

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

GREGORY LUSA KRUG
MARCEL BRAGA LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE POSICIONAMENTO
AUTOMÁTICO PARA PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO ATRAVÉS
DE SENSORES E ESTUDO DE EFICIÊNCIA**

CURITIBA
2016

GREGORY LUSA KRUG
MARCEL BRAGA LOPES

**DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE POSICIONAMENTO
AUTOMÁTICO PARA PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO ATRAVÉS
DE SENSORES E ESTUDO DE EFICIÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de conclusão de curso 2 do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Me. Jaime Favretto

CURITIBA
2016

Gregory Lusa Krug
Marcel Braga Lopes

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA DE POSICIONAMENTO AUTOMÁTICO PARA PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO ATRAVÉS DE SENSORES E ESTUDO DE EFICIÊNCIA

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 06 de abril de 2016.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Marcelo de Oliveira Rosa, Dr.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia de Controle e Automação do DAELT

ORIENTAÇÃO

Jaime Favretto, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Guilherme Luiz Moritz, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Walter Denis Cruz Sanchez, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Controle e Automação

RESUMO

KRUG, Gregory Lusa. LOPES, Marcel Braga. Desenvolvimento de Sistema de Posicionamento Automático para Painel Solar Fotovoltaico Através de Sensores e Estudo de Eficiência. 2016. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

Esta pesquisa apresenta aspectos teóricos e práticos sobre produção de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos, com foco em sistemas do tipo seguidor solar. Detalha modelos de sistemas fotovoltaicos existentes e traz exemplos aplicados. Reúne informações sobre os tipos de aplicações com tecnologia de posicionamento automático seguidor solar. Desenvolve protótipo de sistema fotovoltaico com posicionamento automático através de sensores. Analisa a eficiência de produção de energia do protótipo comparando-o a um sistema estático de geração fotovoltaica.

Palavras-chave: Energia solar. Painel fotovoltaico seguidor solar. Produção de energia elétrica.

ABSTRACT

KRUG, Gregory Lusa. LOPES, Marcel Braga. Development and Efficiency Study of an Automatic Positioning System for Photovoltaic Panel by Sensors. 2016. 62p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016.

This research presents theoretical and practical aspects about electrical energy production by photovoltaic panels, focused in solar tracker systems. It details existing models of photovoltaic systems and bring applied examples. It put together information about types of application involving solar tracker automatic positioning technologies. It develops a prototype of photovoltaic system with automatic positioning by sensors. It analyzes energy production efficiency of the prototype, compared with a static photovoltaic system.

Keywords: Solar Energy. Solar Tracker photovoltaic panel. Electric energy production.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Representação do movimento de translação da Terra..... | 17 |
| Figura 2: Média anual de insolação diária do Brasil (horas)..... | 18 |
| Figura 3: Sistema fotovoltaico da comunidade de Sobrado no Amazonas | 20 |
| Figura 4: Sistema fotovoltaico instalado no estádio Pituaçu, Bahia | 20 |
| Figura 5: Sistema fotovoltaico residencial | 21 |
| Figura 6: Desenho de oferta painel ChinaLand | 22 |
| Figura 7: Sistema Fotovoltaico | 23 |
| Figura 8: Sistema Fotovoltaico Residencial | 23 |
| Figura 9: Sistema Fotovoltaico Comercial | 24 |
| Figura 10: Sistema Fotovoltaico Industrial | 25 |
| Figura 11: Sistema Fotovoltaico Autônomo..... | 25 |
| Figura 12: Ângulo de defasagem da incidência luminosa X Tensão | 27 |
| Figura 13: Seguidor com eixo horizontal leste-oeste..... | 29 |
| Figura 14: Seguidor com eixo horizontal sul-norte | 29 |
| Figura 15: Seguidor Polar | 30 |
| Figura 16: Seguidor eixo vertical móvel | 31 |
| Figura 17: Seguidor solar, eixo vertical e horizontal móvel | 32 |
| Figura 18: Posicionamento dos painéis durante aquisição de dados..... | 34 |
| Figura 19: Painel de Circuitos | 35 |
| Figura 20: Diagrama de Blocos do Sistema | 36 |
| Figura 21: Sistema Fotovoltaico Seguidor Solar com atuadores lineares | 37 |
| Figura 22: Melhor direção do painel solar fotovoltaico | 38 |
| Figura 23: Curva Resistência do LDR x Intensidade Luminosa | 39 |
| Figura 24: Sensores de luminosidade | 39 |
| Figura 25: Esquema de ligação dos LDRs | 40 |
| Figura 26: Circuito do Sistema de Controle de Posicionamento | 42 |
| Figura 27: Esquema de ligação do módulo de relés e acionamento dos atuadores .. | 43 |
| Figura 28: Arduino Uno R3..... | 44 |
| Figura 29: Módulo RTC | 45 |
| Figura 30: Módulo Cartão SD..... | 46 |
| Figura 31: Exemplo de Cartão SD..... | 46 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 32: Sensor de corrente..... | 47 |
| Figura 33: Trecho do arquivo de dados..... | 49 |
| Figura 34: Exemplo energia gerada pelo painel automático – pior período | 50 |
| Figura 35: Exemplo energia gerada pelo painel fixo– pior período | 51 |
| Figura 36: Relação entre tensão gerada pelos paineis – pior período | 51 |
| Figura 37: Exemplo energia consumida pelos atuadores – pior período..... | 52 |
| Figura 38: Exemplo energia gerada pelo painel automático – melhor período | 53 |
| Figura 39: Exemplo energia gerada pelo painel fixo– melhor período | 54 |
| Figura 40: Relação entre tensão gerada pelos painéis – melhor período | 54 |
| Figura 41: Exemplo energia consumida pelos atuadores– melhor período..... | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Lógica de funcionamento dos atuadores Norte-Sul..... | 40 |
| Tabela 2 - Lógica de funcionamento dos atuadores Leste-Oeste..... | 40 |
| Tabela 3 - Comparação entre os valores de energia geradas..... | 55 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|---------------------------------|
| n | Reta normal ao plano |
| p | Reta auxiliar |
| r | Reta auxiliar |
| s | Reta auxiliar |
| Z | Zênite local |
| α | Ângulo de elevação solar |
| β | Ângulo de inclinação |
| γ | Ângulo de azimute da superfície |
| γ_s | Ângulo de azimute solar |
| θ | Ângulo de incidência |
| θ_s | Ângulo de incidência direta |
| θ_z | Ângulo de zênite |
| Φ | Latitude |
| ρ | Albedo |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|-------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 1.1 | TEMA | 11 |
| 1.1.1 | Delimitação do Tema | 11 |
| 1.2 | PROBLEMA | 12 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 13 |
| 1.3.1 | Objetivo geral | 13 |
| 1.3.2 | Objetivos específicos | 13 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA | 13 |
| 1.5 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS | 14 |
| 1.6 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 14 |
| 2 | ENERGIA SOLAR | 16 |
| 2.1 | INFORMAÇÕES GERAIS | 16 |
| 2.2 | RADIAÇÃO SOLAR | 17 |
| 2.3 | APROVEITAMENTO NA ENERGIA SOLAR NO BRASIL | 18 |
| 2.3.1 | Aproveitamento por Sistemas Fotovoltaicos | 19 |
| 2.4 | GERAÇÃO ELÉTRICA FOTOVOLTAICA | 21 |
| 2.4.1 | Painel Fotovoltaico | 21 |
| 2.4.2 | Sistema Fotovoltaico | 22 |
| 3 | SISTEMA FOTOVOLTAICO SEGUIDOR SOLAR | 28 |
| 3.1 | PAINEL MÓVEL - 1 EIXO | 28 |
| 3.1.1 | Eixo Horizontal (Leste-Oeste) | 28 |
| 3.1.2 | Eixo Horizontal (Sul-Norte) | 29 |
| 3.1.3 | Eixo Polar | 30 |
| 3.1.4 | Azimutal | 30 |
| 3.2 | PAINEL MÓVEL – 2 EIXOS | 31 |
| 3.3 | MÉTODOS DE CONTROLE DE POSICIONAMENTO | 32 |
| 4 | APLICAÇÃO PRÁTICA E DETALHAMENTO TÉCNICO | 34 |
| 4.1 | O SISTEMA | 35 |
| 4.1.1 | Sistema Fotovoltaico Seguidor Solar | 36 |
| 4.1.2 | Sistema Fotovoltaico Estático | 37 |

| | |
|--------------------------------------------------|----|
| 4.1.3 Sistema De Controle De Posicionamento..... | 38 |
| 4.1.6 Sistema De Aquisição De Dados..... | 43 |
| 5 APRESENTAÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS..... | 48 |
| 5.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS | 48 |
| 5.2 RESULTADOS..... | 49 |
| 6 CONCLUSÕES | 57 |
| 6.1 COMENTÁRIOS GERAIS..... | 57 |
| 6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 59 |
| REFERÊNCIAS..... | 60 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Com o acelerado crescimento populacional e desenvolvimento urbano, observado ao longo das últimas décadas, uma questão que gera discussões e busca por soluções é a demanda energética. Neste cenário, as energias alternativas ganham cada vez mais espaço, demonstrando seu potencial de complementar a geração de energia elétrica para os consumidores. Dentre elas, a energia solar destaca-se não só por ser uma fonte de energia limpa, mas também pela possibilidade de geração local, graças à simplicidade de sua estrutura.

Dentre os sistemas de geração solar de energia elétrica, temos os modelos estáticos e móveis. No primeiro caso, os painéis fotovoltaicos são posicionados de maneira fixa, em angulação determinada de acordo com a região de sua localização. Nos modelos móveis, existem aqueles com liberdade de movimentação em um eixo apenas, vertical ou horizontal, e também em dois eixos.

Este assunto vem ganhando mais destaque e popularidade de 2012 para cá, quando entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, que permite ao consumidor a geração de energia elétrica individual a partir de fontes renováveis (ANEEL, 2012). Além disso, permite-se que o excedente seja emprestado à concessionária e descontado da fatura, conectando-se o sistema à rede de distribuição, o que garante retorno mais rápido do investimento financeiro realizado na instalação.

1.1.1 Delimitação do Tema

Dentro do tema exposto, neste trabalho de conclusão de curso foi implementado um sistema de posicionamento automático para painel solar fotovoltaico, através da movimentação do painel nos eixos vertical e horizontal. Nos modelos de movimentação em dois eixos mais comuns, a trajetória de movimentação do painel segue uma equação horária pré-determinada através de mapeamento da região onde o painel será implementado. Nesta aplicação, o posicionamento se deu

através de atuadores elétricos ativados após tratamento da aquisição de sensores de luminosidade.

1.2 PROBLEMA

A crescente demanda por energia elétrica no Brasil incita a criação e aperfeiçoamento de novas fontes de energia. Sendo assim, a possibilidade de aumentar a eficiência da geração de energia elétrica de painéis solares fotovoltaicos tradicionais se torna um questionamento válido e propicia um levantamento de ideias, como utilizar um sistema automático que posicione o painel de maneira a obter a maior incidência de radiação solar.

Estudos apontam que um sistema auto-posicionável atinge ganhos anuais de cerca de 28% de eficiência quando comparado ao tradicional, estático (WANG, 2013).

O principal problema deste tipo de geração de energia elétrica é a dependência da incidência de radiação solar. O movimento da Terra em relação ao sol limita a capacidade de geração, pois graças a isto a incidência de radiação varia ao longo do dia. As condições climáticas regionais também são fator limitante a ser considerado, na qual a variabilidade do fluxo de radiação solar médio se mostra importante, como é o caso da região sul, segundo dados do Atlas de Energia Elétrica do Brasil (2005). Portanto, um sistema que proporcione melhor aproveitamento desta energia mostra-se importante ferramenta no aumento de viabilidade da geração solar.

Estes detalhes limitam a capacidade de geração em sistemas fixos e sistemas móveis que seguem equação horária. No primeiro caso por ficar diretamente limitado à angulação da incidência que varia ao longo do dia. No segundo caso por condições climáticas que podem trazer variações na radiação solar mesmo na posição natural de maior incidência para o horário do dia.

Levando tudo isto em conta, um sistema auto-posicionável de acordo com a maior incidência luminosa, independente do horário do dia, tende a eliminar essas características limitantes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo implementar um sistema de controle e automação para posicionar um painel solar fotovoltaico através da leitura de sensores de luminosidade e avaliar seu desempenho. Além disso, será elaborado um sistema de aquisição de dados, afim de monitorar comparativamente a eficiência de geração de energia elétrica entre o painel solar automatizado e o estático.

1.3.2 Objetivos específicos

- Construção da estrutura mecânica de suporte para o painel solar e seus atuadores;
- Elaboração da melhor configuração eletrônica para o sistema atingir seus objetivos de funcionalidade e economia de energia;
- Programação do sistema automático para interpretar os sensores e atuar no posicionamento do painel;
- Programação do sistema de aquisição de dados e análise de eficiência;
- Avaliar o desempenho do sistema e de seus componentes.

1.4 JUSTIFICATIVA

Sabendo-se das dificuldades que já se apresentam na área energética e dos panoramas previstos para o futuro, é interessante buscar novas propostas que possam contribuir para a solução de problemas neste setor, bem como melhorar tecnologias já existentes em prol de maior eficiência.

