

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**DESENVOLVIMENTO DE UM  
EQUIPAMENTO SUPORTE MÓVEL PARA  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS OTIMIZADO  
PARA AUMENTO DA CAPTAÇÃO DE  
ENERGIA SOLAR**

Eduardo Amaral Sanzio  
Marcos Rozario do Nascimento

Prof. Orientador: Leydervan Xavier

**Rio de Janeiro  
Maio de 2016**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**DESENVOLVIMENTO DE UM  
EQUIPAMENTO SUPORTE MÓVEL PARA  
MÓDULOS FOTOVOLTAICOS OTIMIZADO  
PARA AUMENTO DA CAPTAÇÃO DE  
ENERGIA SOLAR**

Eduardo Amaral Sanzio  
Marcos Rozario do Nascimento

Projeto final apresentado em cumprimento às  
normas do Departamento de Educação Superior  
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção  
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Leydervan Xavier

**Rio de Janeiro  
Maio de 2016**

(Exemplo)

M277 Silva, Antônio Joaquim; Almeida, Pedro Paulo de; Lopes Cruz, Ana Maria  
Atenuação por Chuvas em Enlaces de Comunicações Via Satélite / Antônio  
Joaquim silva, Pedro Paulo de Almeida, Ana Maria Lopes Cruz – 2007  
x, 100f+anexos: il (algumas color), grafs, tabs.;enc  
Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso  
Celso Suckow da Fonseca, 2007  
Bibliografia:f.85-90  
1.Engenharia Elétrica 2.Telecomunicações I.Título

CDD 658

## AGRADECIMENTOS

### Sanzio

Agradeço a Deus acima de tudo pela oportunidade de reencontrar velhos companheiros de jornada nessa instituição e por iluminar meu caminho acadêmico, pessoal e profissional.

Agradeço a todos aqueles que estiveram ao meu lado durante todo esse percurso, minha família, em especial minha esposa Bruna, que sempre acreditou em mim mesmo quando eu mesmo vacilei, e meus filhos, que sempre trouxeram o sorriso oportuno para me lembrar o motivo de todo esforço.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante a faculdade, são momentos de alegria, dificuldade, tensão e descontração que formaram laços para toda a vida: Marcos Rozario, Humberto Sá Pereira, Giovanni Seiji, Emanuel Pessoa, Guilherme Júdice. Não seria a mesma coisa sem vocês, obrigado por cada momento.

Agradeço a toda equipe da CEFET Júnior que me acolheu por 2 semestres, tempo suficiente para aprender que vocês são os melhores,

Agradeço a toda a equipe docente que fez de mim um engenheiro, com lições valiosas tanto no âmbito acadêmico quanto pessoal, dentre eles, um obrigado especial aos mestres: Álvaro, Barbosa, Bassani, Fernando, Leydervan, Vogel.

### Rozario

Quero agradecer primeiramente a Deus por ter me dado forças para lutar e vencer todos os desafios que me foram propostos durante o curso de graduação.

Agradeço ao CEFET/RJ, seu corpo docente, direção e administração que me proporcionaram tudo o que foi necessário para adquirir os conhecimentos necessários para a elaboração desse projeto e para me tornar um profissional de qualidade.

Agradeço ao meu Professor Orientador Leydervan Xavier, pela orientação, apoio e confiança prestados durante a elaboração desse projeto. Agradeço também aos meus familiares, amigos e colegas de curso que sempre me apoiaram em todos os momentos de dificuldade durante o curso de Engenharia Mecânica. E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## RESUMO

Fontes alternativas de energia tem se tornado uma necessidade para a humanidade e entre as suas razões para essa necessidade estão os fatores climáticos e econômicos devido a queima de combustíveis fósseis e vulnerabilidade as oscilações do preço do petróleo no mercado mundial. Entre as fontes alternativas está a energia solar que tem potencial elevado em nosso país. A proposta deste trabalho é desenvolver um equipamento capaz de otimizar a produção de energia solar através de painéis solares para aumentar a eficiência energética desta fonte tornando-a mais competitiva entre as fontes disponíveis. Através do estudo das soluções existentes no mercado e da escolha dos parâmetros da usina de Tauá, no Ceará, é projetado um seguidor solar uni-axial capaz de aumentar a eficiência energética por espaço ocupado em comparação ao modelo de painéis fixos.

Palavras chave: Energia, Solar, Seguidor solar, Máquina.

## ABSTRACT

Alternative sources of energy has been a necessity for the human kind and among the reasons for this necessity are the climate and economic factors due to burning of fossil fuels and the vulnerability to the fluctuation of the value of oil in the world market. Among the alternative sources there is the solar energy that has a huge potential in our country. The goal of this work is to develop an equipment able to optimize the production of solar energy through solar panels to increase the energy efficiency of this source and make it more competitive among the available sources. Through the research of the existing solutions in the market and the choice of parameters from the power plant of Tauá, in the state of Ceará, is designed a one axis solar tracker capable of increase the energy efficiency per occupied space in comparison to the model of fixed panels.

Key words: Energy, Solar, Solar Tracker, Machine.

## Sumário

Capítulo 1.....	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Justificativa.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.4 Metodologia e Trabalho Realizado.....	3
Capítulo 2.....	4
2. Energia Solar Fotovoltaica.....	4
2.1 Contexto Histórico.....	4
2.2 Definição.....	5
2.3 Tipos de Usinas Solares Fotovoltaicas.....	6
2.4 Células e Módulos Fotovoltaicos.....	8
2.5 Princípios de Funcionamento da Célula Fotovoltaica.....	9
2.6 Tipos de Células.....	10
2.6.1 Células mono-cristalinas.....	11
2.6.2 Células poli-cristalinas.....	11
2.6.3 Células de silício amorfo.....	11
2.6.4 Células de silício monocristalino.....	12
2.6.5 Células Silício Policristalino.....	13
2.6.6 Células de Silício Amorfo.....	13
Capítulo 3.....	14
3. Seguidor solar uni-axial.....	14
3.1 Vantagens.....	14
3.2 Projeto de um seguidor solar uni-axial: concepção inicial.....	16
3.3 Usina de Tauá.....	19
3.4 Posição do Sol.....	20

3.4.1	Determinação da posição do sol na Usina de Tauá.....	20
	Capítulo 4.....	23
	4.Construção do Seguidor solar.....	23
	4.1 Aspectos Gerais.....	23
	4.2.1 Painéis Solares .....	24
	4.1.2 Suportes .....	25
	4.1.3 Eixos .....	25
	4.1.4 Sistema Motor.....	27
	4.1.5 Elementos Complementares.....	29
	4.1.6 Lubrificação e Proteção Contra Intempéries.....	31
	4.1.6 Montagem.....	31
	4.2 Resultados Esperados .....	32
	Capítulo 5.....	34
	5.1 Conclusão .....	34
	Bibliografia.....	35
	APÊNDICE A: Cálculo de resistência das pernas dos suportes .....	37
	APÊNDICE B: Cálculo para dimensionamento do motor .....	41
	APÊNDICE C: Dimensionamento do eixo quadrado central.....	43
	APÊNDICE D: Consideração da força do vento .....	46
	ANEXO I: Catálogo do Painel Solar. ....	52
	ANEXO II: Catálogo do Motor Elétrico. ....	54
	ANEXO III: Catálogo do Redutor. ....	56
	ANEXO IV: Catálogo do Mancal. ....	57
	ANEXO V: Catálogo Acoplamento flexível.....	58
	ANEXO VI: Catálogo Mancal .....	60

## Lista de Figuras

Figura 1: Divisão da Radiação Solar ao atingir a Terra [1] .....	5
Figura 2: Geração fotovoltaica [4].....	6
Figura 3:Ciclo de Usina Heliotémica [5] .....	7
Figura 4: Distribuição das tecnologias usadas na produção industrial de células fotovoltaicas. Legenda: m-Si - silício monocristalino, p-Si - silício policristalino, CdTe - telureto de cádmio; a-Si - silício amorfo, CIS disseleneto de cobre índio, CIGS [1] .....	9
Figura 5: Exemplo de parque solar utilizando seguidores solares .....	14
Figura 6: Comparação de rendimentos entre painéis solares estáticos e com seguidores .....	15
Figura 7: Variação da corrente elétrica gerada de acordo com a incidência de radiação .....	15
Figura 8: Concepção inicial do Seguidor Solar.....	16
Figura 9: Detalhe do rolamento.....	17
Figura 10: Vista explodida do conjunto do rolamento .....	18
Figura 11: Localização da usina de Tauá.....	21
Figura 12 Gráfico Polar para a posição solar em Tauá.....	21
Figura 13 Gráfico Polar para a posição solar em Nova York, EUA e em Santiago, Chile respectivamente [Software SunEarthTools].....	22
Figura 14: Elementos do seguidor solar .....	23
Figura 15: Seguidor solar invertido .....	24
Figura 16: Painel Solar .....	24
Figura 17: Suporte em V.....	25
Figura 18: Eixo Quadrado.....	26
Figura 19: Eixo Cilíndrico .....	26
Figura 20: Sistema Motor .....	27
Figura 21: Motor.....	28
Figura 22: Motoredutor acoplada ao motor. ....	28
Figura 23: Variador de Frequência.....	29
Figura 24: Rolamentos de esferas de polímero .....	30
Figura 25: Acoplamento elástico .....	30

<b>Figura 26: Forças e reações .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 27: Diagrama de corpo livre seguidor .....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 28: Modelo da perna do suporte .....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 29: Modelo do eixo quadrado .....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 30: Isopaletas para determinação de <math>V_o</math> .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 31: Modelo cargas de vento .....</b>	<b>49</b>

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 1: Azimute do sol em Taurá - CE</b> .....	22
<b>Tabela 2: Dados do seguidor solar</b> .....	41
<b>Tabela 3: Dados do painel solar</b> .....	44
<b>Tabela 4: Classe de relevo para escolha de S1</b> .....	47
<b>Tabela 5: Classe para escolha de S2</b> .....	47
<b>Tabela 6: Classe alfabética para escolha de S2</b> .....	47
<b>Tabela 7: Escolha de S2 por classe</b> .....	48
<b>Tabela 8: Escolha de S3 por grupo</b> .....	48
<b>Tabela 9: Valores para cálculo de <math>V_k</math></b> .....	49

**LISTA DE SÍMBOLOS**

$M_{\max}$  – Momento fletor máximo

$Q_c$  –  $Q$  para o ponto c

$S_1$  – Fator topográfico

$S_2$  – Fator de rugosidade

$S_3$  – Fator estatístico

$V_0$  – Velocidade básica da região

$V_k$  – Velocidade característica

$V_{\max}$  – Cortante máximo

$\sigma_{flex_{max}}$  – Tensão máxima relacionada ao momento fletor

$\sigma_{med}$  – Tensão normal média

$\sigma_{max}$  – Tensão normal máxima

$\tau_c$  – Tensão de cisalhamento no ponto c

$\tau_{max}$  – Tensão de cisalhamento máxima

$\Delta t$  – Variação do tempo

$\Delta w$  – Variação da velocidade angular

$\Sigma F_y$  – Somatório de forças em y

$A$  – Área

$F$  – Força

$I$  – Momento de inércia

$M$  – Momento fletor

$N$  – Força normal

$Pot$  – Potência

$Q$  – Produto entre a área superior da seção analisada e a distância até o centroide desta área medida em relação ao eixo neutro

$T$  – Torque

$V$  – Força cortante

$e$  – Espessura

$f_y$  – Limite de escoamento

$g$  – Aceleração da gravidade

$m$  – Massa

$n$  – Fator de segurança

$q$  – Pressão dinâmica

$t$  – Tempo / Largura da área da seção transversal do elemento

$w$  – Velocidade angular

$y$  – Distância perpendicular do eixo neutro a um determinado ponto/ Eixo vertical

$\alpha$  – Aceleração angular

$\sigma$  – Tensão normal

$\tau$  – Tensão cisalhante

# Capítulo 1

## 1.1 Introdução

O contexto deste trabalho é o da geração de energia elétrica por fontes renováveis, que desafia os diversos segmentos da engenharia, a produzir soluções adequadas às demandas contemporâneas de energia e sustentabilidade. Algumas questões associadas à descoberta de um modo de armazenar e transmitir energia elétrica de forma estável, remontam ao século XVIII. Sabe-se que o estudo sobre esse fenômeno se intensificou nos séculos seguintes e a energia elétrica foi um dos pilares da sociedade em sua ascensão tecnológica. [1]

Dos pequenos laboratórios dos cientistas pioneiros para dentro da casa de cada cidadão, vários foram os desafios enfrentados para gerar a energia, Michel Faraday, ao perceber a relação entre o magnetismo e a eletricidade, criou o primeiro gerador. Os geradores foram se aperfeiçoando até se tornarem as principais fontes de suprimento de eletricidade empregada principalmente na iluminação. Os diversos tipos de geradores utilizados até hoje dependem de uma força motriz mecânica, seja um pistão movido à vapor ou a própria gravidade terrestre (água corrente em um canal), e como a demanda pela energia elétrica aumentou exponencialmente ao longo do século XX, as usinas geradoras de eletricidade tradicionais não conseguem suprir essa demanda sem um impacto negativo no meio ambiente. [2]

A partir da descoberta do efeito fotovoltaico, com o qual se consegue gerar corrente elétrica em um material pela incidência de uma onda eletromagnética, pesquisadores trabalham para criar sistemas para melhor aproveitar a energia solar na geração de energia elétrica. Grandes extensões de painéis conseguem captar a luz solar e gerar energia elétrica, a eficiência do processo está diretamente ligada à incidência de radiação solar, ou seja, depende de fatores climáticos locais e da rotação terrestre. E a eficiência da geração de energia elétrica pode ser aumentada redirecionando o painel solar de modo que fique perpendicular à incidência de luz, ao invés de instalar um painel fixo, utiliza-se um seguidor para movimentar o mesmo, aumentando a energia produzida sem alterar o espaço utilizado ou a quantidade de painéis. O presente trabalho

propõe um modelo de seguidor solar, assim como a análise das principais vantagens e desvantagens de sua utilização.

## **1.2 Justificativa**

A energia solar representa um futuro de energia abundante, pode ser considerada uma energia limpa cuja operação quase não gera impacto ambiental negativo na fase de geração energética. Esse trabalho tem como motivo fazer parte da construção desse futuro, o Brasil ainda está no início de sua jornada perante o potencial energético que possui, ainda não existem fabricantes brasileiros de seguidores solares, assim como existem poucos parques solares instalados no país, realidade prestes a mudar nos próximos anos.

O valor da energia elétrica obtida através de hidrelétricas e combustíveis fósseis aumentou consideravelmente nos últimos meses, além disso, o problema do aquecimento global tem alterado o clima mundial afetando inclusive o ciclo de chuvas, fazendo com que usinas hidrelétricas tenham suas barragens em níveis críticos. Nesse cenário, a energia proveniente do sol tem assumido valor crescente para solucionar o problema da energia. Nesse campo de pesquisa, os seguidores solares conseguem aumentar a geração de energia utilizando a mesma área utilizada por um painel fixo.

## **1.3 Objetivos**

O presente trabalho tem como objetivo o projeto de um equipamento denominado “seguidor solar” que será utilizado como base móvel para painéis fotovoltaicos. Esse equipamento deverá ser capaz de aumentar a eficiência da captação da radiação solar desses painéis em relação aos painéis fixos.

Será realizado um estudo de caso, comparando a captação da energia solar da usina de Tauá no estado do Ceará, que atualmente utiliza painéis fixos, com uma situação em que os seguidores fossem utilizados nessa usina.

A hipótese é de que o rendimento energético com a utilização dos seguidores seja melhor, tendo em vista o melhor aproveitamento da luz solar com o ângulo ideal para a captação desta.

#### **1.4 Metodologia e Trabalho Realizado**

O projeto do equipamento será realizado utilizando conceitos de mecanismos, resistência dos materiais entre outras disciplinas aprendidas ao longo do curso de Engenharia Mecânica. O estudo de caso comparando a captação da energia solar da usina de Tauá no estado do Ceará, em uma situação em que os seguidores fossem utilizados nessa usina, embasará o projeto de seguidores solares, voltados para a substituição nesta usina, com as justificativas apresentadas neste trabalho.

