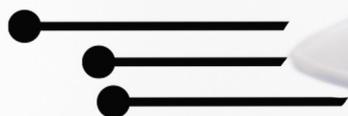




**Luís Fernando Paulista Cotian**  
**(Organizador)**

# **Engenharias, Ciência e Tecnologia 3** .....



**Luís Fernando Paulista Cotian**

(Organizador)

# **Engenharias, Ciência e Tecnologia**

## **3**

Atena Editora

2019

2019 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Lorena Prestes

Revisão: Os autores

#### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

#### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)

E57 Engenharias, ciência e tecnologia 3 [recurso eletrônico] / Organizador  
Luís Fernando Paulista Cotian. – Ponta Grossa (PR): Atena  
Editora, 2019. – (Engenharias, Ciência e Tecnologia; v. 3)

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia.

ISBN 978-85-7247-086-5

DOI 10.22533/at.ed.865193101

1. Ciência. 2. Engenharia. 3. Inovações tecnológicas.  
4. Tecnologia. I. Cotian, Luís Fernando Paulista. II. Série.

CDD 658.5

**Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422**

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de  
responsabilidade exclusiva dos autores.

2019

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos  
autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A obra “Engenharia, Ciência e Tecnologia” aborda uma série de livros de publicação da Atena Editora. O volume III apresenta, em seus 11 capítulos, conhecimentos relacionados a Gestão Energética relacionadas à engenharia de produção nas áreas de Gestão de Recursos Naturais e Produção mais Limpa e Ecoeficiência.

A área temática de Gestão Energética trata de temas relevantes para a geração, manutenção e gerenciamento de assuntos relacionados à energia elétrica. As análises e aplicações de novos estudos proporciona que estudantes utilizem conhecimentos tanto teóricos quanto tácitos na área acadêmica ou no desempenho da função em alguma empresa.

Para atender os requisitos do mercado as organizações precisam levar em consideração a área de Gestão Energética, sejam eles do mercado ou do próprio ambiente interno, tornando-a mais competitiva e seguindo a legislação vigente.

Aos autores dos capítulos, ficam registrados os agradecimentos do Organizador e da Atena Editora, pela dedicação e empenho sem limites que tornaram realidade esta obra, que retrata os recentes avanços científicos do tema.

Por fim, espero que esta obra venha a corroborar no desenvolvimento de novos conhecimentos de Gestão Energética e auxilie os estudantes e pesquisadores na imersão em novas reflexões acerca dos tópicos relevantes na área de engenharia de produção.

Boa leitura!

Luís Fernando Paulista Cotian

## SUMÁRIO

### **CAPÍTULO 1 ..... 1**

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA CONCENTRAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO

*Hugo Tavares Vieira Gouveia*  
*Luiz Fernando Almeida Fontenele*  
*Rodrigo Guido Araújo*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931011**

### **CAPÍTULO 2 ..... 19**

CONFLITO ENTRE ENERGIA ASSEGURADA E HIDROGRAMA AMBIENTAL: O RIO SÃO FRANCISCO ESTÁ MORRENDO?

*Paulo Roberto Ferreira de Moura Bastos*  
*Mônica Silveira*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931012**

### **CAPÍTULO 3 ..... 35**

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA AUTOMATIZADO DE MONITORAÇÃO CONTÍNUA POR ANÁLISE DE IMAGEM DO ESTADO DE CHAVES DE CIRCUITOS ALIMENTADORES EM SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO

*Lourival Lippmann Junior*  
*Bruno Marchesi*  
*Rafael Wagner*  
*Amanda Canestraro de Almeida*  
*Vanderlei Zarnicinski*  
*Bogdan Tomoyuki Nassu*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931013**

### **CAPÍTULO 4 ..... 54**

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE PILHA A COMBUSTÍVEL DE ÓXIDO SÓLIDO COM POTÊNCIA DE GERAÇÃO DE 1 KW

*Gabriel Leonardo Tacchi Nascimento*  
*Jacqueline Amanda Figueiredo dos Santos*  
*Rubens Moreira Almeida*  
*Tulio Matencio*  
*Rosana Zacarias Domingues*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931014**

### **CAPÍTULO 5 ..... 73**

EQUIPAMENTO COM RECONHECIMENTO DINÂMICO DE IMAGEM PARA AVALIAÇÃO DE MEDIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA EM CAMPO

*Fernanda Soares Giannini*  
*Ronaldo Borges Franco*  
*Joel Machado Campos Filho*  
*Ricardo Toshinori Yoshioka*  
*Jean Marcos Andery Baracat*  
*José Eduardo Bertuzzo*

**DOI 10.22533/at.ed.8651931015**

<b>CAPÍTULO 6 .....</b>	<b>87</b>
GERENCIAMENTO ENERGÉTICO PARA MICRORREDES: DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO PILOTO	
<i>Victor Maryama</i>	
<i>Vitor Seger Zeni</i>	
<i>Frederico Viveiros Jordan</i>	
<i>Cesare Quinteiro Pica</i>	
<i>Erlon Cristian Finardi</i>	
<i>Gabriel Aurélio de Oliveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931016</b>	
<b>CAPÍTULO 7 .....</b>	<b>107</b>
INJEÇÃO MÁXIMA DE MW POR GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM ALIMENTADOR PRIMÁRIO	
<i>Henrique Mesquita Tonhá</i>	
<i>Romário Pereira Marinho</i>	
<i>Antônio César Baleeiro Alves</i>	
<i>Luis Gustavo Wesz da Silva</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931017</b>	
<b>CAPÍTULO 8 .....</b>	<b>123</b>
SISTEMA DE GESTÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O ENERGYPLUS: UMA APLICAÇÃO VOLTADA AOS EDIFÍCIOS INTELIGENTES	
<i>Abraão Gualbeto Nazário</i>	
<i>Raimundo Celeste Ghizoni Teive</i>	
<i>João Zico Oliveira</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931018</b>	
<b>CAPÍTULO 9 .....</b>	<b>137</b>
VIBRATIONAL ENERGY HARVESTING TO ELECTRIC TRANSDUCTION IN A HIGH EFFICIENCY ELECTRIC VEHICLE	
<i>Jólio Ribeiro Maia Neto</i>	
<i>Ícaro Lofego Mota</i>	
<i>João Alexandrino Bemfica Neto</i>	
<i>Douglas da Costa Ferreira</i>	
<i>Fábio Roberto Chavarette</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.8651931019</b>	
<b>CAPÍTULO 10 .....</b>	<b>141</b>
MAPEAMENTO DA GOVERNANÇA DO SETOR DE ENERGIA ELÉTRICA PARA A EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO BRASIL	
<i>Tássia Fonseca Latorraca</i>	
<i>Raquel Naves Blumenschein</i>	
<i>Maria Vitória Ferrari</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.86519310110</b>	
<b>CAPÍTULO 11.....</b>	<b>157</b>
OTIMIZAÇÃO DA ABSORÇÃO DE ENERGIA SOLAR COM O USO DE PLACAS FOTOVOLTAICAS E REFLETORES MÓVEIS	
<i>Cynthia Beatriz Scheffer Dutra</i>	
<i>Jean Paulo Rodrigues</i>	
<i>Paulo César Sedor</i>	
<b>DOI 10.22533/at.ed.86519310111</b>	
<b>SOBRE O ORGANIZADOR .....</b>	<b>167</b>

## AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO DE ALTA CONCENTRAÇÃO NO NORDESTE BRASILEIRO

**Hugo Tavares Vieira Gouveia**

PETROBRAS/Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES)

Rio de Janeiro – RJ

**Luiz Fernando Almeida Fontenele**

PETROBRAS/Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES)

Rio de Janeiro – RJ

**Rodrigo Guido Araújo**

PETROBRAS/Centro de Pesquisas e Desenvolvimento (CENPES)

Rio de Janeiro – RJ

**RESUMO:** Em um projeto de P&D ANEEL da Petrobras, foi instalado um Sistema Fotovoltaico de Alta Concentração (HCPV – do inglês, *High Concentration Photovoltaics*), de potência nominal de 30,24 kWp, no Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis (CTGAS-ER), localizado em Natal/RN. O presente artigo trata das perspectivas de desempenho do referido sistema HCPV através de simulações computacionais, as quais fornecem insumos para o conhecimento adequado sobre o funcionamento da tecnologia fotovoltaica de alta concentração, sobretudo em regiões tropicais. São abordados também o contexto histórico da energia fotovoltaica com concentração e o detalhamento da tecnologia envolvida.

**PALAVRAS-CHAVE:** células de múltiplas junções, energia fotovoltaica de alta concentração, rastreamento em dois eixos.

**ABSTRACT:** In an ANEEL R&D project of Petrobras, a 30.24 kWp High Concentration Photovoltaics (HCPV) was installed at the Center for Gas Technologies and Renewable Energies (CTGAS-ER), located in Natal/RN. This article deals with the performance perspectives of the HCPV system through computational simulations, which provide inputs for adequate knowledge about the operation of HCPV technology, especially in tropical regions. The historical context of the HCPV and detailing of the technology involved are approached.

**KEYWORDS:** multijunction cells, high concentration photovoltaics, two-axis tracking.

### 1 | INTRODUÇÃO

O projeto de P&D ANEEL PD-0553-0010/2010, intitulado de “Energia fotovoltaica concentrada”, consistiu na implantação de um Sistema Fotovoltaico de Alta Concentração (HCPV – do inglês, *High Concentration Photovoltaics*) composto por três rastreadores idênticos de potência nominal de 10,08 kWp, o que totaliza 30,24 kWp. O sistema está instalado no Centro de Tecnologias do Gás e Energias

Renováveis (CTGAS-ER), localizado no município de Natal/RN.

É abordado inicialmente o contexto da energia fotovoltaica com concentração, seguido do detalhamento da tecnologia envolvida. Posteriormente, por simulações computacionais, são mostradas as perspectivas de desempenho do referido sistema. São apresentados resultados experimentais, que apontam que a geração anual média esperada é de aproximadamente 43,5 MWh, com um fator de capacidade anual de 16,4 %.

Apesar de a estimativa da geração anual de energia não ser elevada, esse projeto de P&D se mostra importante para gerar informações sobre o funcionamento da tecnologia HCPV, agregar conhecimento técnico sobre suas características construtivas e operacionais, além de estimular a avaliação do desempenho do sistema HCPV para outras localidades do Brasil.

## **2 | TECNOLOGIA DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS DE ALTA CONCENTRAÇÃO (HCPV)**

A tecnologia HCPV é uma alternativa à dos módulos planos convencionais e utiliza elementos ópticos, que aumentam a densidade de potência luminosa incidente nas células fotovoltaicas, cuja área é menor que a superfície de captação, conforme mostrado na figura 2.1 (a) (LUQUE; HEGEDUS, 2011). Isso permite que uma menor área de células produza a mesma quantidade de energia que um sistema convencional. Assim, com o aumento da irradiância solar incidente na célula, é possível obter elevadas correntes elétricas com células de pequenas dimensões (PINHO; GALDINO, 2014).

O objetivo de se combinar células fotovoltaicas com sistemas de concentração é reduzir significativamente o custo da energia produzida, uma vez que parte da área do material fotovoltaico é substituída por um material óptico, que é mais barato (MCEVOY, MARKVART e CASTAÑER, 2012). Isso tende a diminuir o custo global do sistema à medida que o fator de concentração aumenta, conforme pode ser observado na figura 2.1 (b) (SAYIGH, 2012).

O fator de concentração atinge centenas de vezes até o ponto em que o custo de fabricação da célula fotovoltaica passa a ser menos significativo no custo global do sistema fotovoltaico. O emprego de concentração tem sido mais recentemente uma das únicas maneiras de se aceitar, na esfera comercial, a nova geração de células fotovoltaicas, pois ao mesmo tempo em que elas são muito eficientes, elas têm um custo bastante elevado (MARKVART; CASTAÑER, 2003). Entretanto, é necessário utilizar rastreador solar com precisão adequada ao fator de concentração (SAYIGH, 2012).

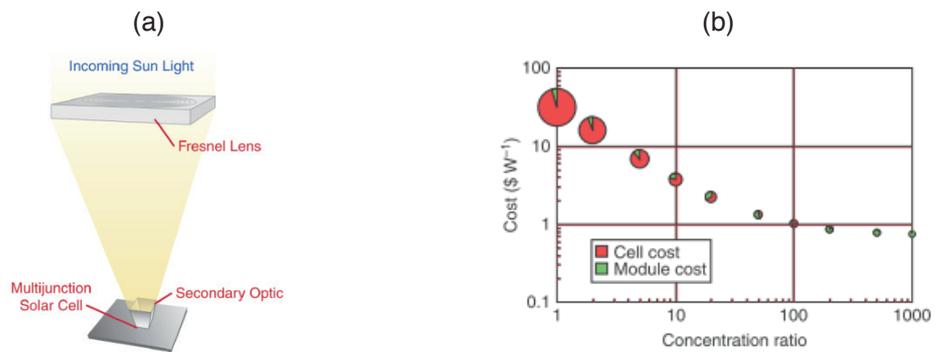


Figura 2.1 – (a) Princípio da concentração fotovoltaica e (b) custo estimado de um sistema fotovoltaico concentrado em função do fator de concentração.

