

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

CHRISTIAN DE FREITAS FARICELLI

Seguidor solar para sistemas fotovoltaicos

São Paulo
2008

CHRISTIAN DE FREITAS FARICELLI

Seguidor solar para sistemas fotovoltaicos

Trabalho de conclusão de curso em Engenharia
Mecânica apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Roberto Zilles

São Paulo

2008

Faricelli, Christian de Freitas
Seguidor solar para sistemas fotovoltaicos, por C. F. Faricelli. São Paulo: EPUSP, 2008. 103p. + apêndice

Trabalho de formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Seguidor Solar.
2. Mecanismo eletromecânico.
3. Energia solar fotovoltaica.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Doutor Roberto Zilles, pelo desafio do trabalho proposto e orientação precisa, sempre direcionando meu trabalho.

Agradeço ao Daniel Basconcellos Filho, pelas recomendações salvadoras no desenvolvimentos do controle eletrônico.

Agradeço à minha família, pelo suporte e apoio incondicional em todos os momentos.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do protótipo de um seguidor solar para painéis fotovoltaicos com dois graus de liberdade, o qual permite movimentação em relação as diferentes horas do dia através de um sistema eletro-mecânico, e também às estações do ano, manualmente. O projeto inclui revisão bibliográfica sobre movimentação solar, energia solar e painéis fotovoltaicos, que juntamente com o estudo de mecanismos eletromecânicos permitiram a elaboração do dimensionamento mecânico e controle eletrônico do sistema. O estudo realizado fornece a base de conhecimento e identificação da necessidade a ser suprida, destacando-se a relevância social do uso da energia solar fotovoltaica no contexto da universalização energética através do desenvolvimento sustentável com aproveitamento das características regionais. O presente estudo se alia ao crescimento da geração fotovoltaica, que desde 1990, mundialmente, alcançou taxas anuais superiores a 20 %. Apesar de os investimento na geração fotovoltaica serem dependentes de incentivos governamentais, melhorias de eficiência, tecnologias emergentes e reduções no custo de fabricação dos sistemas demonstram uma competitividade crescente em relação a fontes convencionais de geração energética. No Brasil, destaca-se o uso de sistemas fotovoltaicos em comunidades rurais e/ou isoladas, principalmente no Norte e Nordeste, em projetos implementados por programas governamentais. Para a determinação teórica do ganho obtido com o uso de sistemas móveis em comparação com sistemas fixos foi utilizado o modelo Perez et Al foi utilizado, que apresentou ganhos em torno de 15% para o protótipo, acréscimo relevante em determinados tipos de projetos.

Palavras chave: seguidor solar, mecanismo eletromecânico, energia solar fotovoltaica.

ABSTRACT

SUN TRACKING SYSTEM FOR PHOTOVOLTAIC PANELS.

This project presents the development of a prototype of a sun tracking system for photovoltaic panels with two degrees of freedom, which allows movement in different times of day, through an electro-mechanical system, and the different seasons of the year, through a manual system. The project includes a literature review on sun movement, solar energy and photovoltaic panels, which together with the study of electromechanical mechanisms enabled the development of mechanical design and electronic control for the prototype. This study provides the basis of knowledge and identification of the need to be addressed, especially the social relevance of the use of photovoltaic solar energy, in the context of energy universalization, through the use of regional characteristics to provide a sustainable development. Since 1990, the photovoltaic generation grew, worldwide, with annual rates exceeding 20%. Despite these figures are still dependent on government incentives, improvements in efficiency, emerging technologies and reductions in the cost of manufacturing show a growing competitiveness in relation to conventional sources of energy generation. In Brazil, the use of photovoltaic systems is bigger in rural and / or isolated communities, mainly in the north and northeast, in projects implemented by government. The Perez et al model, used in the comparison of energy produced by fixed and tracking systems, showed a higher energy generation of around 15% of the prototype in comparison with a fixed system, significant increase in certain types of projects.

Keywords: sun-tracking system, electromechanical mechanism, photovoltaic solar energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vista noturna da Terra tirada pela NASA, em 27 de novembro de 2000.	4
Figura 2 - Índice de atendimento da rede elétrica.....	5
Figura 3 - Exemplo de seguidor solar com células fotovoltaicas.	6
Figura 4 - Comparação entre painel fotovoltaico com seguidor solar (2 eixos) e estático.	7
Figura 5 - Espectro de radiações.....	9
Figura 6 - Mapa-Múndi com principais paralelos e meridianos.....	13
Figura 7 - Radiação solar global diária - média anual típica ($\text{Wh/m}^2\cdot\text{dia}$).....	15
Figura 8 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.	23
Figura 9 - Exemplo de painel fotovoltaico monocristalino (esquerda) e policristalino (direita).	26
Figura 10 - Possibilidades de sistemas fotovoltaicos em função da carga pretendida.....	30
Figura 11 - Sistemas fotovoltaicos isolados da rede.....	30
Figura 12 - Exemplo de sistema híbrido.	31
Figura 13 - Exemplo de sistema híbridos PV, Eólico e Diesel, do GEDAE da UFPA.	32
Figura 14 - Sistema conectado à rede.	32
Figura 15 - Exemplo de sistemas conectados à rede.....	33
Figura 16 - Modelo de Sistema Fixo.....	36
Figura 17 - Modelo com 1 eixo de movimento.	36
Figura 18 - Modelo com 2 eixos de movimento.....	37
Figura 19 - Diagrama de conexão do PIC 16F887A P.	66
Figura 20 - Circuito Principal e fonte de tensão.	68
Figura 21 - Circuito do Display Serial.	69
Figura 22 - Funcionamento básico de um motor de passo.....	70
Figura 23 - Tipos de motores de passo.	71
Figura 24 - Funcionamento de um motor de passo.....	71
Figura 25 - Diagrama de funcionamento do programa.	72
Figura 26 - Circuito impresso.....	88
Figura 27 - Painel fixo e móvel.	89
Figura 28 - Detalhe do seguidor solar.....	89
Figura 29 - Mais detalhes do seguidor.....	90

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Consumo de energia per capita no mundo e em países selecionados.....	1
Gráfico 2 - Irradiação global média em diversas inclinações.....	16
Gráfico 3 - Tendência do preço de painéis fotovoltaicos.....	19
Gráfico 4 - Produção de células fotovoltaicas de 2000 a 2005.	19
Gráfico 5 - Instalações de sistemas fotovoltaicos no mundo, 2005.....	20
Gráfico 6 - Aplicações de sistemas fotovoltaicos no mundo, 2003.....	21
Gráfico 7 - Preço do Ferro-Silício versus outras commodities.	24
Gráfico 8 - Evolução das diversas tecnologias de células solares.	28
Gráfico 9 - Comparação da radiação durante o mês de janeiro.....	43
Gráfico 10 - Comparação da irradiação durante o mês de fevereiro.	43
Gráfico 11 - Comparação da irradiação durante o mês de março.....	44
Gráfico 12 - Comparação da irradiação durante o mês de abril.	44
Gráfico 13 - Comparação da irradiação durante o mês de maio.....	44
Gráfico 14 - Comparação da irradiação durante o mês de junho.	45
Gráfico 15 - Comparação da irradiação durante o mês de julho.	45
Gráfico 16 - Comparação da irradiação durante o mês de agosto.	45
Gráfico 17 - Comparação da irradiação durante o mês de setembro.	46
Gráfico 18 - Comparação da irradiação durante o mês de outubro.	46
Gráfico 19 - Comparação da irradiação durante o mês de novembro.....	46
Gráfico 20 - Comparação da irradiação durante o mês de dezembro.	47
Gráfico 21 - Comparação da irradiação diária nos meses do ano.....	48
Gráfico 22 - Fator Geométrico (J).	55
Gráfico 23 - Tensão de Flexão VS Dureza.....	56
Gráfico 24 - Tensão de Contato Vs. Dureza.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eficiência de conversão e custo de células solares.	18
Tabela 2 - Dados obtidos no LSF.	35
Tabela 3 - Ângulo de saída solar e n.	39
Tabela 4 - Coeficientes de brilho segundo Perez et al.	42
Tabela 5 - Valores obtidos ao aplicar o modelo de Perez et al.	49
Tabela 6 - Fator de distribuição de carga.	54
Tabela 7 - Fatores de Modificação de Vida e Confiabilidade.	57
Tabela 8 - Tensão de flexão para o pinhão.	57
Tabela 9 - Tensão de contato para o pinhão.	60
Tabela 10 - Cálculo esforços atuantes no eixo.	62
Tabela 11 - Equivalente de Von Mises.	62
Tabela 12 - Coeficiente equivalente.	63
Tabela 13 - Dados da chaveta.	64
Tabela 14 - Dimensionamento chaveta.	64
Tabela 15 - Tipos e características de rolamento.	65

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	1
1.1.	Objetivo	8
1.2.	Metodologia	8
2.	Resumo Solar	9
2.1.	Geometria relacionando o Sol e a Terra	12
2.1.1.	Ângulos fundamentais relacionando Sol e Terra.....	13
2.1.2.	Ângulos fundamentais no plano coletor.....	13
2.2.	Caracterização da radiação solar	14
3.	Energia solar fotovoltaica	17
3.1.	Efeito fotovoltaico	21
3.2.	Tipos de células	23
3.2.1.	Silício Monocristalino	24
3.2.2.	Silício Policristalino.....	25
3.2.3.	Silício Amorfo	26
3.2.4.	Tecnologias emergentes	27
3.3.	Utilizando a energia solar fotovoltaica	29
3.3.1.	Sistemas isolados	29
3.3.2.	Sistemas híbridos	31
3.3.3.	Sistemas interligados à rede	32
4.	Análise de modelos de seguidores solares.....	34
4.1.	Descrição do modelo “Perez et al.”.....	37
4.2.	Resultados obtidos com o modelo “Perez et al.”	43
5.	Elaboração do protótipo	50
5.1.	Dimensionamento mecânico	50
5.1.1.	Potência do motor	50
5.1.2.	Dimensionamento da engrenagem.....	52
5.1.2.1.	Relação de Transmissão	52
5.1.2.2.	Largura das engrenagens.....	53
5.1.3.	Dimensionamento do eixo.....	61
5.1.4.	Dimensionamento das chavetas.....	63
5.1.5.	Seleção de rolamentos.....	64
5.2.	Montagem do hardware	66
5.3.	Motor de Passo.....	69
5.4.	Programa em linguagem C.....	71
5.4.1.	Programa Central	72
5.4.2.	Calcula passo	76
5.4.3.	DS 1307 - Relógio	79
5.4.4.	Motor de Passo	81

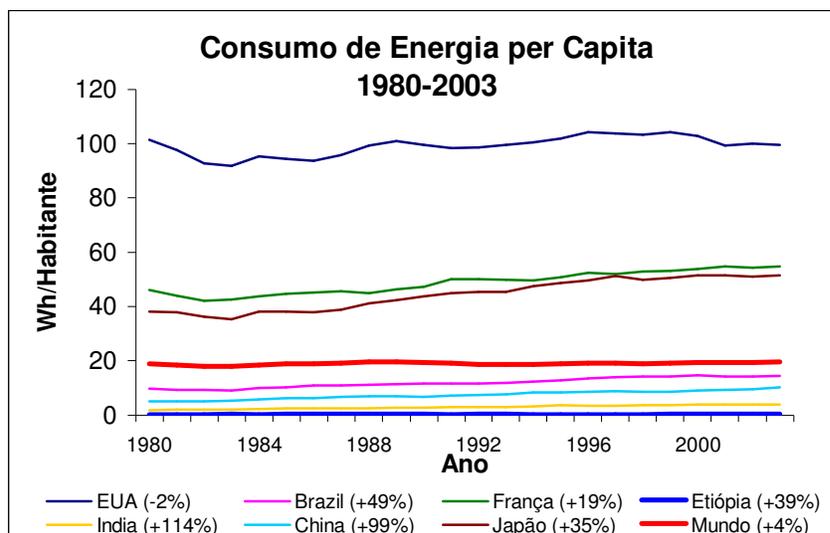
5.4.5. Display e teclado.....	83
5.5. Protótipo.....	88
6. Conclusão e recomendações	91
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
ANEXO 1 – DATASHEET DO MOTOR DE PASSO	95
ANEXO 2 – DESENHOS DE FABRICAÇÃO	96

1. Introdução

Ao longo da história humana a utilização de fontes de energia tornou-se indispensável para a nossa sobrevivência. O uso de diferentes recursos energéticos relaciona-se diretamente com o desenvolvimento e adaptação do homem ao meio ambiente. Entretanto, a utilização desses recursos não tem visado atender apenas requisitos básicos e necessários à sobrevivência humana, através do uso racional e sustentável desses recursos finitos, ocorrendo, muitas vezes, o uso de forma excessiva e indiscriminada, resultando numa demanda mundial crescente de energia. É fundamental que tenhamos cada vez maior consciência sobre a utilização desses recursos, para permitirmos uma demanda equilibrada e suficiente para que toda a humanidade tenha acesso a esse recurso.

O gráfico abaixo apresenta dados sobre o consumo per capita de energia dos habitantes de países selecionados e a média mundial, desde 1980 até 2003.

Gráfico 1 - Consumo de energia per capita no mundo e em países selecionados.



Fonte: EIA (2006).

Note que a legenda mostra a variação da demanda total de cada país no período apresentado. Pode-se observar que os países que apresentaram maior crescimento entre os

citados no gráfico, Índia e a China, tiveram aumento de consumo de energia per capita de 114 e 99%, respectivamente, participando com 14% da demanda global de energia, porcentagem ainda baixa, visto que suas populações, somadas, respondem por aproximadamente 37% da população mundial, de 6,5 bilhões de habitantes (IEA, 2006). Também é interessante mencionar que os Estados Unidos, apesar de terem diminuído seu consumo per capita em 2%, continuam sendo responsáveis por mais de 23% do consumo energético, embora sua população seja inferior a 5% da mundial.

Essa rápida análise mostra claramente a perspectiva de crescimento do consumo energético mundial, num futuro não longínquo, comprovando a necessidade pela procura de novas fontes de energia, que viabilizem um desenvolvimento econômico e sustentável, sem degradar o meio ambiente. Deve-se citar, também, a importância da melhoria na eficiência energética e, principalmente, no uso racional da energia, já que há algum tempo a humanidade tem tratado suas fontes energéticas como se não fossem recursos finitos.

Historicamente, o uso e a substituição das diversas fontes de energia vêm ocorrendo ciclicamente, não ocasionados pela extinção das fontes previamente utilizadas, mas sim pelo surgimento de novas fontes, com vantagens no ponto de vista econômico, ambiental e técnico, possibilitando uma melhor eficiência de conversão de energia, facilidade no uso final e no transporte.

Dentre as diversas fontes de energia, pode-se destacar o uso da energia hidráulica que vêm sendo utilizada por mais de 2.000 anos e foi a única fonte estacionária importante na Europa até o século XII, quando, com a introdução dos moinhos de vento, iniciou-se o aproveitamento da energia eólica. Outros tipos de aproveitamento estacionário para a geração energética são: nuclear, solar, geotérmica, dos oceanos, através do aproveitamento tanto das ondas do mar quanto da variação das marés, e a energia térmica, normalmente associada com a queima de algum combustível, normalmente fóssil.

Primeiramente, o combustível mais utilizado para a geração de energia térmica foi a lenha, substituída pelo carvão mineral. O carvão, ao contrário do que muitos pensam, ainda é responsável por 24,4% da matriz energética mundial¹, tendo participação inferior apenas ao petróleo, o principal combustível atual representando 34,4% da matriz energética mundial. O gás é, atualmente, o terceiro combustível nessa matriz, com participação de 21,2%. Deve-se citar que devido ao avanço tecnológico, a queima desses combustíveis é hoje muito mais eficiente e menos prejudicial ao meio ambiente do que em décadas passadas.

Na verdade, a maioria das fontes de energia pode ser considerada como uma forma indireta de aproveitamento da energia solar, como, por exemplo, a energia eólica, combustíveis fósseis e a biomassa. A energia fornecida pelo Sol, através da radiação solar, pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de ambientes e fluidos, iluminação e geração de potência mecânica e elétrica, além de poder ser convertida diretamente em energia elétrica através de certos materiais.

O uso do calor e da iluminação em ambientes é conhecido como arquitetura bioclimática e reduz a necessidade de iluminação e gasto com conforto térmico, tanto para aquecimento quanto para resfriamento, através do uso racional da radiação e iluminação solar. Por sua vez, o aproveitamento térmico é possível com o uso de coletores, comuns em aplicações comerciais e residências para o aquecimento de água, e aos concentradores solares, utilizados em atividades que necessitam maiores temperaturas.

A radiação solar também pode ser transformada diretamente em energia elétrica pelos efeitos termoelétrico e fotovoltaico, através da utilização de determinados materiais. O primeiro caracteriza-se com a junção de dois metais que, em determinadas condições, possibilitam a formação de uma diferença de potencial. O segundo transforma os fótons

¹ Dados referentes ao ano de 2003. Fonte: MME, 2006.

contidos na luz solar em energia elétrica, com o uso de materiais semicondutores, células solares.

Não se pode esquecer o importante papel da eletricidade no uso de energia, pois após avanços em geração, distribuição e uso final de energia, esta se tornou uma forma muito versátil e eficiente para o suprimento de energia nas diversas regiões do mundo, podendo transformar áreas previamente não apropriadas ao uso humano em pólos industriais e até em centros urbanos. O impacto causado pela transformação do ambiente terrestre pode ser visualizado na figura abaixo.

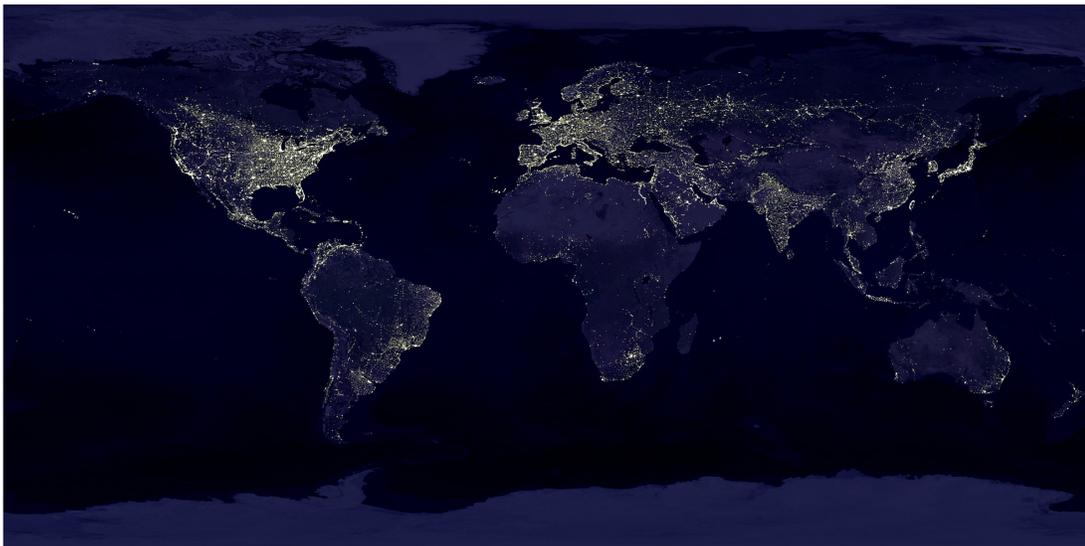


Figura 1 - Vista noturna da Terra tirada pela NASA, em 27 de novembro de 2000.

Fonte: Disponível em <<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/astropix.html>>. Acesso em 25 de maio de 2006.

A análise da figura releva claramente uma concentração luminosa no hemisfério norte, mais desenvolvido economicamente, e espaços praticamente escuros em outras regiões do mundo. Segundo publicação da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel, 2005), cerca de um terço da população mundial ainda não tem acesso a esse recurso, básico e necessário. Além disso, uma grande parcela dos que possuem eletricidade, a possuem de forma precária. No Brasil, conforme figura abaixo, o índice de atendimento da rede elétrica ainda está longe de ser o ideal.

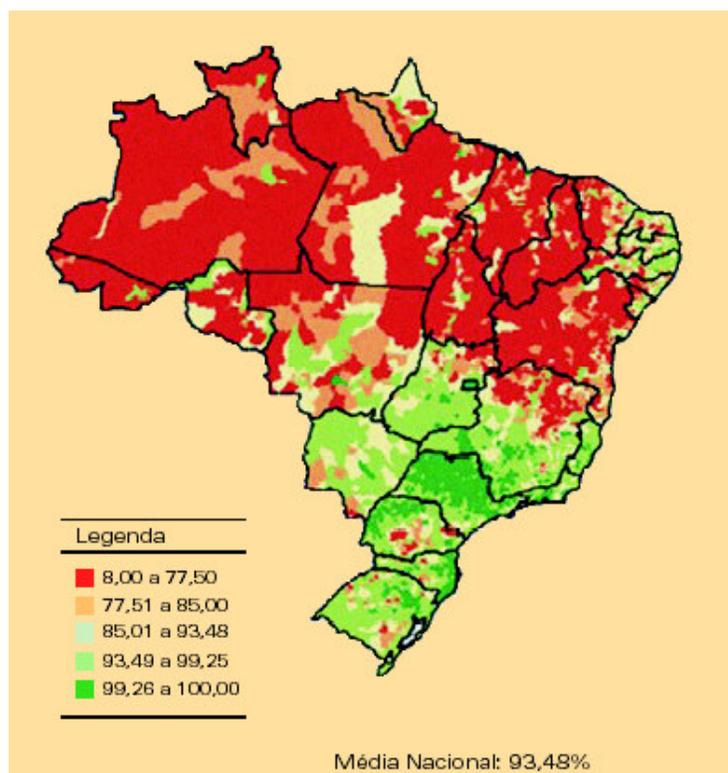


Figura 2 - Índice de atendimento da rede elétrica.

Fonte: Atlas Desenvolvimento Humano, 2000. (Apud cartilha do programa Luz para Todos, MME 2006).

A busca pela universalização energética e utilização dos recursos renováveis regionais, visando o desenvolvimento social e econômico, demonstra o vasto campo de aplicação da energia solar em diversos países. No Brasil, essa afirmação é comprovada pelos inúmeros projetos e utilizações já existentes que, juntamente com o apoio técnico, científico e financeiro de diversos órgãos e instituições nacionais e estrangeiras, proporcionam o atendimento de comunidades isoladas da rede elétrica e desenvolvimento regional. Pode-se destacar o uso de coletores solares para aquecimento de água em instalações residenciais e comerciais, sobretudo nas regiões sul e sudeste, e de células fotovoltaicas para geração de eletricidade e bombeamento de água, em comunidades isoladas, principalmente no Norte e Nordeste.

Características positivas de células fotovoltaicas é seu caráter modular, possibilidade de geração descentralizada, facilidade de instalação e manutenção, além de ser uma fonte limpa

de geração de energia, o que as tornam bastante adequadas na eletrificação rural, em áreas normalmente de baixa e diferente intensidade de consumo. Como fator negativo tem-se o alto custo da energia produzida.

Visando maximizar o aproveitamento da radiação solar proporcionando mais produtividade e conseqüente menor custo por MWh gerado, o presente trabalho de conclusão de curso consiste no projeto de um seguidor solar para uso em sistemas fotovoltaicos. Este seguidor terá dois graus de liberdade, com movimentação em relação às diferentes horas do dia (leste-oeste) e estações do ano (norte-sul), permitindo um maior aproveitamento da energia solar incidente. Esse movimento se dará através de um controle eletromecânico no eixo leste-oeste e um mecanismo puramente mecânico, no eixo norte-sul. A figura abaixo mostra um seguidor solar.



Figura 3 - Exemplo de seguidor solar com células fotovoltaicas.

Diversas fontes, como Mosher (1975), Neville (1976), Gordon (1991) e Kacira (2004), demonstram aumento de produção de energia variando entre 20 e 50 % em painéis fotovoltaicos com seguidores solares de um ou dois eixos, em comparação com plataformas

fixas. A figura abaixo demonstra claramente os horários do dia nos quais há grande diferença na geração de eletricidade.

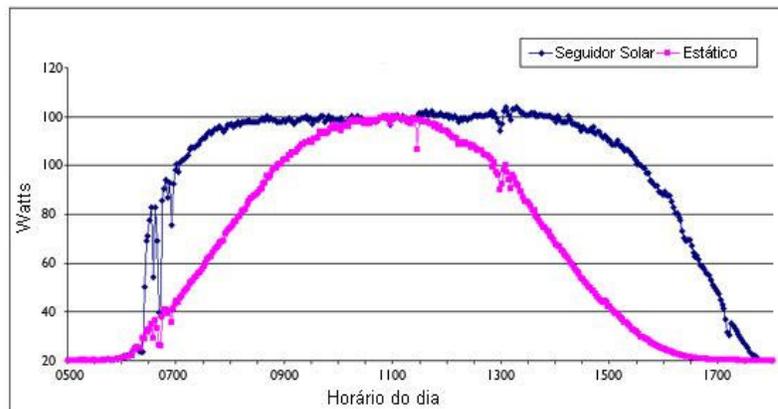


Figura 4 - Comparação entre painel fotovoltaico com seguidor solar (2 eixos) e estático².

Esse trabalho desenvolve estudo sobre movimentação solar, contextualização da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo, revisão bibliográfica de sistemas fotovoltaicos, dimensionamento mecânico e controle eletro-mecânico do projeto, possibilitando a construção de um protótipo. Também será apresentada a comparação da energia gerada pelo seguidor solar com um sistema fixo.

² Adaptado de estudo feito pela Solartrax, disponível em: <<http://www.solartrax.com/advantage-comparison.shtml>>. Acesso em 29 de março de 2006.

1.1. Objetivo

Desenvolver o projeto de um protótipo de seguidor solar para painéis fotovoltaicos, possuindo dois graus de liberdade: um controle eletro-mecânico permitirá movimentação no sentido Leste-Oeste, ou seja, nas variações em relação às diferentes horas do dia, e um controle mecânico no sentido Norte-Sul, relativo às diferentes estações do ano.

1.2. Metodologia

O trabalho será composto das seguintes etapas:

- Estudo da radiação e movimentação solar;
- Contextualização da energia solar fotovoltaica no Brasil e no mundo;
- Estudo de seguidores solares e seus mecanismos eletromecânicos;
- Dimensionamento mecânico;
- Elaboração do controle eletrônico;
- Construção de um protótipo;
- Comparação entre painel fotovoltaico fixo e sistema com seguidor solar.