Este trabalho será organizado de modo a demonstrar a evolução da energia fotovoltaica, os tipos de módulos fotovoltaicos, o atual cenário da energia fotovoltaica no Brasil com foco na usina de Tauá, o projeto de um seguidor solar e a influência de sua aplicação nessa usina.

1. O capítulo 1 trata da introdução ao tema e das justificativas e relevância da escolha do tema assim como a descrição do método utilizado para análise.
2. O capítulo 2 aborda uma revisão bibliográfica da história da energia fotovoltaica, e os tipos de usinas fotovoltaicas, assim como das células e módulos fotovoltaicos.
3. No capítulo 3 é apresentado o tipo de seguidor solar escolhido para projeto e concepção, incluindo-se as vantagens desta escolha.
4. No capítulo 4 será apresentado o projeto do equipamento, assim como os suportes para os módulos fotovoltaicos.
5. No capítulo 5 é abordada as conclusões com base no que foi pesquisado.

## Capítulo 2

### 2. Energia Solar Fotovoltaica

Este capítulo trata das questões relacionadas à energia solar fotovoltaica, iniciando por seu contexto histórico e abordando questões relacionadas aos tipos de usinas solares, bem como os tipos de células e módulos fotovoltaicos.

#### 2.1 Contexto Histórico.

Durante toda a história da humanidade, praticamente todos os povos agrários possuíam alguma espécie de adoração ao sol: os Astecas na América, os aborígenes da Oceania, os celtas da Europa, os povos da China e do antigo Egito. [2]

Gregos e romanos utilizaram-se daquilo chamado hoje de uso passivo do sol, utilização de elementos arquitetônicos para melhor aproveitar a luz e o calor solar no aquecimento de ambientes interiores. [2]

Ao longo de muitos anos, a tecnologia de utilização direta do sol como fonte de energia evoluiu lentamente. Em 1871, William Grylls Adams consegue produzir eletricidade expondo selênio à luz. Cinquenta anos depois, Albert Einstein ganhava o prêmio Nobel de Física por sua pesquisa no efeito fotoelétrico, o fenômeno básico da geração de energia por painéis fotovoltaicos. Em 1953, no Bell Laboratories, Estados Unidos, é criada a primeira célula solar capaz de produzir uma corrente mensurável. [2]

Em meados da década de 60, houve avanços na tecnologia para a utilização da energia proveniente do sol no dia a dia, uma energia limpa, com um baixo impacto ambiental durante a geração de energia. O baixo preço do petróleo, a comodidade já estabelecida por essa tecnologia e os interesses políticos envolvidos contribuíram para a desestimulação da ideia de utilizar-se da energia gratuita proveniente do sol.

A humanidade tornou-se tão dependente de combustíveis fósseis que somente o aumento do preço do petróleo em 1973, devido ao embargo das nações árabes no fornecimento, fez ressurgir o interesse mundial para as energias renováveis. Houve um investimento massivo em tecnologia solar, porém a subsequente queda do preço do petróleo impediu que as tecnologias solares se tornassem competitivas.

A consciência ecológica atual e o novo aumento do preço do petróleo em 2001 provocaram um aumento expressivo da indústria solar no Japão e na Alemanha, ressuscitando a atenção global na energia solar.

## 2.2 Definição

A energia solar ou a energia obtida do sol é a energia composta de ondas eletromagnéticas (fótons) que percorrem quase 150 milhões de quilômetros em aproximadamente 8 minutos para atingir a superfície terrestre. No sol, a fusão atômica é responsável por liberar essa energia, um gigantesco processo termonuclear que converte cerca de 650 milhões de toneladas de hidrogênio em hélio a cada segundo.

A irradiação solar é constante. A intensidade dessa radiação no nível da atmosfera, conhecida como constante solar é de  $1,367 \text{ kW/m}^2$ . Parte dessa radiação é refletida para a atmosfera, outra, absorvida em forma de calor, e uma terceira chega até a superfície terrestre, sendo uma parte refletida novamente para a atmosfera e outra parte absorvida conforme mostrado na Figura 1. A divisão entre reflexão, absorção e transmissão depende do estado da atmosfera. Durante 24h, a média mundial de energia irradiada é cerca de  $165 \text{ W/m}^2$ , mais do que 5 mil vezes a necessidade energética da humanidade atualmente. [3]

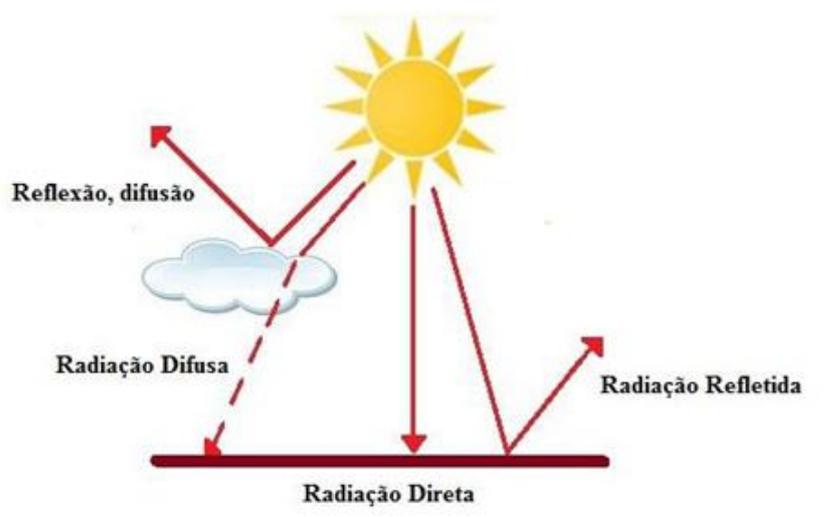


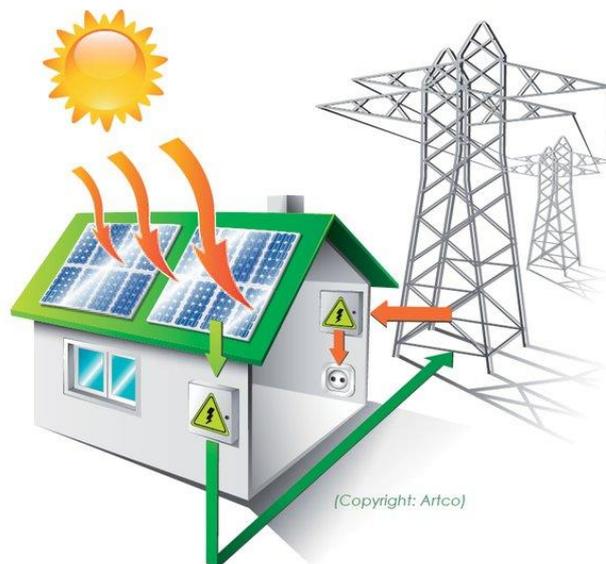
Figura 1: Divisão da Radiação Solar ao atingir a Terra [1]

Algumas usinas hidrelétricas utilizam o sol como energia renovável indiretamente, pois é sua energia que movimenta os ciclos da água e do vento. Ao utilizar-se o petróleo e o carvão, novamente utiliza-se o sol indiretamente, porém de forma não-renovável. Existem outras formas de energia que não dependem do sol, como por exemplo a energia nuclear (não renovável), a energia geotérmica e a energia das marés.

### 2.3 Tipos de Usinas Solares Fotovoltaicas

Muitas são as tecnologias para a utilização da energia solar, que pode ser usada, de maneira geral, como fonte direta para energia elétrica, como fonte para combustível solar (biomassa) ou como energia térmica.

As duas principais tecnologias em estudo atualmente são as usinas heliotérmicas e as usinas fotovoltaicas. Na geração fotovoltaica, a energia luminosa é convertida diretamente em energia elétrica como se pode observar na Figura 2. Nas usinas heliotérmicas, a produção de eletricidade acontece em dois passos: primeiro, os raios solares concentrados aquecem um receptor e, depois, este calor ( $350^{\circ}\text{C}$  -  $1000^{\circ}\text{C}$ ) é usado para iniciar o processo convencional da geração de energia elétrica por meio da movimentação de uma turbina, como pode ser visualizado na Figura 3.



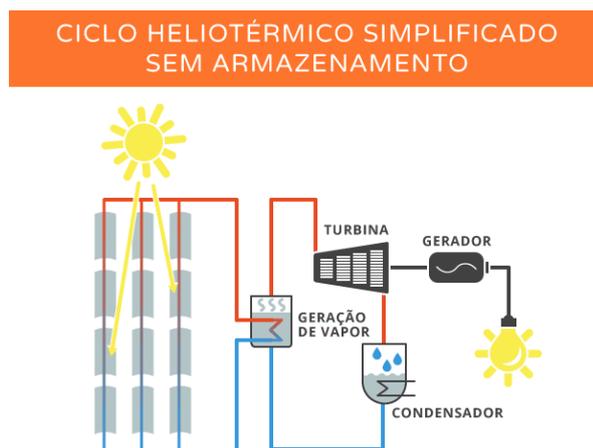
*Figura 2: Geração fotovoltaica [4]*

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o consumo de energia elétrica no Brasil vem crescendo cada vez mais, sendo que dobrou na última década, este crescimento vem ocorrendo devido ao aumento da atividade econômica. Até 2020 estima-se um aumento de 55,6% na demanda total, com um crescimento de 8,5% acima dos 47% registrados na última década.

No Plano Decenal de Expansão de Energia para 2020 da EPE, está previsto um aumento de 51% da capacidade instalada para atender a demanda, sendo que destes 51% (171.138 MW) 32.184 MW virão de usinas hidrelétricas, 8.857 MW de termoeletricas movidas a combustíveis fósseis, 1.405 MW de term nucleares e 18.009 MW de fontes alternativas, sendo estas: Eólica, Biomassa e pequenas centrais Hidrelétricas (EPE 2011<sup>a</sup>). [4]

Já uma usina heliotérmica é muito parecida com uma usina termoeletrica. A diferença é que, em vez de usar carvão ou gás como combustível, utiliza o calor do Sol para gerar eletricidade.

A grande vantagem da tecnologia heliotérmica é a possibilidade de armazenar energia em forma de calor. Assim, é possível gerar energia elétrica mesmo quando não há sol, em dias nublados ou durante a noite. Além disso, também é possível utilizar a tecnologia heliotérmica em conjunto com outros combustíveis, como a biomassa, o gás natural ou o carvão, para garantir a produção de energia a qualquer momento. [5]



*Figura 3: Ciclo de Usina Heliotérmica [5]*

## 2.4 Células e Módulos Fotovoltaicos

O efeito fotovoltaico foi descoberto pelo cientista francês Alexandre Edmond Becquerel em 1839, quando observou que ao iluminar uma solução ácida surgia uma diferença de potencial entre os eletrodos imersos nessa solução. [1]

Em 1876, W. G. Adams e R. E. Day observaram efeito similar em um dispositivo de estado sólido fabricado com selênio. Os primeiros dispositivos que podem ser denominados de células solares ou células fotovoltaicas foram fabricados em selênio e desenvolvidos por C. E. Frits em 1883. [1]

Nos anos 1950, ou seja, mais de 110 anos após a descoberta de Becquerel, foram fabricadas nos Laboratórios Bell, nos Estados Unidos, as primeiras células fotovoltaicas baseadas nos avanços tecnológicos na área de dispositivos semicondutores. Estas células fotovoltaicas foram fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino e atingiram uma eficiência de conversão de energia solar em elétrica, relativamente alta para a época, de 6%, com potência de 5 mW e área de 2 cm<sup>2</sup>. [1]

Diversas tecnologias de fabricação de células fotovoltaicas foram desenvolvidas nos últimos 60 anos e as células fotovoltaicas fabricadas a partir de lâminas de silício cristalino (monocristalino ou policristalino) dominam o mercado mundial atualmente. A Figura 2 mostra que esta tecnologia vem respondendo sempre por mais de 81% da produção mundial desde 2000, e em 2011 atingiu 87,9% deste mercado. As outras tecnologias comercializadas são baseadas em filmes finos de telureto de cádmio (CdTe), disseleneto de cobre índio e gálio (CIGS), silício amorfo hidrogenado (a-Si:H), silício microcristalino ( $\mu\text{c-Si}$ ) e silício crescido em fitas (Si-fitas). Células fotovoltaicas multijunção de alta eficiência, células baseadas em corantes (DSSC – Dye Sensitized Solar Cells) ou polímeros também estão sendo desenvolvidas. [1]

Formatado: Sobrescrito

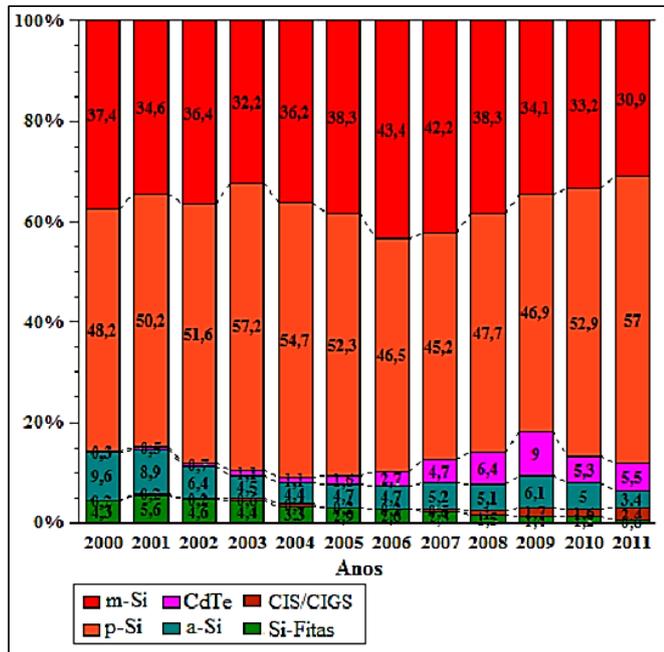


Figura 4: Distribuição das tecnologias usadas na produção industrial de células fotovoltaicas. Legenda: m-Si - silício monocristalino, p-Si - silício policristalino, CdTe - telureto de cádmio; a-Si - silício amorfo, CIS disseleneto de cobre índio, CIGS [1]

## 2.5 Princípios de Funcionamento da Célula Fotovoltaica

Existem na natureza materiais classificados como semicondutores, que se caracterizam por possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução “vazia” (sem elétrons) na temperatura do zero absoluto (0 K). Assim sendo, um semicondutor comporta-se como um isolante a 0 K. [1]

O semicondutor mais usado é o silício. Seus átomos se caracterizam por possuírem quatro elétrons que se ligam aos vizinhos, formando uma rede cristalina. Ao adicionarem-se átomos com cinco elétrons de ligação, como o fósforo, por exemplo, haverá um elétron em excesso que não poderá ser emparelhado e que ficará "sobrando", fracamente ligado a seu átomo de origem. Isto faz com que, com pouca energia térmica, este elétron se livre, indo para a banda de condução. Diz-se assim, que o fósforo é um dopante doador de elétrons e denomina-se dopante n ou impureza n. [6]

Se, por outro lado, introduzem-se átomos com apenas três elétrons de ligação, como é o caso do boro, haverá uma falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede. Esta falta de elétron é denominada buraco ou lacuna e ocorre que, com pouca energia térmica, um elétron de um sítio vizinho pode passar a esta posição, fazendo com que o buraco se desloque. Diz-se portanto, que o boro é um aceitador de elétrons ou um dopante p.

Se, partindo de um silício puro, forem introduzidos átomos de boro em uma metade e de fósforo na outra, será formado o que se chama junção pn. O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado n passam ao lado p onde encontram os buracos que os capturam; isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado p, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado n, que o torna eletricamente positivo. Estas cargas aprisionadas dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado n para o lado p; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado n.

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que o gap, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial ao qual chama-se de Efeito Fotovoltaico. Se as duas extremidades do "pedaço" de silício forem conectadas por um fio, haverá uma circulação de elétrons. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas. [6]

## 2.6 Tipos de Células

As células fotovoltaicas são fabricadas, na sua grande maioria, usando o silício (Si) e podendo ser constituída de cristais monocristalinos, policristalinos ou de silício amorfo.