Fonte: (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 2010) e (SAYIGH, 2012)

Um sistema HCPV é composto por célula fotovoltaica especial de pequena área, elemento óptico e rastreador capaz de concentrar e redirecionar os raios solares para a célula, conforme mostrado na figura 2.2. O sistema de controle também é parte essencial desse sistema, e são utilizados inversores para converter a corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada.

O elemento óptico pode ser uma lente, um espelho ou uma combinação de ambos. A célula deve ser projetada para o nível de irradiância que será recebido no foco do elemento óptico e deve ser também ligada termicamente a um dissipador de calor para remover a energia não convertida em eletricidade.

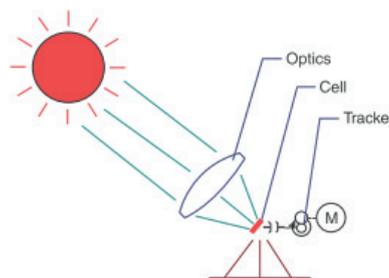


Figura 2.2 – Configuração básica de um sistema fotovoltaico de alta concentração.

Fonte: (SAYIGH, 2012).

Os sistemas com concentração, exceto aqueles que possuem grandes ângulos de aceitação, aproveitam somente a radiação direta e, portanto, não são capazes de coletar a radiação difusa. Essa desvantagem, porém, é compensada pela orientação contínua do coletor em direção ao Sol.

Os concentradores podem ser de acordo com o concentrador óptico utilizado, o número de eixos no quais ocorre o movimento e o mecanismo responsável pelo movimento do rastreador (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

### 3 | RASTREAMENTO EM DOIS EIXOS

Em sistemas fotovoltaicos de alta concentração, os módulos devem ser mantidos direcionados ao Sol, uma vez que o princípio de concentração está fundamentado na captação da radiação direta solar. Pelo limitado ângulo de aceitação dos concentradores, somente os raios solares compreendidos em um dado ângulo sólido conseguem atingir as células (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

Para operação satisfatória, o concentrador é montado em estrutura mecânica, que orienta os módulos ao Sol, variando sua posição ao longo do dia (MCEVOY, MARKVART e CASTAÑER, 2012). Essa estrutura móvel pode ser mais cara que a de sistemas fixos convencionais (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

Dependendo do ângulo de aceitação do elemento óptico e da tecnologia do módulo fotovoltaico, a precisão do sistema de rastreamento pode ser ajustada. Para um fator de concentração de até 2,5 vezes não há necessidade de rastreamento. Para sistemas com médias concentrações, de até 40 vezes, o rastreador pode ser de um eixo alinhado à direção norte-sul, como o mostrado na figura 2.3 (a), pois, em geral, a tecnologia do elemento óptico empregado é do tipo foco linear (SAYIGH, 2012). Sistemas de alta concentração empregam um rastreador de dois eixos, como o mostrado na figura 2.3 (b). Como, geralmente, esses sistemas utilizam lentes do tipo ponto-foco é exigida uma elevada precisão de rastreamento de forma que o módulo esteja constantemente apontado em direção ao Sol, focando a luz solar diretamente na célula. Do ponto de vista mecânico esse tipo de rastreamento é mais complexo que o de um eixo.

Segundo (LUQUE; HEGEDUS, 2011), os rastreadores de dois eixos podem ser classificados como pedestal, mesa girante e rolo basculante. O primeiro, mostrado na figura 2.4, consiste em um pedestal central que suporta os módulos em uma estrutura plana, sendo o mais comumente utilizado.



Figura 2.3 – Rastreamento em (a) um eixo e (b) dois eixos.

Fonte: (SAYIGH, 2012).

O rastreamento é feito por uma caixa de engrenagens, que movimenta o painel em torno do eixo vertical e do horizontal, com controles de azimute e de elevação,

respectivamente. Tem instalação simples, pois necessita apenas uma fundação preenchida com concreto em torno do tubo vertical. Entretanto, os esforços mecânicos produzidos pelo vento são transferidos para o motor central na forma de torque elevado, o que requer engrenagens de maior porte.

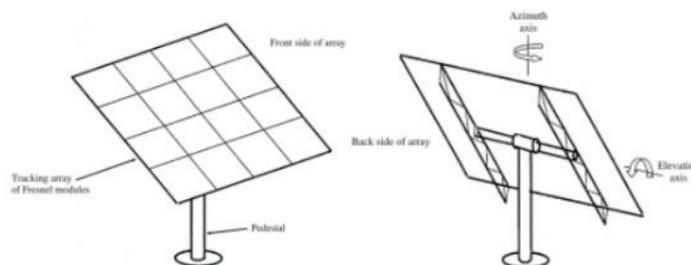


Figura 2.4 – Rastreador em dois eixos do tipo pedestal.

Fonte: (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

O do tipo mesa girante, teoricamente, requer menos aço do que o do tipo pedestal, pois possui vários pontos de suportação, de forma que as barras de aço possam ser mais finas e leves. Os esforços mecânicos oriundos da ação do vento são menores nos elementos motores e, portanto, os componentes mecânicos utilizados podem ser de menor porte. Como desvantagem apresenta uma instalação mais complexa e demanda uma grande e bem construída fundação horizontal. Pode ser observado na figura 2.5 (a).

O do tipo rolo basculante, visto na figura 2.5 (b), apresenta vantagem de esforç os mecânicos reduzidos nos elementos motores devido à ação do vento. Por outro lado, há mais rolamentos e ligações mecânicas e são necessárias várias fundações que precisam estar alinhadas, o que dificulta a instalação.