2. Resumo Solar

O Sol pode ser considerado como sendo um corpo negro³ com temperatura superficial em torno de 6000K, pois em determinado período de tempo, o Sol irá irradiar a mesma quantidade de energia que um corpo negro à mesma temperatura. A figura abaixo compara o espectro da radiação que seria emitida por um corpo negro a 5900 K, com a radiação emitida pelo Sol.

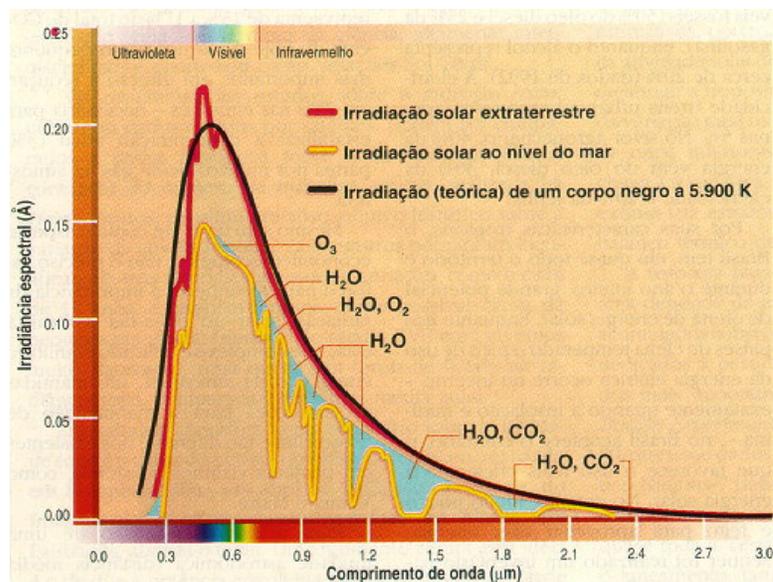


Figura 5 - Espectro de radiações.

Fonte: Ciência Hoje, extraído de <<http://www.cptec.inpe.br/satelite/metsat/pesquisa/radsat/solframe.htm>>. Acesso em 15 de abril de 2006.

Calcula-se que o Sol irradie energia numa taxa média de $3,9 \times 10^{26}$ W. Vale ressaltar que essa taxa não é constante devido a variações de atividades solares, como manchas solares, regiões relativamente mais frias da fotosfera, além das erupções, explosões violentas. Estima-se que essa variação seja da ordem de $\pm 1\%$. Essa taxa relaciona-se geometricamente com a intensidade de radiação solar que chega até a Terra e, para um determinado período, a energia

³ Um corpo negro é um corpo que absorve toda a radiação incidente de forma isentrópica, em todos os comprimentos de onda, isto é, nenhuma luz o atravessa ou é refletida. Além disso, sua emissão é a máxima radiação que pode ser emitida por um corpo, a uma dada temperatura.

que atravessa a fotosfera é a mesma que atravessa uma esfera imaginária que tem o Sol como centro e um raio igual à distância entre o Sol e a Terra, uma vez que a energia em forma de radiação não se perde no espaço. Desse modo, fica claro que o fluxo de energia que chega até a atmosfera da Terra é bem menor que o fluxo nas proximidades do Sol, variando com o inverso da distância até o Sol, analisando-se a partir da fotosfera. Muitos valores já foram sugeridos para a constante solar (G_{sc}). Antigamente, utilizavam-se medições feitas em altas montanhas e extrapoladas para fora da atmosfera, mas, atualmente, foram obtidos valores mais precisos com a utilização de balões meteorológicos e satélites. Hoje, considera-se a constante solar como sendo 1367 W/m^2 .

Um conceito muito importante no presente estudo é a definição da hora solar (HS), que é a hora baseada no movimento angular do Sol, tendo como referência a Terra, e sendo meio dia correspondente ao horário no qual o Sol cruza o meridiano do observador. A hora solar relaciona-se diretamente com o nosso horário habitual, porém necessita de duas correções para obtermos a hora solar a partir desta. A primeira tem origem na diferença entre o meridiano que define o fuso horário e o meridiano do observador e a segunda se deve a perturbações na rotação da Terra. É importante lembrar que no horário habitual utilizado não se leva em consideração o chamado “horário de verão”, pois este objetiva a redução do consumo de energia, não representando um comportamento físico do Sol. O horário solar é calculado da seguinte forma:

$$HS = HL + 4 \cdot (L_{fuso} - L_{local}) + E$$

Sendo:

HS = Hora Solar, HL = Hora Local, L_{fuso} = Longitude do fuso horário que indica o horário local, L_{local} = Longitude do local do observador, e:

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

Onde:

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

sendo n o dia do ano, variando entre 1 e 365 (366 em anos bissextos)

Na elaboração do controle eletrônico essa equação foi utilizada e modificada para que este não necessite ajustes a cada quatro anos, em anos bissextos. É importante ainda a definição de outros conceitos relacionados ao Sol e energia solar. Os principais conceitos, ainda não mencionados, estão relacionados abaixo⁴:

- **Radiação Solar** - forma de transferência de calor e energia através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons provenientes do Sol.
- **Irradiância** - fluxo de energia que atravessa uma determinada área, sendo medido em W/m². Existem irradiâncias atmosféricas, difusas, direcionais, diretas, esféricas e globais.
- **Irradiação** – é a quantidade de energia radiante que atravessa uma determinada área durante um certo intervalo de tempo, por unidade de área. É igual à integração da irradiância no intervalo de tempo em questão, sendo medido, normalmente, em J/m² ou Wh/ m².
- **Insolação** – é o período durante o qual um feixe solar direto ilumina uma superfície, podendo ser obtida experimentalmente por um aparelho chamado heliógrafo, registrando-se a quantidades de horas nas quais a irradiância permaneceu acima de determinado valor, usualmente 120 W/ m². Unidade usual: horas.

⁴ A definição dos conceitos foram baseadas, sobretudo, em definições existentes no site do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, no link <<http://www.cptec.inpe.br/>>. Acessos durante o mês de abril de 2006.

2.1. Geometria relacionando o Sol e a Terra

O conhecimento da posição e movimentação solar em relação à Terra e, mais especificamente, em relação a uma superfície coletora que será utilizada em determinado local é necessário para o dimensionamento físico e programação mecânica do seguidor solar.

Dentre os vários movimentos da Terra, destacam-se o movimento de rotação e translação. A rotação é o movimento da Terra em torno de seu próprio eixo que dura, aproximadamente, 24 horas, ou seja, um dia. Já o movimento de translação é o realizado em torno do Sol, que dura em torno de 365 dias, um ano.

A Terra possui dois principais eixos imaginários que a divide em hemisférios: Norte e Sul, e Leste e Oeste, sendo representados, respectivamente, pela linha do Equador e meridiano de Greenwich. Esses eixos determinaram a criação de dois ângulos: latitude (φ) e longitude (λ).

A longitude é o ângulo medido entre o meridiano de Greenwich ($\lambda=0$) e o meridiano que passa pelo local do observador. A longitude varia entre $+180^\circ$ e -180° , sendo por convenção os valores positivos relativos ao hemisfério à leste de Greenwich, conhecido como oriental.

Por sua vez, a latitude é o ângulo medido entre a linha do Equador ($\varphi=0$) e o paralelo que passa pelo local em questão. A latitude varia de $+90^\circ$ (Pólo Norte) a -90° (Pólo Sul), sendo por convenção os valores positivos relativos ao hemisfério acima da linha do Equador. Há outras linhas imaginárias importantes como os Trópicos de Capricórnio (S, $\varphi=-23.45^\circ$) e Câncer (N, $\varphi=+23.45^\circ$), que assinalam a máxima declinação Solar, além dos Círculos Polares Antártico (S) e Ártico (N), $\varphi=\pm 66,54^\circ$. Nas regiões acima dessas linhas ($\varphi > 66,54^\circ$ ou $\varphi < -66,54^\circ$) o Sol estará sempre acima do horizonte no verão e abaixo deste no inverno.



Figura 6 - Mapa-Múndi com principais paralelos e meridianos.

2.1.1. Ângulos fundamentais relacionando Sol e Terra

- **Declinação (δ):** é a medida formada pelo plano do Sol, ao meio dia, com o plano do equador, variando entre $\pm 23,45^\circ$.
- **Zenital:** é o ângulo formado entre a posição do Sol e a vertical do observador.
- **Altura solar:** é a medida entre o horizonte e a posição do Sol acima do horizonte.
- **Horário:** é o ângulo formado entre o plano meridiano passando pelo Sol e o plano meridiano do local.
- **Saída solar:** é medida na qual o Sol nasce ou se põe.

2.1.2. Ângulos fundamentais no plano coletor

- **Inclinação:** é o ângulo entre a horizontal do local com o plano da superfície coletora.

- **Azimutal:** é a medida angular tomada a partir da orientação norte do observador no plano do horizonte.
- **Incidência:** é o ângulo formado entre a posição do Sol relativa à superfície em questão e a normal a essa superfície.

2.2. Caracterização da radiação solar

A disponibilidade da radiação solar, também denominada de energia total incidente sobre a superfície terrestre, depende da latitude local, estação do ano (variável com a longitude), horário do dia e condições climáticas, sendo dado necessário para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, pois demonstra o recurso solar disponível. No Brasil, na avaliação dessa disponibilidade destacam-se o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), iniciativa conjunta da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco), CHESF (Companhia Hidroelétrica do São Francisco) e CRESESB, e o Atlas de Irradiação Solar no Brasil (1998), elaborado pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e LABSOLAR (Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina), representado a seguir.

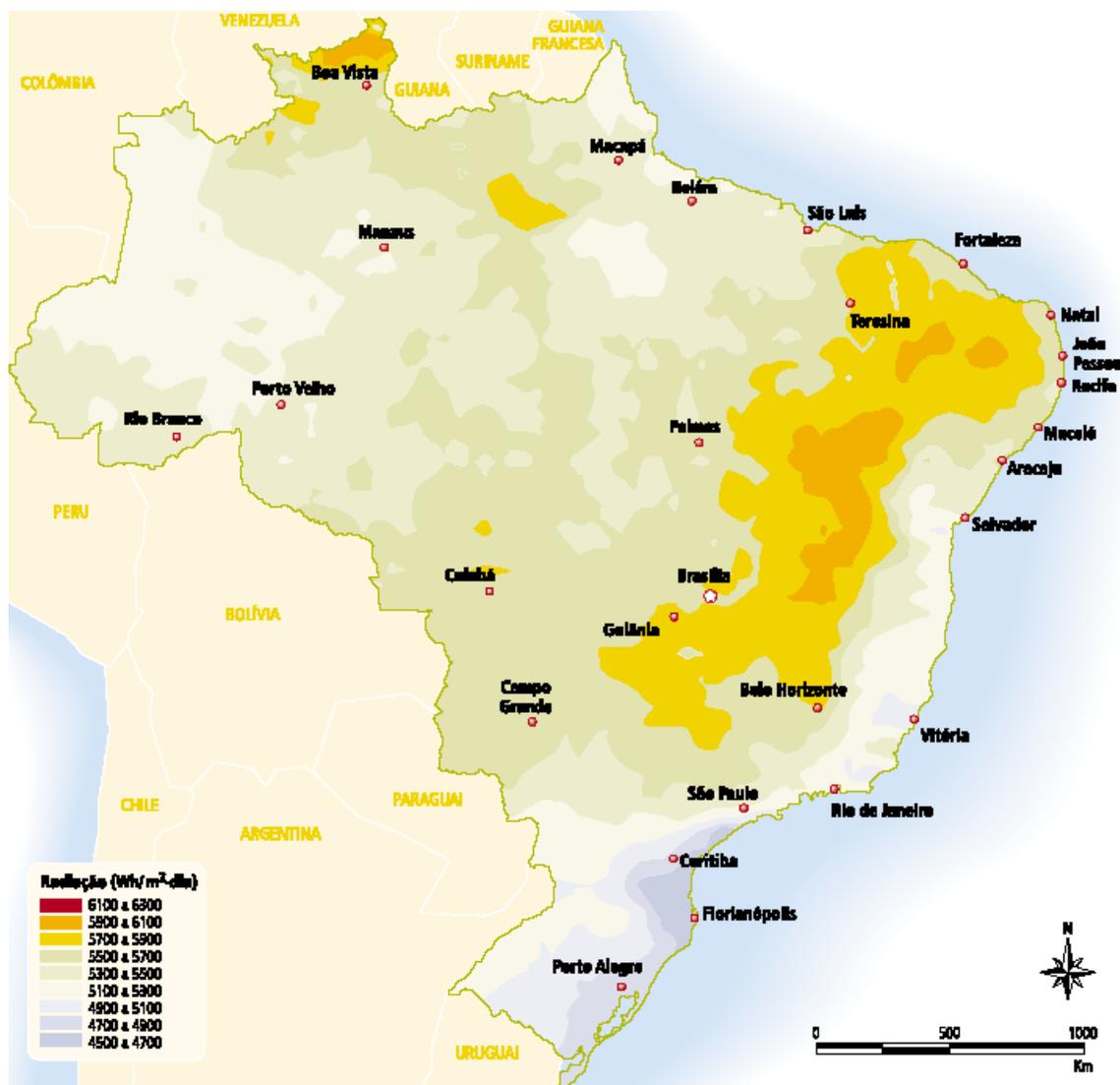


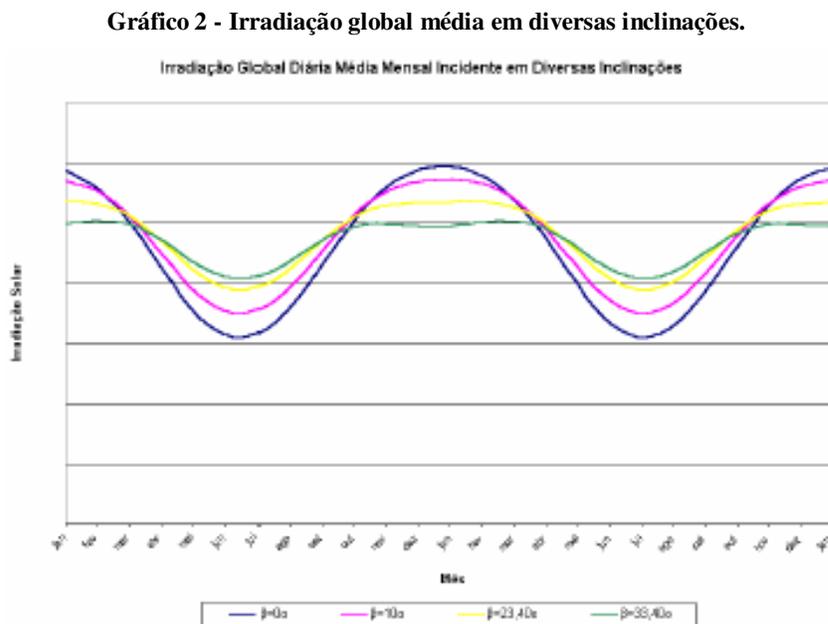
Figura 7 - Radiação solar global diária - média anual típica (Wh/m².dia).

Fonte: Atlas da irradiação solar no Brasil, 1998 (Apud Aneel, 2005).

Segundo Rosa (2003), de toda a radiação solar fornecida à atmosfera (G_{sc}), cerca de 47% é absorvida ou emitida pela própria atmosfera e por nuvens. Dos 53% restantes, 6% são refletidas pelo próprio solo, sendo os outros 47% absorvidos por este. Vale lembrar que a radiação global em algum local, depende das radiações solares diretas, difusas e albedo.

Em sistemas fixos, para o aproveitamento máximo desse recurso solar disponível ao longo de um ano, deve-se inclinar o coletor solar com ângulo igual ao da latitude do local. Pode-se, entretanto, utilizar outros ângulos, no caso de preferência por uma maior geração em

determinada parte do ano, ou visando uma geração anual mais uniforme. O gráfico abaixo demonstra a variação da irradiação global média para diversas inclinações.



Fonte: Rosa (2003).

Observa-se que a linha verde possui uma distribuição mais uniforme ao longo do ano, porém a inclinação com maior geração ao longo do ano possui inclinação igual à latitude local, representada pela linha amarela no gráfico acima.

3. Energia solar fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais na presença de luz solar ou outras formas apropriadas de energia, sendo uma conversão direta da luz em eletricidade. Edmond Becquerel, em 1839, foi o precursor do estudo dessa forma de energia ao relatar o aparecimento de uma diferença de potencial nos extremos de um material semicondutor, quando exposto à luz.

Apesar de o primeiro aparato experimental fotovoltaico ter sido montado em 1876, apenas em 1956 iniciou-se a produção industrial. Os primeiros impulsionadores dessa tecnologia foram, respectivamente, as empresas de telecomunicações, objetivando a geração de energia em localidades isoladas, e os programas espaciais, responsáveis por grande avanço tecnológico em termos de processo de fabricação, eficiência e peso das células. As células fotovoltaicas foram consideradas o meio mais adequado de suprimento de energia para longos períodos no espaço, sendo utilizadas em satélites, naves espaciais e na estação espacial – afirmação que continua verdadeira nos dias atuais (CRESESB, 2006).

O choque do petróleo de 1973/74, que desencadeou a crise energética mundial, fez aumentar a procura por fontes alternativas de geração de energia, viabilizando estudos de aplicações terrestres de energia solar fotovoltaica. Porém, aplicações em larga escala eram impossibilitadas pelo elevado custo das células, produzidas, inicialmente, ao custo de US\$ 600 / W para o programa espacial⁵.

Ainda nos dias de hoje, o custo continua sendo um fator limitante para a geração de eletricidade a partir de células solares em escala comercial. Segundo publicação da Aneel (2005), o custo de capital atual da geração fotovoltaica varia entre 5 e 15 vezes os custos unitários de uma usina a gás natural que opera em ciclo combinado. Entretanto, nos últimos

⁵ Segundo dados disponíveis na publicação do CRESESB - “Energia Solar – princípios e aplicações”.

anos, tem-se observado uma redução nos custos de capital de fabricação, juntamente com melhorias na eficiência de transformação de energia, como demonstrado na tabela abaixo.

Tabela 1 - Eficiência de conversão e custo de células solares.

Tipo de célula	Eficiência (%)			Custo (US\$/W)
	Teórica	Laboratório	Comercial	
Silício de cristal simples	30,0	24,7	12 a 14	4 a 7
Silício concentrado	27,0	28,2	13 a 15	5 a 8
Silício policristalino	25,0	19,8	11 a 13	4 a 7
Silício amorfo	13,0	4 a 7	3 a 5	-

Fonte: Grenn, M. A. et al. *Apud* ANEEL, 2005.

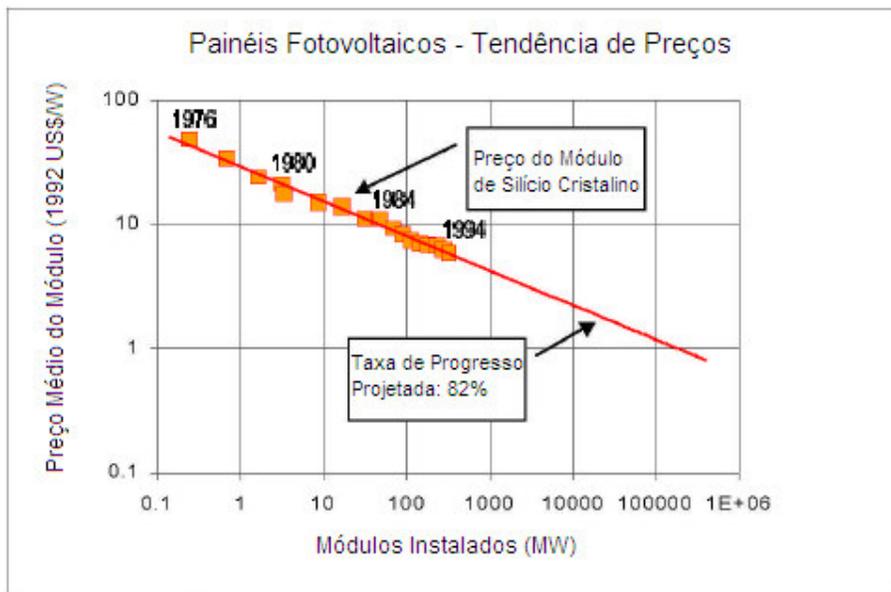
Se compararmos o custo de 1973, 600 US\$/W, com um custo atual estimado⁶ em 6 US\$/W, observam-se redução média anual de aproximadamente 13% no custo de células fotovoltaicas, demonstrando o grande potencial econômico dessa fonte num futuro próximo. É preciso também se levar em consideração as vantagens já citadas no capítulo 1 desde trabalho, e a sua crescente competitividade devido à avaliação do custo real de outras formas de geração de energia, considerando-se fatores anteriormente ignorados, como os impactos ambientais.

O gráfico apresentado a seguir é adaptado de um estudo realizado pela *Strategies Unlimited*⁷ e demonstra a tendência do preço de painéis fotovoltaicos. Repare que os valores demonstrados no gráfico possuem a mesma tendência e ordem de grandeza parecida da estimativa exposta acima.

⁶ Custo estimado para o ano 2000, com base na tabela 1 e no valor de 8 US\$/W obtido no estudo do CRESESB “Energia Solar – princípios e aplicações”.

⁷ Consultoria especializada em pesquisas e análises de mercado. Mais informações disponíveis na home page da empresa <<http://su.ecnext.com/>>.

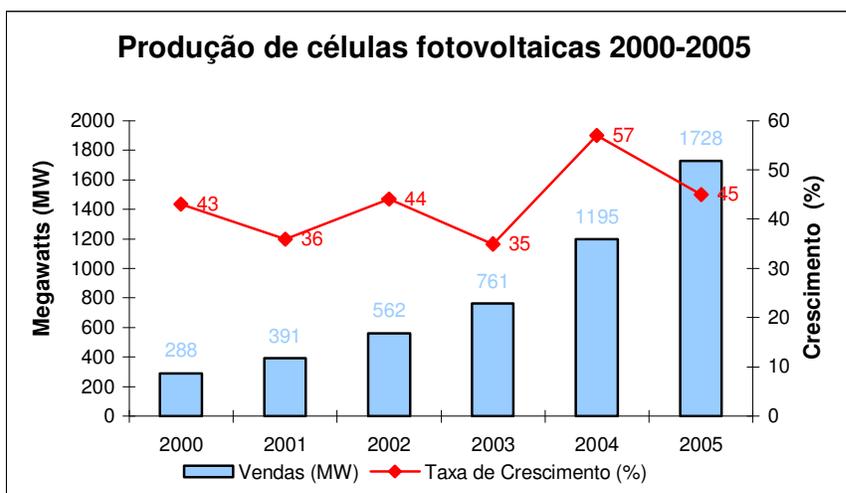
Gráfico 3 - Tendência do preço de painéis fotovoltaicos.



Adaptado de Galdo, 2006.

Melhoria crescente na eficiência de células vem confirmando essa tendência da grande potencial do uso da energia solar fotovoltaica. Essa tendência é confirmada, historicamente, com o crescimento mundial da produção de células fotovoltaicas, conforme gráfico abaixo.

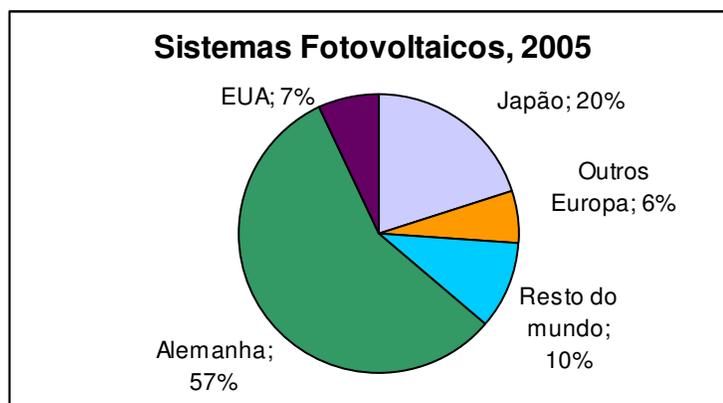
Gráfico 4 - Produção de células fotovoltaicas de 2000 a 2005.



Fonte: Taub, 2006.

A taxa de crescimento anual na produção de células tem se mantido acima de 20 % desde 1990, sendo superior a 30 %, desde 2000 (Taub, 2006 e Rogol, 2004). Dados de 2006 mostram que a capacidade instalada mundial chega a 5 GW, sendo que o ano de 2005 sozinho responde por 1,7 GW, ou seja, 34% do total, conforme mostrado no gráfico acima. Segundo Taub (2006), o valor movimentado apenas referente ao ano de 2005 foi superior a US\$ 11 bilhões. Entretanto, esse crescimento ainda está muito relacionado com incentivos governamentais de países como o Japão e Alemanha, responsáveis por mais de 75% do potencial instalado mundial, como demonstrado no gráfico abaixo.

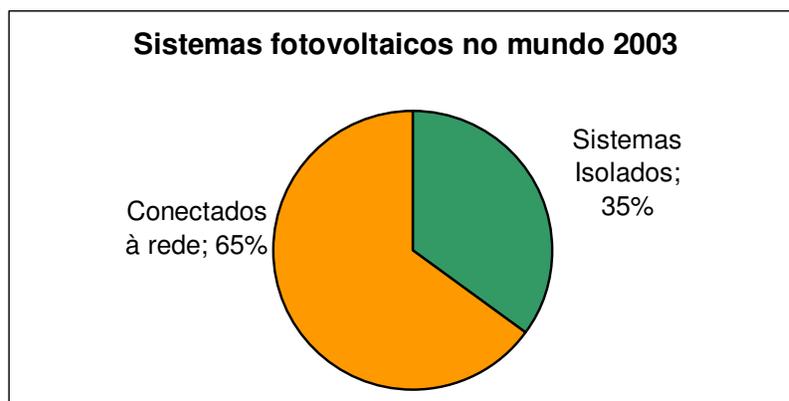
Gráfico 5 - Instalações de sistemas fotovoltaicos no mundo, 2005.



Fonte: Taub, 2006.