As Células fotovoltaicas ou células solares são dispositivos com a particularidade de converterem a energia luminosa proveniente de qualquer fonte de luz, em energia elétrica. São usadas como geradoras de eletricidade ou também como

sensores de intensidade luminosa tendo em vista que a luz solar produz 1MegaWatt de energia por metro quadrado.

Em 1883 as primeiras células fotoelétricas foram construídas, por Charles Fritts, que cobriu o selénio semicondutor com uma camada extremamente fina de ouro, de modo a formar junções. Ao conjunto de células fotoelétricas chama-se de painel solar fotovoltaico cujo uso hoje é bastante comum em lugares afastados da rede eléctrica convencional. [7]

São descritos, a seguir, alguns tipos de células solares:

### 2.6.1 Células mono-cristalinas

Este tipo de célula fotovoltaica representa a primeira geração. O seu rendimento eléctrico é relativamente elevado (aproximadamente 16%, podendo subir até 23% em laboratório), mas as técnicas utilizadas na sua produção são complexas e caras.

Por outro lado, é necessária uma grande quantidade de energia no seu fabrico, devido à exigência de utilizar materiais em estado muito puro e com uma estrutura de cristal perfeita.

[L1] Comentário: Onde estão as fontes dessas informações?

### 2.6.2 Células poli-cristalinas

As células poli-cristalinas têm um custo de produção inferior por necessitarem de menos energia em sua fabricação, mas apresentam um rendimento eléctrico inferior (entre 11% e 13%, obtendo-se até 18% em laboratório). Esta redução de rendimento é causada pela imperfeição do cristal, devido ao sistema de fabricação.

### 2.6.3 Células de silício amorfo

As células de silício amorfo são as que apresentam o custo mais reduzido, mas em contrapartida o seu rendimento eléctrico é também o mais reduzido (aproximadamente 8% a 10%, ou 13% em laboratório). As células de silício amorfo são

películas muito finas, o que permite serem utilizadas como material de construção, tirando ainda o proveito energético.

#### **2.6.4 Células de silício monocristalino**

As células de silício monocristalino são historicamente as mais usadas e comercializadas como conversor direto de energia solar em eletricidade, e a tecnologia para sua fabricação é um processo básico muito bem constituído.

A fabricação da célula de silício começa com a extração do cristal de dióxido de silício. Este material é desoxidado em grandes fornos, purificado e solidificado. Este processo atinge um grau de pureza entre 98 e 99%, o que é razoavelmente eficiente sob o ponto de vista energético e seu custo. Este silício para funcionar como células fotovoltaicas necessita de outros dispositivos semicondutores e de um grau de pureza maior devendo chegar na faixa de 99,9999%.

Para se utilizar o silício na indústria eletrônica, além do alto grau de pureza, o material deve ter a estrutura monocristalina e baixa densidade de defeitos na rede. O processo mais utilizado para se chegar às qualificações desejadas é chamado “processo Czochralski”, pelo qual o silício é fundido juntamente com uma pequena quantidade de dopante, normalmente o boro que é do tipo p. Com um fragmento do cristal devidamente orientado e sob rígido controle de temperatura, vai-se extraindo do material fundido, um grande cilindro de silício monocristalino levemente dopado. Este cilindro obtido é cortado em fatias finas de aproximadamente 300  $\mu\text{m}$ .

Após o corte e limpeza de impurezas das fatias, devem-se introduzir impurezas do tipo n de forma a obter a junção. Este processo é feito através da difusão controlada, em que as fatias de silício são expostas a vapor de fósforo em um forno onde a temperatura varia entre 800 a 1000°C.

Dentro da gama de células fotovoltaicas, que utilizam o silício como material base, as monocristalinas são, em geral, as que apresentam as maiores eficiências. Um painel solar que use estas células solares obtidas com o processo descrito atinge uma eficiência de até 15% podendo chegar em 18% em células feitas em laboratórios.

### **2.6.5 Células Silício Policristalino**

As células de silício policristalino são mais baratas que as de silício monocristalino por exigirem um processo de preparação das células menos rigoroso. A eficiência, no entanto, cai um pouco em comparação as células de silício monocristalino.

O processo de purificação do silício utilizado na produção das células de silício policristalino é similar ao processo do Si monocristalino, o que permite obtenção de níveis de eficiência compatíveis. Basicamente, as técnicas de fabricação de células policristalinas são as mesmas na fabricação das células monocristalinas, porém com menor rigor de controle.

Podem ser preparadas pelo corte de um lingote, de fitas ou depositando-se um filme num substrato, tanto por transporte de vapor como por imersão. Nestes dois últimos casos só o silício policristalino pode ser obtido. Cada técnica produz cristais com características específicas, incluindo tamanho, morfologia e concentração de impurezas. Ao longo dos anos, o processo de fabricação tem alcançado eficiência máxima de 12,5% em escalas industriais.

### **2.6.6 Células de Silício Amorfo**

Uma célula de silício amorfo difere das demais estruturas cristalinas por apresentar alto grau de desordem na estrutura dos átomos. A utilização de silício amorfo em fotocélulas tem mostrado grandes vantagens tanto nas propriedades elétricas quanto no processo de fabricação.

Por apresentar uma absorção da radiação solar na faixa do visível e podendo ser fabricado mediante deposição de diversos tipos de substratos, o silício amorfo vem se mostrando uma forte tecnologia para sistemas fotovoltaicos de baixo custo. Mesmo apresentando um custo reduzido na produção, o uso de silício amorfo apresenta duas desvantagens: a primeira é a baixa eficiência de conversão comparada às células mono e policristalinas de silício; em segundo, as células são afetadas por um processo de degradação logo nos primeiros meses de operação, reduzindo assim a eficiência ao longo da vida útil. [7]

## Capítulo 3

### 3. Seguidor solar uni-axial

Os seguidores solares uni-axiais permitem alterar a direção do painel solar acoplado, como pode-se observar na Figura 5, fazendo com que sempre exista uma incidência perpendicular de radiação, com isso, obtém-se um maior ganho energético perante os painéis estáticos. Uma das principais usinas fotovoltaicas é a Usina de Tauá localizada no Ceará, esta é a primeira usina de Energia Solar da América Latina.



*Figura 5: Exemplo de parque solar utilizando seguidores solares*

#### 3.1 Vantagens

Durante o dia, do ponto de vista terrestre, o sol se encontra em movimento de leste a oeste pelo céu, a luz proveniente atinge a superfície em ângulos diferentes dependendo do horário do dia. O seguidor solar garante que os raios solares serão sempre perpendiculares ao painel fotovoltaico, aumentando assim a eficiência do conjunto, de acordo com os gráficos mostrados na Figura 6 e Figura 7.

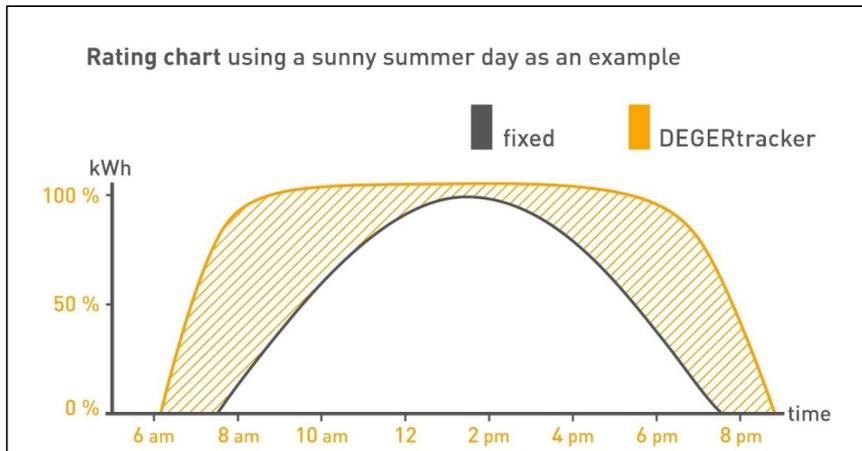


Figura 6: Comparação de rendimentos entre painéis solares estáticos e com seguidores

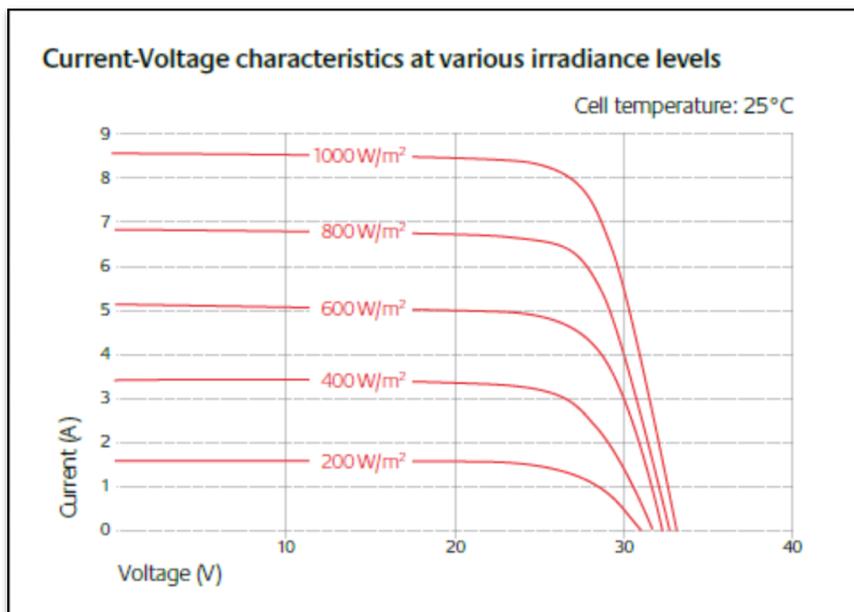


Figura 7: Variação da corrente elétrica gerada de acordo com a incidência de radiação

O gráfico da Figura 6 permite a visualização da diferença entre o uso de painéis fixos e um seguidor solar (nesse caso específico, o modelo DEGERtracker) no que se refere ao ganho de energia (kWh) produzidos durante o dia em um determinado local. Percebe-se que a curva característica de produção de energia comporta-se quase que linearmente durante boa parte do dia se estiver em uso um seguidor solar enquanto a curva aproxima-se de uma parábola para um painel fixo.

Já partir do gráfico da Figura 7, pode-se perceber que a corrente elétrica gerada por um painel solar não se comporta linearmente proporcional à incidência de luz solar, podendo-se concluir que a eficiência de produção de energia solar depende também de quão maior é a incidência solar.

Sendo assim um seguidor solar é capaz de representar ganhos em duas vias, ao aumentar a incidência de luz solar sobre o painel e ao aumentar também a eficiência do mesmo.

### 3.2 Projeto de um seguidor solar uni-axial: concepção inicial

O presente projeto consiste em um longo eixo quadrado sobre o qual os painéis serão fixados, com hastes para fixação e sustentação, possuindo um motor no fim da linha para movimentar os painéis. A Figura 8 esboça a concepção do painel solar sustentado pelo eixo e o movimento desejado para este.

**[L2] Comentário:** Se o projeto é relato do que foi feito. Usar o tempo verbal no futuro não faz sentido. Sugiro explicar usando uma linguagem mais clara. Pode-se narrar dizendo que a concepção inicial foi...usando-se.... Em seguida, a partir da análise disto e daquilo, introduziu-se uma alteração em ... e por aí vai.

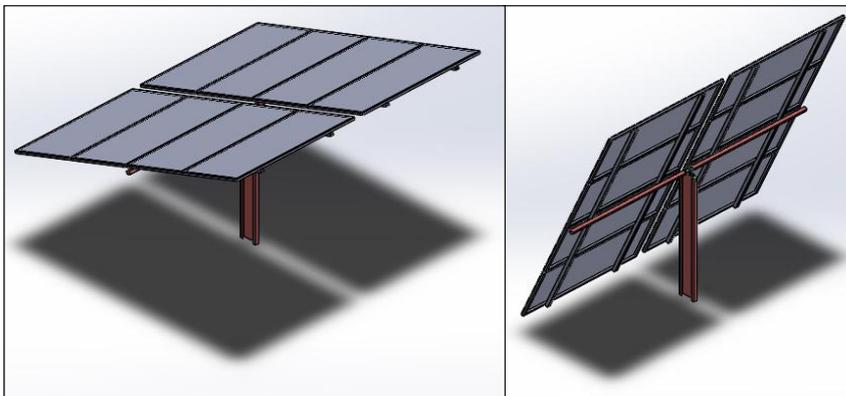
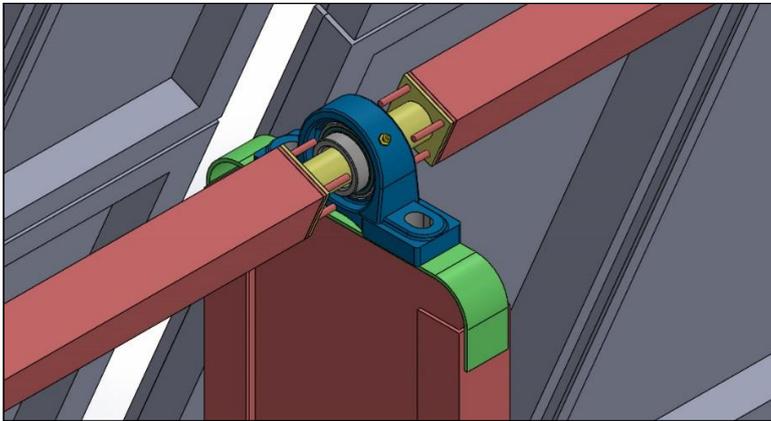


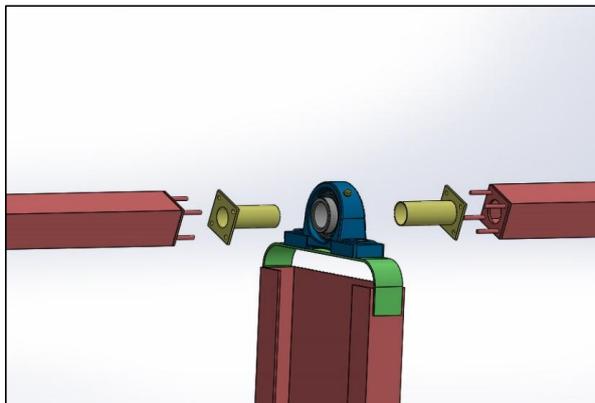
Figura 8: Concepção inicial do Seguidor Solar

*Figura 9: Detalhe do rolamento*



Além do demonstrado acima, havia a ideia de uma estrutura na base do suporte para auxiliar no alinhamento do conjunto, visto que é essencial para o correto funcionamento do motor.

Para permitir que o eixo quadrado tenha livre rotação sobre o suporte, foram criados dois tubos cilíndricos, presos através de flanges ao tubo quadrado, esses dois tubos cilíndricos se encaixam entre si via rosca, conforme demonstrado na Figura 10.



*Figura 10: Vista explodida do conjunto do rolamento*

**[L3] Comentário:** Aqui ficou uma lacuna. Começou de um comentário sobre concepção e saiu direto para a usina de Tauá.

### 3.3 Usina de Tauá

A Usina de Tauá é a primeira usina de Energia Solar da América Latina e entrou em operação no dia 4 de agosto de 2011. A usina está localizada no município de Tauá, no Sertão dos Inhamuns, e começou a operar com capacidade inicial de 1 MW, o suficiente para suprir de energia 1,5 mil famílias. O Ceará é considerado um estado que está à frente dos outros no Brasil no que diz respeito à energia sustentável, já que também conta com o primeiro parque de Energia Eólica.

A usina é resultado do trabalho do Grupo EBX em parceria com a prefeitura e com o governo do Estado. Em um primeiro momento, a empresa recebeu investimentos de cerca de R\$10 milhões e o mesmo montante foi investido para que a Usina passasse a operar com capacidade de 2 MW. A planta solar de Tauá, possui autorização da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) e licença da Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará (SEMACE) para expandir sua capacidade até 5 MW.

A MPX Tauá ocupa uma área de 12 mil metros quadrados e conta com 4.680 painéis fotovoltaicos, que absorvem a luz do sol para transformação em energia elétrica. O projeto concebido pela MPX abrange uma expansão para a usina solar chegar a 50 MW em um estágio final. Quando essa potência for atingida, 234 mil painéis serão necessários.

