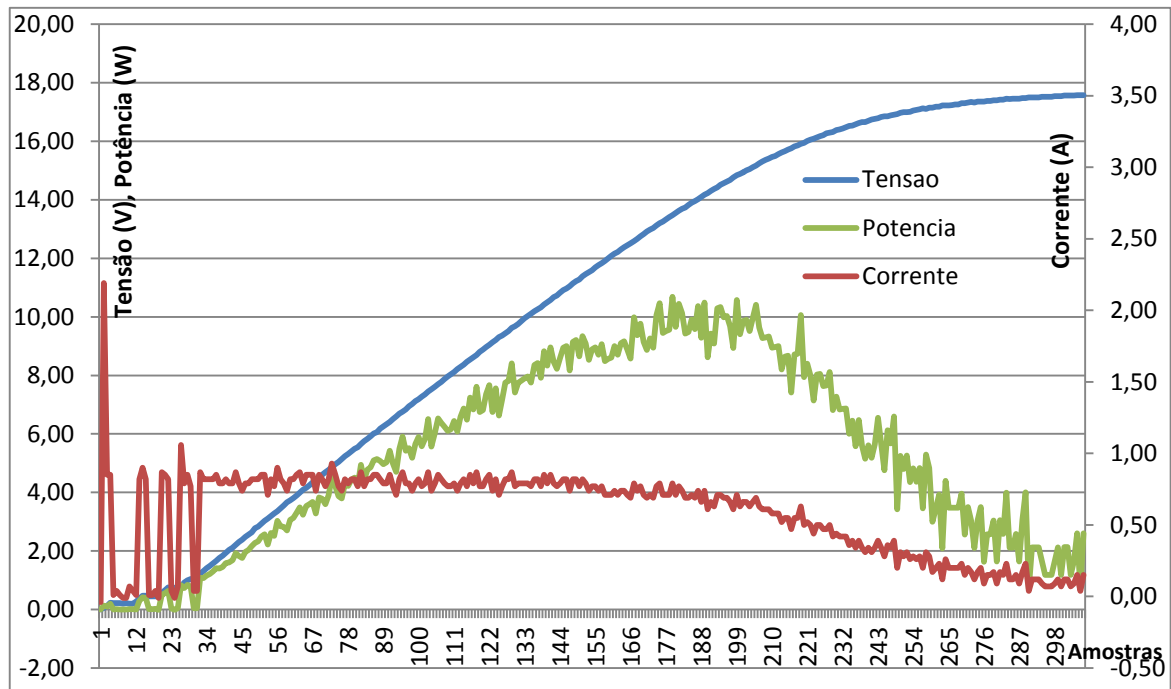
4.3. Teste de software

O algoritmo para medição foi desenvolvido totalmente na linguagem do arduíno, que é essencialmente C/C++ utilizando a respectiva interface de desenvolvimento do arduíno.

Antes de programar o algoritmo para fornecer a potência máxima, foi feita uma programação para demonstrar como esta é calculada, de acordo com a Figura 26, e realizar testes para ajuste do potenciômetro trimpot do divisor de tensão e também da própria programação, no qual fornecia os valores de tensão, corrente e potência lidos durante o carregamento do capacitor.

O resultado desta leitura realizada em 03 de julho de 2015 às 16:54 hs gerou um gráfico que mostra o rendimento do rastreador solar em relação ao painel fixo em 70% maior no momento da medição, ilustrado nos gráficos 6 e 7. Pouco mais de 35 watts de potência máxima para o painel com rastreador solar e aproximadamente 10 watts para o painel sem rastreador solar.

Gráfico 7 – Leitura do painel solar fotovoltaico sem rastreador solar durante carregamento de capacitor