Outro fato fundamental sobre sistemas fotovoltaicos relaciona-se diretamente com o objetivo do presente trabalho de conclusão de curso. Seguidores solares, por ainda não serem utilizados em grande escala no mundo, geralmente não são indicados para uso em sistemas isolados, pois essas áreas muitas vezes são de difícil acesso e a opção por painéis fotovoltaicos relaciona-se diretamente com suas características de não possuir partes móveis, ser resistente e possuírem manutenção praticamente nula, benefícios que não seriam verdadeiros no caso de sistemas com seguidores solares, ainda mais num estágio inicial de desenvolvimento. Porém, a maioria dos sistemas utilizados no mundo está conectada à rede, de acordo com o gráfico a seguir.

Gráfico 6 - Aplicações de sistemas fotovoltaicos no mundo, 2003.



Fonte: Kyocera Solar (apud Baldini, 2005).

Essa tendência levou o Departamento Norte-Americano de Energia (*U. S. Department of Energy*, DOE) e o Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (*Electric Power Research Institute*, EPRI)⁸ a projetarem que o uso de energia solar fotovoltaica passará do nível atual de desenvolvimento a um nível no qual possuirá baixo custo e alta aplicabilidade nos mais diversos usos, incluindo grandes centrais produtoras de energia, após a metade do presente século. Mais recentemente, segundo Taub (2006), o DOE (Departamento de Energia dos Estados Unidos) requisitou investimentos na ordem de US\$ 148 milhões para o desenvolvimento de energia solar fotovoltaica, visando tornar esse tipo de energia competitiva economicamente, sem incentivos fiscais, até 2015.

3.1. Efeito fotovoltaico

O efeito fotovoltaico ocorre em materiais denominados semicondutores, que se caracterizam por apresentarem camadas de valência, onde é permitida a presença de elétrons, e outra camada totalmente “vazia”, denominada camada de condução.

⁸ 1997, DOE e EPRI.

O silício (Si), o segundo elemento mais abundante da face da Terra e muito importante para um grande número de indústrias, é o material mais utilizado para a fabricação de células fotovoltaicas, possuindo massa atômica de 28 u (unidade de massa atômica) e, portanto, 14 elétrons. De acordo com o diagrama de Linus Pauling, o Si possui quatro elétrons na camada de valência (elétrons de ligação), que se ligam aos átomos vizinhos, formando uma rede cristalina. No caso de ligação com átomos com cinco elétrons de ligação, haverá um elétron em excesso, que ficará fracamente ligado com seu átomo de origem e acabará se alocando na camada de condução. O fósforo (P), que possui massa atômica de 31u e 15 elétrons, é um exemplo desse tipo de átomo, denominado *dopante n*, por ser um doador de elétrons.

Caso o átomo de ligação possua apenas três elétrons de ligação, como é o caso do Boro (B), massa atômica de 11u e 5 elétrons, haverá a falta de um elétron para completar as ligações com os átomos de Si. Essa falta é denominada lacuna que, no caso de pouca energia térmica, pode ser preenchida por outro elétron vizinho, fazendo com que essa lacuna ou buraco se desloque. Denomina-se, portanto, o Boro com um aceitador de elétrons ou um *dopante p*.

A partir de silício puro, através da introdução de átomos de boro em uma metade e átomos de fósforo em outra, forma-se a junção pn, na qual elétrons livres do lado n são capturados por lacunas do lado p. Isso polariza a junção formando um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p. No equilíbrio, uma barreira então é formada impedindo a passagem de novos elétrons.

Quando a junção pn é exposta a fótons com energia maior que a diferença de energia existente, ocorre a geração dos pares elétrons-lacuna, que, em regiões onde o campo elétrico é diferente de zero, chega a acelerar as cargas, gerando assim uma corrente através dessa junção. Uma diferença de potencial é resultado deste deslocamento de cargas, ao qual chamamos de Efeito Fotovoltaico.

A conexão de extremidades opostas do silício através de um fio possibilita a circulação de elétrons, sendo esta a base de funcionamento das células fotovoltaicas. Na figura abaixo, pode-se observar o efeito fotovoltaico em uma célula de silício. A luz incide sobre a placa, fornecendo energia suficiente para que ocorra o efeito descrito acima.

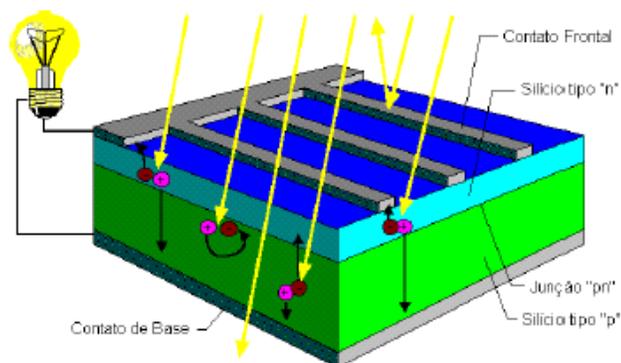
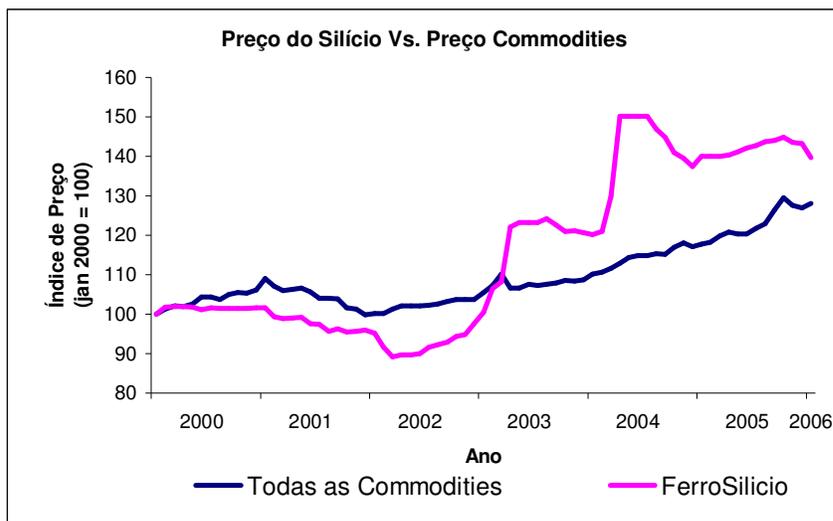


Figura 8 - Corte transversal de uma célula fotovoltaica.

3.2. Tipos de células

Como dito anteriormente, usualmente, as células fotovoltaicas são fabricadas de silício (Si). Elas podem ser construídas de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo. É importante citar que o silício, por possuir grande demanda pelas indústrias de painéis fotovoltaicos e semicondutores elétricos, está passando por uma fase de escassez na oferta de fornecedores, sendo um dos responsáveis por não deixar o preço dos painéis não caírem mais rapidamente (Taub, 2006). O gráfico a seguir mostra o aumento de preço do silício nos últimos anos, em comparação com todas as outras commodities.

Gráfico 7 - Preço do Ferro-Silício⁹ versus outras commodities.

Fonte: US Bureau of Labour Statistics. Disponível em < <http://www.bls.gov/> Acesso em 15 de junho de 2006.

Deve-se citar também que os elevados preços dos painéis são referentes muito mais a necessidade de um elevadíssimo grau de pureza do silício do que da falta de matéria prima, visto que o Si é o segundo elemento mais abundante da Terra.

Uma simples descrição das células mais comumente utilizadas está disponível abaixo, juntamente com uma breve discussão sobre as tecnologias emergentes.

3.2.1. Silício Monocristalino

São historicamente as células mais comercializadas e possuem um processo produtivo amplamente conhecido. A produção inicia-se com a extração do cristal do dióxido de silício, seguido da desoxidação deste material em granes fornos, além da purificação e solidificação. Consegue-se um grau de pureza na ordem de 98 a 99% com esse processo, que é razoavelmente eficiente do ponto de vista econômico e energético, porém, para o uso do silício como célula fotovoltaica, o grau de pureza necessário é da ordem de 99,9999%, ou

⁹ A porcentagem de silício no Ferro Silício varia entre 25 e 90%.

seja, impurezas na ordem de ppm, parte por milhão. O processo comumente utilizado é o Processo *Czochralski*.

Esse processo é utilizado para se obter monocristais de semicondutores, metais e sais, no qual silício é fundido com uma pequena quantidade de átomos dopantes (impurezas), normalmente o boro ou o fósforo, tornando o silício do tipo *n* ou *p*, importante para a modificação das características condutoras deste material, como visto no item anterior. Extrai-se o material fundido em um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Esse processo é feito com um rígido controle de temperatura, num ambiente com algum gás inerte, como o argônio, e numa câmara inerte, como a de quartzo. O cilindro obtido é normalmente cortado em fatias de aproximadamente 300 μm .

Após o corte, utilizam-se impurezas do tipo *n* ou *p*, sendo essas contrárias ao silício obtido, para obter a junção “pn”. O processo de difusão controlada é utilizado, no qual fatias de silício são expostas ao vapor, normalmente de fósforo, em temperaturas que variam entre 800 e 1000°C.

Vale ressaltar que, entre as células que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são as que apresentam as maiores eficiências, chegando a 28%, como visto na tabela 1, página 19, porém possuem alto custo de fabricação. Durante a fabricação, o corte é, normalmente, feito a partir de lingotes de silício, que não são cobrem completamente a célula solar quadrada, provocando um considerável desperdício.

3.2.2. Silício Policristalino

Essas células possuem um custo de fabricação menor do que as monocristalinas, porém possuem uma menor eficiência, na faixa dos 20%. O processo de fabricação é, na maioria dos casos, bem similar ao utilizado com o silício monocristalino, porém com menores níveis de

controles. O silício pode ser preparado a partir do corte de lingotes, de fitas ou depositado em filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. A preparação a partir de fitas é mais econômica do que tendo lingotes como base, gerando menos perdas de silício, mas sua eficiência acaba sendo prejudicada.

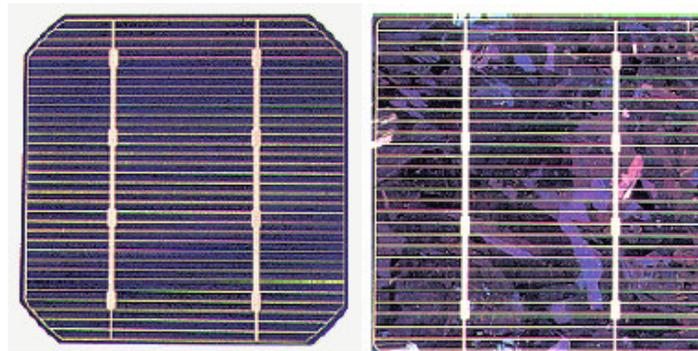


Figura 9 - Exemplo de painel fotovoltaico monocristalino (esquerda) e policristalino (direita).

3.2.3. Silício Amorfo

Essa forma difere-se das cristalinas por apresentar alto grau de desordem entre as estruturas dos átomos. A utilização do silício amorfo tem apresentado vantagens em relação ao custo e processo de fabricação, além de propriedades elétricas. Ele é mais eficiente na absorção do espectro visível da luz solar, porém menos em relação à absorção do espectro da parte infravermelha desta. Outras deficiências apresentadas são a baixa eficiência de conversão, se comparadas com formas cristalinas, e a degradação das células, que ocorre logo nos primeiros meses de utilização, reduzindo a eficiência ao longo da vida útil, algo que ocorre muito discretamente nas células cristalinas. Entretanto, algumas características como o simples e barato processo de fabricação, com baixo consumo de energia, além da possibilidade de fabricação de células com grandes áreas, fazem deste processo uma aposta para o futuro.

3.2.4. Tecnologias emergentes

Uma série de novas tecnologias está atualmente em fase inicial de comercialização e desenvolvimento, mas segundo Taub (2006) não deverão tornar-se competitivas nos próximos cinco anos, ou seja, até 2011.

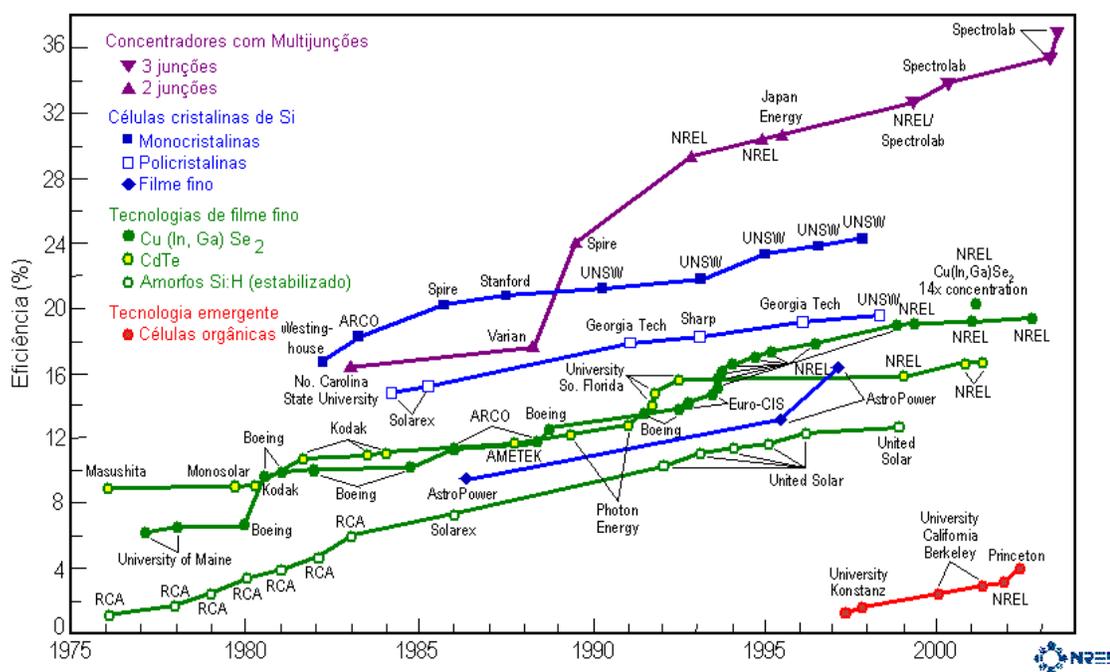
No entanto, essa busca por materiais alternativos é intensa e, atualmente, concentra-se principalmente na área de filmes finos, onde o silício amorfo se enquadra. Células de filmes finos, além de utilizarem menor quantidade de material do que as que apresentam estruturas cristalinas, requerem uma menor quantidade de energia no seu processo de fabricação. Algumas tecnologias existentes são:

- CIGS – apresentou eficiência máxima de 19.5% no ano de 2005, mas promete eficiência na ordem de 30% com o uso de lentes concentradoras de a luz solar incidente;
- CIS – eficiência atual em torno de 11%. Novas pesquisas estão sendo feitas para a redução do custo de fabricação;
- CdTe – apesar de ser tido como um bom absorvedor de energia solar é tido como um metal pesado e tóxico em alguns países, como nos Estados Unidos, diminuindo incentivos governamentais para o desenvolvimento;
- Células solares a partir de polímeros orgânicos – experimentos feitos têm apresentado baixa eficiência, embora possuam baixo custo de fabricação;
- GaGS – são conhecidas atualmente como as células solares mais eficientes, chegando à eficiência na ordem de 39%. Contudo, são também as mais caras.

Outra frente de pesquisa e desenvolvimento é o uso de concentrados solares fotovoltaicos, que, apesar do alto custo de fabricação e baixo nível de utilização atual, tem se mostrado uma das principais promessas de pesquisas científicas para o futuro.

O gráfico abaixo mostra a evolução de diferentes tecnologias em células fotovoltaicas, desde 1975, demonstrando mais uma vez o potencial dessa fonte de geração de energia no futuro.

Gráfico 8 - Evolução das diversas tecnologias de células solares.



A empresa Evident Technologies¹⁰ tem feito estudos na área da nanotecnologia e apresenta uma tecnologia em níveis iniciais de desenvolvimento que pode vir a tornar-se revolucionária na área de painéis fotovoltaicos, caso a premissa da utilização de nano processamento para a construção de células com tecnologia parecida com a dos filmes finos seja capaz de transformar tanto os espectros visíveis quanto os infravermelhos da radiação solar em energia elétrica. Porém, essa é uma tecnologia que não é citada em outras fontes

¹⁰ Maiores informações sobre a empresa podem ser encontradas acessando-se <<http://www.evidenttech.com/>>.

como promissora, estando apresentada aqui mais como uma curiosidade do que como uma tendência.

3.3. Utilizando a energia solar fotovoltaica

Existem três formas distintas de aproveitamento de sistemas fotovoltaicos: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede. Todas estas formas de aproveitamento possuem exemplos de utilização no Brasil, que serão vistas nos itens subseqüentes.

3.3.1. Sistemas isolados

Geração fotovoltaica em sistemas isolados da rede de distribuição é uma boa forma de geração de energia em pequenas comunidades isoladas, devido às características desse tipo de geração elétrica já discutida anteriormente. Normalmente esses sistemas são utilizados em quatro tipos de projetos:

- Bombeamento de água visando abastecimento doméstico, irrigação e/ou piscicultura;
- Iluminação pública;
- Sistemas de uso coletivo, tais como eletrificação em escolas, postos de saúde e/ou centros comunitários e
- Atendimento domiciliar.

Nota-se, que na maioria desses usos, existe algum tipo de armazenamento da energia, que pode ser feito através do uso de baterias ou simplesmente por armazenagem na forma de energia gravitacional, bombeando-se água para tanques de sistemas de abastecimento. Porém, alguns sistemas isolados não necessitam deste armazenamento, como é o caso de usos para a

irrigação, nos quais toda a água bombeada é diretamente utilizada. A figura abaixo demonstra possibilidades de sistemas fotovoltaicos em função da carga pretendida.

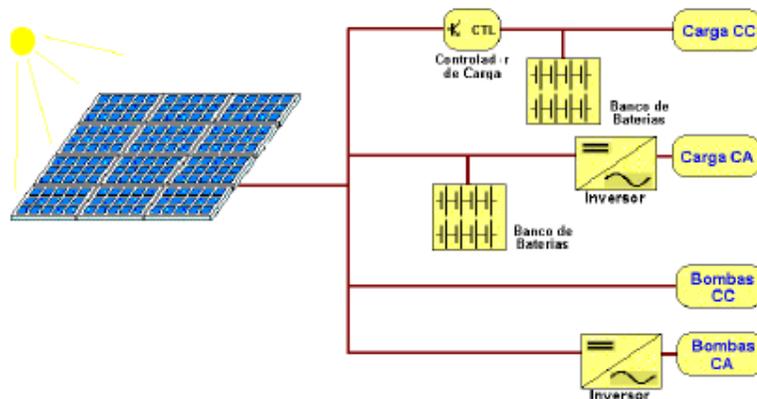


Figura 10 - Possibilidades de sistemas fotovoltaicos em função da carga pretendida.

Sistemas que necessitam de baterias visam o uso de aparelhos elétricos e lâmpadas, possuindo um dispositivo que controla a carga e descarga da bateria. O controlador de carga protege a bateria contra sobrecarga ou descarga profunda.

No caso de aparelhos maiores e/ou possuidores de corrente alternada, CA, o uso de um inversor torna-se indispensável. Este dispositivo, no geral, possui um seguidor de máxima potência necessário para a otimização da potência final produzida.

Devido às características geográficas do Brasil, existem muitos sistemas isolados em território nacional. Exemplos estão apresentados abaixo.



Figura 11 - Sistemas fotovoltaicos isolados da rede.

3.3.2. Sistemas híbridos

Os sistemas híbridos são também desconectados da rede de distribuição de energia, porém, além da energia solar fotovoltaica, possuem outras formas de geração de energia, como turbinas eólicas e geradores à óleo diesel ou combustível. Essa é uma forma muito interessante de utilização de maneira inteligente das potencialidades naturais regionais, mas possui certa complexidade do ponto de vista da otimização das diversas fontes utilizadas.

Esse tipo de sistema visa o atendimento a demandas de médio ou grande porte e, por trabalhar com corrente contínua, também necessita de um inversor. A elevada complexidade de arranjos e multiplicidade de opções, visando o aproveitamento regional ideal, faz com que sistemas híbridos necessitem de um estudo detalhado e particular para cada caso.



Figura 12 - Exemplo de sistema híbrido.

As figuras abaixo são de sistemas híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel do Grupo de Estudos de Desenvolvimento de Alternativas Energéticas (GEDAE), da Universidade Federal do Pará, UFPA.



Figura 13 - Exemplo de sistema híbridos PV, Eólico e Diesel, do GEDAE da UFPA.

3.3.3. Sistemas interligados à rede

Sistemas conectados à rede são muito comuns em países que apresentam incentivos à geração de energia com sistemas solares fotovoltaicos, não utilizando armazenamento de energia, pois essa é consumida instantaneamente ou entregue instantaneamente à rede - exclu-se, portanto, perdas decorrentes do armazenamento em baterias. Esses sistemas são uma fonte de geração auxiliar ao sistema elétrico no qual ele está conectado, podendo ser muito aproveitado num futuro próximo, devido, entre outros fatores, a possuir geração em horários de alta demanda de energia, durante o dia, diminuindo o consumo de pico.

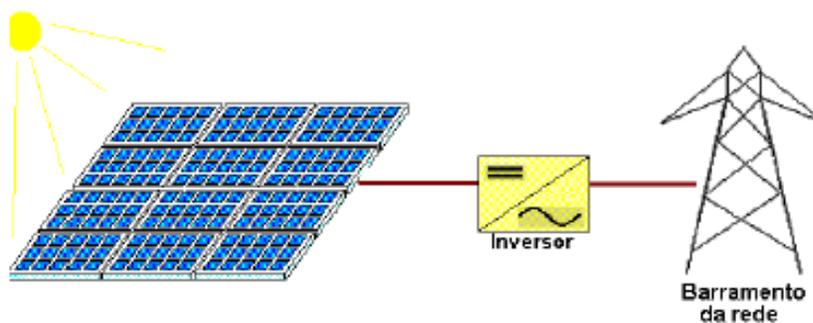


Figura 14 - Sistema conectado à rede.

No Brasil há sistemas conectados à rede, normalmente em universidades, laboratórios e instituições de pesquisa. Abaixo fotos de duas instalações desse tipo: uma instalação com 6,3

kWp, no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (IEE/USP), e outra com 4,8 kWp, no Laboratório de Energia Solar, UFRGS, em Porto Alegre.



Figura 15 - Exemplo de sistemas conectados à rede.

4. Análise de modelos de seguidores solares

Uma análise de diferentes modelos de seguidores solares é apresentada no presente tópico para obter-se uma estimativa da irradiação solar incidente em painéis fotovoltaicos com diferentes formas de movimento, além de painéis fixos, possibilitando assim uma comparação e determinação do ganho teórico da irradiação total incidente.

Para esse cálculo é necessária a utilização de modelos matemáticos que estimam a irradiação solar incidente em planos inclinados. Duffie (1991) cita três principais modelos que podem ser utilizados para essa estimativa, descritos sucintamente a seguir:

- Modelo do céu isotrópico - criado por Liu e Jordan em 1963, o modelo assume que a irradiação em superfícies inclinadas é composta de 3 componentes: direta (I_b), difusa isotrópica (I_d) e insolação solar refletida de forma difusa pelo solo. A soma dessas três componentes resulta na irradiação total incidente (I_T). Esse modelo é simples de ser aplicado, mas tende a subestimar I_T , pois ao considerar o céu isotrópico, não considera as parcelas difusas circunsolar e devida ao brilho do horizonte.
- Modelo do céu anisotrópico - Reindl et al (1990 apud Duffie, 1991) chamou esse modelo de “modelo HDKR”. O nome do modelo faz referência a Hay e Davies, Klucher e Reindl, que adicionaram ao modelo isotrópico o termo relativo a irradiação difusa circunsolar, além de um coeficiente anisotrópico, resultando num modelo que é considerado uma evolução do modelo isotrópico (Reindl et al. e outros *apud* Duffie, 1991).

- Modelo de Perez et al – Esse modelo será discutido posteriormente e leva em consideração os cinco termos referentes à irradiação solar: irradiação direta, isotrópica, difusa circunsolar, difusa do horizonte e refletida pelo solo.

Na utilização desses modelos necessita-se de dados referentes à irradiação global em plano horizontal (I) e irradiação extraterrestre em plano horizontal (I_0). Os dados utilizados foram extraídos de Rosa (2003) e estão explicitados na tabela abaixo.

Tabela 2 - Dados obtidos no LSF.

Mês	Irradiação extraterrestre em plano horizontal (H_0) [MJ/M ²]	Irradiação global em plano horizontal (H) [MJ/M ²]
Dezembro / 2001	42,34	17,93
Janeiro / 2002	39,92	16,38
Fevereiro / 2002	30,06	15,84
Março / 2002	22,39	11,48
Abril / 2002	27,65	14,00
Mai / 2002	38,34	17,53
Junho / 2002	42,73	18,58
Julho / 2002	35,78	11,48
Agosto / 2002	24,91	11,05
Setembro / 2002	23,40	13,82
Outubro / 2002	33,30	18,40
Novembro / 2002	41,51	18,65

Fonte: Rosa (2003).

Esses dados provêm de informações coletadas na estação solarimétrica do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, no IEE/USP, o mesmo local da utilização do potencial protótipo, escopo deste trabalho.

A partir dos dados diários médios apresentados acima, dados horários foram calculados para os três tipos de sistemas, nos dias médios mensais dos diferentes meses do ano.

Um esquema do sistema fixo está representado a seguir, utilizando valores de $\beta = 23,35^\circ$ (igual à latitude local) e $\gamma = 180^\circ$ (Norte) visando uma maior geração de energia ao longo do ano.