A Usina também mantém uma parceria com a Universidade Estadual do Ceará (UECE) para o monitoramento e análise dos dados obtidos na operação, o que orienta a expansão do empreendimento. Dados emitidos pela estação meteorológica da usina são transferidos, em tempo real para os computadores da Universidade. Com essas atividades, estudantes da UECE são capacitados na área de energia solar. [8]

A usina solar de Tauá fechou 2014 com uma produção de 1514,54 MWh de energia. Esse montante é suficiente para abastecer, durante um ano, uma cidade como Guaramiranga com suas cerca de 1.100 residências, considerando o consumo médio de 150 kWh/mês. Desde o início de sua operação, em julho de 2011, já foram gerados cerca de 5.500 MWh. Localizada em município homônimo no Ceará, Tauá foi a primeira usina solar em escala comercial do País a integrar o Sistema Interligado Nacional (SIN). [9]

### 3.4 Posição do Sol

Apesar da aparente simplicidade, o cálculo preciso da posição solar é uma tarefa bastante difícil. O aparente movimento do sol é sujeito a um alto número de variáveis e perturbações: precessão e nutação da rotação do eixo da terra, perturbações causadas pela lua, a diminuição da velocidade de rotação da terra e o efeito dos outros planetas. Todos esses fatores alteram o cálculo de maneiras diferentes.

Diversos algoritmos para computar a posição solar com diferentes níveis de precisão e complexidade podem ser encontrados na literatura de engenharia solar. Fórmulas simples (Cooper, 1969; Spencer, 1971; Swift, 1976; Lamm, 1981) que determinam a declinação ou a equação do tempo geralmente oferecem erros da ordem de décimos de grau. Um algoritmo mais complexo foi proposto por Pitman e Vant-Hull (1978), com um erro máximo de  $0,02^\circ$ ; alguns anos depois Walraven publicou outro algoritmo (Walraven, 1978) com um erro de  $0,013^\circ$ , seguido de correções e comentários (Walraven, 1979; Archer, 1980; Wilkinson, 1981; Ilyas, 1983; Pascoe, 1984). Outro algoritmo foi proposto por Michalsky 10 anos mais tarde (Michalsky, 1988); baseado no Almanaque Astronomico (1985), e reduz o erro máximo para  $0,01^\circ$ . Dois outros algoritmos com erros menores, mas também com menor intervalo de datas válido, foi proposto nos anos seguintes (Blanco-Muriel et al., 2001; Grena, 2008). Todos esses algoritmos possuem implementações relativamente simples e baixa complexidade computacional. [10]

#### 3.4.1 Determinação da posição do sol na Usina de Tauá

Para exemplificar como seriam utilizados esses algoritmos no sistema de controle do seguidor, foram incluídos os dados referentes à usina de Tauá em um software já existente, no entanto, em uma usina real um programa próprio calcularia em tempo real qual a inclinação ótima dos seguidores.

Através do website cartográfico Google Maps, foi possível obter precisamente a latitude e longitude da Usina de Tauá (Figura 11: **Localização da usina de Tauá**), e utilizando o software Sun Earth Tools é possível descobrir com exatidão a posição do sol em cada momento durante qualquer dia (Figura 13).



Figura 11: Localização da usina de Tauá

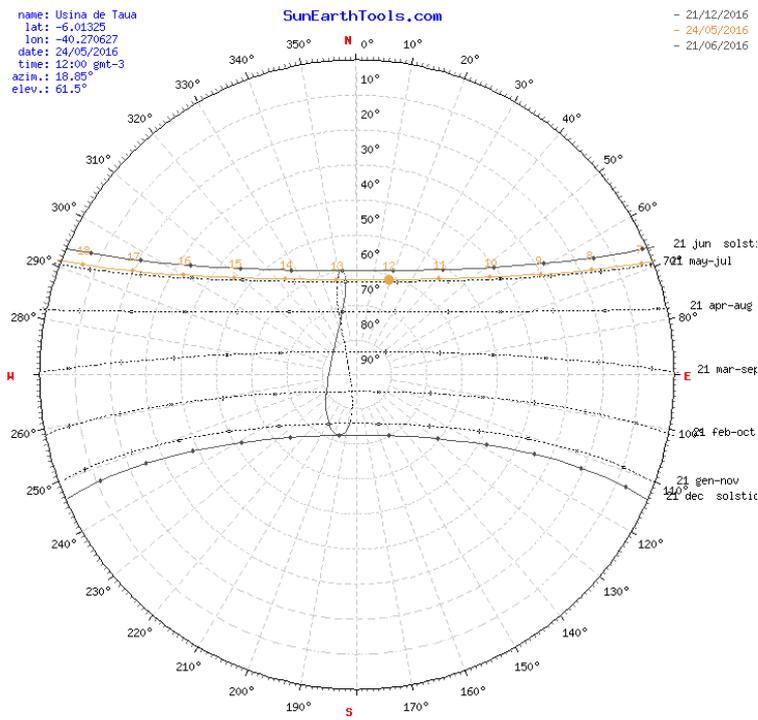
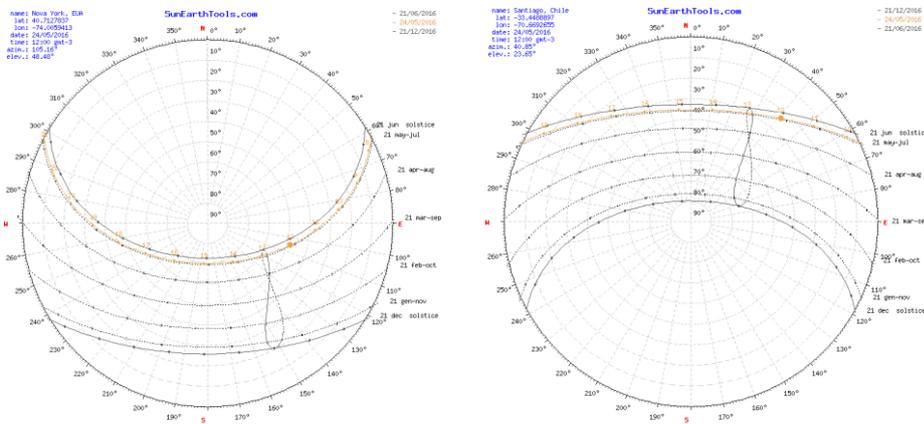


Figura 12 Gráfico Polar para a posição solar em Tauá



**Figura 13** Gráfico Polar para a posição solar em Nova York, EUA e em Santiago, Chile respectivamente [Software SunEarthTools]

Para comparação, foram incluídos outros dois gráficos polares de cidades situadas mais afastadas do equador (**Figura 13**).

Na tabela abaixo, mostra-se a elevação e o azimute do sol calculados para o dia 10 de junho de 2016, em Tauá.

**Tabela 1:** Azimute do sol em Taurá - CE

<b>Data:</b>	10/06/2016   GMT-3	
<b>coordenar:</b>	-6.01325, -40.270627	
<b>local:</b>	Caminho, Tauá - CE, 63660-000, Brasil	
<b>Hora</b>	<b>Elevacao</b>	<b>Azimute</b>
06:47:15	-0.833°	66.9°
7:00:00	2.08°	66.56°
8:00:00	15.64°	63.99°
9:00:00	28.8°	59.51°
10:00:00	41.16°	52.02°
11:00:00	51.91°	39.37°
12:00:00	59.27°	18.53°
13:00:00	60.53°	350.94°
14:00:00	55.05°	327°
15:00:00	45.23°	311.75°
16:00:00	33.31°	302.75°
17:00:00	20.37°	297.37°
18:00:00	6.93°	294.21°
18:34:04	-0.833°	293.13°

## Capítulo 4

### 4. Construção do Seguidor solar

Detalha-se neste capítulo a construção do seguidor solar idealizado ao longo deste projeto, a partir da separação dos elementos que o compõem e suas justificativas. Com o intuito de exemplificar e permitir a visualização do seguidor solar em funcionamento foi utilizado o software de CAD (Computer Aided Design) Solidworks®.

#### 4.1 Aspectos Gerais

O projeto da máquina tem como objetivo o melhor aproveitamento da incidência dos raios solares para geração de energia elétrica. Seu funcionamento baseia-se na movimentação de um conjunto de placas solares apoiadas sob um eixo giratório. Este eixo liga-se a um motor que gera a força motriz necessária para a movimentação do conjunto.

O projeto foi subdividido em cinco partes de construção, os painéis solares, os suportes, os eixos, o sistema motor e os elementos complementares, como pode ser visualizado na Figura 14 e Figura 15.

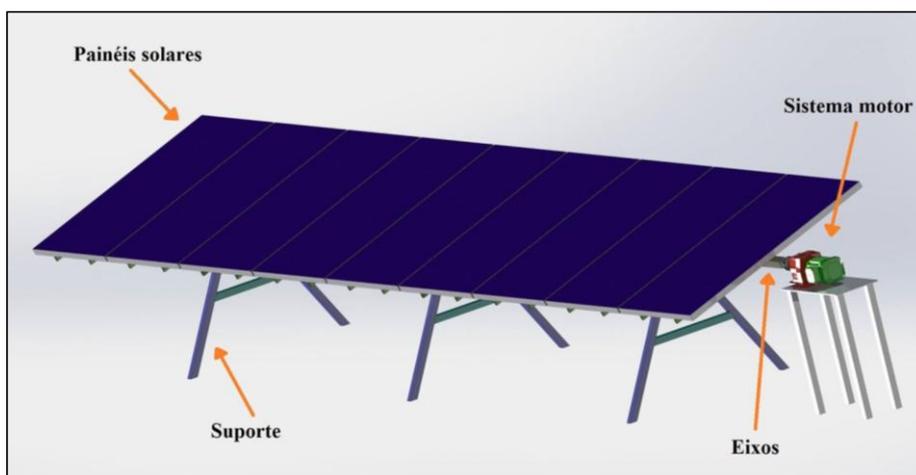
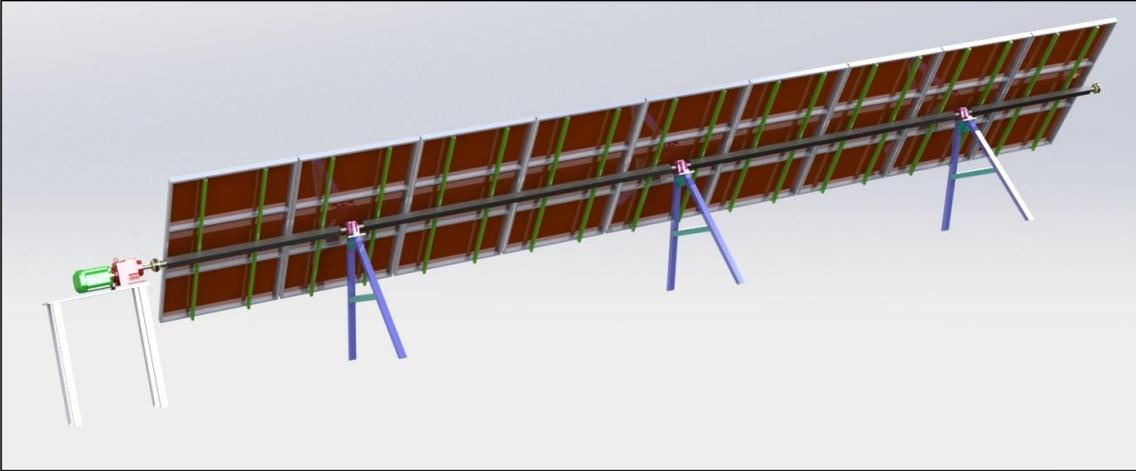


Figura 14: Elementos do seguidor solar



*Figura 15: Seguidor solar invertido*

#### **4.2.1 Painéis Solares**

A escolha dos painéis solares neste projeto teve como motivação a melhor relação entre área e energia solar captada, sem extrapolar, até certo ponto, seu comprimento para que não fossem criadas sombras sobre as fileiras seguintes.

Tendo estas premissas foi escolhido o modelo KB260 da fabricante KYOCERA®, com detalhes no ANEXO 1. Este painel foi ilustrado na Figura 16 a seguir.



*Figura 16: Painel Solar*

### 4.1.2 Suportes

Os suportes foram projetados com um ângulo de  $30^\circ$  a fim de aumentar a resistência ao vento do conjunto tendo em vista que o projeto tem como base a comparação com a usina de Tauá, no Ceará, onde existe a incidência de ventos fortes.

Para o seu dimensionamento foi considerado o peso dos painéis solares e dos eixos como pode ser visto em detalhe no APENDICE A e as cargas de vento detalhadas no APENDICE D. A Figura 17 ilustra o suporte. A fixação no solo é feita através de chumbadores ligando os pés da estrutura triangular do suporte a estrutura de fundação instalada no local.



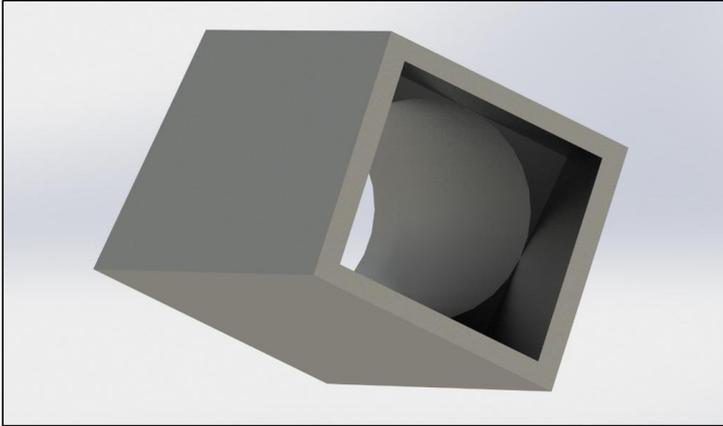
*Figura 17: Suporte em V*

### 4.1.3 Eixos

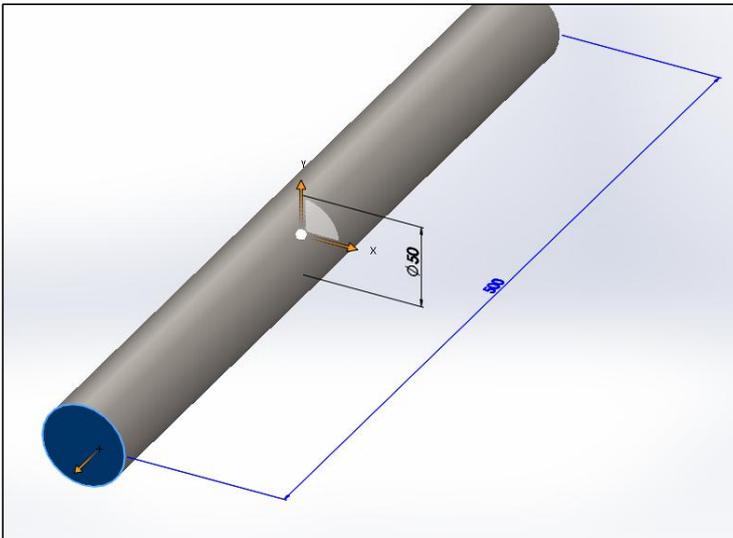
Os eixos têm função dupla nos seguidores solares, além de permitirem o movimento rotatório proporcionado pelo motor, funcionam como parte do apoio ligado às placas solares como pode ser visto na Figura 18 e Figura 19.

Na Figura 13 visualiza-se em corte que o eixo quadrado tem em suas extremidades uma seção maciça e circular para acoplamento ao eixo redondo.

Seu dimensionamento deu-se com base no peso dos painéis solares apoiados sobre eles, sua memória de cálculo pode ser vista no APENDICE C.