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

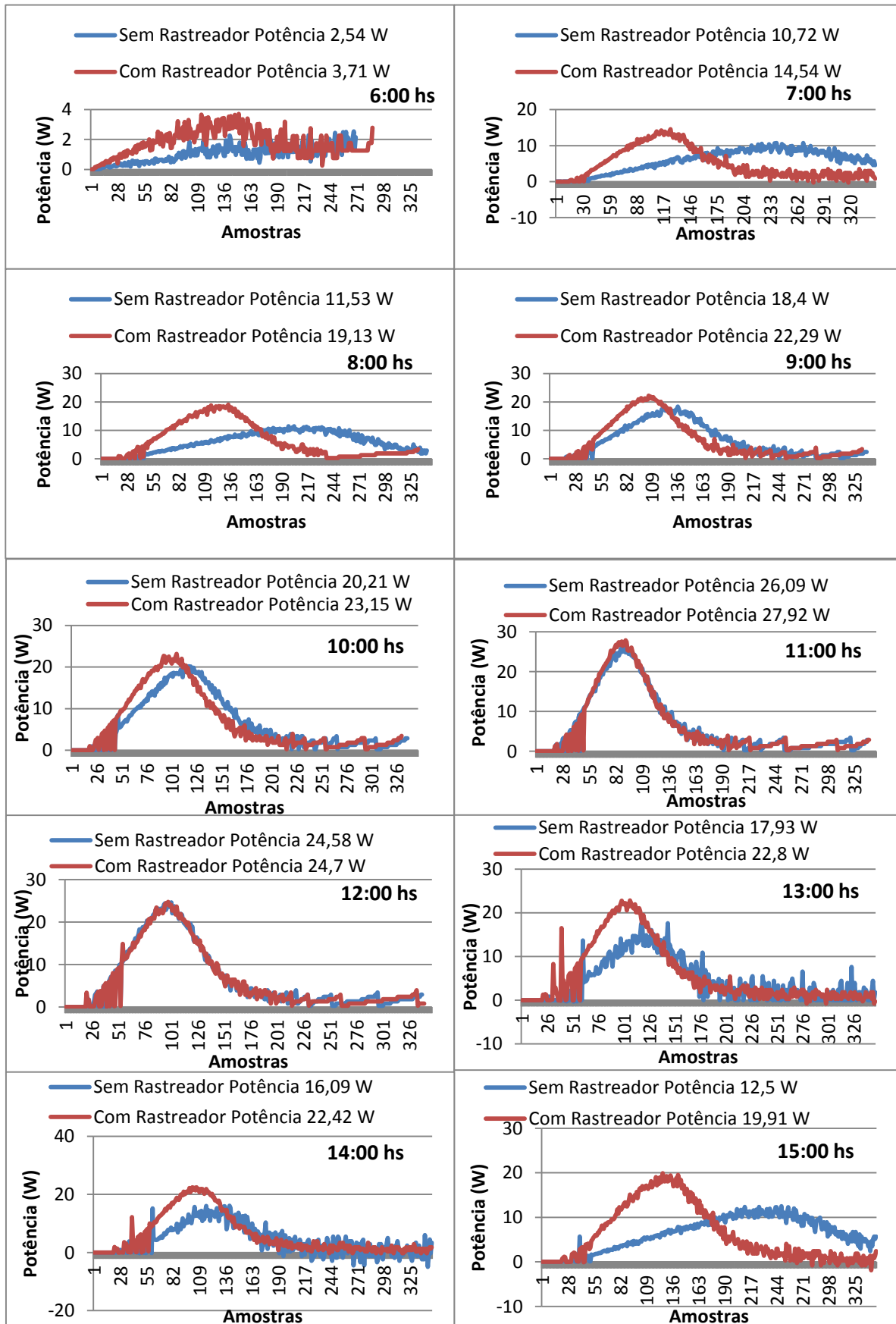
Finalmente após os testes e ajustes realizados o software de medição ficou completo com uma programação para medição a cada 2,5 minutos, com início acionado por meio de comando do teclado do notebook às 6:00 hs e término automático às 18:00 hs. O algoritmo pode ser consultado no apêndice “A” deste trabalho.

4.4. Resultado final

Após os testes realizados, foi dado início às medições e registrado as potências máximas obtidas em cada dia de cada sistema, bem como a relação de aproveitamento do rastreador solar em relação ao sistema convencional.