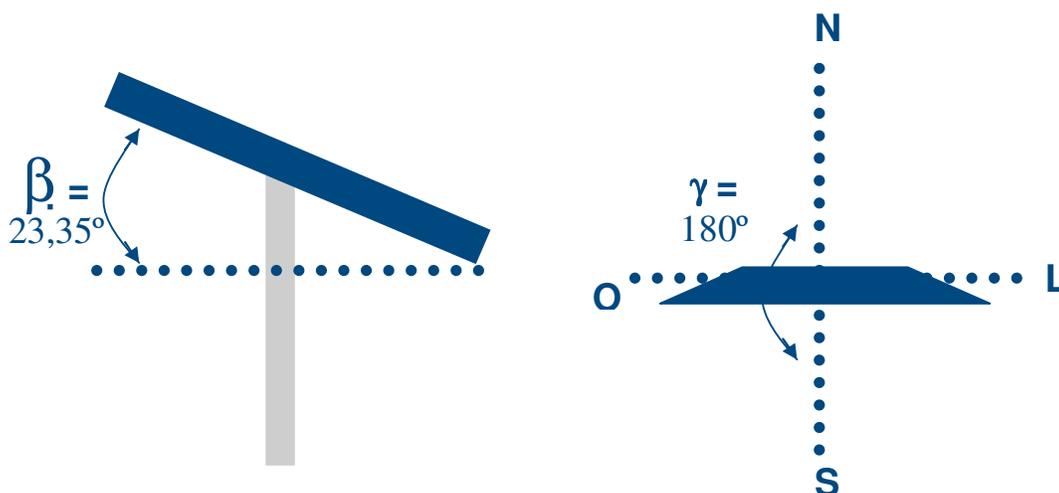


Figura 16 - Modelo de Sistema Fixo.

Na figura 27 está representado o sistema com 1 grau de liberdade, relativo ao ângulo azimutal (γ), que acompanha o ângulo solar azimutal (γ_s).

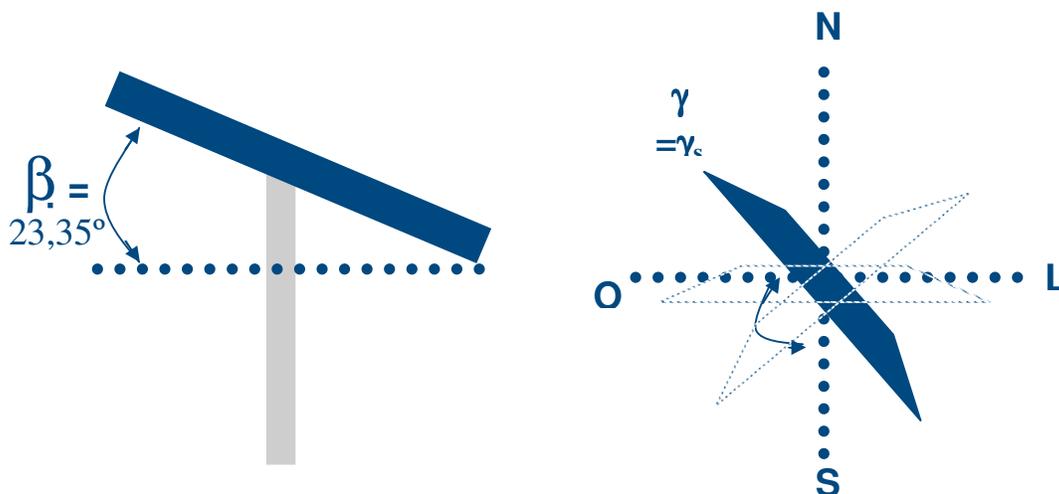


Figura 17 - Modelo com 1 eixo de movimento.

Já a figura 28 apresenta o sistema seguidor solar com dois eixos, movimentando-se em relação ao γ , que acompanha o γ_s , e ao ângulo de inclinação (β), que é numericamente igual ângulo zenital (θ_z).

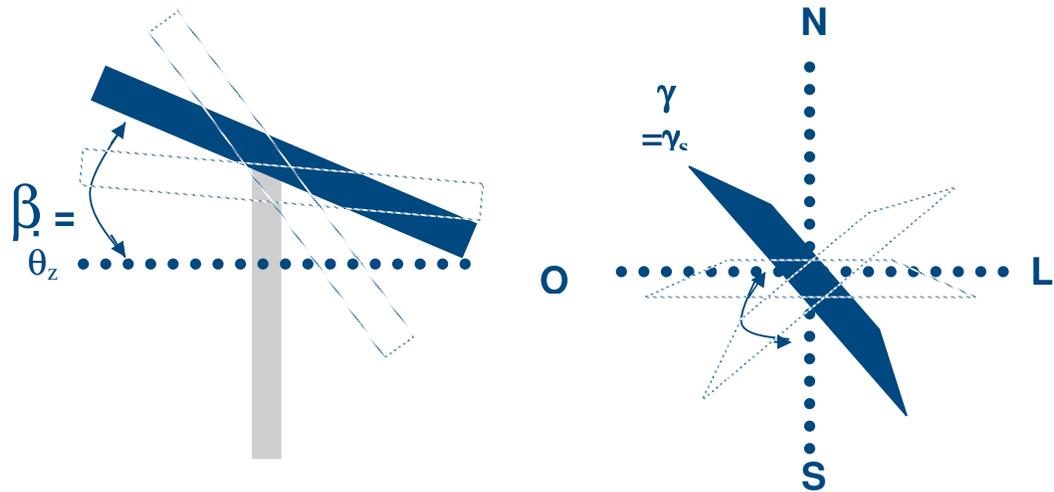


Figura 18 - Modelo com 2 eixos de movimento.

Os modelos isotrópicos, HDKL e Perez et al. foram aplicados aos três sistemas representados pelas figuras acima. Serão apresentados apenas os resultados obtidos com o modelo do Perez et al, por ser o escolhido na análise pretendida.

4.1. Descrição do modelo “Perez et al.”

Os dados necessários para a entrada são:

1. γ = azimutal =
 - a. = 180° para o sistema fixo
 - b. = γ_s para sistema seguidor de 1 eixo
 - c. = γ_s para sistema seguidor de 2 eixos
2. β = inclinação =

- a. = $23,35^\circ$ para sistema fixo
 - b. = $23,35^\circ$ para sistema seguidor de 1 eixo
 - c. = θ_z para sistema seguidor de dois eixos
3. Min – minuto intermediário da hora em relação ao meio dia solar
 4. n = dia médio do mês
 5. ϕ = latitude = $23,25^\circ$
 6. H = Irradiação global em plano horizontal
 7. H_o = Irradiação extraterrestre em plano horizontal
 8. ρ_g = refletância do solo
 9. w_s = ângulo de saída do Sol

Os valores de n e de w_s utilizados estão apresentados abaixo:

Tabela 3 - Ângulo de saída solar e n.

Mês	Ws – Ângulo de saída do Sol	n
Janeiro	99,50°	17
Fevereiro	95,70°	47
Março	91,04°	75
Abril	85,90°	105
Mai	81,55°	135
Junho	79,40°	162
Julho	80,37°	198
Agosto	84,07°	228
Setembro	89,04°	258
Outubro	94,19°	288
Novembro	98,51°	318
Dezembro	100,58°	344

Fonte: Rosa (2003) e Duffie (1991).

O ângulo hora solar (w) é calculado abaixo:

$$w = \frac{\min}{4}$$

Já o ângulo declinação (δ) é obtido assim:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$$

O cálculo do ângulo de incidência (θ) pode ser calculado através de

$$a \cos(\theta) = \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \cos(\beta) - \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(w) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(w) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(\gamma) \cdot \text{sen}(w)$$

O cálculo do ângulo zenital (θ_z) pode ser achado através de

$$a \cos(\theta_z) = \cos(\delta) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(w) + \text{sen}(\phi) \cdot \text{sen}(\delta)$$

A altitude solar (α) é calculada abaixo:

$$\alpha = 90 - \theta_z$$

O ângulo solar azimutal (γ_s) é calculado da seguinte forma:

$$\gamma_s = C_1 \cdot a \cos\left(\frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\phi) - \text{sen}(\delta)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\phi)}\right)$$

Sendo

$$C_1 = \begin{cases} 1 & \text{se } w \leq 0 \\ -1 & \text{se } w < 0 \end{cases}$$

O coeficiente r_t representa a taxa de horária em relação à irradiação diária média

$$r_t = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cdot \cos(w)) \cdot \frac{\cos(w) - \cos(w_s)}{\text{sen}(w_s) - \frac{\pi \cdot w_s}{180} \cdot \cos(w_s)}$$

Sendo os coeficientes a e b

$$a = 0,409 + 0,5016 \cdot \text{sen}(w_s - 60)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \cdot \text{sen}(w_s - 60)$$

A obtenção da irradiação horária extraterrestre e global em um plano horizontal é apresentada abaixo, respectivamente:

$$I_o = r_t \cdot H_o$$

$$I = r_t \cdot H$$

O índice k_T é definido abaixo:

$$k_T = \frac{I}{I_o}$$

A correlação de Erbs é:

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,09k_T & \text{para } k_T \leq 0,22 \\ 0,9511 - 0,1604 k_T + 4,388k_T^2 - 16,638 k_T^3 + 12,336 k_T^4 & \text{para } 0,22 < k_T \leq 0,8 \\ 0,165 & \text{para } k_T > 0,8 \end{cases}$$

Utilizando-se essa correlação, obtém-se a irradiação difusa e direta:

$$I_d = I \cdot Erbs$$

$$I_b = I \cdot (1 - Erbs)$$

O fator geométrico (R_b) é dado por:

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}$$

Os coeficientes a_1 e a_2 são termos relativos ao ângulo de incidência do cone de circunsolar radiação na superfície inclinada e horizontal, respectivamente.

$$a_1 = \max[0, \cos(\theta)]$$

$$b_1 = \max[\cos 85, \cos(\theta_z)]$$

Os coeficientes de brilho circunsolar (F_1) e em relação ao horizonte (F_2) são funções de três parâmetros que descrevem as condições do céu: o ângulo zenital (θ_z), a claridade (ε) e o brilho (Δ). ε é calculado da seguinte forma:

$$\varepsilon = \frac{\frac{I_d + I_n}{I_d} + 5,535 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_z^3}{1 + 5,535 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_z^3}$$

Sendo

$$I_n = \frac{I_b}{\cos(\theta_z)}$$

Com θ_z em graus.

$$\Delta = m \cdot \frac{I_d}{I_{on}}$$

Sendo:

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

$$I_{on} = I_{sc} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right)$$

Os coeficientes de brilho são conhecidos como F_1 e F_2 , sendo calculados da seguinte forma:

$$F_1 = \max\left[0, \left(f_{11} + f_{12} \cdot \Delta + \frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \cdot f_{13}\right)\right]$$

$$F_2 = f_{21} + f_{22} \cdot \Delta + \frac{\pi \cdot \theta_z}{180} \cdot f_{23}$$

Sendo os valores de f retirados da tabela abaixo.

Tabela 4 - Coeficientes de brilho segundo Perez et al.

Varição de ϵ	f_{11}	f_{12}	f_{13}	f_{21}	f_{22}	f_{23}
0,000 - 1,065	-0,196	1,084	-0,006	-0,114	0,180	-0,019
1,065 - 1,230	0,236	0,519	-0,180	-0,011	0,020	-0,038
1,230 - 1,500	0,454	0,321	-0,255	0,072	-0,098	-0,046
1,500 - 1,950	0,866	-0,381	-0,375	0,203	-0,403	-0,049
1,950 - 2,800	1,026	-0,711	-0,426	0,273	-0,602	-0,061
2,800 - 4,500	0,978	-0,986	-0,35	0,28	-0,915	-0,024
4,500 - 6,200	0,748	-0,913	-0,236	0,173	-1,045	0,065
6,200 - maior	0,318	-0,757	0,103	0,062	-1,698	0,236

Por fim, a irradiação total durante a hora analisada é:

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot (1 - F_1) \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2}\right) + I_d \cdot F_1 \cdot \frac{a_1}{b_1} + I_d \cdot F_2 \cdot \text{sen}(\beta) + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2}\right)$$

4.2. Resultados obtidos com o modelo “Perez et al.”

O primeiro resultado importante é a comparação da radiação total diária nos dias médios de cada mês para o sistema fixo, seguidor com 1 eixo, seguidor com 2 eixos e do protótipo criado¹¹. Abaixo estão os gráficos obtidos para os diferentes meses nos quais o modelo foi aplicado.

Gráfico 9 - Comparação da radiação durante o mês de janeiro.

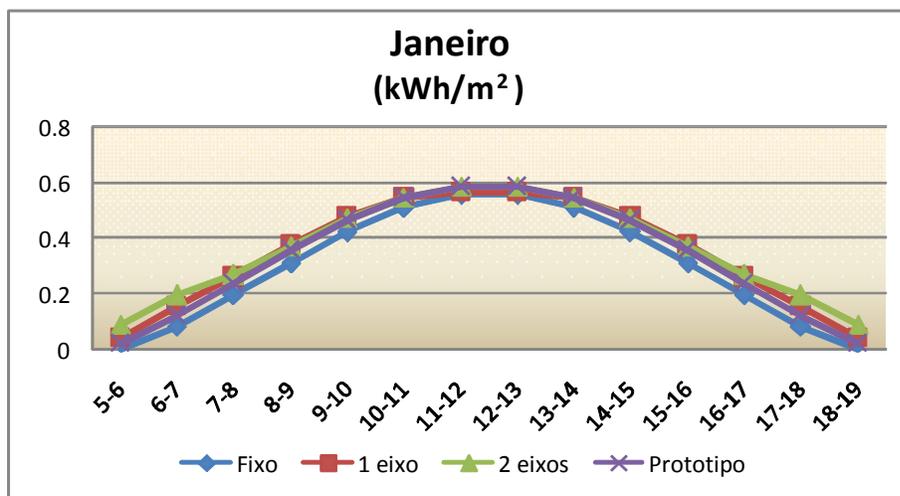
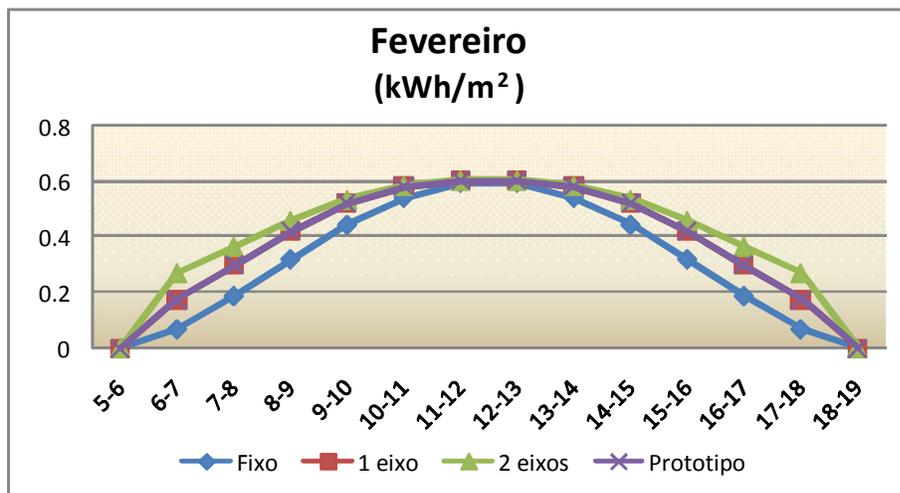


Gráfico 10 - Comparação da irradiação durante o mês de fevereiro.



¹¹ Para detalhes sobre o protótipo ver capítulo 5.

Gráfico 11 - Comparação da irradiação durante o mês de março.

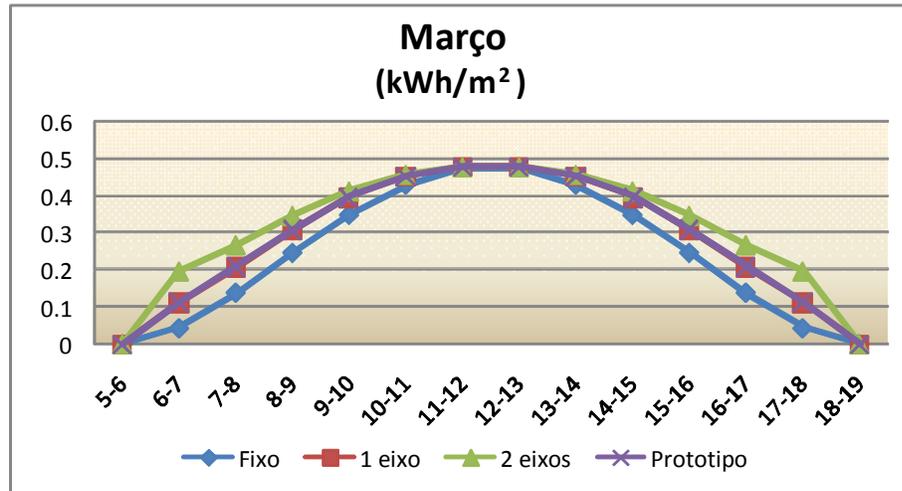


Gráfico 12 - Comparação da irradiação durante o mês de abril.

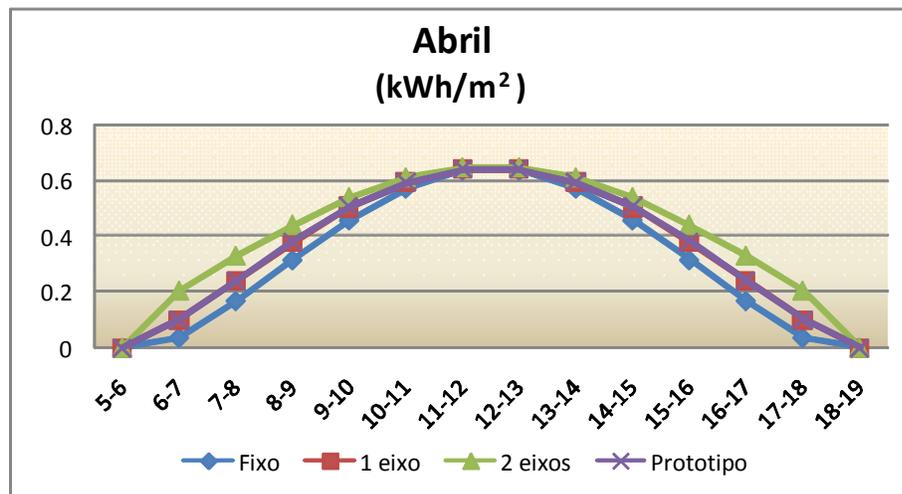


Gráfico 13 - Comparação da irradiação durante o mês de maio.

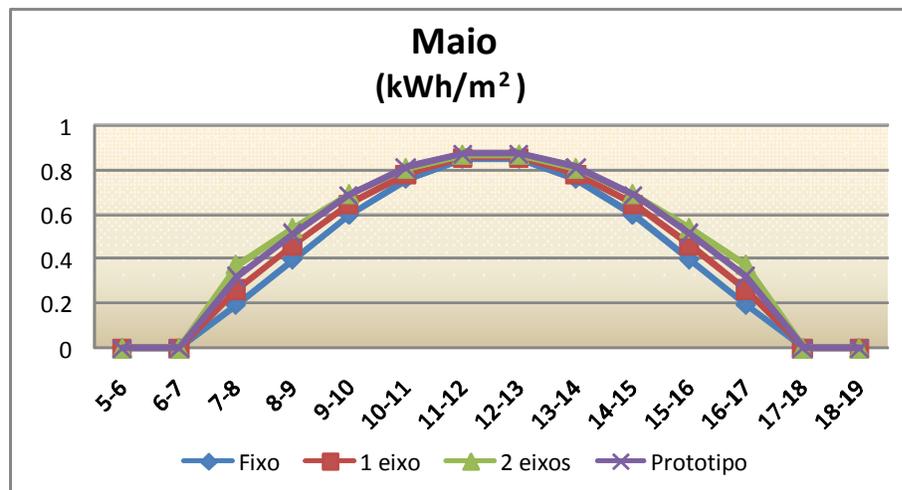


Gráfico 14 - Comparação da irradiação durante o mês de junho.

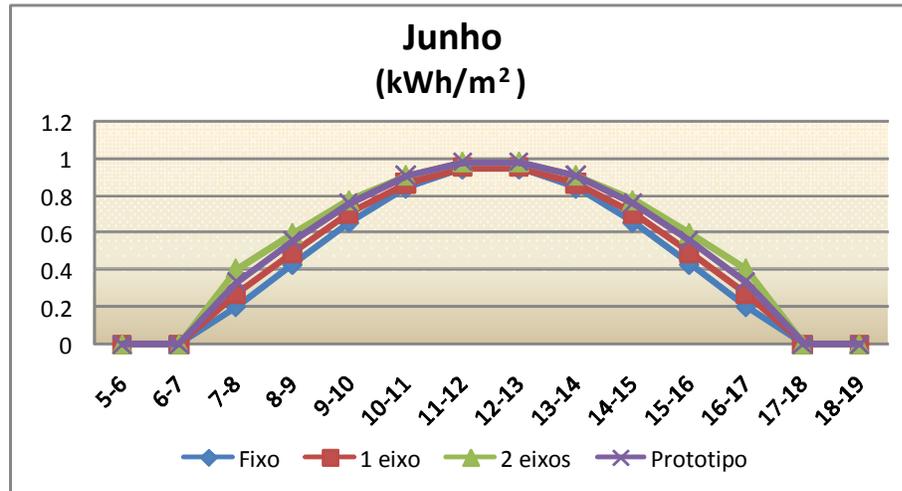


Gráfico 15 - Comparação da irradiação durante o mês de julho.

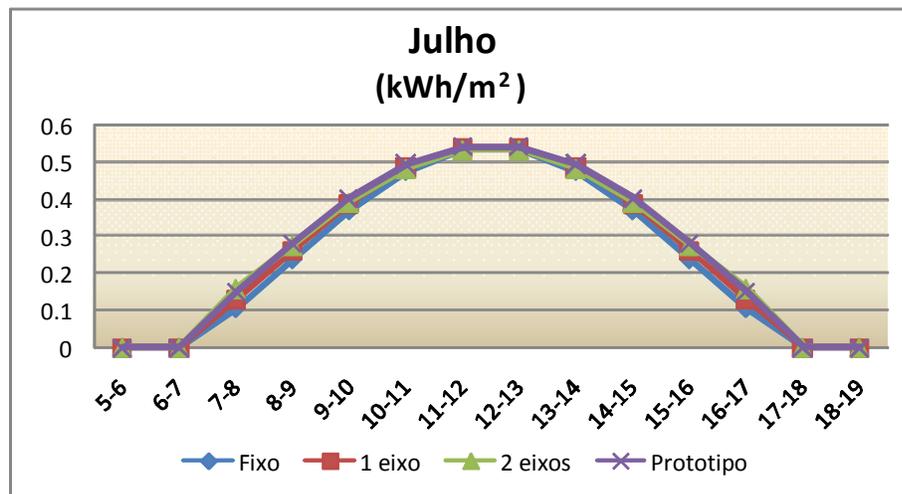


Gráfico 16 - Comparação da irradiação durante o mês de agosto.

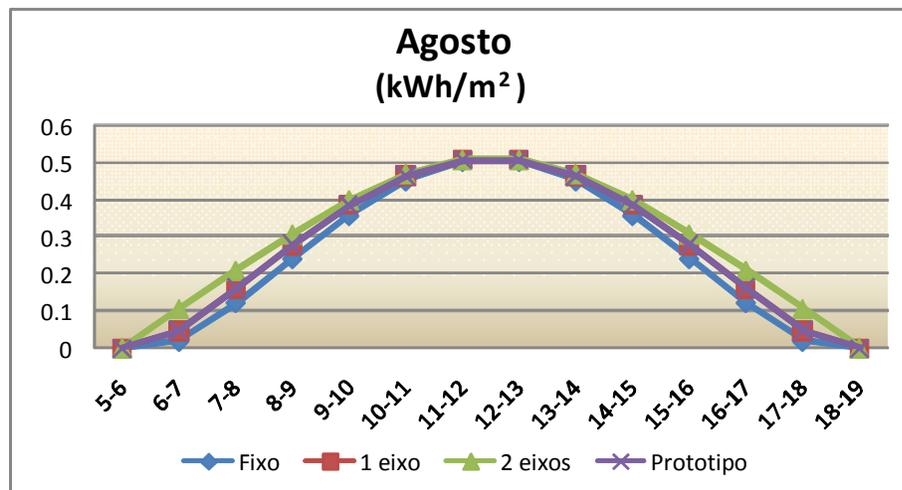


Gráfico 17 - Comparação da irradiação durante o mês de setembro.

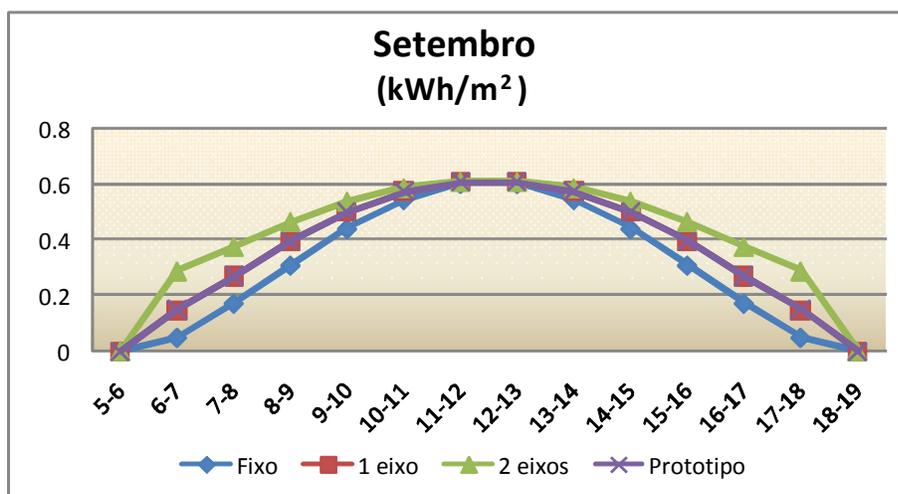


Gráfico 18 - Comparação da irradiação durante o mês de outubro.