Quando se fala em eficiência não se pode limitar o entendimento em apenas maior produção de energia entre o sistema seguidor solar ao estático, mas a possibilidade de expansão da rede geradora para áreas de baixo potencial, que, quando melhor aproveitado, se torna uma alternativa viável de geração complementar.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Utilizando-se de diversos recursos bibliográficos, tanto físicos quanto digitais, como revistas, teses, artigos e livros, foram avaliados os sistemas de geração de energia solar para maior compreensão das suas possibilidades e de seu funcionamento.

Os painéis geradores foram fornecidos pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná, bem como os atuadores lineares para a movimentação do painel. Após os estudos mencionados anteriormente, foram realizados outros estudos sobre o funcionamento dos itens para auxiliar na modelagem do sistema. Definidos os componentes mecânicos e eletrônicos, teve início a montagem mecânica da estrutura do painel e do circuito eletrônico, para acionamento dos atuadores e medição da energia gerada.

Com o sistema de posicionamento do painel fotovoltaico funcionando, com base em protótipo desenvolvido como projeto final na disciplina de Sistemas Microcontrolados, foi implementado o sistema de sensoriamento e controle para que o posicionamento do painel se dê de modo automático, em busca do ponto ótimo de incidência luminosa.

Com estes objetivos alcançados, o sistema funcionando como se propõe. Deu-se início, então, para a fase de aquisição de dados. Nela, foi desenvolvido um modelo de aquisição padrão que será utilizado para o painel seguidor e para um outro painel de mesmo modelo, porém estático. Este procedimento visou monitorar a conversão de energia dos sistemas, permitindo ser feita a análise e estudo de comparação de eficiência entre ambos. O sistema de aquisição de dados foi implementado à parte do sistema posicionador, tanto por se tratar de um meio apenas para estudos, quanto para que seu consumo de energia não influenciasse na eficiência do sistema analisado.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de Conclusão de Curso é composto por quatro capítulos e seus conteúdos seguem a descrição a seguir:

- **Capítulo 1 – PROPOSTA DO TRABALHO:** contém a apresentação do tema do trabalho, os problemas e premissas, objetivos, justificativas para o desenvolvimento do trabalho e procedimentos metodológicos.
- **Capítulo 2 – ENERGIA SOLAR:** contém uma visão geral sobre a energia solar, abordando diversas formas de utilização; a forma como o Brasil faz uso da energia solar; o aproveitamento da energia solar para a geração de energia elétrica e breve explicação sobre o funcionamento do painel fotovoltaico.
- **Capítulo 3 – SISTEMA FOTOVOLTAICO SEGUIDOR SOLAR:** aborda os tipos de sistemas fotovoltaicos existentes e os diversos modos de controle de posição, sendo eles: fixo; movimento em um eixo; e movimento em dois eixos.
- **Capítulo 4 – APLICAÇÃO PRÁTICA E DETALHAMENTO TÉCNICO:** este capítulo visa explicar como foi feita a implementação e aplicação do sistema seguidor solar de dois eixos posicionado por sensores, foco do trabalho, e detalhes sobre os componentes que foram utilizados.
- **Capítulo 5 – APRESENTAÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS:** apresenta os dados obtidos, a forma de obtenção e cálculos utilizados para análise.
- **Capítulo 6 – CONCLUSÃO:** reúne comentários finais sobre os conhecimentos adquiridos, conclusões a que se chegou e dificuldades superadas.

2 ENERGIA SOLAR

2.1 INFORMAÇÕES GERAIS

A maioria das fontes de energia são formas indiretas da energia solar, por exemplo, energia hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos. Há também o uso direto da energia solar como fonte de energia térmica, utilizada para aquecer fluidos e, assim, gerar potência mecânica ou elétrica. E também, gerar energia elétrica através de efeitos sobre determinados materiais, com destaque para o termoelétrico e o fotovoltaico (ANEEL, 2005).

O aquecimento de ambientes pela radiação solar, denominado aquecimento solar passivo, juntamente com a iluminação natural, são formas de aproveitar a energia solar e reduzir gastos com iluminação e aquecimento artificial, e pode ser melhor aproveitado ao utilizar de técnicas mais sofisticadas de arquitetura e construção (ANEEL, 2005).

A energia utilizada para aquecer fluidos é feita através de coletores ou concentradores solares. Aplicações residenciais e comerciais utilizam principalmente coletores e servem para aquecer água. Já os concentradores solares, mais utilizados em aplicações no qual a necessidade de temperatura é maior, como a secagem de grãos e a produção de vapor, que pode servir para gerar energia mecânica através de turbinas e posteriormente, gerar energia elétrica (ANEEL, 2005).

A geração direta de energia elétrica ocorre pelos efeitos da radiação (calor e luz) sobre materiais semicondutores, principalmente os termoelétricos e os fotovoltaicos. Os termoelétricos, caracterizam-se por uma diferença de potencial que surge através da junção de dois metais, em condições específicas. Os fotovoltaicos utilizam os fótons presentes na luz solar para gerar energia elétrica, por meio de células solares (ANEEL, 2005).

O aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica são as formas de aproveitamento da energia solar mais utilizadas. No Brasil, devido as condições climáticas e socioeconômicas, o aquecimento de água é mais usado na região Sul e Sudeste, e a geração fotovoltaica, nas regiões Norte e Nordeste (ANEEL, 2005).

2.2 RADIAÇÃO SOLAR

De acordo com CRESESB (2006), o Sol fornece cerca de 10000 vezes mais energia do que é consumido mundialmente. Dessa forma, além de ser responsável pela manutenção da vida na Terra, a radiação solar é uma fonte inesgotável de energia.

A disponibilidade de radiação solar, também chamada de energia total incidente sobre a superfície terrestre, varia de acordo com a latitude local e a posição no tempo (hora do dia e dia do ano), além das condições atmosféricas, como a nebulosidade e umidade relativa do ar. Este fato se dá devido a inclinação do eixo imaginário em torno do qual a Terra gira diariamente, movimento de rotação, e à trajetória elíptica que a Terra descreve ao redor do Sol, movimento de translação, como pode ser visto na Figura 1.



Figura 1: Representação do movimento de translação da Terra

Fonte: PEREIRA, MARTINS, ABREU, RUTHER, 2005

Sendo assim, a duração solar do dia varia, em determinadas regiões e períodos do ano, de zero a 24 horas. As variações de maior intensidade se dão nas regiões polares e nos períodos de solstício. Na linha do Equador e nos períodos de equinócio não há variação.

Na Figura 2, o mapa apresenta a média anual de insolação diária no Brasil.

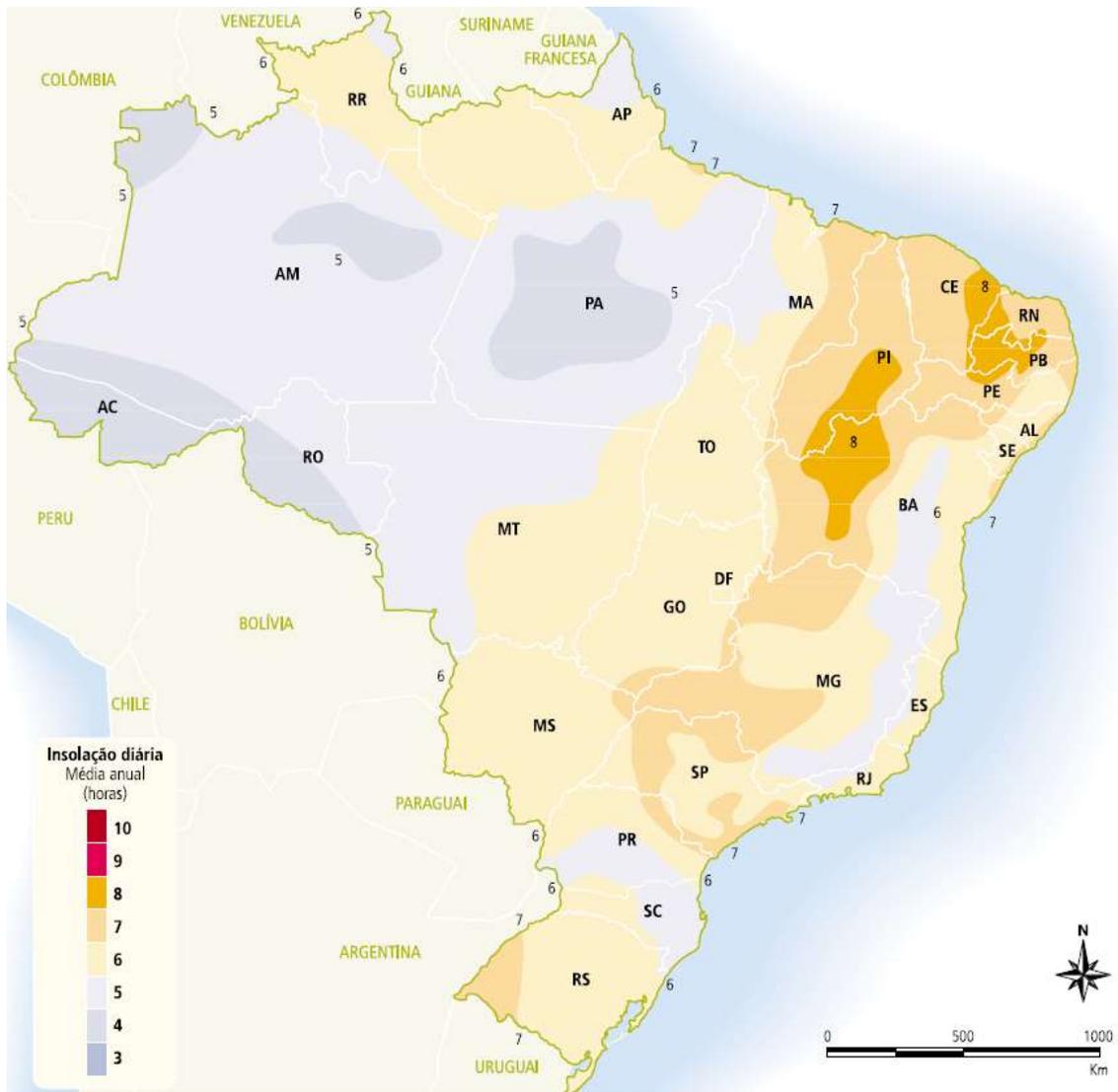


Figura 2: Média anual de insolação diária do Brasil (horas)

Fonte: PEREIRA, MARTINS, ABREU, RUTHER, 2005

2.3 APROVEITAMENTO NA ENERGIA SOLAR NO BRASIL

Segundo o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (2005), há vários projetos para aproveitamento da energia solar no Brasil, alguns em fase de desenvolvimento, outros, já em operação. Os sistemas fotovoltaicos de geração de eletricidade, visando atender, principalmente, comunidades isoladas da rede de energia elétrica das regiões Norte e Nordeste. Nas regiões Sul e Sudeste, o aproveitamento da energia solar para o aquecimento de água tem ganhado importância, principalmente, no setor

residencial, no qual representa uma parcela expressiva do consumo de energia elétrica.

2.3.1 Aproveitamento por Sistemas Fotovoltaicos

De acordo com o Atlas da Energia Elétrica do Brasil (2005), existem muitos pequenos projetos nacionais de geração fotovoltaica de energia elétrica, predominantemente para o suprimento de eletricidade em comunidades rurais e/ou isoladas do Norte e Nordeste. Basicamente, os projetos atuam em quatro tipos de sistemas: i) bombeamento de água, para abastecimento doméstico, irrigação e piscicultura; ii) iluminação pública; iii) sistemas de uso coletivo, tais como eletrificação de escolas, postos de saúde e centros comunitários; e iv) atendimento domiciliar. Há também a utilização em estações de telefonia e monitoramento remoto, a eletrificação de cercas, a produção de gelo e a dessalinização de água.

A seguir, serão apresentados alguns sistemas fotovoltaicos instalados pelo Brasil.

Na Figura 3 são mostrados os painéis fotovoltaicos e a edificação onde ficam os inversores, controladores, baterias e equipamentos de monitoramento do sistema, que atende a 19 unidades consumidoras da comunidade de Sobrado, no município de Novo Airão, no Amazonas.



Figura 3: Sistema fotovoltaico da comunidade de Sobrado no Amazonas

Fonte: CEPEL –CRESESB, 2014

A Figura 4 mostra o projeto do Estádio Solar de Pituaçu, que faz parte do programa de eficiência energética da distribuidora Coelba, com apoio do Governo do Estado da Bahia.



Figura 4: Sistema fotovoltaico instalado no estádio Pituaçu, Bahia

Fonte: CEPEL –CRESESB, 2014

A Figura 5 mostra um sistema de pequeno porte instalado em residência em região isolada do Rio Grande Do Sul.



Figura 5: Sistema fotovoltaico residencial

Fonte: CEPEL –CRESESB, 2014

2.4 GERAÇÃO ELÉTRICA FOTOVOLTAICA

A geração de energia elétrica através da radiação solar é possível graças ao efeito fotovoltaico, observado pela primeira vez por Edmond Becquerel em 1839, quando constatou uma diferença de potencial nos extremos de uma estrutura feita com materiais semicondutores quando exposto a luz (NASCIMENTO, 2004). No ano de 1876 o primeiro aparato fotovoltaico foi montado, resultado de estudos na área de estrutura dos sólidos, entretanto, foi no ano de 1956, seguindo o desenvolvimento da microeletrônica, que se iniciou a produção industrial (CRESESB, 2006).