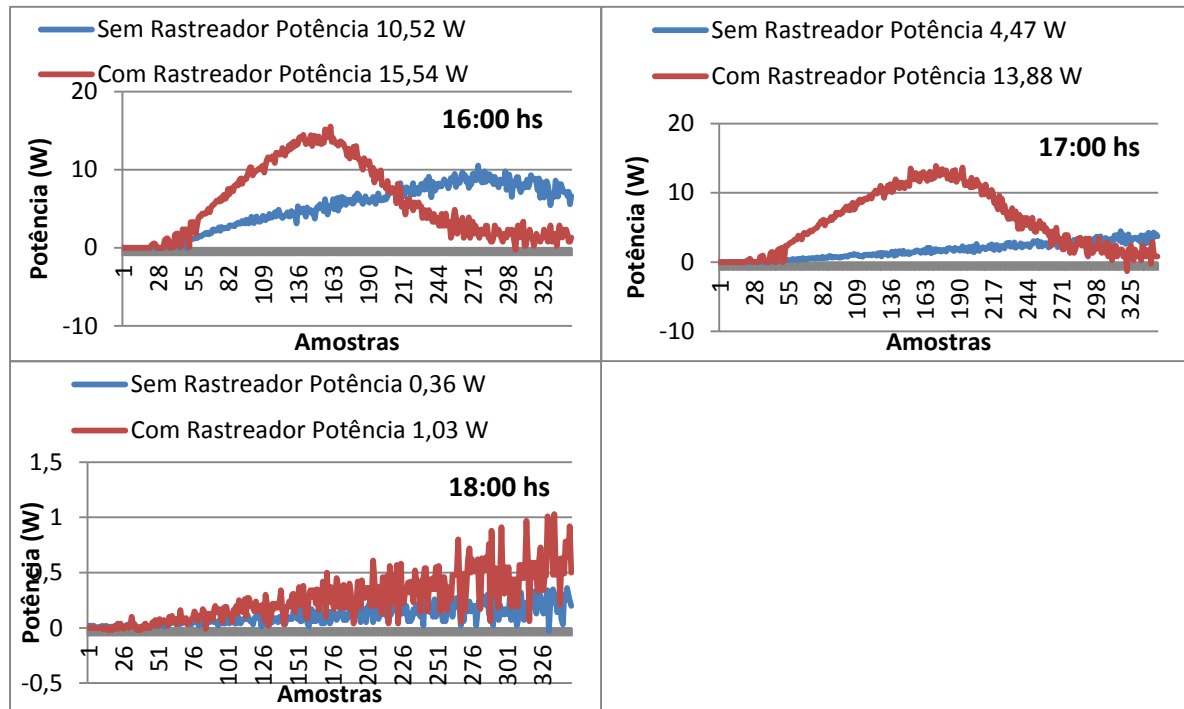
4.4.1. Medição diária

Nos gráficos 8 e 9 têm-se os resultados a cada hora da potência lida durante o carregamento do capacitor no dia 14 de novembro de 2015 das 6:00 hs às 18:00 hs.

Gráfico 8 – Medição de potência máxima dia 14/11/2015 de 6:00 hs a 15:00 hs

Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

Gráfico 9 – Medição de potência máxima dia 14/11/2015 de 16:00 hs a 18:00 hs



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

4.4.1.1. Análise

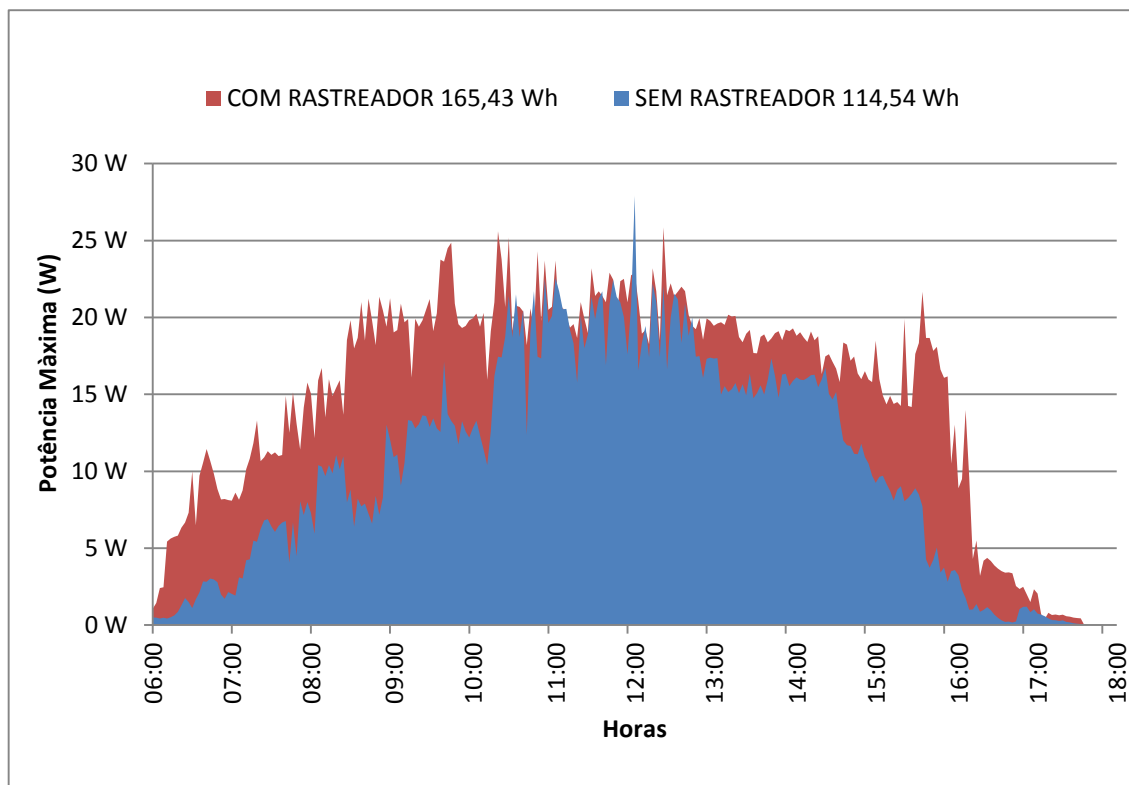
A energia total foi calculada utilizando as potências máximas medidas a cada 2,5 minutos, totalizando 154,01 Wh de energia com o sistema rastreador e 117,29 Wh com o sistema fixo.