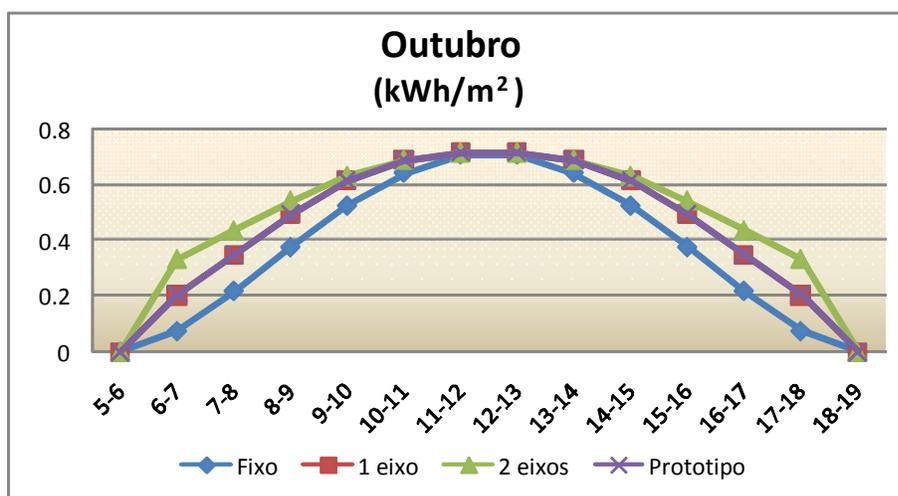


Gráfico 19 - Comparação da irradiação durante o mês de novembro.

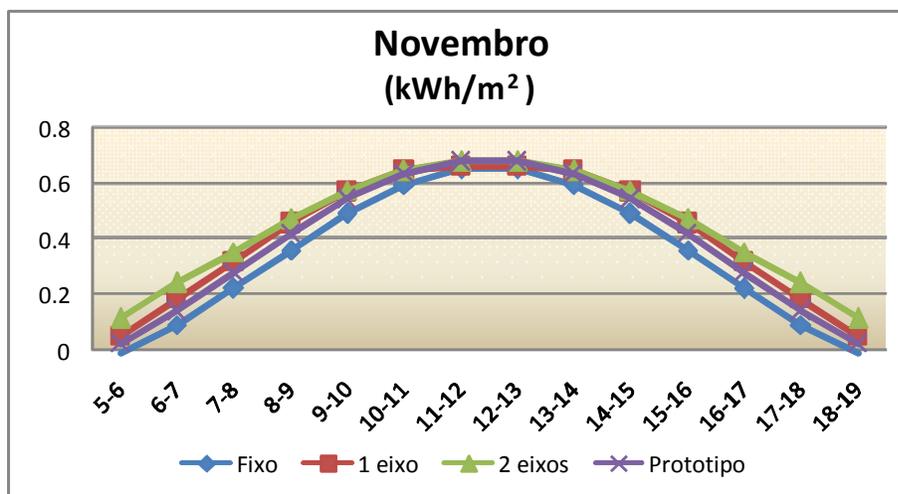
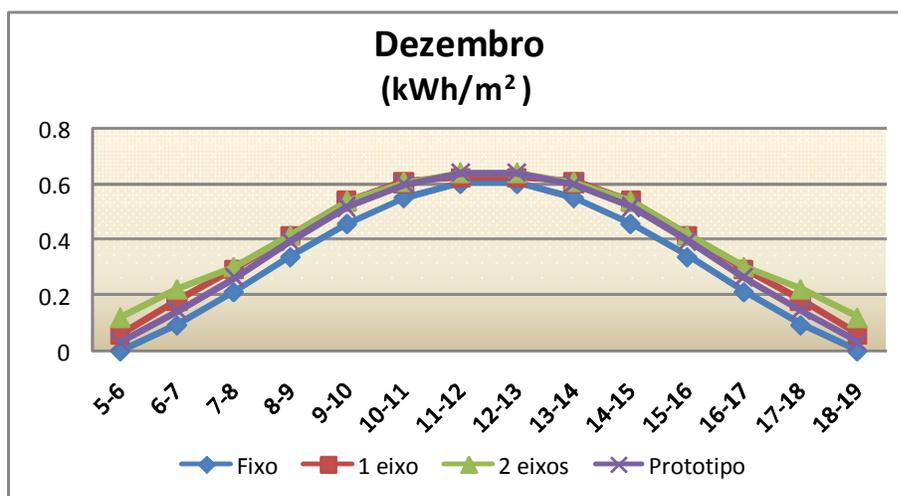


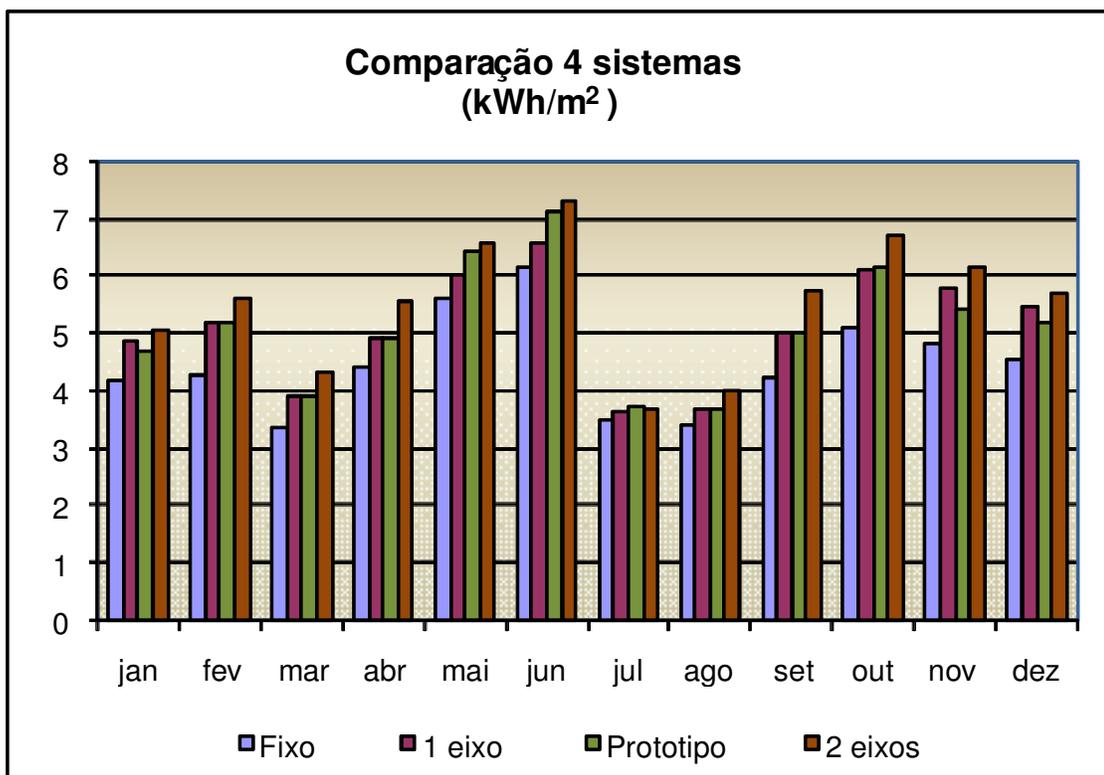
Gráfico 20 - Comparação da irradiação durante o mês de dezembro.



A análise dos gráficos apresentados mostrou que o comportamento das curvas obtidas está de acordo com a esperada, com ganhos maiores no seguidor de 2 eixos, porém esperava-se um ganho maior nas horas próximas do meio-dia solar.

Para possibilitar uma análise do ano como um todo, o gráfico abaixo foi elaborado com a radiação incidente por dia médio nos diferentes meses do ano.

Gráfico 21 - Comparação da irradiação diária nos meses do ano.



O gráfico nos possibilita enxergar o ganho na irradiação incidente para seguidores solares de 1 ou 2 eixos e do protótipo em comparação com sistemas fixos.

A tabela abaixo mostra os valores numéricos obtidos que serviram de base para a elaboração do gráfico acima.

Tabela 5 - Valores obtidos ao aplicar o modelo de Perez et al.

	Fixo	1 Eixo	1Eixo/ Fixo	2 eixos	2eixos/ Fixo	2eixos/ 1eixo	Protót ipo	Prot/ Fixo	Prot/ 1 eixo	Prot/ 2 eixos
<i>jan</i>	4.18	4.87	16.6%	5.08	21,6%	4,3%	4.70	12.5%	-3.6%	-7.5%
<i>fev</i>	4.29	5.20	21.1%	5.63	37,7%	13,7%	5.20	21.1%	0.1%	-7.6%
<i>mar</i>	3.37	3.92	16.6%	4.33	34,0%	15,0%	3.93	16.7%	0.1%	-9.3%
<i>abr</i>	4.39	4.93	12.3%	5.56	31,5%	17,1%	4.94	12.4%	0.1%	-11.2%
<i>mai</i>	5.62	6.02	7.1%	6.59	21,6%	14,1%	6.43	14.4%	6.8%	-2.3%
<i>jun</i>	6.17	6.57	6.6%	7.33	21,1%	13,7%	7.11	15.3%	8.2%	-3.0%
<i>jul</i>	3.47	3.62	4.3%	3.68	6,4%	2,0%	3.73	7.3%	2.9%	1.2%
<i>ago</i>	3.39	3.69	8.6%	4.00	20,6%	11,1%	3.69	8.7%	0.1%	-7.8%
<i>set</i>	4.25	5.01	17.9%	5.75	43,2%	21,4%	5.02	18.1%	0.1%	-12.7%
<i>out</i>	5.09	6.14	20.6%	6.72	39,3%	15,5%	6.14	20.7%	0.1%	-8.6%
<i>nov</i>	4.82	5.78	19.9%	6.15	27,7%	6,5%	5.43	12.7%	-6.0%	-11.8%
<i>dez</i>	4.54	5.45	20.0%	5.72	25,8%	4,8%	5.19	14.2%	-4.8%	-9.2%
Total	53.59	61.21	14.2%	66.53	27,7%	11,8%	61.50	14.8%	0.5%	-7.6%

A tabela 5 nos traz dados interessantes. Pode-se observar que o ganho na irradiação total incidente de um sistema seguidor solar com 2 eixos foi de 27,7% se comparado com o mesmo sistema fixo, um valor considerável. Porém, esses valores estão abaixo da maioria de dados obtidos na literatura. Essa variação pode ser explicada, pois os dados existentes na literatura referem-se a sistemas fotovoltaicos reais, diferentes dos cálculos teóricos aqui apresentados.

Outro ponto que pode ter colaborado para a obtenção de um valor um pouco abaixo das expectativas é o período utilizado nas análises, que foi horário. Caso esse período fosse diminuído para minutos, a tendência é de que essa diferença de irradiação aumentasse. Essas limitações podem explicar alguns valores encontrados nos cálculos em relação ao protótipo que, nos meses de novembro, dezembro e janeiro, não foram condizentes com o esperado.

Entretanto, os valores obtidos já demonstram a relevância e importância de mecanismos seguidores solares.

5. Elaboração do protótipo

Um protótipo foi criado para obterem-se dados experimentais que possibilitem a comparação com os dados obtidos numericamente através dos modelos encontrados na literatura.

O sistema físico possibilita o movimento em relação ao dia e noite (eixo leste-oeste) através de um sistema eletro-mecânico, automático, e em relação às diferentes estações do ano (eixo norte-sul) apenas por um sistema mecânico, manual.

Os itens subseqüentes discorrem sobre pontos específicos, deixando claro o dimensionamento mecânico do protótipo, processo de montagem do sistema eletrônico e escolhas feitas, além de apresentar o programa desenvolvido, montagem do circuito impresso e resultado final.

5.1. Dimensionamento mecânico

Os itens a seguir descrevem o dimensionamento mecânico do protótipo. É importante salientar que economia financeira, de material e peso não foram fatores determinantes nos cálculos, pois tratar-se de um protótipo, que visa à execução das funções principais e robustez, não necessariamente buscando uma eficiência operacional e construtiva.

Todos os desenhos de fabricação estão disponibilizados no anexo 2.

5.1.1. Potência do motor

Inicia-se o dimensionamento mecânico escolhendo a potência necessária do motor de passo, levando-se em conta as forças, torques, potências e rendimentos envolvidos.

Determina-se o torque através do momento de inércia e aceleração angular, considerando o disco como uniforme e o restante dos componentes (motor, placa solar e estrutura de sustentação da placa solar) como sendo um arco de raio interno igual a 11 cm e externo a 16 cm.

$$I_{Total} = I_{Disco} + I_{Anel} + I_{Rolamento}$$

Sendo:

$$I_{Disco} = \frac{1}{2} \cdot M_{Disco} \cdot (Rd_{Interno}^2 + Rd_{Externo}^2)$$

$$I_{Anel} = \frac{1}{2} \cdot M_{Anel} \cdot (Ra_{Interno}^2 + Ra_{Externo}^2)$$

$$I_{Rolamento} = \frac{1}{2} \cdot M_{Rolamento} \cdot (Rr_{Interno}^2 + Rr_{Externo}^2)$$

Substituindo os valores com $M_{Disco} = 2$ kg, $Rd_{Interno} = 5$ cm, $Rd_{Externo} = 25$ cm, $M_{Anel} = 3$ kg, $Ra_{Interno} = 11$ cm, $Ra_{Externo} = 16$ cm, $M_{Rolamento} = 1,8$ kg, $Rr_{Interno} = 3,5$ cm, $Rr_{Externo} = 5$ cm, chega-se a:

$$I_{Total} = I_{Disco} + I_{Anel} + I_{Rolamento} = 0,1249025 \text{ kgm}^2.$$

Sendo a aceleração angular dada por:

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{v_{final} - v_{inicial}}{\Delta t} = \frac{2 \cdot \pi \cdot rad}{1s} = 0,5108 \cdot \frac{rad}{s^2}$$

Chega-se ao torque total necessário ao sistema.

$$T = I_{Total} \cdot a = 0,0638 \text{ Nm}.$$

Devido ao par de engrenagens, o torque necessário ao motor pode ser achado

$$\frac{T}{R_{Engrenagem}} = \frac{T_{motor}}{R_{pinhão}} \rightarrow T_{motor} = \frac{T \cdot R_{pinhão}}{R_{Engrenagem}} = \frac{T}{6} = 0,01063N \cdot m$$

E, portanto chega-se à força e respectiva potência necessária do motor. Para o cálculo da potência, utilizou-se como premissa o rendimento para o par de engrenagens ($\eta_e = 0,99$), rolamento ($\eta_r = 0,995$) e um fator de segurança ($CS = 5$), conservador.

$$F_{Motor} = \frac{T_{Motor}}{R_{Pinhão}} = 0,5315 \rightarrow P_{Motor} = \frac{F_{Motor} \cdot V_{Motor}}{\eta_e \cdot \eta_r} \cdot CS = \frac{0,5315 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,02}{12,3}}{0,99 \cdot 0,995} \cdot 5 = 0,0275626W$$

Os cálculos foram feitos para se obter uma configuração mínima para o motor de passo a ser utilizado, pois não há uma ampla oferta deste item no mercado. O motor de passo escolhido foi Modelo LMC705¹², da Tekkno Mecatrônica, que pode fornecer até 0,415W de potência, satisfazendo as condições do projeto.

5.1.2. Dimensionamento da engrenagem

5.1.2.1. Relação de Transmissão

Determinou-se a relação de transmissão em 6 vezes ($i=6$), levando em consideração uma relação aconselhável entre um par de engrenagens e a possibilidade de obter-se uma boa precisão com o uso apenas da polia e de uma engrenagem.

O motor demora 12,3s para completar uma volta completa, portanto temos a velocidade do motor abaixo:

$$v_{motor} = \frac{2 \cdot \pi \cdot rad}{12,3 \cdot s} = 0,5108281 \cdot rad / s$$

Resultando na velocidade de rotação

$$v_{rotacao} = \frac{v_{motor}}{i} = \frac{0,5108281}{6} rad / s = 0,0851 rad / s$$

¹² As características do motor são apresentadas no Anexo I – Datasheet do motor de passo.

Os cálculos do par pinhão-engrenagem são apresentados a seguir:

$$Z_{\text{pinhão}} = 26 \text{ dentes}$$

$$m_{\text{pinhão}} = 1,5 \text{ mm} \therefore d_{\text{pinhão}} = 39 \text{ mm}$$

$$\text{Como } i = 6, \text{ temos que } Z_{\text{coroa}} = 6 \cdot Z_{\text{pinhão}} = 234 \text{ dentes} \therefore d_{\text{coroa}} = 351 \text{ mm.}$$

Chega-se a distância entre centros de 195 mm.

5.1.2.2. Largura das engrenagens

O dimensionamento aqui descrito é referente ao sugerido pela norma AGMA e extraído de Shigley (1984). Primeiramente é necessário calcular a tensão atuante nos dentes de cada engrenagem e então compará-la com a tensão admissível.

A norma sugere que dois critérios de resistência sejam atendidos para garantir o funcionamento adequado de cada engrenagem. Esses critérios são apresentados e aplicados a seguir, verificando a resistência do dente com relação à flexão máxima e à fadiga de contato.

O material escolhido foi o poliacetal que possui características de dureza compatíveis (Rockwell R 120) com o esforço necessário e não absorve umidade, como o nylon, permitindo uma maior durabilidade e precisão uma vez que o protótipo ficará exposto ao tempo.

Tensão de flexão

A tensão atuante que se refere à flexão máxima no dente pode ser calculada pela equação abaixo.

$$\sigma = \frac{W_t * k_a * k_s * k_m}{K_v * F * m * J}$$

Onde: W_t – Força tangencial; k_a – fator de aplicação; k_s – fator de tamanho; k_m – fator de distribuição de carga; K_v – fator dinâmico; F – largura do dente; m – módulo; J – fator geométrico.

A força tangencial é obtida a partir do torque motor e a redução até a peça considerada, conforme equação.

$$W_t = \frac{T * i}{r_e}$$

Onde: T – torque; i – redução; r_e – raio da engrenagem.

O fator de aplicação (k_a) relaciona a intensidade da força tangencial calculada e a que realmente irá atuar, sendo que ele deve ser aumentado assim que as condições de solicitação se tornem mais críticas, ou seja, excedam o nominal.

O fator de tamanho (k_s) está relacionado com o quanto as propriedades do material influem na tolerância dimensional da peça. Peças de metal tornam esse fator unitário.

O fator de distribuição de carga (k_m) é determinado pela acurácia necessária no desenvolvimento do projeto, dependendo também da largura do dente, sendo obtido na tabela abaixo.

Tabela 6 - Fator de distribuição de carga.

Características do apoio	Largura do Denteado (mm)			
	0 a 50	152	228	406 ou maior
Montagem precisa, peq folga, deflexão mínima, engr de precisão	1,3	1,4	1,5	1,8
Montagem menos rígidas, engr menos precisas, contato em toda largura denteado	1,6	1,7	1,8	2,2
Montagem e precisão tais q contato não ocorre em toda a largura do dentado	-	Maior q 2,2	Maior q 2,2	-

Por sua vez, o fator dinâmico (K_v) é o responsável por manter sob controle o desbalanceamento das engrenagens e o desalinhamento dos eixos, assim como o desgaste, a deformação permanente e a deflexão dos dentes. Ele pode ser obtido através das equações abaixo.

$$K_v = \left[\frac{A}{A + (200 * v)^{\frac{1}{2}}} \right]^B$$

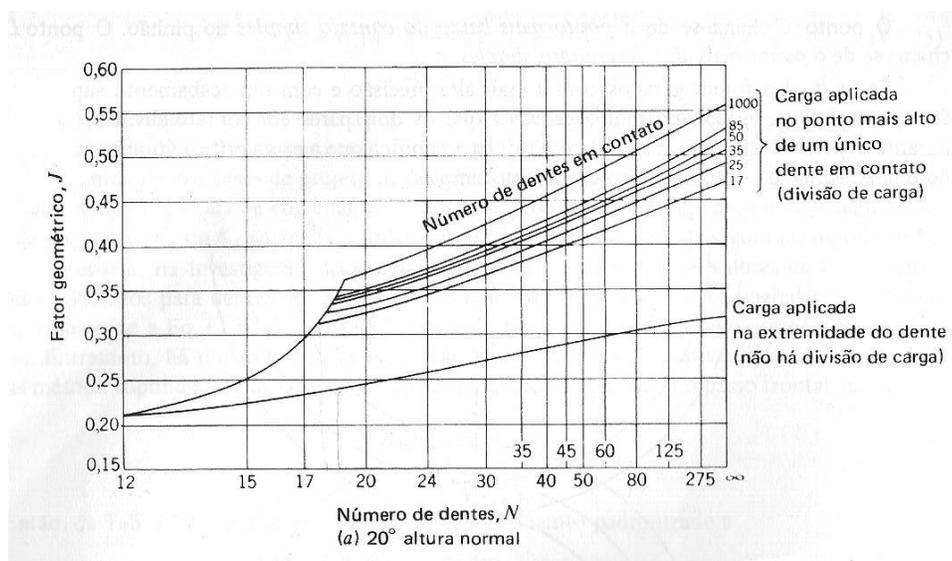
$$A = 50 + 56 * (1 - B)$$

$$B = \frac{(12 - Q_v)^2}{4}$$

Onde: Q_v – índice de qualidade do engrenamento; v – velocidade da engrenagem; A e B são constantes.

O fator geométrico (J) pode ser retirado do gráfico abaixo e depende apenas do tipo de engrenagem e número de dentes.

Gráfico 22 - Fator Geométrico (J).



Extraído de Shigley (1984).

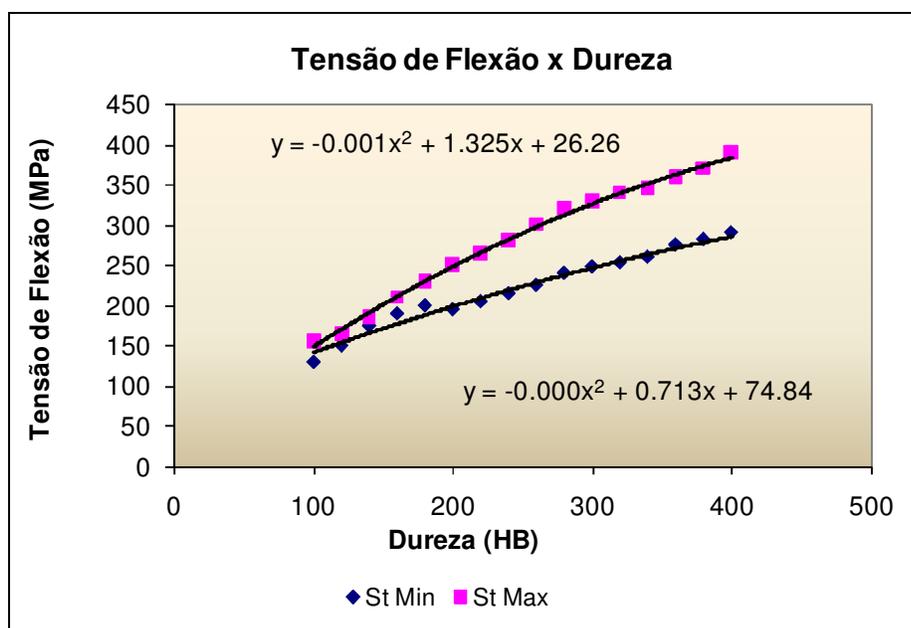
Depois de calculado, é necessário impor que essa tensão seja menor ou igual à tensão admissível, dada pela equação abaixo.

$$\sigma_{adm} = \frac{S_t * k_t}{k_t * k_r * k_f}$$

Onde: σ_{adm} - tensão admissível; S_t – tensão de flexão do material; k_t – fator de vida; k_r – fator de temperatura; k_f – fator de confiabilidade.

A tensão de flexão do material é variável com a dureza e pode ser retirada das curvas de valor máximo e mínimo do gráfico abaixo.

Gráfico 23 - Tensão de Flexão VS Dureza.



O fator de vida (k_t) e fator de confiabilidade (k_r) depende, respectivamente, do número de ciclos da engrenagem e confiabilidade e são retirados da tabela abaixo.

Tabela 7 - Fatores de Modificação de Vida e Confiabilidade.

Ciclos de Vida	Fator de vida k_1	Confiabilidade R	Fator de Confiabilidade k_r
10^4	1,5	Até 0,99	0,80
10^5	1,3	0,99 a 0,999	1,00
10^6	1,1	0,999	1,25
10^8 em diante	1,0		

Fonte: Shigley, 1984.

O fator de temperatura (k_t) pode ser considerado unitário uma vez que a temperatura de trabalho é inferior a 70°C.

A tabela abaixo apresenta as contas para a determinação da largura do pinhão pelo critério da tensão de flexão, sabendo que a flexão do material é variável com a dureza e pode ser retirada das curvas de valor máximo e mínimo, apresentadas na seqüência.

Tabela 8 - Tensão de flexão para o pinhão.

Cálculo da Força Tangencial Máxima		Cálculo da Largura do Dente	
Potência (W)	0.0276	Largura (mm)	0.041
rotação do motor (rpm)	4.8780	Ka (fator de aplicação)	1.00
redução da coroa	1.00	Kv (fator dinâmico)	0.95
rotação no pinhão (rpm)	4.88	Ks (fator de tamanho)	1.00
rotação no pinhão (rad/s)	0.51	Km (fator de distribuição de carga)	1.60
velocidade (m/s)	0.02	J (fator geométrico)	0.22
Força Tangencial Máxima (N)	1.38	módulo (m)	0.003
Cálculo Da Tensão Admissível		Força Tangencial (N)	1.38
Tensão Admissível (Pa)	8.07E+07	Tensão Admissível (Pa)	8.07E+07
Kl (fator de vida em ciclos)	1.00		
Kt (fator de temperatura)	1.00		
Kr (Fator de confiabilidade)	1		
Dureza (HB)	30		
St máximo (MPa)	65.11		
St mínimo (MPa)	96.23		
St tensão de flexão - médio (Pa)	8.07E+07		
Fator Dinâmico			
Qv	3		
B	1.08		
A	45.43		
velocidade (m/s)	0.02		
Kv	0.95		
Cálculo do Módulo			
dp (mm)	78		
Z (nº de dentes)	26		
m - módulo (mm)	3		

Tensão de contato

Por sua vez, a tensão de contato está relacionada à fadiga do contato entre os dentes em engrenamento e pode ser encontrada pela relação:

$$\sigma_c = C_p * \left(\frac{W_t * k_a * k_s * k_m * C_f}{K_v * F * d * I} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Onde: σ_c - tensão de contato de fadiga; C_p - coeficiente elástico; C_f - fator de condição superficial; I - fator geométrico.

O coeficiente elástico está relacionado à rigidez e à elasticidade do material a ser utilizado na confecção das engrenagens, sendo calculado por:

$$C_p = \left[\frac{1}{\pi * \left(\frac{1 - \nu_p^2}{E_p} + \frac{1 - \nu_c^2}{E_c} \right)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Onde: C_p - coeficiente elástico; E - módulo de elasticidade longitudinal; ν - coeficiente de Poisson.