*Figura 18: Eixo Quadrado*

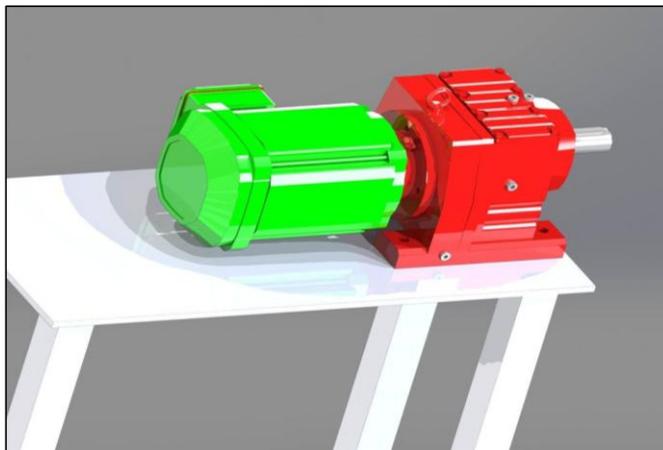


*Figura 19: Eixo Cilíndrico*

#### 4.1.4 Sistema Motor

O sistema motor tem como objetivo gerar o movimento necessário para movimentar os painéis solares através do eixo guia durante as horas de sol disponíveis para geração de energia elétrica.

Os elementos que compõem o sistema motor são: motor, moto redutor, base do motor e variador de frequência. A Figura 20 exhibe os elementos em conjunto.



*Figura 20: Sistema Motor*

O motor elétrico escolhido é um W22 IR2 da marca WEG® é capaz de rotacionar o eixo com até vinte conjuntos de seguidores solares interligados, sendo capaz de alcançar a sua rotação máxima em poucos segundos. Seu dimensionamento encontra-se no APENDICE B, outras informações podem ser visualizadas no catálogo no ANEXO II A Figura 21 ilustra o motor escolhido.



*Figura 21: Motor*

Devido à baixíssima rotação requisitada pelos painéis solares o moto redutor torna-se um elemento essencial para este projeto pois permite a redução da rotação de saída do motor elétrico. O moto redutor escolhido é um redutor coaxial WCG20C00 da marca WEG CESTARI® e a Figura 22 exemplifica suas características. Seu catalogo encontra-se no ANEXO III com dados adicionais.



*Figura 22: Motoredutor acoplada ao motor.*

Além do uso de um moto redutor fez-se necessário a utilização de um variador de frequência para permitir trabalhar em frequências mais baixas do motor e também a

automação do sistema para o funcionamento nos horários corretos do dia. O modelo escolhido foi o WEG® CFW500, exibido na Figura 23.



*Figura 23: Variador de Frequência*

#### **4.1.5 Elementos Complementares**

Os elementos complementares auxiliam na integração de todos os outros elementos e são compostos por: acoplamentos elásticos e mancais.

Os mancais servem como o elemento de ligação e rotação entre o suporte e o eixo ligado ao motor, através dele o movimento ocorre com baixas perdas por atrito. O mancal escolhido tem rolamento do tipo esferas de polímero por ter baixo custo por ciclo e não necessitar de manutenção, o que é muito importante para a redução do custo da energia solar. O mancal escolhido tem rolamento modelo BB-6010-B180-10-ES\* da marca IGUS® com esferas de polímero, informações complementares encontram-se no catálogo ANEXO IV. A Figura 24 ilustra o tipo de rolamento escolhido. Os rolamentos foram selecionados a partir da rotação máxima aceitável pelo fabricante e as dimensões dos eixos.



*Figura 24: Rolamentos de esferas de polímero*

O acoplamento flexível foi escolhido por auxiliar a absorção do torque exercido pelo motor elétrico e para permitir alterações de até sete graus de inclinação no terreno por conjunto de seguidor solar, permitindo a instalação numa gama maior de locais sem a necessidade de aplainamento total do terreno. A Figura 25 ilustra o acoplamento escolhido, informações complementares no ANEXO V. Os acoplamentos elásticos foram selecionados conforme a rotação máxima e a dimensão máxima para acoplamento do eixo conforme o catálogo em anexo.



*Figura 25: Acoplamento elástico*

#### 4.1.6 Lubrificação e Proteção Contra Intempéries

A escolha dos componentes que compõem o seguidor solar foi feita visando a ausência de lubrificação com o intuito de reduzir o custo com manutenção para reduzir o custo de produção de energia. O rolamento do mancal é produzido em esferas de polímeros não requisitando lubrificação. O acoplamento elástico escolhido também não requer lubrificação diminuindo o custo com manutenção.

A proteção contra intempéries é dada pela aplicação de pintura sobre todos os componentes da máquina sujeitos a corrosão. A pintura se dá em três etapas, primeiro o jateamento ou escovação para a limpeza da superfície, a segunda etapa é a aplicação de pintura primer anticorrosiva que possibilita a aderência da tinta final da terceira etapa.

#### 4.1.6 Montagem

A montagem é feita em duas etapas, a etapa 1 é feita na fabricação dos componentes e a etapa 2 é realizada em campo para facilitar o transporte do equipamento.

Etapa 1: Fabricação e montagem dos componentes descritos nos desenhos técnicos seguindo as seguintes etapas:

- Fabricação e soldagem dos itens 1, 2, 3 e 4 conforme detalhado na folha 3 de desenhos.
- Fabricação do item 1 (Base do motor) da folha 13 conforme os desenhos das folhas 14 e 15.
- Fabricação dos demais itens listados nos desenhos sem a fixação por soldagem ou parafusos que serão realizadas em campo.

Etapa 2: Soldagem e montagem dos componentes em campo:

- Construção da fundação em campo para a fixação do suporte (item 1 da folha 2) seguindo as distâncias indicadas na folha 2 e 3 dos desenhos.
- Posicionamento dos suportes que foram fabricados (item 1 da folha 2) na fundação e fixação dos mancais conforme folha 3 dos desenhos.
- Posicionamento e soldagem dos eixos (item 1 a 4 da folha 8) nos mancais dos suportes conforme o desenho da folha 8.
- Com os eixos montados posicionar e soldar os apoios do painel (item 5 da folha 8) conforme o desenho da folha 8.
- Fixar os painéis solares (item 4 da folha 2) nos apoios dos painéis solares conforme o posicionamento indicado no ANEXO I.

Montar o sistema motor conforme o desenho da folha 13, fixando o motor em uma das extremidades do acoplamento elástico e o eixo em sua outra extremidade.

## 4.2 Resultados Esperados

Na Usina de Tauá foram utilizados 4680 painéis da fabricante japonesa Kyocera e o modelo de painel utilizado é o KD215GH-2PU [11]. O material utilizado nas células fotovoltaicas é o silício policristalino. Cada painel com potência individual de 215Wp. Para calcular a potência do painel são utilizados os valores elétricos sob condições de teste padrão (STC), que contemplam uma irradiação de 1.000 W/m<sup>2</sup>, temperatura da célula à 25° C e massa de ar (AM) 1,5 em uma escala de 0 a 1,5. Para estas condições verifica-se que a potência nominal de cada painel é de 215 Wp, a tensão à potência nominal é de 26,6 V e a corrente à potência nominal é de 8,09 A.

Se for considerado que ao se utilizar o seguidor solar em detrimento às estruturas fixas haveria, durante todo o período do dia, de 6h às 18hs, radiação solar suficiente para gerar uma potência individual de 215 Wp/painel pode-se afirmar que, para 4680 painéis em condições de teste com 12h de incidência máxima diária teria-se uma potência total de 1006200 Wp, no período de 365 dias obtem-se, aproximadamente, 4,40 GWh/ano, situação que se aplicaria apenas a uma realidade virtual e quase ideal de produção sob condições de teste padrão.

A nível de comparação, segundo dados obtidos em [11] a produção média anual de Tauá é de 1,56G Wh/ano, onde os painéis são fixos.

No entanto, este é um caso real onde há variação da incidência solar durante o dia e durante o ano, variação das condições climáticas, além do possível aquecimento dos painéis, diminuindo sua eficiência, devido à uma maior captação da radiação solar. Essas condições alterariam as variáveis das condições de teste padrão, com isso, o aumento na captação de energia seria muito menor do que idealizado para condição de teste acima. Ainda assim, segundo [12], o seguidor solar uniaxial apresenta um ganho que pode variar de 10% a 20% se comparado ao sistema de uma usina solar fixa. Se fosse aplicado o seguidor solar na Usina da Tauá, considerando-se, apenas, um ganho mínimo de 10% em relação aos painéis fixos, poderia ser obtida uma produção de aproximadamente 1,72GWh/ano.

Segundo dados da Coelce (Companhia Energética do Ceará) a tarifa de energia elétrica para residências é de 0,70182 R\$/KWh [12]. Caso toda a energia gerada a mais pela utilização de seguidores solares fosse fornecida à população a receita gerada seria de aproximadamente  $1,72 - 1,56 = 0,16 \times 10^9$  Wh/ano  $\times 0,7182 \times 10^{-3}$  R\$/Wh = R\$114.912,00 por ano. Se esse valor fosse aumentado, compativelmente, com a capacidade de expansão futura de 50MWh da usina a receita aumenta para R\$ 5.745.600,00 ao ano. Esse valor representa a receita obtida pela companhia distribuidora de energia, mas a receita da companhia fornecedora é menor. Devem ser considerados ainda os custos de aplicação dos seguidores, operação, manutenção e impostos para um futuro estudo de viabilidade econômico-financeira. Portanto, se for considerado o retorno financeiro e que a energia solar é uma fonte de energia renovável, a aplicação do seguidor solar torna-se uma vantagem nesse tipo de sistema.

## Capítulo 5

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões obtidas na elaboração do projeto, resultados esperados e sugestões para projetos futuros.

### 5.1 Conclusão

Para a concepção do seguidor solar projetado neste documento foi utilizado como premissa a economia no custo de fabricação, instalação e manutenção do projeto. A partir disto foram propostos os conceitos de materiais que dispensassem o uso de lubrificantes aliando alta resistência a corrosão, baixo atrito e peso reduzido. Também foi idealizado a utilização de conexões que permitissem a adaptação a terrenos com diferenças de nivelamento para reduzir o custo de preparação do ambiente.

Ao fim do projeto foi comparado o ganho teórico de implementação do projeto avaliando um ganho de até 20% na produção de energia elétrica solar na usina de Tauá, que permitiria o fornecimento de até 1800 famílias, aliado a um baixo custo de manutenção.

Como sugestão para trabalhos futuros propõem-se o estudo da redução de aparato motor nas linhas de seguidor, através da interligação das linhas, com o intuito de reduzir ainda mais o custo com manutenção e aparato mecânico, tendo em vista que este projeto constatou que não há requisito de um motor de grande porte em uma fileira de seguidores devido a baixíssima rotação requisitada de projeto.

## Bibliografia

- [1] “Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica (CRESESB/CEPEL),” *“Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos”*, Março de 2014.
- [2] E. BROWN, “An introduction to Solar Energy,” p. Disponível em <http://www.ccs.neu.edu/home/feneric/Papers/solar.pdf> [Acesso em Novembro de 2015], 1988.
- [3] “Deserts Dessertec Whitebook,” *Clean Power from*, pp. Disponível em [http://www.desertec.org/fileadmin/downloads/DESERTEC-WhiteBook\\_en\\_small.pdf](http://www.desertec.org/fileadmin/downloads/DESERTEC-WhiteBook_en_small.pdf) [Acessado em Novembro 2015], Alemanha, 2009.
- [4] “Elite Engenharia.,” *O Quadro Energetico Brasileiro.*, pp. Disponível em: <http://www.eliteengenharia.com/noticias/o-quadro-energetico-brasileiro/>.
- [5] “Energia Heliotérmica,” *Como funciona*, pp. Disponível em : <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/energia-heliotermica/como-funciona>.
- [6] “Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB),” *Energia Solar: Princípios e Aplicações*, 2006.
- [7] “Portal de Energias Renováveis,” *Principais tipos de células fotovoltaicas constituintes de painéis solares*, pp. Disponível em: <http://www.portal-energia.com/principais-tipos-de-celulas-fotovoltaicas-constituintes-de-paineis-solares/>.
- [8] “Governo de Ceará.,” *Primeira Usina de Energia Solar é inaugurada no Ceará*, pp. Disponível em: <http://www.ceara.gov.br/sala-de-imprensa/noticias/3941-primeira-usina-de-energia-solar-e-inaugurada-no-ceara>, 2011.
- [9] “Jornal Ceará Agora,” *Usina solar de Tauá gera mais de 1500 MWh em 2014*, pp. Disponível em: <http://www.cearaagora.com.br/site/2015/01/usina-solar-de-taua-gera-mais-de-1500-mwh-em-2014/>, 2015.
- [10] J. P. Justiniano, “Solar Energy Research,” 11 Julho 2011. [Online]. Available: <https://jpjustiniano.wordpress.com/2011/07/11/where-is-the-sun-solar-position-algorithms/>. [Acesso em 12 Maio 2016].
- [11] B. B. Beigelman, “A energia solar fotovoltaica e a aplicação na usina solar

- de Tauá,” 2013.
- [12] H. Mousazadeh, “A review of principle and sun-tracking methods for maximizing,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1800-1818, 2009.
- [13] “Companhia Energética do Ceará,” *Tarifas Vigentes*, p. Disponível em: <https://www.coelce.com.br/sobrecoelce/tarifas.aspx>.
- [14] B. B. Beigelman, *A ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E A APLICAÇÃO*, Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.
- [15] COELCE, “Tarifas,” 12 Maio 2016. [Online]. Available: <https://www.coelce.com.br/sobrecoelce/tarifas.aspx>. [Acesso em 12 Maio 2016].
- [16] R. Hibbeler, *Resistência dos Materiais*, São paulo: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [17] J. E. Shigley, *Projeto de Engenharia Mecânica*, Porto Alegre: Bookman, 2005.
- [18] WEG, *Catálogo de Motores W22 WEG*, Jaraguá do Sul.
- [19] W. *Motores, Catálogo de Inversor de Frequência*, Jaraguá do Sul..
- [20] SKF, *Catálogo de Mancais de Rolamento*.

## APÊNDICE A: Cálculo de resistência das pernas dos suportes

A partir da análise do seguidor solar, em posição estática, com os painéis em posição horizontal e considerando o peso dos painéis solares e dos eixos chega-se ao diagrama de corpo livre indicado na Figura 26 e Figura 27.