2.4.1 Painel Fotovoltaico

O painel fotovoltaico é constituído pela associação de um conjunto de células fotovoltaicas, estrutura semicondutora que sob efeito de energia luminosa gera um fluxo de elétrons, em série. Como exemplo, um modelo genérico com 36 células

associadas, tem como tensão de operação cerca de 14 Volts e corrente de cerca de 5 Ampéres em condições nominais. Na Figura 6, o desenho de oferta de uma placa de 36 células.

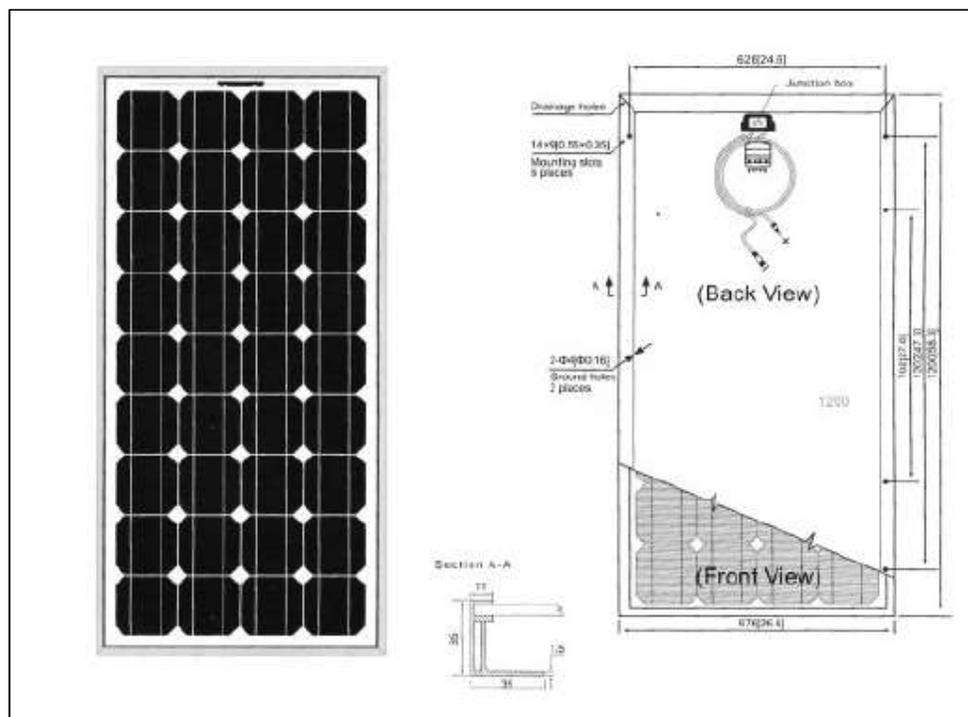


Figura 6: Desenho de oferta painel ChinaLand

Fonte: SolarFob, 2014

2.4.2 Sistema Fotovoltaico

Com objetivo similar à associação de células para formar um painel, são associados painéis em um sistema fotovoltaico, afim de gerar quantidades mais significativas de energia elétrica.

Alguns modelos mais simples são conectados diretamente à carga, que consome a energia gerada nos momentos de incidência solar e se alimenta de algum sistema auxiliar na ausência dela. Outros sistemas contam com acumuladores (baterias), sistemas de controle, geradores auxiliares, adaptadores (inversores), de acordo com o interesse de uso (BRITO, SILVA, 2006). A Figura 7 exemplifica um sistema completo, com baterias controlador de carga e inversor.

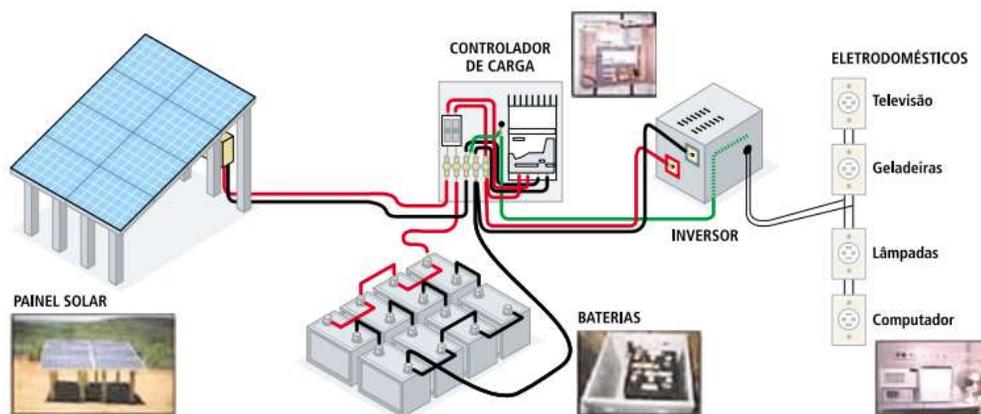


Figura 7: Sistema Fotovoltaico

Fonte: Atlas da Energia Solar / ANEEL, 2005

Segundo o Portal Solar, os sistemas são classificados como:

- Sistema Fotovoltaico Residencial de energia solar conectado à rede (1 – 10 kW): geração para consumo próprio da residência, com empréstimo do excedente para a concessionária de energia e posterior abatimento da fatura de energia. O sistema deve ser equipado com inversor de tensão, para converter a energia gerada em Corrente Contínua em Corrente Alternada e sincronizar à rede. Além disso, é necessária a troca do relógio medidor por um modelo bidirecional, que contabiliza a quantidade entregue à rede para fins de pagamento. Este controle é feito pela concessionária e regulamentado pela ANEEL. A Figura 8 é um exemplo.



Figura 8: Sistema Fotovoltaico Residencial

Fonte: Portal Polar, 2015

Para instalações desse porte, a área ocupada pelos painéis varia de 10 a 80 m², dependendo da região, incidência solar e potência desejada.

- Sistema Fotovoltaico Comercial de energia solar conectado à rede (10 – 100 kW): possui as mesmas características do sistema residencial, sendo utilizado por empresas e diferenciando-se pela quantidade de energia gerada. A Figura 9 de exemplo.



Figura 9: Sistema Fotovoltaico Comercial

Fonte: Portal Polar, 2015

- Sistema Fotovoltaico Industrial de energia solar conectado à rede (100 – 1000 kW): Diferencia-se dos dois anteriores pela quantidade de energia gerada e pela área da instalação (entre 650 m² e 7000 m²). A Figura 10 ilustra bem as dimensões de um sistema industrial



Figura 10: Sistema Fotovoltaico Industrial

Fonte: Portal Polar, 2015

- Sistema Fotovoltaico Isolado/Autônomo de energia solar: não conectados à rede elétrica, são dimensionados para atender a demanda da carga para qual são instalados. Para dimensionar o armazenamento de energia, são consideradas as características dos piores índices de radiação solar do local, para garantir autonomia, em média, de até 3 dias. Exemplos comuns de utilização são postes de iluminação, estações replicadoras de sinal, eletrificação de cercas, bombeamento de água, residências desconectadas da rede, etc. Na Figura 11, exemplo de poste de iluminação com alimentação fotovoltaica.



Figura 11: Sistema Fotovoltaico Autônomo

Fonte: Atria e Energy, 2015

- Sistema Fotovoltaico Híbrido de energia solar: uma mistura de sistema isolado com conectado à rede, possui bancos de baterias para armazenamento local da produção de energia e é conectado à rede. Além do banco de baterias, necessita de mecanismos de segurança e outros aparelhos, o que acaba encarecendo o sistema.

Os sistemas fotovoltaicos ainda podem ser classificados quanto ao seu posicionamento: com painéis estáticos ou móveis. O primeiro caso, tal qual o nome já diz, é estático, o painel fica em uma posição fixa o tempo todo, inclinação definida de acordo com o perfil de insolação do local de sua localização. No segundo caso, o painel, ou um conjunto deles, tem sua inclinação variada através de um sistema de controle, e é na aplicação deste último que se foca este trabalho de conclusão de curso.

O controle de posicionamento do painel busca uma incidência de luz ortogonal ao painel, partindo-se do pressuposto que a geração de energia seja maior sob esta condição. Esta hipótese foi testada experimentalmente e seus resultados se apresentam na Figura 12, tabela extraída do artigo de Villas Bôas e Mota (2011), o valor de θ_i é o ângulo de incidência em relação à ortogonal, e V , a tensão gerada pelo painel.

| θ_i (°) | V (V) | | | | | |
|----------------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| | 21/jul | % | 22/jul | % | 25/jul | % |
| 0 | 20,43 | | 19,00 | | 20,35 | |
| 5 | 20,41 | 0,10 | 18,99 | 0,05 | 20,32 | 0,15 |
| 10 | 20,35 | 0,39 | 18,97 | 0,16 | 20,28 | 0,35 |
| 15 | 20,32 | 0,54 | 18,91 | 0,48 | 20,28 | 0,35 |
| 20 | 20,28 | 0,74 | 18,84 | 0,85 | 20,18 | 0,84 |
| 25 | 20,21 | 1,09 | 18,77 | 1,23 | 20,14 | 1,04 |
| 30 | 20,11 | 1,59 | 18,67 | 1,77 | 18,42 | 10,48 |
| 35 | 19,96 | 2,35 | 18,56 | 2,37 | 18,31 | 11,14 |
| 40 | 19,82 | 3,08 | 18,24 | 4,17 | 18,10 | 12,43 |
| 45 | 19,65 | 3,97 | 18,08 | 5,09 | 18,10 | 12,43 |
| 50 | 19,51 | 4,72 | 17,93 | 5,97 | 18,30 | 11,20 |
| 55 | 19,30 | 5,85 | 17,73 | 7,16 | 18,31 | 11,14 |
| 60 | 19,01 | 7,47 | 17,50 | 8,57 | 18,03 | 12,87 |
| 65 | 18,73 | 9,08 | 17,26 | 10,08 | 17,78 | 14,45 |
| 70 | 18,27 | 11,82 | 17,08 | 11,24 | 17,64 | 15,36 |
| 75 | 17,71 | 15,36 | 16,98 | 11,90 | 17,50 | 16,29 |
| 80 | 16,90 | 20,89 | 16,70 | 13,77 | 17,36 | 17,22 |
| 85 | 15,81 | 29,22 | 16,39 | 15,92 | 17,22 | 18,18 |
| 90 | 15,07 | 35,57 | 16,11 | 17,94 | 17,04 | 19,42 |

Figura 12: Ângulo de defasagem da incidência luminosa X Tensão

Fonte: Villas Bôas e Motta, 2011

3 SISTEMA FOTOVOLTAICO SEGUIDOR SOLAR

Conforme apresentado anteriormente neste trabalho, para que as células componentes do painel solar atinjam sua maior capacidade de geração, busca-se a maior incidência solar possível sobre o painel. Para melhor aproveitamento da disponibilidade de incidência luminosa, o sistema com painéis móveis mostra-se interessante, pois sua inclinação muda de acordo com a maior incidência solar.

A movimentação pode ser ativa, impulsionada por atuadores elétricos, ou passiva, por deslocamento de fluido aquecido de acordo com a incidência solar (OLIVEIRA, 2008). Podem movimentar-se em apenas um eixo ou em dois. Detalhes sobre os modelos de painéis seguidores e tipos de controle são apresentados neste capítulo.

3.1 PAINEL MÓVEL - 1 EIXO

Mais simples, este modelo baseia-se na movimentação do painel ou sistema em apenas um eixo referencial. A movimentação pode ser sobre o eixo horizontal (orientação Leste-Oeste ou Sul-Norte), eixo polar (eixo móvel Norte-Sul), ou sobre eixo vertical (azimutal).

3.1.1 Eixo Horizontal (Leste-Oeste)

Com a vantagem de possuir baixa manutenção e robustez, apresenta melhores ganhos em estações com dias longos. A posição do painel no amanhecer é a mesma do anoitecer. O painel diminui sua inclinação em relação à Terra à medida que a altitude solar aumenta, atingindo o ponto de menor inclinação quando a maior altitude solar é alcançada. Após este ponto, a inclinação volta a aumentar até que o painel retorne à sua posição inicial no anoitecer (OLIVEIRA, 2008). A Figura 13 exemplifica o movimento.

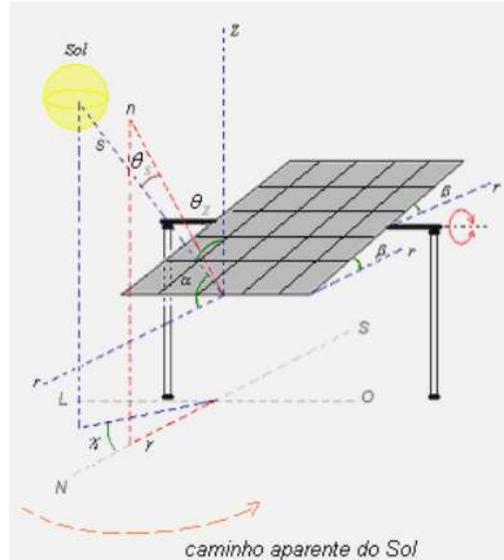


Figura 13: Seguidor com eixo horizontal leste-oeste

Fonte: Oliveira, 2008

3.1.2 Eixo Horizontal (Sul-Norte)

Semelhante ao exemplo anterior, com diferença na orientação. Neste caso, o painel fotovoltaico tem inclinação oposta nos momentos de amanhecer e anoitecer, com ponto de menor inclinação no momento de maior altitude solar (OLIVEIRA, 2008). A Figura 14 apresenta a estrutura e seu movimento.