O fator de condição superficial (C_f) é unitário. A AGMA sugere que seja maior que a unidade quando defeitos forem visíveis na superfície.

Por fim, há ainda o fator geométrico (I) que é obtido abaixo.

$$I = \frac{\cos \phi * \sin \phi}{2} * \frac{i}{i + 1}$$

Onde: ϕ - ângulo de pressão; i - relação de transmissão.

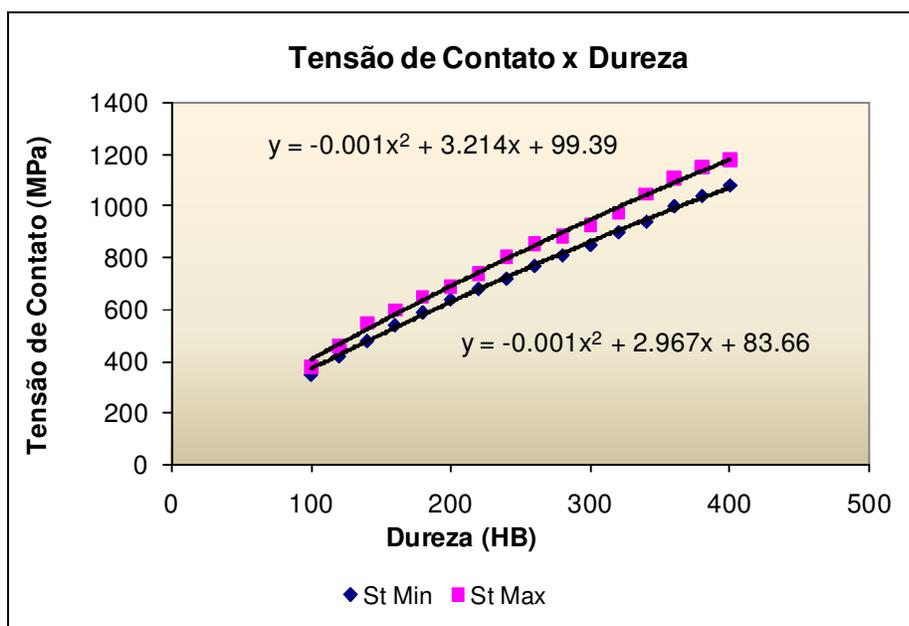
Obtida a tensão de contato, deve-se compará-la com a tensão admissível de contato, que é fornecida pela equação abaixo:

$$\sigma_{c,adm} = \frac{S_c * k_L * C_H}{k_T * k_R}$$

Onde: $\sigma_{c,adm}$ - tensão admissível de contato; S_c - tensão de contato do material; C_H - fator de dureza.

A tensão de contato do material, assim como a tensão de flexão, depende apenas da dureza e pode ser retirada das curvas da figura abaixo.

Gráfico 24 - Tensão de Contato Vs. Dureza.



O fator de razão de dureza é definido basicamente pela relação de transmissão (i) e as durezas da coroa e do pinhão na escala Brinell (HB), dado pela equação abaixo:

$$C_H = 1,0 + A * (i - 1)$$

Onde:

$$A = 8,98 * 10^{-3} * \left(\frac{HB_{PINHÃO}}{HB_{COROA}} \right) - 8,29 * 10^{-3}$$

Tabela 9 - Tensão de contato para o pinhão.

Cálculo da Tensão Admissível	
Dureza (HB)	30
Sc máximo (MPa)	17 1.77
Sc mínimo (MPa)	194.91
Sc tensão de contato médio (Pa)	1.83E+08
vida em horas	8760 0.00
vida em ciclos	2.56E+07
Kl (fator de vida em ciclos)	1.00
Ch (fator de razão de dureza)	1.00
Kt (fator de temperatura)	1.00
Kr (Fator de confiabilidade)	0.85
Tensão Admissível	2.16E+08
Fator de Dureza	
i	0.17
HB pinhão	30
HB coroa	30
razão de dureza	1.00
A	0.00069
Ch	0.999425
Cálculo da Largura	
Wt (N)	1.38
Ka	1.00
Kv	0.95
Ks	1.00
d (m)	0.078
Tensão Admissível (Pa) ^2	4.65E+16
Km	1.60
Cf (fator de condição superficial)	1.00
l (fator geométrico)	0.02
Módulo de Young (Pa) pin e coroa	2.05E+11
Coef. De Poisson (pinhão e coroa)	0.29
Cp (Pa)^(0.5)	1.89E+05
Largura (mm)	0.993
Fator Geométrico	
ângulo de pressão (°)	20.00
ângulo de pressão (rad)	0.35
l (fator geométrico)	0.02

Seleção do critério

Para a determinação da largura, deve-se utilizar o critério que obteve a maior largura. No caso, a menor largura necessária para o pinhão é de 0,993 mm, calculada pelo critério da tensão de contato.

5.1.3. Dimensionamento do eixo

O eixo deve satisfazer dois critérios de resistência dos materiais: resistência estática e resistência à fadiga. Assim, parte-se do diagrama de momentos fletores, usando-se a potência máxima fornecida pelo motor (0,415 W) e, usando as seguintes equações, chega-se nos esforços críticos nas seções mais solicitadas:

$$\sigma = \frac{32 * M}{\pi * d^3}$$

$$\tau = \frac{16 * T}{\pi * d^3}$$

Onde: σ - tensão normal atuante; τ - tensão cisalhante atuante; M – momento fletor; T – momento torçor; d – diâmetro do eixo.

É importante observar que os cálculos também foram feitos para todas as seções com concentração de tensão, como estrangulamentos, utilizados para impedir movimentação axial do eixo, e rasgos de chaveta, utilizados para a fixação dos elementos. Nesse caso, fatores retirados de gráficos de Peterson eram multiplicados às tensões anteriormente calculadas e assim era definida a nova seção crítica.

Por fim, encontrou-se uma tensão atuante equivalente, por meio da equação de Von Mises, ideal para materiais metálicos, e embutiu-se a esse valor um fator de segurança adequado às condições de serviço, conforme sugestão de Juvinal (2003).

Agora, faltava apenas comparar essa tensão com os limites de escoamento de diferentes aços. Decidiu-se utilizar o aço SAE 4340 (com limite de escoamento em torno de 860 MPa) normalizado, para obter um menor peso.

Foi feita, ainda, uma verificação de resistência à ruptura por fadiga. Para tanto, utilizou-se a equação extraída de Juvinal (2003):

$$S_n = S'_n * C_L * C_G * C_S$$

Onde: S_n – limite de resistência à fadiga do eixo; S'_n – limite de resistência à fadiga do material; CL – fator de carga; CG – fator de tamanho; CS – fator de superfície.

As tabelas a seguir ilustram os cálculos mostrados acima:

Tabela 10 - Cálculo esforços atuantes no eixo.

Cálculo do Torque		Esforços Atuantes		Cálculo dos Momentos			
Potência (hp)	0,00058	Fy Disco (N)	-243,72	Trecho CB	z	Mx (N.m)	My (N.m)
Potência (W)	0,41000	Ângulo de pressão (°)	20	O	0	0,0000	-4,8744
i (par engrenado)	8	Ângulo de pressão (rad)	0,35	A	-0,0385	-1,15788	0,0000
rotação do motor (rpm)	4,88	F Disco (N)	-259,38	B	-0,0885	0	-7,673201
rotação do eixo (rpm)	0,81	Fx Disco (N)	-88,71				
rotação do eixo (rad/s)	0,09	Peso Placa (kg)	7,50				
Momento Torçor (N.m)	-4,87	Fy Placa (N)	-73,50				
diâm. Pinhão (m)	0,04	raio peso placa (m)	0,14				
		Esforços Relativos					
		a (m)	-0,0385				
		b (m)	-0,0885				
		l (m)	-0,123				
		Va (N)	317,22				
		Ha (N)	0,00				
		Vb (N)	0,00				
		Hb (N)	88,71				

Tabela 11 - Equivalente de Von Mises.

Diâmetro (m)	sigma-x (MPa)	sigma-y (MPa)	tau-xy (MPa)	r/d	Kt	Kts	sigma-x * Kt
0,01	117,94	78,10	2,85	0,20	1,32	1,01	214,08
0,02	14,74	9,77	3,10	0,10	2,13	1,88	31,40
0,03	4,37	2,89	0,92	0,07	2,34	2,05	10,20
0,04	1,84	1,22	0,38	0,05	2,48	2,19	4,59
0,05	0,84	0,63	0,20	0,04	2,62	2,30	2,47
0,06	0,55	0,38	0,11	0,03	2,78	2,40	1,49
Coefficiente de Segurança (CS)		1,5		Curvatura do eixo (t)		0,002 (m)	
Diâmetro (m)	sigma-gamma * Kt	tau-xy * Kts	sigma-x * CS	sigma-y * CS	tau-xy * CS	Equiv. V.M. (MPa)	
0,01	142,20	39,88	322,02	213,40	59,81	302,08	
0,02	20,81	5,82	47,10	31,21	8,73	44,18	
0,03	0,70	1,89	13,30	10,14	2,85	14,59	
0,04	3,04	0,85	6,39	4,57	1,28	6,48	
0,05	1,08	0,40	3,71	2,40	0,69	3,68	
0,06	0,95	0,28	2,24	1,48	0,41	2,10	

Pelas características, todos os diâmetros têm equivalente de Von Mises inferior ao limite de escoamento do aço 4340 (860 MPa) e para a fadiga temos:

Tabela 12 - Coeficiente equivalente.

Flexão					
Limite de ruptura (MPa)	780	momento fletor eq. (N.m)	13.89	conc. direta (Kt)	2.73
Limite de fadiga (MPa)	438.8	momento total (N.m)	13.95	sensibilidade (q)	0.9
tensão média (MPa)	0	alfa	3.8	conc. final (Kf)	2.58
epsilon 1	0.85	tensão alternada (MPa)	8.95		
epsilon 2	0.87	diâmetro (m)	0.027	coef. de fadiga	13.88

Torção					
Limite de ruptura (MPa)	390	momento fletor eq. (N.m)	13.89	conc. direta (Kts)	1.88
Limite de fadiga (MPa)	175.50	momento total (N.m)	13.95	sensibilidade (q)	0.85
tensão média (MPa)	1.22	alfa	3.8	conc. final (Kf)	1.74
epsilon 1	0.74	tensão alternada (MPa)	0		
epsilon 2	0.87	diâmetro (m)	0.027	coef. de fadiga	319.84

Coeficiente Equivalente	13.87
--------------------------------	--------------

Segundo Stipkovitch (*apud* Juvinal, 2003), o coeficiente equivalente deve ser superior a 1,25 e, neste caso, um eixo de 27,3 mm de diâmetro satisfaz com folga o critério de fadiga.

5.1.4. Dimensionamento das chavetas

As chavetas devem suportar dois tipos de esforços: compressão e cisalhamento da parede. Sua largura e altura são determinadas pela dimensão da engrenagem. Deve-se calcular o momento torçor suportado pelos critérios do esmagamento e do cisalhamento a fim de verificar se os valores obtidos são superiores ao suportado pelo eixo. É importante salientar que a tensão admissível a ser utilizada será a menor entre a do eixo, da chaveta e da engrenagem.

O critério que fornecer o maior comprimento é quem determina esse item, já que largura e altura são determinadas em função do diâmetro do eixo.

Tabela 13 - Dados da chaveta.

Comprimento da Chaveta	5	mm
Tensão Admissível do Eixo	700	MPa
Tensão Admissível da Chaveta	600	MPa
Tensão Admissível da Engrenagem	216	MPa
Tensão Flexão admissível	216	MPa
Tensão de Cisalhamento admissível	108	MPa
Altura da Chaveta	10.0	mm
Largura da Chaveta	8.0	mm
Diâmetro do final do eixo	27.3	mm
Momento Torçor no eixo	4.9	Nm

Tabela 14 - Dimensionamento chaveta.

Dimensionamento pelo critério do esmagamento:		
Momento Torçor suportado:	74	Nm
Dimensionamento pelo critério do Cisalhamento:		
Momento Torçor suportado:	59	Nm

Como o momento torçor no eixo é 4,9 Nm, a chaveta projetada é adequada ao projeto.

5.1.5. Seleção de rolamentos

Como protótipo possui baixa velocidade de rotação e carga total pequena, a característica principal do rolamento deve ser a resistência ao tempo, pois o protótipo ficará exposto ao tempo por um longo período. Utilizando o catálogo geral e a tabela abaixo da NSK, optou-se por um rolamento fixo de carreira simples de esfera, pois permite apoio de cargas radiais e axiais em ambos os sentidos e o torque de atrito é pequeno. O ideal seria um rolamento vedado, pois preservaria a lubrificação por mais tempo, porém foi utilizado um aberto, mais simples.

Tabela 15 - Tipos e características de rolamento.

Tipos de Rolamentos	Fixos de uma carreira de esferas	Mag-neto	Uma carreira de esfe-ras de contato angular	Dois carrei-ras de esfe-ras de contato angular	Combi-nados	Esfe-ras de Quatro pontos de con-tato	Auto-com-pensado-ras de esfe-ras	Rolos Cilíndri-cos	Dois carrei-ras de rolos Cilíndri-cos	Rolos Cilíndri-cos com Rebordo em um lado	Rolos Cilíndri-cos com am-al do anco-sto	Rolos Agulha	Rolos Cônico	Dois e multi-plas car-reiras de rolos Cônico	Auto-com-pensado-ras de rolos	Axiais de esfe-ras	Axiais de esfe-ras com con-tra-placa esférica	Dois carrei-las de esfe-ras de contato angular	Axiais de Rolos Cilíndri-cos	Axiais de Rolos Cônico	Axiais auto-com-pensado-ras de rolos	Refe-rência na Pá-gina	
	Características																						
Capacidades de carga	Carga Radial	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	
	Carga Axial	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	↔	
	Carga Combi-nada	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	
Alta Velocidade	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	A 18 A 37
Alta Precisão	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	A 10 A 59 A 81
Baixo Torque e Ruído	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	A 10
Rigidez	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	A 10 A 96
Desalinhamento Permissível	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	😊	A 18 folha-brochura 344/19
Ação de Compensação							🟢								🟢		🟢				🟢		A 18
Separação dos Anéis		🟢				🟢		🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	🟢	A 19 A 20
Rolamento Lado Fixo	🟢			🟢	🟢	🟢	🟢				🟢			🟢	🟢								A 20- A 21
Rolamento lado Livre	🟡			🟡	🟡	🟡	🟡	🟢	🟢			🟢		🟡	🟡								A 20- A 27
Furo Cônico							🟢		🟢						🟢								A 80 A 118 A 122
Observação		Usa-se duas peças contrapostas	Agulha com 10, 20, 30 e 40 mm de comprimento		Menor diâmetro interno para o mesmo diâmetro externo	o ângulo de contato é de 35°		Inclui o tipo N	Inclui o tipo NNJ	Inclui o tipo NF	Inclui o tipo NUP			Usa-se duas peças contrapostas, a roda deve ser ajustada						Inclui os fixamentos axiais de rolos Agulha	Usados com lubrifi-cado a óleo		

Muito Bom
 Bom
 Regular
 Precário
 Inviável
 Somente em um sentido
 Dois sentidos
 Aplicável
 Aplicável porém deve permitir a fuga de dilatação ou contração do eixo na superfície de ajuste do rolamento

Extraído de NSK, 2002.

5.2. Montagem do hardware

A programação foi desenvolvida em linguagem C, utilizando-se o PICSTART PLUS no ambiente do MPLAB IDE Versão 7.60, fazendo-se uso do compilador CCSPCM C Compiler. O circuito impresso é composto por basicamente dois circuitos distintos, que serão explicados a seguir, e uma fonte redutora de tensão.

O circuito principal é composto basicamente por um PIC, um DS1307, três botões normalmente fechados, díodos, capacitores, cristais, resistores e mosfets.

O PIC utilizado é o 16F877A-1/P¹³, microprocessador da Microchip, que foi escolhido principalmente pela memória de 256 bytes EEPROM de memória, pois o programa desenvolvido não é simples, necessitando de funções como seno e cosseno para o cálculo da posição solar, que utilizam muita memória. Funciona em 5 Volts.

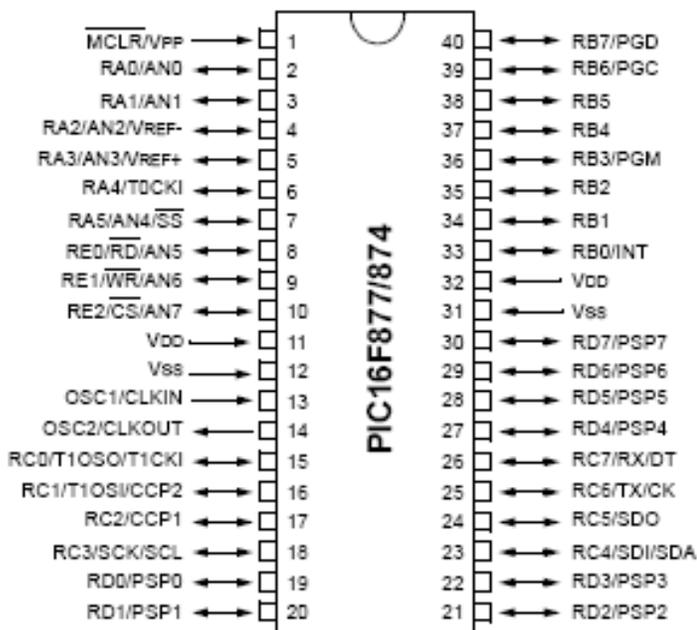


Figura 19 - Diagrama de conexão do PIC 16F887A P¹⁴.

¹³ O datasheet completo pode ser obtido no website www.microchip.com.

¹⁴ Extraído de Microchip, 2003.

O DS1307¹⁵ é um relógio externo fabricado pela Dallas Semiconductor, que é utilizado no protótipo acoplado a uma bateria externa para o caso de falta energia elétrica. O uso desse relógio decorre do fato do relógio do PIC não ser preciso o suficiente para períodos longos. Funciona em 5 Volts.

Os outros componentes servem apenas de suporte para o PIC, realizando funções específicas. Os botões são utilizados para setar a data, horário e sentido de rotação. O redutor de tensão é utilizado pois o sistema recebe 12 Volts e utiliza 5 Volts para os PICs e DS1307 e 12 Volts para os mosfet. Os mosfets são utilizados para energizar as bobinas do motor de passo, controlando seu movimento. Os resistores, capacitores e cristais possuem funções de conexão e funcionamento das demais peças.

O circuito principal e fonte de tensão foram montados conforme diagrama.

¹⁵ O datasheet completo pode ser obtido no website www.maxim-ic.com.

Já o circuito secundário é composto de um PIC 16F628A e um display LCD, sendo desenvolvido apenas para o funcionamento do display, pois o PIC do circuito principal não possui memória para suficiente para todas as funções. Seu diagrama está apresentado abaixo.

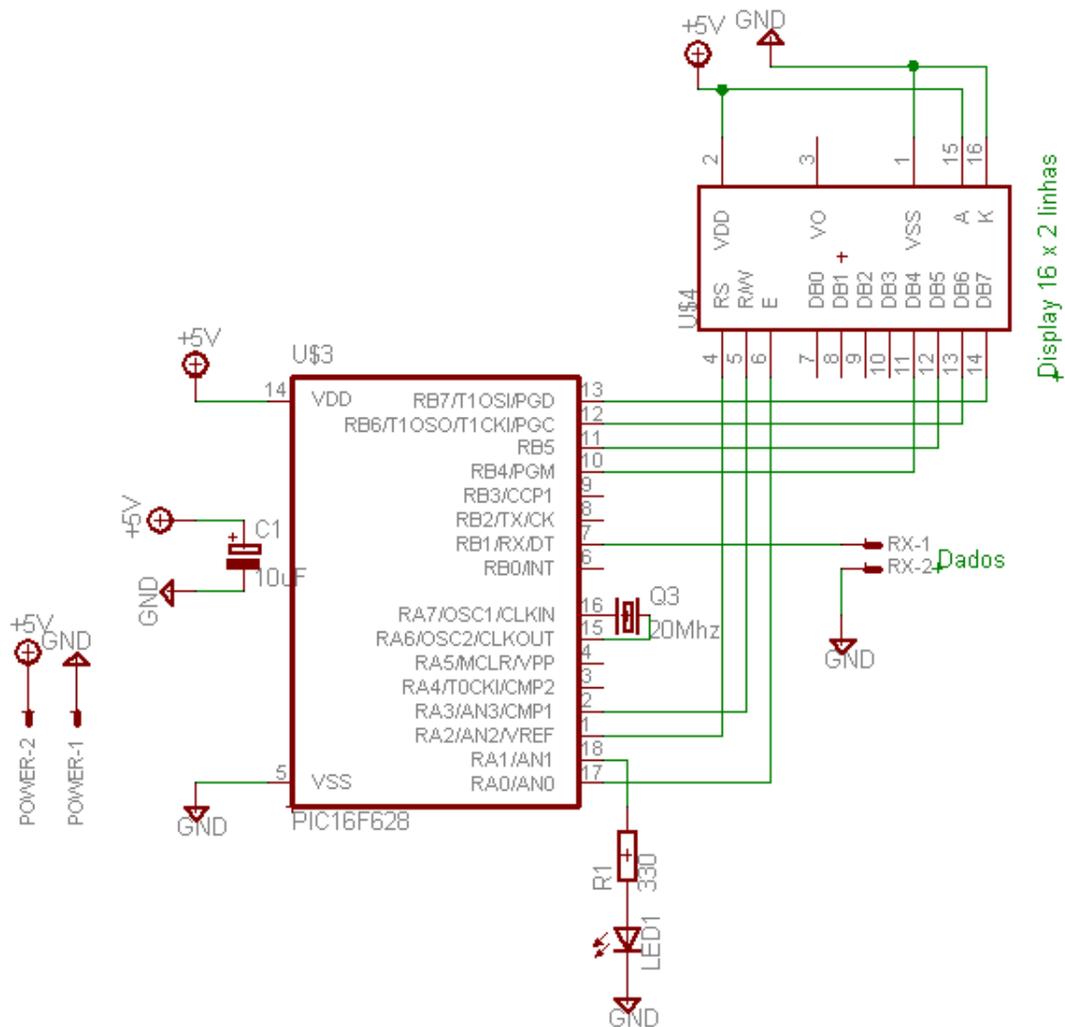


Figura 21 - Circuito do Display Serial.

5.3. Motor de Passo

Motores de passo, como o nome sugere, são motores que são programados para rodarem um determinado número de passos. Por esse motivo são muito utilizados em circuitos de

looping aberto, permitindo um custo muito baixo, pois evitam o uso de sensores, não necessitando de informações de retroalimentação. Conforme dito anteriormente, o motor utilizado é o LMC705, da Tekkno Mecatrônica, com passos de $1,8^\circ$.

O modo mais fácil de compreender esses motores é pensar como se eles possuíssem uma barra magnética móvel rodeada de 4 pólos eletromagnéticos idênticos. A figura abaixo simula o movimento de um motor. Se nenhum dos pólos está energizado (I), existe a força de atração do pólo mais próximo que dificulta a movimentação da barra central – nesse caso, o torque necessário para o movimento é conhecido como *detent torque*. Já na parte II, uma corrente horária está energizando o pólo A – seria difícil movimentar o motor, pois há um torque maior, chamado de *holding torque*. Na subfigura III, uma corrente horária em B faria com que o motor desse o primeiro passo, e assim por diante.

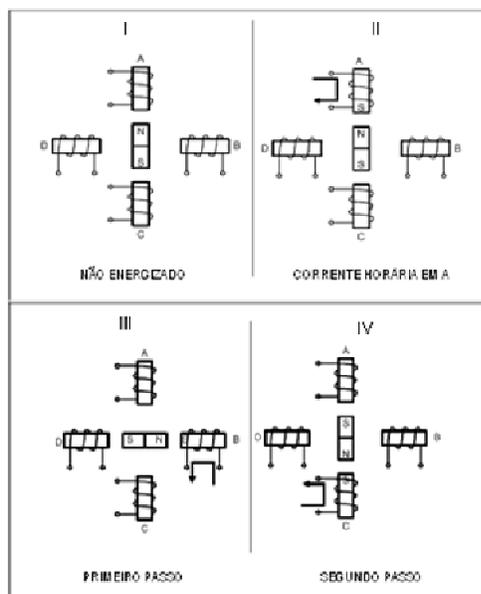


Figura 22 - Funcionamento básico de um motor de passo.

A utilização de um motor de passo necessita do controle de pelo menos 4 fios distintos, porém ele é simples. Existe, normalmente, motores bipolares de 4 fios e unipolares de 5 ou 6 fios, sendo esse último o utilizado no projeto.

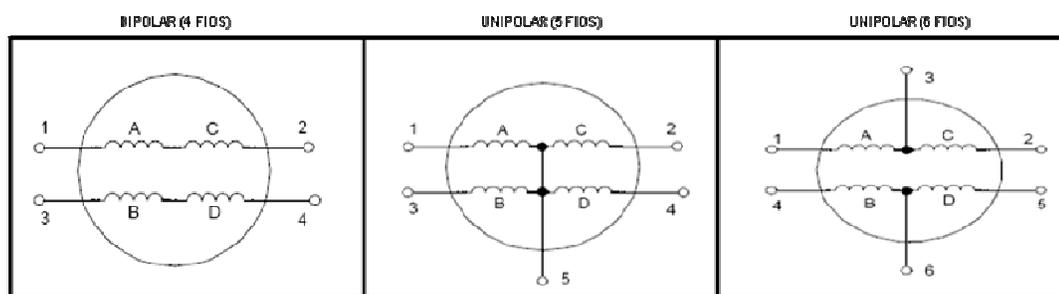


Figura 23 - Tipos de motores de passo.

Por fim, uma figura exemplificando o acionamento de um motor de passo para uma “volta” completa, ou seja, 4 passos.