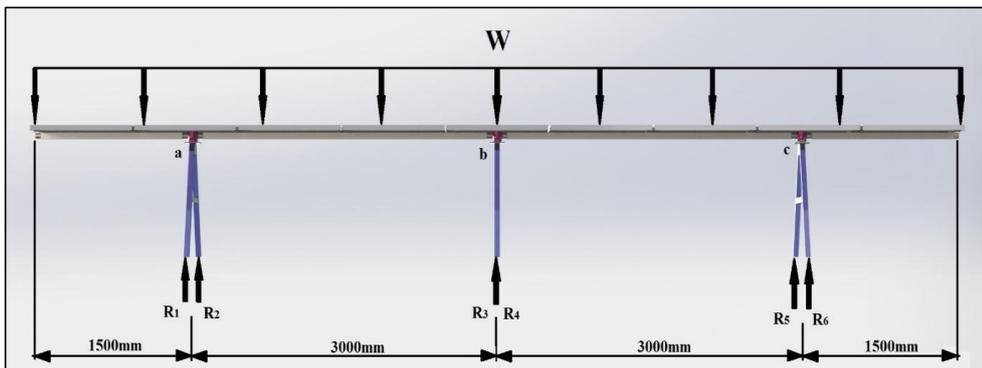


Figura 26: Forças e reações

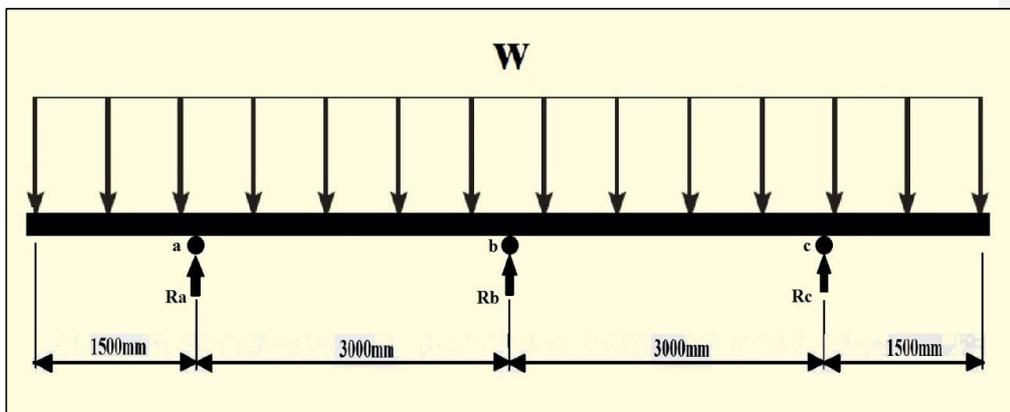


Figura 27: Diagrama de corpo livre seguidor

Considerando a força  $F$ , relativa ao peso que os suportes devem resistir, e a inclinação das pernas dos suportes em relação ao eixo vertical chega-se ao modelo abaixo: [15]

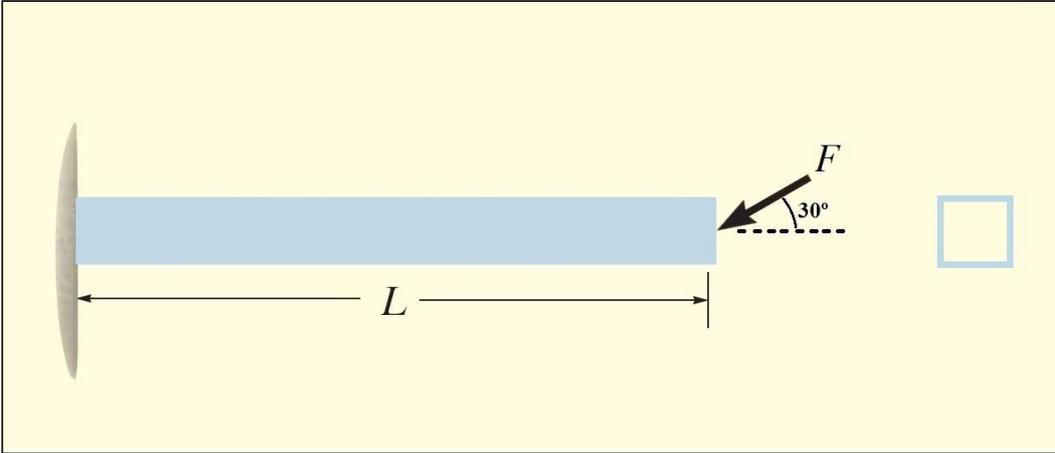


Figura 28: Modelo da perna do suporte

Por tratarem-se de 3 suportes com duas pernas cada suportando o peso dos painéis solares e eixos tem-se:

$$F = \frac{m \cdot g}{6} \quad (1)$$

$$\epsilon F_y = 0; \quad (2)$$

$$M_{\max} = F_{\text{sen } 30^\circ} \cdot L \quad (3)$$

$$V_{\max} = F_{\text{sen } 30^\circ} \quad (4)$$

$$N = F_{\text{cos } 30^\circ} \quad (5)$$

Portanto para o perfil quadrado da perna do suporte com espessura  $e$  e lado  $x$  é possível calcular que:

$$\sigma_{\text{med}} = \frac{N}{A} \quad (6)$$

$$\sigma_{\text{flex}_{\max}} = \frac{My}{I} = \frac{6 \cdot F_{\text{sen } 30^\circ} \cdot L \cdot x}{(x^4 - (x - 2e)^4)} \quad (7)$$

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{It} \quad (8)$$

$$Q_c = 2e^3 - \frac{5e^2x}{2} + ex^2 \quad (9)$$

$$\tau_c = \frac{6 F_{sen30^\circ} Q_c}{(x^4 - (x - 2e)^4) \cdot t} \quad (10)$$

Onde  $Q_c$  é a simplificação de  $Q$  para um ponto  $c$  posicionado no eixo horizontal que corta ao meio a seção do perfil quadrado onde o  $\tau$  é máximo.

Para  $x = 0,05 \text{ m}$  e  $e = 0,005 \text{ m}$  e  $L = 1,15 \text{ m}$  tem-se que:

$$\sigma_N = 0,48 \text{ MPa} \quad (11)$$

$$\sigma_{flex_{max}} = 23,4 \text{ MPa} \quad (12)$$

Pelo princípio da superposição [16] tem-se que:

$$\sigma_x = 23,88 \text{ Mpa} \quad (13)$$

$$\tau_{max} = 0,79 \text{ MPa} \quad (14)$$

Pela teoria da tensão de cisalhamento máxima para um material com limite de escoamento ( $f_y$ ) de 250 MPa tem-se:

$$\tau_{max} = f_y/2 \quad (15)$$

$$\tau_{max} = 125 \text{ Mpa} \quad (16)$$

Portanto o material passa no critério da tensão de cisalhamento máxima.

Aplicando-se a teoria da energia de distorção máxima, ou teoria de Von Mises, em termos das tensões normais e das tensões cisalhantes em três planos ortogonais pode ser expresso da seguinte forma:

$$\sigma_{eq}^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)] \quad (17)$$

Para o caso estudado onde  $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{xz} = 0$ , é possível rescrever a equação como:

$$\sigma_{eq} = (\sigma_x^2 + 3\tau_{xy}^2)^{1/2} \quad (18)$$

Entretanto no caso estudado o ponto onde  $\sigma_x$  é máximo tem  $\tau_{xy} = 0$ , sendo assim a equação é reescrita como:

$$\sigma_{eq} = \sigma_x \quad (19)$$

Assim para um suporte feito em aço carbono ASTM A36 com limite de escoamento ( $f_y$ ) de 250 MPa chega-se ao fator de segurança:

$$n = \frac{f_y}{\sigma_x} \quad (20)$$

$$n = 10,5 \quad (21)$$

## APÊNDICE B: Cálculo para dimensionamento do motor

Com o auxílio do software Solidworks<sup>®</sup> foi possível extrair os seguintes dados:

*Tabela 2: Dados do seguidor solar*

<b>Massa do conjunto [kg]</b>	m = 307
<b>Momento de Inércia [kg.m<sup>2</sup>]</b>	I = 49.2

O motor especificado deverá ser capaz de movimentar o seguidor solar pelo percurso de 90° em 5 (cinco) segundos, mais do que necessário durante o funcionamento de trabalho, obtendo-se:

$$w = 0.31 \frac{rad}{s} \quad (22)$$

Tendo a velocidade angular especificada deve-se definir a aceleração angular desejada a partir do conceito que o motor deverá alcançar sua rotação máxima em 1 segundo.

$$\alpha = \frac{\Delta w}{\Delta t} \quad (23)$$

$$\alpha = 0,31 \frac{rad}{s^2} \quad (24)$$

Com estes dados foi possível calcular o Torque e, em seguida, a Potência desejada para o motor.

$$T = I \cdot \alpha \quad (25)$$

$$T' = 14,9 Nm \quad (26)$$

Para movimentar 20 seguidores em conjunto tem-se que:

$$T = 299 Nm \quad (27)$$

$$Pot = T \cdot w \quad (28)$$

42

$$Pot = 92,6w = 0,12 Hp \quad (29)$$

Para um rendimento de 60% do motor tem-se que:

$$Pot = 0,2Hp \quad (30)$$

## APÊNDICE C: Dimensionamento do eixo quadrado central

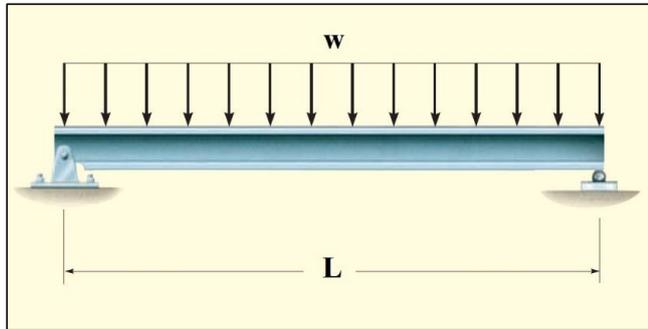


Figura 29: Modelo do eixo quadrado

Adotando o modelo da figura acima pode-se chegar à equação para o cortante e momento fletor máximo que são:

$$V_{max} = \frac{wL}{2} \quad (31)$$

$$M_{max} = wL^2/8 \quad (32)$$

O cortante máximo ocorre nas extremidades e o momento fletor máximo ocorre na metade do eixo quadrado.

Para um perfil quadrado vazado de espessura  $e$  e lado  $x$  tem-se que:

$$\tau = \frac{VQ}{It} \quad (33)$$

$$Q = 2e^3 - \frac{5e^2x}{2} + ex^2 \quad (34)$$

$$I = \frac{x^4 - (x - 2e)^4}{12} \quad (35)$$

Onde as equações para  $Q$  e  $I$  são simplificações para o caso específico de um perfil quadrado de espessura  $e$  e lado  $x$ . Permitindo a utilização de uma equação da tensão cisalhante onde se possa trabalhar em cima das dimensões do perfil escolhido com o intuito de obter um eixo com fator de segurança admissível.

Fazendo-se o mesmo para a tensão de flexão tem-se que:

$$\sigma = -\frac{My}{I} \quad (36)$$

$$\sigma = \frac{3wL^2 \cdot x}{4(x^4 - (x - 2e)^4)} \quad (37)$$

A partir da determinação das dimensões do eixo e do peso dos painéis solares sobre eles tem-se os seguintes valores:

*Tabela 3: Dados do painel solar*

<b>Massa dos painéis [kg]</b>	<b>m = 60</b>
<b>Carga distribuída w [N/m]</b>	<b>w = 196</b>
<b>Comprimento do eixo [m]</b>	<b>L = 3</b>
<b>Espessura e do eixo [mm]</b>	<b>e = 5</b>
<b>Comprimento do lado x do eixo [mm]</b>	<b>x = 60</b>

Assim tem-se que:

$$\tau = 9,1 \text{ MPa} \quad (38)$$

$$\sigma_{max} = 47 \text{ Mpa} \quad (39)$$

Este caso se assemelha ao exemplo analisado no APÊNDICE A onde a tensão máxima de cisalhamento e a tensão normal ocorrem em pontos diferentes e, onde a tensão normal é máxima a tensão de cisalhamento é nula, desta forma tem-se novamente que:

$$\sigma_{eq} = \sigma_x$$

É possível então calcular o fator de segurança para um tubo ASME SA106 Grau B com limite de escoamento ( $f_y$ ) igual a 241 Mpa.

$$n = \frac{f_y}{\sigma_x} = 5,1 \quad (40)$$

Observa-se que não há consideração de fadiga no eixo pois são necessários dois fatores para que ocorra fadiga em peças de aço (no caso o eixo), a tensão variável que a peça está exposta deve ultrapassar o limite de resistência a fadiga pois abaixo deste limite não ocorrerá falha por fadiga em aços independentemente do número de ciclos de tensão que a peça esteja exposta e, o outro fator é o número de ciclos de tensão. No caso deste projeto o baixo número de ciclos, mais especificamente a baixíssima rotação imposta ao eixo, foi o fator determinante para a desconsideração da falha por fadiga.

O ciclo de movimentação é dado pela rotação de noventa graus de rotação desde a posição inicial pela manhã até a posição final ao fim do dia.

## APÊNDICE D: Consideração da força do vento

Para considerar o caso crítico da aplicação da força do vento sobre a estrutura será adotado o modelo onde o painel solar está em posição de 45 graus em relação ao eixo horizontal e uma rajada de vento incide perpendicularmente a superfície do painel.

Conforme a NBR-6123 – Forças devido ao vento, tem-se que:

$$q = 0,613 V_k^2 \quad (41)$$

Onde  $q$  é a pressão dinâmica e  $V_k$  é a velocidade característica em m/s e é encontrado a partir da equação:

$$V_k = V_0 * S_1 * S_2 * S_3 \quad (42)$$

Onde  $V_0$  é a velocidade básica da região,  $S_1$  é o fator topográfico,  $S_2$  é o fator rugosidade e  $S_3$  o fator probabilístico, dados pelas tabelas a seguir:

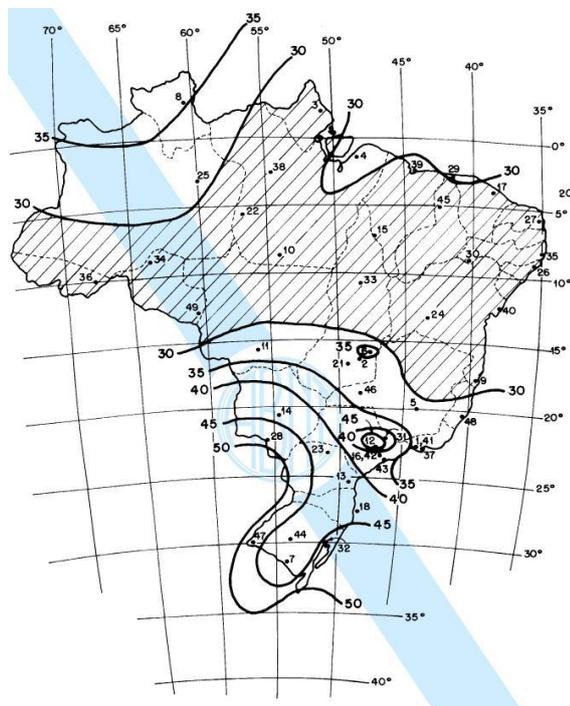


Figura 30: Isopaletas para determinação de  $V_0$

**Tabela 4: Classe de relevo para escolha de S1**

QUADRO 4: Classes de relevo do terreno	
S <sub>1</sub>	TIPO DE RELEVO DO TERRENO
1,0	Terreno Plano ou fracamente acidentado
VARIÁVEL	Taludes e Morros
0,9	Vales Profundos e protegidos de ventos de qualquer direção.

**Tabela 5: Classe para escolha de S2**

QUADRO 5: Categorias de Rugosidade do terreno	
CATEGORIA	TIPO DE SUPERFÍCIE DO TERRENO
I	Superfícies Lisas de grandes dimensões, com mais de 5 km de extensão, medida na direção e sentido do vento incidente.
II	Terrenos abertos em nível ou aproximadamente em nível, com poucos obstáculos isolados, tais como árvores e edificações baixas. Obstáculos com altura média abaixo de 1,0 metros.
III	Terrenos planos ou ondulados com obstáculos, tais como sebes e muros, poucos quebra-ventos. Obstáculos com altura média de 3,0 metros.
IV	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial o urbanizada. Altura média dos obstáculos de 10 metros.
V	Terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados. Obstáculos com altura média de 25 metros ou mais.

**Tabela 6: Classe alfabética para escolha de S2**

QUADRO 6: Classes de Edifícios em função de suas dimensões.	
CLASSE	DIMENSÕES DO EDIFÍCIO
A	Todas as unidades de vedação, seus elementos de fixação e peças individuais de estruturas sem vedação. Toda edificação na qual a maior dimensão horizontal ou vertical seja inferior a <b>20 metros</b> .
B	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal esteja entre <b>20 e 50 metros</b> .
C	Toda edificação ou parte de edificação para a qual a maior dimensão horizontal ou vertical da superfície frontal exceda <b>50 metros</b> .