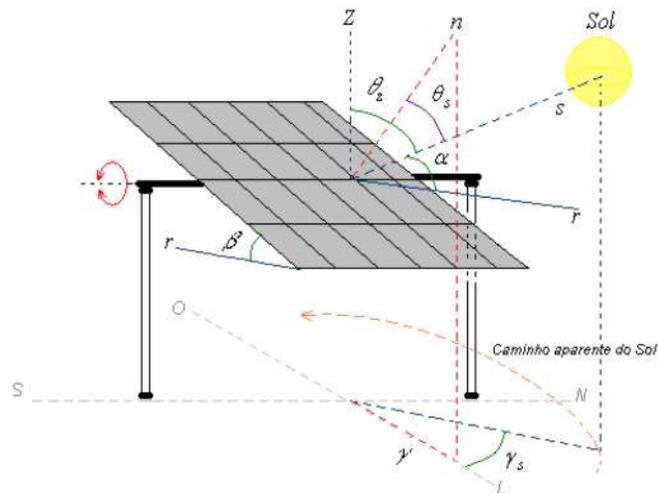


Figura 14: Seguidor com eixo horizontal sul-norte

Fonte: Oliveira, 2008

3.1.3 Eixo Polar

Gira em torno de um eixo Norte-Sul, localizado paralelamente ao eixo terrestre e perpendicularmente a um plano imaginário que descreve o caminho aparente do Sol (OLIVEIRA, 2008). A Figura 15 representa o modelo e seu movimento.

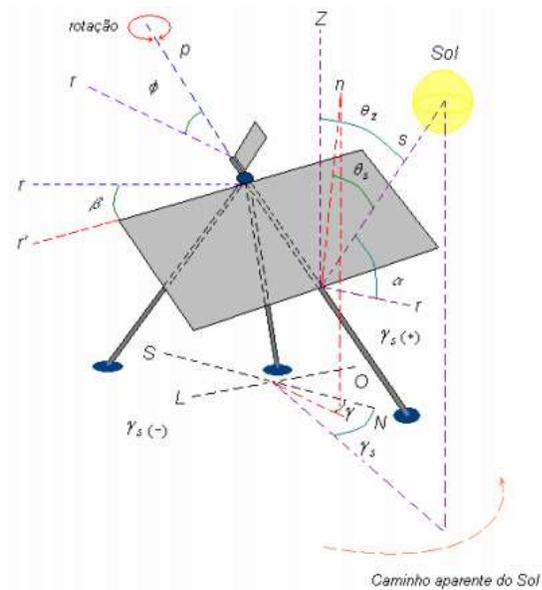


Figura 15: Seguidor Polar

Fonte: Oliveira, 2008

3.1.4 Azimutal

Neste caso, o painel sustenta-se em um eixo móvel vertical rotativo, com inclinação fixa, no qual o movimento de rotação deste eixo segue a trajetória azimutal do Sol (OLIVEIRA, 2008). A Figura 16 traz detalhes do movimento.

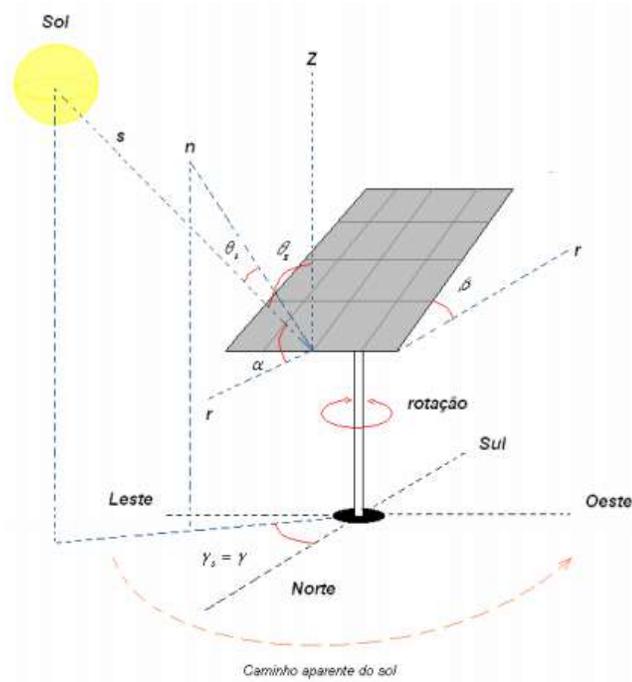


Figura 16: Seguidor eixo vertical móvel

Fonte: Oliveira, 2008

3.2 PAINEL MÓVEL – 2 EIXOS

Neste caso o painel fotovoltaico é movimentado tanto no referencial azimutal quanto horizontal. Estas possibilidades permitem que o painel seja posicionado sempre perpendicularmente à incidência luminosa, garantindo igual aproveitamento da luz por toda superfície da placa durante todas as horas de incidência solar. O painel pode ser posicionado através de atuadores lineares ou rotativos, sendo o primeiro caso com liberdade de movimento nos eixos e sustentação pelos atuadores e o último com sustentação nos eixos, que são atuados geralmente por motor de passo. A Figura 17 demonstra o atuador rotativo.

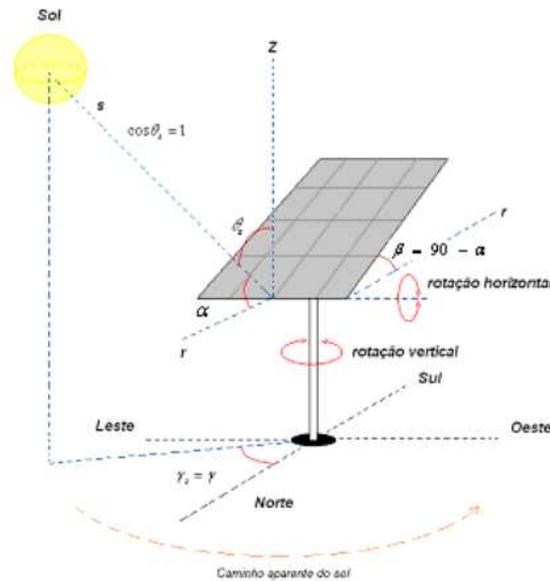


Figura 17: Seguidor solar, eixo vertical e horizontal móvel

Fonte: Oliveira, 2008

3.3 MÉTODOS DE CONTROLE DE POSICIONAMENTO

Tanto para os modelos de um eixo quanto para os de dois eixos, existem dois métodos de controle para posicionamento: através de equação horária ou através de sensores.

No primeiro caso citado, um algoritmo de posicionamento é estabelecido no microprocessador do circuito de controle de modo que o painel siga a trajetória do sol de acordo com a data e horário. A trajetória, portanto, é pré-estabelecida e será executada do início ao fim independente de fatores externos, como a localização de nuvens e outras condições climáticas, por exemplo.

No segundo caso, através de sensores, o painel sempre será posicionado de acordo com a direção de maior incidência luminosa. Diferindo do modelo anterior principalmente por não necessitar de um algoritmo para cada local de instalação, devido a alteração da latitude, também pela ausência da necessidade de um circuito de horário, bem ajustado, que é necessário no sistema via algoritmo horário, sendo sua aplicação mais fácil e sem necessidade de ajustes. Isto é feito através da aquisição de dados por meio de sensores, em tempo real, e o processamento, através do circuito de controle. Para tal, são utilizados diversos sensores, como fotodiodos, fototransistores, LDRs (Light Dependent Resistor - Resistores Dependentes de Luz) e

até mesmo células fotovoltaicas. Geralmente os sensores são posicionados nas extremidades radiais do painel, e o algoritmo trabalha fazendo a comparação entre os níveis de incidência luminosa sobre cada sensor.

4 APLICAÇÃO PRÁTICA E DETALHAMENTO TÉCNICO

Afim de avaliar a eficiência de um sistema seguidor solar comparativamente a um estático, construiu-se um protótipo de sistema fotovoltaico seguidor solar de dois eixos posicionado através de dois atuadores lineares com motores de corrente contínua e controlado através de sensores.

Após a construção do protótipo, com o posicionamento automático funcionando corretamente, o sistema foi preparado para geração e medição de energia, feita em cima de um resistor *shunt* de potência.

Foram posicionados então, no mesmo local, na cidade de Curitiba, latitude 25° Sul, o protótipo de sistema seguidor solar, juntamente com outro painel idêntico, porém estático. Através de um sistema de aquisição de dados foi observada a potência gerada por cada sistema e feita a análise e conclusões. Na Figura 18 e Figura 19, apresentam-se a disposição dos painéis no local de aferição e o painel de circuitos, respectivamente.



Figura 18: Posicionamento dos painéis durante aquisição de dados
Fonte: Autoria própria, 2016



Figura 19: Painel de Circuitos

Fonte: Autoria própria, 2016

Neste capítulo são apresentados os detalhes técnicos sobre os equipamentos utilizados, circuitos elétricos envolvidos, método de controle e configuração do sistema.

4.1 O SISTEMA

Para melhor entendimento e organização do projeto, é interessante separar o sistema em subsistemas, de acordo com a função exercida por cada componente.

A divisão foi feita da seguinte maneira:

- Sistema Fotovoltaico Seguidor Solar
- Sistema Fotovoltaico Estático
- Sistema de Controle de Posicionamento
- Sistema de Aquisição de Dados

A maneira como eles se relacionam, pode ser descrita através do diagrama de blocos apresentado na Figura 20.

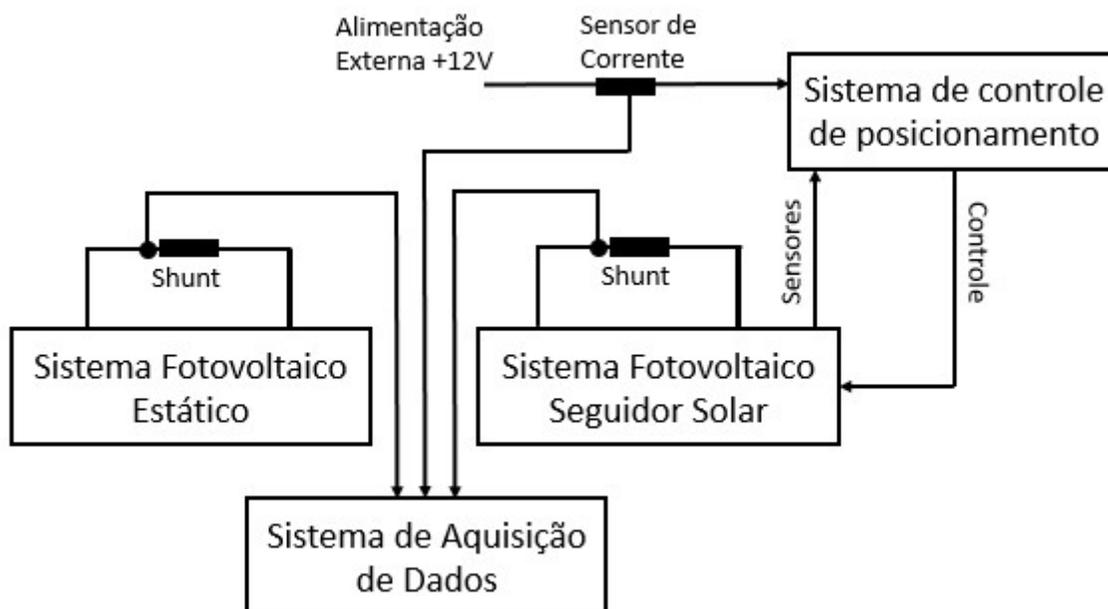


Figura 20: Diagrama de Blocos do Sistema

Fonte: Autoria Própria, 2015

4.1.1 Sistema Fotovoltaico Seguidor Solar

Peça central deste Trabalho de Conclusão de Curso, o sistema é composto de painel fotovoltaico, estrutura mecânica e atuadores lineares.

O painel fotovoltaico é da marca ChinaLand, modelo CHN80-36M, com potência máxima de 80 W. Foi adquirido pela universidade e cedido para o desenvolvimento deste projeto pelo professor orientador.

A estrutura mecânica é composta de perfis de alumínio e outros componentes mecânicos de travamento e movimentação (parafusos, porcas, arruelas, pinos, etc.), e foi construída com auxílio do aluno Cleon F. Dos Santos, como parte de seu Trabalho de Conclusão do Curso de Tecnologia em Automação Industrial, também do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da UTFPR, ainda em desenvolvimento.

Para movimentação do painel, são utilizados dois atuadores lineares da marca Line, modelo 68/55. Estes são acionados por motores de corrente contínua 11-15 V. Através de dados experimentais, obteve-se um consumo de corrente de pico de 1,3A e 0,7A em regime.

Neste sistema também são posicionados os sensores LDR, sobre os quais há detalhamento na sequência deste trabalho, no tópico de Sistema de Controle de Posicionamento.

Na Figura 21, é apresentada a estrutura mecânica completa, em que os atuadores lineares sustentam o painel em sua posição.