Após a análise dos gráficos 8 e 9 algumas observações foram feitas:

- A potência máxima obtida às 6:00 hs e às 18:00 hs é muito pequena, tornando irrelevante o sistema de rastreamento solar nestes horários;
- A partir das 7:00 hs o sistema com rastreamento solar começa a apresentar um ganho de potência em relação ao sistema fixo convencional;
- Às 11:00 hs e às 12:00 hs a potência nos dois sistemas são iguais, devido as duas placas estarem na mesma posição, ou seja, em um mesmo ângulo entre sua base e a incidência dos raios solares;
- A partir das 13:00 hs até às 17:00 hs novamente o rastreador solar apresenta vantagens;
- A tensão e a corrente de potência máxima são diferentes para os dois sistemas dependendo do horário.

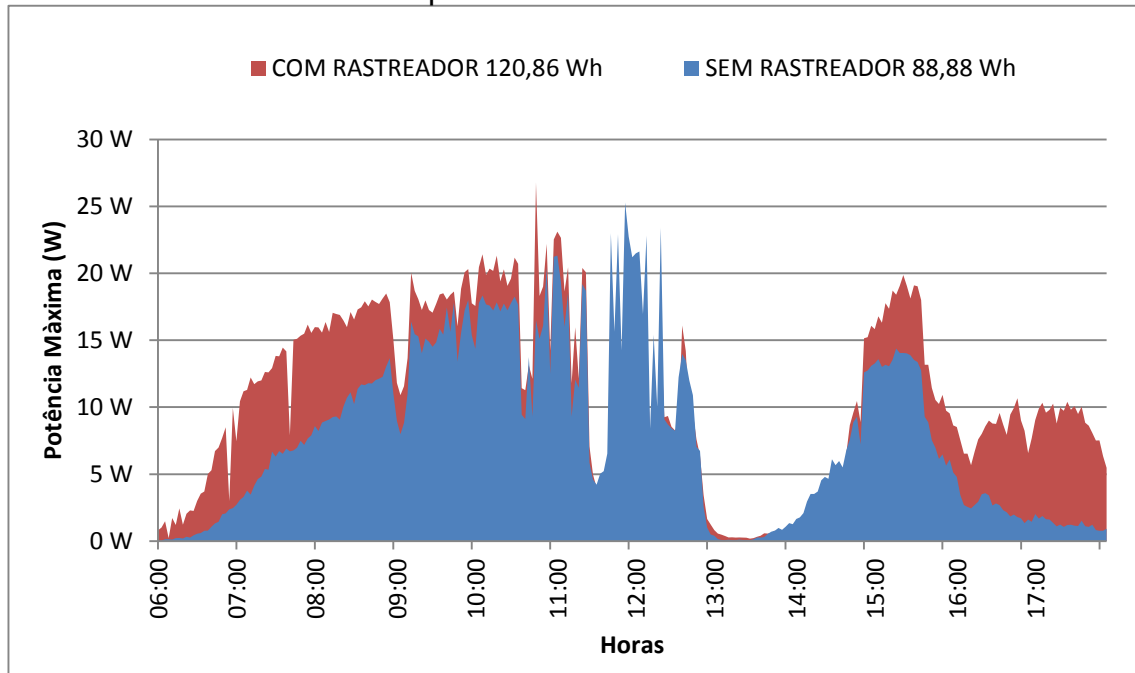
O Gráfico 10 apresenta a curva em forma de área da energia gerada durante todo o período de medição do dia 08 de dezembro de 2015, demonstrando o rendimento em uma situação com incidência solar durante todo o dia. O Gráfico 11 apresenta a energia medida no dia 07 de dezembro de 2015, em uma situação de chuva entre o período das 13:00 hs e 14:00 hs. A área do ganho de energia de um sistema para o outro é indicada pela área do gráfico que se sobressai, lembrando que o rastreamento foi realizado com apenas um grau de liberdade, ou seja, o sistema utilizado movimenta apenas no sentido leste – oeste, rastreando o sol durante os efeitos de rotação da Terra, podendo gerar um ganho ainda maior se utilizado dois graus de liberdade. Quanto aos efeitos de translação da Terra, o que define as estações do ano, o sistema permaneceu todo o tempo com uma inclinação de 10° ao norte, obedecendo o critério para melhor aproveitamento da incidência dos raios solares, que usa como referência a latitude do local.

Gráfico 10 – Curva de energia total gerada no dia 08 de dezembro de 2015 com o céu aberto