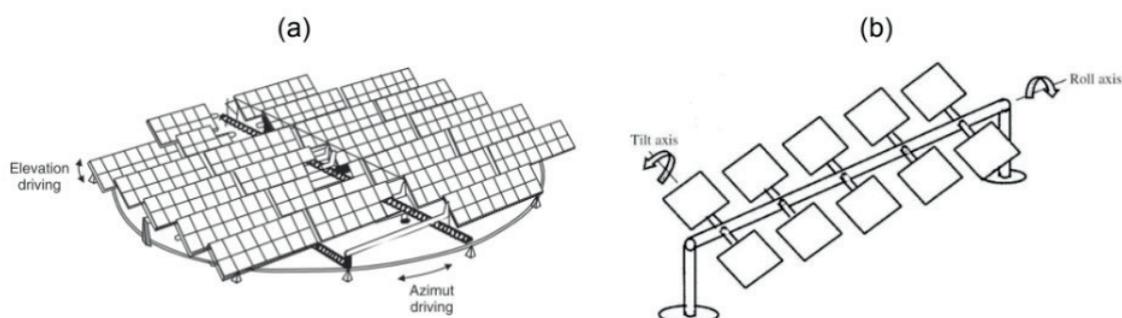


Figura 2.5 – Rastreador em dois eixos do tipo (a) mesa girante e (b) rolo basculante.

Fonte: (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

O uso de rastreamento é considerado uma desvantagem por alguns empreiteiros, pois tem um custo de aquisição mais elevado, reduz a confiabilidade do sistema pela adição de partes móveis e limita o campo de aplicação, pois não pode ser instalado em telhados. Os dois primeiros aspectos podem ser minimizados com a experiência de construção e montagem e um melhor controle de qualidade (MCEVOY, MARKVART e

CASTAÑER, 2012).

Quanto ao controle do sistema de rastreamento, na referência (LUQUE; HEGEDUS, 2011) são listadas algumas estratégias para que a estrutura mecânica móvel siga o Sol a cada momento do dia, mantendo o rastreador perpendicular aos raios solares com uma determinada precisão.

Os rastreadores passivos não utilizam motores para a orientação do painel fotovoltaico. Em geral, são constituídos por dois cilindros metálicos pintados de preto que ficam localizados nas extremidades do painel. Quando o painel não está normal aos raios solares, os cilindros ficam em diferentes temperaturas, uma vez que um deles capta mais energia que o outro, o que produz uma força hidráulica que corrige a orientação do painel até que os cilindros atinjam o equilíbrio térmico. Esse método é proposto para sistemas de baixa concentração, na ordem de 10 vezes.

Já os ativos utilizam motores para orientação do painel fotovoltaico. Alguns possuem um sistema de controle baseado na posição teórica do Sol de acordo com equações astronômicas e de tempo, sendo feito em malha aberta. Requerem um preciso sinal de relógio como entrada do sistema de controle para que a posição do painel seja ajustada de acordo com a posição estimada do Sol (MCEVOY, MARKVART e CASTAÑER, 2012).

Os ativos podem também ser baseados na detecção direta da posição do Sol. Nesse caso, é feito em malha fechada, empregando sensores de luz, que geram um sinal nulo quando diretamente posicionados em direção ao Sol e um sinal de erro proporcional no caso de desorientação. Um circuito servomecânico aciona o motor para corrigir a orientação do painel continuamente ou por passos discretos (MARKVART; CASTAÑER, 2003).

O uso de apenas um método de controle pode gerar erros de posicionamento. Nos sistemas que utilizam malha aberta, o posicionamento incorreto e uma instalação mal feita podem reduzir a precisão do rastreamento. Para os de malha fechada, pode haver desorientação do painel quando o sensor de luz estiver sombreado durante a operação. Com o intuito de minimizar erros, alguns sistemas atuais empregam um controle híbrido, que utilizam algoritmos baseados no movimento aparente do Sol e sensores de luz (SAYIGH, 2012).

Com a finalidade de aprimorar o rastreamento do Sol e reduzir custos eliminando componentes caros de ambos os métodos, é recomendado utilizar a saída elétrica do sistema fotovoltaico concentrado como realimentação do sistema de controle. Assim a unidade de controle passa a ser um sistema adaptativo, capaz de aprender o caminho solar, modificar valores das variáveis do circuito de controle e corrigir erros (MARKVART; CASTAÑER, 2003).

### **3.1 Células de Múltiplas Junções**

Os custos e as eficiências relacionadas aos módulos fotovoltaicos têm sido duas

barreiras para o desenvolvimento do mercado fotovoltaico mundial. Geralmente, há uma relação direta entre o aumento da eficiência e do custo de uma célula fotovoltaica. Dessa forma, o aumento no custo de fabricação das células devido ao emprego de materiais mais caros pode levar a um custo por unidade de potência não muito diferente ao das tecnologias convencionais, se a eficiência aumentar na mesma proporção do custo (SAYIGH, 2012).

No que diz respeito à operação de células fotovoltaicas sob concentração dos raios solares, podem ser listadas duas principais vantagens. Uma delas é que a concentração permite que células menores produzam a mesma quantidade de energia que um sistema convencional, sendo aceitável ter um maior custo de produção do que as células convencionais. A outra é que a concentração está diretamente relacionada à eficiência da célula, tendendo a ser maior quanto maior for o fator de concentração (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

Para o aproveitamento dessas vantagens, entretanto, alguns obstáculos devem ser superados, como a necessidade de rastreamento com uso de concentradores e a refrigeração das células, uma vez que o aumento da temperatura diminui a tensão de circuito aberto e, conseqüentemente, a potência de saída. Na figura 2.6 pode ser observado um exemplo de concentração óptica dos raios solares em células fotovoltaicas de elevada eficiência.



Figura 2.6 – Concentração da luz solar em células de alta eficiência.

Fonte: (HÄBERLIN, 2012).

Na figura 2.7, é mostrada a evolução da eficiência das células ao longo de três décadas, podendo ser verificado o aumento na eficiência de uma célula de junção simples de GaAs de 22 % em 1980 para uma célula de tripla junção com concentração de 42,5 % em 2010 (SAYIGH, 2012).

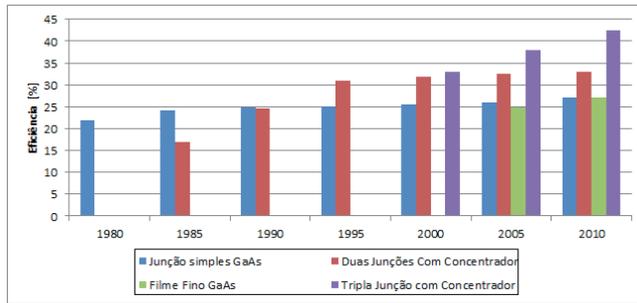


Figura 2.7 – Influência do número de junções na eficiência de uma célula fotovoltaica.

Fonte: Adaptado de (SAYIGH, 2012).