Figura 21: Sistema Fotovoltaico Seguidor Solar com atuadores lineares
Fonte: Autoria própria, 2015

4.1.2 Sistema Fotovoltaico Estático

Utilizado como referência, o sistema estático, é composto de um painel fotovoltaico idêntico ao do sistema seguidor solar e estrutura mecânica de sustentação. Foi posicionado com ângulo de 25° de inclinação (latitude de Curitiba) com face voltada ao norte, que segundo Portal Solar (2015), a melhor posição para se instalar o painel solar é com o ângulo de inclinação igual ao da Latitude do local de instalação, e no caso do Brasil, com face voltada ao norte, como pode ser visto na Figura 22.

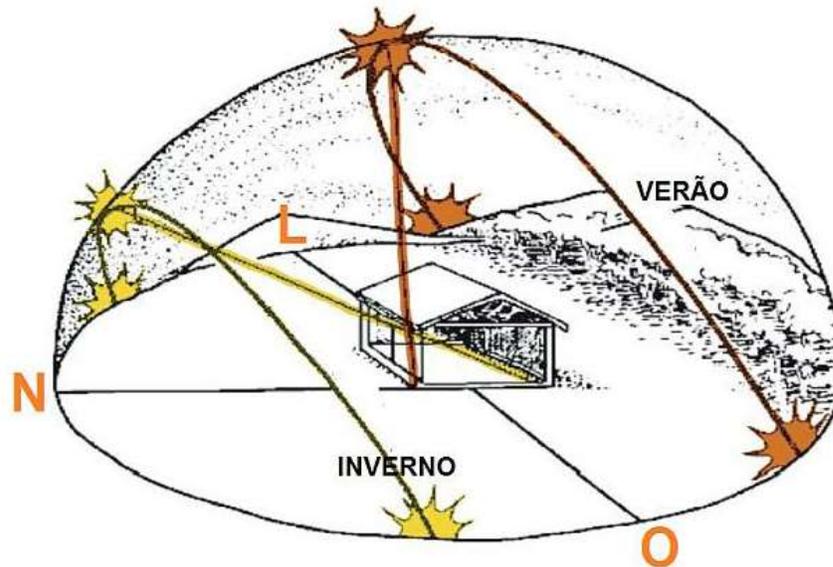


Figura 22: Melhor direção do painel solar fotovoltaico
Fonte: Portal Polar, 2015

4.1.3 Sistema De Controle De Posicionamento

É responsável por comandar os atuadores lineares no posicionamento do Sistema Fotovoltaico Seguidor Solar. Para tal, utilizou-se do microcontrolador PIC16F877A, da marca Microchip e alguns periféricos.

A escolha deste microcontrolador se deve a facilidade de implementação, baixo custo, atendimento a todos os requisitos do sistema e familiaridade de utilização, já que é utilizado na disciplina de Sistemas Microcontrolados, da grade curricular do curso de Engenharia de Controle e Automação da UTFPR. O microcontrolador é baseado na tecnologia CMOS (Semicondutor de Metal-Óxido Complementar) e possui 256 Bytes de memória de dados programável. Para o projeto, foram utilizadas 3 portas de conversor analógico-digital e 8 de entradas e saídas digitais.

Os periféricos utilizados são os sensores LDR, instalados no painel e relés para acionamento dos motores de corrente contínua.

A intensidade luminosa será lida através de dispositivos LDR, resistores que tem o valor de sua resistência alterada de acordo com a incidência de luz sobre sua superfície superior. Quanto menor for a incidência de luz, maior é o valor da resistência elétrica do dispositivo, conforme representado na Figura 23.

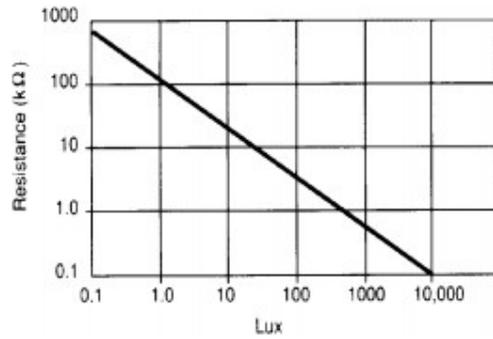


Figura 23: Curva Resistência do LDR x Intensidade Luminosa

Fonte: Sunrom Technologies, 2008.

Foram utilizados quatro dispositivos, e considerando que a luz do Sol chega na superfície terrestre de forma paralela, devido à distância, estes foram separados por um anteparo de sombreamento para se ter diferença de iluminação na superfície dos sensores, como pode ser visto na Figura 24.



Figura 24: Sensores de luminosidade

Fonte: Aatoria própria, 2016

Os sensores são agrupados dois a dois, de forma que um par representa o movimento norte-sul e o outro par, leste-oeste, sendo a extremidade comum dos LDRs conectada ao conversor AD (analógico-digital) do microcontrolador. Uma das extremidades não comum é conectada no terminal positivo de uma alimentação de 5V, enquanto a outra é ligada ao terminal negativo, funcionando como divisor de tensão, como pode ser visto na Figura 25.

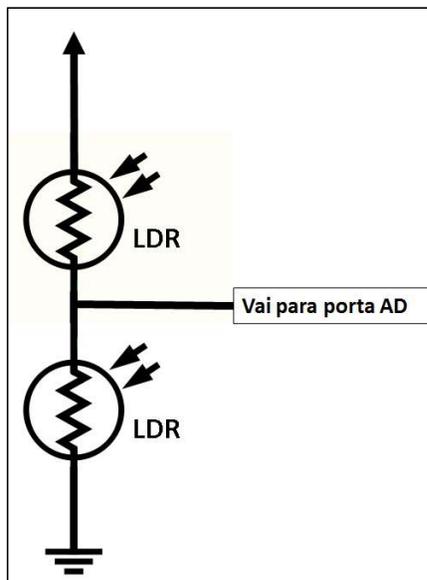


Figura 25: Esquema de ligação dos LDRs

Fonte: Autoria própria, 2016

O microcontrolador lê a tensão recebida pelos conversores AD e compara com um valor programado. Quando a tensão lida é maior ou menor que este valor, significa que há maior incidência luminosa em um dos sensores, e faz-se necessário o reposicionamento do painel até que o valor programado seja atingido novamente. Assim, garante-se que a incidência luminosa é ortogonal a ambos sensores do par em questão, e por consequência, ao painel fotovoltaico. O controle da posição possui como dados de entrada a leitura de tensão dos sensores, feita através de conversores AD do microcontrolador.

Da comparação destes valores com uma referência, o algoritmo programado interpreta qual ação deve tomar. Esta ação consiste em definir valores lógicos binários nas 4 saídas digitais utilizadas. Estes níveis lógicos são responsáveis pelo chaveamento do módulo de relés, que faz o controle de ligação e inversão de giro dos motores. As Tabelas 1 e 2 ilustram a relação de funcionamento dos atuadores 1 e 2, respectivamente. N representa a incidência luminosa sobre o LDR norte, S sobre sul, L sobre leste e O sobre oeste:

Tabela 1 - Lógica de funcionamento dos atuadores Norte-Sul

| Luminosidade | Leitura AD | Saída Digital 1 | Saída Digital 2 | Atuador 1 |
|---------------|------------|-----------------|-----------------|-----------|
| N=S | AD0 = Ref | 0 | 0 | Parado |
| N>S | AD0 > Ref | 1 | 0 | Estende |
| N<S | AD0 < Ref | 0 | 1 | Recolhe |

Fonte: Autoria própria, 2016

Tabela 2 - Lógica de funcionamento dos atuadores Leste-Oeste

| Luminosidade | Leitura AD | Saída Digital 3 | Saída Digital 4 | Atuador 2 |
|---------------|------------|-----------------|-----------------|-----------|
| L=O | AD1 = Ref | 0 | 0 | Parado |
| L>O | AD1 > Ref | 1 | 0 | Estende |
| L<O | AD1 < Ref | 0 | 1 | Recolhe |

Fonte: Autoria própria, 2016

Ao fim do dia, o painel fica voltado para o oeste, permanecendo assim até o amanhecer. Ao amanhecer, o sensor leste recebe luz e começa o processo de reposicionamento. Um quinto sensor LDR para medir a incidência luminosa foi adicionado afim de desligar os atuadores no caso de baixa incidência, como no período noturno ou dias de intensa nebulosidade. Há um potenciômetro de 100 k Ω ligado ao LDR, de maneira semelhante ao divisor de tensão dos pares de sensores citados neste subcapítulo. O valor de tensão deste divisor alimenta o conversor AD2 do microcontrolador, que compara esta leitura a um outro valor de referência. Esta lógica atua definindo nível lógico nas saídas digitais 1 a 4, desligando assim todos os atuadores quando a incidência luminosa não é significativa. O valor desta referência é ajustado no código do microcontrolador, porém o potenciômetro permite um ajuste fino para regular o nível de intensidade luminosa necessário para que o desligamento do sistema ocorra.

Há ainda no sistema quatro sensores fim-de-curso, um em cada extremidade do painel. Estes alimentam 4 entradas digitais, e o valor lido nestas entradas age no algoritmo, desligando o atuador quando este chega no limite de posicionamento mecânico da estrutura.

A configuração do circuito é apresentada na Figura 26, na qual J4 recebe valores de tensão dos LDRs, J3 o potenciômetro de ajuste do desligamento noturno, J8 o LDR de desligamento noturno e a alimentação de 5V do sistema, J2 o sinal de saída para os atuadores e J1 as entradas de sinal dos fins-de-curso.

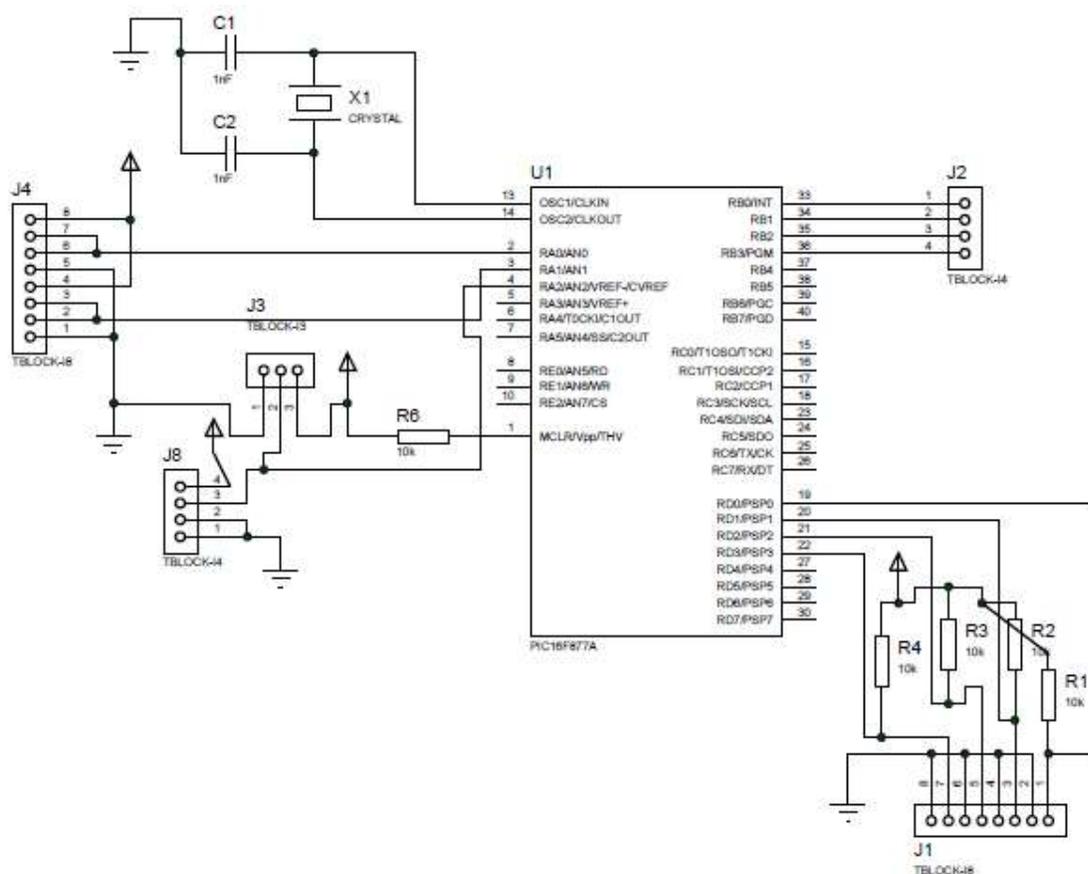


Figura 26: Circuito do Sistema de Controle de Posicionamento

Fonte: Autoria Própria, 2015

Na Figura 2627, é apresentado o esquema de ligação dos motores, a partir da saída J2, passando pelo módulo de relés responsável pelo chaveamento. Os motores são alimentados com uma fonte externa ao circuito de controle, de 12V.