Tabela 7: Escolha de S2 por classe

QUADRO 7: Fator Rugosidade S2															
ALTURA z (m)	CATEGORIA DE RUGOSIDADE DO TERRENO														
	I			II			III			IV			V		
	CLASSE			CLASSE			CLASSE			CLASSE			CLASSE		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
≤ 5	1,06	1,04	1,01	0,94	0,92	0,89	0,88	0,86	0,82	0,79	0,76	0,73	0,74	0,72	0,67
10	1,1	1,09	1,06	1	0,98	0,95	0,94	0,92	0,88	0,86	0,83	0,8	0,74	0,72	0,67
15	1,13	1,12	1,09	1,04	1,02	0,99	0,98	0,96	0,93	0,9	0,88	0,84	0,79	0,76	0,72
20	1,15	1,14	1,12	1,06	1,04	1,02	1,01	0,99	0,96	0,93	0,91	0,88	0,82	0,8	0,76
30	1,17	1,17	1,15	1,1	1,08	1,06	1,05	1,03	1	0,98	0,96	0,93	0,87	0,85	0,82
40	1,2	1,19	1,17	1,13	1,11	1,09	1,08	1,06	1,04	1,01	0,99	0,96	0,91	0,89	0,86
50	1,21	1,21	1,19	1,15	1,13	1,12	1,1	1,09	1,06	1,04	1,02	0,99	0,94	0,93	0,89
60	1,22	1,22	1,21	1,16	1,15	1,14	1,12	1,11	1,09	1,07	1,04	1,02	0,97	0,95	0,92
80	1,25	1,24	1,23	1,19	1,18	1,17	1,16	1,14	1,12	1,1	1,08	1,06	1,01	1	0,97
100	1,26	1,26	1,25	1,22	1,21	1,2	1,18	1,17	1,15	1,13	1,11	1,09	1,05	1,03	1,01
120	1,28	1,28	1,27	1,24	1,23	1,22	1,2	1,2	1,18	1,16	1,14	1,12	1,07	1,06	1,04
140	1,29	1,29	1,28	1,25	1,24	1,24	1,22	1,22	1,2	1,18	1,16	1,14	1,1	1,09	1,07
160	1,3	1,3	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24	1,23	1,22	1,2	1,18	1,16	1,12	1,11	1,1
180	1,31	1,31	1,31	1,28	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,22	1,2	1,18	1,14	1,14	1,12
200	1,32	1,32	1,32	1,29	1,28	1,28	1,27	1,26	1,25	1,23	1,21	1,2	1,16	1,16	1,14
250	1,34	1,34	1,33	1,31	1,31	1,31	1,3	1,29	1,28	1,27	1,25	1,23	1,2	1,2	1,18
300				1,34	1,33	1,33	1,32	1,32	1,31	1,29	1,27	1,26	1,23	1,23	1,22
350							1,34	1,34	1,33	1,32	1,3	1,29	1,26	1,26	1,26
400										1,34	1,32	1,32	1,29	1,29	1,29
420										1,35	1,35	1,33	1,3	1,3	1,3
450													1,32	1,32	1,32
500													1,34	1,34	1,34

Tabela 8: Escolha de S3 por grupo

QUADRO 8: Determinação do Fator Estatístico S <sub>3</sub> conforme os Grupos de ocupação.		
GRUPO	DESCRIÇÃO	FATOR S <sub>3</sub>
1	Edificações cuja ruína total ou parcial pode afetar a segurança ou possibilidade de socorro a pessoas após uma tempestade destrutiva (hospitais, quartéis de bombeiros e de forças de segurança, centrais de comunicação, etc.)	1,10
2	Edificações para hotéis e residências. Edificações para comércio e indústria com alto fator de ocupação.	1,00
3	Edificações e instalações industriais com baixo fator de ocupação (depósitos, silos, construções rurais, etc.)	0,95
4	Vedações (telhas, vidros, painéis de vedação, etc.)	0,88
5	Edificações temporárias. Estruturas dos grupos 1 a 3 durante a construção.	0,83

A partir das tabelas acima retiramos os valores de  $V_0$ ,  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$ :

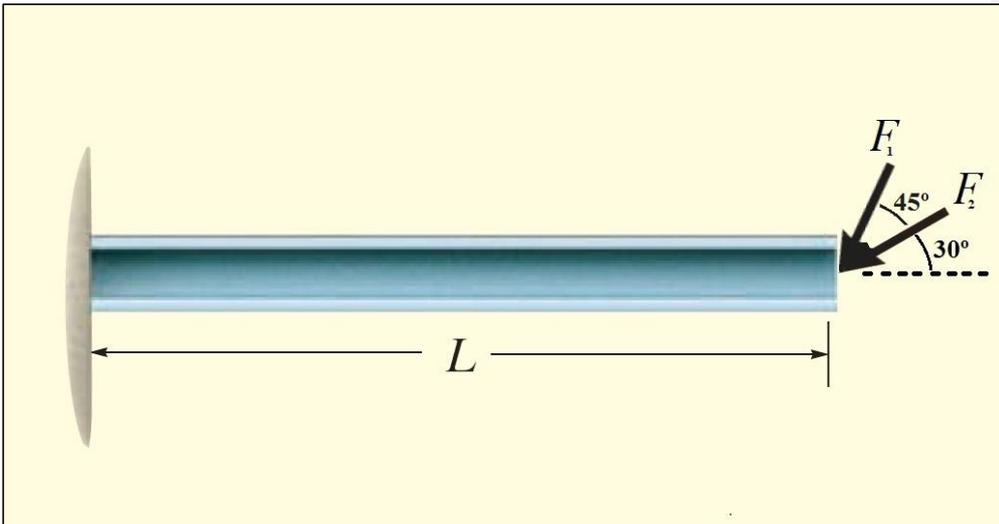
*Tabela 9: Valores para cálculo de  $V_k$*

$V_0$ (m/s)	30
$S_1$	1
$S_2$	0,94
$S_3$	0,95

Então a força dinâmica exercida pelo vento no painel solar é:

$$q = 440 \frac{N}{m^2} \quad (43)$$

Com uma área total de 15,1 m<sup>2</sup> tem-se a força de 6644 N agindo sobre os suportes, assim o modelo torna-se:



**Figura 31: Modelo cargas de vento**

Onde uma das pernas é representada e  $F_1$  é a força relativa ao vento em uma das pernas e  $F_2$  é a força do peso incidente nos suportes.

$$\varepsilon F_y = 0; \quad (44)$$

$$\varepsilon M = 0; \quad (45)$$

$$M_{\max} = (F_1 \text{sen}75^\circ + F_2 \text{sen}30^\circ) \cdot L \quad (46)$$

$$V_{\max} = F_1 \text{sen}75^\circ + F_2 \text{sen}30^\circ \quad (47)$$

$$N = F_1 \text{cos}75^\circ + F_2 \text{cos}30^\circ \quad (48)$$

Portanto para o perfil quadrado da perna do suporte com espessura  $e$  e lado  $x$  é possível calcular que:

$$\sigma_{\text{med}} = \frac{N}{A} \quad (49)$$

$$\sigma_{\text{flex}_{\max}} = \frac{My}{I} = \frac{6 \cdot F_{\text{sen}30^\circ} \cdot L \cdot x}{(x^4 - (x - 2e)^4)} \quad (50)$$

$$\tau_{\max} = \frac{VQ}{It} \quad (51)$$

$$Q_c = 2e^3 - \frac{5e^2x}{2} + ex^2 \quad (52)$$

$$\tau_c = \frac{6 F_{\text{sen}30^\circ} Q_c}{(x^4 - (x - 2e)^4) \cdot t} \quad (53)$$

Para  $x = 0,05 \text{ m}$  e  $e = 0,005 \text{ m}$  e  $L = 1,15 \text{ m}$  tem-se que:

$$\sigma_{N\text{med}} = 0,81 \text{ MPa} \quad (54)$$

$$\sigma_{\text{flex}_{\max}} = 123,94 \text{ MPa} \quad (55)$$

$$\tau_{\max} = 4,15 \text{ MPa} \quad (56)$$

Pelo princípio da superposição [16] tem-se que:

$$\sigma_x = 124,75 \text{ Mpa} \quad (57)$$

Este caso se assemelha ao exemplo analisado no APÊNDICE A onde a tensão máxima de cisalhamento e a tensão normal ocorrem em pontos diferentes e, onde a tensão normal é máxima a tensão de cisalhamento é nula, desta forma tem-se novamente que:

$$\sigma_{eq} = \sigma_x$$

Assim para um suporte feito em aço carbono ASTM A36 com limite de escoamento ( $f_y$ ) de 250 MPa e desconsiderando a falha por fadiga devido a velocidade do vento considerada ser de uma rajada de vento que só é excedida em média uma vez a cada 50 anos conforme a norma NBR-6123 chega-se ao fator de segurança:

$$n = \frac{f_y}{\sigma_{max}} \quad (58)$$

$$n = 2,00 \quad (59)$$

Ressalta-se que a rajada de vento homogênea não é o pior caso, entretanto a norma utilizada para a consideração do carregamento gerado pelo vento padroniza para este tipo de carregamento sobre estruturas industriais compensando em rígidos fatores de segurança.

## ANEXO I: Catálogo do Painel Solar.



### KB-60 1000V Series

KB255-6BCA KB255-6BPA KB260-6BCA KB260-6BPA

#### CUTTING EDGE TECHNOLOGY

As a pioneer with four decades of experience in the development of photovoltaic systems, Kyocera drives the market as a leading provider of PV products. We demonstrate our *Kaizen* philosophy, or commitment to continuous improvement, by setting the industry standard in the innovation of best-in-class solar energy equipment.

#### QUALITY BUILT IN

- UV-stabilized, anodized aluminum frame in black
- Supported by major mounting structure manufacturers
- Easily accessible grounding points on all four corners for fast installation
- Proven junction box technology with 12 AWG PV wire works with transformerless inverters
- Locking plug-in connectors provide safe, quick connections

#### PROVEN RELIABILITY

- Kyocera modules confirmed by the Desert Knowledge Australia Solar Centre to have the highest average output of any crystalline module
- First module manufacturer in the world to pass long-term sequential testing performed by TÜV Rheinland
- This series construction also passed TÜV Rheinland's Salt Mist Corrosion Test at Severity Level 6, the most intense test conditions available
- Only module manufacturer to achieve the rank of "Performance Leader" in all six categories of GTM Research's 2014 PV Module Reliability Scorecard

#### CERTIFICATIONS

- UL1703 Certified and Registered, UL Module Fire Performance: Type 2, CEC
- NEC2008 Compliant, IEC 61215/61730, and ISO 14001
- IEC61701 Ed.2 Severity 6 (Salt Mist Corrosion Test)



HIGH EFFICIENCY MULTICRYSTAL PHOTOVOLTAIC MODULE

**SOLAR** by KYOCERA

## ELECTRICAL SPECIFICATIONS

## Standard Test Conditions (STC)

STC=1000 W/M<sup>2</sup> irradiance, 25°C module temperature, AM 1.5 spectrum\*

	KB255-6BCA/6BPA	KB260-6BCA/6BPA	
P <sub>max</sub>	255	260	W
V <sub>mp</sub>	30.8	31.0	V
I <sub>mp</sub>	8.28	8.39	A
V <sub>oc</sub>	38.0	38.3	V
I <sub>sc</sub>	8.83	9.09	A
P <sub>tolerance</sub>	+5/-0	+5/-0	%

## Nominal Operating Cell Temperature Conditions (NOCT)

NOCT=800 W/M<sup>2</sup> irradiance, 20°C ambient temperature, AM 1.5 spectrum\*

T <sub>NOCT</sub>	45	45	°C
P <sub>max</sub>	183	187	W
V <sub>mp</sub>	27.7	27.9	V
I <sub>mp</sub>	6.61	6.71	A
V <sub>oc</sub>	34.8	35.1	V
I <sub>sc</sub>	7.15	7.36	A
PTC	228.3	232.9	W

## Temperature Coefficients

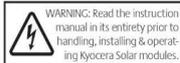
P <sub>max</sub>	-0.45	-0.45	%/°C
V <sub>mp</sub>	-0.48	-0.48	%/°C
I <sub>mp</sub>	0.02	0.02	%/°C
V <sub>oc</sub>	-0.36	-0.36	%/°C
I <sub>sc</sub>	0.06	0.06	%/°C
Operating Temp	-40 to +90	-40 to +90	°C

## System Design

Series Fuse Rating	15 A
Maximum DC System Voltage (UL)	1000 V
Hailstone Impact	in (25mm) @ 51 mp (23m/s)

\*Subject to simulator measurement uncertainty of +/- 3%.  
KYOCERA reserves the right to modify these specifications without notice.

NEC 2008 COMPLIANT  
UL 1703 LISTED  
Q21715

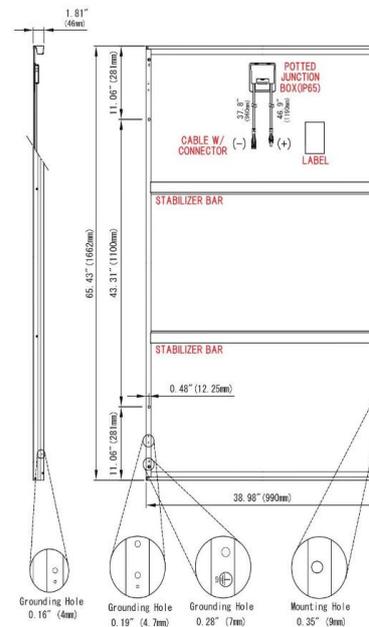


## MODULE CHARACTERISTICS

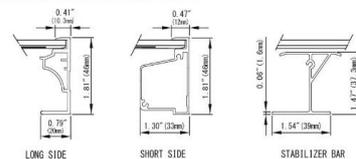
Cells per module:	60 (6 x 10)
Dimensions: length/width/height	65.43in/38.98in/1.81in (1662mm/990mm/46mm)
Weight:	44.1lbs (20.0kg)

## PACKAGING SPECIFICATIONS

Modules per pallet:	20
Pallets per 53' container:	36
Pallet box dimensions: length/width/height	66in/40in/47in (1675mm/1005mm/1175mm)
Pallet box weight:	990lbs (450kg)



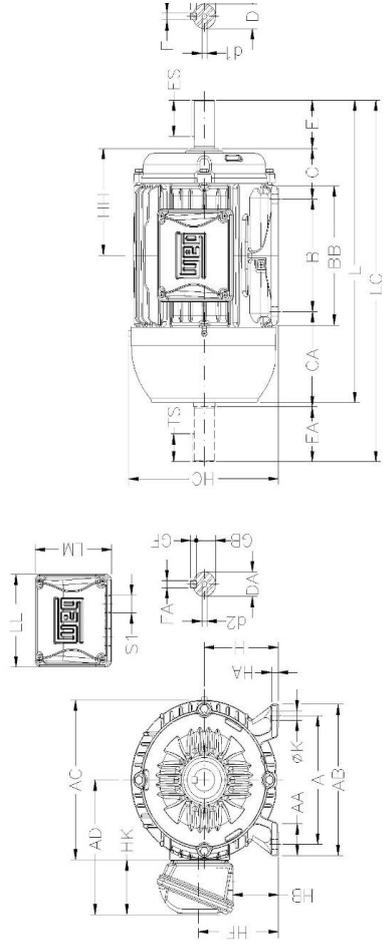
## FRAME CROSS SECTION DIAGRAM



OUR VALUED PARTNER

## ANEXO II: Catálogo do Motor Elétrico.

		No.:			
		Data: 21-MAI-2016			
<b>FOLHA DE DADOS</b> <b>Motor trifásico de indução - Rotor de gaiola</b>					
Cliente	:				
Linha do produto	: W22 IR2				
Carcaça	: 63				
Potência	: 0,25 HP				
Frequência	: 60 Hz				
Polos	: 2				
Rotação nominal	: 3350				
Escorregamento	: 6,94 %				
Tensão nominal	: 220/380 V				
Corrente nominal	: 0,920/0,533 A				
Corrente de partida	: 4,88/2,82 A				
Ip/In	: 5,3				
Corrente a vazio	: 0,690/0,399 A				
Conjugado nominal	: 0,513 Nm				
Conjugado de partida	: 270 %				
Conjugado máximo	: 290 %				
Categoria	: ---				
Classe de isolamento	: F				
Elevação de temperatura	: 80 K				
Tempo de rotor bloqueado	: 9 s (quente)				
Fator de serviço	: 1,15				
Regime de serviço	: S1				
Temperatura ambiente	: -20°C - +40°C				
Altitude	: 1000				
Proteção	: IP55				
Massa aproximada	: 6 kg				
Momento de inércia	: 0,00012 kgm <sup>2</sup>				
Nível de ruído	: 56 dB(A)				
	Dianteiro	Traseiro	Carga	Fator potência	Rendimento (%)
Rolamento	6201 ZZ	6201 ZZ	100%	0,79	65,0
Intervalo de lubrificação	---	---	75%	0,70	63,0
Quantidade de graxa	---	---	50%	0,57	58,0
Observações:					
Executor			Verificado		