No modelo de funcionamento de células convencionais, fótons com energia maior que a banda proibida tem o seu excesso de energia perdido na forma de calor, enquanto fótons com energia menor que a banda proibida não são absorvidos e, portanto, toda sua energia é desperdiçada (LUQUE; HEGEDUS, 2011). Essa é uma das limitações fundamentais para o aumento da eficiência das células fotovoltaicas convencionais de junção simples e um obstáculo significativo para o seu desenvolvimento.

O conceito para se alcançar elevadas eficiências está fundamentado no empilhamento de diferentes tipos de materiais, geralmente elementos das famílias 3A e 5A da tabela periódica, formando uma célula fotovoltaica de múltiplas junções com alguns micrômetros de espessura. Cada junção está disposta de tal forma que a subcélula superior possui uma banda de energia maior que a da imediatamente inferior, como exemplificado na figura 2.8. Sendo assim, cada subcélula absorve o espectro da luz solar mais próximo à sua banda de energia, convertendo fótons de diferentes energias em energia elétrica (MCEVOY, MARKVART e CASTAÑER, 2012).

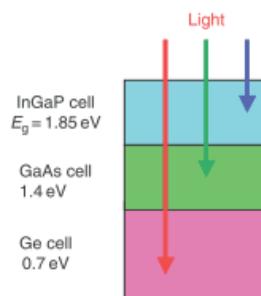


Figura 2.8 – Esquema de uma célula fotovoltaica de múltipla junção.

Fonte: (SAYIGH, 2012).

Os fótons com maiores energias são absorvidos nas camadas superiores. Os que possuem energia menor que a da banda de energia das camadas superiores atravessam o material semiconductor e podem ser absorvidos pelas camadas inferiores. Assim, a radiação solar é dividida em diversas regiões espectrais, sendo cada uma delas convertida em energia elétrica por uma célula que possui banda de energia correspondente a essa região. Isso permite um eficiente aproveitamento do espectro

solar, além de reduzir as perdas térmicas. Na figura 2.9 é mostrada uma comparação entre o aproveitamento do espectro solar por uma célula de junção única de silício e por uma de múltiplas junções.

As células de múltiplas junções têm potencial de atingir mais de 50 % de eficiência, e, portanto, podem ser consideradas promissoras para aplicações espaciais e terrestres, devido à sua maior resposta espectral quando comparadas às células tradicionais, conforme observado na figura 2.9. Inicialmente, foram propostas por Jackson, em 1953, e por Wolf, em 1960, atingindo eficiências maiores do que 40 % desde o ano de 2006 (SAYIGH, 2012).

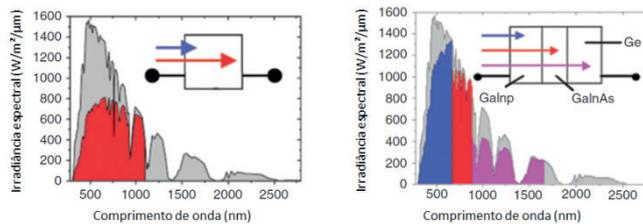


Figura 2.9 – Comparação de resposta espectral de uma célula de silício convencional e uma de múltiplas junções.

Fonte: (SAYIGH, 2012).

Baseado na resposta espectral, o limite teórico de eficiência para células de silício é de 31 %, enquanto células de múltiplas junções podem alcançar 86% de eficiência, o que permite a redução do tamanho da célula para cerca de 1 cm<sup>2</sup> ou até mesmo 1 mm<sup>2</sup>, como pode ser observado na figura 2.10 (SAYIGH, 2012).

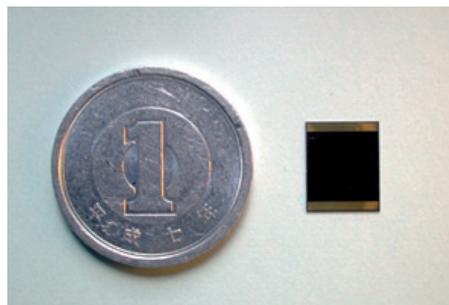


Figura 2.10 – Comparação de tamanho entre uma moeda e uma célula fotovoltaica de múltiplas junções.

Fonte: (DAIDO STEEL, 2014).

Em aplicações com concentração, recomenda-se o uso de células de alta eficiência. Esses sistemas possuem fator de concentração de mais de 350, podendo chegar ordem de 1.000 em alguns casos (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

### 3.2 Lentes

O projeto de elementos ópticos que atendam aos requisitos exigidos pelos sistemas fotovoltaicos de alta concentração é considerado um ponto fundamental para o desenvolvimento e estabelecimento da tecnologia. Tradicionalmente, as lentes de Fresnel têm sido as mais utilizadas em diversas aplicações no mundo, seja pelo custo reduzido, pela facilidade de projeto ou pela simplicidade de fabricação (SAYIGH, 2012).

As lentes concentradoras, fundamentadas nos princípios físicos da refração, possuem uma característica chamada de ângulo de aceitação, que se refere ao ângulo de tolerância em que a lente ainda consegue captar os raios solares e concentrá-los em uma determinada região. Fisicamente, o ângulo de aceitação e a concentração são grandezas opostas. Para melhorar o ângulo de aceitação de um sistema com concentração, sugere-se utilizar um elemento secundário, como um vidro ou um prisma, os quais proporcionam uma melhor captação e distribuição da luz na célula (SAYIGH, 2012).

O fator de concentração é definido como a razão geométrica entre a área da lente primária e da área ativa da célula fotovoltaica, que é a região projetada para ser iluminada. Outra medida de concentração é a intensidade de concentração solar ou sóis, definida como a razão entre a irradiância média focada na área ativa da célula e  $1.000 \text{ W/m}^2$  (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

A lente de Fresnel utilizada em sistemas fotovoltaicos concentrados é um dispositivo coletor refrativo com uma baixa razão entre a distância focal e o diâmetro da lente. O conceito dessa lente consiste em projetar a forma da lente convexa convencional, recortando uma lente plano-convexa em determinadas regiões, criando elementos descontínuos, de forma a se obter um perfil delgado, cuja seção transversal pode ser observada na figura 2.11. Assim, a lente de Fresnel utiliza menos material que a lente convexa convencional, a qual tende a ser mais espessa e pesada (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

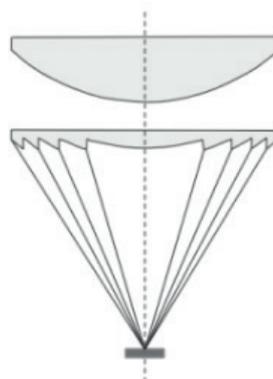


Figura 2.11 – Comparação entre uma lente plano-convexa e uma de Fresnel.