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

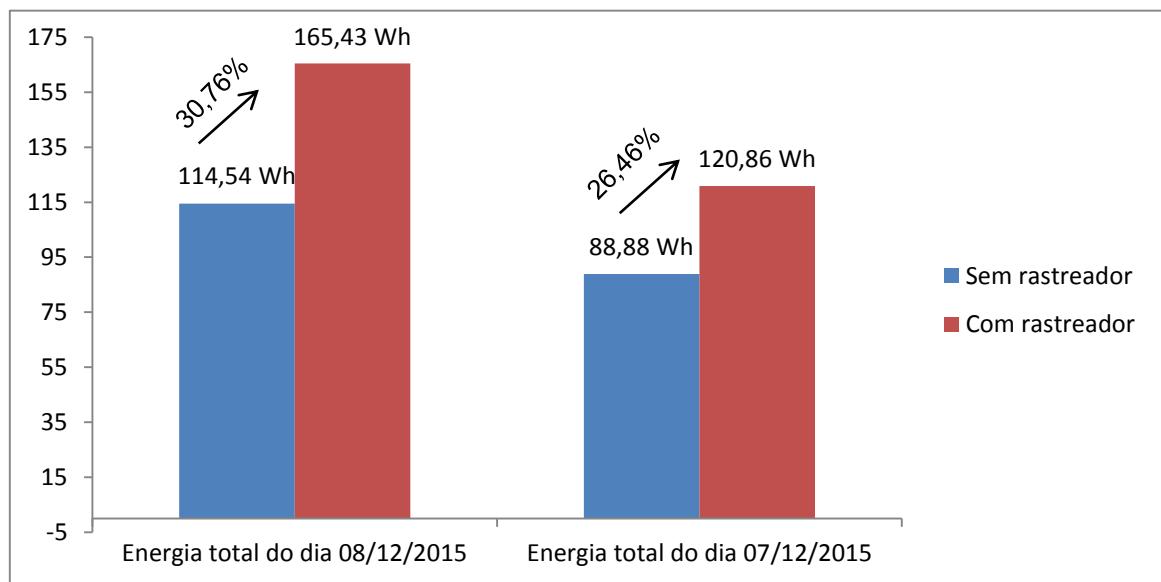
Gráfico 11 – Curva de energia total gerada no dia 07 de dezembro de 2015 com um período de chuva



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

Após esta análise verificou-se que o sistema com rastreamento solar conseguiu gerar **30,76 %** de energia total do dia a mais que o sistema convencional em um dia inteiro de sol e **26,46 %** em um dia com um curto período de chuva, conforme gráfico 12:

Gráfico 12 – Medição de energia elétrica dos dias 07 e 08 de dezembro de 2015

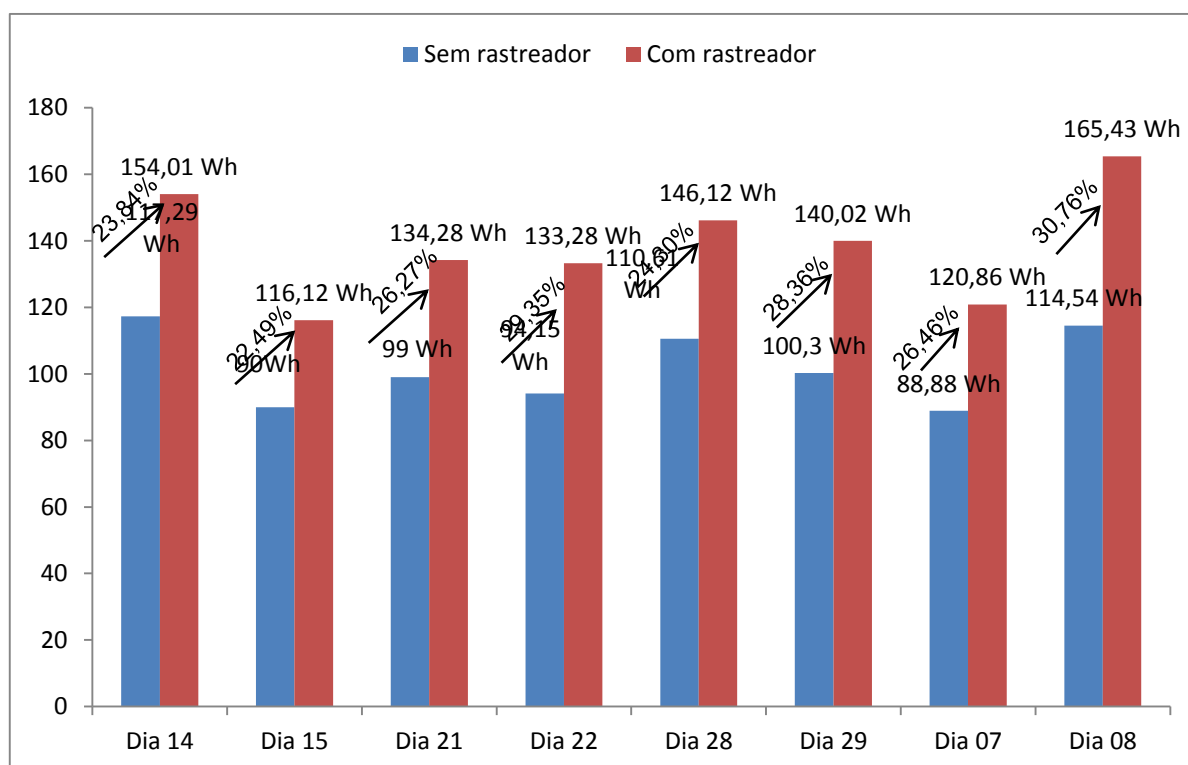


Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

4.4.2. Medições periódicas

Além das medições apresentadas dos dias 07 e 08 de dezembro e 14 de novembro, foram feitas mais medições nos dias 15, 21, 22, 28 e 29 de novembro, os resultados estão no gráfico 13.