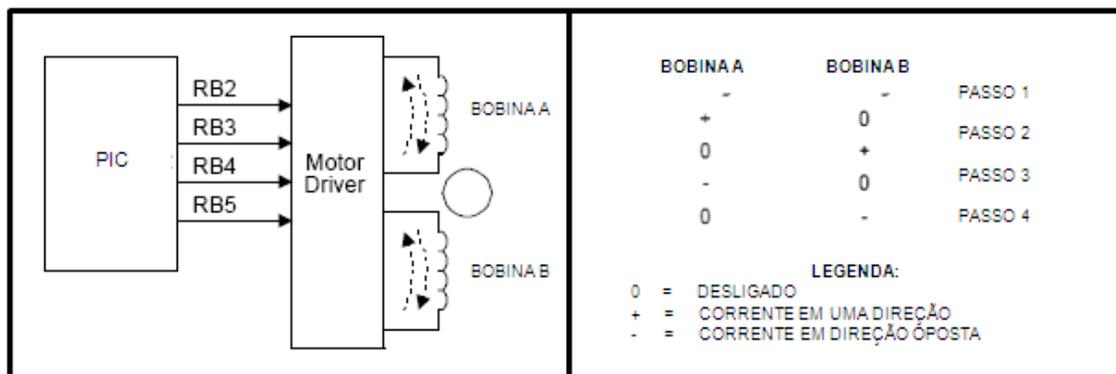


Figura 24 - Funcionamento de um motor de passo.

5.4. Programa em linguagem C

O programa desenvolvido em linguagem C possui uma rotina central e quatro acessórias: calcula passo, ds 1307, motor e display teclado. Abaixo uma figura mostra a

lógica da rotina de execução resumida do programa, desconsiderando a leitura do relógio, checagem dos botões e outras travas.

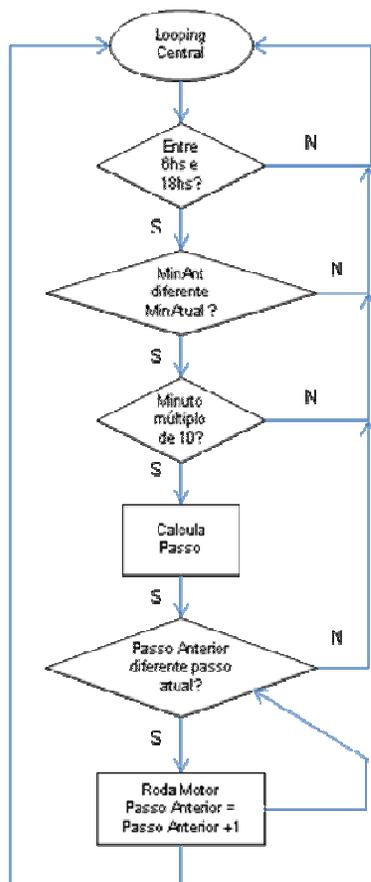


Figura 25 - Diagrama de funcionamento do programa.

5.4.1. Programa Central

Abaixo o programa raiz, principal:

```
#include <16f877a.h>
```

```
#DEVICE *=16 ADC=10
```

```
#FUSES NOWDT
```

```
#FUSES HS
```

```
#FUSES PUT
```

```
//No Watch Dog Timer
```

```
//Resistor/Capacitor Osc with CLKOUT
```

```
//No Power Up Timer
```

```

#FUSES NOPROTECT           //Code not protected from reading
#FUSES NODEBUG             //No Debug mode for ICD
#FUSES BROWNOUT           //No brownout reset
#FUSES NOLVP               //Low Voltage Programming on B3(PIC16) or B5(PIC18)
#FUSES NOCPD               //No EE protection
#FUSES NOWRT               //Program memory not write protected

#use delay(clock=2000000)
#use rs232(baud=9600, xmit=PIN_C6, rcv=PIN_c7) //define a comunicação com o display

#define INTS_PER_SECOND 60 //((2000000)/(4*256*256))
#define INT_PER_COUNT1 30;

#include <regs_16f87x.h>

#define LED_STATUS          PIN_D1
#define BOTAO_ESQUERDA     PIN_D6
#define BOTAO_DIREITA      PIN_D4
#define BOTAO_OK           PIN_D2
#define SENSOR              PIN_C2

//Define os pinos de IO correspondente ao motor de passo
#define MOTOR_P1           PIN_A1
#define MOTOR_P2           PIN_D3
#define MOTOR_P3           PIN_A2
#define MOTOR_P4           PIN_A3

//Variaveis de controle

int1 estado = 0;           //Controla o led de estado do processador - pisca quando roda o programa
int limiteInf, limiteSup; //Controla os limites do menu
int cp;
int x, modo;

//Contadores
int int_count;
int int_count1;
int contTeclado;
long int contPasso;
int tempoSalva;

//Flags
int1 dataOuHora;          //indica se o display mostra data ou hora
int1 primeiraVez;        //indica se o passo foi calculado a primeira vez
int1 direcaoMotor;       //indica a direção do motor

//Calculos
long int minDia;
long int numDia;
long int minDiaAnt;
long int passos, passosAnt, passosAntDisplay;

signed long minmeiodia;
float horasolG;
float horasolR;
signed int const3;
float latitudeR;
float declinacaoG;
float declinacaoR;
float coszenitalG;

```

```

float zenitalG;
float altsolG;
float altsolR;
float azimutalR;
float azimutalG;
float grausandarauX;
float grausrad = 0.017453293;
float latitudeG = -23.35;

//Relogio
int sec,min,hour,day,date,month, year;
int xDate, xMonth, xYear;
const long int dias[12] = {0,31,59,90,120,151,181,212,243,273,304,334};

// Prototipos das funções

void resetaMotor();           // Vira o motor até ele atingir o sensor
void mudaModo(int1 sentido);  // Muda o modo do menu
void setaLimiteMenu(int i,s); // Muda as variaveis de limite do menu
void processaBotoes();       // Verifica o estado dos botoes, e de acordo com o modo atua
void atualizaLcd();           // Atualiza o display de acordo com o modo atual

#SEPARATE
void IniciaPIC();             // Rotina de inicialização

#SEPARATE
void roda();                  // Roda o motor de acordo com os passos calculados

#SEPARATE
void ligaMotor(int1 enable, int1 direcao);

#SEPARATE
void calculaPasso();

// Includes
#include <ds1307.c>
#include <math.h>
#include <calculaPasso.c>
#include <motor.c>
#include <teclaTeclado.c>

#INT_TIMER0
void clock_isr() { //Roda 76 vezes por segundo
    int_count--;

    //ROTINA EXECUTA 1x SEGUNDO
    if(int_count==0)
    {
        leRelogio();
        atualizaLcd();

        //Pisca o led de status do processador
        estado = !estado;
        output_bit(LED_STATUS,estado);

        if(tempoSalva >= 10)
        {
            //salvaRelogio();
            tempoSalva=0;
        }
    }
}

```

```

        tempoSalva++;

        contTeclado = 0;

        int_count=INTS_PER_SECOND;
        set_timer0(100);
    }
}

// Rotina de inicialização

#SEPARATE
void IniciaPIC()
{
    //Força o desligamento do motor
    ligaMotor(0,direcaoMotor);

    // INICIALIZA TIMER 0
    int_count=INTS_PER_SECOND;
    set_timer0(100);
    setup_counters( RTCC_INTERNAL, RTCC_DIV_256 | RTCC_8_BIT);
    enable_interrupts(INT_TIMER0);

    //Tempo para o display serial inicializar
    delay_ms(2000);

    //Inicializa o relógio
    init_ds1307();

    if(input(BOTAO_OK)==1)
    {
        // 06/04/2008 10:59

        sec = 22;
        min = 89;
        hour = 16;
        day = 16;
        date = 6;
        month = 4;
        year = 8;

        write_DS1307(0, sec);
        write_DS1307(1, min);
        write_DS1307(2, hour);
        write_DS1307(3, day);
        write_DS1307(4, date);
        write_DS1307(5, month);
        write_DS1307(6, year);

    }
    //else
    //    carregaRelogio();

    leRelogio();

    //Carrega da eeprom, a direção configurada do motor
    direcaoMotor = read_eeprom(7);

    //Inicializa o modo do menu
    setaLimiteMenu(0,4);

```

```

//Inicializa o contador do timer 0
int_count1 = INT_PER_COUNT1;

//inicializa algumas variáveis
passos = 0;
passosAnt = 0;
primeiraVez = 1;
resetaMotor();

// INICIALIZA GLOBAL - A partir deste ponto o timer 0 está ativo
    enable_interrupts(GLOBAL);
}

// PROGRAMA PRINCIPAL

void main()
{
    IniciaPIC();

    while (1) //Loop infinito
    {
        //Verifica o estado do teclado
        processaBotoes();

        //Calcula o angulo da placa
        calculaPasso();

        //Força o desligamento do motor
        ligaMotor(0,direcaoMotor);

    } //Fim loop infinito
}

```

5.4.2. Calcula passo

É importante citar que nessa rotina que estão as variáveis que determinam o início e final do movimento em um dia, além de variáveis como a latitude na qual será utilizado o protótipo e redução utilizada nas engrenagens. A lógica desse programa é simples e pode ser alterada facilmente para outras latitudes, relação de transmissão ou horário de funcionamento, sendo também possível simples alterações para utilizar o mesmo aparato para o movimento em relação à diferentes estações do ano, possibilitando ao protótipo movimentação eletromecânica nos dois eixos.

Nessa parte do problema que foi determinado o intervalo para cada mudança de posição (10 minutos), o horário de funcionamento (6hs às 18hs) e mecanismo que faz com que o protótipo volta à meia noite, procurando o ponto de referência, sensor de proximidade.

```
#SEPARATE
void calculaPasso()
{
    float fAux,fAux2;

    minDia = ((long int) bcdToInt(hour) * 60) + ((long int) bcdToInt(min));
    numDia = bcdToInt(date) + dias[bcdToInt(month-1)];

    if(numDia>360)
        numDia = 360;

    if(minDia==720)
    {
        passos = 300;
    }

    if(minDia!=720 && minDia!=1440)
    {
        minmeiodia = -720 + minDia;
        horasolG = (float) minmeiodia / 4;
        horasolR = (float) horasolG * grausRad;
        if(horasolR >= 0)
            const3 = 1;
        else
            const3 = -1;
        latitudeR = (float) latitudeG * grausRad;

        fAux = 360 * grausRad * (284 + numDia) / 365;
        declinacaoG = 23.45 * SIN(fAux);
        declinacaoR = declinacaoG * grausRad;
        coszenitalG = (SIN(declinacaoR) * SIN(latitudeR)) + COS(declinacaoR) * COS(latitudeR) *
COS(horasolR);
        zenitalG = ACOS(coszenitalG)/ grausRad;
        altsolG = 90 - zenitalG;
        altsolR = altSolG * grausRad;

        fAux = ( SIN(altSolR) * SIN(latitudeR) ) - SIN(declinacaoR);
        fAux2 = COS(altSolR) * COS(latitudeR);
        azimutalR = (float) const3 * ACOS( fAux / fAux2 );

        azimutalG = azimutalR / grausRad;

        if(const3 == -1)
            grausandarauX = -azimutalG -90;
        else
            grausandarauX = 180 - azimutalG;

        if(    grausandarauX >= 90 && grausandarauX < 0 )
            grausandarauX = 0;
    }
}
```

```

if(minDia<720)
    passos = grausandarauX * 6 / 1.8;
else
    passos = ( 90 + grausandarauX ) * 6 / 1.8;

//Apos 18:00hs, garante posição, fixa-a e espera virar o dia
if(minDia > 1080)
{
    passos = 600;
}

//Antes das 06:00hs, garante posição, fixa-a e espera 6 hs para iniciar movimento
if(minDia <= 360)
{
    passos = 0;
    passosAnt = 0;
}

}

//---- bloco que reseta o motor para a posição inicial
if( (minDia==0) && (minDia != minDiaAnt) )
{
    resetaMotor();
    minDiaAnt = minDia;
}

roda();

}

#SEPARATE
void roda()
{
    //Caso seja 10 minutos... ou a primeira vez que roda
    if( ( (minDia % 10) == 0) && (passos != 0) && (minDia != minDiaAnt) || (primeiraVez==1) )
    {
        //Salva valor dos passos anterior para mostrar no display
        passosAntDisplay = passosAnt;

        //calcula a diferenca entre o que andou e o que tem que andar agora
        passosAnt = passos - passosAnt;

        for(contPasso=0;contPasso < passosAnt;contPasso++)
        {
            ligaMotor(1,direcaoMotor);
            printf("\f%Lu",contPasso);
        }

        //salva o que andou agora para comparar depois
        passosAnt = passos;

        //Grava minuto que rodou senão roda durante todo o minuto (minDia mod 10)
        minDiaAnt = minDia;

        //Depois que roda a primeira vez, zera a variavel para não entrar novamente
        primeiraVez = 0;
    }
}

```

5.4.3. DS 1307 - Relógio

O programa que permite a utilização do Dallas DS 1307, que é utilizado como relógio do sistema, está descrito abaixo:

```
#define DS1307_SDA PIN_D0
#define DS1307_SCL PIN_C3

#use i2c(master, sda=DS1307_SDA, scl=DS1307_SCL)

//Rotinas que passam de hexa (bcd) para decimal
int intToBcd(int dec)
{
    return ((dec/10)<<4)+(dec%10);
}

int bcdToInt(int bcd)
{
    return ((bcd>>4)*10)+bcd%16;
}

// inicializa o DS1307
void init_DS1307()
{
    output_float(DS1307_SCL);
    output_float(DS1307_SDA);
}

//Acerta o relógio
void write_DS1307(byte address, BYTE data)
{
    short int status;
    i2c_start();
    i2c_write(0xd0);
    i2c_write(address);
    i2c_write(data);
    i2c_stop();
    i2c_start();
    status=i2c_write(0xd0);
    while(status==1)
    {
        i2c_start();
        status=i2c_write(0xd0);
    }
}

//Le a memória do relógio, byte a byte
BYTE read_DS1307(byte address)
{
    BYTE data;
    i2c_start();
    i2c_write(0xd0);
```

```

i2c_write(address);
i2c_start();
i2c_write(0xd1);
data=i2c_read(0);
i2c_stop();
return(data);
}

//Le a memória do relógio para as variaveis do programa
void leRelogio()
{
    sec = read_ds1307(0) & 0x7F ; // read second
    min = read_ds1307(1);        // read minute
    hour = read_ds1307(2);       // read hour
    day = read_ds1307(2);        // read hour
    date = read_ds1307(4);       // read date
    month = read_ds1307(5);      // read month
    year = read_ds1307(6);       // read year
}

#SEPARATE
void carregaRelogio()
{
    sec = read_eeprom(0) & 0x7F;
    min = read_eeprom(1);
    hour = read_eeprom(2);
    day = read_eeprom(3);
    date = read_eeprom(4);
    month = read_eeprom(5);
    year = read_eeprom(6);

    write_DS1307(0, sec);
    write_DS1307(1, min);
    write_DS1307(2, hour);
    write_DS1307(3, day);
    write_DS1307(4, date);
    write_DS1307(5, month);
    write_DS1307(6, year);
}

/*
#SEPARATE
void atualizaRelogio()
{
    write_DS1307(0, sec & 0x7F);
    write_DS1307(1, min);
    write_DS1307(2, hour);
    write_DS1307(3, day);
    write_DS1307(4, date);
    write_DS1307(5, month);
    write_DS1307(6, year);
}
*/

//Grava o dado do relógio na memória não volátil do processador
void salvaRelogio()
{
    //write_eeprom(0,sec);
    //write_eeprom(1,min);
    //write_eeprom(2,hour);

```

```

//write_eeprom(3,day);
//write_eeprom(4,date);
//write_eeprom(5,month);
//write_eeprom(6,year);

write_DS1307(0, sec);
write_DS1307(1, min);
write_DS1307(2, hour);
write_DS1307(3, day);
write_DS1307(4, date);
write_DS1307(5, month);
write_DS1307(6, year);

}

```

5.4.4. Motor de Passo

A ativação do motor é feita através do programa abaixo:

```

long int passoMax;
void resetaMotor()
{
  for(passoMax=0; passoMax<1200; passoMax++)
  {
    if(input(SENSOR)==0) //roda para trás enquanto o sensor não foi acionado
    {
      ligaMotor(1,!direcaoMotor);
    }
    else
      passoMax=1201;
  }
}
#SEPARATE
void ligaMotor(int1 enable, int1 direcao)
{
  if(enable)
  {
    if(direcao)
    {
      if(cp>1)
        cp--;
      else
        cp=4;
    }
    else
    {
      if(cp<4)
        cp++;
      else
        cp=1;
    }
    switch(cp)

```

```
{
    case 1: {
        //Passo 1
        output_bit(MOTOR_P1, true);
        output_bit(MOTOR_P2, false);
        output_bit(MOTOR_P3, false);
        output_bit(MOTOR_P4, false);
        break;
    }

    case 2: {
        //Passo 2
        output_bit(MOTOR_P1, false);
        output_bit(MOTOR_P2, true);
        output_bit(MOTOR_P3, false);
        output_bit(MOTOR_P4, false);
        break;
    }

    case 3: {
        //Passo 3
        output_bit(MOTOR_P1, false);
        output_bit(MOTOR_P2, false);
        output_bit(MOTOR_P3, true);
        output_bit(MOTOR_P4, false);
        break;
    }

    case 4: {
        //Passo 4
        output_bit(MOTOR_P1, false);
        output_bit(MOTOR_P2, false);
        output_bit(MOTOR_P3, false);
        output_bit(MOTOR_P4, true);
        break;
    }

} //Switch
}
else //enable = 0
{
    output_bit(MOTOR_P1, false);
    output_bit(MOTOR_P2, false);
    output_bit(MOTOR_P3, false);
    output_bit(MOTOR_P4, false);
}

delay_ms(60);
}
```

5.4.5. Display e teclado

A rotina abaixo é responsável pelo display LCD e teclado. Após utilizar-se o programa, algumas travas mostraram-se necessárias para evitar que o programa entrasse em looping infinito.

```

void mudaModo(int1 sentido)
{
    if(sentido==0)
    {
        if(modo>limiteInf)
            modo--;
    }
    else
    {
        if(modo<limiteSup)
            modo++;
    }
}

void setaLimiteMenu(int i,s)
{
    limiteInf = i;
    limiteSup = s;
    //mudaModo(0);
    modo = i;
}

void atualizaLcd()
{
    switch(modo)
    {
        case 0: {
            printf("\fRodando\n\r");
            if(dataOuhora)
                printf("%02X:%02X:%02X",hour,min,sec);
            else
                printf("%02X/%02X/%02X",date,month,year);
            break;
        }

        case 1: {
            printf("\f1> Direcao\n\r");
            if(direcaoMotor)
                printf("esq.");
            else
                printf("dir.");
            break;
        }

        case 2: {

```

```

        printf("\f2> Passos\n\r");
        printf("%lu - %lu", passosAntDisplay, passos);
        break;
    }

//----- SETA DATA -----
    case 3: {
        printf("\f3> Seta Data");
        break;
    }

    case 31: {
        printf("\f3.1> Dia\n\r");
        printf("%u",xdate);
        break;
    }

    case 32: {
        printf("\f3.2> Mes\n\r");
        printf("%u",xmonth);

        break;
    }

    case 33: {
        printf("\f3.3> Ano\n\r");
        printf("%u",xyear);
        break;
    }

    case 34: {
        printf("\f3.4> Volta");
        break;
    }

//----- SETA HORA -----
    case 4: {
        printf("\f4> Seta Horário");
        break;
    }

    case 41: {
        printf("\f4.1> Segundo\n\r");
        printf("%u",bcdToInt(sec));
        break;
    }

    case 42: {
        printf("\f4.2> Minuto\n\r");
        printf("%u",bcdToInt(min));
        break;
    }

    case 43: {
        printf("\f4.3> Hora\n\r");
        printf("%u",bcdToInt(hour));
        break;
    }
}

```

```

        case 44: {
            printf("\f4.4> Volta");
            break;
        }
    }
}

void processaBotoes()
{
    if(input(BOTAO_OK)==1)
    {
        contTeclado++;
        if(contTeclado==1)
        {
            switch(modos)
            {
                case 0: {
                    dataOuhora = !dataOuHora;
                    break;
                }

                case 1: {
                    direcaoMotor =!direcaoMotor;
                    write_eeprom(7,direcaoMotor);
                    break;
                }

                //Seta Data
                case 3: {
                    setaLimiteMenu(31,34);
                    xDate = bcdToInt(date);
                    xMonth = bcdToInt(month);
                    xYear = bcdToInt(year);
                    break;
                }

                //Seta Dia
                case 31: {
                    if(xdate < 31)
                        xdate++;
                    else
                        xdate = 1;
                    break;
                }

                //Seta Mes
                case 32: {
                    if(xmonth < 12)
                        xmonth++;
                    else
                        xmonth = 1;
                    break;
                }

                //Seta Ano
                case 33: {
                    if(xyear < 10)
                        xyear++;
                }
            }
        }
    }
}

```

```

else
    xyear = 1;
break;
}

//Volta para o menu principal
case 34: {

    date = intToBcd(xDate);
    month = intToBcd(xMonth);
    year = intToBcd(xYear);
    salvaRelogio();
    passos = 0;
    passosAnt = 0;
    primeiraVez = 1;
    resetaMotor();

    setaLimiteMenu(0,4);
    modo=3;
    break;
}

//Entra em Seta Hora
case 4: {

    setaLimiteMenu(41,44);
    break;
}

//Seta Segundo
case 41: {

    sec = bcdToInt(sec);
    if(sec < 59)
        sec++;
    else
        sec = 0;

    sec = IntToBcd(sec);
    salvaRelogio();
    break;
}

//Seta Minuto
case 42: {

    min = bcdToInt(min);
    hour = bcdToInt(hour);
    if(min < 59)
        min++;
    else
    {
        min = 0;
        hour++;
    }

    min = IntToBcd(min);
    hour = IntToBcd(hour);
    salvaRelogio();
    break;
}

```

```

//Seta Hora
                                case 43: {
                                        hour = bcdToInt(hour);
                                        if(hour < 23)
                                                hour++;
                                        else
                                                hour = 0;
                                        hour = IntToBcd(hour);
                                        salvaRelogio();
                                        break;
                                }

//Volta para o menu principal
                                case 44: {
                                        setaLimiteMenu(0,4);
                                        modo=4;
                                        break;
                                }
                                // switch modo
                                }
                                atualizaLcd();
                                }
                                }

//INPUT BOTAO OK

if(input(BOTAO_ESQUERDA)==1)
{
    contTeclado++;
    if(contTeclado == 1)
    {
        mudaModo(0);
        atualizaLcd();
    }
}

if(input(BOTAO_DIREITA)==1)
{
    contTeclado++;
    if(contTeclado == 1)
    {
        mudaModo(1);
        atualizaLcd();
    }
}

if(input(BOTAO_ESQUERDA)==0 && input(BOTAO_DIREITA)==0 && input(BOTAO_OK)==0)
    contTeclado = 0;

//reseta o contador do teclado - TORNA POSSIVEL A NAVEGAÇÃO
if(contTeclado==100)
    contTeclado = 0;
}

```

5.5. Protótipo

As figuras de 26 a 29 mostram o circuito impresso, projeto mecânico e o local final do protótipo, com o painel fixo que será utilizado para a medição da diferença de geração entre o seguidor solar e um painel fixo.

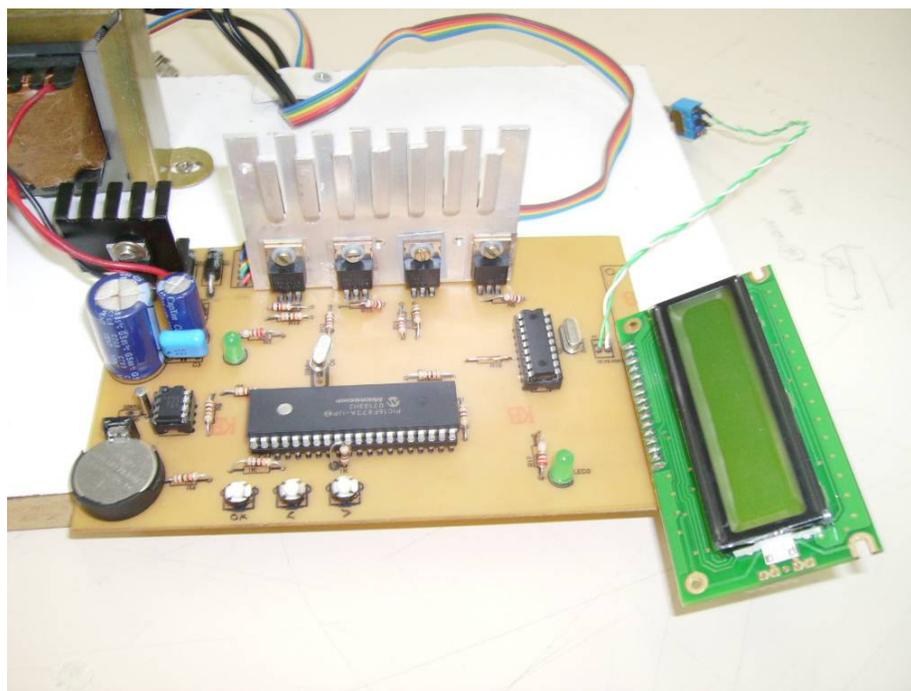


Figura 26 - Circuito impresso.



Figura 27 - Painel fixo e móvel.



Figura 28 - Detalhe do seguidor solar.



Figura 29 - Mais detalhes do seguidor.

6. Conclusão e recomendações

O protótipo foi colocado em funcionamento no dia 10 de dezembro para registro de dados e avaliação do incremento da produtividade.

Mesmo sem os dados experimentais, o projeto mostrou-se útil e atual, fazendo deste trabalho o início de um estudo que merece ser aprofundado.

Para a continuidade do projeto de seguidores solares recomenda-se as seguintes utilidades:

- Comparação por um maior período de tempo entre sistemas fixos e seguidores;
- Desenvolvimento de protótipos maiores, com 1 ou mesmo 2 eixos, diante da facilidade de extrapolar o programa aqui apresentado;
- Análise financeira do seguidor;
- Análise energética do seguidor, levando em consideração o consumo de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil.** Agência Nacional de Energia Elétrica, 2ª edição. Brasília, 2005.

Baldini, R. **Fabricação de Componentes de Sistemas FV - Mercado no Brasil : O ponto de vista da ABEER.** Apresentado no 2º SNESF - Simpósio Nacional de Energia Solar Fotovoltaica. Rio de Janeiro, 2005.