Fonte: (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

Segundo (LUQUE; HEGEDUS, 2011), as lentes de Fresnel podem ser classificadas como ponto-foco e foco linear. As do primeiro tipo têm simetria circular em relação ao seu eixo, concentrando a luz em um ponto focal. Assim, deve ser utilizada uma lente para cada célula. Podem ser planas ou em forma de cúpula, como mostrado na figura 2.12.

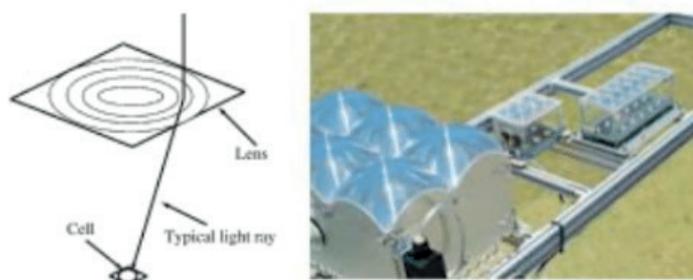


Figura 2.12 – Lente do tipo ponto-foco plana e em forma de cúpula.

Fonte: (LUQUE; HEGEDUS, 2011) e (HÄBERLIN, 2012).

Já as lentes do tipo foco linear possuem uma seção transversal constante ao longo do eixo, concentrando a luz em uma série de células. Podem ter formatos planos ou curvos, conforme mostrado na figura 2.13.

Uma alternativa ao emprego de lentes é o uso de espelhos, que são baseados nos princípios físicos da reflexão. Como é de conhecimento, uma superfície reflexiva em forma de parábola concentra todo raio luminoso paralelo ao seu eixo no ponto focal da parábola. Assim como as lentes, as parábolas têm as configurações ponto-foco, quando o espelho é formado pela rotação de uma parábola em torno do seu eixo criando um paraboloide, e foco linear, quando o espelho é formado pela translação perpendicular da parábola em relação ao seu eixo, formando um cilindro parabólico, conforme pode ser observado na figura 2.14. Os cilindros parabólicos concentram os raios solares em uma série de células fotovoltaicas, ao passo em que os paraboloides são empregados individualmente para cada célula (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

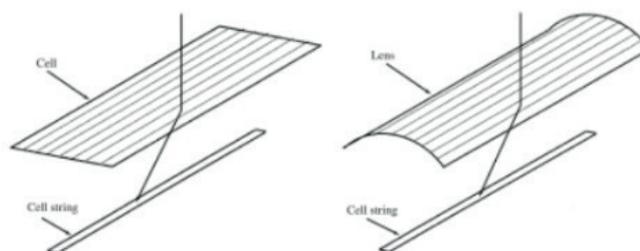


Figura 2.13 – Lente do tipo foco linear plana e curva.

Fonte: (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

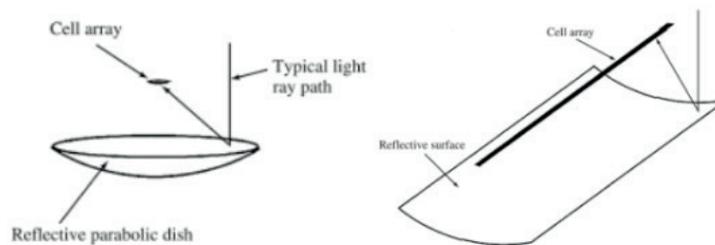


Figura 2.14 – Configurações de concentradores reflexivos em forma de parabolóide e de cilindro parabólico.

Fonte: (LUQUE; HEGEDUS, 2011).

## PERSPECTIVAS DE DESEMPENHO DO SISTEMA HCPV DO CTGAS-ER

Conforme visto na seção 2, os sistemas fotovoltaicos de alta concentração baseiam-se no princípio de concentração da radiação solar em células fotovoltaicas de alta eficiência por meio de dispositivos ópticos. Esses sistemas são formados basicamente por quatro elementos: módulos fotovoltaicos de alta concentração, estrutura de rastreamento em dois eixos, conversor CC/CA (inversor) e sistema de aquisição de dados e controle.

Por questões de simplificação, daqui em diante, será utilizada a seguinte terminologia:

- Gerador HCPV: conjunto formado pela estrutura mecânica de suporte e rastreamento em dois eixos, módulos fotovoltaicos de alta concentração e inversor;

Sistema fotovoltaico HCPV: conjunto de geradores HCPV e sistema de aquisição de dados e controle.

O foco principal do projeto de P&D mencionado é avaliar tecnicamente o desempenho dos geradores HCPV. Será apresentada uma visão geral do local de instalação do sistema, seus equipamentos e também uma simulação com a perspectiva de desempenho dos geradores HCPV instalados no CTGAS-ER.

### 3.1 Dados de Localização e Acesso

O sistema HCPV encontra-se no estacionamento frontal do prédio administrativo do CTGAS-ER, em Natal/RN, conforme visto na figura 3.1, nas coordenadas são  $-5,82^{\circ}\text{S}$  e  $-35,23^{\circ}\text{O}$ .



Figura 3.1 – Vista geral do estacionamento frontal do CTGAS-ER.

Fonte: Elaboração própria.

## 3.2 Equipamentos dos Geradores HCPV do CTGAS-ER

O sistema fotovoltaico está interconectado à rede elétrica interna do CTGAS-ER em baixa tensão. É composto por três geradores HCPV idênticos, cada um deles com potência nominal instalada de 10,08 kWp nas condições padronizadas de teste (*Standard Test Conditions* – STC).

### 3.2.1 Estruturas de rastreamento em dois eixos

As estruturas de rastreamento são do tipo pedestal com movimento em dois eixos. O sistema de controle é do tipo híbrido, que posiciona o painel de forma a manter a incidência dos raios solares normais ao plano dos módulos, independentemente do local de instalação. O azimute de atuação é de 360 °, o ângulo de atuação do eixo secundário varia entre 0 ° e 90 °, e a precisão do rastreamento é de 0,05°. Por ser montado num estacionamento, requisitou-se uma cota mínima entre o painel e o solo de 4 m, como visto na figura 3.2.