Gráfico 13 – Medição periódica de energia elétrica



Fonte: Elaborado pelos autores (2015).

Considerando um total de 1110,12 Wh de energia geradas pela placa com sistema móvel e 814,77 Wh geradas pela placa com sistema fixo durante esses 8 dias de medição, a energia gerada pelo sistema com rastreador solar foi em média de **26,60 %** maior que a gerada pelo sistema fixo. Se comparado ao rastreador de Monteiro que utiliza dois eixos, e obteve 42,9 % de ganho, este rastreador com 1 eixo obteve 16,3 % a menos. O consumo do sistema de rastreamento durante os dias de ensaio foi medido em 0,8 Wh, sendo considerado um valor irrisório quando comparado à energia gerada durante o período.

4.4.3. Sistema conectado à rede elétrica

Sabendo que para uma unidade consumidora com sistema de geração de energia elétrica conectado à rede de distribuição, quanto maior a energia gerada durante o período de leitura do relógio maior será o abatimento da conta cobrada neste período, sugere-se que um sistema de geração mais eficiente resultará em um melhor retorno.

A viabilidade de um sistema é medida pela sua relação custo-benefício. Mesmo com o preço da mão de obra, assistência técnica e tendência de mercado sendo uma variável, o preço da matéria-prima é o principal determinante para o valor final de um produto. O preço total dos materiais utilizados na montagem do sistema de rastreamento solar apresentado neste trabalho foi de R\$ 170,00. Apesar de não ter sido feitas medições suficientes para definir a robustez do mesmo, este indicativo aponta para um valor total de investimento consideravelmente baixo, e apresenta um desempenho na geração de energia elétrica em média de 26% maior que em um sistema fixo convencional.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1. Conclusão

O protótipo proposto e montado funcionou como o esperado, alcançando os objetivos com bons resultados, mostrando a importância de um sistema com a função de melhorar o rendimento na produção de energia elétrica por meio de fontes renováveis.

As vantagens apresentadas durante o desenvolvimento e ao final deste estudo demonstrou o desempenho do modelo de rastreamento solar proposto neste trabalho, dentre elas o baixo custo na montagem do protótipo, o maior rendimento na geração de energia elétrica proveniente do painel fotovoltaico, entre outras.

Com as vantagens oferecidas pela concessionária de energia elétrica que foram possíveis devido à resolução normativa 482/2012 da ANEEL, o sistema de geração distribuída tem ganhado mais espaço no mercado de energia solar, deixando cada vez mais evidente que o sistema de geração de energia solar isolado não apresenta muitas vantagens quando comparado ao sistema conectado à rede, que não necessita de banco de baterias e outros equipamentos obrigatórios para o sistema isolado.

O rastreamento solar é de fundamental importância para um sistema fotovoltaico conectado à rede de distribuição, pois a normativa que rege este tipo de geração, está diretamente ligada à eficiência energética (mais rendimento com menos custo), quanto maior a geração maior será o abatimento na conta de energia e o acúmulo de créditos. Os testes e ensaios realizados com o protótipo deste trabalho resultaram em um bom rendimento energético, aumenta a energia convertida em aproximadamente 26% em relação ao sistema convencional.

5.2. Proposta para futuros projetos

- Realizar estudo de rendimento do mesmo sistema com dois graus de liberdade para rastreamento;
- Encontrar uma solução para melhorar o desempenho do sistema com rastreador solar em dias nublados;

- Desenvolver um sistema que permita interligar mais de um rastreador solar, permitindo aumentar a demanda de energia gerada;
- Realizar um estudo de desempenho durante um ano;
- Realizar estudo de viabilidade econômica deste sistema no atual cenário do mercado de energias renováveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A brief overview of allegro acs712 current sensor (part 1). Disponível em: <http://embedded-lab.com/blog/a-brief-overview-of-allegro-acs712-current-sensor-part-1/>. Acessado em 11/2015.

ADALBÓ, R. **Energia Solar**. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**: 2ª Ed. Brasília: 2005. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-Energia_Solar(3).pdf). Acessado em 04/2013.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482 de 17 de abril de 2012**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acessado em 11/2015.

ALMEIDA, M. P. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Dissertação de Mestrado, PPGE, USP. Maio de 2012.

Arduino – Sensor de Corrente ACS712 em AC e DC (Monitoring Current with Arduino and ACS712). Disponível em: <http://helpdev.com.br/2014/01/01/arduino-sensor-de-corrente-ac712-em-ac-e-dc-monitoring-current-with-arduino-and-ac712/>. Acessado em: 11/2015.

BARROS, H. A. **Anteprojeto de um sistema fotovoltaico de 12 KWP conectado à rede**. Projeto de Graduação da UFRJ/ Escola Politécnica. Outubro de 2011.