CIA **The World Fact Book.** Central Intelligence Agency. Disponível em <<http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/>>. Acesso dia 16 de junho de 2006.

CRESESB. **Energia solar: princípios e aplicações.** CRESESB, Centro de referência para energia solar e eólica Sérgio de Salvo Brito, disponível em <<http://www.cresesb.cepel.br>>. Acesso em 15 de abril de 2006.

Dallas Semiconductor. **DS1307 Real-Time Clock Data Sheet.** MAXIM – Dallas Semiconductor. Disponível em <<http://www.maxim-ic.com/>>. Diversos acessos.

Duffie, B. **Solar engineering of thermal processes.** Ed. John Wiley & Sons, Inc. 2ª Ed, EUA, 1991.

EIA. **International energy annual 2003.** Energy Information Administration. Disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/emeu/iea>>. Acesso em 15 de maio de 2006.

Evident Technologies. **Quantum dots enables new advances in solar cell industry.** Disponível em: <<http://www.evidenttech.com>>. Acesso em 20 de maio de 2006.

Galdo, J. F. **Renewable energy technology characterizations.** Disponível em: <http://eereweb.ee.doe.gov/ba/pdfs/pv_concentrators.pdf>. Acesso em: 01 de abril de 2005.

Gere, J. **Mecânica dos Materiais.** Ed. Thomson, 1ª Ed, São Paulo, 2003.

Gordon, J. M.; Kreider, J. F.; Reeves, P. **Tracking and stationary flat plate solar collectors: yearly collectible energy correlations for photovoltaic applications.** Solar energy, vol. 47, pp. 245-252, 1991.

INPE. **Distribuição espacial da radiação solar.** Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/~ensinop/rad_sol_02.htm>. Acesso em 15 de maio de 2006.

Juvinall, R.C.; Marshek, K. M. **Fundamentals of Machine Component Design.** Ed. John Wiley & Sons, Inc. 3ª Ed, Danvers, 2003.

Kacira, M.; Simsek, M.; Babur, Y.; Demirkol, S. **Determining optimum tilt angles and orientation of photovoltaic panels in Sanlirfa, Turkey.** Renewable energy, nº 29, pp 1265-1275, 2004.

- Krauter, S.; Araújo, R.; Onneken, K.; Quaschnig, V. **Photovoltaic energy systems**. Disponível em: <<http://emsolar.ee.tu-berlin.de/lehre/english/pv1/index.html>>. Acesso em 15 de maio de 2006.
- Manfê, G.; Pozza, R.; Scarato, G. **Desenho técnico mecânico Volume 3** Hemus-Livraria Editora Ltda. São Paulo.
- Microchip Technology. **PIC16F87XA Data Sheet**. Microchip Technology Incorporated. Disponível em <<http://www.microchip.com/>>. Diversos acessos.
- MME. **Balço energético nacional – BEN 2006**. Ministério das Minas e Energia. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/site/menu/>>. Acesso dia 16 de junho de 2006.
- Mosher, D. M.; Boese, R. E.; Soukupt, R. J. **The advantages of sun tracking for planar silicon solar cells**. Solar energy, vol. 16, pp. 91-97, 1977.
- Neville, R. C. **Solar energy collector orientation and tracking mode**. Solar energy, vol. 20, pp. 7-11, 1978.
- NREL. **Best researches cell efficiencies**. National Center for Photovoltaics. Disponível em <www.nrel.gov/ncpv/thin_film/docs/kaz_best_research_cells.ppt>. Acesso em 15 de junho de 2006.
- NSK. **Catálogo NSK de Rolamentos**. São Paulo, 2002.
- Peterson, R.E. **Stress Concentration Factors**. Ed. Longman, Inc., New York, 1972.
- Rogol, M. Tipping point: **Will Japan become the first mass market for solar power?** Decision brief, CERA (*Cambridge Energy Research Associates*), 2004.
- Rosa, D. J. M. **Caracterização da radiação solar: o caso da Cidade Universitária/ USP e da Ilha do Cardoso/ Cananéia**. Tese de Mestrado, PIPGE-USP. São Paulo, 2003.
- Shigley, J. E. **Elementos de Máquinas 2** McGraw Hill Hogaksha, 1ª edição. Sao Paulo, 1984.
- Shigley, J. E. **Mechanical Engineering Design** McGraw Hill Hogaksha, 3ª edição. Japão, 1977.
- Siemens. **Installation Guide for the Siemens Solar ProCharger JF Solar Electric Modules**. Siemens Solar Industries, USA, 1996.
- Stern, M.; Duran, G.; Fourer, G.; Mackamul, K.; Whalen, W.; Loo, M. V.; West, R. **Development of low-cost integrated 20 kW AC solar tracking subarray for grid connected PV power system application - final technical report**. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, 1998.
- Taub, S. **Riding the wave**. Emerging generation technologies watch, CERA (*Cambridge Energy Research Associates*), 2005.
- Taub, S.; Walker C. S. **And now, the moment you've all been waiting for...** Emerging generation technologies watch, CERA (*Cambridge Energy Research Associates*), 2006.

Yedamale, P.; Chattopadhyay, S. *Stepper Motor Microstepping with PIC18C452*. Microchip Technology Inc, 2002.

Zampese, B. **Dimensionamento** Grêmio Politécnico, 1ª edição. São Paulo, 1986.

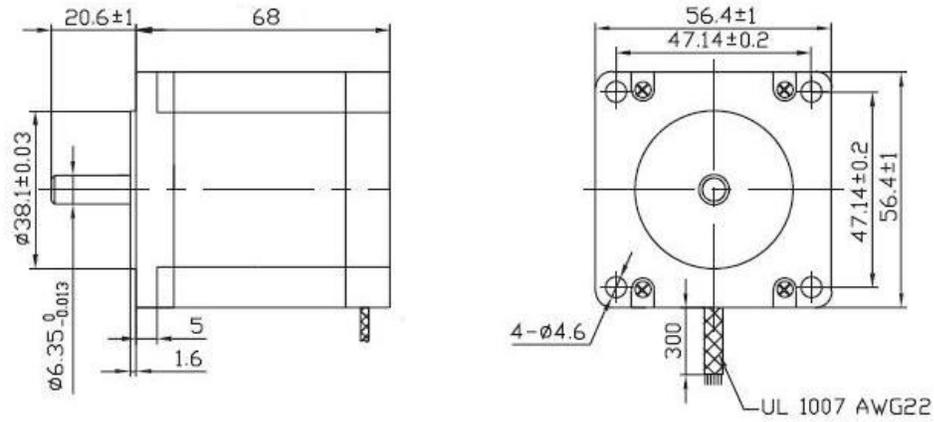
Zampese, B. **Manual de elementos de construção de elementos de máquina** Grêmio Politécnico, 1ª edição. São Paulo, 1976.

ANEXO 1 – DATASHEET DO MOTOR DE PASSO



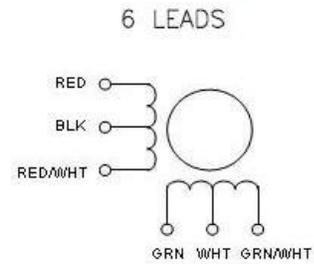
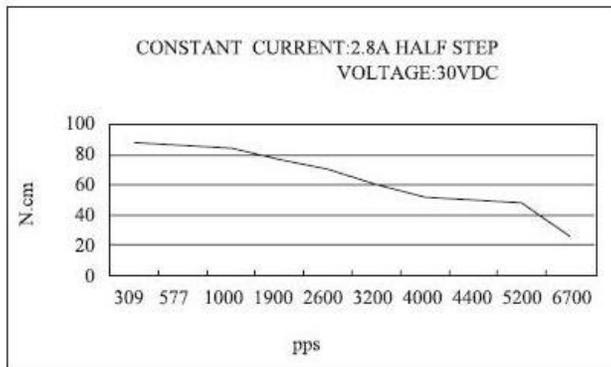
Dimensões (mm)

Motor de Passo TK23LM-C705

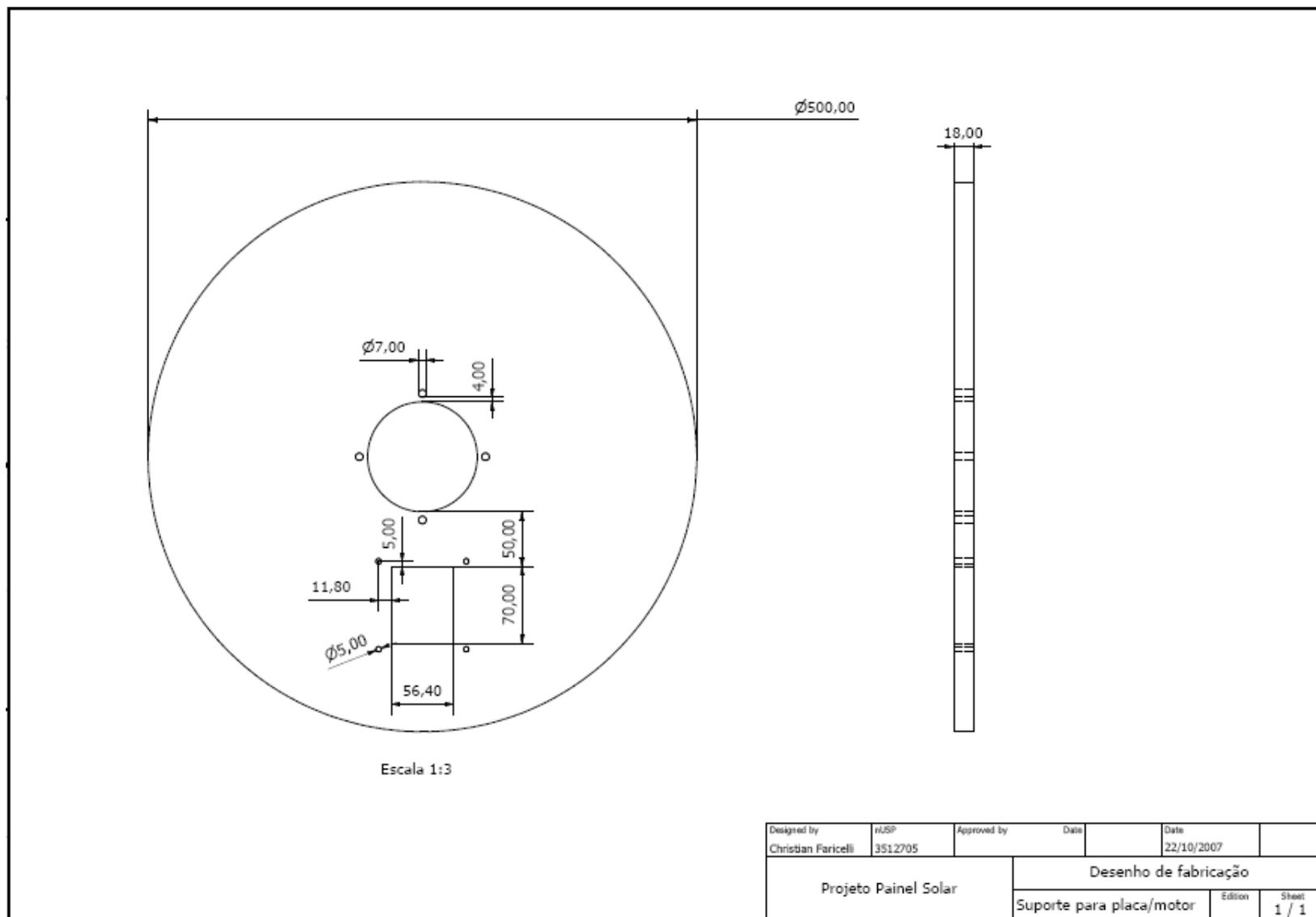


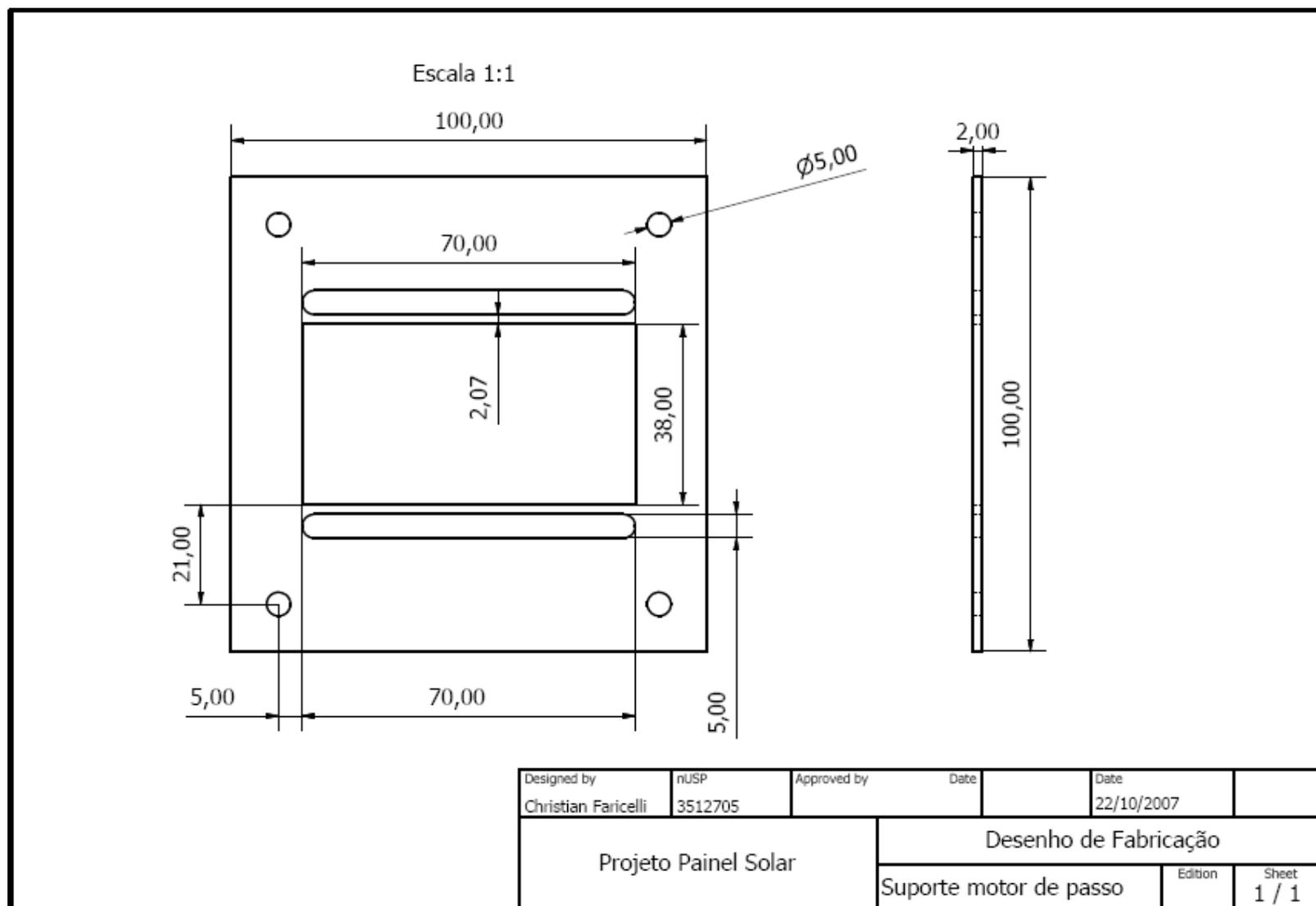
Dados Motor

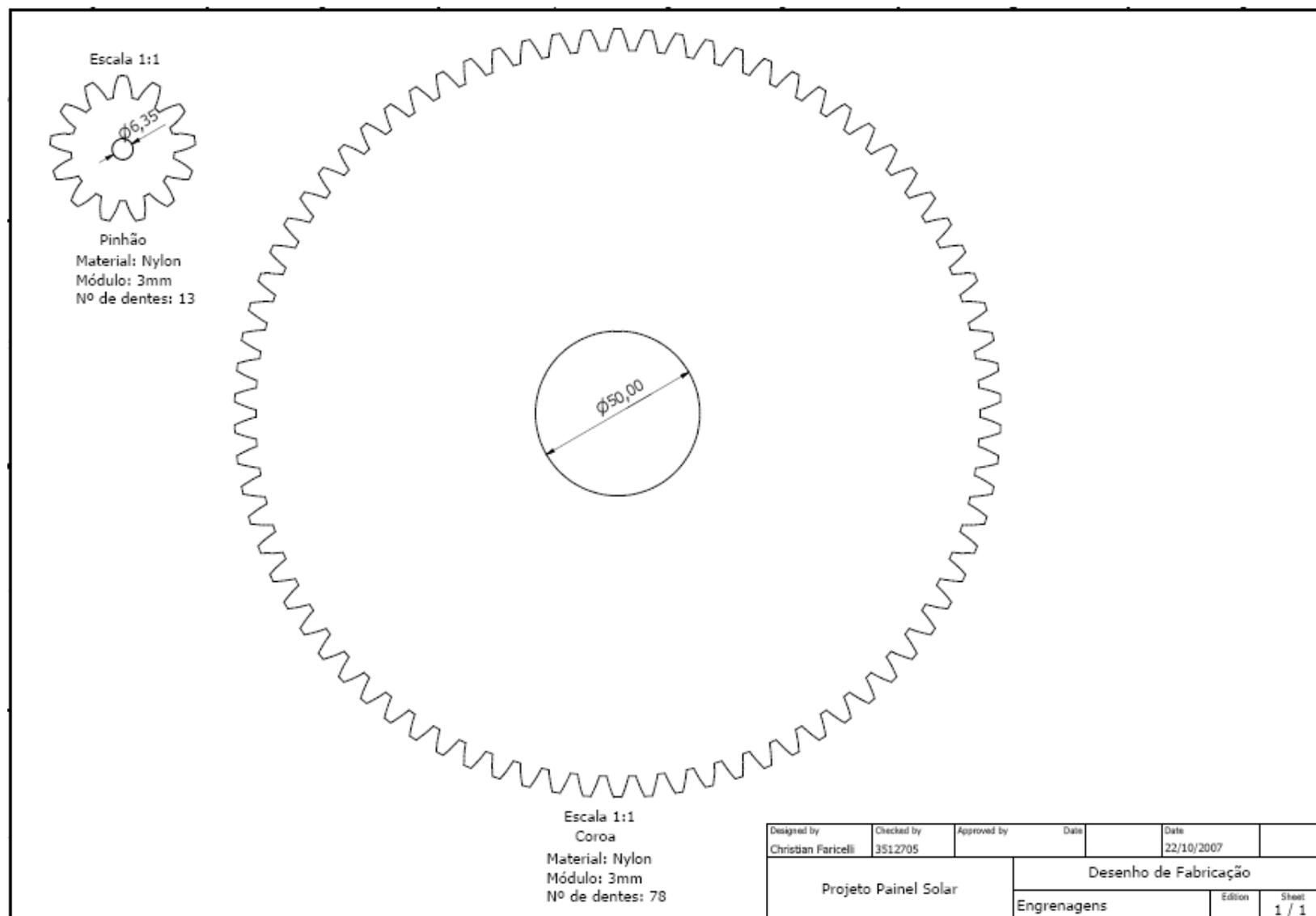
Tensão Nominal	Corrente	Reistência	Indutância	Holding Torque	Inércia Motor	Peso
Vdc	A/Fase	Ohm/Fase	mH/Fase	Kgf/cm	g/cm2	Kg
3.00	2.4	1.25	1.80	10	180	1.0

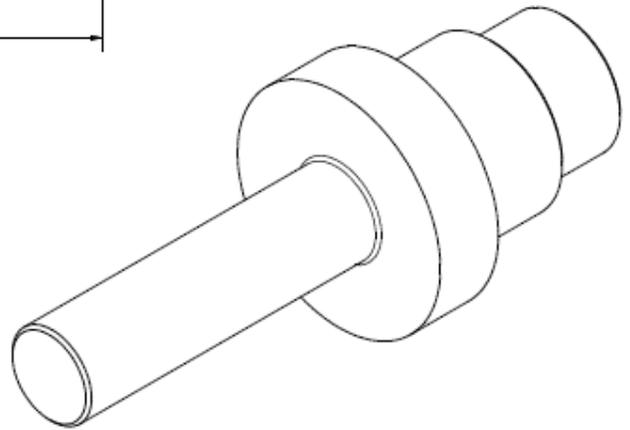
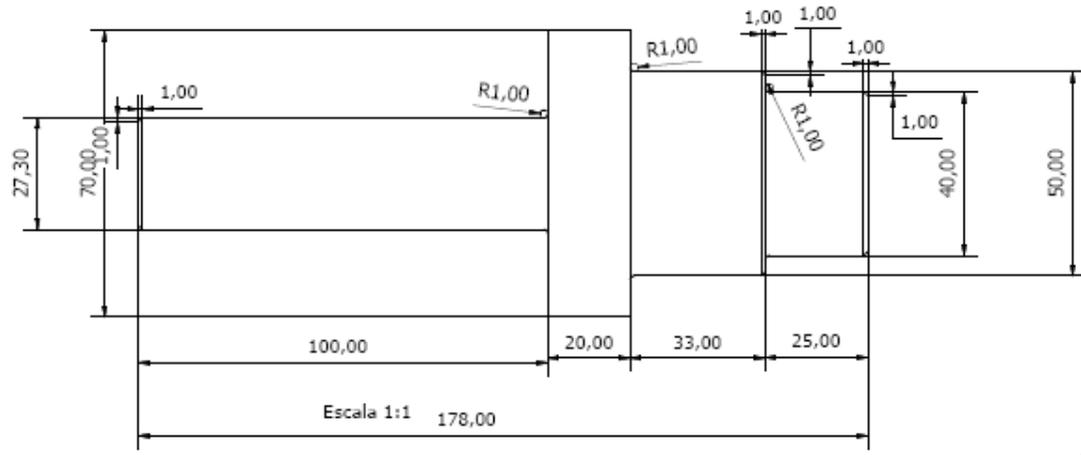


ANEXO 2 – DESENHOS DE FABRICAÇÃO

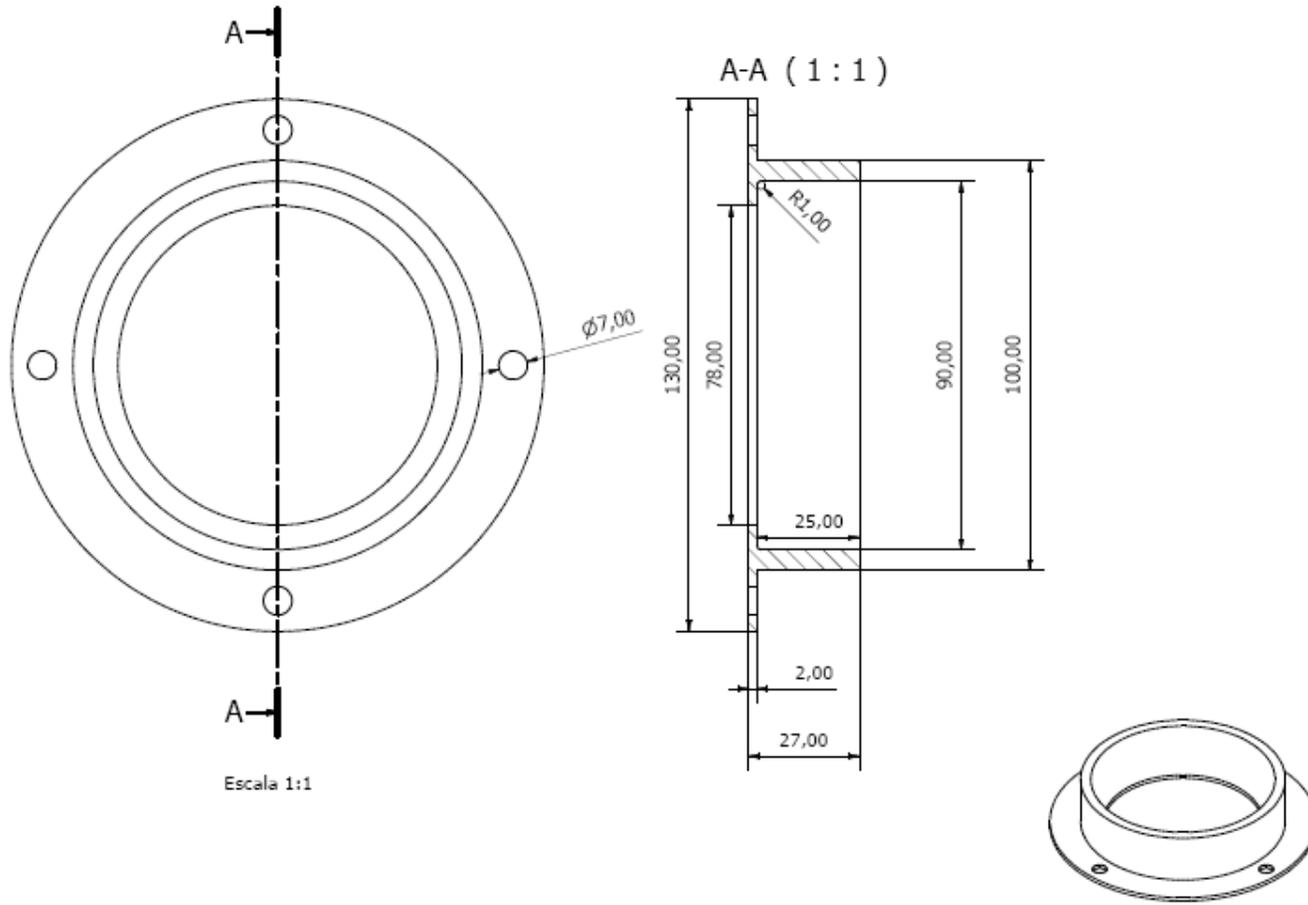








Designed by	NUSP	Approved by	Date	Date
Christian Faricelli	3512705			22/10/2007
Projeto Painel Solar		Desenho de Fabricação		
Eixo		Edition	Sheet	
			1 / 1	



Escala 1:1

Designed by	n/USP	Approved by	Date	Date
Christian Faricelli	3512705			22/10/2007
Projeto Painel Solar		Desenho de fabricação		
		Suporte p/ rolamento	Edition	Sheet
				1 / 1