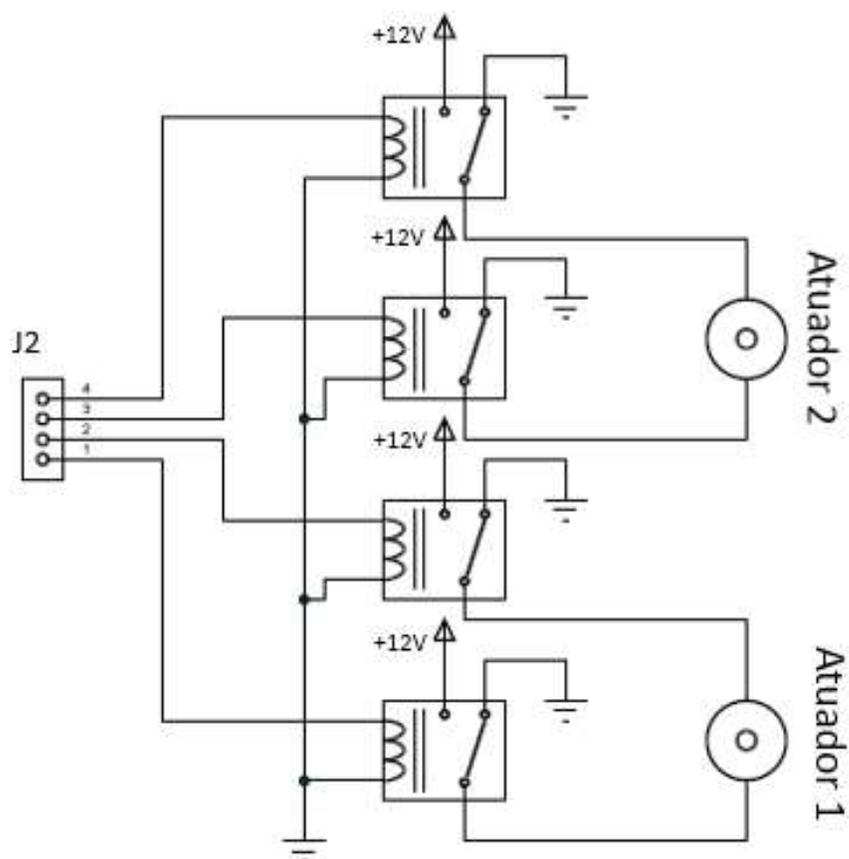


Figura 27: Esquema de ligação do módulo de relés e acionamento dos atuadores
 Fonte: Autoria Própria, 2016

4.1.6 Sistema De Aquisição De Dados

Componente fundamental para as análises comparativas da segunda etapa deste Trabalho de Conclusão de Curso, este sistema é responsável por fazer a aquisição e registro das medidas de potência gerada pelos painéis, aferida sobre um resistor *shunt* localizado num caminho de curto circuito entre o polo positivo e negativo do painel.

Para executar esta tarefa, baseando-se em um modelo de coletor de dados de baixo custo (BORGES, 2014), foi escolhida a plataforma de desenvolvimento Arduino UNO R3, responsável pelo processamento de dados, execução do programa e controle dos periféricos, que são o módulo de relógio em tempo real e módulo para conexão com cartões SD. O primeiro periférico serve para registrar a data e hora de

cada amostra de aquisição, e o segundo para fazer a gravação dos dados em cartão SD para posterior análise.

- **Arduino UNO R3**

O Arduino Uno R3 é uma placa com microcontrolador Atmega328, com entradas tanto digitais quanto analógicas, é uma plataforma de computação *open-source* e possui um ambiente de desenvolvimento próprio que implementa a linguagem C. Na Figura 28, há uma placa Arduino.



Figura 28: Arduino Uno R3

Fonte: Felipeflop, 2015

- **Módulo de Relógio Tempo Real (RTC ou Real Time Clock, em inglês)**

Este módulo é baseado no chip Maxim DS-1307, como mostrado da Figura 29, que incorpora ao sistema um relógio eletrônico à bateria, com data e hora, dessa forma, é possível salvar o horário juntamente aos dados coletados dos sensores, permitindo uma análise no tempo, detalhada, de como as grandezas monitoradas variaram.

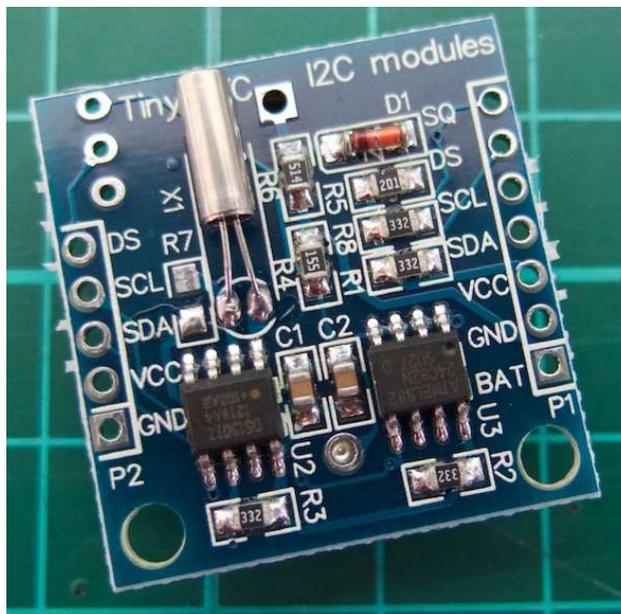


Figura 29: Módulo RTC

Fonte: Tronixlabs, 2015

- **Módulo para conexão com cartões SD/MMC**

Este módulo é utilizado para o armazenamento dos dados coletados, como na Figura 30. Após a aquisição dos dados dos sensores, o microcontrolador salva data, hora (recebidas do módulo RTC) a cada segundo, bem como os valores médios, 200 amostras por segundo, de tensão e corrente dos sensores. Este módulo se comunica através do barramento SPI, utilizando 4 sinais digitais: SD_CLK, SD_OUT, SD_IN e SD_CS.

A biblioteca SD, disponível em Arduino (2014), permite a leitura e gravação em cartões SD. Ela foi construída com base na *sdfatlib*, suportando os formatos FAT16 e FAT32 em cartões SD padrão e cartões SDHC. Ela utiliza o formato 8.3 para os nomes dos arquivos (nomes com 8 caracteres e 3 caracteres para o sufixo), por exemplo, “diretório/arquivo.txt”.

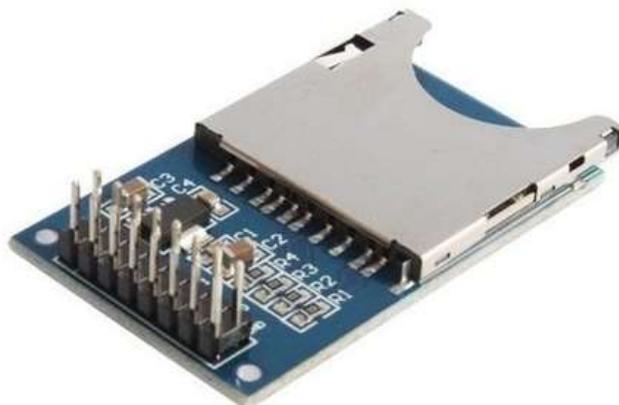


Figura 30: Módulo Cartão SD

Fonte: Felipeflop, 2015

- **Cartão SD**

O cartão SD (Secure Digital), será usado para armazenar os dados coletados pelo sistema de aquisição de dados, possui o tamanho aproximado de um selo, compatibilidade com diversos equipamentos eletrônicos, facilidade de compra e utilização.

Como os dados foram gravados segundo a segundo, totalizando 3600 valores por hora, seria possível armazenar aproximadamente 550 dias em um cartão de 2GB, sendo 6,5 horas por MB.

Na Figura 31, há um exemplo de cartão SD.



Figura 31: Exemplo de Cartão SD

Fonte: Cartão de Memória, 2015

- **Módulo leitor de corrente**

É utilizado para monitorar a corrente que circula em um condutor através de método invasivo, onde o sensor é colocado em série no circuito e mede o fluxo de elétrons através de efeito Hall. Opera com tensão de alimentação de 5V e suporta uma corrente máxima de 5A. A Figura 32 representa o modelo do sensor de corrente utilizado.

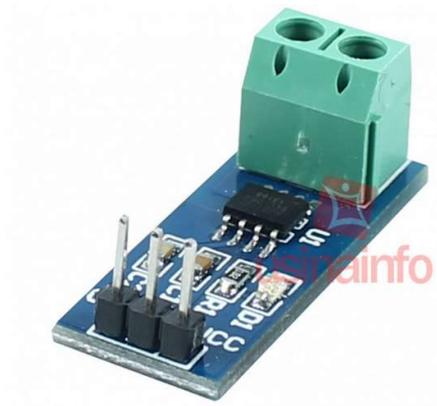


Figura 32: Sensor de corrente

Fonte: Usina Info, 2016

5 APRESENTAÇÃO DOS DADOS E RESULTADOS

Após a coleta de dados, no período de 60 dias, utilizando o software MATLAB, fez-se a análise dos dados. A coleta foi feita durante os meses de janeiro, fevereiro e março de 2016, na cidade de Curitiba-PR. Levando em consideração o período de aquisições, a análise acaba focando no desempenho do controle de posicionamento leste-oeste do sistema, já que não há alteração angular significativa no eixo norte-sul durante a estação do ano em questão. Para dados mais significativos, recomenda-se a condução de análises por um período de tempo maior, contemplando diferentes estações do ano.

5.1 APRESENTAÇÃO DOS DADOS

Para a coleta dos dados foram utilizados, como descrito anteriormente, o Arduino uno R3, o módulo RTC, o módulo de cartão de memória e sensor de corrente.

O programa criado para o armazenamento de dados coletava os valores de tensão e corrente a cada 5 milissegundos, ou seja, 200 Hz, depois, somava esses valores e obtinha-se o valor médio por segundo. Dessa forma, pode-se coletar os dados desejados de forma a reduzir oscilações indesejadas do sistema, além de reduzir o volume de dados, para posterior processamento.

Foram gerados 226 MB de dados, sendo eles a data, hora, tensão lida sobre o resistor *shunt* de 330 m Ω do painel auto-posicionável, tensão do painel estático e a corrente utilizada pelos atuadores. A Figura 33 mostra um trecho do arquivo gerado.

| Arquivo | Editar | Formatar | Exibir | Ajuda |
|------------|----------|----------|--------|-------|
| 08/03/2016 | 11:51:37 | 2.10 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:38 | 2.10 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:39 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:40 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:41 | 2.10 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:42 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:43 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:44 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:45 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:46 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:47 | 2.09 | 1.49 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:48 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:49 | 2.09 | 1.49 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:50 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:51 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:52 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |
| 08/03/2016 | 11:51:53 | 2.09 | 1.50 | 0.00 |

Figura 33: Trecho do arquivo de dados

Fonte: Autoria própria, 2016

5.2 RESULTADOS

A partir dos dados coletados, para efeito de análise e comparação, os valores de tensão e corrente foram transformados em potência.

Para as tensões coletadas sobre o resistor *shunt* foram feitos os seguintes cálculos:

$$P_1 = V_1^2/R_1$$

$$P_2 = V_2^2/R_2$$

Sendo P_1 a potência gerada pelo painel fixo, V_1 , a tensão sobre o resistor e R_1 , o valor da resistência. P_2 , V_2 , R_2 representam os valores respectivos de potência gerada, tensão e resistência do painel auto-posicionável. Considerou-se a resistência constante ao longo do período de coleta de dados.

Para a corrente dos atuadores:

$$P_3 = V_3 \times A$$

Sendo V_3 a tensão de operação dos atuadores, constante de 12 Volts, A , a corrente lida pelo sensor e P_3 a potência consumida pelos atuadores.

Dessa forma, foi possível gerar gráficos para melhor visualização dos desempenhos. Na Figura 34, o gráfico da energia gerada pelo painel automático durante o pior período de aquisição.

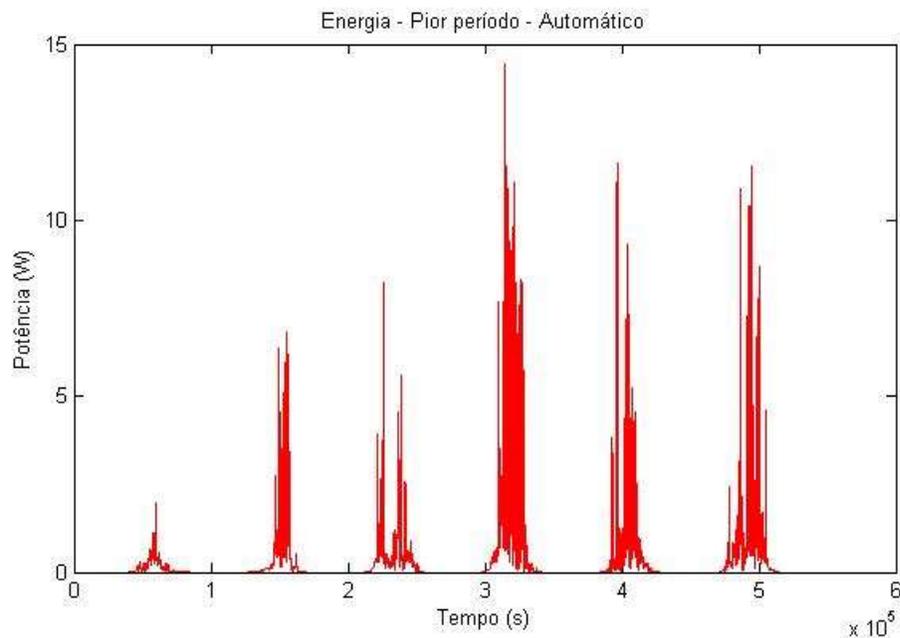


Figura 34: Exemplo energia gerada pelo painel automático – pior período

Fonte: Autoria própria, 2016

Na Figura 35, o gráfico da energia gerada pelo painel fixo durante o pior período de aquisição.