BIG – Capacidade de Geração no Brasil. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acessado em 12/2015

CELTINS (Grupo ENERGISA). Normas técnicas: **NTD18 – Requisitos para acesso e conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição da Celtins – Rede**

de distribuição aérea – Conexão de microgeração na rede de baixa tensão. 1ª edição Ver. 28/05/2014. Disponível em: <http://www.celtins.com.br/files/2012/06/NTD-18-REQUISITOS-PARA-ACESSO-E-CONEX%C3%83O-DE-GERA%C3%87%C3%83O-DISTRIBU%C3%8DDA-AO-SISTEMA-DE-DISTRIBUI%C3%87%C3%83O-DE-BAIXA-TENS%C3%83O-MICROGERA%C3%87%C3%83O-1%C2%BA-REVIS%C3%83O2.pdf>. Acessado em 10/11/2015.

CELTINS (Grupo ENERGISA). Normas técnicas: **NTD19 – Requisitos para acesso e conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição da Celtins – Rede de distribuição aérea – Conexão em média tensão.** 1ª edição. 12/12/2012. Disponível em: <http://www.celtins.com.br/files/2012/06/NTD-19-REQUISITOS-PARA-ACESSO-E-CONEX%C3%83O-DE-GERA%C3%87%C3%83O-DISTRIBU%C3%8DDA-AO-SISTEMA-DE-DISTRIBUI%C3%87%C3%83O-DE-M%C3%89DIA-TENS%C3%83O-MINIGERA%C3%87%C3%83O2.pdf>. Acessado em: 10/11/2015.

Datasheet dos sensores de efeito Hall, disponível em: <http://web4.lem.com>. Acessado em 11/2015.

Energia heliotérmica, disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/o-sol-fonte-de-energia>. Acessado em 11/2015.

Estádio Pituacu, disponível em: <http://atitudesustentavel.com.br/blog/2012/04/11/estadio-pituacu-em-salvador-tera-paineis-solares/>. Acessado em 04/2013.

FONSECA, K. T. **Apostila sobre Energia Solar para criação de um projeto solar para uma residência.** Agosto de 2008.

Geração distribuída supera 1000 conexões no Brasil, disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8899&id_area=90. Acessado em 11/2015.

HALLIDAY,D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de física, v.3: Eletromagnetismo – Rio de Janeiro: LTC, 2007.

Informações técnicas – Geração Distribuída, disponível em:

<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=757&idPerfil=2>. Acessado em 11/2015.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA. **Diretrizes para elaboração de trabalho de conclusão de curso de graduação**. Palmas, 2013.

Medição efeito hall. Disponível em:

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAEjToAJ/medicao-efeito-hall>. Acessado em 11/2015.

MONTEIRO, F. A. M. **Desenvolvimento de um sistema de controle de baixo custo para rastreador solar**: Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Energética Solar. Universidade Federal de Pernambuco. Agosto de 2007.

Os planetas, disponível em:

<http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Universo/sistemasolar2.php>. Acessado em 09/2014.

PANESI, A. R. Q. **Fundamentos de Eficiência Energética**: Industrial, Comercial e Residencial. 1ª edição. São Paulo: Ensino Profissional Editora. 2006.

PAULA, G. J. **Medidor de demanda de energia elétrica residencial com acesso remoto**. Monografia – Engenharia de computação, UNB. Julho de 2013.

Pituaçu Solar, disponível em: http://www.americadosol.org/pituacu_solar/. Acessado em 04/2013.

Principio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica, disponível em:

http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf. Acessado em 04/2013.

Principais movimentos da Terra, disponível em:

<http://geoconceicao.blogspot.com.br/2012/02/movimentos-da-terra-rotacao-translacao.html>. Acessado em 09/2014.

Resolução 414 da ANEEL: condições gerais de fornecimento de energia elétrica, disponível em:

http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/REN_414_2010_atual_REN_499_2012.pdf. Acessado em 04/2013.

SILVA, S. B. **Dimensionamento ótimo de sistemas híbridos, com geração fotovoltaica e célula a combustível, para atendimento a comunidades isoladas na Amazônia**. Tese de Doutorado nº 052/10, PPGENE.TD, UNB. Novembro de 2010.

VILLALVA, M. G; GAZOLI, J. R. **Energia Solar Fotovoltaica**: Conceitos e Aplicações. 1ª edição. São Paulo: Editora Érica Ltda. 2012.