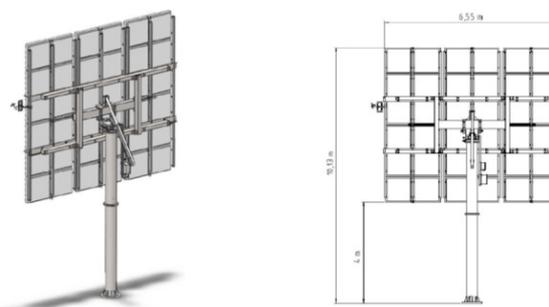


Figura 3.2 – Estruturas de rastreamento em dois eixos.

Fonte: (BSQ SOLAR, 2014).

### 3.2.2 Módulos HCPV

Em cada rastreador, são utilizados 36 módulos HCPV, como o da figura 3.3, de 280 Wp, eficiência de 28 %, área quadrada de 1 m<sup>2</sup>, fator de concentração de 820 e refrigeração passiva. A potência de cada rastreador é de 10,08 kWp e, portanto, o sistema HCPV do CTGAS-ER tem 30,24 kWp.



Figura 3.3 – Módulo HCPV de 280 Wp.

Fonte: (DAIDO STEEL, 2014).

### 3.2.3 Inversores

Cada inversor trifásico, visto na figura 3.4, possui tensão nominal de saída de 380 V, frequência nominal de 60 Hz, sem transformador interno, grau de proteção IP 65, eficiência máxima de 98,1 %, distorção harmônica total de correntes menor do que 3 %, fator de potência ajustável entre 0,8 capacitivo e 0,8 indutivo, e também dois seguidores do ponto de máxima potência (MPPT).



Figura 3.4 - Inversor de 10 kW.

Fonte: (SMA, 2014).

### 3.3 Estação Meteorológica

Para fins científicos, instalou-se uma estação meteorológica, como a mostrada na figura 3.5, a qual realiza medições em 1 Hz das irradiâncias global e difusa no plano horizontal, direta normal e de onda longa; velocidade e direção do vento, temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica e precipitação.



Figura 3.5 – Estação meteorológica.

Fonte: Elaboração própria.

## 4 | SIMULAÇÃO DOS GERADORES HCPV DO CTGAS-ER

Nas simulações dos geradores HCPV utilizou-se a plataforma de simulação PVsyst V6.19 (PVSYST, 2014). As séries fotovoltaicas possuem 6 módulos, resultando num

total de 6 séries por rastreador, cujo esquema de ligação ao inversor é apresentado na figura 4.1 (a). Os geradores HCPV, vistos na figura 4.1 (b), estão dispostos linearmente e afastados 30 m entre si. Não foram consideradas restrições de perdas elétricas por sombreamento de objetos próximos, sendo a linha de horizonte considerada livre de obstáculos.

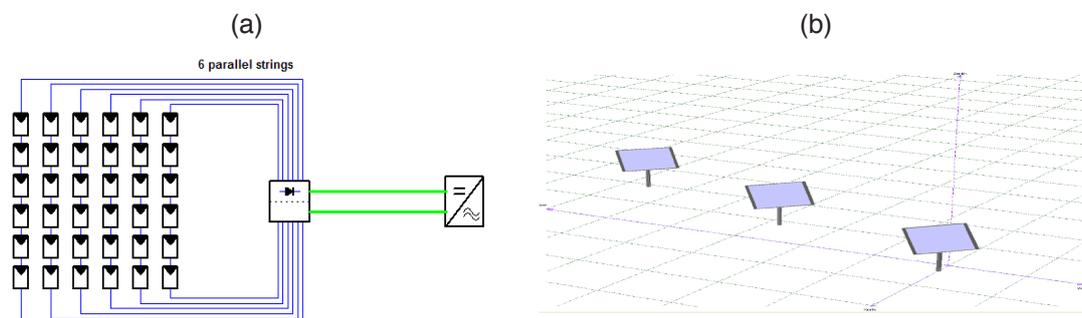


Figura 4.1 – Configuração do arranjo: (a) elétrica e (b) física.

Fonte: (PVSYST, 2014).

#### 4.1 Séries de irradiação e temperatura ambiente de Natal/RN

A série de irradiação global horizontal foi obtida da rede SONDA (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS), e foi integralizada em intervalos horários para ser utilizada no *software*. O período escolhido foi de maio de 2011 a abril de 2012. Por suspeita de falta de manutenção do dispositivo de sombreamento do piranômetro, optou-se pela geração automática da série de difusa com o Pvsyst, pela correlação de Erbs (ERBS, KLEIN e DUFFIE, 1982).

Mês	Global [kWh/m <sup>2</sup> ]	Difusa [kWh/m <sup>2</sup> ]	Temperatura [°C]
Janeiro	201,1	76,01	27,10
Fevereiro	179,0	69,30	27,15
Março	199,2	64,13	26,80
Abril	181,0	62,04	26,30
Maio	136,0	66,74	25,70
Junho	129,2	60,56	24,85
Julho	141,9	65,81	24,25
Agosto	172,7	61,15	24,30
Setembro	196,9	63,24	25,15
Outubro	208,6	68,40	26,10
Novembro	205,5	66,99	26,40
Dezembro	212,5	68,52	26,90
<b>Anual</b>	<b>2.163,6</b>	<b>792,89</b>	<b>25,92</b>

Tabela 4.1 – Irradiações e temperatura ambiente para Natal/RN.

Fonte: (PVSYST, 2014).

A série horária de temperatura ambiente foi obtida através de metodologia

desenvolvida pela Petrobras, utilizando os valores médios, mínimos e máximos, das Normais Climatológicas do Brasil 1961-1960, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA). Os valores médios mensais para as séries são apresentados na tabela 4.1.

## 5 | RESULTADOS

Na figura 4.2 é apresentado um esquema para um rastreador, indicando os pontos em que são calculadas as energias apresentadas na tabela 4.2.

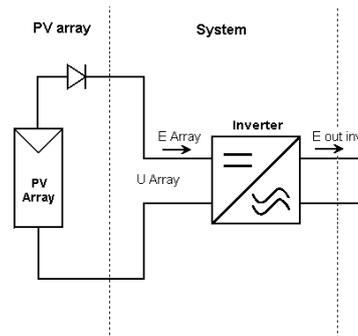


Figura 4.2 - Esquema do gerador HCPV.

Fonte: (PVSYST, 2014).