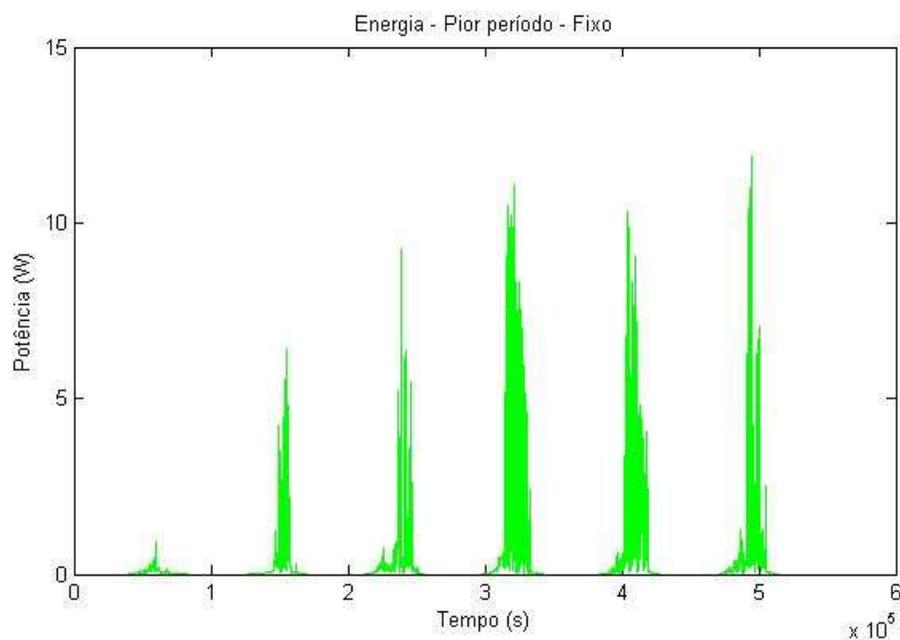


Figura 35: Exemplo energia gerada pelo painel fixo– pior período

Fonte: Autoria própria, 2016

Na Figura 36, o gráfico da relação entre a energia gerada pelo painel automático e a energia gerada pelo painel fixo durante o pior período de aquisição, no qual valores maiores que 1 representam maior geração do painel automático.

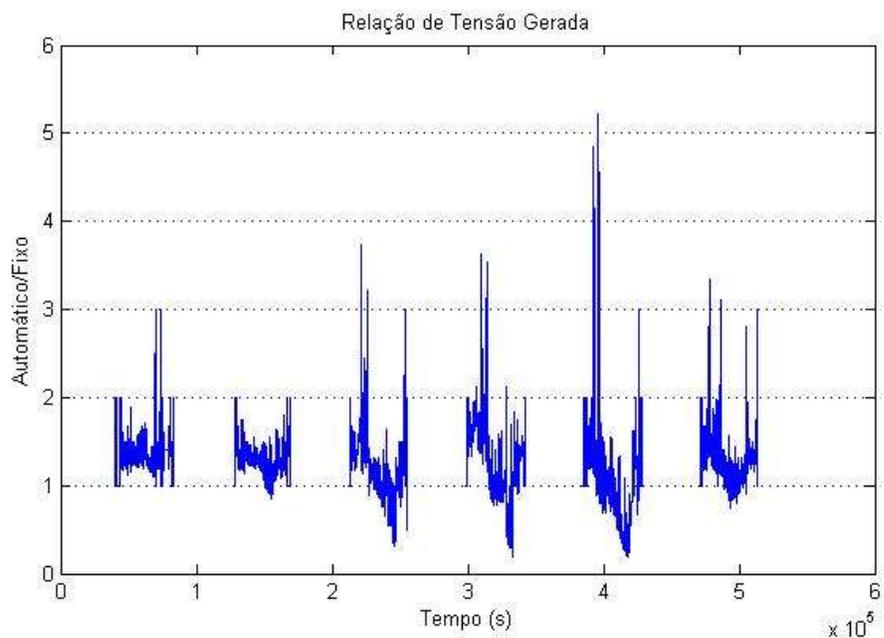


Figura 36: Relação entre tensão gerada pelos painéis – pior período

Fonte: Autoria própria, 2016

A Figura 37 mostra a energia consumida pelos atuadores durante o pior período.

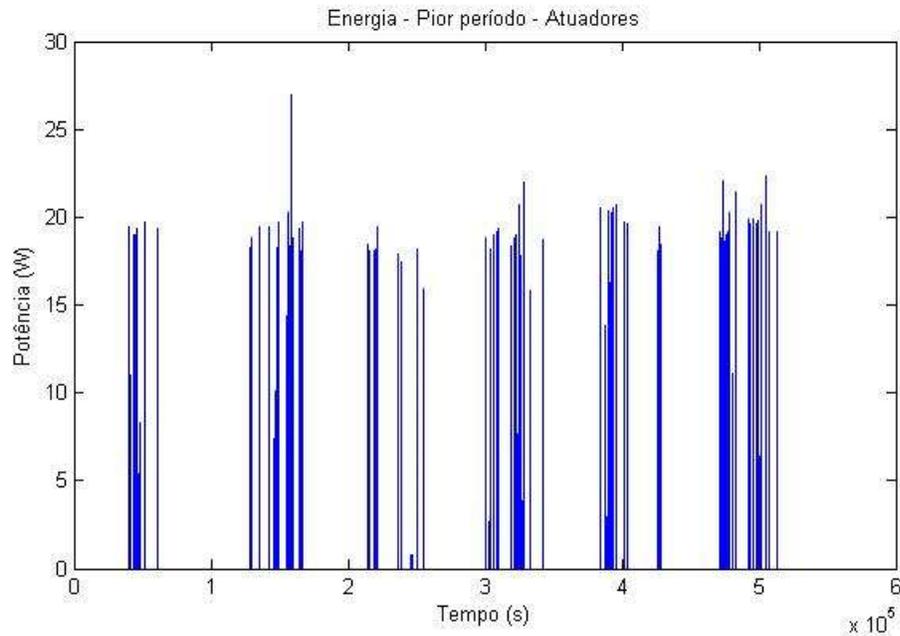


Figura 37: Exemplo energia consumida pelos atuadores – pior período

Fonte: Autoria própria, 2016

Após obter os valores médios de potência e traçar seus respectivos gráficos, foi feito o somatório desses valores a fim de obter a energia total gerada pelos painéis solares e energia consumida pelos atuadores:

$$E_1 = \sum_{n=1}^N P_1(n)$$

$$E_2 = \sum_{n=1}^N P_2(n)$$

$$E_3 = \sum_{n=1}^N P_3(n)$$

Sendo E_1 a energia gerada pelo painel fixo, E_2 , a energia gerada pelo painel auto-posicionável, E_3 , a energia consumida pelos atuadores e N , o número total de amostras, equivalente ao tempo em segundos.

Para o período exemplificado acima, os seguintes valores foram obtidos:

$$E_1 = 227,03 \text{ kJ} = 63,06 \text{ Wh}$$

$$E_2 = 209,45 \text{ kJ} = 58,18 \text{ Wh}$$

$$E_3 = 4,18 \text{ kJ} = 1,28 \text{ Wh}$$

Para calcular o ganho de energia gerada pelo painel automático foi utilizado a seguinte fórmula:

$$\left(\frac{E_1 - E_3}{E_2} - 1 \right) \times 100\%$$

Sendo assim, foi constatado um ganho de 6,18%.

Na Figura 38, o gráfico da energia gerada pelo painel automático durante o melhor período de aquisição.

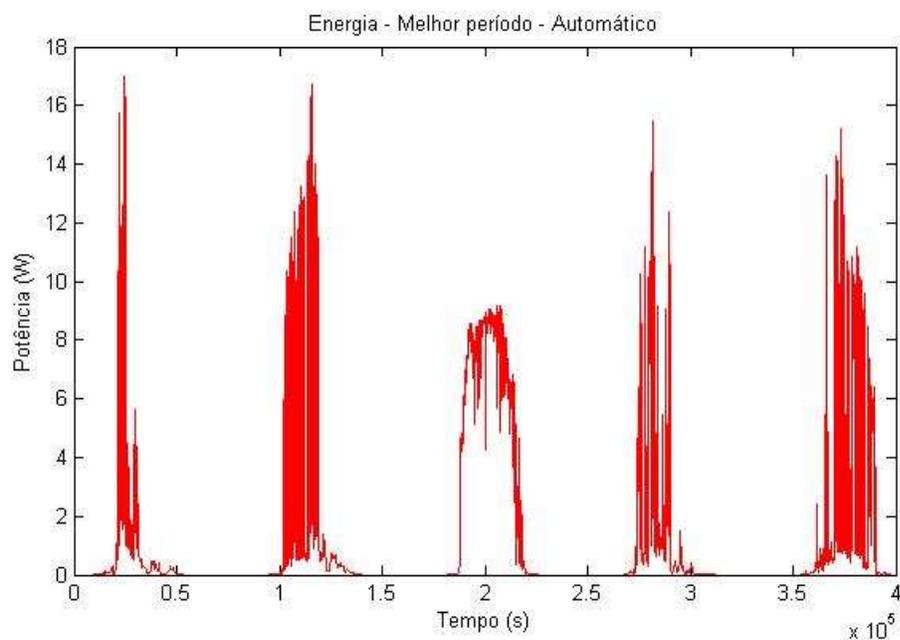


Figura 38: Exemplo energia gerada pelo painel automático – melhor período

Fonte: Autoria própria, 2016

Na Figura 39, o gráfico da energia gerada pelo painel fixo durante o melhor período de aquisição.

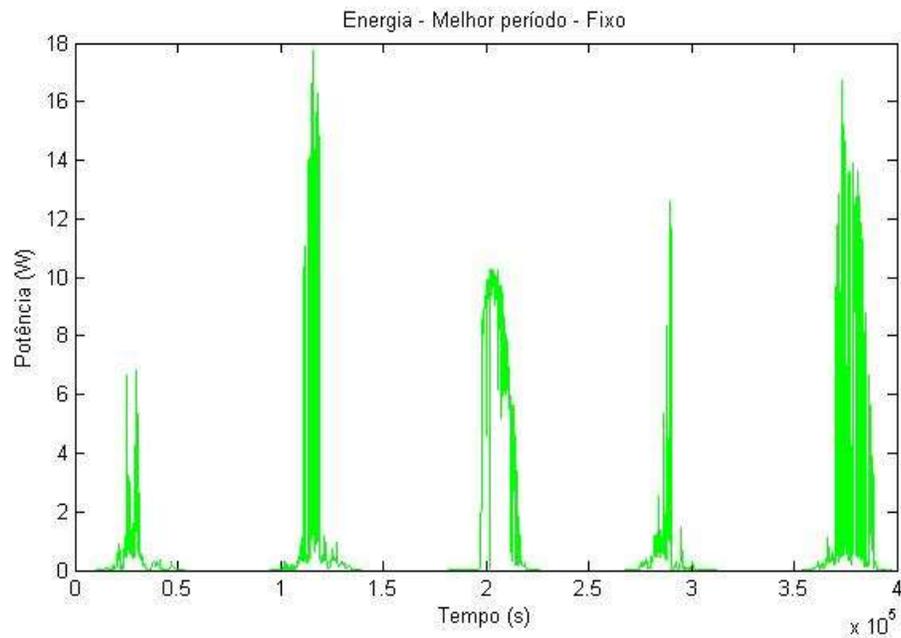


Figura 39: Exemplo energia gerada pelo painel fixo– melhor período

Fonte: Autoria própria, 2016

Na Figura 40, o gráfico da relação entre a energia gerada pelo painel automático e a energia gerada pelo painel fixo durante o melhor período de aquisição, no qual valores maiores que 1 representam maior geração do painel automático.

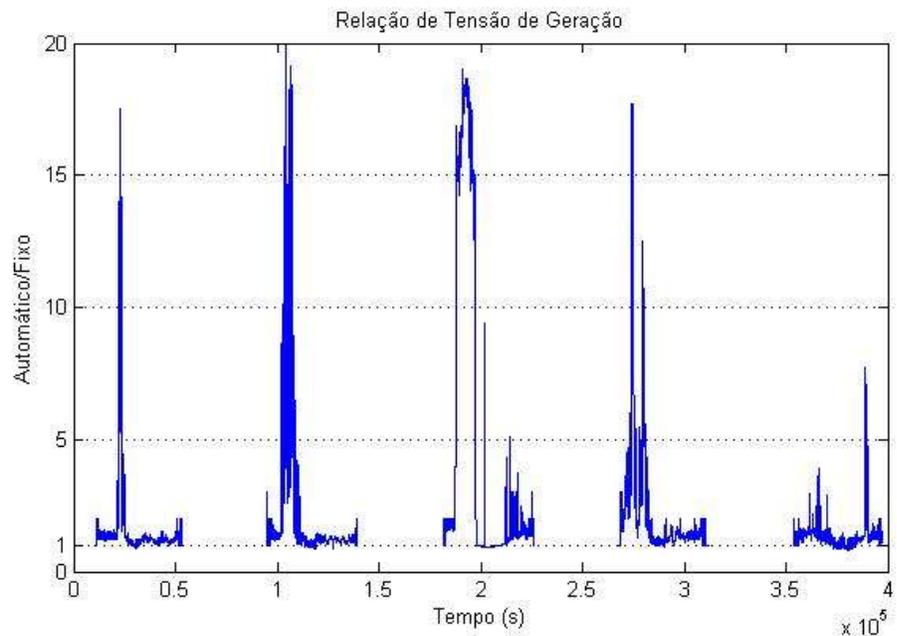


Figura 40: Relação entre tensão gerada pelos painéis – melhor período

Fonte: Autoria própria, 2016

A Figura 41 mostra a energia consumida pelos atuadores durante o melhor período.