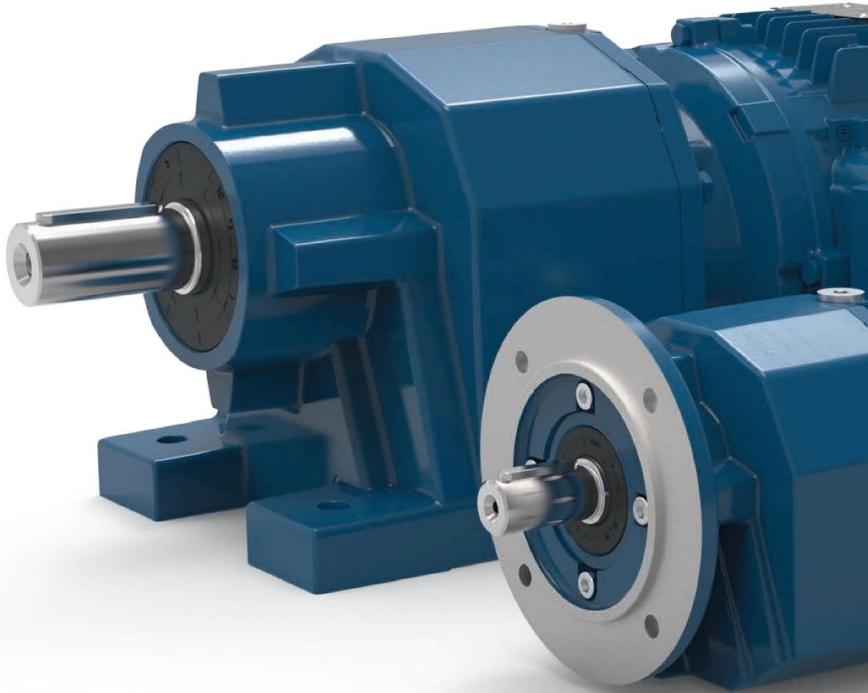
AA	26.5	AB	116	AC	133	AD	123	
BB	95	C	40	CA	78	D	116	
ES	14	F	4	G	6.5	GD	4	
EA	20	IA	12	IA	7.2	G2	4	
H	63	HA	7	HB	26.5	HC	130	
HH	80	HK	7	K	7	L	216	
LL	108.5	LM	39	S1	1/2"	L1	31	
				RWG	1/2"	A3.15		
Observações:							21-MAI-20	
Executor:							Carcaça 63 - IP55	
Verificado:							Motor trifásico de indução	
Cliente:							W22 IR2	

## ANEXO III: Catálogo do Redutor.



### Coaxial WCG20 Motorredutores Helicoidais

Os motorredutores Coaxial são fornecidos em cinco tamanhos com torque nominais de 50 a 600 Nm e são disponíveis nas formas com pés e com flange de fixação. Enquanto os dois tamanhos menores (C00 e C01) são capazes de desempenhar seu completo potencial com apenas dois estágios, os tamanhos restantes, do C03 ao C06 são disponibilizados em dois ou três estágios para aplicações que exigem maiores faixas de torque.



#### Especificações Técnicas

		C00	C01	C03	C05	C06
Torque nominal	[Nm]	50	85	200	400	600
Número de estágios		2-estágios	2-estágios	2/3-estágios	2/3-estágios	2/3-estágios
Faixa de reduções		2,44-47,44	3,09-66,5	3,34-286,32	3,83-328,43	3,73-375,71
Rotações de saída para entrada de 1750 rpm 60 Hz	[rpm]	37-717	26-566	6-524	5-457	5-469
Potência nominal em 60Hz	[kW]	0,12-0,75	0,12-1,5	0,12-2,2	0,12-7,5	0,12-9,2
Eixo de saída	[mm]	20 x 40	20 x 40	25 x 50	30 x 60 35 x 70	35 x 70
Flange de saída IEC	[mm]	120/140/160	120/140/160	140/160/200	160/200/250	200/250

## ANEXO IV: Catálogo do Mancal.

xiros®  
polymer  
ball  
bearings

NEW in this catalog!

### xirodur® B180 Polymer Ball Bearings | Product Range

#### Radial deep-groove ball bearings



From xirodur® B180  
PA cage, glass balls



From xirodur® B180  
PA cage, stainless steel balls



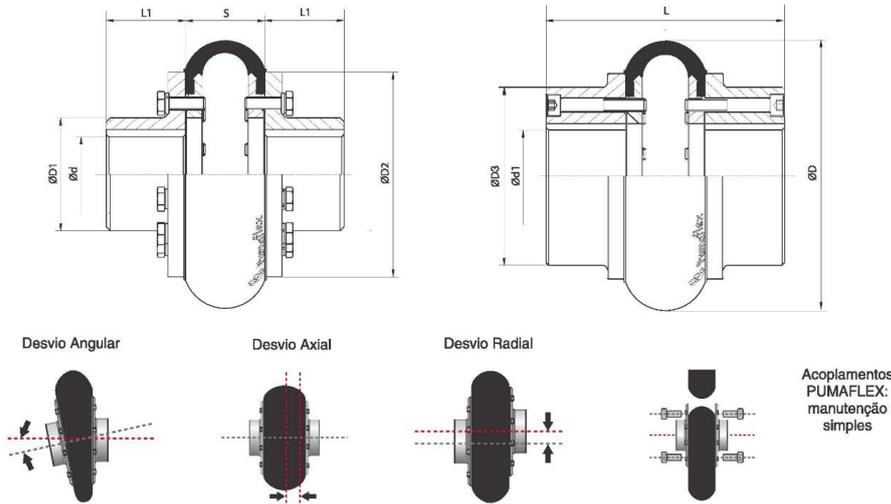
xiros® B180 polymer ball bearings are for use with temperatures up to +80 °C. The specially developed material xirodur® B180 provides significantly longer life times at a lower cost.

- Lubrication- and maintenance-free
- Non-magnetic and washable
- Corrosion-resistant
- Predictable lifetime
- Low weight
- For shaft diameters 3–60 mm
- Electrically insulating

#### Dimensions [mm]

Part number	Race	Cage	Ball	Inner-Ø d1	Outer-Ø d2	Width b1
BB-623-B180-10-ES	B180	PA	1.4401	3	10	4
BB-626-B180-10-ES	B180	PA	1.4401	6	19	6
BB-608-B180-10-ES	B180	PA	1.4401	8	22	7
BB-6000-B180-10-ES	B180	PA	1.4401	10	26	8
BB-6001-B180-10-ES	B180	PA	1.4401	12	28	8
BB-6003-B180-10-ES	B180	PA	1.4401	17	35	10
BB-6004-B180-10-ES	B180	PA	1.4401	20	42	12
BB-6005-B180-10-ES	B180	PA	1.4401	25	47	12
BB-6006-B180-10-ES*	B180	PA	1.4401	30	55	13
BB-6007-B180-10-ES*	B180	PA	1.4401	35	62	14
BB-6008-B180-10-ES*	B180	PA	1.4401	40	68	15
BB-6009-B180-10-ES*	B180	PA	1.4401	45	75	16
BB-6010-B180-10-ES*	B180	PA	1.4401	50	80	16
BB-6011-B180-10-ES*	B180	PA	1.4401	55	90	18
BB-6012-B180-10-ES*	B180	PA	1.4401	60	95	18
BB-623-B180-10-GL	B180	PA	Glass	3	10	4
BB-626-B180-10-GL	B180	PA	Glass	6	19	6
BB-608-B180-10-GL	B180	PA	Glass	8	22	7
BB-6000-B180-10-GL	B180	PA	Glass	10	26	8
BB-6001-B180-10-GL	B180	PA	Glass	12	28	8
BB-6003-B180-10-GL	B180	PA	Glass	17	35	10
BB-6004-B180-10-GL	B180	PA	Glass	20	42	12
BB-6005-B180-10-GL	B180	PA	Glass	25	47	12
BB-6006-B180-10-GL*	B180	PA	Glass	30	55	13
BB-6007-B180-10-GL*	B180	PA	Glass	35	62	14
BB-6008-B180-10-GL*	B180	PA	Glass	40	68	15
BB-6009-B180-10-GL*	B180	PA	Glass	45	75	16
BB-6010-B180-10-GL*	B180	PA	Glass	50	80	16
BB-6011-B180-10-GL*	B180	PA	Glass	55	90	18
BB-6012-B180-10-GL*	B180	PA	Glass	60	95	18

## ANEXO V: Catálogo Acoplamento flexível

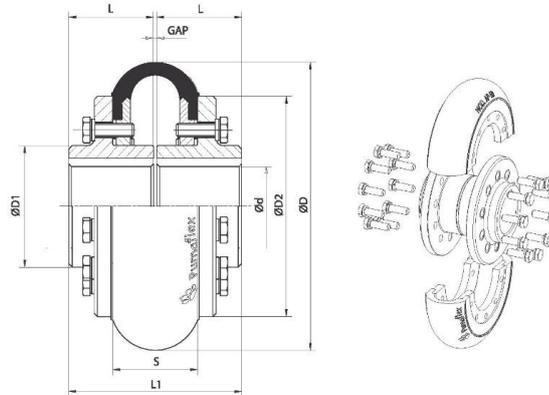


Modelo	Torque nominal (Nm)	Rotação máxima (rpm)	Medidas principais (mm)																
			ØD	Cubos normais							Desvios máximos			Cubos cheios			Torque de ajuste dos parafusos - Nm 1ª ajuste   2ª ajuste		
				ØD1	ØD2	d max	L1	L	S	Peso Total kg	Angular	Axial	Radial	d1 max	ØD3	Peso Total kg			
AP - 25	45	5000	95	36	74	24	25	80	30	1,1	2°	-0,5	0,25	38	66	1,3	5	5	
AP - 35	90	4000	125	49	96	32	35	110	40	2,6	2°	-0,75	0,4	45	86	3,7	7,5	10	
AP - 50	340	3600	165	70	127	46	50	150	50	5,6	2°	-1	0,5	60	120	8,5	10	20	
AP - 70	940	3600	220	99	169	65	70	205	65	15,1	2°	-1,5	0,8	90	150	22	20	25	
AP - 90	1700	3600	300	116	218	85	80	250	90	28,8	2°	-2	1	105	180	42	50	60	
AP - 105	2500	2000	335	139	235	100	100	290	90	41,7	2°	-2	1	125	200	58	50	60	
AP - 140/100	6800	1800	405	150	290	100	100	320	120	67,2	2°	-3	2	170	265	Consultar a Aciobras	60	70	
AP - 140/140		1800		195		140	130	380		95,0									
AP - 200/90	1200	150	100	100	385	160	173	2°	-4	3	260	380							
AP - 200/140	20200	1200	195	140	130	445							185						
AP - 200/200	1200	276	200	180	545	275	340	2°	-4	3	350	490							
AP - 300/150	69000	720	730	225	150	160							555	236					
AP - 300/200		290	200	200	635	403													
AP - 300/250		350	250	275	785	595													
AP - 300/300		390	300	275	785	695													

Para acoplamentos com torques maiores ou com rotações acima das indicadas, consulte a Aciobras.  
 \*Acoplamentos Pumaflex APR reforçados, consulte a Aciobras.



Os acoplamentos elásticos PUMAFLEX® Bipartidos BP permitem a troca do Elemento Elástico de maneira rápida e simples sem a necessidade do deslocamento dos equipamentos, mesmo com as pontas dos eixos próximas.



## BIPARTIDO

TABELA "A"						
Modelo	Torque Nominal (Nm)	*Rotação máxima (rpm)	Ød max	Peso kg	Momento de Inércia Cubo Normal (kg.m²)	Momento de Inércia Cubo Cheio (kg.m²)
AP-BP - 25	40	4000	24	1,1	0.000483	0.000715
AP-BP - 35	80	3800	32	2,6	0.001928	0.00277
AP-BP - 50	300	3600	48	5,6	0.00682	0.0102
AP-BP - 70	820	3600	70	15,1	0.0298	0.0468
AP-BP - 90	1500	2000	80	28,8	0.111	0.150
AP-BP - 105	2200	2000	100	41,7	0.158	0.225
AP-BP - 140	6000	1890	145	67,7	0,483	0,841

Consultar a Aciobras em caso de necessidade de alteração de medidas  
\*Consultar a Aciobras para rotações acima das indicadas

TABELA "B" - Dimensões em mm								
Modelo	ØD	ØD1	ØD2	L	L1	S	GAP Mínimo	GAP Máximo
AP-BP - 25	95	36	74	30	63	30	3	33
AP-BP - 35	125	49	96	38,5	80	40	3	41,5
AP-BP - 50	165	70	127	50	103	50	3	53
AP-BP - 70	220	99	169	70	143	65	3	73
AP-BP - 90	300	116	218	80	165	90	5	85
AP-BP - 105	335	144	235	100	205	90	5	105
AP-BP - 140	405	195	290	130	265	120	5	135

Por ter o centro seccionado em duas partes, sua capacidade de torque é reduzida em relação aos tradicionais, portanto, não substitua um acoplamento normal por um BP sem antes fazer uma criteriosa avaliação do torque nominal e da velocidade máxima.



ENGRENAGEM

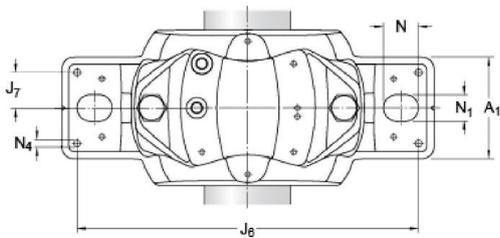
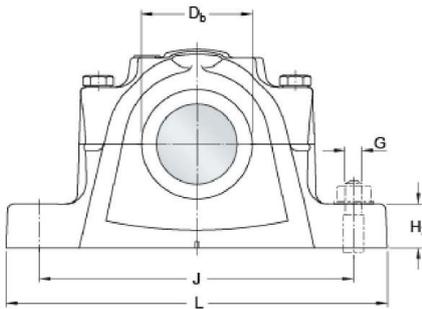
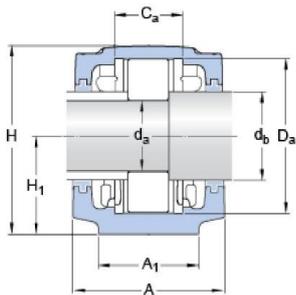


## ANEXO VI: Catálogo Mancal

**SKF**

### SE 210

#### Dimensions



$d_a$	50	mm
$d_b$	60	mm
$C_a$	41	mm
$D_a$	90	mm
$D_b$	72	mm
$A$	90	mm
$A_1$	60	mm
$H$	114	mm
$H_1$	60	mm
$H_2$	25	mm
$J$	170	mm
$L$	205	mm
$N$	20	mm
$N_1$	15	mm

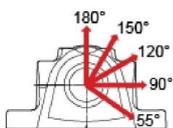
#### Dowel pins

$J_6$	188	mm
$J_7$	22	mm
$N_4$ max.	6	mm
$N_4$ max.	6	mm

#### Seal stand-out

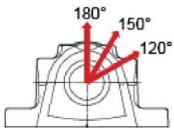
$A_{2L}$	6	mm
$A_{2T}$	37.5	mm

#### Breaking loads, housing

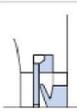


$P_{0^\circ}$	170	kN
$P_{55^\circ}$	265	kN

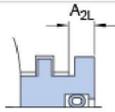
$P_{90^\circ}$	155	kN
$P_{120^\circ}$	120	kN
$P_{150^\circ}$	110	kN
$P_{180^\circ}$	130	kN
$P_a$	85	kN

**Yield point, cap bolts**

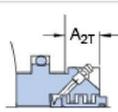
$Q_{120^\circ}$	150	kN
$Q_{150^\circ}$	85	kN
$Q_{180^\circ}$	75	kN

**Appropriate seals and end cover**

TSN 210 A



2 X TSN 210 S



2 X TSN 210 ND



ASNH 512-610

**Appropriate products**

Bearing (basic designation)	1210
Lock nut	KM 10
Lock washer	MB 10
Locating ring	2 X FRB 10.5/90

**Mass**

Mass housing	3.63	kg
--------------	------	----

**Mounting information**

Cap bolt, size		M 10x55
Cap bolt, rec. tightening torque		50 N·m
Appropriate attachment bolt, size	G	12 mm
Appropriate attachment bolt, rec. tightening torque		80 N·m
Initial grease fill, 20%		40 g
Initial grease fill, 40%		70 g