Mês	Global Incidente [kWh/m <sup>2</sup> ]	Direta Incidente [kWh/m <sup>2</sup> ]	Energia Painéis [kWh]	Energia Inversores [kWh]	FC [%]
Janeiro	251,4	161,5	4.908	3.863	17,2
Fevereiro	215,6	136,8	4.155	3.263	16,1
Março	249,3	173,3	5.266	4.132	18,4
Abril	231,7	157,1	4.775	3.765	17,3
Mai	171,9	96,9	2.943	2.325	10,3
Junho	171,7	101,5	3.083	2.445	11,2
Julho	187,3	111,3	3.381	2.693	12,0
Agosto	226,8	153,4	4.661	3.710	16,5
Setembro	249,3	172,3	5.237	4.167	19,1
Outubro	260,9	178,6	5.428	4.290	19,1
Novembro	265,5	182,4	5.543	4.382	20,1
Dezembro	273,2	188,1	5.717	4.497	20,0
<b>Anual</b>	<b>2.754,6</b>	<b>1.813,2</b>	<b>55.097</b>	<b>43.532</b>	<b>16,4</b>

Tabela 4.2 – Valores médios mensais da energia gerada pelos geradores HCPV.

Fonte: (PVSYST, 2014).

Observa-se na tabela 4.2 que a produção anual de energia estimada é de aproximadamente 43,5 MWh, tendo probabilidade acumulada de ocorrência de 75 %. O fator de capacidade anual médio correspondente é de 16,4 %. Trata-se de um valor baixo quando comparado com os fatores de capacidade de geradores

HCPV instalados em outras localidades, cujos valores, segundo (ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, 2013), são da ordem de 25 % a 28 %. Cabe aqui uma observação importante: embora o recurso solar da cidade de Natal/RN seja muito bom, aproximadamente 34 % da energia solar que incide no plano dos módulos (com o rastreamento em dois eixos) não pode ser concentrada pois é composta de irradiação difusa. No período de abril a julho, os valores do fator de capacidade são afetados drasticamente pela perda de geração por excesso de nebulosidade (aumento da irradiação difusa).

## 6 | CONCLUSÕES

Os sistemas fotovoltaicos de alta concentração são uma alternativa aos sistemas convencionais para produção de energia elétrica. Empregam elementos ópticos para captar e concentrar os raios solares em células de múltiplas junções de altas eficiências, utilizando menos material fotovoltaico para produzir uma mesma quantidade de energia que os convencionais.

Um dos principais objetivos dessa tecnologia é a redução do custo da energia produzida, pois parte da área que seria referente às células é substituída pelo material óptico, que tem um custo inferior. Entretanto, para que esse sistema opere satisfatoriamente, é necessário utilizar um rastreamento em dois eixos de forma a manter os módulos constantemente perpendiculares aos raios solares, uma vez que essa é uma exigência dos elementos ópticos utilizados para que a concentração ocorra no foco, onde as células estão localizadas.

Assim, é de fundamental importância o conhecimento do recurso solar do local onde o sistema HCPV será instalado, pois há basicamente o aproveitamento da componente direta da irradiação solar. Nesse âmbito, os instrumentos de medição, como piranômetro e pireliômetro desempenham uma função essencial no levantamento dos dados solarimétricos e, juntamente com o conhecimento técnico adquirido sobre essa tecnologia, podem auxiliar na identificação de oportunidades de investimento na área de energias renováveis.

O projeto de P&D proposto consistiu na instalação de um sistema HCPV de 30,24 kWp, que usa células de múltiplas junções de alta eficiência. O sistema está ligado à rede elétrica interna do CTGAS-ER, em Natal/RN.

Com o objetivo de avaliar tecnicamente o desempenho dos geradores HCPV realizaram-se previamente simulações computacionais com a finalidade de se estimar a produção anual de energia do sistema HCPV instalado.

Como resultado de simulação, estima-se que a geração anual média é de 43,5 MWh, correspondendo a um fator de capacidade anual de 16,4 %. A máxima geração mensal estimada foi de 4.497 kWh em dezembro, com um fator de capacidade de 20,0 %, e a mínima de 2.325 kWh em maio, com um fator de capacidade de 10,3 %. São dois os principais motivos para o baixo fator de capacidade em relação àquele

esperado para essa tecnologia, ambos relacionados ao recurso solar: o primeiro deles é inerente ao insumo energético, a radiação solar, que possui variação cíclica diária; o segundo está relacionado ao fato de que embora a cidade de Natal/RN apresente bons níveis de radiação anual, a fração da radiação solar que pode ser concentrada (a radiação direta) para o local escolhido é de apenas 65 % pois há muita nebulosidade e, conseqüentemente, bastante radiação difusa (que não pode ser concentrada).

Apesar de a estimativa da geração anual de energia não ser elevada, esse projeto de P&D se mostra importante para gerar informações no que diz respeito ao funcionamento da tecnologia HCPV, agregar conhecimento técnico sobre suas características construtivas e operacionais, além de estimular a avaliação do desempenho do sistema HCPV para outras localidades do Brasil.

## REFERÊNCIAS

BSQ SOLAR. BSQ Solar, 2014. Disponível em: <<http://www.bsqsolar.com/>>.

DAIDO STEEL. Daido Steel, 2014. Disponível em: <<http://www.daido.co.jp/>>.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Concentrating photovoltaics: an emerging competitor for the utility energy market.** Palo Alto: EPRI, 2010.

ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Renewable Energy Technology Guide: 2012.** 1023993. Palo Alto: EPRI, 2013.

ERBS, D. G.; KLEIN, S. A.; DUFFIE, J. A. Estimation of Diffuse Radiation Fraction for Hourly, Daily and Monthly - Average Global Radiation. **Solar Energy**, v. 28, p. 293 - 302, 1982.

HÄBERLIN, H. **Photovoltaics: system design and practice.** Chichester: John Wiley & Sons, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. INMET. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br>>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. INPE. Disponível em: <<http://sonda.ccst.inpe.br>>.

LUQUE, A.; HEGEDUS, S. **Handbook of photovoltaic science and engineering.** Chichester: John Wiley & Sons, 2011.

MARKVART, T.; CASTAÑER, L. **Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications.** Oxford: Elsevier, 2003.

MCEVOY, A.; MARKVART, T.; CASTAÑER, L. **Practical handbook of photovoltaics: fundamentals and applications.** Waltham: Elsevier, 2012.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CRESESB, 2014.

PVSYST. PVsyst Photovoltaic Software, 2014. Disponível em: <<http://www.pvsyst.com/>>.

SAYIGH, A. **Comprehensive renewable energy.** Oxford: Elsevier, 2012.

SMA. SMA Solar Technology, 2014. Disponível em: <<http://www.sma.de/>>.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-7247-086-5



9 788572 470865