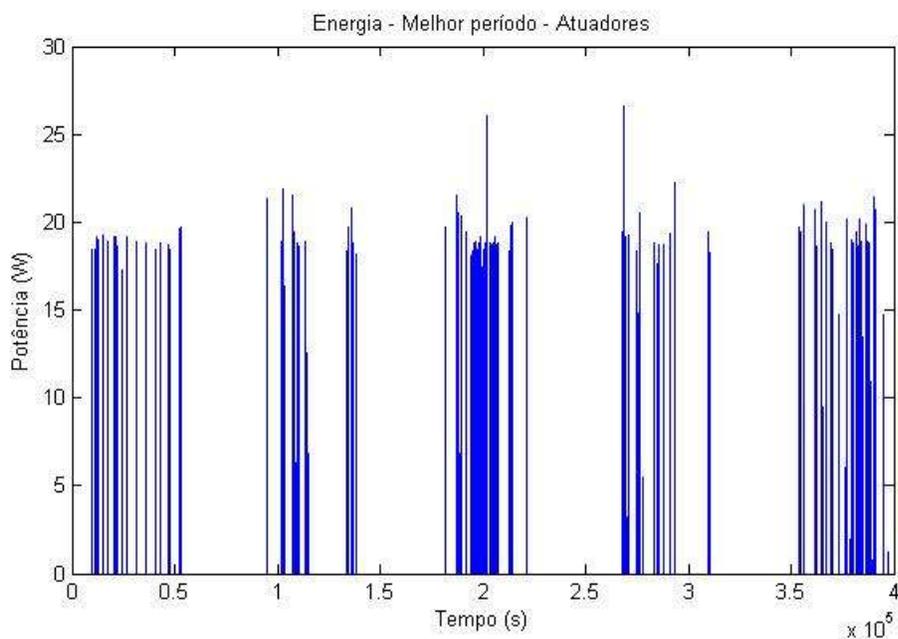


Figura 41: Exemplo energia consumida pelos atuadores– melhor período

Fonte: Autoria própria, 2016

Para o período exemplificado a cima, os seguintes valores foram obtidos:

$$E_1 = 498,25 \text{ kJ} = 138,4 \text{ Wh}$$

$$E_2 = 293,76 \text{ kJ} = 81,6 \text{ Wh}$$

$$E_3 = 6,09 \text{ kJ} = 1,69 \text{ Wh}$$

Sendo constatado um ganho de 67,5%.

Neste período de aquisições, sob a condição climática predominantemente ensolarada (melhor período), o sistema auto-posicionável apresenta elevado saldo energético quando comparado à sua versão estática, tendo em vista que a geração de energia tem duração média de uma hora a mais. Já durante o período de intensas chuvas (pior período), o sistema seguidor solar não apresentou grande vantagem sobre o sistema estático.

Ao final do período de aquisição de 60 dias, os montantes acumulados foram de:

$$E_1 = 3,6 \text{ MJ} = 1000,2 \text{ Wh}$$

$$E_2 = 2,95 \text{ MJ} = 820,63 \text{ Wh}$$

$$E_3 = 57,47 \text{ kJ} = 15,96 \text{ Wh}$$

demonstrando que este protótipo de sistema seguidor solar, sob as condições em que foi analisado, apresentou ganhos de aproximadamente 19,93% em relação ao sistema estático sob as mesmas condições.

A comparação entre as semanas de exemplo e os valores totais gerados se encontram na Tabela 3, na qual apresenta os valores de energia gerado, bem como a energia consumida pelo sistema e o ganho para os períodos descritos anteriormente:

Tabela 3 – Comparação entre os valores de energia geradas

| | E1 [Wh] | E2 [Wh] | E3 [Wh] | Ganho [%] |
|--------------------------|--------------|--------------|-------------|-----------|
| Pior período (exemplo) | 63,06 | 58,18 | 1,28 | 6,18 |
| Média por dia | 10,51 | 9,67 | 0,21 | |
| Melhor período (exemplo) | 138,40 | 81,60 | 1,69 | 67,5 |
| Média por dia | 27,68 | 16,32 | 0,34 | |
| Período completo | 1000,20 | 820,63 | 15,96 | 19,93 |
| Média por dia | 16,67 | 13,68 | 0,27 | |

Fonte: Autoria própria, 2016

6 CONCLUSÕES

6.1 COMENTÁRIOS GERAIS

Primeiramente, é interessante mencionar o caráter investigativo desta pesquisa, que utilizando de métodos empíricos, buscou verificar a hipótese de que ao posicionar um painel fotovoltaico ortogonalmente à incidência solar ao longo do dia obtêm-se um maior saldo energético do que o mantendo posicionado estaticamente. Sendo assim, os estudos conduzidos tratam dos dados obtidos em Curitiba, durante o verão, porém, com longos períodos de chuvas fortes, o que justifica a grande variação na eficiência do sistema automático de posicionamento.

A estrutura mecânica de suporte para o painel solar e seus atuadores, da forma como foi construída, funcionou conforme esperado, atendendo as exigências e esforços a que foi submetida naturalmente.

O programa utilizado para o sistema de posicionamento do painel e o programa para a aquisição de dados foram feitos em linguagem de programação C, os dados gerados serviram de base para estudo da eficiência do sistema.

Do ponto de vista técnico, algumas dificuldades não contabilizadas inicialmente destacam-se como aprendizado e breve avaliação do desempenho dos componentes do sistema são descritas abaixo:

- O microcontrolador escolhido, da família PIC, atende às necessidades de processamento e número de entradas e saídas, porém sua robustez é questionável quanto à interface com seus periféricos. Muitas dificuldades existiram no acionamento dos relés que ativam os atuadores, e por este motivo preferiu-se utilizar um módulo de relés já preparado com driver de acionamento próprio, que apresentou melhor funcionamento e estabilidade.
- O circuito preparado atende às necessidades de protótipo, porém sua robustez não é própria para exposição ao calor. Verificou-se problemas na solda dos componentes após um período exposto ao sol intenso, ocasionando mau contato e falhas no funcionamento do controle, durante o período de aquisições. Sendo assim, o circuito, conforme foi concebido e aplicado, não atenderia requisitos de alta durabilidade.

Caso o intuito seja de aplicar tal sistema na geração de energia, recomenda-se um projeto mais robusto e validações de durabilidade e funcionamento sob condições extremas de calor, umidade, interferência eletromagnética, etc.

- Houveram diversas dificuldades de funcionamento do sistema de aquisição de dados, desde mau contato nos condutores até perda dos dados gravados na memória do módulo RTC. Como protótipo, o mesmo foi conectado através de jumpers preparados para montagem em *protoboard*, o que pode justificar os problemas. Após diversas tentativas, o sistema funcionou corretamente, porém, uma melhor estratégia deveria ter sido planejada durante a concepção do sistema, projetando-se um circuito impresso para garantir as conexões entre os componentes.

Apesar das dificuldades encontradas, que causaram certo atraso no cronograma e conseqüente diminuição no período de aquisição de dados, o aprendizado obtido na solução dos problemas é muito válido e faz parte do processo de produção científica. As lições aprendidas ficam guardadas tanto como experiência sobre planejamento quanto capacidade de reação a adversidades.

Do ponto de vista do tema abordado, os conhecimentos adquiridos possibilitam uma melhor visão sobre as suas potencialidades e também sobre sua importância, dada a situação atual da matriz energética brasileira, além de nos colocar em posição privilegiada na decisão quanto ao mercado de trabalho neste setor.

Sobre os resultados obtidos ao longo deste período de aquisição, cabe destacar a significância observada no efeito das condições climáticas sobre a geração de energia. Para justificar a causa das diferenças obtidas, seriam necessários estudos aprofundados sobre diversas hipóteses passíveis de consideração, como a maneira com que o sistema se comporta em busca de reposicionamento e o efeito da temperatura de operação na geração fotovoltaica, por exemplo. Apesar das diferenças obtidas, porém, o saldo final foi positivo, o que demonstra o potencial do sistema seguidor solar como alternativa mais eficiente de geração de energia se comparado ao estático.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este tema, são interessantes algumas sugestões de abordagens diferentes ou aprofundamentos deste trabalho. São listadas a seguir:

- Análise de eficiência do sistema de controle automático via sensores X sistema de controle automático via algoritmo horário;
- Implementação de algoritmo de controle com Filtro de Kalman, utilizando simultaneamente equação horária e sensores;
- Repetição da análise de eficiência abordada neste trabalho por um período mais longo de aquisição de dados e em locais geográficos diferentes;
- Estudo de viabilidade econômica da implantação do sistema fotovoltaico com posicionamento automático;
- Análise de eficiência de sistema com controlador de carga rastreador de ponto de máxima potência (MPPT).

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil. 2 ed. 2005.** 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)>. Acesso em: 10 jun. 2015

_____. **Resolução Normativa nº482, de 17 de abril de 2012.** 2012. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>>. Acesso em 20 de jun. 2015

ARDUINO. **SD Library.** 2014. Disponível em: <<http://arduino.cc/en/Reference/SD#.Uy9rl2K2jAh>>. Acesso em 03 jul. 2015.

BORGES, Francisco F.; NUNES, Olga J. S.; BORGES, Iago R. F. **Coletor de Dados de Baixo Custo, Baseado na Plataforma Arduino, Para Aplicações em Pesquisas Sobre Meio Ambiente.** João Pessoa, 2014. Disponível em: <<http://meioambientepocos.com.br/portal/anais/2014/arquivos2014/COLETOR%20E%20DADOS%20DE%20BAIXO%20CUSTO,%20BASEADO%20NA%20PLATAFORMA%20ARDUINO,%20PARA%20APLICA%C3%87%C3%95ES%20EM%20PESQUISAS%20SOBRE%20MEIO%20AMBIENTE.doc>>. Acesso em: 27 jun. 2015.

BRITO, Miguel C.; SILVA, José A. **Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em electricidade.** O Instalador, sine loco, 2006. Disponível em: <<http://solar.fc.ul.pt/i1.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

CARTAODEMEMORIA. **Cartão SD.** 2015. Disponível em: <<http://www.cartaodememoria.com/cartao-sd>>. Acesso em: 26 jun. 2015.

CEPEL –CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2015.

FELIPEFLOP. **Catalogo de produtos**. 2015. Disponível em: <<http://www.filipeflop.com/pd-6b847-modulo-cartao-sd-card.html?ct=&p=1&s=1>>. Acesso em: 22 jun. 2015.

JING-MIN, WANG. CHIA-LIANG, LU. **Design and Implementation of a Sun Tracker with a Dual-Axis Single Motor for an Optical Sensor-Based Photovoltaic System**. Sensors, Basel, 13, 3157-3168, 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/13/3/3157>>. Acesso em: 15 nov. 2014.

NASCIMENTO, Cássio Araújo. **Princípio de Funcionamento da Célula Fotovoltaica**. 2004. Monografia – Programa de Pós-graduação em Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, 2004. Disponível em: <http://www.solenerg.com.br/files/monografia_cassio.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2015.

OLIVEIRA, Mauricio M. **Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. Disponível em: <<ftp://ftp.solar.ufrgs.br/teses/oliveira.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

PEREIRA, Enicio Bueno; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L.; RUTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2014.

PORTAL SOLAR. **Sistema Fotovoltaico: Como Funciona**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.portalsolar.com.br/sistema-fotovoltaico--como-funciona.html>>. Acesso em: 25 jun. 2015.

SOLARFOB. **Mono Solar Panel (60w-95w)**. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://www.solarfob.com/solarpanel/Mono60W-95W.html>>. Acesso em: 22 jun. 2015.

SUNROM TECHNOLOGIES. **Datasheet: Light Dependent Resistor – LDR**. 2008. Disponível em: < <http://kennarar.vma.is/thor/v2011/vgr402/ldr.pdf>>. Acesso em: 07 abr. 2016.

TRONIXLABS. **Catalogo de produtos**. 2015. Disponível em: < <http://tronixlabs.com/breakout-boards/real-time-clock/real-time-clock-module-ds1307-v1-1-includes-battery/>>. Acesso em: 22 jun. 2015.

VILLAS BÔAS, Matheus Gouveia; MOTA, Alexandre de Assis. **Avaliação da Influência do Ângulo de Incidência Solar na Geração Fotovoltaica**. In: XVI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E I ENCONTRO DE INICIAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO E INOVAÇÃO DA PUC-CAMPINAS. 2011. Campinas. Anais. Disponível em: < <https://www.puc-campinas.edu.br/websist/portal/ceatec/hidro/subprojetos/arquivos/Avaliacao-influencia-angulo-incidencia.pdf>>. Acesso em 10 jan. 2016.