ZILLES, R; MACÊDO, W. N; GALHARDO, M, A, B; OLIVEIRA, S, H, F. **Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

Apêndice A - Algoritmo de programação do arduíno para medição de tensão, corrente e potência.

```

int corrente[350];
int tensao[350];
int x = 0;
int y = 0;
int z = 0;
int w = 0;
int t = 0;
int m=0;
int hora=0;
int horainicial=0;
int horaatual=0;
float ValCorrente = 0;
float ValTensao = 0;
float Potencia = 0;
float PotenciaM=0;
void CICLOHORA();
void HORA();
void setup(){
  pinMode(13,OUTPUT);
  pinMode(9,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Projeto Watimetro Paine solar");
  Serial.println("Comecando a medicao agora");
}
void loop(){
  char chave = Serial.read();
  if (chave=='I'){
    t=0;
    HORA();
    CICLOHORA();
    t++;
  }
}

```

```

}
else{
    if(t>0){
        delay(150000);
        horaatual=(t+horainicial);
        Serial.println("");
        Serial.print(horaatual);
        Serial.println(":00 hs");
        Serial.println("");
        CICLOHORA();
        t++;
    }
}
}

void CICLOHORA(){
    Serial.println("");
    Serial.println("COM RASTREADOR");
    Serial.println(" ");
    digitalWrite(9,HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(13,HIGH);
    for(x=0; x<350; x++){
        corrente[x] = analogRead(A4);
        tensao[y] = analogRead(A2);
        y++;
    }
    digitalWrite(13, LOW);
    for(z=0; z<350; z++){
        ValCorrente = ((corrente[z]-512.50)*(3.00/1023.00)*(1000.00/109.00));
        ValTensao = ((tensao[w]*20.00)/1023.00);
        Potencia = (ValCorrente * ValTensao);
        Serial.print(ValTensao);
        Serial.print("   ");
        Serial.print(ValCorrente);

```

```

Serial.print("  ");
Serial.println(Potencia);
if (Potencia > PotenciaM){
    PotenciaM = Potencia;
}
w++;
}
Serial.println("");
Serial.print("  ");
Serial.print(PotenciaM);
Serial.println("  W maxima");
PotenciaM=0;
x=0;
y=0;
z=0;
w=0;
Serial.println("");
Serial.println("SEM RASTREADOR");
Serial.println(" ");
digitalWrite(9,LOW);
delay(500);
digitalWrite(13,HIGH);
for(x=0; x<350; x++){
    corrente[x] = analogRead(A4);
    tensao[y] = analogRead(A2);
    y++;
}
digitalWrite(13, LOW);
for(z=0; z<350; z++){
    ValCorrente = ((corrente[z]-512.50)*(3.00/1023.00)*(1000.00/109.00));
    ValTensao = ((tensao[w]*20.00)/1023.00);
    Potencia = (ValCorrente * ValTensao);
    Serial.print(ValTensao);
    Serial.print("  ");

```

```

Serial.print(ValCorrente);
Serial.print("  ");
Serial.println(Potencia);
if (Potencia > PotenciaM){
    PotenciaM = Potencia;
}
w++;
}
Serial.println("");
Serial.print("  ");
Serial.print(PotenciaM);
Serial.println("  W maxima");
PotenciaM=0;
x=0;
y=0;
z=0;
w=0;
m=0;
for(m=0; m<23; m++){
    delay(150000);
    Serial.print("COM RASTREADOR");
    Serial.print(" ");
    digitalWrite(9,HIGH);
    delay(500);
    digitalWrite(13,HIGH);
    for(x=0; x<350; x++){
        corrente[x] = analogRead(A4);
        tensao[y] = analogRead(A2);
        y++;
    }
    digitalWrite(13, LOW);
    for(z=0; z<350; z++){
        ValCorrente = ((corrente[z]-512.50)*(3.00/1023.00)*(1000.00/109.00));
        ValTensao = ((tensao[w]*20.00)/1023.00);
    }
}

```

```

Potencia = (ValCorrente * ValTensao);
if (Potencia > PotenciaM){
    PotenciaM = Potencia;
}
w++;
}
Serial.print(PotenciaM);
Serial.print("  W maxima");
PotenciaM = 0;
x=0;
y=0;
z=0;
w=0;
Serial.print(" / ");
Serial.print("SEM RASTREADOR");
Serial.print(" ");
digitalWrite(9,LOW);
delay(500);
digitalWrite(13,HIGH);
for(x=0; x<350; x++){
    corrente[x] = analogRead(A4);
    tensao[y] = analogRead(A2);
    y++;
}
digitalWrite(13, LOW);
for(z=0; z<350; z++){
    ValCorrente = ((corrente[z]-512.50)*(3.00/1023.00)*(1000.00/109.00));
    ValTensao = ((tensao[w]*20.00)/1023.00);
    Potencia = (ValCorrente * ValTensao);
    if (Potencia > PotenciaM){
        PotenciaM = Potencia;
    }
    w++;
}

```

```
Serial.print(PotenciaM);
Serial.print("  W maxima");
Serial.println("");
PotenciaM = 0;
x=0;
y=0;
z=0;
w=0;
}
}
void HORA(){
  hora=Serial.read();
  if (hora>0){
    if(hora<100){
      horainicial=(hora-48);
      Serial.println("");
      Serial.print(horainicial);
      Serial.println(":00 hs");
      Serial.println("");
    }
  }
  else{
    HORA();
  }
}
```